

VAJDA GYÖRGY

ENERGIAELLÁTÁS MA ÉS HOLNAP

MAGYARORSZÁG AZ EZREDFORDULÓN



Uajda György
Energiaellátás ma és holnap

Uajda György
Energiaellátás ma és holnap

Erdélyi 2004
MTA Társadalomtudományi Osztály

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai tanulmányok a Magyar Tudományos Akadémián

Sorozatszerkesztő
Glatz Ferenc

Olvasószerkesztő
Balogh Margit

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai tanulmányok a Magyar Tudományos Akadémián

Uajda György

Energiaellátás ma és holnap

Budapest 2004

MTA Társadalomkutató Központ

A kötet megjelenését
a 2003. évi XC. törvény alapján
a Magyar Villamos Művek Rt.
támogatta

© Vajda György

ISBN 963 508 424 2
ISSN 1419-3507

Kiadja az
MTA Társadalomkutató Központ
Kiadásért felel: Glatz Ferenc, a Nemzeti Stratégiai Kutatási Program elnöke
Borító: Abinéri Gábor
Kézirat-előkészítés: Gemini 42. Bt.
Szedés, tördelés: AbiPrint Bt., Budapest
Nyomdai munkálatok: Folpress Nyomdaipari Kft.
Felelős vezető: Várlaki Imre
Megjelent 23,9 A/5 ív terjedelemben

Tartalom

Bevezetés	7
Energiahordozók	11
Energiafajták 11 • Energiaszerkezet 16 • Energiabázis 22 • Energiaátvitel 28	
Tüzelőanyagok	33
Tüzelőanyagok égése 34 • Szilárd tüzelőanyagok 51 • Folyékony tüzelőanyagok 88 • Gáznemű tüzelőanyagok 132 • Exoterm reakciók 167 • Mi várható a jövőben? 170	
Megújuló energiaforrások	177
Napenergia 180 • Szélenergia 205 • Vízenergia 216 • Kilátások 234	
Nukleáris energia	237
Az atomenergetika megítélése 237 • Az atommag, mint energiaforrás 240 • A hasadóanyag-potenciál 250 • Üzemanyagciklus 254 • A nukleáris potenciál bővítése 261 • Az atomenergia hasznosítása 266 • A környezet terhelése 277 • Nukleáris biztonság 281 • A hulladékok sorsa 286 • Kapcsolat a nukleáris fegyverekkel 293 • Gazdasági versenyképesség 294 • Az atomenergia kilátásai 302	
Hőhordozók	307
Hőhordozók tulajdonságai 307 • Szilárd hőhordozók 311 • Folyékony hőhordozók 314 • Gáznemű hőhordozók 321 • Geotermikus energia 328 • Hőszivattyú 339	
Villamos energia	341
A villamosság jellemzői 343 • Villamosenergia-ellátás 353 • A villamosenergia-rendszerek működése 360	
Függelék. Aktinidák bomlási sorai	377
Irodalom	379
Summary	383
A kötet szerzője	387

Bevezetés

A legtöbb emberi szükséglet kielégítéséhez energiát kell befektetni. A felhasznált energia jelentős hányadát az életfeltételek – ételkészítés, fűtés, világítás, tisztálkodás, ruhakarbantartás, hűtés – biztosítására használják. A mérsékelt égöv országában erre fordítják az energia 40-50%-át, ennek is legnagyobb részét a fűtés teszi ki. Az életfeltételek megteremtésén túlmenően az energiafelhasználás termékek előállítására és a különféle szolgáltatások biztosítására, gépek hajtására, anyagok átalakítására, közlekedésre, szállításra, információk átvitelére, audiovizuális eszközök működtetésére stb. szolgál.

Energiaszükségletük kielégítésére a fogyasztóknak rendszerint többféle lehetőségük van. A célszerű megoldás eldöntéséhez egyrészt a szolgáltatáshoz legmegfelelőbb energiahordozót, másrészt a feladat ellátására legalkalmasabb technológiát kell kiválasztaniuk. A lehetőségek bőségesek, például otthonunk fűtése megoldható egyedi szén-, olaj-, gáz-, fa- vagy biomassza-tüzelésű kályhával, villamos hőfejlesztéssel, de megvalósítható sokféle tüzelőanyagot felhasználó etázs- vagy központi fűtéssel, és számításba jöhet a távhőszolgáltatás, de kialakítható és alkalmazható fűtési célra a napenergiás vagy hőszivattyús rendszer is. Egy üzem energiaszükségei is hasonlóan többféleképpen megoldható, mint például vásárolt energiahordozókkal, az üzemben keletkező hulladékenergiákkal, különféle energiahordozókra támaszkodva saját energiaközpontból vagy erőműből biztosítva azt.

Az energiaellátás módjának megválasztását gazdasági és műszaki szempontok határozzák meg, az életkörülményeket befolyásoló kérdésekben szerepet kap a komfort iránti igény is. Többnyire az energiaszolgáltatás költsége elsődleges szempont, de a megoldáshoz, a beruházáshoz szükséges tőkeszükséglet mértékét is mérlegelni kell. A leggazdaságosabb megoldást nemritkán azért vetik el, mert a berendezések létesítése túlságosan sokba kerül, és megtérülése hosszú időbe telik. A fejlett országokban a fogyasztók egyidejűleg többféle energiahordozót (tüzelőanyagot, üzemanyagot, villanyt, gázt stb.) használnak, nő a vezetékes energiaellátási módok – a lakosságnál villany, gáz, távhő, a nagyfogyasztóknál ezeken túlmenően folyékony szénhidrogének, és helyenként hidrogén – szerepe. A vezetékes ellátás népszerűségében az előnyös műszaki tulajdonságaik mellett szerepet játszik kényelmes és könnyű kezelhetőségük is. Az emberiségnek viszont közel harmada olyan térségekben él, ahol nem létezik vezetékes energiaellátó rendszer, és ahova energiahordozókat árusító kereskedelmi hálózatok sem jutnak el.

Mivel az energiaellátás létesítményei költségesek és élettartamuk nagy, időtálló megoldásokra van szükség. Ez a követelmény nemcsak a fizikai élettartamra vonatkozik, hanem a gazdasági hatékonyságra és a műszaki színvonalra is. A döntésekhez ezért sokoldalú és előretekintő vizsgálatra van szükség, mérlegelve a választott megoldás időtállóságát, figyelembe véve az energiabeszerezési lehetőségek, az árak, valamint a működési feltételek lehetséges változását. Ma már az is magától értetődő, hogy csak a környezetvédelem szigorodó követelményeit kielégítő megoldások jöhetnek számításba. A viszonyokat befolyásoló külső körülmények megítélésében az előrelátás nagy körütekintést és tapasztalatot igényel, de még a leggondosabb vizsgálat sem zárja ki az esetleges váratlan gazdasági vagy műszaki fejleményeket, amelyek megingathatják a korábbi döntések érvényességét: lásd az 1970-es évek olajkrízise, a csernobili katasztrófa, vagy a KGST széthullása.

Az energiagazdálkodás legnagyobb részt a jelen és a közeljövő feladataival foglalkozik, működését alapvetően a piaci viszonyok szabják meg. Stratégiai jelentősége és a folyamatok nagy időállandója miatt az energiaellátás alakulásában nem lehet kizárólag a piac szabályozó erejére hagyatkozni. Ezért elkerülhetetlen az állami szerepvállalás, mindenekelőtt az energiapolitika kialakításában, és az abból eredő követelményeket közvetítő jogi és gazdasági szabályozás létrehozásában. Az energiagazdálkodás és az annak mozgásterét kijelölő energiapolitika kapcsolata a taktika és stratégia viszonyához hasonlítható. Az energiapolitikának hosszú távra előretekintve kell megrajzolni az energiaellátás kilátásait, követelményeit és lehetőségeit, számba véve a társadalmi érdekek érvényesítésének lehetőségeit, ugyanakkor megteremtve ennek feltételeit is. Az állam szerepét elsősorban a jogi, gazdasági és műszaki körülmények bonyolult kölcsönhatásait összehangoló jogszabályok alkotásával, valamint a követelmények teljesülését ellenőrző hatóságok működtetésével tudja ellátni. Néha közvetlen beavatkozásra is szükség lehet, amikor a gazdasági körülmények nem kedveznek az energiapolitikai célok érvényesülésének. Például állami preferenciákkal ösztönzik az energiahatékonyságot növelő műszaki lépéseket. Más kérdésekben is szükségessé válhat állami beavatkozás, így a megújuló energiák hasznosításának ösztönzésére, az ellátásbiztonság növelésére, a környezetvédelem érdekében, az energiaiimport relációs politikájának terelésére, vagy a készletezés mértékével kapcsolatban. Az ilyen kérdésekben az Európai Unió jogszabályaival összhangban kell eljárni.

Magyarországon különösen fontos egy átgondolt energiapolitika kialakítása, mivel energiaszükségletünk közel 70%-át importból fedezzük. Energiahelyzetünk ezért erősen függ a külvilág helyzetétől. A világ gazdaság és a világpolitika váratlan fejleményei az elmúlt fél évszázadban szinte évtizedenként kényszerítették ki a magyar energiapolitika radikális módosítását, ami szükségszerűen megváltoztatta az energiagazdálkodás mozgásterét is, nemegyszer jelentős társadalmi veszteségek árán.

Az energiagazdálkodás alapvető rendeltetése annak biztosítása, hogy a fogyasztók energiaszükségletét mindig a kívánt mértékben lehessen kielégíteni mind minőségében, mind összetételében. Mindezek teljesítése sokféle szálon és érdekekkel fonódik össze. A fogyasztók számára az a legfontosabb, hogy energiafelhasználásuk minél kevesebbe kerüljön. Az ország érdeke a nemzeti vagyon részét képező ásványi energiahordozókkal a természeti erőforrásokkal való optimális gazdálkodás, továbbá, hogy az energiaimport mértéke ne veszélyeztesse az ellátásbiztonságot, de a külkereskedelmi, illetve a fizetési mérleg egyensúlyát sem. Az energiaellátást biztosító vállalatok számára a stabil és nyereséges piac a legfontosabb. E gyakran szétartó érdekek összehangolása szintén energiapolitikai feladat, bár a megoldása nem mindig sikeres. Ezt tanúsítják az energetika kérdései körül gyakran kialakuló közéleti viharok, amelyek nemcsak a médiában és a politika színterén tapasztalhatók, hanem társadalmi megmozdulásokban is jelentkeznek.

Az energiagazdálkodás sok szakterület ismeretanyagára támaszkodó, nagyon összetett műszaki és gazdasági tevékenység. Több tudományág – fizika, kémia, geológia, bányászat, gépészet, elektrotechnika, biológia, meteorológia, közgazdaság, jog, szociológia – ismereteit kell ötvözni a feladatok megoldásához. Ennek eredője azonban nem egyszerűen a szaktudományok ismereteinek az összege, hanem egy minőségileg új halmaz, ami nemegyszer vissza is hat az egyes szaktudományok fejlődésére. Az energetika még a szociológia vagy más társadalomtudományok számára is ad újszerű, megoldandó feladatokat. Meglepő példa, hogy az atomenergetika olyan új problémák elé állította a jogtudományt (kárfelölősség, radioaktív hulladékok elhelyezése, hozzáférés a hasadóanyagokhoz, nemzetközi megállapodások stb.), amiknek a megoldására a jogászok új nemzetközi társaságot alakítottak.

Bár ez ritkán tudatos, energiagazdálkodással tulajdonképpen mindenki foglalkozik. Lakásunk fűtésének módja és mértéke, a gépkocsi üzemeltetése és vezetési stílusa, a szabad idő eltöltésének módja, háztartási gépeink megvásárlása, a lakás világításának a megoldása, és sok egyéb személyes döntésünk valójában energiagazdálkodást is érintő elhatározásokat tartalmaz. Munkahelyünkön sem kizárólag a vezetői döntéseken múlik az energia ésszerű hasznosítása, ahhoz minden munkavállaló egyénenként is hozzájárulhat. Az energia racionális használata korunk egyik nagy kihívása, ami kihat az egyének egészségére, a környezet állapotára, a gazdaság fejlődésére, utódaink lehetőségeire, sőt a politikai viszonyokat is befolyásolja. A megoldás kollektív erőfeszítést kíván, mindehhez színvonalas ismeretterjesztésre van szükség, hogy mindenkiben kialakulhasson az energiatudatos szemlélet. Könyvem ezt a célt is szolgálni kívánja.

Jelen munka az energiahordozók szerepének megítéléséhez és a közöttük történő választáshoz kíván segítséget nyújtani, az energiaátalakítás technológiáinak az áttekintése egy következő kötet tárgya. A mennyiségek jellemzésé-

re a mértékegységek előtt az SI rendszer (Système International d'Unités, Nemzetközi Mértékegységrendszer) szabványos előtagjait¹ alkalmazom. Nagy volt a kísértés, hogy az ábraanyagot az elvi összefüggések szemléltetésén túlmenően megvalósított létesítményeket és készülékeket bemutató ábrákkal is kiegészítsem. Ettől azonban két okból is eltekintettem. Egyrészt korunk gyors műszaki fejlődése miatt a termékváltás nagyon gyors, s már a nyomdai átfutás ideje is elég ahhoz, hogy a bemutatottnál korszerűbb és hatékonyabb megoldás jelenjen meg a piacon. Másrészt így elkerülhettem azt a gyanút, hogy felvállaltam egyes vállalatok, azok termékeinek népszerűsítését vagy propagálását.

Jegyzetek

- 1 A leggyakrabban használt prefixumok: m (mili) = 10^{-3} , k (kilo) = 10^3 , M (mega) = 10^6 , G (giga) = 10^9 , T (tera) = 10^{12} , P (peta) = 10^{15} , E (exa) = 10^{18} , Z (zetta) = 10^{21} , Y (yotta) = 10^{24} .

Energiahordozók

Az energia megjelenítése, közvetítése többnyire valamilyen anyaghoz kötött, ezeket energiahordozóknak nevezzük. Az energiaellátási feladatokat energiahordozók segítségével látják el, amelyek köre széles: tüzelő-, hasadóanyagok, hőhordozók, hőerőgépek és vízgépek munkaközege, berendezések hűtőközege stb. Nem minden energiahordozó látható, pl. a szél energiahordozóját, a levegőt vagy a villamos energiát közvetítő töltéseket nem látjuk. Az elektromágneses sugárzások vákuumban is terjednek, de átalakításuk és hasznosításuk viszont már anyagokhoz kapcsolódik.

Az energiagazdálkodás a rendelkezésre álló energiahordozók optimális hasznosítására törekszik, ami a műszaki és gazdasági szempontok egyidejű mérlegelését követeli meg. Egyrészt ki kell választani a feladatok megoldására a műszakilag legalkalmasabb és gazdaságilag legelőnyösebb energiahordozót. Másrészt törekedni kell arra, hogy a kiválasztott energiahordozót a lehető legnagyobb gazdasági haszonnal és a lehető legkisebb energiavesztéssel hasznosítsák. E feladatot tovább bonyolítja, hogy a műszaki és a gazdasági optimum gyakran nem esik egybe, ilyenkor a tapasztalatokra és ítélőképességre alapuló kompromisszumra van szükség. A szubjektív elem azért sem nélkülözhető, mert az energetikában a legtöbb döntés hosszú időre szól, hiszen az alapvető létesítmények élettartama sok évtized, és a legfontosabb fogyasztóberendezések cseréje sem történik meg egy-két évtizednél hamarabb. Ilyen hosszú időre a piacnak nincs eligazító ereje, nem tudja megjósolni a gazdaságot alapvetően meghatározó paraméterek (például: világpiaci energiaár, kamatláb, diszkonttényező, infláció, a gazdasági növekedés üteme, tőkekínálat) jövőbeli alakulását, és az új műszaki lehetőségek előrejelzéséhez is kevés a kapaszkodó.

A társadalom energiaellátása során az energiahordozók hosszú utat tesznek meg a forrásoktól a fogyasztókig mind a földrajzi távolságok, mind a megjelenési formák tekintetében. Ennek sikere sok szervezet, sokféle szakma összehangolt együttműködésétől függ, hogy mindig és mindenütt rendelkezésünkre álljon az életvitelünkhöz és tevékenységeinkhez szükséges energia.

Energiafajták

A technika teszi lehetővé, hogy a természetben található energia egy részét az emberi szükségletek kielégítésére hasznosítsuk. A környezettel kölcsönha-

tásba kerülve az energia többféle módon nyilvánul meg, e hatások alapján megkülönböztetett megjelenési formák az energiafajták. A gyakorlati felhasználás szemszögéből mechanikai, hő, nukleáris, vegyi, villamos, akusztikai, fény és különféle egyéb sugárzási energiafajtákat különböztetnek meg. E felosztás ugyan célszerű, de a fizika által használt terminológia alapján nem szabatos, pl. az elektromágneses sugárzások sorában a hő-, fény-, röntgen-, mikrohullámú és ionizáló sugárzás, valamint a rádióhullámok csupán hullámhosszban térnek el egymástól, a hanghullámok pedig tulajdonképpen mechanikai rezgések. Az energiafajtákat nem lehet mindig élesen szétválasztani, mert egyszerre többféle hatás is érvényesülhet, egyidejűleg többféle energiafajta is megnyilvánulhat (például az égésnél hő és fény, a nagynyomású gőzben mechanikai energia és hő).

Az energiafajták egymásba átalakíthatók, minderre a tudomány időnként újabb és újabb lehetőségeket tár fel. Célszerű közvetlen és közvetett energiaátalakítási eljárásokat megkülönböztetni aszerint, hogy az egyik energiafajtából a másik valamilyen fizikai vagy kémiai hatás segítségével közvetlenül állítható-e elő, vagy pedig egynél több átalakítási eljárással más típusú energiafajták közbeeső előállításán keresztül lehet a végcélhoz eljutni. Az utóbbira a legismertebb példát a hőerőművek szolgáltatják: a tüzelőanyagok kémiai energiájából az égés során hő fejlődik, azzal gőzt fejlesztenek, ami a turbinában mechanikai munkát végez, és a megforgatott generátor az indukció révén villamos energiát fejleszt. Az 1. táblázat bemutatja a közvetlen átalakítási lehetőségek fontosabb, a technika jelenlegi szintjén megvalósítható módjait. A fizikailag bizonyított átalakítási eljárások egy részének a gyakorlati alkalmazása műszaki vagy gazdasági okokból nem jöhet számításba, ez teremti meg a közvetett átalakítási eljárások létjogosultságát.

Az energia megmaradásának törvényéből következik, hogy az átalakítások során energia nemvész el, legfeljebb tömeggé alakul át, ami viszont a gyakorlati alkalmazásoknál nemigen fordul elő. Fordítva igen, hiszen a nukleáris energiahasznosításnál tömeget alakítanak át energiává. Az átalakítások során azonban az energia egy része mindig olyan nemkívánatos formát ölt, amit nem tudunk hasznosítani, s ez gyakorlati szempontból veszteséget jelent. A veszteség – esetleg további energiaátalakulásokat követően – többnyire hő formájában távozik a környezetbe. Ugyancsak veszteséggel jár az energiaszállítás is.

Az energiahasznosítás során a fogyasztóknak a legnagyobb mennyiségben hőre van szükségük. A mérsékelt égő országokban a végső felhasználás 60-70%-a hő. Ennek mintegy a fele az életkörülmények megteremtésére szolgál, legnagyobb részét fűtésre, de számottevők az egyéb hőigények is (főzés, hűtés, használati melegvíz-készítés, ruhakarbantartás stb.). A hő másik felét technológiai célokra használják, alig akad olyan termelési mód, amelyhez ne lenne szükség több-kevesebb hőre. A hőmérséklet növelése gyorsítja a kémiai reakciókat, sőt számos vegyi és kohászati átalakulás csak magas hőmérsék-

Közvetlen energiaátalakítás fontosabb lehetőségei

	Mechanikai energia	Hőenergia	Villamos energia	Sugárzási energia	Kémiai energia	Nukleáris energia
mechanikai energiából	egyszerű gépek és hajtások, hidraulikus és pneumatikus gépek, vízturbina	sűrűlódás, kompressziós hűtőgép, hőszivattyú	dinamó, generátor (indukciós, elektrosztatikus, MHD, EGD), mikrofon, piezoelektromos hatás	tribo-, kristallo-, szonolumineszcencia, fékezési sugárzás	mechanikai hatás	részecskegyorsítók
hőből	hőerőgépek (gőzturбина, belső égésű motor, gázturbina), sugárhajtás	abszorpciós hűtőgép, hőtranszformátor	hőelem, elektroncső, termoelektromos áramforrás	hőszugárzás, izzólámpa, kristallo- és termolumineszcencia	endoterm reakciók	fúzió kiváltása
villamos energiából	villamos motor, rezgőkvarc, MHD szivattyú	ellenállásfűtés, indukciós-, dielektromos-, iv-hevítés, Peltier hatás	transzformátor, motorgenerátor, elektroncső, tranzisztor, egyen- és váltóirányító	gázkistűlések, elektrolumineszcencia, adóantenna, galvanolumineszcencia	elektrolízis, elektrodialízis, akkumulátor	részecskegyorsító
sugárzási energiából	fotonrakéta	abszorpció, infrasugárzó, mikrohullámú melegítés	fényelem, napelem, vevőantenna	fluoreszcencia, foszforeszcencia, foto-, röntgen-, radiolumineszcencia, lézer	fotoszintézis, fényképezés	magreakció, ionozás, gerjesztés, fúzió lézerrel, részecske-sugárral
kémiai energiából	izom, ozmózis, robbantás, sugárhajtómű, kémomechanikus hatás	exoterm kémiai reakciók, égés	galvánelem, akkumulátor, tüzelőanyag-cella	kemo-, biolumineszcencia	kémiai reakciók, tüzelőanyag-átalakítások	újrafeldolgozás, tenyésztés
nukleáris energiából	hasadás	atomreaktor, radioizotópos hőelem	izotópos áramforrás	ionizáló sugárzás	kötések módosítása besugárzással	újrafeldolgozás, tenyésztés

leten játszódik le. Hő szükséges a fémek kinyerésére az ércekből, a fémes félkész gyártmányok előállításához, a munkadarabok megmunkálásához és szövetszerkezetének módosításához. A nem fémes szerkezeti anyagok technológiáját is átszövik a termikus eljárások, a szilikátipari anyagok égetésétől és a szervesen vegyipari alapanyagok előállításától a szerves anyagok gyártásáig és megmunkálásáig. Több fizikai átalakulást is csak hőközléssel lehet előidézni (olvasztás, forralás, párolgás, izzítás, lágyítás, szárítás stb.). Az anyagok alakítása, formázása is gyakran csak azt melegítve vagy megolvasztva végezhető el. Nem elhanyagolható a mezőgazdaság, az élelmiszer- és könnyűipar hőhasznosítása sem (szárítás, erjesztés, forralás). Nem a végső felhasználás része az átalakító művek jelentős hőigénye, például hóból fejlesztik a villamos energia nagy részét, sok hő kell a kőolaj-feldolgozáshoz, és hőhasznosításon alapul a mechanikai munkát szolgáltató hőerőgépek működése is.

Viszonylag kevés hő nyerhető közvetlenül elsődleges energiaforrásokból (napsugárzásból, geotermikus energiából, a környezet hőjéből hőszivattyúval), a gyakorlatban hasznosított hő legnagyobb részét más energiahajtók átalakításával nyerik. A legáltalánosabb eljárás anyagok vegyi energiájának felhasználása exoterm reakciók révén. Az esetek legnagyobb részében ez tüzelőanyagok elégetését jelenti, a hő a lángban és a távozó füstgázban jelenik meg. Egyes technológiáknál (például a szilikátiparban) melegítésre közvetlenül az égéstermékeket hasznosítják a kemencékben, a füstgázzal azonban gyakran tisztább és könnyebben kezelhető hőhordozót (vizet, gőzt, gázt) fűtenek fel kazánokban, és azzal fedezik a hőigényeket. Nagy mennyiségű hő fejlődik atomreaktorokban a nukleáris láncreakció során, kis hőmennyiségek előállítására a radioaktív bomlás is alkalmas. Bizonyos feladatokhoz célszerű villamos energiából előállítani a hőt, ellenállásfűtés, indukciós hevítés, ívfűtés, dielektromos hevítés útján. Lehet hőt fejleszteni mechanikai munkával (súrlódás vagy munkaközeg komprimálása révén), koncentrált elektromágneses besugárzással (például lézerrel vagy mikrohullámmal), de más módokon is.

A fejlett országokban a végső hasznosítás 20-30%-át mechanikai munka jelenti. Legnagyobb része a közlekedés és szállítás igényeit fedezi, a többi gépek hajtására, anyagok megmunkálására és továbbítására szolgál. Ez az energiahajtó teszi lehetővé az élet minden területén a fizikai munka gépesítését. Csak kismértékben nyerik a mechanikai munkát elsődleges energiákból (szél, vízfolyások, tengerek mozgása). A gépeket és járműveket legnagyobb részben villamos vagy belső égésű motorok működtetik, helyhez kötött berendezéseket inkább az első, a helyhez nem kötötteket inkább a második hajtási mód jellemzi, de az átfedés jelentős. Az egyéb működtetési lehetőségek (súlyok, lendkerekek, rugók, hidraulikus rendszerek stb.) szerepe nem számottevő.

Az elektromágneses hullámok hasznosítása nagyon sokrétű, és az alkalmazás lehetősége állandóan bővül. A legnagyobb múltja a világításnak van, ebben a villamos energia kizárólagos szerephez jutott. A fényforrások hatásfoka

síralmasan alacsony, de a világítás energiafelhasználása az ország energiamelegének így is csupán 1-2%-át teszi ki. Az elektromágneses hullámok másik nagy hasznosítási területe az információtechnika. Nagyon kis mennyiségben az információ egyben energiát is tartalmaz, aminek összessége az információkorszakban nem jelentéktelen, de az érdemi energiavonzatot az információkat küldő és fogadó, valamint átalakító berendezések (például audiovizuális eszközök, számítógépek, telefonok, folyamatirányító rendszerek, műholdak) villamosenergia-felhasználása képviseli. Technológiai, terápiás és egyéb célokra is használnak különféle sugárzásokat (infravörös, ibolyántúli, lézer, mikrohullámú, röntgen). Energetikai célokra a természetes eredetű sugárzások közül a napsugárzást és a radioaktív anyagok ionizáló sugárzását hasznosítják, a mesterséges sugárzásokat ~ 1 mm hullámhosszig áramkörök elektromágneses rezgésével idézik elő, az alatt pedig leginkább a szelektív sugárzásra készített atomok lehetnek a forrásai.

A kémiai energia hasznosításának alapvető szerepe van, hiszen energiagazdálkodásunk legnagyobbbrészt a tüzelőanyagok eltüzelésén, valamint átalakításukon válik szekunder energiahordozókká. Ezen túlmenően nagyon sok technológiában hasznosítják a kémiai folyamatok reakcióhőjét fizikai és kémiai hatások előidézésére. A vegyi energiát kiaknázzák más energiafajták helyettesítésére is. Példa erre a mezőgazdaság kemizálása a mechanikai munka csökkentésére, a robbanóanyagok alkalmazása mechanikai munka helyett, a kémiai és mikrobiológiai eljárások alkalmazása szénhidrogének, fémek és más nyersanyagok kinyerésére, a vegyszerek használata felületek megmunkálására, kémiai szennyvíztisztítás és sok más eljárás. A kémiai áramforrások (galvánelem, akkumulátor, tüzelőanyag-cella) nélkülözhetetlenek járművekben és a helyhez nem kötött elektronikus eszközök működtetésére. A kémiai energiának személyes életvitelünkben is jelentős a szerepe, a mosó- és tisztítószeresok fizikai munka és hőenergia megtakarítását teszik lehetővé, a háztartásokban található sokféle vegyületnek (gyógyszerek, testápolók, rovarirtók, felületvédők stb.) is van közvetlen vagy közvetett energetikai hatása.

Eltelkintve a katonai alkalmazásoktól (robbanófejek, hajók meghajtása), a nukleáris energiából elsősorban hőt fejlesztenek, főleg villamos energia előállítására és kismértékben hőszolgáltatásra is. A radioaktív bomlás is hasznosítható kisebb áramforrások működtetésére, ezt leginkább az űreszközökben alkalmazzák.

Magát a villamos energiát közvetlenül csak kevés célra hasznosítják, ennek zömét néhány vegyipari (elektrolízis, elektroforézis) és fémtechnológiai (elektrokohászat, galvanizálás, fémporlasztás) alkalmazás jelenti, valamint az elektrosztatikus technológiák (festés, fémszórás, gáztisztítás) és az orvosi terápiás eljárások alkalmazzák. A villamos energia főszerepe az energiaátvitel, az energia eljuttatása a fogyasztókhoz, ahol az az igényeknek megfelelően más energiafajttává átalakítható. Villamos energiát minden más energiafajttából elő

lehet állítani, erre sokféle közvetlen és közvetett energiaátalakítási módszer áll rendelkezésre.

Energiaszerkezet

Az energiahordozók egy részét a természet szolgáltatja, ezek az elsődleges (primer-, alap-) energiahordozók. Ebbe a körbe tartoznak a bányászati módszerekkel kinyerhető ásványi energiahordozók: a fosszilis ásványi tüzelőanyagok, a nukleáris energiafejlesztés alapanyagai és a geotermikus hőhordozók. Az elsődleges energiahordozók másik csoportját a megújuló energia sokféle előfordulási formájának hordozói képviselik, így a napsugárzás, a szél, a felszíni vízáramok, a biomassa, a tengerek mozgása (áramlatok, hullámozás, árapály). A ma ismert természeti energiaforrásainkat a 2. táblázat foglalja össze.

A kimerülő és megújuló források megkülönböztetése az időléptéktől függ. Valójában az energiaforrások minden fajtája folytonosan megújul, csupán a kiaknázás mértékén múlik, hogy mennyisége a Földön a kiapadás felé tart-e. Ma is zajlik például szénülés és kőolajképződés, de sok nagyságrenddel lassabban, mint a kitermelés üteme. Ugyanakkor a megújuló források fennmaradására sincs garancia, hatalmas területeken már kipusztították az erdőket, az üvegházhatással, valamint a hőszennyezéssel pedig az emberiség sokat tesz a napsugárzás közvetlen hatásának csökkentésére, a klíma megváltoztatására. A fenntartható fejlődés az erőforrások olyan ütemű kiaknázását kívánja meg, hogy az emberi tevékenység ne vezessen a kimerülő források tényleges kimerülésére, és ne korlátozza a megújulók megújulását.

A természetben található, munkavégzésre hasznosítható erőforrások a történelmi fejlődés során fokozatosan bővültek, ahogy a technikai fejlődés újabb és újabb lehetőségek kiaknázása előtt nyitotta meg az utat. Ez nemcsak az energiabázis bővülését eredményezte, hanem a technika és a termelési technológiák fejlődésére is visszahatott. Az energetikai berendezések már az ókorban is „csúcstechnológiát” képviseltek, a nagy technológiai előrelépések és a jelentős társadalmi átalakulások gyakran kapcsolódtak össze az energetika új vívmányaival. A réz-, bronz- és vaskor kialakulása a tüzeléstechnika fejlődésén múlt. Az ókori és az újkori gyarmatosítás egyik feltétele volt a szélenergia hasznosításának elsajátítása a vitorlások hajtására. A manufaktúrák kialakulásához a szél- és vízimalmok teljesítményét kellett nagymértékben megnövelni, az ipari forradalom pedig aligha jöhetett volna létre a gőzgép feltalálása és a szénbányászat fejlődése nélkül. A világkereskedelem kialakulásának is energetikai feltételei voltak, a kőolaj és a belső égésű motorok szerepét nehéz túlbecsülni a mobilitás megteremtésében és a földrajzi távolságok összehúzóerőjében. A rakétahajtás pedig lehetővé tette az ember kijutását az

Természeti energiaforrások

Kimerülő energiaforrások	Megújuló energiaforrások
ásványi tüzelőanyagok szén kőolaj nem konvencionális olaj földgáz nem konvencionális földgáz	napenergia napsugárzás fotoszintézis szélenergia vízfolyások energiája tengeri áramlások tengervíz hőfokkülönbsége hullámzás
nukleáris üzemanyagok hasadó anyagok tenyészananyagok fúzió anyagai radioizotópok	biológiai energia izomerő biomassa mikrobiológiai reakciók
geotermikus energia konvektív hőhordozók kondukción forró sziklák	gravitáció árapály égitestek vonzása
egyéb tüzelőanyagok	kozmikus hatások
exoterm kémiai reakciók a tüzelésen kívül	

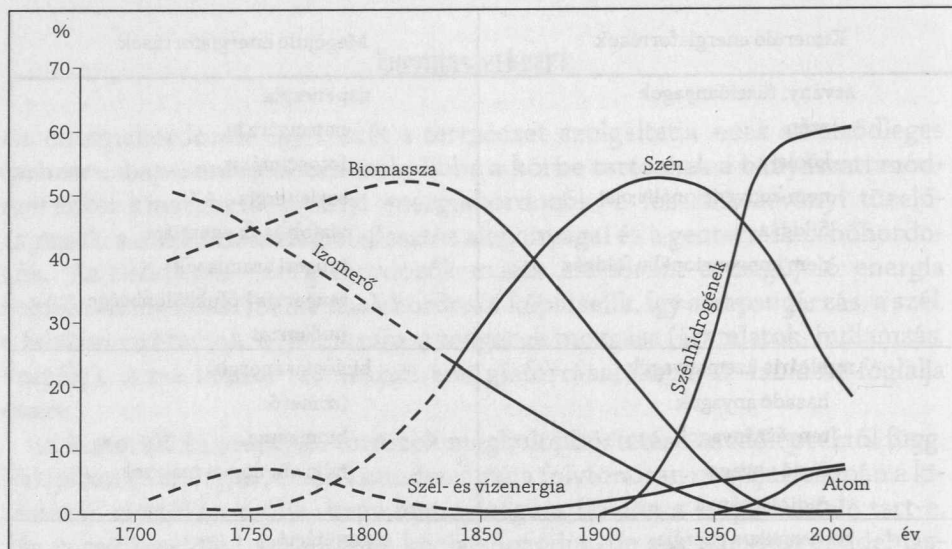
űrbe. Vajon mit tartogat számunkra az atomenergia, a napenergia, a bioenergetika jövője?

A felhasznált különféle természeti erőforrások aránya – a primer energiaszerkezet – a fejlődés során állandóan változott (1. ábra). Az újabb energiahordozók mindig előnyösebb gazdasági és műszaki adottságaik miatt kerültek előtérbe, és sohasem a korábban használt források kimerülése miatt. Az energiaszerkezetnek ez a módosulása napjainkban is tart, és a jövőben is folytatódik. A változások lassúak, mert fékezően hat egyrészt az alapvető létesítmények hosszú élettartama, másrészt a tömegesen használt berendezések elterjedésének jelentős időre van szüksége.

Az emberiség hosszú ideig csupán saját fizikai munkavégző képességére volt utalva. Az emberi izomerő 100 W körüli teljesítménye eltörpül a korszerű technikai berendezések mellett. A fejlett országokban bár sok munkafolyamatnál még nem nélkülözhető az ember fizikai munkája, de ennek részesedése a világ energiamérlegében elhanyagolhatóan kicsi. A világ legszegényebb régióiban azonban ma is jóformán az egyetlen „erőgép” az ember, legfeljebb

1. ábra

Az emberiség energiafelhasználásának becsült szerkezete 1700 óta



néhány állat segít a feladatok elvégzésében. A maga idejében – 10-12 ezer évvel ezelőtt – nagy előrelépés volt az emberi lehetőségeket megsokszorozó állati izomerő munkába fogása, de e felett is eljárt az idő. A magyar törpebirtokokon mostanában megjelenő igavonók egy tragikus visszafejlődés szimbólumai.

Az energiabázis első jelentős bővülését a tűz meghódítása tette lehetővé. A kezdetet – úgy félmillió éve – a növényi, állati és háztartási hulladékok el-tűzése jelentette. Afrika és Ázsia legszegényebb országaiban ma is ezek gyűjtögetése biztosítja a legfontosabb tüzelőanyagokat. Tűzfára csak erdős vidéken lehet szert tenni, viszont kitermelése már bizonyos technikai felkés-zültséget is megkíván. Az ókor és a középkor fejlett országainak a tűzifa volt a legfontosabb energiabázisa egészen az első ipari forradalomig. Napjainkban a megújuló energiák előtérbe kerülése új lendületet ad a biomassza hasznosí-tásának.

A szél és a vízenergia felhasználásának ókori előzményei mintegy 4-5 ezer évre nyúlnak vissza, azonban igazi fellendülést a kézművesség kibontakozása és a manufaktúrák megjelenése a 16-17. században jelentette. A gőzgép később háttérbe szorította a szél- és vízimalmokat, majd korszerű változatai a 20. szá-zadban új alkalmazási lehetőséget biztosítottak a villamosenergia-termelésre.

Az első ipari forradalom összekapcsolódott a kőszén térhódításával. A 20. század elején a belső égésű motorok megjelenése diadalmas térhódításra indí-totta el a kőolajat, amit a század közepén, a csőgyártás fejlődése nyomán köve-

A primer energiahordozók százalékos megoszlása

Energiahordozó	Világ	OECD	EU	Magyarország
szilárd	31	24,1	16	14,6
folyékony	34	41,0	41	34,1
gáznemű	22	20,5	22	38,5
nukleáris	6	10,6	15	12,1
egyéb	7	3,8	6	0,7

tett a földgáz gyors elterjedése. A század utolsó évtizedeiben megjelenő atom-energiának ellentmondásos, rögzös pálya jutott osztályrészül.

A 3. táblázat a világ, a fejlett országokból álló OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet), az Európai Unió (EU) és Magyarország 21. század eleji primer energiaszerkezetét hasonlítja össze. A nemzetközi statisztikákban a tüzelőanyagok megnevezése (szén, kőolaj, földgáz) a szokásos gyakorlat, az ettől eltérő, halmazállapot szerinti megkülönböztetés oka az, hogy a magyar energiámérlegben jelentős az importált szekunder energiahordozók (koks, brikett, kőolajszármazékok, villamos energia) szerepe is. Az egyéb kategória a világfelhasználásban és az Európai Unióban főleg vízenergiát, Magyarország esetében alapvetően importált villamos energiát jelent (a víz- és a geotermikus energia szerepe hazánkban 1%-nál kisebb). A tűzifa a fejlett világban a szilárd energiahordozók között szerepel (Magyarországon részesedése 2,5%), a fejlődőknél a biomassa része. A fejlődő világ biomassa-hasznosítására nincsenek megbízható adatok, mert nem kereskedelmi forgalom tárgya, becsült értéke a világ energiafelhasználásának 10-15%-a. A napenergia közvetlen hasznosítása egyelőre nem jelentős, a szélenergia kiaknázása kedvező széljárású térségekben erősen fejlődik, de súlya a nemzetközi összesítésekben még kicsi. A magyar energiaszerkezet nem nagyon különbözik a fejlett országokétól, egyedül a földgáz kiugróan nagy aránya szembetűnő, ami azonban ellátásbiztonság szempontjából már óvatosságra int.

Az elsődleges energiahordozók több mint feléből energiaátalakító technológiákkal vagy energiaátszármaztatás útján másodlagos (szekunder) energiahordozókat fejlesztenek. Az utóbbiak köre nagyon széles, a villamos energiától a vízgőzig, a benzintől a szaporító reaktorokat hűtő fémekig sokféle anyagot és hatást foglal magába. A legfontosabb másodlagos energiahordozókat a 4. táblázat mutatja be.

A szekunder energiahordozók nagy része tüzelőanyag (koks, brikett, tüzelő- és fűtőolaj, PB-gáz stb.), illetve motorhajtó üzemanyag (benzin, gázolaj, kerozin, metanol, etanol, biodízel stb.). A földgázt nem tekintik szekunder

Szekunder energiahordozók

Jelleg	Energiahordozó
szilárd	koks brikett faszén petrolkoks biobrikett (pellet) nukleáris fűtőelem
folyékony	benzin petróleum gázolaj kerozin pakura gudron metanol etanol biodízel LNG (Liquefied Natural Gas, cseppfolyósított földgáz) MTBE (metil-tercier-butil-észter) ETBE (etil-tercier-butil-észter) feketevíz víz olaj folyékony fémek
gáznemű	hidrogén SNG (Synthetic Natural Gas, vagy Substitute Natural Gas, szintetikus földgáz vagy földgázt helyettesítő gáz) PB (propán-bután gáz, más néven LPG (Liquefied Petroleum Gas, cseppfolyósított kőolajgáz)) biogáz acetilén városi gáz generátorgáz vízgáz kevert gáz kohógáz kamragáz kohófüst füstgáz

4. táblázat folytatása

Jelleg	Energiahordozó
	vízgőz hidrogén nitrogén hélium, szén-dioxid szerves gőzök
egyéb	villamos áram sugárzások

energiahordozónak, bár összetétele és nyomása a fogyasztóknál lényegesen eltér a termelőkutakra jellemző értékektől. A szekunder energiahordozók széles körét képviselik a hőhordozók. Ezek sokféleségét az alkalmazás eltérő körülményei (többek között hőmérséklet, viszkozitás, stabilitás, ellenálló képesség, fizikai és kémiai igény-bevételek) szabják meg. Sokféle szerepük lehet, kalorikus eszközökben és berendezésekben a hő tárolása vagy átszarmaztatása, hőerőgépekben a munkaközeg, melegedő berendezések hűtése, távhőszolgáltatás stb. területén. A legfontosabb hőhordozók az 5. táblázatban láthatók.

A táblázatban szereplő fluid közegek egy része nemcsak hő, hanem hidraulikus és pneumatikus berendezésekben gyakran erő átvitelére is szolgál.

A fogyasztók által vásárolt energiahordozók jellegének hazai megoszlását a 2. ábra mutatja. E végső felhasználásban a másodlagos energiahordozók aránya meghaladja az 50%-ot. A közvetlenül felhasznált elsődleges szilárd energiahordozók (szén, tüzi-fa) mértéke és aránya csökkenő. Ugyanakkor gyorsan nő a vezeté-

5. táblázat

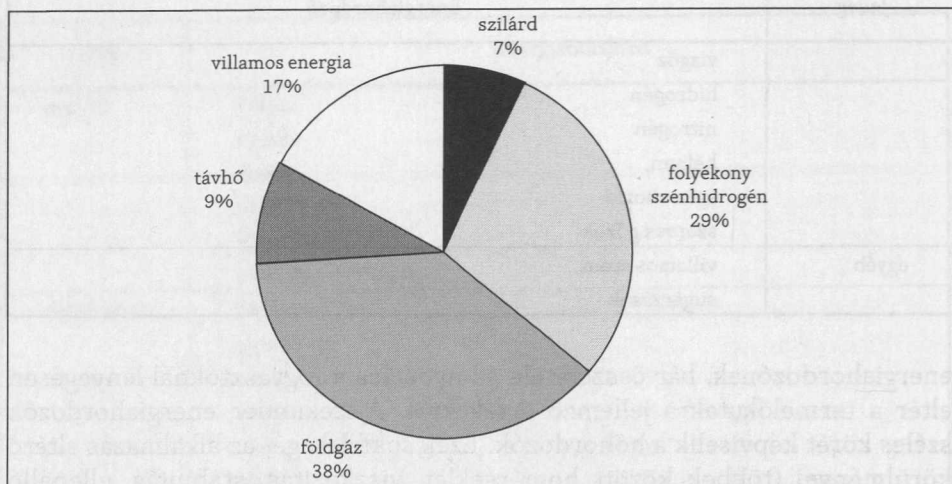
A fontosabb hőhordozók

Állapot	Anyag
gáznemű	vízgőz levegő füstgáz szén-dioxid hidrogén hélium szerves gőzök ammónia (freonok)*
folyékony	víz olaj folyékony fémek
szilárd	salak keramikus anyagok
változó	reverzibilis rejtett hő reakcióhő (pl. $\text{CO} + 3\text{H}_2$) disszociáció (pl. N_2O_3) halmazállapot-változás (pl. sók)

* gyártásukat nemzetközi megállapodás tiltja

2. ábra

Végso felhasználás Magyarországon energiatípusok szerinti



kes ellátások (villamos energia és földgáz) szerepe, mert kényelmes, könnyen kezelhető és környezetbarát megoldást kínálnak. A vezetékes hőellátás szerepe hazánkban egyelőre bizonytalan, de a gazdasági feltételek rendeződése után ez is nőni fog. A folyékony szénhidrogének közel egyharmada benzín, hasonló a gázolaj aránya, az egyéb termékek (fűtőolaj, bitumen, gudron stb.) összesítve szintén a folyékony energiahordozók egyharmada körüli mennyiséget reprezentálnak. A földgáz, a szilárd tüzelőanyagok, a tüzelő- és fűtőolaj legnagyobb részéből a fogyasztók energiaátalakítás révén hőt fejlesztenek, a motorhajtó üzemanyagok mechanikai munkát szolgáltatnak, a villamos energiának mindenféle hasznosításban szerep jut. Nyitott kérdés, hogy hosszabb távon a megújuló energiák térhódítása vagy a tüzelőanyag-cellák fejlődése mennyire mozdítja elő a decentralizált, illetve autonóm energiaellátás mód-szereit, háttérbe szorítva a vezetékes ellátást.

Energiabázis

Jelenleg az emberiség energiaszükségletének megközelítően 80%-át ásványi tüzelőanyagok fedezik (Magyarországon az arány 87%). A világ energiafelhasználásához az atomenergia 7%-kal, a vízenergia 6%-kal járul hozzá, a többi megújuló energia közül csak a biomassa – legnagyobbbrészt tűzifa – szerepe számottevő. Az utóbbi részesedését csaknem 10%-ra becsülik, de ez az érték meglehetősen bizonytalan, mert e téren a legnagyobb felhasználók a fejlődő országok, és ott statisztikai adatok ritkán állnak rendelkezésre. A világ

energiafelhasználása a 20. század végén olajegyenértékben kifejezve meghaladta a 10 Mrd t/év-t, és a szakemberek a következő évtizedekre további növekedést prognosztizálnak. A 21. század száz évre kumulált energiaszükséglete olajegyenértékben néhány billió t-ra becsülhető, ennek a hatalmas mennyiségnek biztosítása viszont együtt jár az energiaellátás drágulásával, a környezetszennyezés növekvő gondjaival, a fenntartható fejlődés lehetőségének a megkérdőjelezésével.

Az energiaellátás fokozódó gondolai és terhei világszerte az érdeklődés előterébe állították az energiaellátás feszültségeinek enyhítését, az energiatakarékosság ösztönzését, a környezetszennyezés csökkentését, az energiabázis kiszélesítését. Nagy erőket fordítanak egyrészt a kimerülő energiahordozók új lelőhelyeinek feltárására és jobb kiaknázására, valamint helyettesítésére, másrészt a megújuló energiaforrások hasznosításának előtérbe helyezésére.

A szakirodalomban gyakran jelennek meg becslések az egyes országok és az egész világ feltételezhető energiavagyonáról. Mivel ezek nemcsak az ismert vagyont tartalmazzák, hanem a reménybeli és feltételezett előfordulásokat is, az információk bizonytalanok. Az adatok szórásában szerepet játszik a becslést végzők optimista vagy pesszimista beállítottsága, de nemritkán a felméréseket üzletpolitikai vagy stratégiai szempontok is befolyásolják. Az áttekintést nehezíti, hogy az ásványi energiahordozó vagyon minősítésének és kategorizálásának gyakorlata sem egységes. Mind az országok, mind a nemzetközi szervezetek gyakran eltérő módon nevezik meg, és eltérő módon értelmezik a bizonyított, valószínű és feltételezett készletek sokféle válfaját. Ebben szerepet kap a kutathatóság mértéke, a kitermelésre számításba jöhető technológia rendelkezésre állása, valamint a kiaknázás gazdaságossága. Eltérőek a kategóriákba sorolás feltételei is. Az egységesítés érdekében az EGB (Európai Gazdasági Bizottság [ENSZ-szervezet]) új kategorizálási rendszer bevezetését kezdeményezte, figyelembe véve a geológiai kutathatóság mértékét, a hasznosítás gazdasági kilátásait és a kiaknázás módjának kidolgozottságát. A legfontosabb kategória a kitermelésre alkalmas, részletesen felkutatott vagyon (műrevaló, ipari és hasonló megnevezések szokásosak), amit bevált és gazdaságos technológiával lehet kitermelni. Egyes szervezetek – így az IEA (International Energy Agency, Nemzetközi Energia Ügynökség [OECD szervezet]) – műrevaló vagyont (reserve) és annak még nem minősíthető készletet (resource) különböztetnek meg.

Hazánkban a határköltség és a tényleges termelési költség hányadosával értelmezett műrevalósági mutatóval jellemzik a viszonyokat. A határköltséget annak a legdrágábban kitermelhető előfordulásnak az önköltségével értelmezik, amit a rendelkezésre álló technológiákkal még érdemes kitermelni. Az önköltségek azonban ritkán publikusak, ezért a határköltséget gyakran a világpiaci árból vezetik le, amit azonban a tőzsdei árak ingadozása miatti bizonytalanságok terhelnek, különösen ugrásszerű árváltozások esetében

(például az olajárnál). Ezért a műrevaló vagyon nagysága nemcsak a kutatás előrehaladásától és a termelési technológia fejlődésétől függ, hanem a világpiaci ár alakulásától is.

A hazai földtani nyilvántartásban a földtani kutatás eredményei alapján megismert és 0,6-nál nagyobb műrevalósági mutatóval rendelkező földtani vagyont és a kutatásokkal még nem igazolt, de földtani meggondolások alapján feltételezett reménybeli vagyont különböztetnek meg. Mindkét kategórián belül az ismertség fokától függő alosztályokat is alkalmaznak. A földtani vagyonnak csak azt a részét tekintik műrevalónak, amelynek műrevalósági mutatója egynél nagyobb, vagyis önköltsége – az adott időszak átlagos termelési technológiáját és átlagos gazdasági feltételeit alapul véve – nem haladja meg a határköltséget. A 0,8 és 1,0 közötti mutatóval jellemzett vagyont műrevaló tartaléknak tekintik, ennek az átminősítését eredményezheti a műszaki fejlődés vagy a határköltség növekedése. A műrevalóságot nem mindig lehet az „in situ” érték alapján megítélni, például a barnaszéneknek nincs világpiaci ára. Ilyenkor a felhasználás végtermékének, így a fejlesztett villamos energia önköltségét hasonlítják össze más előállítási móddal.

A legtöbb ismerettel a földkéregben rejtőző ásványi energiavagyonról rendelkezünk, de a geológiailag feltáratlan terület még rendkívül nagy. A médiában időnként felbukkannak prognózisok a világ szénhidrogénvagyonának közeli kimerüléséről, ugyanakkor a legutóbbi két évtizedben a műrevaló kőolaj- és földgázvagyon gyorsabban gyarapodott, mint a kitermelés. A Földön nagyon sok olyan medence van, amely ásványi tüzelőanyag-vagyonnal kecsegtet, de a részletesebb feltárást gazdasági, műszaki, politikai, szállítási vagy más körülmények nem teszik vonzóvá. A körülmények változása a megítélést módosíthatja, amit példáz a mély tengerek alatti szénhidrogénvagyon kitermelési technológiájának kifejlesztése az elmúlt évtizedben.

A tudomány fejlődése fokozatosan bővíti az eszköztárat a potenciális lehetőségek felismeréséhez (űrbeli távérzékelés, háromdimenziós szeizmikus vizsgálatok, számítógépes szimuláció, fizikai jellemzők nagy érzékenységgű feltérképezése, kémiai és biológiai viszonyok mikroanalízise stb.). Bár a talaj felszínén végzett vizsgálatok sok információt szolgáltatnak, meggyőző erejű ismeretekhez csak a földkéregbe mélyített fúrások juttatnak. Az ezekből nyert adatok alapján lehet megítélni a térség földtani felépítését, a kőzetek tulajdonságait és geofizikai jellemzőit, az ásvány-előfordulás térbeli helyzetét, mennyiségét és minőségét, a lelet elhelyezkedését a kísérő kőzetek között, a hidrogeológiai viszonyokat, a leművelést kísérő körülmények várható alakulását (kísérő kőzetek viselkedése és azokban a nyomásviszonyok változása, állapotjellemzők alakulása, a környezetben található fluidumok mozgása).

A művelésbe vont ásványvagyon jelentős részét technológiai okokból nem lehet kitermelni, az végleg a föld mélyében marad. A kitermelhető mennyiség és a termelésbe vont készlet aránya, a kitermelési együttható függ a geológiai

viszonyoktól, a termelés technológiájától és gazdasági megfontolásoktól. A legalacsonyabb a kitermelési együtttható a kőolajbányászatban (0,3–0,4), a legmagasabb a száraz földgáz termelésében (~0,9), a szénbányászat közepes helyet foglal el (átlagosan 0,5) ezen a skálán. A kitermelési együtttható növelése a műszaki fejlesztés állandó feladata, amit legsikeresebben a kőolajtermelésben oldottak meg, a másodlagos és harmadlagos termelési eljárások nagyban növelték a szénhidrogén-kihozatait.

Más technikai fejlemények is lényegesen bővítették a lehetőségeket, megoldódtak a kiaknázás problémái az örök fagy birodalmában, egyre mélyebb tengerek alól tudják a szénhidrogént kitermelni, már készülnek a 4000 m mély tengerek alatti előfordulások kiaknázására alkalmas berendezések. A szállítási technika fejlődése visszaszorította a földgáz „elfáklyázását” a felhasználóktól távoli gázmezőkhöz. Fejlesztik a technológiákat a nem konvencionális szénhidrogének (olajpala, kátrányos homok, szénlencsék metántartalma, geonyomásos zónák, metánklatrátok) kitermelésére, és számos eljárást dolgoztak ki a szén elgázosítására és cseppfolyósítására. Kutatják, hogyan lehetne a nagy mélységben lévő szénelőfordulásokat a föld alatt elgázosítani, illetve hogyan hasznosítható a mélyen fekvő forró sziklák hőtartalma. A hasadóanyag-vagyon bővítésére kipróbált technológiák állnak rendelkezésre (újrafeldolgozás, szaporítás), a lehetőségeket tovább növelni a Th-bázisú ércek hasznosítása.

Ha a természet rendjét nem akarjuk megzavarni, a megújuló energiaforrásoknak csak egy viszonylag kis hányadát szabad az energiaellátáshoz elvonni. Ezzel a hányaddal is lehetne fedezni az energiaszükséglet jelentős részét, ha két körülmény nem fékezné a megújuló energiák térhódítását. Az egyik a magas fajlagos beruházási költség, ami a gazdasági vonzerőt korlátozza. A másik – a vízerőművek kivételével – az alacsony átalakítási hatások, amiért azonos szolgáltatáshoz többször annyi megújuló energia szükséges, mint tüzelőanyag. Mindkét probléma megoldása a műszaki fejlesztésen múlik, a kis teljesítményű eszközöknél sokat számít a tömeggyártás lehetősége is.

Magyarországot a természet nem kényeztette el sem a kimerülő, sem a megújuló energiák vonatkozásában. Kőolaj- és földgáz-előfordulásaink jó minőségűek, de csupán a szükségletek kis hányadát fedezik. Szén- és uránérc-vagyonunk számottevő, de gyenge minőségük mellett a mélybányászatuk is költséges, ezért versenyképtelenné váltak, egyedül csak a külfejtéses lignitvagyon tűnik ígéretesnek. Nagy szintkülönbségek híján vízenergia potenciálunk kicsi, a széljárás szeszélyes és ritkán megfelelő erősségű. A napos órák száma ugyan nem csekély, de az inszoláció a téli fél évben kicsi, pedig akkor van sok energiára szükségünk. Jelentős lehetőségek rejlenek a biomasszában, de a szétaprózódott mezőgazdasági birtokszerkezet nehezíti kiaknázását. Sok reményt fűznek egyesek a geotermikus energiához, de a lehetőségeket termálvizeink viszonylag alacsony hőfoka korlátozza. Energiavagyonunk mostoha

Fejlesztési irányzatok

Energiafajta	Irányzatok
szén	nagynyomású fluid tüzelés (PFB Pressurized Fluid Bed) elgázosítás szintetikus földgáz (SNG) cseppfolyósítás föld alatti elgázosítás kombinált ciklussal integrált elgázosítás (IGCC Integrated Gasification with Combined Cyclus)
olaj	másodlagos és harmadlagos kitermelés mélytengeri termelés olajpala-hasznosítás bitumenes homok hasznosítása
földgáz	metánkinyerés széntelepekből termelés geonyomásos zónákból klatrátok hasznosítása
atom	urántermelés baktériumokkal inherens biztonságú reaktor fajlagos beruházási költség csökkentése szaporító reaktor magas hőmérsékletű reaktor transzmutáció új izotópdúsítási eljárások (lézer, mikrohullám) Th-üzemanyagciklus radioaktív hulladékkezelés és -elhelyezés fúzió
biomassza	üzemanyaggyártás (alkoholok, biodízel) hidrogénfejlesztés baktériumokkal
nap	nagy hatásfokú napelem naperőmű naperőmű az űrben
szél	nagy teljesítményű szélmotor off shore létesítmények
geotermia	rezervoárgazdálkodás bináris rendszerek forró szikla hasznosítása
tenger	hőfokkülönbség hasznosítása energianyerés hullámokból
villamos energia	jó hatásfokú közvetlen átalakítások

6. táblázat folytatása

Energiafajta	Irányzatok
	hőkörfolyamatok hatásfokjavítása szupravezetés MHD (Magneto-hidrodinamikusan átalakítás) EGD (Elektrosztatikus-gázdinamikusan átalakítás)
fosszilis energiahordozók	füstgáztisztítás szén-dioxid-kivonás és -lekötés szén-dioxid-hasznosítás
ásványi energiahordozók	hulladékok közömbösítése vagy hasznosítása területek rekultivációja

helyzetéből következik erős importfüggésünk, amivel együtt jár, hogy az átlagosnál jobban függünk a világgazdaság és világpolitika energiaviszonyokat befolyásoló, előre nem látható fejleményeitől, ezért az ellátásbiztonság feltételei megkülönböztetett figyelmet érdemelnek.

Az energiagondok csökkentésének legvonzóbb lehetősége az indokolatlan felhasználás megtakarítása, valamint az energetikai hatásfok javítása. Ezek révén nemcsak több szolgáltatásra nyílik lehetőség azonos primer energia-bázisból, hanem az energiaellátás számos feszültsége is enyhíthető, így a környezetszennyezés, az egészségi kockázatok, az importszükséglet, a tőkeigény, a társadalmi opposíció. Különösen nagy jelentősége lehet a szükségleteket radikálisan csökkentő új megközelítésnek, így a mezőgazdaság energiaigényes kemizálásának helyettesítése biológiai eljárással (a rezisztencia és termés-hozam növelése génmódosítással), vagy fémek *in situ* kinyerése baktériumokkal a bányászati és kohászati technológiák helyett.

Az energiabázis bővítésére világszerte nagy ráfordításokkal járó, sok irányú kutató-fejlesztő munka folyik. A legfontosabb jelenlegi tevékenységeket a 6. táblázat foglalja össze. Az eredmények gyakran tárnak fel új lehetőségeket és nehéz előrelátni, a tudomány milyen új utakat talál a jövőben.

Valószínű, hogy a tudomány még sok meglepetést tartogat az energetika számára. Fél évszázada még álmódóznak tartották azt, aki az atomenergia békés hasznosítását lehetségesnek tartotta, ma pedig az atomerőművek fennmaradásáról zajlik a vita. A Föld körül keringő naperőmű néhány éve még a sci-fi irodalom szüleménye volt, ma pedig az amerikai NASA-ban, valamint a japán MITI-ben tervezik a létesítményeket, sőt alkotóelemei már működnek az űrben.

Az energia eljuttatása a forrásoktól a fogyasztókig sok fázisból álló, összetett logisztikai feladat. A hosszú út egyrészt különböző technológiai lépésekből áll. A kibányászott ásványi tüzelőanyagok előkészítő üzemekbe kerülnek, a szén szállításra, illetve közvetlen felhasználásra alkalmasabbá teszik (törés, aprítás, őrlés, osztályozás, mosás, flotálás), a szénhidrogéneket halmazállapot szerint szétválasztják és leválasztják a szállítást zavaró alkotókat. A hasadóanyagércet kinyerik a kőzetből és dúsítják, a geotermikus hőhordozókat szűrik, és leválasztják a veszélyes vagy káros anyagokat.

Az előkészített tüzelőanyagok kisebb hányadát a végső fogyasztókhoz, nagyobb hányadát átalakító művekbe szállítják. A szénből kokszolóknak, brikettálóknak, és ha az eljárások versenyképesé válnak, elgázosítóknak és cseppfolyósítóknak, a kőolajból a kőolaj-finomítóknak állítanak elő szekunder energiahordozókat, az uránércet a több üzemből álló üzemanyagciklusban (konverzió, izotópdúsítás, fűtőelemgyártás, esetleg újrafeldolgozás) dolgozzák fel. A tüzelőanyagok jelentős hányadából erő- és fűtőművekben, ipari kazántelegeken állítanak elő hőhordozókat és/vagy villamos energiát, a megújuló energiákból többnyire szintén villamos energiát, egyesekből hőt is fejlesztenek. Az átalakítóművekből (szénfeldolgozó, kokszoló, kőolaj-finomító, erőmű, fűtőmű stb.) újabb szállítási és elosztási folyamatokon keresztül jut az energia a fogyasztókhoz. A primer és szekunder energiahordozók szállítása gyakran tárolással is kiegészül, egyrészt a termelés és fogyasztás egyenlőtlenségeinek az áthidalására, másrészt az ellátásbiztonságot növelő stratégiai készletek biztosítására. A fogyasztók által vásárolt primer és szekunder energiahordozók összessége kerül végső felhasználásra, ennek eloszlását mutatja a 2. ábra. A fogyasztók a fogyasztóberendezésekben végrehajtott további átalakítással jutnak a kívánt szolgáltatáshoz, annak energiaértéke a végső hasznosítás.

A forrásoktól a végső hasznosításig terjedő folyamat vesztesége az ellátás struktúrájától függően, a kitermelt energiahordozók hőértékének 60-70%-ára becsülhető, az ásványi energiahordozóknál a földkéregben értelmezett *in situ* érték 80-85%-át is elérheti. (Szerény vigasz, hogy a természet sem gazdálkodik jól az energiával, a fotoszintézis hatásfoka 2-4%, az izmoké pedig 10-15%.)

Az energiahordozók szállításánál nagy földrajzi távolságokat is át kell hidalni. A legtöbb szállítási tevékenységre a tüzelőanyag-ellátásnál van szükség, ennek költsége jelentős tétel az energiaellátás árában. Egyrészt biztosítani kell a tüzelőanyagok továbbítását a források (bányák, szénhidrogénmezők, kikötők) helyétől a fogyasztói súlypontokba, gyakran nemzetközi forgalomban, esetleg több országon vagy tengereken keresztül. Másrészt a fogyasztói súlypontokból el kell juttatni azokat minden fogyasztóhoz. A sze-

kunder energiahordozók esetében a szállítási távolságok a fogyasztókig többnyire kisebbek.

Nemritkán szállítási optimalizáció dönti el az energiaellátás jellegét. Előnyösebb-e a kőolaj-finomítók a tengeri olajkikötők közelébe telepíteni, és azok termékeit szállítani a fogyasztókhoz, vagy célszerűbb-e a fogyasztói centrumban végezni a kőolaj-feldolgozást, odaszállítva a kőolajat? Olcsóbb-e a fogyasztói súlypontban levő erőműbe szállítani a szenet, vagy a bánya mellé telepített erőműből villamos vezetékeken továbbítani az energiát? A magyar döntéseket is sokszor a szállítási lehetőségek és feltételek motiválják, például hogyan lehet diverzifikálni szénhidrogénimportunkat, milyen kockázatok terhelik az erőművi szénimportot, hogyan alakítsuk villamos energia külkereskedelmünket.

A tüzelőanyagok – különösen a szénhidrogének – a Föld országai között nagyon egyenlőtlenül oszlanak el, ezért vált a világkereskedelem legnagyobb tételévé a hihetetlenül megnőtt – több milliárd tonnára rúgó – forgalmuk. Emellett gazdasági szempontok is szerepet játszanak, mint például az olcsó tengerentúli szén európai importjában. Az energiahordozók nemzetközi forgalmában mindennapos gyakorlattá vált a hatalmas mennyiségek szállítása, akár több ezer kilométeres távolságra is mind szárazföldön, mind a tengereken. A külkereskedelmen keresztül biztosítják a világ kőolaj-szükségletének több mint felét, a földgázfelhasználásnak mintegy negyedét, a cseppfolyós üzemanyagok 18 és a szén 15%-át. Az energiaellátás stratégiai jelentősége miatt a szállítások módját jelentősen befolyásolják politikai szempontok is. Fontos szerepet játszottak annak idején a Szovjetunió befolyásának növelésében a a KGST-tagországokba történt nagymértékű energiaszállítások. A több országot átszelő energiaszállító-vezetékek létesítése és üzeme körül a gazdasági érdekelletékeken túlmenően időnként nemzetközi politikai konfliktusok is kialakultak (pl. a Közel-Keleten vagy Közép-Ázsiában).

A tüzelőanyagok forgalmában nagy szerepe van a közforgalmú szállítási módoknak. Az ipari fejlődés kezdetén a szenet nagyobb távolságra kis hajókon szállították a folyókon és a tengerpartok mentén. A vízi szállítás azóta is megőrizte jelentőségét mind a tengereken, mind a belvizeken. A tüzelőanyag-forgalom jelentős hányadát a világtengereken keresztül bonyolítják. A felhasznált kőolajnak több mint fele a tengereken keresztül jut el a nagy kőolajkikötőkbe, ezek a szállítások kötik le a világ tengeri hajóparkjának több mint harmadát. A világtengereket szinte uralják a sűrű forgalmat bonyolító, gyakran több száz kilotonnás kapacitású olajtankerek. E hatalmas méretű hajókkal a szállítási költség nagyon alacsony. Jelentős a szénszállító teherhajók és újabban a cseppfolyós földgáz (LNG) továbbító mélyhűtést alkalmazó tartályhajók forgalma is (az utóbbiak száma már a kétszázat is meghaladja évente > 200 mrd m³ forgalommal). Az LNG technológia költséges és veszélyes, ezért helyettesítésére foglalkoznak a földgázból olyan más tüzelőanyag

(pl. metanol) előállításával, ami közönséges tartályhajókban szállítható a tengeren. Megfelelő infrastruktúrával rendelkező országokban a belvízi hajózás szerepe is jelentős a szén és a kőolajtermékek továbbításában.

Sajnos az olcsó tengeri szállítás előnyeit földrajzi fekvésünk miatt nem tudjuk kihasználni. A szénét vagy több országon keresztül vasúton kellene hazaszállítani a nyugat-európai (Amszterdam, Rotterdam, Antwerpen), illetve a földközi-tengeri kikötőkből, aminek költsége elviselhetetlenül megnövelné az árat, vagy a Fekete-tengerről a bizonytalan dunai szállításra kellene hagyatkoznunk. A nagy kőolajkikötőkhöz (Rotterdam, Hamburg, Trieszt) pedig hiányzik a csővezetési kapcsolatunk. Kikötők és rakodóberendezések híján hazánkban a belvízi hajózás sem játszik nagy szerepet.

A vasútnak mindig fontos feladata volt a tüzelőanyag-szállítás. Már az első vasútvonal szerepe is az volt, hogy a Darlingtonban bányászott szenet Stocktonba szállítsa. Napjainkban a vasút a szén és más darabos tüzelőanyagok szárazföldi szállításának fő eszköze, de a kőolajtermékek és a PB-gáz fogyasztóinak nagy hányadát szintén a vasút szolgálja ki. Az 1950-es évek erőltetett szénbányászatának időszakában a magyar vasút szállítási kapacitásának jelentős részét a szén fuvarozása kötötte le, ennek hektikus viszonyai súlyos zavarokat okoztak a vasút személy- és teherszállítási forgalmában. Azóta a szénszállítás volumene összezsugorodott a mélybányák visszafejlesztése és a felhasználói kör beszűkülése következtében, a szénbányák közelében fekvő nagyfogyasztókat pedig lehetőleg közvetlen kapcsolattal (szállítószalag, kötélpálya) szolgálják ki. Jelenleg a MAV áruszállítási kapacitásának csak negyedét köti le a különféle energiahordozók fuvarozása, amiknek zömét a folyékony üzemanyagok és tüzelőanyagok teszik ki.

A közúti szállítás a kiskereskedelmi ellátásában tölt be meghatározó szerepet, az energiahordozók a közúti áruforgalomnak mintegy tizedét teszik ki. Közúton tűzfától kezdve a palackos PB-gázig mindenféle tüzelőanyag szállítása előfordul. A legnagyobb tételt a több mint 1000 töltőállomáson kialakított üzemanyag-kúthálózat kiszolgálása jelenti, így fedezi az ország teljes gépkocsiallómanájának üzemanyag-ellátását. A jelenleg kiépített kúthálózat tartósítja az ellátás módját, más üzemanyag-ellátási módok (földgáz, PB-gáz, alkoholok, növényi olajok, villamos hajtás) elterjedését nehezíti a szükséges infrastruktúra (töltőállomások, szállító eszközök) kiépítésének nagy tőkeszükséglete. A PB-gáz kiszolgálása azonban autógáz-elnevezéssel megkezdődött.

Hatalmas előrelépés volt a kőolaj hordókban történő szállításának helyettesítése csővezetékes továbbítással. A csővezeték a kőolaj szárazföldi szállításának szinte kizárólagos módjává vált, gyakran kontinenseket áthidaló távolságokra is, kisebb távolságra tenger alatti vezetékek is előfordulnak. Kőolajvezetékek kötik össze a kőolajmezőket a kőolaj-finomítókkal, illetve a tengeri feladó kikötőkkel, valamint a tengeri fogadó kikötőket a nagy fogyasztói súlypontokkal. A nagy kőolaj-finomítók többnyire a csőhálózatok csomó-

pontjai, hogy megoldható legyen e stratégiaiilag fontos létesítmények többirányú nyersanyagellátása. A fejlődés során elágazásokat, a biztonság növelésére csomópontokat és párhuzamos szállítási utakat alakítottak ki, ami egyre összetettebb csőhálózatok kiépítésére vezetett, így egyes vezetékek kiesését más szakaszokkal helyettesítve lehet biztosítani a folyamatos ellátást. A nemzeti vezetékrendszerek fokozatosan nemzetközivé kapcsolódtak össze. Magyarország kőolajellátásának zöme egy Oroszországból kiinduló nemzetközi vezeték leágazásán keresztül történik, aminek tartaléka a Krk szigetén fekvő Omisalj kikötőből kiinduló Adria-vezeték. Növelné ellátásbiztonságunkat egy közvetlen kapcsolat a nyugat-európai kőolajhálózattal. A kőolajtermékek legnagyobb fogyasztóihoz (erőművek, vegyi művek, nagy elosztó központok) is csővezetéken jut el a folyékony energiahordozó, a hazai felhasználásnak mintegy a felét így biztosítják.

Amikor a csőgyártás képessé vált nagy átmérőjű és nagy nyomást elviselő csövek gyártására, megteremtődött a nagy távolságú földgázzállítás feltétele. A földgáz a forrásoktól (szénhidrogénmezők, LNG-kikötők, -tárolók) a fogyasztókig csövön jut el, a szállítási távolságok szerint differenciált és fokozatosan csökkenő nyomáson. Igényes feladat a mennyiségek és nyomások szabályozása a változó terhelések követésére. A magyar földgázimport legnagyobb része Oroszországból csövön érkezik, Ausztrián keresztül pedig megvalósult az összeköttetés a nyugat-európai rendszerrel is. Néhány, a gázvezetésektől távol fekvő település a földgázra történő későbbi áttérés reményében helyi PB-gázelosztó rendszert épített ki.

Csővezeték más energiahordozók szállítására is használatos, így forró vízzel vagy gőzzel távhőszolgáltatásra, egyes kiterjedt iparvidékek ellátására hidrogénnel, az USA-ban még nagy távolságú szénszállítás is előfordul gáz vagy szuszpenzió formájában. Az energiaszállítás megoldható nagy kémiai energiát tartalmazó anyaggal (pl. hidrogénnel, szén-monoxid-hidrogén keverékkel), vagy reverzibilis fizikai, illetve kémiai átalakulásra képes közeggel is.

A fogyasztók kiszolgálásának a vezetékes (villany-, gáz-, hő-) ellátás a legfejlettebb formája, de a hálózatok létesítése költséges és üzemeltetéséhez szakértelemmel rendelkező személyzetre van szükség. A vezetékes ellátási mód központi irányítást és kényszerkapcsolatot jelent a termelés és a fogyasztók között. Az energiaszállítás legkényelmesebb formáját a villamos energia biztosítja. Az erőműveket összekapcsoló nagyfeszültségű (többnyire 400 kV-os) országos alaphálózatok nemzetközi együttműködésbe kapcsolódtak össze, üzemvitelüket szigorúan koordináltan. A magyar villamosenergia-rendszer része a közel egész Európát átszövő UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity, Egyesülés a villamosenergia-átvitel koordinálására) rendszernek. Az alaphálózatról kisebb feszültségű szállító vezetékek juttatják az energiát a csomópontokba, ahonnan az ipari nagyfogyasztók nagyobb feszültségen, a kisfogyasztók kisebb feszültségen (400, 230 V) kapják

az áramot. A csomópontokat alkotó transzformátorállomásokban a szállítás szempontjából optimális feszültséget állítanak be. A villamos energia a fogyasztók (lakások, üzemek, intézmények) minden helyiségébe eljut, s mindenütt meg kell felelnie a nemzetközi szabványokban előírt minőségi mutatóknak, hogy csatlakoztatni lehessen az ugyancsak szabványokban rögzített tulajdonságú fogyasztóberendezéseket. Nehezíti a feladatot, hogy a villamos energia nagy mennyiségben nem tárolható, ezért az erőműveknek folyamatosan illeszkedniük kell a fogyasztók véletlenszerűen változó igényeihez. Szinte hihetetlen, hogy e bonyolult, összetett rendszerben folyamatosan áramlik a kívánt mennyiségben az energia, és e tevékenység léte a fogyasztókban csak akkor válik tudatossá, amikor – meglehetősen ritkán – egy váratlan üzemzavar megszakítja a szolgáltatást (például 2003. augusztus 14-én Észak-Amerika keleti térségeiben). Nem kizárt, hogy távlatilag a hidrogénszállító csőhálózatok is hasonló energiaszállító szerephez juthatnak.

A vezetékes villamosenergia-rendszerek mellett terjednek az autonóm villamosenergia-ellátás különféle módjai is. A legáltalánosabb a hordozható elektronikus készülékek táplálása kémiai áramforrásokkal. Főleg hő- és villamos energia kapcsolt előállításával gazdaságos és rugalmas autonóm megoldást lehet kialakítani, nagy gyárakban saját erőművel, kisebb létesítményekben (intézmények, lakótömbök) dízelmotorokkal vagy mikrogázturbinákkal hajtott generátorokkal. Az energiaellátás folytonosságára kényes fogyasztók a hálózat üzemzavaránál automatikusan bekapcsolódó autonóm tartalékellátást építenek ki. A megújuló energiákra támaszkodó áramforrások a folytonos rendelkezésre állás érdekében többnyire kapcsolódnak a villamosenergia-rendszerhez, de a villamos hálózattól távol fekvő fogyasztóknál autonóm megoldások is előfordulnak (megfelelő tárolással). Nagy távlatban nem elképzelhetetlen az ellátási módok összefonódása, például hidrogénellátó hálózatra támaszkodó tüzelőberendezésekben fejlesztve a hőt és tüzelőanyag-cellákban a villamos energiát.

Az energiahordozók szállításánál számításba kell venni a veszélyességet is. A folyékony és gáznemű szénhidrogének tűz- és robbanásveszélyesek, a szállító járműveket úgy kell kialakítani, hogy védelmet biztosítsanak e veszélyek ellen. A tartálykocsiknál az ellen is védekezni kell, hogy a nagy tömegű folyadék súlypontjának áthelyeződése ne okozza a jármű stabilitásának elvesztését. Különösen szigorú rendszabályok vonatkoznak a radioaktív és nukleáris anyagok szállítására mind az ionizáló sugárzás elleni védekezés, mind a hasadóanyagok fizikai védelme érdekében.

Tüzelőanyagok

A tűz meghódítása százezer évekig tartó keserves tanulási folyamat lehetett az ősember számára. Sok ember vált pusztító erdőtüzek áldozatává, amíg sikerült azokat pislákoló lángokká szelídíteni. A félelmetes természeti erő azonban baráttá változott, ami melegít, fényt visz a sötétbe, elriasztja a ragadozókat és a gyötrő rovarokat, védi a barlangot, emészthetőbbé teszi a húst, keményebbre edzi a dárda hegyét. De ez a barát folyamatos szolgálatot követelt, állandó táplálást, és ha nem tudtak elég éghető anyagot gyűjteni, a tűz kialudt, a vívmányok semmivé váltak, a törzs életben maradásának esélye jelentősen csökkent. A tűzcsiholás módját felfedező varázslók szolgából a tűz urát teremtették meg, elindítva a technikai fejlődés véget nem érő folyamatát. Az első agyagedények készítésétől az űrbe történő kilépésig a műszaki fejlemények nagy része valahogy kapcsolódik a tűz hatásaihoz.

Az emberiség energiaellátásának mintegy 80%-a jelenleg az ásványi tüzelőanyagok hasznosítására alapul, arányuk a magyar energiamérlegben 87%. Az elsődleges ásványi tüzelőanyagok természetes eredetű bányatermékek, a legjelentősebb a szén, a kőolaj és a földgáz, de más termékek is szerepet játszhatnak, például a tőzeg, olajpala, bitumenes homok, bányamétán stb. A bányatermékek egy részét közvetlenül hasznosítják, a nagyobbik részükből előkészítő és átalakító technológiákkal a fogyasztói igényeknek jobban megfelelő energiahordozókat állítanak elő. Az előkészítő műveletekkel a nemkívánatos alkotókat (meddő, víz) leválasztják, a szállítást és a hasznosítást zavaró komponenseket szétválasztják, de a termék alapvető jellegét nem módosítják. Az átalakító technológiák lényegesen módosítják az anyagi összetételt és/vagy tulajdonságokat, másodlagos energiahordozókat állítanak elő, például kokszot, kőolajtermékeket (benzin, gázolaj, petróleum, gudron stb.), PB-gázt, a szén elgázosításával vagy cseppfolyósításával nyert termékeket, szénhidrogének bontásával előállított tüzelőanyagokat stb.

A világ energiamérlegében 10% körüli arányban részesednek a biomasszából nyert tüzelőanyagok, tűzifa, energiaültetvények termékei, növényi és állati hulladékok, bomlástermékek szerves szemétből, illetve szennyvíziszapból, valamint azok további feldolgozásával előállított üzemanyagok (biodízel, etanol stb.). Mivel ezek nagy része nem kerül kereskedelmi forgalomba, szerepüket csak hozzávetőlegesen lehet becsülni. A fejlődő világ legszegényebb régióiban a biomassza a kizárólagos energiabázis, de a törekvés a megújuló energiahasznosításra a fejlett országokban is megnövelte vonzerejét. Csak

marginális szerepet játszanak azok a tüzelőanyagként hasznosítható éghető gázok (pl. kohógáz), illetve szilárd vagy folyékony maradékok (például a feketevíz a papíriparban), amelyeket egyes vegyipari és kohászati technológiák szolgáltatnak.

Tüzelőanyagok égése

A tüzelőanyagok égése exoterm oxidáció, az égéstermékek kötési energiája kisebb, mint a komponensek környezethez viszonyított energiapotenciáljainak összege. A felszabaduló R reakcióhő

$$R = \Delta U + W \quad (1)$$

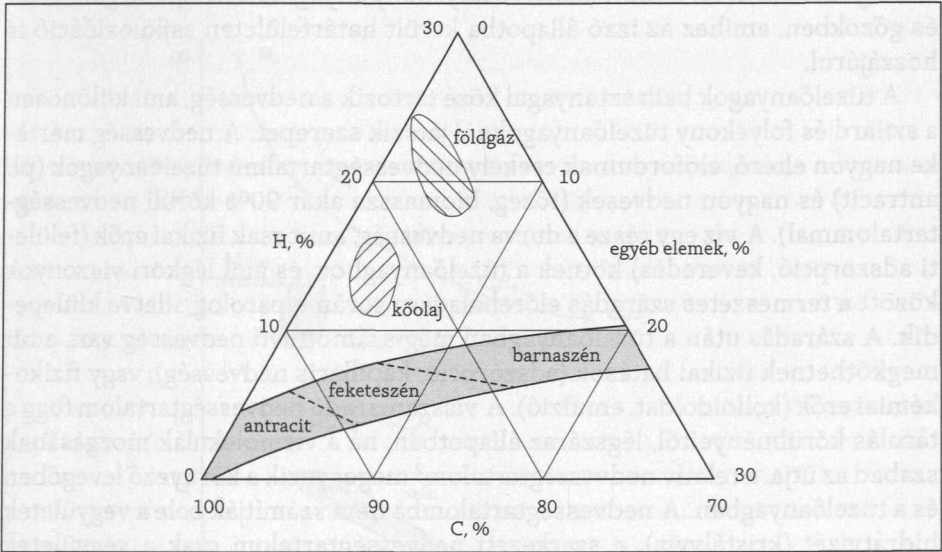
fedezi az U belső energia ΔU növekményét, és ha a körülmények kedvezőek, W külső munkát is végez. A belső energia növekedése egyrészt az anyagok hőmérsékletének emelkedését jelenti, másrészt fedezi a halmazállapot-változások (olvadás, párolgás, forrás) rejtett (latens) hőjét. A külső munkavégzésnek sokféle módja lehetséges, az anyagok kiterjedése, deformációja, oldása, sugárzása, ionizációja, villamos áram keletkezése stb. Mivel a valóságos folyamatok irreverzibilisek, W kisebb, U növekedése nagyobb, mint az ideális érték, mert a veszteségek is hővé alakulnak. A tüzelésnél az éghető alkotók közül a karbon¹ és a hidrogén égése játssza a főszerepet, az elsődleges tüzelőanyagokban e két legfontosabb elem mértékét szemlélteti az 1. ábra. Az elemi analízissel kimutatott karbonnak és hidrogénnek csak egy része vesz részt exoterm reakcióban, mivel van éghetetlen vegyületekben (pl. karbonátokban, vízben) lekötött hányaduk is.

Az égésnél játszódó fontosabb kémiai reakciókat mutatja az 1. táblázat. Tökéletes égésnél a karbon szén-dioxiddá (reakcióhő 36,8 MJ/kg) és a hidrogén vízgőzzé (reakcióhő 144 MJ/kg) ég el, a táblázat 2.2 és 2.4 jelű reakciói szerint. A hőfejlődéshez kismértékben más anyagok oxidációja is hozzájárul, például a tüzelőanyagokban előforduló kén egy része (2.5 reakció, 10,4 MJ/kg).

A tüzelőanyagok égése fizikai és kémiai változásokból álló, nagyon összetett folyamat. Lefolyását nemcsak a tüzelőanyag halmazállapota, szerkezete és összetétele szabja meg, hanem sok külső körülmény is, a hőmérséklet, a nyomás, a tartózkodási idő a tüztérben, a keveredés módja az oxigénnel stb. A folyamatok során maguk a tüzelőanyagok is fizikai és kémiai változásokon mennek keresztül, amelyek annál összetettebbek, minél bonyolultabb molekulákból épülnek fel, és minél heterogénebb a szerkezetük. Az illó komponensek elpárolognak, az összetett, bonyolult szénhidrogén-molekulák egyszerűbbé bomlanak le. Egyes folyamatok számottevő hőelvonással járnak, így az endoterm kémiai reakciók, például a vegyületek pirolízise vagy a hamualkotás

1. ábra

Tüzelőanyagok elemi összetétele



1. táblázat

Az égésnél lejátszódó fontosabb reakciók

Képlet	Reakció	Megjegyzés
2	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	tökéletes égés
3	$C + (1/2)O_2 \rightarrow CO$	
4	$H_2 + (1/2)O_2 \rightarrow H_2O$	
5	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	
6	$CO + (1/2)O_2 \rightarrow CO_2$	
7	$H_2S + (3/2)O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$	
8	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	
9	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	tökéletes égés
10	$C_2H_6 + (7/2)O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	
11	$C_mH_n + [m + n/4]O_2 \rightarrow mCO_2 + (n/2)H_2O$	
12	$C_mH_n + [m/2 + n/4]O_2 \rightarrow mCO + (n/2)H_2O$	koromkiválás
13	$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O$	
14	$2CO \rightarrow C + CO_2$	
15	$CO_2 + 2H_2 \rightarrow C + 2H_2O$	

néhány folyamata. Ugyancsak hő igényelnek egyes fizikai folyamatok is, a szilárd anyagok kigázosítása, a molekulák termikus disszociációja, a salak hal-

mazállapot-változásai (lágyulás, olvadás), hő távozik el az égéstermékekben és az éghetetlen ballasztanyagokban stb. A tüzelőanyagok égése legnagyobb-részt gázfázisban történik, szilárd és folyékony anyagoknál a fejlődő gázokban és gőzökben, amihez az izzó állapotba került határfelületen zajló oxidáció is hozzájárul.

A tüzelőanyagok ballasztanyagai közé tartozik a nedvesség, ami különösen a szilárd és folyékony tüzelőanyagoknál játszik szerepet. A nedvesség mértéke nagyon eltérő, előfordulnak csekély nedvességtartalmú tüzelőanyagok (pl. antracit) és nagyon nedvesek (tőzeg, biomassa akár 90% körüli nedvességtartalommal). A víz egy része a durva nedvesség, amit csak fizikai erők (felületi adszorpció, keveredés) kötnek a tüzelőanyaghoz, és ami légköri viszonyok között a természetes száradás előrehaladása során elpárolog, illetve kiülepedik. A száradás után a tüzelőanyagban még számottevő nedvesség van, amit megköthetnek fizikai hatások (adszorpció, kapilláris nedvesség), vagy fizikokémiai erők (kolloidoldat, emulzió). A visszamaradó nedvességtartalom függ a tárolás körülményeitől, légszáraz állapotban, ha a vízmolekulák mozgásának szabad az útja, a relatív nedvességtartalom² megegyezik a környező levegőben és a tüzelőanyagban. A nedvességtartalomba nem számítják bele a vegyületek hidratvizét (kristályvíz), e szerkezeti nedvességtartalom csak a vegyületek szétbontásához szükséges magas hőmérsékleten szabadul fel. A távozó nedvesség kémiaiilag aktív anyagokkal agresszív vegyületeket alkothat (például kénsav, sósav, salétromsav), amelyek – különösen a harmatpont alatt kicsapódva – meggyorsítják a szerkezeti anyagok korrózióját.

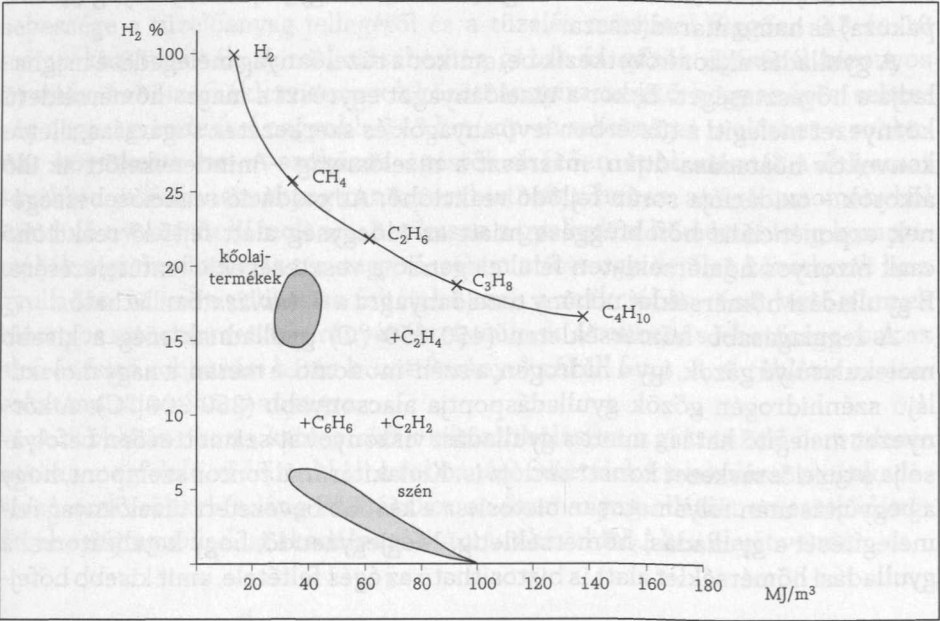
A tüzelőanyagokat különféle éghetetlen ásványi anyagok szennyezik. Ezek egy részét az előkészítő műveletek során le lehet választani, a visszamaradó szilárd hányadból keletkezik az égés során a hamu, ami szélsőséges esetben – például egyes barnaszenekeknél – elérheti a száraz tömeg 50%-át is.

Az égéshez a tüzelőanyagot legalább a gyulladási hőmérsékletig fel kell melegíteni. A felmelegedés első szakaszában a nedvességtartalom távozik el, ami történhet a tűztérben vagy azon kívül a tüzelőanyag előzetes felmelegítésével. A hőmérséklet növelésével mind nagyobb arányban válnak ki az illó alkotók. Illónak azokat a komponenseket tekintik, amelyek a levegőtől elzárt hevítés során a száraz szilárd, vagy folyékony tüzelőanyagból gázok és gőzök formájában kilépnek. Ezek között vannak éghetetlen komponensek is, de nagy részük éghető, az utóbbiak közül a legfontosabbakat a 2. ábra jellemzi, fűtőértékük a 2. táblázatban látható.

Az illó alkotók aránya és felszabadulásának kezdeti hőmérséklete erősen befolyásolja a gyulladási viszonyokat. A szeneke minél fiatalabbak, illó tartalmuk annál nagyobb, a szárazanyagra vonatkoztatott illótartalom antracitnál 4-9%, feketeszeneknél 10-40%, barnaszenekeknél 40-60%. A fa illó tartalma 85%-ot is elérhet, a folyékony szénhidrogének bizonyos hőmérsékleten felül majdnem teljes mértékben elgőzölgnek. Az illó felszabadulás kezdeti hőmér-

2. ábra

Illó alkotók jellemzői



2. táblázat

A legfontosabb illók

Anyag	Összetétel	Fűtőérték	
		MJ/kg	MJ/m^3 *
hidrogén	H_2	120,5	10,8
szén-monoxid	CO	12,7	12,7
metán	CH_4	50,2	35,9
etán	C_2H_6	47,7	64,6
propán	C_3H_8	46,5	93,9
bután	C_4H_{10}	45,3	122,6
pentán	C_5H_{12}	43,3	146,0
hexán	C_6H_{14}	45,2	173,7
heptán	C_7H_{16}	44,5	198,6
etilén	C_2H_4	47,2	59,6
benzol	C_6H_6	40,8	141,8

* fizikai normál állapotban (fizikai normál állapot: $0^\circ C$, 101,325 kPa (760 torr), műszaki normál állapot: $20^\circ C$, 98,0655 kPa (1 at), gáztechnikai normál állapot: $15^\circ C$, 101,325 kPa (760 torr))

séklete is tüzelőanyag-függő, fiatal barnaszénknél 120-170 °C-on már megindul a folyamat, de a sovány feketeszeneknél 380-400 °C-ra is szükség lehet. Az illók teljes körű kiválása után éghető szilárd vagy képlékeny anyag (koks, pakura) és hamu marad vissza.

A gyulladás akkor következik be, amikor a tüzelőanyag melegeდება meghaladja a hőveszteséget. Ekkor a tüzelőanyagot egyrészt a magas hőmérsékletű környezet melegíti a tüztérben levő anyagok és szerkezetek sugárzása, illetve konvektív hőátadása útján, másrészt a tüzelőanyag – mindenekelőtt az illó alkotók – oxidációja során fejlődő reakcióhő. Az oxidáció reakciósebességének exponenciális hőfokfüggése miatt az időegység alatt fejlődő reakcióhő csak bizonyos hőmérsékleten felül elegendő a veszteségek ellentételezésére. E gyulladási hőmérséklet néhány tüzelőanyagra a 3. táblázatban látható.

A legmagasabb hőmérsékleten (450-650 °C) gyulladnak meg a kisebb molekulású gázok, így a hidrogén, a szén-monoxid, a metán, a nagy molekulájú szénhidrogén gőzök gyulladáspontja alacsonyabb (250-300 °C). A környezet melegítő hatása miatt a gyulladási viszonyokat számottevően befolyásolja a tüzelőszerszék konstrukciója is. Kialakításánál fontos szempont, hogy a begyújtás után folyamatosan biztosítsa a később bevezetett tüzelőanyag felmelegítését a gyulladási hőmérsékletig. Megjegyzendő, hogy katalizátorral a gyulladási hőmérséklet alatt is biztosítható az égés feltétele, amit kisebb hőfej-

3. táblázat

Tüzelőanyagok gyulladási hőmérséklete levegőben

Tüzelőanyag	Gyulladási hőmérséklet, °C
gázolaj, tüzelőolaj	240-250
benzin	350-500
generátorgáz	650
szén-monoxid	600
hidrogén	450
metán	650
városi gáz	450
etilén	480
propán-bután	650-750
fa	300
légszáraz tőzeg	240-280
fiatal barnaszén	250-300
idős barnaszén	350-400
feketeszen	400-500
koks	500-600
antracit	500-550

lesztő készülékeknel ki is használnak, láng nélküli exoterm reakcióban égetve el a gázokat.

A gyulladás után az égés zónája kiterjed a térben, a lángfront erre jellemző sebessége a tüzelőanyag jellegétől és a tüzelés módjától függően 0,3 és 10 m/mp közötti érték. A reakciósebesség gázok és gőzök égésénél bizonyos nyomás- és hőmérsékletviszonyok között annyira megnő, hogy az égési sebesség nagyságrendekkel nagyobb, 1–3 km/mp-es sebességet is elérhet, s robbanás következik be. A szokásos égéstől eltérően robbanásnál a folyamat továbbterjedését nem anyagtranszport biztosítja, hanem az égő tartományból kiinduló nyomáshullámok adiabatikusan a gyulladási hőmérsékletig komprimálják a gázkeveréket, a tér nagy részében szinte egyidejűleg következik be a gyulladás. Mivel a robbanás feltételei csak a reakcióban részt vevő elemek bizonyos sztöchiometriai arányánál teljesülnek, a robbanás lehetősége csak az alsó és felső robbanási határ közötti arányoknál áll fenn. A 4. táblázat e határokat mutatja néhány anyagra.

A robbanás okozta katasztrófák kiküszöbölésére a gázt tüzelő berendezésekben megfelelő védelmekkel, a robbanási feltételek kialakulását megakadályozó eszközökkel (a láng kialakásakor az üzemanyag-ellátást reteszelő lángörrel, az újragyulladást akadályozó automatikával stb.) kell elejét venni.

4. táblázat

Robbanási határok levegővel alkotott elegyben 1 bar nyomáson

Gáz, gőz	Robbanási határ, térfogat%	
	alsó	felső
hidrogén	4,1	74,0
szén-monoxid	12,5	74,0
metán	4,1	14,0
etán	3,2	12,5
propán	2,4	9,5
bután	1,6	8,5
acetilén	2,5	80,0
benzin	1,2	7,0
generátorgáz	30,0	75,0
torokgáz	40,0	65,0
olajgáz	3,4	7,8
vízgáz	6,0	70,0
városi gáz	6,0	35,0
MAPP	2,0	14,5

A tüzelőanyagok használati értékét az égés során felszabaduló hő fejezi ki. Ezt a tüzeléstechnikai gyakorlatban a fűtőértékkel (alsó fűtőérték), a kémiai vizsgálatoknál az égéshővel (felső fűtőérték) jellemzik. Az égéshő a tüzelőanyag tökéletes elégésekor fejlődő hő, ha a bevezetett tüzelőanyag és a levegő, valamint az égéstermékek hőmérséklete 20 °C. Ilyenkor az égés során képződött víz folyékony halmazállapotban található az égéstermékekben. A gyakorlatban az égéstermékek magas hőmérsékleten távoznak a tüzelőberendezésekből, és jelentős mennyiségű hőt visznek magukkal. A tüzeléstechnikában a fűtőérték és az égéshő különbségét döntő mértékben a gőz formájában távozó víz okozza. A vízgőz viszi magával egyrészt a 2,3 MJ/kg párolgási hőt, másrészt a felmelegítéséhez szükséges hőt (330 kJ/kg-t a 20 °C-os víz felmelegítéséhez 100 °C-ra, valamint a gőznek 100 °C-ról a kilépési hőmérsékletre történő felhevítéséhez szükséges hőmennyiséget). Újabban olyan hőszolgáltató kazánokat (kondenzációs kazán) is alkalmaznak, amelyekben a hatásfokjavítás érdekében visszanyerik a víz párolgáshőjét.

A hőfejlesztésre használt tüzelőanyagok fűtőértéke 4 és 50 MJ/kg közötti tartományban fekszik, az alsó határt a gyenge minőségű lignit, a felsőt a kőolajtermékek jelölik ki (5. táblázat). Azonos hőteljesítményt biztosító tüzelőberendezések mérete és beruházási költsége általában annál kisebb, minél magasabb fűtőértékű tüzelőanyag elégetésére létesültek. Hasonlóan alakulnak a tüzelőanyagok szállítási költségei is, ezért az alacsony fűtőértékű tüzelőanyagokat (lignit, inert tartalmú földgáz, hulladékgázok) nem gazdaságos nagyobb távolságra szállítani, azokat célszerű előfordulásuk közvetlen közelé-

5. táblázat

Fontosabb tüzelőanyagok fűtőértéke

Tüzelőanyag	MJ/kg
fa	9–17
faszén	31
tőzeg	6,5–17
lignit	3,5–10
barnaszén	21–25
feketeszén	25–33,5
antracit	34,5–35,5
koksiz	25–31,5
tüzelőolaj	42
fűtőolaj	41–42
pakura	38
földgáz	18–40
PB-gáz	45–47

ben felhasználni. A nagyon alacsony fűtőértékű tüzelőanyagok versenyképeségének feltétele a kitermelés alacsony költsége.

Az égéshez szükséges oxigént többnyire levegő bevezetésével biztosítják, magasabb hőmérsékletet igénylő folyamatoknál oxigénben dúsabb égéslevegőt használnak, ami növeli a térfogategységben fejlődő hőt, és csökkenti a füstgázban a ballaszt nitrogén részarányát. Nagyon magas hőmérséklet tiszta oxigén használatával érhető el, kiküszöbölve a levegő nitrogéntartalmának felmelegítéséhez szükséges hővesztéseget, azonban a tiszta oxigén előállítása költséges, ezért a tüzelésnek ezt a módját ritkán alkalmazzák (például hidrogént oxigénben égető rakétáknál, vagy az acetilénnel végzett hegesztéshez). A tökéletes égéshez elméletileg oxigén szükséges, illetve a levegő mennyiségét az 1. táblázatban található reakcióegyenletek által meghatározott sztöchiometriai arány szabja meg. Ezzel azonban nem lehet a tüzelőanyagot teljes mértékben elégetni, mert egyrészt az éghető anyag keveredése a levegővel nem tökéletes, másrészt az anyagok egy része elégetlenül áramlik ki a reakciótérből. Ezért az elméletinél több levegőre van szükség, a tüzelőanyagtól és a tüzelőberendezéstől függő mértékben. Az elméleti értékre vetített szükséges levegőmennyiség aránya – a légfelesleg-tényező – néhány tájékoztató értékét mutatja a 6. táblázat, a rosszul szabályozható tüzelésnél 100%-os többletre is szükség lehet, viszont a szénhidrogént égető tüzelőberendezéseknél néhány százaléknyi többletlevégő is elegendő a jó égéshez.

Technológiai berendezéseknél – így például a fémkohászatban – redukáló atmoszférára is szükség lehet, hogy a tüzelőanyag a jelenlevő oxidokból vonja el az oxigént, ilyenkor levegőben szegény környezetben zajlik az égés.

A tüzelőanyag tökéletes elégését a légfelesleg sem biztosítja, a karbon egy része csak szén-monoxidá éget el (1. táblázat 3. és 12. egyenletei), az égéstermékekben finom szén szemcsékből álló korom válik ki (13–15. egyenletek), az

6. táblázat

Légfelesleg-tényezők

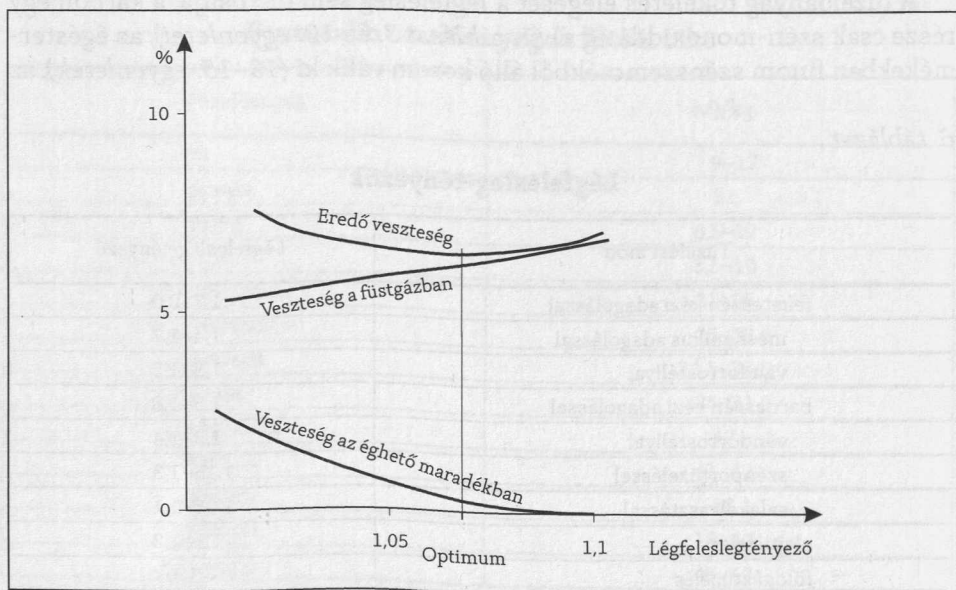
Tüzelési mód	Légfelesleg-tényező
feketeszén kézi adagolással	1,7–2,0
mechanikus adagolással	1,4–1,7
vándorrostéllyal	1,3–1,5
barnaszén kézi adagolással	1,5–1,8
vándorrostéllyal	1,3–1,4
szénportüzeléssel	1,15–1,3
salakolvasztással	1,05–1,1
olajtüzelés	1,1–1,2
földgáztüzelés	< 1,1

égéstérből elégetlen gázok és szállókokszt távoznak. Szilárd tüzelőanyagoknál a pernyében és a salakban is maradnak éghető részecskék (pernyeéghető, salakéghető), ami csökkenti a tüzelés hatásfokát. E veszteségeket több égéslevegő bevezetésével lehet csökkenteni, de ez csak bizonyos mértékig célszerű, ugyanis a légfelesleg növelése növeli a füstgáz mennyiségét, és az azzal távozó hőmennyiséget. Így a légfelesleg függvényében a veszteségek eredőjének helyi minimuma van, ami kijelöli az energetikai optimumot (3. ábra). A légfelesleget nemcsak az energetikai optimum érdekében célszerű a lehetséges minimumon tartani, hanem a környezetszennyező hatások, valamint a berendezések korróziójának csökkentése érdekében is.

A tüztér hőmérsékletét az égés során felszabaduló hő és a veszteségek viszonya szabja meg. A veszteségek kisebb részét a tüzelőberendezés közvetlenül a környezetbe történő hőleadása képviseli, sugárzás és konvekció útján, nagyobbik hányada az égéstermékekben távozik. A magas hőmérsékleten kilépő égéstermékek a hőkapacitásukkal arányos hőmennyiséget szállítanak el, a legnagyobb mennyiséget a füstgáz. Technológiai berendezésekből hőt visznek magukkal a tüztérből távozó gyártmányok, illetve tároló eszközök is. A tüztér átlagos hőmérséklete elméletileg a felszabaduló hőmennyiség és az égéstermékek hőkapacitásának hányadosa, a valóságos hőmérséklet a különféle veszteségek miatt ennél alacsonyabb. Levegőben zajló égésnél a füstgáz jelentős hányadát a ballaszt nitrogén teszi ki. Nagyon magas hőmérsékleten,

3. ábra

A légfelesleg-tényező szerepe



1800-2000 °C felett az égéstermékek molekulái (főleg a CO₂ és H₂O) nagyobb arányban disszociálnak, ami egyrészt hőt von el, másrészt növeli a térfogatot, vagyis csökkenti a hőmérsékletet. Ez korlátozza a szokásos égéssel nyerhető hőmérséklet mértékét, magasabb hőmérséklet eléréséhez a hőfejlesztés más módját kell igénybe venni.

Az égéstermékek kémiai összetétele és halmazállapota a tüzelőanyagtól és az égés körülményeitől függ. Az égéstermékek nagy része gázállapotban távozik, de keletkeznek szilárd égéstermékek is, míg folyékony halmazállapotot csak a kicsapódó gőzök képviselik. A gázokban mindig található karbon és hidrogén tökéletes égéséből származó szén-dioxid és vízgőz, a tökéletlen égés miatt kisebb-nagyobb mennyiségű szén-monoxid, a légszelettség miatt fel nem használt oxigén, valamint – levegőben történő égésnél – a bevezetett oxigénnek kereken négyszeresét kitevő nitrogén. A tökéletlen égés miatt éghető gázok is távoznak, a gáznemű tüzelőanyagoknál hidrogén és metán, a folyékony és szilárd tüzelőanyagoknál különféle szénhidrogén-gázok és gőzök.

A folyékony és szilárd tüzelőanyagok többsége kénszennyezést is tartalmaz. A kén a legkellemetlenebb légszennyező, a legtöbb vegyülete agresszív, az egészségre ártalmas, károsítja az élővilágot és az épített környezetet, s meghatározó szerepük van a füstköd, valamint a savas eső kialakulásában. A kén éghető hányadából kén-dioxid keletkezik. Magas hőmérsékleten, ha a füstgázban sok az oxigén az SO₂ egy részéből SO₃ képződik, a fejlődő kén-trioxid rostélytüzelésnél a távozó kén-dioxid 1,5–3%-a, szénportüzelésnél 0,8%, olajtüzelésnél 0,5–4%. Az olajban előforduló vanádium az SO₃ képződést katalizálja. A kén-dioxid, illetve kén-trioxid nedvességgel kénessavat (7. táblázat, 16. képlet), illetve kénsavat (17. képlet) alkot.

Ha a füstgáz a harmatpont alá hűl, ezek a savak kicsapódnak és megtámadják a fémes szerkezeti anyagokat (alacsony hőmérsékletű korrózió), a légszelettség növekedése megemeli a harmatpontot, fokozva a korrózióvesztést. Az alacsony hőmérsékletű korróziót a légszelettség csökkentésével, inhibitorok adagolásával, kémiai vagy adszorptív leköttetéssel, vagy a füstgáz-hőmérséklet

7. táblázat

Légszennyezők átalakulása a transzport folyamatokban

Képlet	Termék	Reakció
16	kénessav	SO ₂ +H ₂ O=H ₂ SO ₃
17	kénsav	SO ₃ +H ₂ O=H ₂ SO ₄
18	kalcium-szulfát	Ca(OH) ₂ +H ₂ SO ₃ =CaSO ₃ +2H ₂ O
19	kalcium-szulfát	CaCO ₃ +H ₂ SO ₃ =CaSO ₃ +H ₂ O+CO ₂
20	salétromsav	NO ₂ +H ₂ O=H ₂ NO ₃
21	ammónium-nitrát	N ₂ O+2H ₂ O=NH ₄ NO ₃

emelésével lehet ellensúlyozni. Vizes oldatban, vagy aeroszollokkal kölcsönhatásban szulfátok keletkeznek, például a 18–19. egyenletek szerint, amelyek többnyire aeroszolt alkotnak, az átalakulásokat egyes fémek katalizálják.

Alacsony tüztérhőmérsékleten főleg a tüzelőanyagban levő nitrogén oxidálódik, magas, 1000 °C feletti hőmérsékleten a levegő nitrogénjének egy része is. A keletkező nitrogén-oxid fotooxidáns, szerepe van a fotokémiai szmog- és a troposzférában az ózonképződésben, előmozdítja a savas eső, valamint a sztratoszférában az ózonlyuk kialakulását. A nitrogén-oxidok képződése többféle közbenső terméken átvezető komplex folyamat. Néhány száz fokos hőmérsékleten főleg egészségkárosító dinitrogén-oxid képződik, ebben a hőmérséklet-tartományban az N_2O stabil, ezért a környezetbe nagyobb mennyiségben az alacsony tüztér-hőmérsékletű berendezésekből (lakossági kályhafűtés, fluidkazanok) kerül ki. Magasabb hőmérsékleten az N_2O bomlik, ennek következtében a nagy kazánokban 95%-ban NO , 5%-ban NO_2 jön létre (e kétféle oxid közös megnevezése NO_x). Az NO oxigéndús környezetben 600 °C felett, illetve az atmoszférába kikerülve, napfény hatására idővel NO_2 -vé oxidálódik. A nitrogén-oxid képződést a tüztérhőmérséklet leszállításával, illetve a légfelesleg csökkentésével mérsékelni lehet, az utóbbi viszont a szén-monoxid képződés mértékét növeli. Nedvesség jelenlétében kedvezőek a feltetelek salétromsav (7. táblázat, 20. képlet), illetve nitrátok képződésére (például 7. táblázat, 21. képlet).

Elsősorban a szekben található klórszennyezés is, amiből sósav, illetve kloridok képződhetnek. Az olajokban vanádium is előfordul, ami oxigénnel korrózív vanádium-pentoxidot alkot, de különösen agresszív a nátrium-oxid-dal alkotott eutektikuma. Az utóbbinak a lágyulása 570–600 °C körül indul meg, ennél magasabb hőmérsékleten a fémeket és keramikus anyagokat megtámadja (magas hőmérsékletű korrózió). Ezért korlátozzák az olajtüzelésű erőművekben a gőzhőmérsékletet 540–545 °C-ra.

Az éghetetlen szilárd égéstermék, a hamu elsősorban a szilárd tüzelőanyagokra jellemző, kismértékben (<0,5%) folyékony tüzelőanyagoknál is előfordulhat, de gyakoribb a képlékeny állapotú kiülepedés.

A kisméretű szilárd égéstermékek – porok, pernye, korom, szulfátok, nitrátok, szerves vegyületek – nagy részét a füstgáz magával ragadja, és ezek a légterbe távoznak aeroszolk formájában. Ha a láng hőmérséklete magas, az ásványok bomlanak, és ennek következtében fémgőzök is keletkeznek, amelyek későbbi kondenzációja a füstgázban hozza létre az aeroszolk legkisebb méretű részecskéit. A nagyobb méretű granulált szilárd égéstermékek salak formájában visszamaradnak a tüzelőberendezésben.

A füstgázban távozó légszennyező égéstermékeknek sokféle kedvezőtlen hatása van. A kibocsátott gázok többsége – elsősorban az alacsony pH-értékűek – károsítják az egészséget és a környezetet, egyesek súlyos mérgek (például a tökéletlen égésnél keletkező CO) vagy rákkeltő anyagok. A CO_2 , CH_4 és

N_2O üvegházgázok, kibocsátásuk jelenleg a környezetvédelem legsúlyosabb gondja. A szén-dioxid emisszió csökkentésének lehetősége a fosszilis tüzelőanyagok jövőjét eldöntő tényezővé vált. Az Európai Unió néhány országa szén-dioxid-adót is bevezetett (mértéke 50-100 EUR/t CO_2), de ezt fel fogja váltani az általánosabb bevezetésre szánt energiaadó. (A szén-dioxid kivonására és tárolására kutatási stádiumban lévő eljárások várható költségét tonnáként 30-50 USD-ra becsülik, de alkalmazásuk egyhamar nem várható.)

A legegyszerűbben és leghatékonyabban a gázokat lehet eltűzelni, a berendezések egyszerűek és karbantartásuk is könnyű. Többnyire levegővel elkeverve égőkön keresztül juttatják be az égőtérbe a gázt. Miután az jól keveredik a levegővel, a szükséges légfelesleg kicsi, ami az égés jó hatásfokát és magas hőmérsékletét biztosítja. A gázlángban kezdetben pirogén disszociáció alakul ki, szén-monoxid és hidrogén fejlődik, ami szén-dioxiddá és vízgőzzé ég el. A gázégés nagyon kevés hamuval jár, gyakorlatilag csak gáznemű égéstermék képződik. A tüzelést könnyű szabályozni és automatizálni, viszont megfelelő védelemmel kell ellátni a robbanásveszély elkerülésére. A kis légfelesleg miatt fontos feladat a gáz-levegő arány helyes beállítása, túl kevés levegőnél a hidrogén nagyobb égési sebessége miatt a karbon egy része korom alakjában válik ki, a túl sok levegő növeli a füstgáz mennyiségét. Az égőkből kiáramló gáz sebessége is kritikus, ha meghaladja az égési sebességet, a láng leszakad és kialszik. A környezetet a legkevésbé a hidrogén égése szennyezi, hiszen égésterméke víz. A gyakorlati tüzelőanyagok közül a földgáz a legkevésbé környezetszennyező, CO_2 kibocsátása viszonylag kicsi, egyedül az NO_x emisszió okoz gondot. Mérséklésére az égőtér hőmérsékletét csökkentik, a láng elnyújtásával, több helyre szétosztva juttatva be a levegőt, esetleg a tüzelőanyagot is, a hűtéshez füstgázt vagy vízgőzt befújva és hasonló módszerekkel.

A folyékony tüzelőanyagokat is égők segítségével tüzelik el, amelyekkel gondoskodni kell a folyadék diszpergálásáról is. Ennek érdekében a folyadékot vagy finom eloszlású köddé porlasztva fűjják be, vagy – ha nem hajlamos koksizódásra – forró felületen párologtatják el. A folyadékok forráspontja mindig alacsonyabb a gyulladási hőmérsékletnél, ezért a folyadékok a gázokhoz hasonlóan mindig csak gőzfázisban égnak. A hő hatására a nagy molekulájú szénhidrogének egyszerű gázokra, instabil atomcsoportokra és elemi karbonra bomlanak. A gyulladáspont annál magasabb, és az égés annál vontatottabb, minél nagyobbak a molekulák és minél nagyobb a szénhidrogénekben a szénatomok száma. Az egyenlőtlenebb keveredés miatt nagyobb légfelesleg szükséges, mint a gázoknál. Az égéstermékek legnagyobb része gáznemű, csupán minimális mennyiségű szállóhamu keletkezik, valamint a tökéletlen égésnél némi korom. Az olajokban előfordulnak koksizódásra hajlamos alkotók, egyes ásványi szennyezők (V, S) pedig korróziót okozhatnak, ezért az ilyen berendezések elhasználódása gyorsabb, bonyolultabbak és karbantartás-igényesebbek mint a gáztüzelésűeké, viszont könnyen szabályozhatók.

Legbonyolultabb folyamat a szilárd tüzelőanyagok égése. A hő hatására a tüzelőanyagból elillanó éghető gázok és gőzök biztosítják a gyulladást és gázkeverékként égnak. A visszamaradó izzó szilárd anyag határfelületén oxidálódva sokféle fizikai és kémiai folyamat közben bomlik le, és ég el. A rendelkezésre álló idő alatt nem tud tökéletesen kiégni, kiégetlen tartományok maradnak az összesülésre hajlamos szén belsejében és a salakban. A darabos szilárd tüzelőanyagokat kisebb berendezésekben égetőfelületekre, többnyire rostélyokra helyezve égetik el, a szénport pedig égőkön keresztül juttatják a tűztérbe. A tüzelés annál több légfelesleget igényel, minél durvábbak a széndarabok, a porszéntüzelésnél a porszemek nagy fajlagos felülete jobb keveredést és az égés jobb hatásfokát biztosítja. Technológiai berendezésekben előfordul a tüzelőanyag együttes adagolása más anyagokkal, ha a tüzelőanyag a hőfejlesztés mellett kémiai reakciókban is részt vesz (például nagyolvasztóban az ércel, tégláégető kemencében az agyaggal). A tüzelőberendezések bonyolultak, fokozott elhasználódásnak vannak kitéve. A tüzelőanyagok versenyében a szén egyik hátránya, hogy a berendezések gyakori karbantartásra szorulnak, mert több körülmény a széntüzelő berendezések fokozott elhasználódását okozza. Az áramló szén és a szilárd égéstermékek koptatják a szerkezeti anyagokat, a salak és a pernye lerakódhat a felületekre, az agresszív alkotók a berendezések korrózióját okozzák. Az üzemvitel igényes, a szénminőség ingadozása miatt a tüzelést nehezebben és lassabban lehet szabályozni.

A darabos, durva szerkezetű szeneket rostélyos tüzelőszerkezeteken égetik el, ami a szén hordásán kívül az alulról bejuttatott levegő elosztását is végzi. A különféle rostélytüzelések (fix-, ferde-, vándor-, lépcsőzetes bolygatórostély) a kis teljesítménytartományokra szorultak vissza, a ferde és lépcsős rostélyokat inkább a kis hamutartalmú, nem sülő szenekre alkalmazzák, a nagy hamutartalmú szeneket többnyire vándorrostélyokon tüzelik el. A kis széntüzelésű kazánok többsége kézi rostélytüzelésű, ezek magas fűtőértékű feketeszenet, jó minőségű darabos barnaszenet vagy brikettet igényelnek. Gyengébb minőségű barnaszenet csak a ritkábban alkalmazott ferde lépcsős rostélyon lehet tüzelni, de alacsony hatásfokkal. A mechanikus rostélyok kevésbé érzékenyek a szénminőségre, jó minőségű szennel 70-75%-os, gyengébb barnaszenekkel 64-65%-os hatásfok érhető el.

Nagy kazánoknál a szénportüzelés vált kizárólagossá. A szénport az égéslevegő egy részével, az öngyulladás elkerülésére viszonylag alacsony hőmérsékleten, fújják be a kazán tűztérébe. Az égéslevegő nagyobb részét magasabb hőmérsékletre melegítve külön juttatják a tűztérbe. A nagy szenes kazánokban a tűz begyújtására és a stabil égés biztosítására olajbefecskendezést is alkalmaznak, kihasználva a nagymolekulájú szénhidrogéngőzök alacsony gyulladási hőmérsékletét. Az égők konstrukciójára és elhelyezésére sokféle megoldást alakítottak ki azzal a rendeltetéssel, hogy a tüzelőanyag és az égés-

levegő egyenletes keveredését megvalósítsák és megteremtsék a hőátáramoztatáshoz szükséges optimális hőmérséklet-eloszlást. Porszártózézésnél a tűztér legmégebb részén a hőmérséklet 1200-1500 °C-t is elérheti. Kis berendezésekbe a levegőt a kémények természetes huzata szívja be, amit a meleg füstgáz és a környezeti hideg levegő fajsúlykülönbségéből származó felhajtóerő hoz létre. Nagyobb berendezésekben ventilátorok biztosítják a légáramot. Nagy kazánoknál a füstgázveszteség 4-8%, a salakveszteség 1-2%, a tökéletlen égés okozta veszteség 2-6%, kis berendezéseknél e mutatók lényegesen nagyobbak. A bevitt levegő előmelegítése a füstgázzal számottevően javítja az energetikai hatásfokot.

A környezetvédelem érdekében rohamosan terjed a fluid (örvényágyas) tűzézés. Ezt a 20. század elején bevezetett vegyipari technológiát az 1970-es években kezdték tűzézerendezésekben alkalmazni, azóta nagyon sok fluidkázánt helyeztek üzembe, összesített teljesítményük már 80 GW_t³ körül mozog. A fluidkázánokban erős légáramban lebegtetett szilárd részecskékből álló „fluid”-ágyban zajlanak a kémiai reakciók, a karbon és a kén oxidációja, valamint a kén-oxid redukciója. A fluidágy anyaga 0,5-3 mm-es szemcséjű salak, esetleg homokkal megtámasztva, valamint mészkő, amivel a keletkező kén-dioxid 90-95%-a megköthető. Kis teljesítményű fluidkázánokban erősen bázikus salak esetében a mészkőadagolás feleslegessé is válhat. A salakágyba adagolják a salakmennyiség mintegy 2%-a körüli arányban az 5-10 mm-esre őrlött tűzéeranyagot. A jó keveredés következtében az égés viszonylag vékony rétegben játszódik le. A kazánokat ki lehet alakítani fix ággal vagy cirkulációs rendszerrel. Az utóbbinál az erős légáram a részecskéket magasra emeli, a lebegő ágy a kazán teljes térfogatát betölti, majd a kiáramló durvább szemcséjű szilárd részecskéket ciklon segítségével visszakeringtetik az égéstérbe. Különböző szinteken másodlagos levegő befúvásával mozdítják elő a reakciók tökéletesebb lefolyását és a tűztér alacsonyabb hőmérsékletét. A gőzfejlesztés a fluidágyba merülő csövekben történik, a víz előmelegítésével, illetve a gőz túlhevítésével növelhető a termikus hatásfok. Nagy előnye a fluidtűzézésnek, hogy az égés 800-900 °C-on zajlik, és ezen a hőmérsékleten a NO_x képződés csekély. Az alacsony hőmérsékleten az alkáli fémek reakciói sem következnek be, azok a salakban maradnak, így elmarad a berendezés elpiszkolódása és korróziója is. Atmoszférikus nyomáson működő fluidkázánokból ma már kereskedelmi típusok kaphatók ~1000 t/h gőzteljesítményig (~300 MW_e). A teljesítménykorlátok túlhaladását a nyomás alatti fluidkázánoktól várják, amelyekből az első – néhány 100 MW_e-os – példányok kísérleti üzemben működnek. A néhány bar nyomás a kisebb méretű terekben intenzívebb kölcsönhatásokat és nagyobb fajlagos teljesítményeket tesz lehetővé, továbbá a szénadagolás is egyszerűsödik.

A tűzéerendezések alapvető rendeltetése hőfejlesztés, és ennek érdekében a tűzéeranyag és az égéslevegő kölcsönhatásának biztosítása. A műszaki

fejlődés hosszú útja vezetett a nyílt tűzhelyektől korunk bonyolult tüzelőberendezéseig. A legősibb hőforrások a tűzhelyek, amelyek a hőt nyílt térrészen vagy egyszerű zárófelületen keresztül származtatják át. Energetikai hatásfokuk alacsony, az égés alig szabályozható, ezért a fejlett országokban a legtöbb alkalmazási területről kiszorultak. Hatásukat az emberiség fejlődésére és a technika kibontakozására azonban nehéz túlbecsülni. Ma leginkább ételkészítésre használatosak, de vannak technológiai rendeltetésű szerkezetek is, elsősorban anyagok melegítésére.

A tüzelőberendezések legszélesebb családját a kályhák képviselik, elsősorban légterek egyedi fűtésére szolgálnak, de csökkenő mértékben anyagok felmelegítésére is használatosak. A kályhák a hőt tároló közeg közvetítésével adják le, teljesítményük 1–10 kW között mozog. A hőfejlesztés jellegétől és a fűtés módjától függően sokféle kályhatípus létezik. Darabos, szilárd tüzelőanyagokhoz legegyszerűbbek az acéllemez vagy öntöttvas köpenyű és samottbélésű, kis hőkapacitású vaskályhák. A cserépkályhákat nagy hőkapacitás jellemzi. Építenek lassan égő aknás kályhákat, az egyaknásoknál az égés felül, a tüzelőanyag tetején zajlik. A kétaknás (folytonégő) kályhákban alul ég a szén, ami az egyik aknából kapja az utánpótlását, a második aknában – hőátjáratás közben – távozik a füstgáz.

A kályhatüzelés szilárd tüzelőanyagokkal munkaigényes, és szennyezéssel jár együtt. Ezek a hátrányok elesnek a gázkályháknál, amelyeknél megfelelő konstrukciós megoldásokkal csak a robbanásveszélynek és a gázömlésnek kell elejét venni. Sokféle típusú kapható, egyszerű falikályha, parapet alá szerelhető konvektor, cserépkályhába szerelhető égő stb. Az olajkályhák használata kevésbé kényelmes, előnyük a gyors felfűthetőségük. A technológiai célú kályhák legnagyobb számban vízmelegítésre szolgálnak, a más anyagok hevítésére használt kályhák néha bonyolult szerkezetek (például transzformátorokat vákuum alatt szárító kályhák) és e megnevezéssel gyakran tulajdonképp kemencéket illetnek.

A kemencék a belsejükben elhelyezett anyagok vagy gyártmányok felmelegítésére, hőtartására vagy termikus technológiai folyamatokra szolgálnak, így: szárítás, hőkezelés, pörkölés, izzítás, zsugorítás, olvasztás, kémiai reakciók. Felépítésük szerint boksa-, tégely-, kád-, aknás-, cső-, kamrás-, alagútkemencéket különböztetnek meg, s készülnek forgó kivitelű rendszerek is. A kemence közvetlen melegítésű, ha a láng vagy a füstgáz közvetlenül érintkezik a felmelegítendő anyaggal, és közvetett melegítésű, ha az égéstermékek közbenső hőhordozón keresztül adják át hőjüket a felmelegítendő anyagnak. Az aknás kemencékben a melegítendő anyag közös térben van a tüzelőanyaggal, idetartoznak a nagyolvasztók és a kúpoló-, ércredukáló, pörkölő-, fémolvasztó, mészégető, kalcináló, érczsugorító kemencék nagy része. Egyes kohászati kemencékben a tüzelőanyag a hőfejlesztés mellett a kémiai reakciókban is szerepet kap. Ennek legtipikusabb esetét a nagyolvasztók képviselik, ahol az érc oxidjait a tüzelő-

anyagokból kiszabaduló szén és hidrogén redukálja. Az ilyen kemencék üzemvitelét a hőmérség és a kémiai reakcióarányok együttesen szabják meg. Szilárd tüzelőanyagokkal működő közepes nagyságú kemencékre 50-60%-os hatásfok jellemző, szénhidrogén-tüzelésnél viszont 70-80%-ot is el lehet érni. Közvetlen tüzelésű kemencéknél az égők hőleadásának növelése (nagy sebességű égők, sugárzó égők és égőfalak alkalmazása), a hőmérséklet-eloszlás optimalizálása (a láng oda irányuljon, ahol a magas hőmérsékletre szükség van, esetenként a falhoz simuló lángút előnyös stb.), a tüzelőanyag és az égéslevegő optimális arányának automatikus szabályozása, a hőátsharmaztatást rontó szennyeződések lerakódásának megakadályozása (gyakran hatásos víz beporlasztása az égéslevegőbe 1-2% súlyarányban) a legfontosabbak tüztérben belüli lehetőségek, a hatásfok javítására. A hőveszteségek csökkentésében a hőszigetelés minősége a legfontosabb, a szervesetlen, a szálas hőszigetelő anyagok kis rétegvastagsággal is kitűnő megoldást biztosítanak. Lényegesen nehezebb a sugárzás csökkentése abszorbeáló vagy reflektáló felületekkel. Elsősorban a sugárzás magyarázza, hogy az energetikai hatásfok annál alacsonyabb, minél magasabb a kemence üzemi hőmérséklete. Minél magasabb a hőmérséklet, annál nagyobb jelentősége van a kemencéből távozó hulladékhő hasznosításának a betáplált anyagok előmelegítésére, egyéb hőigények ellátására, esetleg magas hőmérsékleten gőzfejlesztésre is. Az égéslevegő hőmérsékletének növelése csökkenti a tüzelőanyag-felhasználást (100°C hőfoknövelés 4-5%-kal).

Nagyon széles körben használják a fluid halmazállapotú hőhordozók felmelegítését biztosító kazánokat. A hőhordozók jellege és paraméterei, a hőfejlesztés módja és a teljesítmény nagysága szerint sokféle rendszert fejlesztettek ki. Teljesítményük a kW tartományban dolgozó kis kazánoktól (például lakásfűtés) a nagy erőművek több GW-os egységéig terjed. A legtöbb kazánt tüzelőberendezéssel építik össze, amelyben szilárd, folyékony és gáznemű tüzelőanyagok alkalmazása egyaránt előfordul. Az energiagazdálkodás rugalmassága érdekében többféle tüzelőanyag felhasználására alkalmas kazánokat is készítenek. A lángcsöves (füstcsöves) rendszerben a hőhordozót tartalmazó tartályt szeli át egy vagy több, a lángot vagy füstgázt vezető cső, a vízcsövesnél a hőhordozó melegítése a tüztérben és a füstgázhuzamban elhelyezett csőrendszerben történik. A lángcsöves rendszer használata kis teljesítményű, elsősorban meleg vizet készítő kazánokra szorult vissza, a korszerű, a nagyobb gőzkazánok kizárólag vízcsövesek. A korszerű kazánok hatásfoka a hőfejlesztés módjától, illetve a tüzelőanyag jellegétől függően kis berendezéseknél 70-80%, nagy kazánoknál 80-90%. Az energiagazdálkodás számára különösen fontos, hogy a kazánok hatásfoka a légérzéketlenebb a tüzelőanyag jellegére, így néhány százalékos hatásfokromlás árán rosszabb minőségű tüzelőanyagok is használhatók, ami azonban rendszerint többletberuházást is igényel.

A legtöbb kazán feladata gőzfejlesztés. A legnagyobb és legbonyolultabb kazánok a hőerőművekben találhatók, itt fordulnak elő a legszélsőségesebb

gőzjellemzők is. A kis- és nagynyomású kazánok közötti határt 6 bar-nál vonják meg, a nagy teljesítményű egységek általában nagynyomásúak, a kis nyomást többnyire csak kis kazánoknál használják.

A gőzkazánok alapvető kérdése a betáplált víz és a fejlesztett gőz cirkulációja. Szubkritikus⁴ rendszereknél ezt a hőmérséklet-különbség által létrehozott fajsúlykülönbség is biztosítja, az így kialakuló természetes vízkeringtetéssel működik a legtöbb kazán. Nagy kazánoknál mesterséges vízkeringtetés is előfordul, a kényszerkeringtetésű kazánokból kilépő közeg áramlását szivattyú biztosítja, ami a hőtelsítmény növelését némi szabályozási többletfeladat ellenében szolgálja. A kényszeráramlású rendszerekben a szivattyú a tápvizet közvetlenül a forrcsővekbe nyomja, a szuperkritikus kazánokra mindig ez a megoldás jellemző (nincs is kazándob), bár elvétve szubkritikus kazánoknál is alkalmazzák.

A víz felmelegítése és forralása csövekből álló fűtőfelületeken keresztül történik. A tüztérben levő csöveket főleg sugárzás, a füstjáratban levőket nagyrészt konvekció melegíti. Változó mennyiségű gőz felhasználásnál a tápvíz mennyiségét és a hőfejlesztés mértékét automatika illeszti a terheléshez. A víz és a gőz arányában bizonyos fokú kiegyenlítő szerepet tölthet be a kazándob, ami egyben hőtárolásra is szolgál. Ilyenkor a tápvizet a tápszivattyú a kazándobba táplálja, a víz onnan áramlik tovább a fűtőfelületekbe. Minél nagyobb a gőznyomás, annál kisebb a kazándob szerepe, a szuperkritikus rendszereket azonban dob nélkül építik. Nagy kazánokba kiegészítő fűtőfelületeket is beépítenek a gőz túlhevítésére és újrahevítésére, a tápvíz előmelegítésére, és az égéslevegő előmelegítésére (léghevítő).

A fűtésben és a használati melegvíz-ellátásban nagy szerepet játszó vízmelegítő kazánok felépítése lényegesen egyszerűbb, mint a gőzkazánoké, ezért sokkal olcsóbbak is. Sokféle teljesítményre készülnek, a háztartások néhány kW_t-os cirkokazánjaitól a központi fűtések 100-1000 kW_t-os berendezésain keresztül a fűtőművek 50-100 MW_t-os forróvíz-kazánjaiig. A fűtésre és vízmelegítésre szolgáló szilárd és folyékony tüzelőanyaggal működő kazánokat nagyon erősen háttérbe szorították a gáztüzelésűek.

A tüzelőanyagok nemcsak hőfejlesztésre szolgálnak, hanem főleg másodlagos energiahordozókká átalakítva erőgépek működtetésére is. Ezek üzemanyagai elsősorban folyékony szénhidrogének (benzin, gázolaj, kerozin, alkoholok stb.) de használatosak különféle éghető gázok (pl. földgáz, PB-gáz, hidrogén) is. Az égés hője a munkaközeg állapotjellemzőit (hőmérséklet, nyomás, térfogat) változtatja meg, a munkaközeggel végzett hőkörfolyamat pedig a mechanikai munkát szolgáltatja. Az állapotjelzők alakulásától, valamint a hőközlés és hőelvonás módjától függően sokféle körfolyamattípus alakítható ki.

Szilárd tüzelőanyagok

Az emberiség első tüzelőanyag-bázisa a természetben gyűjtögetett, valamint a táplálkozásból visszamaradt („konyhai”) hulladékokból álló biomassa volt. Ezzel táplálta az életét kellemesebbé varázsló tűzrakásokat. Az első nagy társadalmi munkamegosztás nyomán ez kiegészült a mezőgazdaság növényi és állati hulladékaival, majd a szerszámok fejlődése módot adott a tűzifa kitermelésére is. A világ legelmaradottabb térségeiben, mintegy 2,4 milliárd ember számára ma is a legnagyobb részt hulladékokból álló biomassa kezdetleges eltüzelése jelenti az energiahasznosítást. Az európai fejlődésben a tűzifa, valamint az abból készített faszén játszotta a főszerepet, amit az első ipari forradalom kezdetétől háttérbe szorított a szén. A 20. században a szén részesedését a világ energiámérlegében 20% körüli értékre csökkentette a szénhidrogének térhódítása. A megújuló energiák előtérbe kerülése új lendületet adott a modern eszközökkel és átalakítási technológiákkal megvalósított biomassa hasznosításának

Szénelőfordulások

A Földön a legbőségebben rendelkezésre álló fosszilis tüzelőanyag a szén, ez teszi ki a műrevaló tüzelőanyag-vagyon háromnegyedét és a feltételezett vagyonnak több mint 80%-át. A földkéregben felhalmozódott széntelepek hosszú földtani korszakok alatt alakultak ki. A szénképződés első fázisában, a tözegesedés során a víz alá került elhalt növények nagy molekulái kisebbekre bomlanak le a mikroorganizmusok hatására lejátszódó, hosszú ideig tartó biokémiai folyamatokban (digenezis). A bomlástermékek egy része gázalakban, vagy vizes oldatban távozik, a visszamaradó szilárd maradék a tőzeg. A növényi szerkezet annál inkább felismerhető, minél fiatalabb a tőzeg. A tőzeglápok évente átlagosan 1 mm-rel vastagodnak jelenleg is, aminek a feltétele kerekén 2 milliméternyi növényi hulladék leülepedése.

Magát a tőzeget is használják tüzelőanyagként, de nagy nedvességtartalma miatt az égéshő nagyrészt a nedvesség elpárologtatását fedezi. Ezért frissen fejtve, nyersen – amikor nedvességtartalma 85-90%-ot is eléri – nem is tüzelhető el. Levegőn szárítva a nedvességtartalom 20-25%-ra csökken, ekkor fűtőértéke 15-17 MJ/kg, ami erősen függ a hamutartalomtól. Kis sűrűsége (0,1-0,8 kg/dm³) és nagy nedvességtartalma miatt nem érdemes szállítani, ezért tüzelőanyagként az előfordulás helyén hasznosítják. Nagy tőzegtelepek mellett kis egységteljesítményű erőművi hasznosítása is előfordul (Oroszország, Finnország), de a tüzeléstechnikai problémák korlátozzák az építhető kazánok méretét, így a megvalósítható blokk nagyság felső határa 100–200 MW_e. A világ ismert tőzegvagyonának becsült hőértéke néhány ZJ, a termelése pedig

EJ nagyságrendű. A kis mennyiségben előforduló hazai tőzeget nem energetikai célokra hasznosítják.

A szénülés a szénképződés második fázisa, amin a süllyedés és a hordalékok következtében a földkéreg mélyébe került tőzeg megy keresztül a hegyképző erők hatására (geokémiai átalakulás). Egyméteres tőzegrétegből mintegy 20 cm-es szénréteg képződik. A Föld mélyében uralkodó nagy nyomás és magas hőmérséklet hatására a kisebb molekulású vegyületek polimerizálódtak és kondenzálódtak, így alakult ki a kőszén nagy molekulású, bonyolult vegyületekből álló kolloidszerkezete. A kőszén 5000-nél nagyobb molekulású szénvázasszerves vegyületekből áll, a karbonnak mintegy 70%-a benzolgyűrűben helyezkedik el. A kémiai összetételű vegyületcsoportokkal jellemzik, a huminiték a növényi sejtfalat alkotó lignin átalakulási termékei, az oxiniték kis fűtőértékű, rideg alkotók, a kitiniték nitrogéntartalmú szerves elegyrészek, a bituminitek oldószerrel kivonható közepes molekulású szénhidrogének. Az utóbbiak a legértékesebb összetevők, ha részarányuk jelentős, a szenet bitumendúsnak nevezik. A szénülés lefolyása függ az egyes geológiai korok növényi anyagának összetételétől és az adott helyen a földkéregben uralkodó viszonyoktól. Minél hosszabb ideig tartott a szénülés, annál nagyobb az elemi összetételben a karbon aránya a többi összetevő rovására, amivel arányosan nő a fűtőérték is. Ez látható néhány tüzelőanyag példáján a 8. táblázatban. A szénülés körülményeinek változatossága következtében a szenek összetétele, kémiai és fizikai tulajdonságai nagyon eltérőek, szinte telephelyről telephelyre változnak.

A kőszén mikroszkóp alatt többnyire sávosszerkezetet mutat, ami gyakran szabad szemmel is megfigyelhető. A sávokat jellegük szerint csoportosítják: a kéreg és levélrészekből képződött üvegfényű, jól kokszolható vitrit hamutartalma kicsi. Az inhomogén növényi részekből keletkezett finom tőzegiszapból képződött durit fénytelen, hidrogén- és hamutartalma nagy, gázfejlődésre hajlamos. A klárit az előbbi két típus közötti átmeneti szerkezet. Üres sejtek ma-

8. táblázat

Elemi kémiai analízis átlagos értékei

Tüzelőanyag	Arány, súlyszázalék		
	C	H	O+N
fa	50	6	44
tőzeg	55-64	5-7	39-35
barnaszén	60-78	4-8	34-17
feketeszen	75-93	4-6	15-3
antracit	94-98	1-3	3-1

radványaiból jött létre a fuzit, főleg karbon és oxigén alkotja, rostos szerkezetű, rideg és porlékony. E legfontosabb struktúrák mellett mások is előfordulnak, például egészen fiatal barnaszemekben a nehezen őrlhető, rostos jellegű xilit.

A széntelepek elsősorban olyan medencékben alakultak ki, ahova a környezetből kevés egyéb hordalék került. E medencék az idők során lassan lesüllyedtek, följük más rétegek rakódtak le, majd újabb tözegképződés után a folyamat megismétlődött, így egymás felett több szénréteg jött létre. A széntelepek egy része a hegységek előtti medencékben keletkezett, többnyire kisszámú, de vastag rétegekben, amelyek vastagsága 100 métert is elérhet. Az egykori tengerek partján kialakuló széntelepek viszont sok egymás felett elhelyezkedő vékony rétegből állnak, szélsőséges esetben több száz réteg is előfordul, a szénmedence mélységbeli kiterjedése több kilométert is elérhet. E rétegek vastagsága néhány méter, köztük a vízzel és széllel kialakult transzportfolyamatokból lerakódó üledékes kőzet (mészkő, homokkő, pala) helyezkedik el. A későbbi kőzetmozgások helyenként megzavarták a széntelepek eredeti helyzetét, törések, vetődések, eltolódások és dőlések alakultak ki, nehezítve mind a kutatás, mind a termelés körülményeit.

A szenek tulajdonságai erősen függenek a koruktól, a legértékesebbek és a legidősebbek a feketeszenek, ezek fűtőértéke a legnagyobb (a felső határ 33 MJ/kg). A jó minőségű feketeszenek anyagát a karbonkori mocsárerdők szolgáltatták. E kor buja, főleg zsurlókból, páfrányfélékből, korpafüvekből álló elhalt növényzete az altalaj lassú süllyedése és a vízszint emelkedése közben folyamatosan tözegesedett, majd a későbbi kéregmozgások hatására betemetődött. Kevésbé szénült feketeszenek a későbbi időkben is keletkeztek. A legidősebb feketeszen az antracit, teljesen homogén, sávos szerkezetet sem mutat, rideg, kagylós törésű, fémesen csillogó szénféleség, illótartalma csekély, ezért nehezen gyullad, füst nélkül ég, nem kokszolható. Az antracit és a barnaszemek között különböző átmeneti csoportok vannak, rövidebb szénülési idővel és eltérő tulajdonságokkal. A hosszú lángú szén sok illóanyagot tartalmaz, rosszul kokszolható, lángkemencék ideális tüzelőanyaga. A gázzsén kisebb lánggal ég, könnyen gyullad, gyengén kokszolható, főleg gázfejlesztésre előnyös. A kokszzsén (zsírzsén) a többi feketeszénnél lágyabb, szilárdsága is kisebb, viszont jól összesülő, nagy szilárdságú kokszt lehet belőle előállítani. A kovácszsén is jól kokszolható, de keményebb a kovácsolás igényének megfelelően. A sovány kőszén (energetikai szén, steam coal) kevés illóanyagot tartalmaz, nem sülőképes, rosszul kokszolódik, főleg kazánok tüzelőanyaga.

A barnaszemek jóval később képződtek, többségük az eocénkor sűrű láperdőiből, amelyek hasonlóak voltak a mai kor trópusi, szubtrópusi és mérsékelt égövi növényzetéhez. Összetételük és tulajdonságaik alapján a barnaszemek között szárítva széteső földes, egyenetlen törési felületű darabos, kagylós törésű majdnem szurokfekete, és nagy bitumentartalmú bitumenes barnaszéntípusokat szoktak megkülönböztetni. Külső megjelenésük alapján földes, lágy, fény-

telen és fényes megjelölés is használatos. A barnaszén alkotó krisztallitok sok micellából állnak, azokhoz kollodiálisan kötött víz, valamint sokféle szerves és szervetlen vegyület kapcsolódik. A barnaszének közül a 38%-nál kisebb bányanedvességűek a kemény barnaszének, az ennél nagyobb nedvességűek pedig a lágy barnaszének, de a mindennapos szóhasználatban csak az első csoportot nevezik barnaszénnek, a második csoportra a lignit megnevezés használatos. A lignit a legfiatalabb szén, amelynek szerkezete még erősen fás. Nagy nedvesség- és hamutartalma miatt fűtőértéke is alacsony (3,5–10 MJ/kg), kedvezőtlen tüzeléstechnikai tulajdonságai miatt gazdaságosan csak nagy kazánokban tüzelhető el. Nem túl vastag takarórteg alatt található kiterjedt rétegekben, így külfejtéssel hatékonyan lehet kitermelni.

A feketeszenek és a barnaszének megkülönböztetése megállapodás kérdése. A magyar szabvány az európai gyakorlatnak megfelelően 24 MJ/kg égéshőnél jelöli ki a két széntípus határát, egyensúlyi nedvességtartalom mellett és hamumentes állapotra vonatkoztatva. A tüzeléstechnikai gyakorlatban az égéshő helyett a hamutartalmat is magában foglaló mennyiségre vonatkoztatott fűtőértéket veszik figyelembe a szén minősítésénél, ami kevésbé éles kategorizálást eredményez, a feketeszen és barnaszén választóvonalára 17-20 MJ/kg körül helyezkedik el. Az OECD statisztikáiban 23,865 MJ/kg (5,7 Mcal/kg) felett helyezkedik el az antracit, a kokszzszen és a bitumendús szén, 23,865 és 17,435 MJ/kg között a szubbitumenes szén, és ez alatt a lignit.

A kereskedelmi forgalomban a fűtőérték mellett a fix karbontartalom és az illóarány a legfontosabb mérce. A szén fontos alkotói a hevített szénből gáz- és gőzalakban kilépő illókomponensek. Arányuk annál nagyobb, minél fiatalabbak a szén, a szárazanyagra vonatkoztatott illótartalom antracitban 4-9%, sovány feketeszenekben 7-17%, zsíros feketeszenekben 20-40%, barnaszénben 40-60%. A gyulladási viszonyokat az éghető illók – CO, H₂, CH₄ és más szénhidrogéngőzök – határozzák meg, az illók között vannak éghetetlen komponensek – H₂O, CO₂, NH₃, H₂S, valamint különféle kloridok is.

A szén osztályozására többféle rendszert használnak, eredetük, illetve fizikai és kémiai tulajdonságaik alapján. A széndarabok mérete szerint a 20 mm feletti szemnagyságot többnyire durva, az az alatti apró szemű szénnek nevezik. A 9. táblázat mutatja a magyar szabványban alkalmazott megnevezéseket a mérethatárok alapján, de a telephelyek szerint azoktól némileg eltérő méretek is megengedhetők.

Hazánkban a júrakori tengerparti mocsarakból származó feketeszen található a Mecsekben. Több vonulatban, 600-800 m mélységben, meredek dőlésű, töréses, gyűrt szerkezetű telepekben helyezkednek el. Az előfordulásokban található szén minősége eltérő, többnyire erősen morzsolódott, apró szemű állapotban található, nagy hamutartalmuk miatt fűtőértékük alacsony, egy részük kokszolható. Bányászatukat a magas termelési költségük miatt beszüntették.

Szenek méret szerinti osztályozása

Osztály	Mérethatárok, mm
aknaszén	nincs
darabos szén	>80
rostált aknaszén	>40
kockadarabos szén	80–40–50
dió	40–20
mogyoró	15–25
rostált dara	10–20
por	<10
iszap	<3

A magyar minőségi barnaszének többsége a Vértes, Gerecse, Pilis előterében az eocénkorban keletkezett, a Pannon-tenger part menti öbleinek növényzetéből. Illóalkotókban dúsak, így jól gyulladnak, és hevesen égnek, hamujuk alkálitartalma nagy, ezért salakosodásra hajlamosak. Tatabánya térségében a rétegvastagság 4–30 m, ami a Balaton irányában elvékonyodik, csökkenő fűtőértékkel, de növekvő kátránytartalommal. Kevésbé jó minőségű a Bakony északnyugati oldalán elhelyezkedő Ajkai-medencében 1–3 m-es rétegekben található krétakori szén. Gyengébb minőségűek a borsodi terület miocénkorú, valamint a Nógrádi medence és a Sajó-völgy oligocénkori szenei is. Ezek a felszínhez közel elhelyezkedő széntelepek szétdaraboltak és vékonyak (0,7–6 m). Karbonban dúsak, de illótartalmuk kicsi, nehezen gyulladnak. Szilikátdús hamujuk ásványtartalma nagy, ezért kemények. A magyar barnaszénbányászat fokozatosan leépül, egyrészt a bányák vagyonának kimerülése, másrészt a termelés versenyképtelensége miatt.

A Dunántúlon (Várpalota, Torony, Hidas) és a Mátra-Bükk déli peremén (Visonta, Bükkábrány) nem nagy mélységben 3–8 m-es rétegekben található pliocénkorú lignit. Szerkezetük erősen fás, nedvességtartalmuk (43–50%) és hamutartalmuk (15–35%) magas, fűtőértékük (4,2–8,4 MJ/kg) alacsony. A külfejtésben termelhető lignit versenyképes erőművi tüzelőanyag, a visontai lignitre települt legnagyobb szénerőművünk (Mátrai Erőmű), a ténylegesen már megnyitott bükkábrányi előfordulásra további 1 GW körüli kapacitás telepíthető, ami valószínűleg meg is épül. Az viszont valószínűtlen, hogy a dunántúli lignit-előfordulások kitermeléséhez sikerül a lakossági hozzájárulást elnyerni.

A szénben a felhasználás szempontjából különféle nemkívánatos alkotók találhatóak. E ballasztanyagok szállítása és manipulálása energiát emészt fel, többségük csökkenti a tüzelés hatásfokát és hőmérsékletét, és gyakran ártal-

mas környezetszennyezők. A nemkívánatos alkotók közé tartozik a nedvességtartalom is, ami annál nagyobb, minél fiatalabb a szén. A feketeszenek nedvességtartalma nem haladja meg a 10%-ot, a barnaszenek és lignitek erősen higroszkóposak, nedvességük 50%-ot is megközelíthet. A szénben lévő durva nedvesség légköri viszonyok között természetes száradás közben magától is elpárolog (például ha a szenet szétterítve állni hagyják). Ennek előrehaladásától függően a szén nedvességtartalma függ a tárolás körülményeitől. A visszamaradó higroszkópos nedvesség legnagyobb része a szerves szénanyaghoz kötődik, kisebb hányada a szervetlen vegyületekhez kapcsolódik. A kolloid szerkezetű szén szemcséinek felületén adszorpciósan és a kapilláris csatornában lekötött nedvességet csak 100 °C feletti szárítással lehet eltávolítani, a vegyületek hidratvíze csak a tüzelés során, a vegyületek szétbontásához szükséges magasabb hőmérsékleten távozik el. A felületarányok miatt a szemcse-nagyságnak jelentős a befolyása a nedvességtartalomra.

A tüzelés magas hőmérsékletén a szénekben eredetileg található ásványi anyagok és vegyületek megváltoznak, oxidáció, pirolízis és más reakciók során keletkező szilárd égéstermék a hamu. A hamu kémiai összetétele és mennyisége lelőhelyfüggő, a szén száraz tömegére vetített aránya szélsőséges esetben 50%-ot is elérhet. A hamu szabad és kötött komponensekből áll. A szabad hamu a bányaművelés során a szénhez keveredett, rendszerint palás meddő kőzetekből képződik, mennyisége a művelés és szénelőkészítés technológiájától függ. A leggyakoribb hamuképző ásvány az agyag és a kaolin, de előfordul pirit, mészpát, vaspát, ankerit, dolomit, hematit, kvarc, különféle karbonátok, szulfidok és oxidok. A szabad hamut az anyagjellemzők eltéréseit kihasználó fizikai eljárásokkal el lehet különíteni a széntől. A szénben finoman eloszló kötött hamu mennyisége a szén keletkezési körülményeitől függ, főleg szervetlen vegyületekből áll, a domináns rész SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , Fe_2O_3 , de előfordulnak más (Mg, Na, K, Ti, P) oxidok is. E hamu fizikai eljárásokkal nem távolítható el, mennyisége a szén jellemzői közé tartozik. A jó minőségű szén hamujában többnyire a savas alkotók (Si, Al) dominálnak, s minél gyengébb a szénminőség, rendszerint annál több a lúgos összetevő (Ca, Mg, Na), ami a hamu kémhatását és későbbi viselkedését befolyásolja. A hamuban mintegy 50-féle fém, köztük sokféle nehézfém vegyületei is előfordulnak, a láng magas hőmérsékletén a kémiai kötések bomlanak, és a fémek szabadbá válnak. A hazai szeneinkben előforduló nehézfémek koncentrációja elég széles határok – néhány mg/kg és g/kg – között mozog. Ugyancsak sokféle fémet juttat az égéstermékekbe a kénlekötéshez használt mészke is. A szénben előforduló mérgező nyomelemek (Cd, As, Pb, Hg stb.), valamint természetes eredetű radioaktív anyagok (U és Th sor elemei, ^{40}K stb.) koncentrációja a salakban vagy zagyban feldúsulva veszélyes mértéket érhet el. Az égés során felszabaduló fémek, illetve fémtartalmú oxidok és kloridok egy része a pernyéhez kötődik (As, Cd, Cu, Pb, Sb, Se, Zn), számos fém egyenletesen oszlik meg a

salak és a pernye között (Al, Ba, Ca, Ce, Cs, Fe, K, Mg, Mn, Th), vannak a salakban dúsulók (Cr, Ni, U, V), néhány elem (Br, I, Hg) pedig gázfázisba kerül. A füstgázkezelési eljárások a Hg és Se kivételével a nehézfémek jó részét is kivonják, azok főleg a zagyba kerülnek, bár némi arzén és kadmium a távozó füstgázban is kimutatható.

Rostélytüzelésnél a szenek hamutartalmának 80-85%-a, szénportüzelésnél ~10%-a a nagyobb darabokká összesült salak formájában válik ki, a többiből kis méretű, granulált részecskékké összeállt pernye képződik, ami szállópor jelleggel a füstgázban távozik. A salak rendszerint tartalmaz némi éghető anyagot (salakéghető), ha ez jelentős mennyiség, akkor utóégetéssel csökkentik a veszteséget. A salak kémiai összetétele szénfajtánként lényegesen eltérő, lágyuláspontja 1000 és 1500 °C között van, olvadáspontja ezt meghaladja és annál magasabb, minél nagyobb a savas alkotók aránya a bázikus alkotókhoz képest. A meglágyult hamu lerakódhat, vagy rásülhet a szerkezeti elemekre, rontva a hőátadást és zavarva az áramlást, ez üzemzavarokat is okozhat. Többnyire olyan hőmérsékleti viszonyokra törekednek, hogy a salak szilárd rögök formájában legyen eltávolítható (granuláló tüzelés). Alacsony olvadáspontú salakot folyékony állapotban is el lehet távolítani, ha a tüztérben a hőmérséklet meghaladja az olvadáspontot (salakolvasztó tüzelés).

A pernye összetétele elsősorban a hamu jellegétől függ, de a tüztérben, majd a légtérbe kilépve különféle fizikai és kémiai kölcsönhatásokban vesz részt. Kén-, illetve nitrogén-oxidokkal légzőszervi ártalmakat okozó szulfátokat, illetve nitrátokat alkotnak, egyesek katalizátorként elősegítik kénessav képződését az SO_2 -ből. A füstgázáram a gáznemű és szilárd alkotók mellett olvadt részecskéket is magával ragad. A pernye legkisebb méretű, finom szemcséit azok a gőzök hozzák létre, amelyek magas hőmérsékleten elpárolognak, és a későbbiek során a hidegebb huzamokban újra kondenzálódnak. Ezek a légzőszervi ártalmak legfőbb okozói, mert kis méretük révén a mélyebb légutakba is bejutnak. A pernye éghető anyagokat (pernyeéghető) is tartalmaz. A pernye koptatja az áramlás útjába eső szerkezeti anyagokat, kedvezőtlen áramlási viszonyoknál lerakódhat, rontja a hőátadást, és csökkenti az áramlási keresztmetszetet.

A széntüzelésnél komoly gond a szilárd égéstermékek elhelyezése, amihez a kénmentesítés hulladékai is társulhatnak. Törekvés tapasztalható a veszélytelen hulladékok hasznosítására, például építőipari anyagok adalékaként (gipsz, pernyebeton, salakszigetelés), vagy útépitéshez, de a piaci felvevőképesség korlátozott, és a minőségi követelmények sem mindig elégíthetők ki. Kedvező feltételek esetében visszatölthetők a közeli külfejtéses bányákba, de többnyire lerakóhelyekről (zagyter) kell gondoskodni. Az erőművekből vizes zagy formájában kiszállított hulladékban lehetnek veszélyes alkotók (nehézfémek, radioaktív anyagok, agresszív ásványok), ezért a talajvizek védelmére a zagyterek alját megfelelő szigeteléssel kell borítani, felületét pedig meg kell

kötni, hogy szél vagy csapadék ne hordhasson ki káros anyagokat. A tevékenység befejeztével gondoskodni kell a zagyterek rekultiválásáról.

A legtöbb szénben jelentős a kéntartalom, átlagosan 0,5-2,5%, de barnaszénknél ez néha 5%-ot is elérhet. A kén egy része (5–30%) – főleg a pirit – fizikai eljárásokkal, például mosással eltávolítható. A kén éghető és nem éghető formában fordul elő a szénben. Nem éghető a gipsz vagy a vasszulfát alakjában jelen levő kén. Éghető egyrészt a kőszenet alkotó szerves molekulákba beépült szerves kén, másrészt a szulfid kén, ami legtöbbször pirit formájában összefüggő vékony rétegeket és ereket képez. Az éghető kén nagyobbik hányada égetéskor vagy lepárlás során kén-dioxid formájában távozik a füstgázban, elég magas hőmérsékleten, és légfelesleg mellett kevés kén-trioxid is képződik. A kén egy része, miután a tüzelésnél kialakuló magas hőmérsékleten komplex reakciókban vett részt, a hamuban megkötve visszamarad. A lekötés a salakban és a pernyében egyrészt a bázikus hamualkotók (CaO, MgO) mennyiségétől függ, ezek kénhez viszonyított sztöchiometriai aránya 1 és 2 között optimális. Másrészt a kölcsönhatás módján múlik a megkötés mértéke, ami porszéntüzelésnél az éghető kén 8-20, fluid tüzelésnél 50-80%-a.

A szénben a nitrogén szerves kötésben fordul elő, fizikai eljárásokkal nem távolítható el. Nem közömbös a szén klórszennyezése sem, mivel víz jelenlétében agresszív sósavat képezhet.

A világ műrevaló szénvagyon 2002 végén 984 Gt volt (10. táblázat), e mennyiség 52%-a fekete-, a többi barnaszén, de a fűtőérték szerinti megoszlásban a feketeszén részesedése 83%. A vagyonbecslés feketeszénnél az 1200 m-nél nem mélyebben fekvő és 30 cm-nél vastagabb rétegekre terjed ki, barnaszénnél és lignitnél pedig 500 m-es mélységig veszik figyelembe az előfordulásokat. A számbavételt nehezíti, hogy nagyon eltérő fűtőértékű szenek mennyiségét kell összegezni. Ennek áthidalására vezették be az egyezményes tüzelőanyag (ETA⁵) fogalmát.

A 10. táblázatban látható ellátottsági értékek (a vagyon és a jelenlegi termelés hányadosa) szerint a jelenleg kitermelhetőnek minősített vagyon is hosszú

10. táblázat

A világ műrevaló szénvagyonja

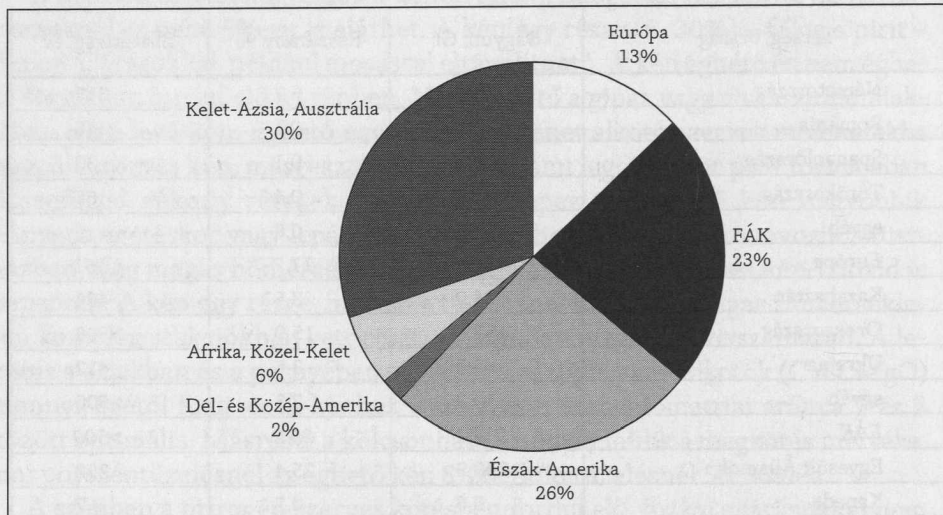
Térség, ország	Vagyon, Gt	Részarány, %	Ellátottság, év
Bulgária	2,7	0,3	100
Csehország	5,7	0,6	90
Egyesült Királyság	1,5	0,2	50
Görögország	2,9	0,3	40
Lengyelország	22,1	2,3	138
Magyarország	1,1	0,1	85

10. táblázat folytatása

Térség, ország	Vagyon, Gt	Részarány, %	Ellátottság, év
Németország	66,0	6,7	317
Románia	1,5	0,1	48
Spanyolország	0,6	0,1	30
Törökország	3,7	0,4	68
egyéb	6,9	0,8	
<i>Európa</i>	<i>114,8</i>	<i>11,7</i>	<i>161</i>
Kazahsztán	34,0	3,5	464
Oroszország	157,0	15,9	>500
Ukrajna	34,1	3,5	412
egyéb	12,0	2,3	>500
<i>FÁK</i>	<i>237,1</i>	<i>25,2</i>	<i>>500</i>
Egyesült Államok	249,9	25,4	252
Kanada	6,6	0,7	9,7
Mexikó	1,2	0,1	101
<i>Észak-Amerika</i>	<i>257,7</i>	<i>26,2</i>	<i>240</i>
Brazília	12,0	1,2	>500
Kolumbia	6,7	0,7	16876
Venezuela	0,5	0,1	60
egyéb	2,4	0,1	
<i>Közép- és Dél-Amerika</i>	<i>21,6</i>	<i>2,1</i>	<i>404</i>
Dél-afrikai Köztársaság	49,5	5,6	221
Zimbabwe	0,5	0,1	122
Közel-Kelet	1,7	0,2	>100
egyéb	5,3	0,5	>100
<i>Afrika és Közel-Kelet</i>	<i>5,3</i>	<i>0,5</i>	<i>>100</i>
Ausztrália	82,1	8,3	243
Észak-Korea	0,6	0,1	9
India	84,4	8,6	235
Indonézia	5,4	0,5	52
Japán	0,8	0,1	197
Kína	114,5	11,6	82
Pakisztán	2,3	0,1	134
Thaiföld	1,3	0,1	64
Új-Zéland	0,5	0,1	187
egyéb	2	0,1	54
<i>Délkelet-Ázsia</i>	<i>293,9</i>	<i>29,5</i>	<i>164</i>
<i>világ</i>	<i>984,2</i>	<i>100</i>	<i>204</i>

4. ábra

A világ műrevaló szénvagyonának regionális megoszlása



időre fedezi a szükségletet, a legalább 5 Tt-ra becsült feltételezett szénvagyon pedig sokszorosa a műrevalónak. A szénvagyon regionális megoszlását a 4. ábra szemlélteti.

A magyar szénvagyon nagyságának megítélése ellentmondásos. A Magyar Geológiai Szolgálat jelentős ipari szénvagyont tart nyilván, feketeszénből 226,

11. táblázat

A fontosabb magyar bányatérsegek

Térség	A szén jellege	Átlagos fűtőérték, MJ/kg	Hamutartalom, %	Nedvesség- tartalom, %	Kéntartalom, %	Becsült műrevaló vagyon, Mt
Mecsek	jurakori feketeszén	12*-17**	38-42	7,5	2	13
Ajkai-medence	krétakori barnaszén	8-9	33	20	2,6	8-9
Balinka	eocénkori barnaszén	11	36	18	3	13-14
Oroszlányi terület	eocénkori barnaszén	11-12	38-48	12-14	3,6-4	30
Tatabánya	eocénkori barnaszén	13	26	24	2,4	4-6
Borsodi terület	miocénkori barnaszén	10	31	25	1,8	30
Mátra-bükkaljai lignit	pliocénkori lignit	6,5	19	49	2	630

* külfejtés

** mélyművelés

barnaszénből 263 és lignitből 2693 Mt-t. A földtani vagyon ezek összegének legalább háromszorosa. Más vélemények szerint e vagyonbecslések túlzóak, az előfordulások nagy része nem műrevaló, és a legtöbb bezárt szénbányánk kitermelésre érdemes vagyona elfogyott. Néhány szénmedencénk jellemző adatai a 11. táblázatban láthatók.

A szén felhasználása

A szén legnagyobb részét eltüzelik, a többiből másodlagos tüzelőanyagokat (kokszt, brikett, gáznemű és cseppfolyós termékek) állítanak elő. A szerves vegyipar kifejlődésekor a barnaszén, illetve az abból nyert termékek voltak a legfontosabb nyersanyagok. Ez a szerep megszűnt, mert a kőolaj és a földgáz nemcsak olcsóbb és könnyebben kezelhető nyersanyagoknak bizonyultak, hanem az alapanyagok sokkal szélesebb spektrumának előállítását tették lehetővé.

A szén eltüzelhetőségét régóta ismerték. Már az ókorban is előfordult, hogy kovácsoláshoz és öntéshez szenet használtak, de alkalmazása nem terjedt el, mert a fát könnyebb volt kitermelni és eltüzelni. Angliában és Skóciában a felszínre kibúvó rétegeket már a római kor óta bányászgatták, sőt „tengeri szén” néven még a kontinensre is eljutott. Az erdők ritkulása miatt a 9–10. században szórványosan már előfordult a fa helyettesítése szénnel. A 13–14. században kormozó füstje miatt még több városban szigorúan tiltották a széntüzelést, Angliában egy 1273-ban kiadott királyi rendelet intézkedett erről, aminek megszegése miatt I. Eduárd állítólag le is fejeztetett egy londoni polgárt. Ezek ellenére a fa drágulása és gyakori hiánya miatt a szénhasználat terjedt.

Az első szénbányákat 1350 táján nyitották meg a Ruhr-vidéken és Szászországban. A 16–17. században a gyorsan növekvő vas- és acéligények biztosításához hatalmas erdőségeket kellett kipusztítani, hogy biztosítsák a kohók redukáló anyagaként használt faszenet. Ennek következtében Angliában és Hollandiában nagy faválság bontakozódott ki. A fahiány megakadályozására, az erdők védelmében rendeletekkel korlátozták a kohók létesítését (akkor ezt még nem nevezték környezetvédelemnek), az új kohókat az erdőkben bővelkedő Svédországba és Oroszországba telepítették. A tűzifa árának emelkedése és a visszatérő ellátási zavarok megnyitották az utat a szén használata előtt, a városokban a 17. században már növekvő mértékben alkalmazták lakóházak fűtésére, majd ipari célokra is. Az iparosodó Angliában a szén gyors térhódítása következett be, a 17. század közepére a termelés elérte a 3 Mt/év-et, ami az akkori európai termelés 4/5-e volt. Az ércbányászati módszerek alkalmazásával megindult a mélyműveléses szénbányászat, amiben jelentős szerepet játszottak a vízemelésre használt első, kezdetleges gőzgépek (Savery és New-

comen konstrukciói). A nagyléptékű bányászkodásra Watt nagy teljesítményű gépe nyitotta meg a lehetőséget. A vasipar fejlődése jobb tüzelőberendezések előállítását tette lehetővé, amelyekben tökéletesebben lehetett elégetni a szenet. Lassan kiderült, hogy a pótanyagnak tekintett szén hatékonyabb tüzelőanyag, mint a fa, nagyobb a fűtőértéke, magasabb a tűztérben a hőmérséklet, olcsóbb, mert a bányák koncentráltan, nagy mennyiségben és hatékonyan tudják termelni. Az angol kormány pályázatot hirdetett a szén kokszosítására, ennek sikere a 18. század elejére lehetővé tette a faszén kiküszöbölését a kohászatból, ez az acélipar fejlesztésének is nagy lökést adott.

A szén-szükségletet különösen megnövelte a gőzgép térhódítása, a szén vált a kibontakozódó ipari forradalom fő tüzelőanyagává. A gőzgép sikeres pályafutását a kőszénnel összefonódva érte el. A szén remek tüzelőanyag a gőzfejlesztő kazánokban, a gőzgép nagyszerű erőgép a széntermelésben. Már az első gőzgépek jelentős része is a szénbányákba kerül emelőgépek, vízszivattyúk és szellőzők hajtására, az első gőzmozdony rendeltetése, hogy a Darlingtonban kibányászott szenet Stocktonba juttassa, és az első gőzhajók is jórészt szenet szállítottak. Az energiaigényes ipartelepek is a szénvidékek közelébe települtek, a széntelepek körül jelentős ipari városok jöttek létre. A szén és a gőzgép diadalmenete nem állt meg az iparnál, a gőzhajó és a gőzmozdony révén a közlekedésben is egyeduradalomra tett szert, majd a mobil gőzgépek révén betört a mezőgazdaságba is. Szénből fejlesztették a világító-, illetve a városi gázt, szén volt a kibontakozó vegyipar alapanyaga, majd a 19. század vége felé megjelenő villamosság forrása.

A 19. századot a szén gyors térhódítása jellemezte, a szénfelhasználás az iparosodás fokmérőjévé és a gazdagodás alapjává vált. A szén világtermelése 1800-ban 10 Mt/év körül mozgott, és a 19. század végére közel százszorosára nőtt. A szénbányavállalatok, többnyire a kohászattal összekapcsolódva, rendkívül nagy gazdasági erővel és befolyással rendelkező vállalatbirodalmakká nőttek. Regionális szerepük idővel országos jelentőségűvé fejlődött, a bankokkal összefonódva kulcsszerepet játszottak az ipari országok gazdaságában. A szén vitathatatlanul látszó hegemoniáját azonban a 19. század végén új energiahordozók – a kőolaj és a villamos energia – kezdték megtörni, majd a 20. század során visszaszorítani, amihez hozzájárult a földgáz térhódítása is.

A 20. században a szénhasználat műszaki hátrányai, magas munkabérekkel párosuló nagy munkaerő-szükséglete, szállítási kapacitás igényessége, a szénhidrogénénél nehezebb kezelhetősége, környezetszennyező jellege, valamint a szénhidrogén olcsósága számos fejlett országban aláásták a szén versenyképességét, amit még jelentős állami támogatással sem sikerült fenntartani. Tovább rontotta a szén pozícióját a század második felében a környezetvédelmi követelmények szigorodása. Ezek következtében a fejlett országokban a szénhasználat nagyrészt a villamosenergia-termelés és a kohászat területére szorult vissza. A legnagyobb szénfogyasztók az erőművek,

ezek hasznosítják a világon kibányászott szén több mint felét. A szénhidrogének előnyei miatt csökkenő az ipari kazánok és különösen a kemencék szénfelhasználása, valamint a lakossági széntüzelés. A világ széntermelésének mintegy 20%-át kokszolják, az évente előállított kokszmennyiség ~400 Mt.

Az Európai Unió (illetve korábban a Montánunió) liberalizált piaci viszonyai több országban (például Belgiumban) a szénbányászat nagy részének leépüléséhez vezettek. Néhány állam főleg a foglalkoztatottság fenntartása és az energetikai ellátásbiztonság érdekében dotációkkal törekszik a széntermelés életben tartására, ezt viszont az Európai Unió csak vonakodva tolerálja. A támogatási politikát Németország és Spanyolország hosszabb időre kívánja fenntartani, Franciaországban és az Egyesült Királyságban megszűnően van. Az európai szénbányászat nagy részének válságos helyzetét tovább mélyítette a jó minőségű, olcsó tengerentúli szén kínálata. Néhány nagy fejlődő országban (többek között Kínában és Indiában) a szénfelhasználás nagyarányú növekedésével számolnak, mert a növekvő energiaigények fedezésére a széntermelést tudják a legkönnyebben és legolcsóbban növelni. Ez a növekmény az üvegházhatás visszaszorításában okoz majd komoly gondokat.

A szénbányászat nagy erőfeszítéseket tesz piaci helyzetének stabilizálására. A gazdaságtalan bányákat bezárják, a termelést nagy kapacitású üzemekbe koncentrálják, a drága élőmunkát gépesítéssel és automatizálással helyettesítik, növelik a munkagépek egységteljesítményét, hasznosítják az információtechnika új lehetőségeit a geológiai kutatásban és az üzemirányításban, környezetbarát technológiákat és tüzelőanyagokat fejlesztenek, előnyös feltételeket ajánlanak a szénfogyasztóknak stb. Korunk energiagazdálkodásának egyik nagy ellentmondása, hogy a legbővebben rendelkezésre álló tüzelőanyag felhasználása visszaszorul. E helyzet megváltoztatásának egyik útja a szénből felhasználóbarát folyékony és gáznemű tüzelőanyagok előállítása. A másik lehetőség olyan technológiák alkalmazása, melyek megakadályozzák a környezetet veszélyeztető égéstermékek kibocsátását. Ezt a legtöbb káros anyagra gyakorlatilag kifejlesztették, de a szén-dioxid visszatartásának és közömbösítésének megoldása várat magára.

A világ energiaszerkezetében részarányának maximumát a szén az 1930-as években érte el, amikor a primer energiahordozóknak több mint felét tette ki, ez az arány a 20. század végére mintegy 20%-ra csökkent. A részesedés csökkenése mellett azonban a széntermelés tovább emelkedett, és további növekedést prognosztizálnak a jövőre is. A növekedés átlagos üteme 1% alatt van, de 2002-ben 2,8%-ra ugrott, amiben alapvető szerepe volt a Kínában bekövetkezett 28%-os drámai növekedésnek. A világtermelés 2002-ben feketeszénből 3,6 Gt-t, barnaszénből és lignitből 0,9 Gt volt. A világon bányászott szilárd ásványi anyagok mintegy 80%-át még mindig a szén teszi ki. Az egyezményes tüzelőanyagra átszámított összesített értékek 3,1-3,3 Gt ETA körül mozognak, ami 2,1-2,3 Gt olajjegyértéknek felel meg. Az adatok bizonytalanságát egy-

12. táblázat

A fontosabb széntermelő országok 2002-ben

Ország	Termelés, Mt ETA	Részarány, %
Kína	1005	29,5
Egyesült Államok	818	24,0
Ausztrália	262	7,7
India	240	7,1
Dél-afrikai Köztársaság	181	5,3
Oroszország	163	4,8
Lengyelország	101	3,0
Indonézia	90	2,7
Németország	78	2,3
Ukrajna	61	1,8
Kazahsztán	54	1,6
Kanada	51	1,5
Kolumbia	37	1,1
Cseh Köztársaság	35	1,0
Egyesült Királyság	26	0,8
Törökország	13	0,5

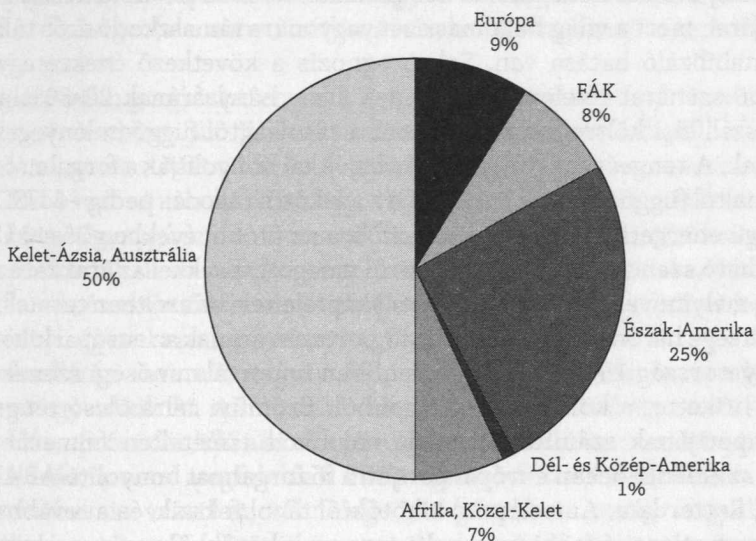
részt a fűtőértékek különbségei okozzák, másrészt a statisztikai rendszerek eltérései (mint például egyes országoknál a bányatermékeket, másoknál az értékesítésre kerülő mosott és osztályozott terméket mutatják ki). A fontosabb széntermelő országokat a 12. táblázat tünteti fel. A legtöbb feketeszenet az USA, Kína, Ausztrália, India, Dél-Afrika, Oroszország, Lengyelország, Németország, Ukrajna, Indonézia és Kazahsztán termeli, a legtöbb barnaszenet pedig Németország, a FÁK, az USA, Lengyelország, Görögország, Csehország, Törökország és Ausztrália.

A széntermelés és -felhasználás kontinensek közötti megoszlása kiegyenlített, ezt szemlélteti az 5. ábra. Az OECD-országok részesedése a termelésből 42%, a fogyasztásból 46%.

Az energetikai szén 60%-át a bányák 50 km-es körzetén belül tüzelik el, ennek ellenére az utóbbi évtizedekben erősen megnőtt a szén világkereskedelme, a termelésnek kereken 15%-át értékesítik a külkereskedelmen keresztül. A legfőbb exportőrök: Ausztrália, Egyesült Államok, Dél-Afrika, Kanada, Lengyelország, Oroszország, Kína, Kolumbia, Indonézia. A legfontosabb importőrök: Nyugat-Európa, Japán, Dél-Korea. Az Európai Unió 2020-ra már a szénfelhasználás kétharmadát fogja importból fedezni. Nagy távolságra csak jó minőségű, kevés ballasztanyagot tartalmazó feketeszenet gazdaságos szállítani. A kínálat nagy, a hatalmas külfejtésekből (Ausztrália, Dél-Afrika, Kolumbia,

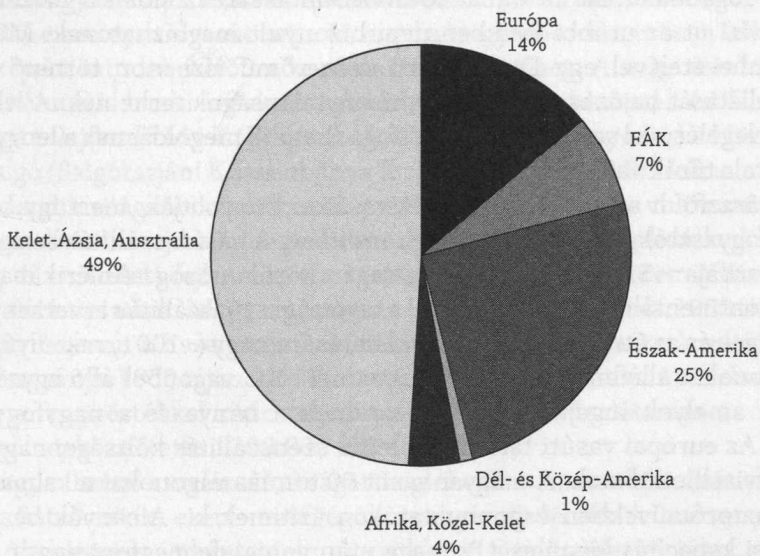
5a. ábra

A széntermelés regionális megoszlása



5b. ábra

A szénfelhasználás regionális megoszlása



Egyesült Államok) származó, olcsón kitermelhető szén még a tengeri szállítással együtt is versenyképes. A szén külkereskedelmének 90%-a tengereken keresztül történik. A szén ára, azonos hőértékű mennyiségeket figyelembe véve, a tüzelőolaj árának kétharmada körül alakul, de csak jelentős késéssel követi a kőolajárát, mert a világ hatalmas szénvagyonára támaszkodó erős túlkínálatnak árstabilizáló hatása van. Sok prognózis a következő évekre egyenesen csökkenő szénárát tételez fel. A szenek ára – bányáárának 20-50%-a között mozgó szállítási költség miatt – viszont a távolságtól függően lényegesen változhatnak. A tengereken 30-150 kt-ás hajókkal bonyolítják a forgalmat, ezeken az útvonalról függő fuvardíj 8-12 USD/t, a kikötői rakodás pedig ~5 USD/t. A jó minőségű energetikai feketeszenek cif⁶ ára az utóbbi években 35-40 USD/t, a kokszolható szeneké 40-50 USD/t körül mozgott. Ezekkel az árakkal a nyugat-európai mélyműveléses bányák versenyképtelenek, az azokban termelt feketeszen költsége három-négyszerese az importszén árának az európai kikötőkben.

Magyarország 1 Mt/év nagyságrendben importál minőségi szeneket, kokszot és brikettet a környező országokból. Erőművi célra olcsó tengerentúli szén importjának számításba vétele nálunk is ismételten felmerül. Sajnos hazánk az Atlanti-óceán európai partján a fő forgalmat bonyolító ARA (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen) kikötőktől távol fekszik, és a továbbszállítás költsége az atlanti-óceáni vagy balti-tengeri kikötőkből vasúton elviselhetetlenül drága lenne. A Rajna-Majna-Duna hajóút használata nemcsak költséges, hanem bizonytalan is, többek között a magyar szakasz korlátozott hajózhatósága miatt. Ezért elsősorban földközi-tengeri beérkeztetés lenne reális, ahonnan a szenet vasúton lehetne tovább szállítani. Számításba jöhet feketetengeri fogadóállomás is dunai továbbszállítással, azonban a Balkánon átvezető vízi út az utóbbi években nem bizonyult megbízhatónak. Mindezek figyelembevételével egy Duna menti szénerőmű vízi úton történő tüzelőanyag-ellátását hajózási és politikai bizonytalanságok terhelnék. A lehetőségek mérlegelésével számunkra a legelfogadhatóbb megoldásnak a lengyel szén behozatala tűnik vasúton.

A szárazföldi szénszállítás zömét vasúton bonyolítják, mert így biztosítható a fogyasztók rugalmasabb megközelítése. A vasúti szállítás sem olcsó, a MÁV tarifája ~5 ECU/100(t/km) átlagár körül mozog. Amerikában nagy transzkontinentális irányvonatokkal a távolsági szénszállítás is versenyképes, a költségek és az átrakási munka csökkentésére nagy (~100 t) raksúlyú, önrírtós vagonokat alkalmaznak, lehetőleg minél több vagonból álló egységvonatokban, amelyek ingajáratban közlekednek a bánya és a nagyfogyasztók között. Az európai vasúti tarifák mellett a szénszállítás költségei nagy távolságra elviselhetetlenek. A magyar vasút 60 tonnás vagonokat alkalmaz, amelyeket az erőművekben vagonbuktatókon ürítenek ki. A bányák bezárása a szállítási kapacitás leépülését is maga után vonja, de megfontolandó az esz-közpark megőrzése az esetleges import bonyolításához.

A fejlett országokban az energiahordozók szállításában jelentős a belvízi forgalom, ami sajnos Magyarországon teljesen hiányzik. Ennek kiépítése csak hosszú időre biztosított kihasználással lenne gazdaságos, mert a kikötők, rakodógépek és hajóterek létesítése nagyon költséges. A Dunán és Tiszán a vízjárás szélsőségei (alacsony vízállás, árvíz, befagyás, jégzajlás) is korlátozzák a belvízi hajózást.

A legkevesebb gonddal a termelőt és a fogyasztót közvetlenül összekapcsoló szállítási rendszer jár. Erőműveink egy részébe kötélpályák szállítják a bányából a szenet, a Mátrai Erőművet szállítószalag köti össze a visontai kifejtesű bányával. Amerikában zagy vagy szuszpenzió formájában néhány mm-es szemnagyságú szén csővezetéki szállítása még 1500-1800 km-es távolságra is előfordul, de ez csak kemény szeneknél jöhet számításba, a barnaszenek mállanak, és eltömődést okozhatnak. Ehhez a szállítási módhoz legalább a szén mennyiségével azonos mennyiségű víz is szükséges.

A szénellátás zavarait, vagy a felhasználás szezonális egyenetlenségeit tárolással egyenlítik ki. A hosszabb idejű tárolás a minőség romlásával jár, nedvesedés, aprózódás, illó alkotók párolgása miatt. Különösen kényes kérdés az oxidálódás, a nem megfelelően hűtött garmadákban a fűtőérték 10%-os csökkenéséhez is vezethet, túlmelegedett gócekban pedig öngyulladás is bekövetkezhet. Az erősen nedves szenek nagy hidegben összefagyhatnak, igen megnehezítve a szállítást, ami néhányszor már komoly zavart okozott a hazai villamosenergia-ellátásban.

Magyarországon az ipari felhasználással párosuló széntermelés 1753-ban indult el Brennbergbányán, amit további bányanyitások követtek. Az első nagy szénfogyasztó az 1830-as évektől a dunai gőzhajózás volt. A 19. század közepétől e szerepet a vasút vette át, majd a kiegyezés után erősen fellendült a szén az ipari, mindenekelőtt a kohászati felhasználása. A nagy szénbányavállalatok nálunk is banki érdekeltségbe kerültek, így a dunántúli és északkeleti bányákat tulajdonló MÁK (Magyar Általános Kőszénbánya Rt.) a Hitelbankéba, a Salgó (Salgótarjáni Kőszénbánya Rt.) a Kereskedelmi Bankéba.

A második világháború után a helyreállítás kulcskérdése volt a széntermelés megindítása, majd a hidegháborús évtizedek autark gazdálkodásában a nehézipar erőltetett fejlesztését a széntermelés feszített ütemű növelésével kellett alátámasztani. Magyarország energiagazdálkodása az 1960-as évekig jóformán teljesen a hazai széntermelésre alapult, energiaszerkezetünkben a szén részaránya 1950 táján 90%-kal tetőzött, a széntermelés 1965-ben érte el 420 PJ energiaértékkel csúcsteljesítményét, a bányászlétszám az 1960-as években megközelítette a 100 000 főt.

A magyar széntermelés adottságai meglehetősen mostohák. Szénelőfordulásaink fiatalok, ezért minőségük gyenge, fűtőértékük alacsony, magas hamu-, nedvesség- és kéntartalmuk csökkenti a használati értéket, eltüzelésükhöz az átlagosnál költségesebb tüzelőberendezések szükségesek. A mély-

művelés termelési adottságai is kedvezőtlenek, a legtöbb szénlencse viszonylag nagy mélységben található, vékony és szabdalt rétegekben, esetenként erősen megdőlvé és vetődésekkel megzavarva. A termelés munkaigényes, a munkakörülmények mostohák, és a bányászkodást különféle elemi veszélyek nehezítik: a Mecsekben a sújtólég, a Dunántúlon a karsztvíz, Észak-Magyarországon a laza fedőközet omlása képviseli a főveszélyt. Mindezek következtében a mélyműveléses széntermelés önköltsége magas, termékének piaci értéke pedig alacsony. A kormány hosszú ideig dotációkkal támogatta a széntermelést, de az egy évtizeden keresztül folytatott sorozatos átszervezésekkel és szanálásokkal sem sikerült a szénbányák versenyképességét elérni. Különösen kiélezte ezt a kérdést a rendszerváltást követően a piaci viszonyok kialakulása, a gazdasági szempontok előtérbe kerülése pedig elkerülhetetlené tette a mélyművelés visszafejlesztését. Egyedül a külfejtéses lignit termelése bizonyult versenyképesnek. A magyar kohászat a hazai szén helyett importszén kokszolására tért át, a feketeszén-bányászatot be kellett fejezni. A földgáz térhódítása nyomán a lakossági szénpiac összeomlott, a szén majdnem kizárólagos fogyasztói az erőművek maradtak. A szénbányászat gondját az állam a vállalati körre terhelte át azzal, hogy a 1990-es évek elején a szén-erőműveket összevonta a tüzelőanyag-bázisukat jelentő bányákkal. A szénbányászat kapacitásának 95%-a, a produktív munkaerő 80%-a olvadt be az erőmű vállalatokba. A gyenge minőségű szenet drágán termelő bányák házassága a rossz hatásfokú, öreg és környezetszennyező erőművekkel nem bizonyult versenyképes megoldásnak. A barnaszénbányászat leépülését csak lassította az összevonás, a termelés néhány Mt-ra csökkent, a létszám pedig tizedére apadt. A bányászok munkahelyének elvesztése súlyos szociális problémákat okozott, de különféle intézkedésekkel (átképzés, végkielégítés, munkahelyteremtés, kedvezményes nyugdíj) viszonylag súrlódásmentesen sikerült a feszültségeket levezetni. A légszennyezésre vonatkozó szigorú EU-előírások meghonosítására kitűzött 2004-es végső határidő a kis egységteljesítményű, öreg szén-erőművek bezárását és ezzel a barnaszéntermelés majdnem teljes felszámolását jelenti.

Széntermelés

A szénbányászat leghatékonyabb módszere a gépesített külfejtés, ahol kevés munkaerővel nagy hatékonyságot lehet elérni. A nem nagyon vastag takarórétegek alatt fekvő, kiterjedt szénrétegeket hatalmas fejtő és rakodógépekkel biztonságosan lehet kitermelni. Bár a technológia erősen beruházásigényes, a termelt szénre vetített fajlagos beruházási költség átlagosan fele a mélyművelésének. A külfejtés akkor gazdaságos, ha a fedőréteg és a szénréteg vastagságának arányát kifejező letakarási arány a szénminőségétől függően nem

nagyobb 5-8-nál. Az észak-magyarországi lignitnél ez 5-6 körül mozog (6-9 m³ föld/t lignit), ami az alacsony fűtőérték miatt a gazdaságosság határán van. A külfejtésnek nagy tehertétele a tájrombolás: a kialakított munkagödör, valamint a mellette kialakított deponáliák tönkreteszik a táj képét, felszámolják az eredeti élőhelyeket, a fejtés során keletkező por pedig belepi a környéket. Ezért a környezetvédelem lakott térségek közelében többnyire megakadályozza a külfejtések létesítését. Az engedélyek elnyerésének mindig feltétele a leművelt bánya helyreállításához a jogi és pénzügyi feltételek biztosítása. A lezárás nem csupán a táj esztétikai rendezését jelenti, hanem az élővilág rehabilitációját is. Ezért a bányászatot a termőtalajréteg gondos lefejtésével és tárolásával kezdik. Ezt követi a fedőréteg letakarítása, amit a szén kifejtése után visszahelyeznek. A bányászkodás befejeztével visszahordják a termőtalajt, és abba növényzetet telepítenek, a rekultiváció során a betelepített fajok értékét fokozatosan növelik. Ez azonban hosszú időbe telik, és az eredeti növény- és állatvilágot nem mindig sikerül helyreállítani. Gyakran a talajvízből és csapadékból a kibányászott szén mennyiségének megfelelő térfogatú tó is keletkezik, aminek a hasznosíthatóságát szintén rendezni szükséges.

A külfejtéses bányákat nagy kapacitással gazdaságos kiépíteni, nem ritkák a többször 10 Mt/év-es léptékek, a visontai bánya 7,5 Mt/év teljesítménye a kisebbek közé tartozik. A fejtés geometriai viszonyait a gépek paraméterei szabják meg. A szén teljes mértékben nem lehet kitermelni, a kiaknázott mennyiség és az ásványvagyon hányadosából képzett kitermelési együttható 0,8-0,9. A veszteség oka egyrészt, hogy a jövesztőgépek fogása nem vág egybe a szénréteg méretével, másrészt, hogy a fejtés szélein elvékonyodó szénréteget többnyire már nem gazdaságos kifejteni. A szénminőség és a fűtőérték ingadozását okozza, hogy a gépek időnként a szénrel együtt meddőt is fejtenek. Kemény fedőközetnél mozzanatos, puhábbnál folytonos működésű fejtőgépeket használnak, ezek teljesítménye óránként több ezer m³ is lehet. Hatalmas méretek jellemzik a lazább anyagok fejtésére használt vedersoros és marótárcsás kotrókat (sok m³-es vedrek, kanalak), illetve a keményebb anyagokhoz alkalmazott puttonyos vagy vonóvedres exkavátorokat. E teljesítményekhez illeszkednek a nagy anyagmennyiségek rakodására és szállítására szolgáló berendezések, szállítószalagok, illetve billenő teherautók és sínen gördülő szerelvények. A fedőrétegek letakarítását szolgáló átrakóhidak több száz méter áthidalására is képesek. A talajvíz szintjének süllyesztésére szolgáló kútrendszerrel 1-10 m³ víz kiszivattyúzása párosul 1 t szén kitermeléséhez.

A szénvagyon nagyobbik hányada mélyebben fekszik és csak föld alatti bányászkodással lehet kitermelni. Összességében a világ széntermelésének kétharmada származik mélybányákból és egyharmada külfejtésből, de Európában a mélyművelés részaránya 90%, ami közrejátszott a versenyképtelenség kialakulásában. Magától értetődő, hogy a széntermelés annál gazdaságosabb, minél közelebb van a szénréteg a felszínhez, a műszaki és gazdasági

feltételek a mélyművelés alsó határát 1200 m körül jelölik ki. Az ennél mélyebben fekvő szén kitermeléséhez jelentős műszaki fejlesztésre lenne szükség (nagyobb teherbírású támszerkezetek, a munkakörülményeket biztosító szellőztetési technika stb.), ami jelenleg még nincs napirenden, mert a kisebb mélységben feltárt vagyon is bőséges.

A mélyművelés feltételeit a geológiai körülmények szabják meg, a fejtési rendszer megválasztása a szénlencsék elhelyezkedésén múlik a kísérő kőzetben. Figyelembe veendő a szénrétegek száma, vastagsága, dőlése, szabálytalansága, hibái (vetők, elcsúszások), a kísérő kőzetek szilárdsága és permeabilitása, különösen a fedőréteg (főte) stabilitása és állékonysága. Szerepet játszanak a tektonikai és hidrogeológiai viszonyok, a bányatérsgben várható hőmérséklet, nyomás és légnedvesség, a gáz- és vízveszély. Nagy előrelátással kell kialakítani a széntelep megközelítését, a szükséges szállítási, szellőztetési, energiaellátási, információtovábbítási utakat függőlegesen vagy a ferdén biztosító aknákat, illetve vízszintes irányú tárókat.

A mélyművelés átlagos kitermelési együtthatója 0,5, mivel a termelésnek jelentősek a veszteségei. Ennek egyik oka, hogy az optimális fejtési vastagságnál (1–3 m) vékonyabb vagy vastagabb rétegek kitermelése veszteséggel jár. Ugyancsak veszteséggel jár, hogy gépekkel a szénvagyon mezők szerinti kitermelése célszerű, az ezeket elválasztó szénpillérek végleg a föld mélyében maradnak. Az is veszteségforrás, hogy a termelést általában a legvastagabb, legjobb minőségű réteggel kezdik, ami gyakran akadályozza, esetleg lehetetlenné teszi a többi réteg kitermelését. Veszteséget jelentenek azok a biztonsági pillérek is, melyeket a felszínen levő épületek és műtárgyak védelmére, vagy más okokból (például vízvédelem) kell kialakítani.

A szénréteg jellegétől függően széles vagy keskeny homlokú fejtést alakítanak ki. A széles homlokú fejtés a legtermelékenyebb és a legjobban gépesíthető módszer, ez jár a legkisebb veszteséggel (kitermelési együtthatója 0,6–0,8). A fejtés előrehaladásának iránya a homlokra merőleges, a szén elszállítása azzal párhuzamosan történik, maga a fejtés irányulhat a teljes frontra vagy csak pászmákra. Előnyei miatt a bányászat lehetőleg a széles homlokú módszer kialakítására törekszik, de a geológiai viszonyok gyakran csak a keskenyhomlokú fejtésre adnak módot. Ez nehezebben gépesíthető, a munkahelyek biztosítása miatt a szén jelentős hányadát nem lehet kifejteni, emiatt átlagos kitermelési együtthatója 0,35 körüli. A szállítás a viszonylag keskeny homlokra merőlegesen történik, a bányatérsg kialakításától és a kifejtett részek jellegétől függően kamra-, kamrapillér-, pillér, pásztás fejtések, illetve ezek kombinációi szokásosak. A hazai bányatérsgekben többnyire csak keskeny homlokú fejtés kialakítására van mód. A korszerű bányákban a nehéz munkák (jövesztés, rakodás) gépesítettek, az infrastruktúrák (szállítás, szellőztetés, víztelenítés, energiaellátás) nagymértékben automatizáltak, illetve távirányítottak, a fedőréteget biztosító támszerkezetek sokszor önjáróak.

A széntermelés nagy tehertételei a meddőhányók, ahová a bányaeépítés, a széntermelés és a szénelőkészítés során keletkezett meddőt elhelyezik. E jelentős területet elfoglaló közetrakások nemcsak a táj képét rontják, hanem káros kibocsátások forrásai is. Gyakran következik be ártalmas légszennyezőket kibocsátó öngyulladás, a csapadék is rendszeresen kimossa a nemkívánatos anyagokat. A hányók felületének stabilizálása, majd a tevékenység befejeztével rekultiválása sem egyszerű feladat.

Több mint egy évszázada foglalkoznak a szén föld alatti elgázosításával, sajnos egyelőre kevés sikerrel. A feladat megoldása többszörös előnyöket ígér: olcsó terméket, mivel a beruházásigény kicsi, a föld alatti munkával járó bal-esetek kiküszöbölését, a bányászat környezetkárosításának minimalizálását és a nagy mélységben található szénvagyon hozzáférhetőségét. Az elképzelés egyszerű, a szénhez fűrőlyukakon keresztül levegőt vagy oxigént kell bejuttatni, esetleg vízgőz hozzákeverésével. Ha begyűjtják a szenet, a generátorgáz gyártáshoz hasonló reakciók alakulnak ki. A folyamatos égés biztosításához a szénréteg szerkezetét fel kell lazítani, pl. nagy nyomáson besajtolt közeggel repesztve, robbantással vagy villamos árammal kialakított csatornákkal. Az égés szabályozása a föld alatt nehéz, az elgázosítás mellett kigázosítás, karbonizáció, valamint az égést elfojtó folyamatok is kialakulnak. A hőmérséklet eloszlását és a gázok áramlását a nem pontosan ismert morfológiai viszonyok és inhomogenitások befolyásolják. Az égési tér kialakítására és a közegek keringtetésére sokféle megoldást próbáltak ki, többnyire a levegőárammal ellentétes irányú égetés bizonyult a leghatásosabbnak, de eddig nem sikerült olyan technológiát kialakítani, amely egyenletes mennyiségben és állandó minőségben szolgáltatna éghető gázt. A fűrőlyukon kivezetett alacsony fűtőértékű gáz erősen szennyezett, tisztításra szorul, hogy tüzelőanyagként használható legyen. Problémát jelent a kiégett térség feletti felszín beroskadása elleni védekezés, valamint a felszín alatti vizeknek az elszívárgó égéstermékkel történő szennyeződésének megakadályozása.

A felhasználók meghatározott minőségű és összetételű tüzelőanyagokat igényelnek, mivel a legtöbb berendezést arra méretezik, hogy a szén jellemzői a megadott határokon belül maradjanak. A gazdaságosságon múlik, hogy a kibányászott szenet a használati érték növelése érdekében milyen mértékű előkészítő eljárásoknak vetik alá. A szénrögök méretének csökkentésére szolgálnak a törés, aprítás, őrlés különféle eljárásai. A szénportüzelésű kazánok üzemkésztségnek sarkalatos pontja a légáramban befűjt szén szemcsék mérete, ami az őrlést végző malmokon múlik. A koksizálásnak is fontos feltétele a megfelelő aprítás. Az aprított vagy őrlött szenet osztályozással lehet szemcsenagyság szerint szétválasztani, amit darabos szénnél rácsokkal, apró szemcsék esetében vibrátorokkal, folytonosan mozgó rostákkal és szitákkal, esetleg hidrociklonnal oldanak meg. Többféle eljárás van a szén dúsítására, vagyis a meddő anyag leválasztására, ami az összes bányászott terméknek mintegy negyed-

részét teszi ki. A meddő többletsúlyt és többletmunkát okoz a szén szállításánál, őrlésénél, mozgatásánál és rontja az eltüzelhetőséget. A meddő közet szétválasztására már a fejtésnél és szállításnál is törekedni lehet, de a gépesítés nehezíti a szelektálást, ezért nőtt a felszíni eljárások szerepe. A mosásnál azt használják ki, hogy a meddő fajsúlya ($\sim 2 \text{ kg/dm}^3$) közel kétszerese a szénének ($\sim 1,3 \text{ kg/dm}^3$), és a vízzel alkotott zagyban – főleg apró szemű szénél – elérhető a fajsúly szerinti rétegződés. Ülepítéssel eljárásnál a víz lüktető mozgásával fellazítják a szitára helyezett nyers szenet, és a szemcsék a szitára vízszintes fajsúly szerint rendeződnek. A rendszert vízáramba helyezve terelő lapokkal külön lehet választani a szenet és a meddőt. Finomabb szétválasztáshoz több ülepítőt kapcsolnak sorba. Áramlásos eljárásnál a nyers szenet állandó vízáram sodorja ferde felületen, és így alakul ki a megbolygatott anyag rendeződése. Tökéletesebb szétválasztás érhető el a víznél nagyobb – $1,3\text{--}1,8 \text{ kg/dm}^3$ – fajsúlyú folyadék használatával, aminek a tetején úsznak a szén-szemcsék. Ilyen folyadék lehet szerves anyagokat tartalmazó oldat, vagy homokot, baritot, agyagot, magnetitet tartalmazó szuszpenzió. Szárazon is dúsítható a szén légszrékben, ekkor a vízáram szerepét légáram tölti be. A főleg koksizálás előtt alkalmazott flotálásnál azt aknázzák ki, hogy a tiszta szén hidrofób, a meddő pedig hidrophil. Az erősen aprított ($\sim 2 \text{ mm}$ -es) nyers szenet olyan vízben szuszpendálják, amelyhez levegőt és kevés habképző olajat adagolnak. A befúvás vagy kavarási hatására hab képződik, a légbuborékok a szenet a felszínre emelik, az a felületi feszültség hatására a víz-levegő határfelületen helyezkedik el, a nedvesedő meddő pedig lesüllyed a habban. A szenet a folyamatosan eltávolított habtól kell elkülöníteni. Szárítás is szükséges lehet a nedves eljárásokat követően, vagy nagyon nedves szeneknél, ha az gazdaságosnak mutatkozik. Szárítani lehet mechanikai úton (rázással, centrifugálással) vagy hővel. Az utóbbinál a víz elpárologtatására szóba jöhet füstgáz vagy vízgőz atmoszferikus nyomáson történő bevezetése. Drasztikusabb eljárás az ahidrállás, aminél autoklávban nemcsak forró közeggel szárítják a szenet, hanem néhány bar nyomáson ki is préselik belőle a vizet. Az összepréselt szén a kezelés után már nem tud vizet felvenni. A hazai szénelőkészítésben a bányáknál törést, osztályozást és esetenként mosást alkalmaznak, az erőművek porszéntüzelésű kazánjainál pedig malmokkal megfelelő méretre őrlik a tüzelőanyagot. Az igényesebb eljárások költségét az energetikai barnaszeneink nem bírják el, a régebben alkalmazott lignit-ahidrállást beszüntették, mert versenyképtelenné vált. A szárítás kiküszöbölésére kidolgoztak módszereket a víz-szén szuszpenzió közvetlen eltüzelésére, ami alkalmazható a vízsugaras fejtés termékeinél vagy vizes szállítási mód esetében (zagyban vagy szuszpenzióban) is.

A szén hasznosításának legfőbb gondja a környezetszennyezés. Sokirányú erőfeszítések történnek a környezetvédelmi követelmények kielégítésére, mindenekelőtt a légszennyezés visszaszorítására. Nemcsak a kibocsátásokra vonatkozó előírások betartására törekednek, hanem a követelmények túlteljesítésére is, hogy elébe menjenek a várható szigorításoknak. A tiszta szén (*clean coal*) jelszó e törekvések szimbólumává vált, az ilyen irányú kutató-fejlesztő munkákat mind az államok, mind a nemzetközi szervezetek támogatják.

A legtöbb tevékenység a főfogyasztók, az erőművek területére koncentrálódik, de ennek eredményei kihatnak más fogyasztói szektorokra is, például az ipari kazánokra és kemencékre. A porszéntüzelésű kazánok területén ma már kiforrottnak tekinthető füstgáztisztító eljárásokat – pernyeleválasztás, kénmentesítés, nitrogén-oxid-redukció – alkalmaznak, nemcsak új létesítményeknél, hanem régi berendezések utólagos felújításánál is. Ezek az eljárások a legnagyobb egységteljesítményre (Mm^3/h nagyságrendű füstgázmennyiség, $\sim 2000 \text{ t/h}$ gőztermelés, $\sim 800 \text{ MW}_t$ teljesítmény) is megvalósíthatók.

A füstgázból a pernye kiválasztására régebben alkalmazott ciklonok leválasztási hatásfoka alacsony volt, ma már az elektrosztatikus porleválasztók a legáltalánosabban használt berendezések. Erős villamos erőterben az ionizált gázban a szilárd részecskék villamosan feltöltődnek és az ellentétes polaritású elektródához vándorolnak, ahonnan már leválaszthatók. A korszerű megoldások 99,99%-os leválasztási hatásfokot is elérnek, s 450°C -os füstgáz hőmérsékletet is elviselnek. Hasonlóan hatékony, de kevésbé gyakori a szűrőzsákos megoldás, amelynél a megengedhető hőmérséklet alacsonyabb, $<200^\circ\text{C}$. A porózus hőálló anyagú szövetből készült zsákok szűrik ki a füstgázból a szilárd részecskéket, a lerakódott réteget ellenkező irányú levegő befúvásával távolítják el. A WHO (*World Health Organization*, Egészségügyi Világszervezet) a kiüledő felületi porterhelés elviselhető határát 90 mg/m^2 -ben szabta meg, az előírások a füstgázban a porkibocsátásra 100 MW_t teljesítmény alatt 100 , afelett 50 mg/m^3 koncentrációt engednek meg. Mivel a legkisebb méretű szemcsék képesek a tüdő mélyebb légutaiba behatolni, várható a követelmények a $2,5 \mu\text{m}$ -nél kisebb részecskék kibocsátható mértékére szigorodnak.

A kén-oxidok kivonására többnyire nedves kénmentesítő eljárások szokásosak, de ahol a rendelkezésre álló hely korlátozott, ott száraz eljárást alkalmaznak. A korszerű berendezések kénmentesítési hatásfoka 90-95%. A nedves eljárásnál a lehűtött füstgáz egy mosóoldaton áramlik keresztül, majd ellenáramban felülről bepermetezett vizes szuszpenzióval találkozik. A vízben a kén-oxid legtöbbször kalciummal lép reakcióba, de más anyagok (így magnézium, nátrium, ammónia) is számításba jöhetnek. A kalciumot biztosító szuszpendált vagy oldott adalékanyag lehet mészkő (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$),

oltott mész ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), oldatbavitelüket segédanyagokkal (például hangyasavval) mozdítják elő. Fontos a pH-érték megfelelő (3,5–5 az optimális) beállítása, hogy a reakciótermék minél nagyobb arányban kalcium-biszulfit $\{\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2\}$ legyen, amiből könnyen lehet a gipsz ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) végterméket előállítani oxigén jelenlétében. A kidolgozott technológiák a reakciófeltételekben és segédanyagokban, valamint az áramlási viszonyok kialakításában különböznek egymástól. A száraz eljárásban többnyire mészhidráttal reagáltatják a füstgázt, gyakran fluidágyban, egyes eljárások katalizátort is alkalmaznak. Az ideális Ca/S arány 1,3–1,4, a szilárd reakciótermék többnyire gipsz, de megfelelő kémiai folyamatokkal elemi kén vagy kénsav is nyerhető (a 7. táblázat 18–19 jelű reakciói). Kisebb kazánoknál kísérleteztek mészkőpor befűtésével a tűztérbe, hogy így kössék le a kenet, de ez sem üzemviteli, sem gazdasági szempontból nem vált be, és a keletkezett CaSO_4 magas hőmérsékleten nem bizonyult stabilnak. A fluidágyas tüzelés a keletkező kén-oxidok 90–95%-át köti meg. A WHO irányszáma az immisszió határértékére levegőben 50 mg/m^3 , az előírások a füstgázban kisebb berendezéseknél 100 MW_t alatt 850 mg/m^3 -t, 500 MW_t felett 200 mg/m^3 -t engednek meg, a két érték között lineáris átmenettel.

A nitrogén-oxid-képződést mérsékelni lehet jó keveredést biztosító égőkkel, a légfesleget minimálisra csökkentő szabályozással, valamint az égési hőmérséklet csökkentésével. A szigorú környezetvédelmi előírások betartásához a magas tűztér-hőmérsékletű berendezéseknél (elsősorban fekete szeknel) szelektív katalitikus reakcióval (DeNOx eljárás) redukálják a nitrogén-oxidot. A reakcióhoz ammóniát (NH_3) adagolnak, ami a katalizátor felületén kölcsönhatásba lép a nitrogén-oxiddal és a reakció terméke nitrogén és víz. A katalizátor hatás 350°C táján optimális, a leválasztás hatásfoka 75%-ot is elérhet. A WHO levegőben $50 \mu\text{g/m}^3$ immissziót tolerál, a füstgázban kibocsátható mértékre az előírások differenciáltak, az erőműveknél megengedett érték 30 mg/m^3 .

A füstgáztisztítás vagy a fluid tüzelés nem enyhíti a legnagyobb gondot, a szén-dioxid-kibocsátást. Ennek csökkentésére sokirányú kutató tevékenység folyik, a legerőteljesebben a füstgázból a CO_2 kivonásával és elnyelésével foglalkoznak. A kivonásra számításba jöhetnek membrános szeparációs eljárások, fizikai és kémiai oldási módszerek (például monoetanolamin oldatban abszorbeálva), kriotechnikai szétválasztás, reakció Mg vagy Ca szilikátokkal temethető karbonátok létrehozására stb., de továbbra is gondot jelent a kivont szén-dioxid további sorsa. A legjobb megoldás a hasznosítás lenne. Kis mennyiségben felhasználják a szén-dioxidot az élelmiszeriparban italok dúsítására, és a kőolajtermelésben a kutakba visszanyomva a kihozatal növelésére. Elképzelések születtek további hasznosításra ipari technológiákban, vízi vagy szárazföldi növényi kultúrák fotoszintézisében, hőkörfolyamatok munkaközegeként stb., azonban e lehetőségek a keletkező szén-dioxidnak csak kis hányadát érintenék. A fennmaradó nagy mennyiségű gáz elhelyezésére, be-

fogadására a legtöbb reményt a tengerekhez fűzik, de számításba jöhetnek felszín alatti üregek, felhagyott bányatérsek, akviferek, porózus kőzetek (pl. leművelt szénhidrogénmezők) is. Mindez azonban csak távoli perspektíva, ha egyáltalán sikerül gazdaságilag elviselhető megoldást kifejleszteni – ami sok szakértő szerint kétséges. Jelenleg csak a kibocsátás mérséklése van napirenden az energetikai határfok növelésével, vagy a tüzelőanyag-struktúra módosítása a több hidrogént és kevesebb kARBONT tartalmazók javára.

A gázturbinás kombinált ciklusú blokkok hatásfokának ugrásszerű megnövekedése új lehetőségek keresésére ösztönözte a kondenzációs szénérőművek fejlesztőit. Főleg különleges szerkezeti anyagok alkalmazásával lehetőséget látnak a hőkörfolyamat paramétereinek növelésére – és ezzel a hosszú ideig felfő határnak tekintett 40% körüli erőművi hatásfok számottevő (50-55%-ra) növelésére –, de a magas költségek miatt erre eddig nem került sor.

A környezeti terhelés csökkentésének egy másik iránya a közvetlen eltűzés helyett a szén átalakítása értékesebb – cseppfolyós vagy gáznemű – tüzelőanyaggá. Szénhidrogén-kémiai ismereteink, a korszerű vegyipari technológia eljárásai és berendezései lehetőséget nyújtanak szintetikus szénhidrogének előállítására. A 13. táblázatban látható a különféle tüzelőanyagok átlagos molekulásúlya és az elemi analízis szerinti karbon/hidrogén aránya. Ebből kitűnik, hogy a feladat egyrészt a szén alkotó nagy molekulák kisebbekre bontása, másrészt hidrogén hozzáadagolásával a kívánatos C/H arány beállítása. A hidrogén bevezetése abból a szempontból is előnyös, hogy megköti a szén kellemetlen szennyezőit – a ként H_2S , a nitrogént NH_3 formájában –, és ezeket könnyű leválasztani.

Éghető gázok előállítása szénből több mint két évszázados múltra tekint vissza. Két fő iránya ismeretes: a kigázosítás és az elgázosítás. A kigázosítás

13. táblázat

Tüzelőanyagok kémiai jellemzői

Anyag	Átlagos molekulásúly	C/H tömegarány
metán	16	3
földgáz	20	3-4
propán-bután	58	4-5
könnyű benzin	100	5-6
könnyű fűtőolaj	200	6-7
nyersolaj	400	7-8
finomítói maradék	600	8-10
lignit	>5000	12-15
barnaszén	>5000	15-17
antracit	>5000	32

során nyert kokszt mellett fejlődő gáz a feldolgozott szén fűtőértékének 20-40%-át képviseli. A szénelgázosítást is hosszú ideje alkalmazzák, főleg vegyipari eljárások kiinduló anyagainak gyártására. A szén cseppfolyósításának a célja folyékony motorhajtó üzemanyagok előállítása. A szénátalakítási eljárások elvesztették vonzerejüket az olcsó szénhidrogének időszakában, majd a kőolajválság után ismét előtérbe kerültek. A legtöbb kifejlesztett eljárás nagyüzemi megvalósítása azonban túlságosan költségesnek ígérkezett, ezért a napirendről lekerültek. Jelenleg egyedül a kombinált ciklusban működő gázturbinák tüzelőanyagául szolgáló alacsony fűtőértékű gázt fejlesztő elgázosító eljárásokat tekintik ígéretesnek.

Gyártott szilárd tüzelőanyagok

A másodlagos energiahordozók történetét a fa száraz lepárlásával előállított faszén nyitotta meg. E porózus szerkezetű, kis térfogatsúlyú anyag főképp tiszta szénből áll, hamu és kén tartalma kicsi, fűtőértéke 29–33 MJ/kg, ami az eredeti anyagénak kétszerese, és égési hőmérséklete is magas. Retortákban vagy erdőgazdaságok boksáiban állítják elő, 100 kg fa lepárlásából átlagosan 30–40 kg faszén nyerhető, az átalakítás energetikai hatásfoka 55–60%. Előállításához a fa fűtőértékének jelentős hányada felhasználódik, az energiamérleg javítható a keletkező melléktermékek (éghető gázok és olaj) hasznosításával. Hosszú ideig a vas- és acélgyártás alapvető tüzelő- és redukálóanyaga volt. A szén kokszosításának megoldása után ipari jelentőségét teljesen elvesztette, jelenleg ételkészítési és gyógyászati célokra, valamint abszorbensként használják. Magyarországon a nem energetikai célokra előállított mennyiség 10 kt/év nagyságrendű. Egyesek ugyan javasolják, hogy az erdőkben gazdag trópusi országok energiagazdálkodásában erőteljesen támaszkodjanak a faszénre, de ez aligha jelentené a felemelkedés útját.

A legfontosabb iparilag előállított szilárd tüzelőanyag a kokszt. A kokszyártás folyamán a szén levegő kizárásával magas hőmérsékleten hevítve lepárolják. E lényegében száraz desztillálás során a szén egyrészt kémiaiag bomlik, másrészt a hőmérséklet függvényében különféle kémiai reakciók következnek be. A hőmérséklet növelésével mind magasabb forrpon-tú anyagok lépnek ki gáz alakban, a szén pedig fizikai és kémiai átalakulásokon megy keresztül. A lepárlás következtében a szén kolloidrendszere koagulál, az összeolvadt tömör szerkezetű szénstruktúrán, a kokszon kívül gáz (kamragáz), kátrány és gázvíz keletkezik. A gáz tüzelőanyagként hasznosítható, a kátrány régebben a szerves vegyipar egyik legfontosabb alapanyaga volt, a gázvíz inkább kellemetlen melléktermék, bár ebből is nyerhető hasznosítható vegyipari anyagok. Az előállított kokszt és a többi termék arányát a szén jellege, valamint a lepárlás módja – mindenekelőtt hőmérséklete – szabja

meg. A lepárlás eredő energetikai hatásfoka 85-90%, a kokszkihozatal – a szén minőségétől és a lepárlás módjától függően – a feldolgozott szénnek 50-70%-a.

Minden szénből lehet kokszot előállítani, de a kereskedelmi forgalomban csak meghatározott feltételeknek megfelelő termékeket minősítenek koksznak. Jó minőségű kokszot elsősorban bizonyos fekete szenekből lehet előállítani, a barnaszénnek porlásra hajlamos, higroszkópos struktúrára szolgálnak. A koksz minőségét anyagi összetétele, struktúrája, mechanikai szilárdsága, fűtőértéke jellemzi. Általában annál jobb a koksz minősége, minél sülőképesebb a szén, amit kísérleti úton meghatározott egyezményes mérőszámokkal (például Roga-szám) jellemeznek. A nyomószilárdságra jellemző sülőképességen kívül fontos a szén illóanyag-tartalmának és zsugorodásának az ismerete is. A feldolgozott szén minőségétől és a lepárlás módjától függően többféle kokszfajtát különböztetnek meg. Az erre alkalmas, jól sülő, nagy bitumentartalmú fekete szenek kokszolása magas hőmérsékleten történik, a hőmérséklet fokozatosan növelik az 1200-1300 °C-os véghőmérsékletig. Így állítják elő a kohókokszot, ami a nagyolvasztókban a hőfejlesztést és a vasérc redukcióját biztosítja. A kohókokszban 84-91% C, 4-4,5% H és viszonylag sok, 1-1,5% N van. Az ércredukció többféle folyamatban zajlik, amelyekben a koksz égése közben fejlődő szén-monoxid és a koksz karbontartalma vesz részt. A kohókoksznak sokirányú követelményrendszert kell kielégíteni: a szükséges hőmérséklethez magas fűtőértékkel (>30 MJ/kg) kell rendelkeznie, a nyersvas jó minősége megfelelő kémiai összetételt igényel (1%-nál kisebb kéntartalom, maximálisan 8-10% hamutartalom, kis foszfor- és illótartalom). Biztosítani kell a nagyolvasztóban levő anyagoszlop megfelelő gázáteresztő képességét, hogy az égéstermékek zavartalanul tudjanak felfelé áramlani. Fontos követelmény a mechanikai szilárdság is (>0,8 kN/cm²), hogy a nagyolvasztókban levő anyag hatalmas súlya a kokszot ne roppantsa össze.

Az energetikai optimum érdekében a kokszolóműveket többnyire a nagyolvasztók mellé telepítik, amit az is indokol, hogy a koksz minőségét a szállítás és átrakás rontja. Ugyanezért a koksz külkereskedelme kicsi, inkább a kokszolható szenet importálják, és szállítják nagyobb távolságra. A legjelentősebb kokszszéntermelők: USA, FÁK, Kína, Egyesült Királyság, Németország, Lengyelország, Ausztrália és Kanada. A hazai szükségletet is importszénből biztosítjuk. A kohászat fejlesztésének egyik főiránya a fajlagos kokszfelhasználás csökkentése, amiben jelentős eredményeket sikerült elérni. Ennek egyik lehetősége a koksz egy részének helyettesítése a magas hőmérsékleten redukáló hatású karbonra és hidrogénre bomló földgáz vagy fűtőolaj befűtésével. Ez a minőséget és a fajlagos kihozatalat is javítja. Terjednek a koksz nélküli, direkt vasércredukciós eljárások is, például hidrogénatmoszférában. Mindez a kokszszükséglet mérséklésének irányába hat.

Az öntödei koksz alapvetően hőfejlesztésre szolgál, itt kémiai reakciók csak kis mértékben játszódnak le, viszont a követelmények az öntödei koksz-szal szemben is jelentősek. Nagy kémiai tisztaságot kívánnak meg, hasonló mechanikai szilárdságra van szükség, mint a kohókoksznál, és a megolvadt vas útjának biztosítása porózus szerkezetet igényel.

A kovácsszén megolvadt, zsugorodott, néha felfúvódott puha kokszot szolgáltat. A gázlángszénből nagyon puha, a lángszénből gyengén zsugorodott porózus koksz nyerhető. Bitumendús barnaszénekre dolgozták ki az alacsony hőmérsékletű kokszolás (svélezés) technológiáját. E kíméletes, 550–600 °C véghőmérsékletig végzett lepárlással elejét lehet venni a bituminitek túlságos lebomlásának. Az eljárás eredetileg minél több kátrány kinyerését célozta, a II. világháborúban a műbenzin gyártásban használták. A főleg tüzelésre vagy elgázosításra használható svélkoksz (félkoksz) fűtőértéke 25 MJ/kg. A petrol-kémia térhódítása a svélezést visszaszorította.

Régebben nagy jelentősége volt a lángkőszének és zsírkőszének magas hőmérsékletű lepárlásával történt városi gázt szolgáltató kokszolásnak. A gázgyárak mellékterméke gyenge minőségű, alacsonyabb fűtőértékű (~25 MJ/kg) gázkoksz volt, amit ipari és háztartási tüzelőanyagként hasznosítottak, de a városi gázgyártás leépülésével alkalmazása is visszaszorul.

A kokszolható szén drágák és ritkák, ezért elsődleges cél a kokszgyártás nyersanyagbázisának bővítése. Előzetes tömörítéssel a gyengébben sülő szénnek is felhasználhatók, e formakoksz használata különösen jól bevált öntödei célokra és füstmentes háztartási tüzelőanyagként. Gyengén sülő szénből gyártott porkokszból készített brikettből állítják elő újabb kokszolással a brikettkokszot. A kőolajlepárlásból nyert petrolkokszot (H–C koksz) főleg kohászati, valamint vegyipari célokra és elektródagyártáshoz használják, gyengébb minőségű hányada tüzelőanyag vagy adalékanyagokkal elfogadható nyersanyag kokszoláshoz.

14. táblázat

Kokszok méret szerinti osztályozása

Osztály	Méret, mm
por	0–5
dara	0–10
mogyoró	5–10
dió II	10–25
dió I	25–40
kocka II	40–60
kocka I	60–80
darabos	>80

A kereskedelmi forgalomba kerülő kokszt méret szerinti osztályozása a 14. táblázat szerint történik.

Darabos tüzelőanyagot igénylő berendezések számára nehezen hasznosítható termékek eltüzelhetőségét teszi lehetővé a brikettálás. Aprószemű szénből vagy kokszból, illetve szénporból és kokszporból készítik. Lágy barnaszeneket kötőanyag nélkül 800-1200 bar nyomással préselik össze, a kötést molekuláris erők biztosítják. Kemény barna- és feketeszeneket kötőanyaggal brikettálnak 200-400 bar nyomással (patent szén). A kötőanyag kátrányszurok, bitumen, pakura vagy fűtőolaj, esetleg szulfitlég, de az ilyen brikett iránt csökken az igény, mert kötőanyaga erősen kormoz. Ez vezetett a hazai brikettgyártás leépüléséhez is. A brikettálás energetikai hatásfoka magas (~95%), a termék fűtőértéke ~20 MJ/kg. A brikett elsősorban kisfogyasztók számára előnyös, az egyenletes darabnagyság kedvező a gyulladáshoz és a stabil égéshez.

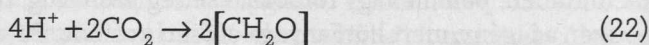
Biomassza

A biomassza elvileg minden a bioszférában található élő anyag, valamint annak a hulladékai. Legnagyobb hányadát a növények – elsősorban az erdők – képviselik, de nem elhanyagolható az állati eredetű és a feldolgozott állapotból származó hulladékok szerepe sem. A biomassza gyakorlati értelmezése ettől némileg eltér, nem tartoznak bele az ásványi tüzelőanyagok, bár azok is a biomassza hulladékaiból képződtek, beleértik viszont az élő anyagokból származó ipari hulladékokat (fa-, papír-, bőr-, élelmiszeripar stb.), valamint a kommunális szemetet is. A biomassza megújuló energiaforrás, ha hasznosításának mértéke nem haladja meg az újratermelődését. A megújulás egyben a növényi eredetű biomassza égésénél képződő szén-dioxid ellensúlyozását is biztosítja a fotoszintézis útján.

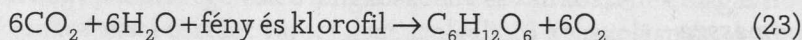
A világ jelenlegi energiaszükségletének megközelítőleg 10%-át biomasszával fedezik, átlagos aránya a fejlett országok energiamérlegében csaknem 3%, viszont a fejlődőknél 35%. Pontos statisztikai adatokkal nem rendelkezünk, mivel csak kis hányaduk kerül kereskedelmi forgalomba. A kereskedelmi forgalomba nem kerülő biomassza felhasználását olajegyenértékben ~1 Gt-ra becsülik. A biomassza a világ legelmaradottabb térségeinek fő tüzelőanyaga, sok országban (például Indiában, Kenyában) a felhasznált energia felét is meghaladja, egyeseknek (Etiópia, Malawi, Nepál) majdnem kizárólagos tüzelőanyaga.

A növényeket alkotó szénhidrátokat a napsugárzás hozza létre fotoszintézissel szén-dioxidból, vízből és ásványokból oxigén felszabadítása közben. A táplálékláncon vagy az anyagcsere más módján keresztül a növényekre támaszkodik a többi élőlény léte is. A fotoszintézist a növények citoplazmájában található pigmentek, legnagyobbbrészt a legaktívabb klorofil katalitikus hatása vezérli. A fényből nyert energiát a vízmolekulák bontására használják, az oxi-

gén eltávozik és a további folyamatokban a H^+ , illetve e^- részecskék vesznek részt. A hidrogén sorozatos redukciós folyamatok után a NADP (difoszforipiridin-nukleotid) enzimhez kapcsolódik, ami a hidrogén és a levegőből felvett szén-dioxid összekapcsolódását szénhidráttá katalizálja. Az ehhez szükséges energiát az ATP (adenozin-trifoszfát) nukleotidok szolgáltatják, e minden sejtben jelen levő molekulák központi szerepet játszanak az élő szervezetek energiaforgalmában. Szintézisük nagy szabadenergia-növekedéssel, lebomlásuk energia-felszabadulással jár. A folyamatok jellegét leegyszerűsítve a



összefüggés tükrözi, ennek végén a NADP és az ATP eredeti állapotába visszatérülve újabb reakcióra kész. A lehetséges sokféle folyamat közül a legegyszerűbb a glukóz képződése a



reakció szerint, amihez a fénynek 15,7 MJ energiát kell biztosítani 1 kg glukóz előállításához.

A fotoszintézis a vízbontást környezeti hőmérsékleten valósítja meg, amihez pirolízissel nagyon magas hőmérsékletre lenne szükség, a vízbontás hatékony, viszont a teljes folyamat a napsugárzást nagyon rosszul hasznosítja. Mivel fotoszintézis csak a vegetáció időszakában zajlik, a beeső napsugárzásnak kétharmada eleve nem játszik szerepet. A felszínre eső napsugárzásnak mintegy 20%-át fogják fel a növények levelei, de annak csak a felét hasznosítja a fotoszintézis, a többi – mintegy 55% – oxidációs folyamatokban újból felszabadul és a növényből légzés (O_2 -kibocsátás), a nedvesség elpárologtatása és hőleadás formájában távozik. A reakciókhoz szükséges energiakvantummal csak a látható fény spektrumába eső fotonok rendelkeznek (főleg 0,4 és 0,75 μm között, de a zöld fényt a levelek visszaverik), a napsugárzás többi része nem hasznosul. Az elnyelt energiának mintegy 30%-át tárolják a szénhidrátok kötési energia formájában, de annak 40%-a a növényt működtető anyagcserére fordítódik, és csak a fennmaradó rész hasznosul a növekedésben (átlagosan mintegy 16,7 kJ/g). Mindezek figyelembevételével az átlagos átalakítási hatásfok a területre eső napsugárzásra vetítve az 1%-ot sem éri el. Valamivel kedvezőbb a kép, ha csak a vegetációs időszakban beeső napsugárzás a vonatkoztatási alap, az így számított átalakítási hatásfok a trópusi növényeknél 1,1-1,6%, a mérsékelt égöviéknél 0,6-1,0%. A fotoszintézis hatásfokát befolyásolja a szén-dioxid rendelkezésre állása, a hőmérséklet, a növény kora és más körülmények. Ha a növényevő állatok testépítését a táplálék-lánc keresztül visszavezetik a fotoszintézisre, a napenergiára vetített hatásfok egy nagyságrenddel kisebbre adódik.

Fotoszintézis baktériumoknál is kialakulhat, mint például a kénbaktérium nem vizet, hanem kénhidrogént, kéntartalmú alkoholt vagy szerves savat bont meg, és az így nyert hidrogént építi be a szervezetébe, a környezetbe pedig nem oxigén, hanem kén lép ki. A fotoszintézist ilyenkor is pigmentek katalitikus hatása vezérli, a folyamat anaerob körülmények között is kialakulhat. Új tudományos eredmény annak felismerése, hogy egyes baktériumok molekulák átalakításából nyernek energiát. Kutatások folynak a fotoszintézisnél hatékonyabb fotobiológiai eljárások kifejlesztésére, élő szervezetekkel (algák, cianobaktériumok) valamint sejtkomponensekkel (kloroplasztok, membránok, enzimek). Fotokémiai módszereket is kutatnak élettelen szerves és szeretlen molekulákkal (pigmentek, félvezetők) a napenergia hasznosításra oldatokban és szuszpenziókban. A két irányzat kombinációját jelentő fotoelektrokémiai eljárásokkal határfelületeken kívánnak a fotoszintézishez hasonló folyamatot előidézni művi környezetben. Kutatás tárgya, hogy a fizika és biológia közötti hidat jelentő nanotechnológia segítségével nem lehet-e mesterségesen előidézni a fotoszintézist. Érdekes kutatások folynak mesterséges fotoszintézis előidézésére ruténium alapú fényérzékeny réteggel bevont titán-dioxid részecskéekkel.

Az élőlények elpusztulása után a szerves anyagok tovább oxidálódnak és bomlanak, anyaguk legnagyobb része a légkörbe kerül, és energiájuk infravörös hullámok formájában kisugárzódik. Csak kis hányaduk marad vissza anyagcsere és bomlás révén a talaj részévé váló anyagokban. Az elhalt élőlények mélybe süllyedt üledékéből képződnek nagyon lassú átalakulási folyamatok során a fosszilis ásványi tüzelőanyagok. A számítások szerint a fotoszintézis a Föld élő anyagát átlagosan mintegy 3-5 évenként újítja meg, a légkör CO_2 tartalma 300, az O_2 tartalma pedig 2000 évenként cserélődik.

A Földet érő napsugárzás egy ezrelékénél kevesebb, ~100 TW nagyságrendű teljesítmény fedezi a fotoszintézist, ennyi szükséges a teljes földi élet fenntartásához (ennek energiaértéke alig 7,5-szerese az emberiség jelenlegi 400 EJ/évnnyi energiafelhasználásának). Az évente hasznosított napenergia harmada az óceánok élővilágának fenntartására szolgál, másik harmadát a trópusi és szubtrópusi erdők használják fel, a harmadik harmad a szárazföldi lét többi részét szolgálja, amiből csak kb. 2,5%-a az emberiség mező- és erdőgazdaságának részesedése. Az emberiség táplálékának számított energiaértéke 10 EJ/év (másfél nagyságrenddel kisebb, mint az emberiség technikai energiafelhasználása). A talajszintre érkező napsugárzásból a szárazföldi növényvilág 0,2-0,3%-ot hasznosít a növekedésére, a tengerek élővilága pedig 0,04-0,07%-ot.

A Földön található biomassza tömegét ~2 Pt-ra becsülik, aminek 80%-át az erdők faállománya tartalmazza, és további 10% található az egyéb szárazföldi növényekben. Évente megközelítően 400 Gt biomassza képződik, amiből a szárazföldeken létrejövő száraz szerves anyag ~170 Gt/év. A fotoszintézis

Növények energiahozama

Növény	Energiahozam, MJ/(m ² ·év)	Fotoszintézis hatásfoka, %
fenyőültetvény	31	0,8
tölgyerdő	21	0,5
trópusi őserdő	54	0,9
cukornád	293	4,8
kukorica	293	3,2
cukorrépa	218	5,4
lucerna	62	1,0

évente mintegy 0,2 Tt szén-dioxidot von el a levegőből, a biomasszába így beépülő karbon energiaértéke 3,2 ZJ. A hidrogén szerepének megítélését nehezíti, hogy az élő szervezetek anyagában sok a víz. A szárazföldi biomassza energiatartalmára található irodalmi adatok 15 és 25 ZJ között mozognak.

A növekedés időszakában a növények gyarapodása faj- és klímafüggő, a trópusi növényeknél 15–25 g/(m²·nap), a mérsékelt égöviéknél 3–8 g/(m²·nap), ennek megfelelően a terméshozam a trópusokon 35–90 t/(ha·év), a mérsékelt égövön 15–30 t/(ha·év). Néhány növény hozamának energetikai jellemzői a 15. táblázatban láthatók.

A biomassza energetikai célú hasznosításában a legnagyobb szerepe az erdőknek van. A szárazföldek egyharmadát borítják erdők, a Földön zajló fotoszintézisnek közel fele az erdőségekben realizálódik. A világ élőfa készletét 310 milliárd köbméterre becsülik, lombos fáknál a 20 cm-nél, fenyőfáknál az 5 cm-nél nagyobb törzsátmérőt véve figyelembe. Sajnos sokfelé rablógazdálkodás folyik az erdőkkel, amire nemcsak a dél-amerikai esőerdők kipusztítása szolgáltat példát, hanem a privatizálás során szerzett hazai törpe erdőbirtokok kíméletlen tarvágása is. Intő tanulság, hogy sok száz év alatt sem sikerült megállítani azt az eróziót, ami az erdők kipusztítása után a Földközi-tenger keleti felének számos országában bekövetkezett. A világ erdőállománya csökken, aminek kedvezőtlen ökológiai következménye nemcsak lokálisan (humuszképződés elmaradása, talajerózió) érvényesül, hanem globálisan is a CO₂ elnyelőképesség csökkenése következtében. Néhány fejlett ország szén-dioxid-kibocsátásának kívánt csökkentését helyettesíteni kívánja erdősítéssel fejlődő országokban, miután a fák 40–60 évre megkötik a CO₂-t (bár a fák pusztulása utáni bomlás a szén-dioxid nagy részét ismét kibocsátja a légkörbe).

Szakszerű erdőgazdálkodással biztosítható az erdők egyensúlya. A kivágott fák pótlása általában néhány évtizedbe telik, de vannak gyorsan fejlődő fajták is. Energetikai szempontból a legígéretesebb gyorsan növő fajták a mérsékelt égövön a nyár, fűz, éger és kőris, trópusokon a szikomor-, eukaliptusz-

és az édes gumifa. Magyarországon különösen az akácot tartják reménykeltőnek, mint jól sarjadó, gyorsan nöövő, rövid vágásfordulójú, 4-5 év alatt kitermelhető fafajtát, ami a hazai körülmények között a legnagyobb hozamú keményfa. Betegségeknek ellenálló, kevés károsítója van, és jelentős előnyei vannak az erdőgazdálkodás számára is (növeli a talaj nitrogéntartalmát, gazdagítja a szervesanyag- és nedvességtartalmat, csökkenti a talaj lemosódását).

Természetesen az erdőtelepítést a hasznosítási szempontokon kívül természetvédelmi és rekreációs szempontok is befolyásolják. A fa ipari feldolgozása (papír- és bútoripar, szerkezeti anyag stb.) több haszonnal jár, mint eltüzelése, ezért az erdők éves szaporulatának csak az ilyen célokra nem hasznosuló részét lehet energetikai célra fordítani. Jelenleg a világon évente kitermelt 2,5 milliárd m^3 fából a felhasznált tűzifa becsült mennyisége 1 milliárd m^3 (fűtőértéke ~ 10 EJ), az erdők szaporulatának 25%-ával mintegy 100 EJ lenne fedezhető.

Az élőfa nedvességtartalma 50-60%, a frissen döntött fáé 40-50%, ami légszáraz állapotban 15-25%-ra csökken. A fákat lehetőleg télen vágják ki, amikor a nedvkeringés szünetel, hogy minél kisebb legyen a nedvességtartalom. A nedvességmentes szárazanyag összetétele fafajtánként eltérő, az elemi analízis 38-42% C, 4-6% H, 31-35% O, 0,5-1% N és néhány % szervesetlen hamu tartalmat mutat ki. A fa vázanyagát alkotó szerves vegyületek közül a cellulóz és hemicellulóz poliszaharidokból áll, a lignint aromás vegyületek alkotják.

A tűzifa a legfontosabb növényi tüzelőanyag. A fa tüzelése a fejlett országokban visszaszorulóban van, egyrészt a fakitermelés munkaerő- és szállítási igényessége tükröződik az árban, másrészt a felhasználása is munkaigényes. A vágott fát elsősorban ott használják tüzelésre, ahol kereskedelmi tüzelőanyag olcsón nem szerezhető be, vagy ahol az állomány más célra nem használható. Tüzeléstechnikai szempontból előnyös a fa alacsony, 300 °C körüli gyulladási hőmérséklete és kis hamutartalma. Kedvezőtlen viszont alacsony fűtőértéke, ami légszáraz állapotban ~ 15 MJ/kg, és az égési hőmérséklet is alacsony. A füstgázban számottevő szén-monoxid és dinitrogén-oxid fordul elő, ami légzőszervi ártalmak forrása.

A kultúrnövények termékének kereken a felét teszik ki a hulladékok. Ezek egy része közvetlenül a begyűjtésből származik (szalma, torzsa, kukoricaszár és -csutka, napraforgó-szár, szőlővenyige és -szár, kóró, rózse), más részüket feldolgozás mellékterméke (hüvely, rizshéj, napraforgóhéj, kenderpozdorja stb.). Jelentős hányadukat nagyobb haszonnal lehet felhasználni takarmányozásra, a talaj termőerejének fokozására vagy ipari nyersanyagként (gyógyszer-, növényvédőszer-, papírgyártásra), az ezek után fennmaradó hányad fordítható energetikai célokra. Fűtőértékük légszáraz állapotban 12-15 MJ/kg. Az állattartás hulladékaiból is lehet energetikai hasznót húzni, néhol a szárított trágya fontos tüzelőanyag. A világ mezőgazdasági hulladékainak energiaértékét ~ 30 EJ-ra becsülik.

Energiaültetvények hozama

Fajta	Átlag, t/ha	Maximum, t/ha
cukornád	35	90
kukorica	10	40
gabona	5	20
rizs	4	16
cukorrépa	8	18
manióka	8	35
fa mérsékelt égövön	10	20
fa trópuson	20	35

Mezőgazdaságilag nem hasznosított területeken energiaültetvények (energiaplantációk) kialakítását javasolják. A legnagyobb energetikai hozamot a gyorsan növekvő szárazföldi növények közül a cukornád, cukorrépa, napraforgó, szudáni fű, kenaf, napier fű ígéri (16. táblázat). Főleg alkohol előállításához a melegebb égövön jöttek létre ilyen ültetvények, de a mezőgazdasági termelés visszaszorulása miatt telepítésük a mérsékelt égövön is előtérbe került. A fotoszintézis magasabb, 4-10%-os hatásfoka is elérhető vízkultúrákban (energiafarmok), a legígéretesebbek az algák, a fitoplankton, a tengeri hínár és a vízi jácint, a tengeri moszatok növekedése a napi 0,5 m-t is elérheti. (A kutatások az édesvízi algák többlet ígérő hasznosításával egyrészt proteintermelés, másrészt vegyipari alapanyagok előállítása felé fordultak.) Hazai körülmények között a hektáronként és évenként várható növekmény akácfánál 5-11 t, nemes nyárnál 13-15 t és fűzfánál 35 t is elérhet, s folynak kísérletek energiafűvek kialakítására is.

A biokonverzió átlagos teljesítménysűrűsége 0,5 W/m²-re becsülhető, amivel a 15. táblázat értékeit figyelembe véve 1 MW hőteljesítmény kielégítéséhez 1,5-15 km² termőterület tartozik. Ez a nagy fajlagos területigény rámutat az energiaültetvények legnagyobb problémájára. A mérsékelt égöv fejlett országaiban a megítélést befolyásolja a termesztés energiaráfordítása (gépi munkák, vegyszerek, szállítás, szárítás, esetleg vízellátás) is, ezek nagy értékénél még negatív energiamérleg sem lehetetlen.

A biomasszába sorolhatók a természetes eredetű szerves anyagok feldolgozott formában is. Ilyenek az erdőgazdasági hulladékok (fakéreg, gallyak, fűrészpor, hulladék fa), a fa ipari feldolgozásának hulladékai (faapríték, fűrészpor, faforgács, használt szerfa, bútorigipari hulladék stb.), bontott vagy leselejtezett anyagok (bányafa, vasúti talpfa, építőipari zsalszóanyag, csomagolóanyag, bontott szerkezeti anyag), vegyipari hulladékok (olajpogácsa, savgyanta, hulladékbőr), az eltüzelhető háztartási szerves szemét, a sok szer-

Biomasszák fűtőértéke

Anyag	MJ/kg	MJ/m ³
légszáraz fa (20% nedvességtartalom)	15	10
papír (kötegelt újságpapír)	17	9
szárított trágya	16	4
bálázott szalma	14	1,4
légszáraz cukornád	14	10
frissen vágott fű	4	3
háztartási szemét (nem tömörített)	9	1,5
kereskedelmi szemét	16	eredetfüggő

ves anyagot tartalmazó kommunális és ipari (például papíripari fekete víz) szennyvizek is.

Miután a biomassa területileg elszórtan keletkezik, a helyszínen történő, kisléptékű felhasználása a legegyszerűbb. Ezt támasztja alá, hogy a kis fajsűrűség és az alacsony fűtőérték miatt a szállítás viszonylag költséges, továbbá sok anyag gyorsan bomlik, így hosszabb ideig nem tárolható.

Jelenleg a biomassa hasznosításának jellemző módja az eltüzelés, néhány válfajának fűtőértéke a 17. táblázatban látható. Használják fűtésre, főzésre, gőzfejlesztésre, sőt villamosenergia-fejlesztésre is. A fejlődő országokban a biomassa hasznosítása általában közvetlen eltüzeléssel történik, főleg nyílt tűzhelyekben, nagyon rossz hatásfokkal, egészségi ártalmakkal és nagyon kedvezőtlen ökológiai következményekkel. A primitív belsejéi berendezésekben a tökéletlen égés termékei (CO, N₂O, benzol, aldehid, butadién, korom, nehézfémek) a légúti és keringési betegségek legfőbb okozói. Az ökológiai károk között említhető az erdők kipusztítása és a növényzet kiirtása nyomán kialakuló talajerózió, az egyoldalú fajtaszelekció pedig – az energiaplantációk következtében – a biodiverzitás csökkenését eredményezheti.

Míg a gazdasági fejlődés útjára lépett fejlődő országokban a kereskedelmi energiahordozók fokozatosan háttérbe szorítják a biomasszát, a fejlett országokban viszont ösztönzik a biomassa-hasznosítás korszerű módszereit. Kis mennyiségben a biomassa bekeverhető más szilárd tüzelőanyagok közé a hagyományos tüzelőberendezésekben, de nagy mennyiség eltüzeléséhez a hulladékok sajátos tüzeléstechnikai tulajdonságait (nagy fajtérfogat, nagy nedvességtartalom, alacsony fűtőérték, nagy mennyiségű, sok alkáli fémet is tartalmazható hamu) figyelembe vevő különleges tüzelőberendezések szükségesek. A tüzelésre kiforrott technikák állnak rendelkezésre, a kis kályhaktól 100 MW nagyságrendű erőművekig. A nagyléptékű berendezésekhez gyakran fizikai előkészítéssel (osztályozás, tömörítés, darabolás, szárítás) növelik

a biomassza használati értékét. A fajtérfogatot csökkentő és a kezelhetőséget megkönnyítő kompresszió 15-18 MJ/kg-os fűtőértéket is eredményezhet. A tömörítéssel nyert brikett (50 mm-nél nagyobb méretű préselvények) és pellett (50 mm-nél kisebb préselvények) előállításához szigorú követelményeket (méret, nedvességtartalom, tisztaság) támasztanak a nyersanyaggal szemben. A nagy berendezésekben sokszor szénhidrogénnel táplált támasztó tüzelést alkalmaznak, nemcsak a begyűjtáshoz, hanem az alacsony fűtőérték és az ingadozó összetétel miatt a stabil égés fenntartásához is. A tüzelőberendezések méretezésénél figyelembe kell venni a biomassza nagy illótartalmát, egyrészt a légfelesleg jó szabályozásával, másrészt kellő – de nem feleslegesen nagy – tér kialakításával a levegővel történő keveredéshez. A kisméretű darabokra bontott tüzelőanyagoknál a finom porszennyezés kiszűrését is biztosítani kell. Esetenként problémát okozhat az égés során felszabaduló agresszív vagy mérgező gázok megkötése is.

Vannak törekvések a biomassza értékesebb üzemanyaggá, vagy kémiai technológiák alapanyagává történő feldolgozására is. A fejlett országokban a biomassza hasznosítása különösen akkor vonzó, ha más jellegű igények kielégítésével párosul, például személtávolítás, hulladékhasznosítás, környezetvédelem, használaton kívüli területek kiaknázása, falusi lakosság foglalkoztatása, fizetési mérleg javítása stb.

A Föld energetikai célra számításba vehető biomassza-termelésének jelentős hányadát gyakorlati vagy gazdasági okokból ténylegesen nem lehet figyelembe venni. Aligha jöhetnek számításba a nehezen megközelíthető erdőségek, a diszperz hulladékok munkaiigényes begyűjtése és költséges szállítás sem mindig fizetődik ki. A világ tűzifatermelésének 100 EJ körüli lehetősége, a mezőgazdasági hulladékokban rejlő ~30 EJ-nyi potenciált és a kifejezetten energetikai célokat szolgáló energiaültetvények és energiafarmok 100 EJ-ra becsülhető hozama, a biomasszával fedezhető energiaszükséglet lehetősége 230 EJ/év-re prognosztizálható. De ez az emberiség jelenlegi tüzelőanyag-felhasználásának is csupán tört részét, a távlati igényeknek pedig csak kis hányadát tudná fedezni.

A jelenlegi magyar biomassza hasznosítását lényegében a tűzifa kitermelése jelenti. Racionális erdőgazdálkodással a hazai 1,6 Mha-nyi erdőterületünkől (~150 M m³) évente 2-2,5 Mt faanyag termelhető ki, de ennek jó részét szerkezeti anyagként, valamint papír-, bútór-, építőipari és egyéb célokra hasznosítják. A tűzifafelhasználás energiaértéke évente 10-15 PJ (~2,5 M m³). A teljes magyar mezőgazdasági biomassza-termelés szervesanyag-tartalma 800-900 PJ/év energiaértéket reprezentál, ennek fele melléktermék. Ebben az évente keletkező ~54 Mt szárazanyagban jelentős a nedvességtartalom, ami tárolás után 13-25%-ra csökken, a fűtőérték pedig 13-15 MJ/kg-t ér el. Levonva a takarmányozásra, talajerőpótlásra és ipari nyersanyagként hasznosított hányadot, a melléktermékek 20-30%-a (80-130 PJ) lenne hasznosítható energetikai célra.

A hulladékok begyűjtésének azonban nagy akadálya a rendkívül szétaprózódott magyar birtokszerkezet (a becslések szerint a mezőgazdasági produkció energiaértékének fele marad betakarítatlanul). A reális lehetőségeket összesítve a hazai biomasszából kinyerhető energia mintegy 100-150 PJ/év-re tehető. Ennél nagyobb értéket csak akkor lehet remélni, ha a növényekből előállított motorhajtó anyagok versenyképessé válnak, aminek feltétele vagy a jelenleginél jóval magasabb olajár, vagy a termék nagymértékű állami támogatása.

Újabban gyakran felvetődik, hogy az Európai Unióhoz való csatlakozásunk együtt jár majd a mezőgazdaságilag művelt területek csökkentésével. Nem lehetetlen, hogy a parlagon hagyott területeken energetikai célokra is lehetne növényeket termelni. Átlagosan ~25 GJ bruttó energiakihozatal képzelhető el egy hektáron.

A háztartási szemét összetétele az életmódtól függ, minél magasabb az életszínvonal, annál nagyobb a fűtőértéket csökkentő szervesetlen anyag (fémek, üveg), valamint a műanyagok aránya. Az utóbbiak égéstermékei között veszélyes anyagok (így klórvegyületek, dioxinok, dibenzofuránok, PAH) is előfordulhatnak. Mindezek elkerülésére előtérbe kerülnek a gyorsan lebomló környezetbarát műanyagok. Magyarországon naponta átlagosan lakosonként 1 kg 7,5-8 MJ/kg fűtőértékű háztartási szemét képződik. A szemétnek mintegy 85%-át összegyűjtik, és annak 83%-át hulladéklerakókba helyezik. Az Európai Unió előírja a biológiailag lebomló szervesanyag-tartalom csökkentését a lerakással ártalmatlanított szemétben, ami további kezelést igényel, például a depóniagáz kinyerését.

Léteznek kezdeményezések a szemből megfelelő előkészítő műveletek (darabos anyagok kiszűrése, mágneses vaseltávolítás, porítás, összenyomás, szárítás) után olyan pelleték (RDF Refuse Derived Fuel, hulladékból nyert tüzelőanyag) készítésére, amelyek hagyományos tüzelőberendezésekben, más tüzelőanyagokkal keverve vagy önállóan is eltűzelhetők. A szelektív szemetgyűjtés a hulladékok újrahasznosításán és a környezetszennyezés csökkentésén kívül elősegíti az energetikai hasznosíthatóság javítását is.

A nagyvárosokban összegyűlt szemetet gyakran szemetégetőművekben égetik el, amelyek elsődleges feladata a megőrölt szemét eltüntetése, az energia csak melléktermék. A technológiát mindig összekapcsolják az újra feldolgozható anyagok kinyerésével. A budapesti égetőmű a városban keletkező szemét harmadát képes feldolgozni, a feldarabolt szemetet 950-1050 °C-on égeti el, a kinyerhető villamos teljesítmény 25 MW, a hőteljesítmény ennek kétszerese. A salak steril, térfogata az eredeti szeméttérfogat egyhatod-egy-tized része, s miután abból kiválasztották a kohászatban hasznosítható vasat, terepfeltöltésre használják. A szemetégetés drága technológia, és nagy teher-tétele a füstgáz megtisztítása a veszélyes szennyezőktől. Ez a budapesti létesítménynél is gond. Újabban a csatornarendszer szennyvizéből derítéssel kinyert iszap eltűzelésére alkalmas égetőrendszereket is létesítenek. Az iszap

fűtőértéke nedvesen 1,2 MJ/kg, ami 10%-os végnedvességig szárítva 10 MJ/kg-ra növelhető.

Az égetésnél nagyobb hatékonyságot remélnék a biomassza további feldolgozásától, és abból kedvezőbb tulajdonságú gáznemű (biogáz), valamint cseppfolyós üzemanyagok (etanol, biodízel) előállításától, amire kémiai és biokémiai módszerek jöhetnek számításba.

Folyékony tüzelőanyagok

Korunk energiagazdaságának legfontosabb forrása a kőolaj. Az abból nyerhető termékek könnyen tárolhatók és szállíthatók, kis térfogatban sok energiát tartalmaznak. Előnyös tulajdonságaik révén a könnyebb párlatok a közlekedés, a mobil munkagépek és a hadsereg nélkülözhetetlen üzemanyagai, egyes frakciók tüzelőanyagként játszanak jelentős szerepet, mások alapvető vegyipari nyersanyagok. A kőolaj a világ gazdaság legfontosabb nyersanyaga, ára meghatározó szerepet játszik a gazdasági folyamatokban, nemzetközi forgalma a világkereskedelem legnagyobb tétele. Kitüntetett szerepe magyarázza az ádáz konfliktusokat a források birtoklásáért és a piacok befolyásolásáért.

Kőolajforrások

A kőolaj eredetére számos elképzelés van mind szerves, mind szervetlen kémiai folyamatok feltételezésével. A leginkább elfogadott magyarázat szerint a tengerekben elhalt és a fenékre leülepedett állati és növényi szervezetek, elsősorban egysejtű lények alkotta iszapból, a szapropélból keletkezett a kialakuló üledékes kőzetekben. Az átalakulás mikroorganizmusok hatására anaerobbomlás formájában zajlott, a kőzetekben uralkodó magas hőmérséklet és nyomás mellett. A keletkezésre vonatkozó elméletet erősíti, hogy a legtöbb kőolajtelepet tengeri eredetű üledékes rétegekben találják. Időnként felelevenednek a szervetlen eredetű nézetek is, amelyek szerint az elemek a mélyben uralkodó szélsőséges körülmények hatására kapcsolódtak össze szénhidrogén-molekulákká. Az ilyen elméletek újabban a tengerfenéken zajló közetmozgásokhoz kapcsolódnak.

A keletkezett szénhidrogének a földkéregben elvándoroltak, migráltak, míg át nem eresztő réteggel határolt kőolajmegtartó kőzetekbe, kőolajcsapdákbá nem kerültek. A záróréteg lehet boltozatosan felgyűrődött formáció (kerek dóm vagy hosszan elnyúló antiklinális), vetődéssel kialakult ferde réteg, kőstomb vagy zátonyszerű rög. A záróréteg alatt a kőolaj homokkövek likacsiban, pórusaiban, mészkövek, palák repedéseiben, szemcsék közötti terekben gyűlik össze. A kőolajtároló kőzetek szilárd anyaggal ki nem töltött térfogatának ará-

nya – a porozitás – 3 és 30% közötti érték. Egy-egy olajtároló réteg vastagsága néhány métertől néhányszor tíz méterig terjedhet. Gyakran egymás felett váltakozva találhatók olajtartalmú rétegek és impermeábilis zárórétegek. Az ilyen több rétegből álló zónák vastagsága pár száz métert is elérhet.

A szapropél eredete, kora, bomlásának körülményei, a szénhidrogének migrációjának útja és geológiai körülményei nagyon változatosak, ennek következtében a földkéregben található kőolaj-előfordulások anyagi összetétele, és ebből eredően fizikai és kémiai tulajdonságai lelőhelyenként erősen eltérőek. Ez már megjelenésükben is tükröződik, szalmaszínű, sárga, vöröses-barna, barna, zöld, fekete stb. színű kőolajok fordulnak elő. A legkiterjedtebb kőolajtelepeket a nagy táblák felboltozódásainál lehet találni (arab, szaharai, észak-amerikai, Volga–Urál-vidéki táblák), kis számú, egymás alatt fekvő rétegekben. A nagy geológiai törésvonalaknál kialakuló kőolaj-előfordulásokat kis felület, de nagy mennyiség jellemzi, gyakran sok rétegben (például Kaszpi-tenger, Kalifornia). A tenger alatti üledékes rendszerekben szintén kedvezőek a kőolaj-felhalmozódás feltételei.

A magyar kőolajvagyon nagy részét a hazánk területét borító triász kori tenger üledékeiből származtatják. Az első jelentős kőolaj-előfordulást 1937-ben találták meg Lispe–Lovászi térségében, 1952-ben vezettek sikerre a kutatások Nagylengyelnél és 1965-ben Algyő környékén. E jelentősebb előfordulások mellett számos más helyen (például Babócsa, Battonya, Budafa, Demjén, Dorozsma, Eger, Kaba, Pusztaföldvár, Sávoly, Szank, Szeged, Tótkomlós, Üllés, Tótalmás, Gödöllő) is találtak kisebb mennyiségben kőolajat. A kőolajkutatásra néhány külföldi cégnek adott koncessziók eddig csak szerény eredményre vezettek. A termelésbe vett hazai kőolajmezők száma jelenleg meghaladja a tízet. A dél-alföldi olajok többsége parafinbázisú, kénszegény, a sűrű konzisztenciájú dél-zalaiak nagy viszkozitásúak és magas bitumentartalmúak. A hazai előfordulásokból a 20. században 41 Mt kőolajat termeltek ki, a jelenlegi ismeretek alapján a még gazdaságosan kitermelhető vagyonunkat ~10 Mt-ra becsülik.

A tárolórétegben legtöbbször nem csak kőolaj található. A csökkenő sűrűség függvényében egymás felett többféle közeg rétegződik, amelyeket egymástól nem éles határfelületek választanak el, hanem a közegek keverékéből álló átmeneti tartományok. Legfelül gyakran szabad gáz található, nagyrészt metán, de kis mennyiségben más, kis molekulásúlyú szénhidrogének is előfordulnak. A gázsapka változó mennyiségben tartalmazhat szén-dioxidot, nitrogént, hidrogén-szulfidot, argont, neont, radont is. A gázt nedvesnek minősítik, ha légköri viszonyok között kondenzálódó szénhidrogéneket (C_5 -től C_{15} -ig terjedő szénatomszámú C_5 – C_{15} frakciók) is tartalmaz, egyébként száraznak. A gáz alatt az olaj a nyomástól és hőmérséklettől függő mértékben telítve van gázzal. Az olajban oldott gázok (főleg szénhidrogének) mennyisége többnyire jelentős, a kitermelésnél a gázhozam m^3/l nagyságrendet is elérhet.

A kőolaj a csapdákbán gyakran víz felett rétegződve helyezkedik el, ilyenkor emulzió formájában az olajban is található nem jelentéktelen mennyiségű sós víz. A vízben viszonylag nagy mennyiségű szervesetlen só, főleg nátrium-, kálium-, kalcium- és magnézium-kloridok és szulfátok vannak oldatban, NaCl-ra átszámított koncentrációjuk 0,25g/l-t is elérhet. Víz a tároló kőzet kis pórusaiban a felülethez tapadva is előfordulhat, és nyomokban a gázrétegben is.

A talajszinttől lefele haladva a geológiai körülményektől függően a hőmérséklet 100 m-enként 1,5-4,0 °C-kal nő, a nyomás pedig 1-2 MPa-lal. A Pannon-medence alatt a kialakult geotermikus anomália következtében a hőmérséklet gradiens, az átlagosnak közel kétszerese. A halmazállapot- és oldódás-viszonyok, valamint a különféle fázisok aránya a hőmérséklet és a nyomás eltérő körülményei miatt a felszínen és a rezervoárban nem azonosak. A lelőhely mélyén uralkodó magas hőmérséklet és nagy nyomás határozza meg a kőolaj komponenseinek konzisztenciáját. Kőolaj 8-12 km-nél mélyebben nem fordulhat elő, mert az ottani magas hőmérsékleten a szerves molekulák bomlanának. A talajszinten a legtöbb kőolaj híg folyós, amiben oldott gázok és kolloidfázisok (főleg emulziók), valamint szilárd anyagok (főleg nagy molekulású gyanta és aszfaltszerű anyagok) találhatóak. Az extra nehéz kőolajok légköri viszonyok között gyantaszerűek, félkemények, sőt néha szilárd állapotúak is lehetnek. Az eltérő körülmények következtében a tengeri termelésnek komoly gondja, hogy amikor a kőzetből feltörő forró olaj eléri a hideg (3-4 °C-os) tengervízbe fektetett csőszakaszt, ne váljanak ki az áramlást gátló hidrátok és parafin. Hasonló gondok jelentkeznek szárazföldi termelésnél az örök fagy térségében is.

A kőolaj nagyszámú – néha sok száz – vegyület elegye. Az összetétel a lelőhelytől függően nagyon változatos, legnagyobb részt páros számú hidrogént tartalmazó szénhidrogén-molekulák homológ sorának tagjaiból áll, melyek molekulásúlya 16 és 900 közötti érték. A nyílt szénláncú molekulák közül főleg telítettek fordulnak elő, ezen egyenes vagy elágazó láncú parafinoknak általános képlete: C_nH_{2n+2} . Légköri viszonyok között a kis szénatomszámú parafinok C_4 -ig bezárólag gázhalmazállapotúak, az e feletti tagok C_{15} -ig cseppfolyósak, ennél több szénatomot tartalmazók szilárdak (aszfaltok, bitumenek, kristályos parafin), de oldódnak a magasabb forráspontú frakciókban. Telítetlen nyílt láncú szénhidrogének – olefinek (C_nH_{2n}) – ritkán és csak kis mennyiségben fordulnak elő, ezeket a feldolgozás során állítják elő. A zárt szénláncú, ciklikus szénhidrogének közül mind telítettek, mind telítetlenek előfordulnak a kőolajban. Az egy vagy több telített gyűrűből felépített naftének néha alkil-lánc szárnyleágazást is tartalmaznak. A telítetlen, kettős kötést tartalmazó zárt szénláncú vegyületek ritkábbak, főleg az egy benzolgyűrűt tartalmazó aromások fordulnak elő (C_nH_{2n-2m}). A három alapvegyület-csoport (parafinok, naftének, aromások) tagjai sokféle kapcsolódásban és oldalláncokban egymással is alkotnak vegyületeket. Külön csoportot alkotnak az aszfaltos anyagok, amelyek hidrogénszegény, gyűrűs szerkezetű, nagy molekulájú vegyületek.

18. táblázat

Kőolajok elemi összetétele

Elem	Súlyszázalék
C	80-88
H	10-14
S	0,01-5
N	0,1-1,7
O	0,5-7,0
fémek	<0,03

A 18. táblázat a kőolajokban található elemek szokásos arányait mutatja, a szénhidrogének kivül előfordulnak kén-, nitrogén-, oxigéntartalmú vegyületek, valamint fémvegyületek is. A kén mennyisége 0,01-5%, olajban oldott kénhidrogén vagy szulfidok formájában, esetleg aszfaltanyagokhoz kapcsolódva, de lehet szerves elemi kén is. A kén égéstermék nemcsak agresszív és egészségkárosító, hanem korróziót okoz a feldolgozás és a felhasználás során, és károsítja a katalizátorokat is. Az égés magas hőmérséklete miatt az SO_3/SO_2 arány magas, 12%-ot is elérhet, ezért a kénessavhoz viszonyítva nő a kénsavképződés és ezzel a korrózió mértéke. Kedvezőtlen hatása miatt a kén-tartalom szerint is megkülönböztetik az olajokat, összefoglalóan a nagy kén-tartalmúakat savanyú, a kis kén-tartalmúakat édes olajnak nevezik, az utóbbiak ára is magasabb. A hazai kőolajok között vannak alacsony (Algyő) és magas (Nagy-lengyel, 3,5%) kén-tartalmúak. A nitrogénkoncentráció 0,1-1,7%, főleg heterociklusos vegyületekben, például merkaptánokban, piridinvegyületekben fordul elő, égésterméké légszennyező. Az oxigén (0,5-7%) többnyire szerves vegyületekben található, nafténsavakban, zsírsavakban, gyantákban, aszfaltokban, néha fémek komplex vegyületeiben. A kis mennyiséget képviselő fémek (Fe, V, Ni stb.) oxidokban, szerves sókban jelennek meg. A sók korrózióvak, magas hőmérsékleten bomlanak, a fémek katalizátormérgek, hajlamosak lerakódásra, egyesek (főleg a V és Ni) ártalmas légszennyezők.

A kőolajvagyon becslését sok bizonytalanság terheli, amit az országok és nemzetközi szervezetek eltérő osztályozási gyakorlata is nehezít. A kőolaj drágulása és a termelési technológia fejlődése bővíti a kiaknázásra érdemes előfordulások körét, a technikai fejlődés a kihozatal mértékét is növeli. A rendelkezésre álló 2002. végi adatok alapján a BP-AMOCO a műrevaló vagyonról a 19. táblázatban látható adatokat adta közre. Magyarország 10 Mt-t is alig elérő műrevaló kőolajvagyonra benne foglaltatik a táblázat „egyéb európai országok” sorában.

A táblázat több fontos következtetésre ad módot. A világ olajellátásában a Közel-Keletnek meghatározó szerepe van, mivel ebben a térségben található

A világ műrevaló kőolajvagyon

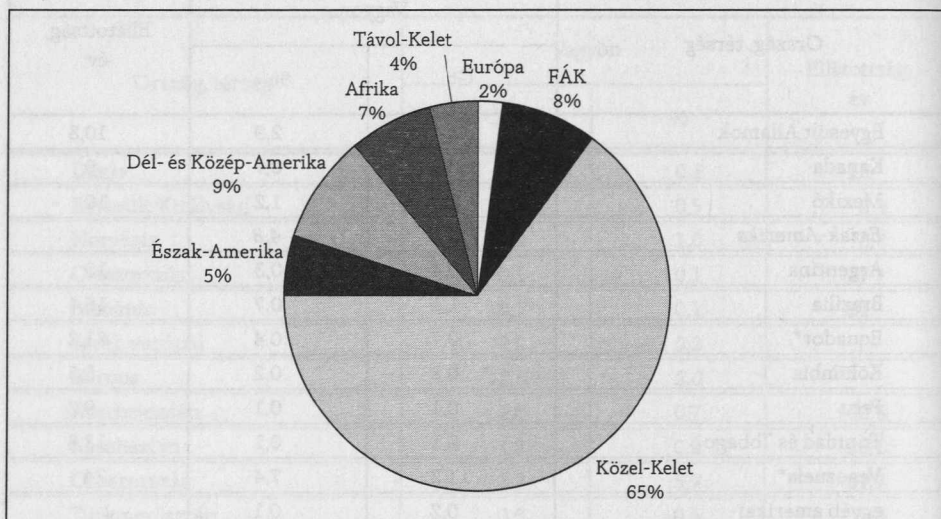
Ország, térség	Vagyon		Ellátottság, év
	Gt	%	
Dánia	0,2	0,1	10
Egyesült Királyság	0,6	0,5	5,4
Norvégia	1,4	1,0	8,7
Olaszország	0,1	0,1	17
Románia	0,1	0,1	21
egyéb európai	0,2	0,2	
<i>Európa</i>	2,6	2,0	
Azerbajdzsán	1,0	0,7	62,5
Kazahsztán	1,2	0,9	26,1
Oroszország	8,2	5,7	21,7
Türkmenisztán	0,6	0,5	5,4
Üzbegisztán	0,3	0,2	14,5
egyéb FÁK	0,1	0,1	
<i>FÁK</i>	11,4	8,1	
Egyesült Arab Emírátságok*	13	9,3	>100
Irán*	12,3	8,6	73,8
Irak*	15,2	10,7	>100
Jemen	0,5	0,4	23,4
Katar*	0,7	0,5	57,6
Kuvait	13,3	9,3	>100
Omán*	0,7	0,5	16,8
Szaúd-Arábia	36,0	25	86
Szíria	0,3	0,2	12
egyéb közel-keleti	0,1	0,1	
<i>Közel-Kelet</i>	92,1	64,6	
Algéria*	1,2	0,9	16,5
Angola	0,7	0,5	16,4
Egyiptom	0,5	0,4	14,1
Gabon*	0,3	0,2	23,2
Kamerun	0,1	0,1	15,2
Kongói Köztársaság	0,2	0,1	16
Líbia*	3,8	2,8	69,4
Nigéria*	3,2	2,3	32,8
egyéb afrikai	0,2	0,2	
<i>Afrika</i>	10,2	7,5	

19. táblázat folytatása

Ország, térség	Vagyon		Ellátottság, év
	Gt	%	
Egyesült Államok	3,8	2,9	10,8
Kanada	0,9	0,7	9
Mexikó	1,8	1,2	10
Észak-Amerika	6,5	4,8	
Argentína	0,4	0,3	10
Brazília	1,1	0,7	15,4
Equador*	0,7	0,4	31,2
Kolumbia	0,3	0,2	8,5
Peru	0,1	0,1	9,2
Trinidad és Tobago	0,1	0,1	13,8
Venezuela*	11,2	7,4	74
egyéb amerikai	0,2	0,1	
Közép- és Dél-Amerika	14,1	9,3	8,6
Ausztrália	0,4	0,3	14,1
Brunei	0,2	0,1	18
India	0,7	0,5	19,4
Indonézia*	0,7	0,5	1,1
Kína	2,5	1,7	14,8
Malajzia	0,4	0,3	10,6
Pápua Új-Guinea	0,2	0,1	9,8
Vietnam	0,1	0,1	14,7
Kelet-Ázsia és Ausztrália	5,3	3,7	
Világ összesen	142,1	100	48,6

*.OPEC-tagok

az olajvagyon kerekén kétharmada. Nem utolsósorban az olajforrások feletti befolyás megszerzésére vezethetők vissza a térséget átszövő feszültségek, amelyek nemegyszer lokális háborúkat robbantottak ki (például Irán–Irak, Irak–Kuvait, Észak- és Dél-Jemen között). A térség labilitása a kőolajellátás biztonságát is veszélyezteti. Nem véletlenül törekszik az Egyesült Államok mindenáron a második legnagyobb kőolajvagyonnal rendelkező Irak pacifikálására. Fontos körülmény, hogy a világ kőolajvagyonának 78%-a az OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries, Kőolaj Exportáló Országok Szervezete) -tagállamok területén található. Erre támaszkodva a szervezet alapvető befolyást tud gyakorolni az olajellátásra – mindenekelőtt az árakra – amikor sikerül összehangolnia a tagállamok olajpolitikáját (mint például az

A világ műrevaló kőolajvagyonának regionális megoszlása

1970-es években, majd a 20. század végén). Egyes vélemények szerint az 1980-as évek második felében az OPEC-országok azért jeleztek nagy vagyongyarapodást, mert a szervezet a termelési kvótákat a műrevaló vagyonok arányában osztja szét. Figyelmet érdemel, hogy az Európai Unió a világ olajvagyonának 1%-ával sem rendelkezik, miközben fogyasztása a világfelhasználás 20%-át teszi ki. Ez az erős importfüggés, ami 2020-ra akár 95%-ra is nőhet, jelentős kockázati tényező az unió energiaellátásának biztonságában. Erre a bizottság 2000 végén kiadott „zöld könyv”-e nyomatékosan felhívja a figyelmet, egyben közös energiapolitika kidolgozását sürgeti. A világ kőolajvagyonának regionális megoszlását a 6. ábra érzékelteti.

A környező közetekkel kialakult kölcsönhatások miatt a rezervoárban található kőolajat teljes mértékben nem lehet kiaknázni, 0,3-0,5-nél nagyobb arányú kihozatal a jelenlegi technológiákkal csak kivételesen érhető el. Heves viták tárgya, hogyan alakul a világ kitermelhető végső olajvagyon, amit a különféle elemzések 300-400 Gt-ra becsülnek. Ebben nemcsak a bizonyított vagyont veszik figyelembe, hanem a valószínű és lehetséges előfordulásokat is. Bár gyakran megjósolták a világ kőolajvagyonának közeli kimerülését, a kőolajkutatás rendszeresen új lelőhelyeket tár fel, az utóbbi években a vagyon már gyorsabban nőtt, mint a felhasználás. A két világháború között találtak rá az Arab-félsziget, Texas, Venezuela, Közép-Ázsia olajvagyonára, a második világháború után tárták fel a Szahara, Szibéria, Indonézia területén a lehetőségeket, az olajválság nyomán indult meg a termelés az Északi-tenger, Alaszka, Délkelet-Ázsia olajmezőin, majd később ismertté váltak Nigéria, Angola, Bra-

zília, Kolumbia olajlelőhelyei. Új olaj-előfordulások felfedezését a jövőben is remélni lehet, mivel a Földön még több száz olyan ígéretes üledékes medence található, amelyeket még meg sem kutattak. A sokféle végzett szárazföldi kutatások sok új termelési lehetőséget tártak fel, de a közel-keletiekhez hasonló gazdagságú előfordulásokat eddig nem találtak. A Föld mintegy 30 000 termelésbe vont kőolaj-előfordulás 1%-a számít óriásinak, viszont ezek szolgáltatják a világtermelés háromnegyedét. Kedvezőtlenebb klímaövezetek (trópusok, sarkkörü övezet), nehezebb megközelíthetőség, előnytelen geológiai körülmények, nagyobb mélység, kisebb rezervoárok, gyengébb olajminőség és hasonló hátrányok jellemezték a legtöbb újonnan termelésbe vett mezőt. Ezek alapján feltételezhető, hogy a szárazföldi (*on shore*) termelés körülményei a korábbiakénál kedvezőtlenebbé válnak, aminek feltételezhetően már árfelhajtó hatása lesz.

Az utóbbi két évtized drámai fejleménye a tenger alatti (*off shore*) olaj-előfordulások feltárása, a világ olajtermelésének már több mint harmada származik tenger alatti kutakból, és a kilátások nagyon biztatóak. Kezdetben csupán a néhány száz méteres tengerrel borított kontinentális talapzatban (*selfek*) tételeztek fel kőolaj-előfordulásokat, idővel azonban azok folytatásában, a kontinentális rézsűben és az óceáni lapályokban, továbbá az üledékes szerkezetű óceáni medencékben is sikerre vezettek a kutatások, a mély tengerek alatt szintén óriási készleteket sikerült feltárni.

A kőolajok minőségének legfontosabb jellemzője a sűrűség és a viszkozitás. A többféle osztályozási rendszer közül leginkább a sűrűségmérésen alapulókat terjedtek el. A gázmentes kőolaj fajsűrűsége a nagy molekulájú szénhidrogének arányától függően 0,7-1,02 kg/l. A sűrűség a H/C arány függvénye, a parafinok sűrűsége a legkisebb, a nafténeké nagyobb, még nagyobb az aromásoké, és az aszfaltanyagoké a legnagyobb. A legegyszerűbb minősítési rendszert a 20. táblázat mutatja, ami kétféle desztillálás során nyert párlat osztályozására alapul. Az első lepárlásnál légköri nyomáson a 250-275 °C forrpon-tú, a másodikonál 5,3 kPa-nál a 275-300 °C forrpon-tú frakciókat különítik el, és sűrűségüket 15,5 °C-on mérik.

20. táblázat

Kőolajok minősítése

Jelleg	Sűrűség, kg/l	
	első kulcspárlat	második kulcspárlat
parafinos	<0,83	<0,874
intermedier	0,83-0,86	0,874-0,928
nafténes	>0,86	>0,928

Ha mindkét párlatban a könnyű frakciók dominálnak, a kőolaj parafinbázisú, a nehéz frakciók dominanciájánál nafténbázisú, ha kettő között helyezkedik el, az intermedier kategória, míg az aszfaltbázisúakat külön kezelik. Egy másik rendszer 9 osztályt különböztet meg a háromféle alaptípus különféle keverékeinek figyelembevételével. A hazai kőolajok között főleg parafinos (Algyő), bitumentartalmú (Nagylengyel) és intermedier típusok találhatók. A kereskedelembe leginkább az API (American Petroleum Institute, Amerikai Kőolaj Intézet) fokot használják, ami a vízhez viszonyított $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on mért relatív fajsűrűséghez rendelt érték, az API skálán 0° tartozik $1,076$ fajsűrűséghez és 100° $0,612$ -höz. Az API° alapján a könnyű olajok tartománya $31,1^{\circ}$ felett helyezkedik el, a közepes olajoké $22,3^{\circ}$ és $31,1^{\circ}$ között, a nehéz olajoké 10° és $22,3^{\circ}$ között, és 10° alatt helyezkednek el az extra nehéz olajok.

Az osztályozási rendszerek főleg gyors tájékozódásra alkalmasak, minél kisebb a sűrűség, annál több motorhajtó üzemanyagot lehet a kőolajból kinyerni. Az áramlási viszonyok szempontjából különösen fontos viszkozitás mérésére többféle módszer használatos. Egyszerű meghatározni az olaj és a víz kicsorgási idejének hányadosaként értelmezett Engler-fokot, szabatosabban a poise-ban, stoke-ban, illetve m^2/mp -ban megadott értékek. A sűrűségtől és az aszfalttartalomtól függően a kőolajok viszkozitása szobahőmérsékleten a híg folyós és a kenőcsszerű állapot között nagyon eltérő értékeket mutat ($7 \cdot 10^{-7}$ és $13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{mp}$ között). A hőmérséklet és az oldott gázmennyiség növekedése csökkenti a viszkozitást, a nyomás növekedése pedig növeli. A ki-termelés szempontjából fontos a kőolaj felületi viselkedésének ismerete, különösen a vízzel alkotott határfelületen, valamint a kőzetek felszínén. A hőmérséklet és a gáztartalom növekedése csökkenti a felületi feszültséget, a felületi adhéziót csökkentő felületaktív adalékok megnövelik a kőolaj mozgékony-ságát a kőzetekben.

Más osztályozási módszerek más jellemzőket, például a kémiai összetételt vagy a karbontartalmat veszik alapul, esetleg több mutatót (viszkozitás és sűrűség, forráspont és fajsúly) együttesen vesznek figyelembe. A feldolgozási lehetőségek megítéléséhez azonban a fizikai és a kémiai tulajdonságok részletebb ismeretére van szükség. A tőzsdei forgalomban a származási hellyel jellemzik a kőolajokat, mivel az egyértelműen meghatározza az anyagjellemzőket is.

A kőolaj hasznosítása

A felszíni olaj-, illetve aszfaltkibúvások hasznosításáról az első adatok az ókori Mezopotámiából származnak. A fontos szövegeket tartalmazó agyagtáblákat bitumenborítással óvták, aszfaltot használtak hajók impregnálására, téglafalak tapasztására, homokkal keverve épületalapok szigetelésére. A Gilga-

mes-eposz leírja, hogyan főzték a bitument a kellő keménység elérésére. Olajfáklyák alkalmazására, valamint templomi lángok táplálására már Babilonban is voltak példák. Az első olajlámpást az alexandriai Héron szerkesztette i. e. 100 körül, de elterjedésére két évezredet kellett várni. Olajjal gyújtották fel a rómaiak a szaracén flottát, és olajtűztől pusztult el 670-ben az ostromlott Syracusa. A tatárok tüzes nyilain, a bizánciak tengeri ütközetben alkalmazott „görög tűzben” felitatott szurok égett. Kolumbusz a bennszülöttek tapasztalata alapján trinidadi aszfalttal szigetelte a hajóit. A középkortól kezdve az olajat külsőleg és belsőleg gyógyszerként is alkalmazták, a 18. századtól kezdve előnyös kenési tulajdonságait is kiaknázták. A kőolajlepárlás lehetőségét először Agricola említi (1550-ben), arab gyakorlat alapján. Az első nagyobb keresletet a kőolajtermékek iránt a petróleumlámpák széles körű elterjedése támasztotta a 19. században. Ennek kielégítésére kezdték meg a felszínközeli előfordulások kitermelését ásott kutakból, árkokból, felszíni kibúvásokból, és indult el a kezdetleges lepárlás is. A benzin ebben az időben kellemetlen és veszélyes hulladék volt, amit óvatos eltüzeléssel kellett megsemmisíteni. Szigorú rendszabályok tiltották, hogy a petróleum hígítására használják, mert a petróleumba kevert benzin okozta robbanás sok ember halálát okozta. Úgy tűnt, hogy a világítógáz, majd a villanyvilágítás megjelenése aláássa a petróleum és ezzel az egész olajipar jövőjét, és csak az akkoriban kiépülő vasút növekvő kenőanyag-szükséglete marad meg a nehéz frakciók felhasználási területeként. Ki gondolta volna az első – kerékpárookra szerelt – kezdetleges belsőégésű motorokról, hogy megváltoztatják az emberiség életvitelét, és ennek érdekében a kőolajipart is példátlan ütemű fejlődési pályára állítják. Míg a 20. század elején a világ kőolajtermelése alig ért el néhány millió tonnát, a század végén már 3,5 milliárd tonna körül mozgott. Nincs még egy nyersanyag, amelynek termelése egy évszázad alatt ezerszeresére nőtt. A fejlődésben meghatározó szerepe volt a kútúrési technológia kialakulásának, amivel egyre mélyebben fekvő és mind nagyobb előfordulásokat lehetett bevonni a termelésbe. Ugyancsak jelentős fejlemény volt a csővezetékes kőolajszállítás kifejlesztése. Az első sikeres kőolajfúrást 1859-ben Pennsylvaniában (USA) végezték, a váratlanul feltörő nagy olajmennyiség felfogására csak heringes hordók álltak rendelkezésre, így vált ezek szabványos térfogata – a barrel⁷ (hordó) – a mai napig is az olajkereskedelem alapvető mértékegységévé. Mivel az olaj fajsűrűsége leőhelyenként eltérő, országoként eltérő átszámítási kulcsot alkalmaznak a tonnában mért mennyiség meghatározásához (6,813 és 8,043 bbl/t között, a világátlag 7,7). Magyarországon az első olajkutató 1890-ben fúrták.

Az olajipar gyors fejlődése a világ legnagyobb őőkeereőő és hatalmas nyeresőőő vállalatainak a létreőőttét és mesés magánvagyonok felhalmozódását eredményezte. A leghamarabb és a legdinamikusabban az amerikai olajipar alakult ki. Rendkívőő nagy politikai és gazdasági befolyása, valamint visszaélőő

sei miatt Amerikában a Standard Oil a trösztellenes törvény alkalmazásának legfőbb célpontjává vált. A 20 évig tartó pereskedés végén az amerikai legfelsőbb bíróságnak a tröszt feloszlására kimondott ítélete után 1911-ben azt 34 vállalatra bontották, amelyek között olyan önmagukban is hatalmas szervezetek voltak, mint az Exxon, a Mobil Oil, a Standard Oil of California. A vállalhálózat azonban bonyolult pénzügyi kapcsolatok, titkos megállapodások és informális eszközök révén továbbra is az alapító J. D. Rockefeller irányítása alatt maradt. Az újabb olaj-előfordulások felfedezése az Egyesült Államokban további vállalatok alapítására adott módot, egyesek, például Texaco, Gulf Oil, a legnagyobbak sorába fejlődtek. Mivel a kőolajtermékek nemcsak a közlekedési eszközök és mobil munkagépek pótolhatatlan üzemanyagai, hanem biztosításuk a korszerű hadseregek ütőképességének is kulcskérdése, a kőolajipari vállalatok tevékenysége gyakran összefonódik a politikával. A páratlan lehetőségek kiaknázására követett agresszív politikájuk fegyvertárában minden napos volt a gazdasági nyomás, az erőszak, a törvények kijátszása, ha érdekük kívánta, kormányokat döntöttek meg, felkeléseket és háborúkat robbantottak ki. A nagyhatalmak közötti harc a kőolajforrások birtoklásáért már a 20. század elején megindult, a kőolajforrások megszerzését politikai intrikák, titkoszolgálati akciók, fegyveres konfliktusok kísérték. A megoldás többnyire az értékes területek megszállása, a nyílt gyarmatosítása volt. A Távol-Keleten kialakuló Royal Dutch Shell kíméletlen módszerekkel irányító H. Deterding országok politikáját befolyásoló szerephez jutott, a bakui olajmezők elvesztése miatt a Szovjetunió elleni intervenció fő finanszírozójává, majd a náci Németország támogatójává vált. Az iráni olaj kiaknázási jogát a haditengerészet ügynöke ravasz csellel szerezte meg az angol kormánynak, erre alapították a British Petroleum (BP) elődjét. Regénybe illő bonyadalmak között zajlott a harc az iraki olajért a német és az angol szervezetek között. A két világháború között a nyílt katonai akciók finomabb politikai módszerekkel ötvöződtek, gyarmati státus helyett protektorátus kialakításával, gazdasági befolyás biztosításával, baráti kormányok hatalomra juttatásával stb. A világháborúk stratégiai céljai között jelentős szerepe volt a kőolajforrások birtokbavételének, és az ellenség távoltartásának a forrásoktól. Az olajipari vállalatok üzleti érdeke azonban rendszerint megelőzte az állami érdeket, még a világháború időszakában is folytak üzemanyag-szállítások az ellenséges országoknak.

A két világháború között tovább erősödött az amerikai olajipar pozíciója, új jelentős olajkincseket tártak fel (Venezuela, Mexikó, Texas), és megszerezték az olajszállítási és -finomítási kapacitások legnagyobb részét. A második világháború végén a világgazdaság olajellátása szilárdan a nagy olajipari társaságok – mindenekelőtt a rendkívül megerősödött amerikai irányítású vállalatok – kezében koncentrálódott, a nagy olajvállalatok gazdasági hatalmuk, politikai befolyásuk csúcsán voltak, a világ legnagyobb vállalatainak élbolyában a legtöbb helyet a multinacionális olajvállalatok foglalták el. Az olajpiac helyze-

te megingathatatlanak tűnt, a Közel-Keleten és Észak-Afrikában mesés olajkincsekre bukkantak, csak meg kellett fújni Szaúd-Arábiában, Kuvaitban, Iránban, Irakban, Líbiában, Algériában és másutt a homokot, és ömlött az olcsó olaj. Az olajforrások kiaknázásának a lehetőségét, rendkívül előnyös feltételek mellett, több évtizedre szóló koncessziók biztosították. A gyarmatbirodalmak felbomlása után a gazdasági függés vette át a katonai és politikai hatalom szerepét. A volt gyarmati országok politikai függetlenségük elnyerése után is sok szálon függték a volt gyarmattartóktól, de ezek a szálak koptak, az amerikai tőke pedig igyekezett átvenni a befolyást ezen országok felett. Ebben szerepet játszott a feszült nemzetközi helyzet, a katonai támaszpontok mellett az olajforrások birtoklása is stratégiai jelentőséggel bírt. A kulisszák mögött néha előfordultak békétlenségek a szövetségesek között, de az amerikai hegemonia vitathatatlan volt a hidegháborúban. A monokulturális olajországokban a tényleges hatalom az olajvállalatok kezében volt, ezek gazdasági kényszerrel, politikai intrikákkal, ha kellett erőszakos beavatkozással biztosították, hogy a helyi politikai vezetés megfelelően képviselje érdekeiket. Ha valamelyik kormány nem volt elég engedelmes, újat ültettek a helyére, az okvetetlenkedő személyiségeket lecserélték vagy eltették láb alól, az olajkiaknázását veszélyeztető szociális elégedetlenséget vaskézrel törték le. Az olajpozíciók átrendezése érdekében nem voltak ritkák a puccsok, államcsínyek, néha helyi háborúkra is sor került.

A második világháborút követő negyedszázad alatt az olajbirodalmak helyzete – mindenekelőtt a „7 nővér” (Exxon, Shell, Texaco, Mobil, Gulf, Standard, BP) és leányvállalataik szövetvényes hálózata – rendíthetetlennek tűnt. A bőségesen és olcsón rendelkezésre álló olaj világpiaci árát a kedvező koncessziós feltételek és az alacsony önköltség biztosították. De az olajvilágrendszeren megjelentek az első repedések, amelyeket akkor még gyorsan ki lehetett javítani. Az eredeti állapot helyreállítására az olajtársaságot államosító Moszadik iráni miniszterelnököt megbuktatták és bebörtönözték (1953), az olasz ENI (Ente Nazionale Idrocarburi, Nemzeti Szénhidrogén Vállalat) önálló olajpolitikát ösztönző vezérigazgatójának, Matteinek a repülőgépet lelőtték. De a feszítőerők egyre nőttek, a fejlődő olajországok gazdasági felemelkedésükhöz nagyobb részesedést követeltek az olajjövedelmekből. Az olajtársaságok engedményekre kényszerültek, az 1970-es évek elején nagyobb koncessziós díjakat, bányajáradékokat, exportilletékeket fogadtak el, bizonyos idő után beletrőrdtek a tulajdonban való részesedésbe is, de egyes országokban (Mexikó, Líbia, Szíria, Algéria, Venezuela, Irán, Irak) az olajvállalatok teljes államosítását sem tudták megakadályozni. A nagy áttörés az 1973. évi 4. közel-keleti háború során következett be, amikor az arab olajországok bevetették az olajfegyvert. Az arab hadviselők támogatására visszafogták az olajtermelést, egyes országok ellen embargót vezettek be, és többszörösére emelték az olajárát.

Az áremelést viszonylag könnyen sikerült érvényesíteni, mivel az egybeesett a többi olajország és az olajtársaságok érdekével. Az olajár alakítása hosszú időre az 1960-ban alapított OPEC kezébe került, az 1970-es években még több kisebb, valamint 1978-ban még egy nagy áremelésre került sor, 1981-ben már 26,26 USD/t-t ért el, szemben az 1971 évi 13,3 USD/t-val. Az első árrobbanás sok országban energiaellátási zavarokat váltott ki, ami különféle kényszerintézkedéseket tett szükségessé. A tartósan érvényesülő magas olajár nemcsak az energiaellátást zavarta meg, hanem súlyos károkat okozott az egész világ gazdaságában. Az olajimportáló országok fizetési mérlege felbillent, gazdasági megszorításokra került sor, sok fejlődő ország fizetési képessége elcsúszott, máig is kiható következményekkel. Az áremelkedés inflációt és recessziót gerjesztett. Az olajországokban óriási – évente 100 mrd USD-t meghaladó – olajjövödelmek halmozódtak fel, ezek jó részét a pénzpiacon könnyen megszerezhető hitelek formájában költötték el, ami később sok ország súlyos eladósodásához vezetett. Rekordmagasságot ért el az olajvállalatok profitja is, amit pozícióik átrendezésére használtak fel, új – az OPEC-től független – területeken (például Latin-Amerika, Közép-Afrika, Indonézia, Távol-Kelet) keresve olajforrásokat, tevékenységük súlypontját a kőolajszállítás és -feldolgozás, valamint a termékértékesítés területére helyezték át, továbbá diverzifikálták üzleti tevékenységüket az energetika más (földgázellátás, szénbányászat, megújuló energiahasznosítás) szektoraiban.

Az 1970-es évek olajválsága kikényszerítette az olajimportáló fejlett országok gazdaságpolitikájának módosítását. Egyrészt a fejlett technikát tartalmazó, és így nagy értéket megtestesítő termékek és technológiák exportjának előtérbe helyezésével helyrebillentették a fizetési mérlegüket. Másrészt erőteljes lépések történtek olajfelhasználásuk mérséklésére (energiatakarékosság ösztönzése, az olaj helyettesítése más energiahordozókkal, az energiaigényes iparágak kitelepítése fejlődő országokba stb.). Az OPEC monopolhelyzetének csökkentésére az olajbeszerzés forrásainak diverzifikálására törekedtek, támogatva az OPEC-től független olajforrások felkutatását. Megalakították az IEA-t (International Energy Agency) az energiapolitikák koordinálására és az olajellátási válságok közös elhárítására. A nagy olajimportálók stratégiai tartalékokat képeztek, aminek tárolására a tartályokon kívül felhasználhatók a föld alatti üregek, a felhagyott bányák, kiselejtezett tankhajók, vagy nem termelő olajmezők is. A legnagyobb stratégiai tartaléka (700 M bbl) az Egyesült Államoknak van, az elnök közvetlen rendelkezése alatt. Kritikus időszakokban e hatalmas készletből piacra dobott mennyiségekkel befolyásolni lehet a kőolaj világpiacát is. Az EU-ban és Magyarországon a gyakorlat a legalább háromhavi felhasználás fedezetére elegendő tartalék, de az EU tervezi a tartalékolás kötelező mértékének felemelését 120 napra. Hazánkban e tartályokban tárolt készletek biztosítása erre a célra létrehozott társulás feladata, a tárolt mennyiség meghaladja az EU előírását.

A fejlett országok stratégiájának sikere párosult az OPEC egységének meglazulásával. A kis lélekszámú olajországok (Szaúd-Arábia, Kuvait, Egyesült Arab Emírségek) olajjövödelmükből magas életszínvonalat biztosítottak a lakosságnak, és megalapozták az olaj utáni kor gazdaságát, egyrészt hazai beruházásokkal, másrészt külföldi befektetésekkel. Ezek az országok szükség esetén könnyen elviselik az olajtermelés visszafogását is, ami a magas olajárak fenntartásának egyik eszköze. Ez számukra nem okoz veszteséget, mivel a földben hagyott olaj megőrzi értékét. A sűrűn lakott olajországok (Irán, Irak, Algéria, Líbia, Mexikó, Nigéria) azonban az olajtermelés tartósan magas szintjében érdekeltek, mert a lakosság elviselhető életkörülményeit így is nehezen tudják biztosítani az olajjövödelmekből. A két országcsoport érdekeit hosszú ideig nem sikerült összehangolni, s az OPEC befolyása visszaszorult. Mindezek következtében az 1980-as években megindult az olajár csökkenése, ami- ben még jelentős olajforrások kiesése is – például a helyi háborúk miatt – csak átmeneti növekedést okozott, viszont szinte összeomlásszerű árcsökkenés alakult ki 1986-ban és 1998-ban. A 20. század utolsó éveiben az olajár nagyon ingataggyá vált, 1999-re a reálár a krízis előtti szintre esett vissza, ami kiváltotta az olajországok összefogását, az OPEC ismét meghatározó szerephez jutott. Ennek eredményeképp az olajárát 1999-ben 10 USD/bbl-ról (~77 USD/t) 31 USD/bbl-ra (~239 USD/t) növelték, és az a következő években időnként számottevően meghaladta a 30 USD/bbl-t. Ennek nyomán a benzin és a gáz-olaj áremelkedése meghaladta a fuvarozók tűréshatárát, ami Nyugat-Európában tettelegességbe torkolló demonstrációkat, útelzárásokat, a finomítókból a kőolajtermékek kiszállítását megakadályozó blokádot idézett elő. A feszültségek levezetésére és a gazdasági stabilitás biztosítására egyes kormányok mérsékeltek az üzemanyagok adótartalmát, amire átmenetileg Magyarországon is sor került.

Hosszabb idő szükséges ahhoz, hogy az olajár hektikus mozgása lecsillapodjon, s a kompromisszum 25 USD/bbl táján állapodjon meg, de lefele és felfele is lehetséges néhány USD-nyi eltérés (az OPEC 25 ± 3 USD/bbl-t irányzott elő). Az olajár-alakítás mögött azonban nehéz nem látni a legnagyobb olajvállalatok és a világ gazdaság meghatározó államainak érdekérvényesítését is. A kompromisszum a kőolajtermelő országoknak biztosított nagy jövedelemmel alapot ad politikai és gazdasági elképzeléseik megvalósításához. Ennek ellenében érdekeltté váltak abban, hogy kapcsolataik az olajimportáló országokkal szilárdak legyenek. A szállító, feldolgozó, valamint értékesítő hálózat birtokában levő nagy olajvállalatok is jól járnak, hiszen jövedelmük többszörösére nő a magas olajárakkal arányos nagyobb nyereség következtében. A vezető fejlett országok beletörődtek a magasabb árakba, a jövedelmek jelentős része úgyis hozzájuk áramlik vissza részben az olajtársaságok adójában, részben az olajországok vásárlásaival. De arról nem mondtak le, hogy befolyásukat időnként latba vessék világpolitikai és világ gazdasági célok érvé-

nyesítésére. Ebben az USA mellett növekvő szerephez jut a nagy olajexportőrök közé tartozó Oroszország is.

Távlati helyzetük megalapozására az olajtársaságok meghatározó szerepre törekednek a helyettesítési lehetőségek területén is (szénbányák és nem konvencionális szénhidrogén-előfordulások tulajdonjogának megszerzése, technológiai eljárások fejlesztése olajpótlásra és megújuló energiák hasznosítására). A 20. század végén az erőviszonyok új átrendeződése indult el a nagy olajvállalatok fúziójával (Exxon + Mobil, BP + Amoco, Chevron + Texaco, Total + Fina + Elf stb.) és tevékenységük kiterjesztésével az energetikán kívüli, hálózatszerűen működő (infrastruktúra, informatika, bankok) területekre.

21. táblázat

A legnagyobb olajtermelők

Ország	Termelés, Mt/év	Ellátottság, év
Szaúd-Arábia	418,1	86,0
Egyesült Államok	350,4	10,8
Orosz Államszövetség	379,6	21,8
Mexikó	178,4	10,1
Irán	166,8	73,8
Kína	168,9	14,8
Norvégia	157,4	8,7
Venezuela	151,4	74,0
Kanada	135,6	9,0
Egyesült Királyság	115,9	5,4
Egyesült Arab Emírátsok	105,6	>100
Irak	99,7	>100
Nigéria	98,6	32,8
Kuvait	91,8	>100
Brazília	74,4	15,4
Algéria	70,2	18,5
Líbia	64,7	32,8
Indonézia	62,4	10,8
Kazahsztán	47,2	28,1
Omán	44,6	16,8
Argentína	39,4	10,1
Malajzia	37,0	10,6
Kolumbia	29,7	8,5
Egyiptom	37,0	14,1
Katar	34,7	57,6

A világ kőolajtermelése 2002-ben 3,68 Gt volt, a legnagyobb olajtermelő országokat a 21. táblázat mutatja be (a statisztikai adatok a kőolajon kívül tartalmazzák a nem konvencionális olajtermelést, valamint a földgázból kinyert folyékony és kondenzált szénhidrogéneket is). Az 1937-ben indult magyar olajtermelés az 1980-as évek közepén tetőzött 2,2 Mt/év értékkel, azóta lassan csökken, mértéke már az 1 Mt/évet sem éri el.

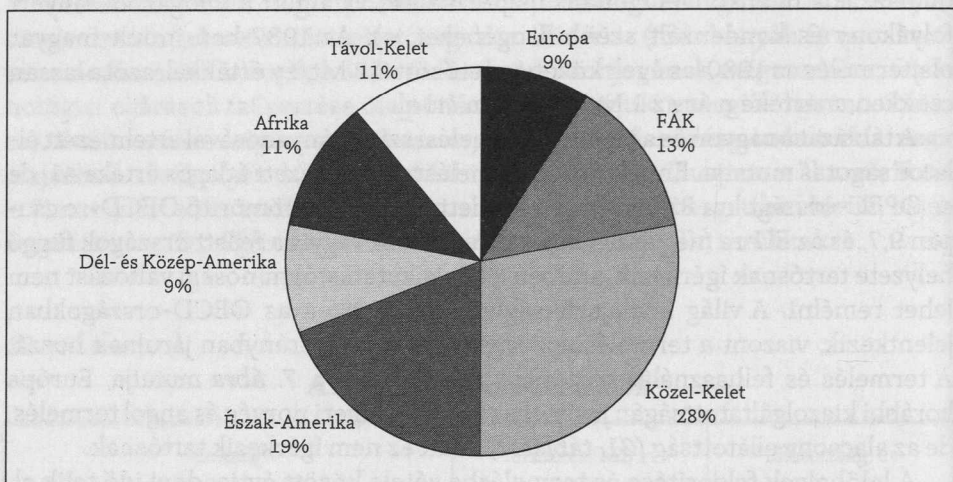
A táblázat a vagyon és a jelenlegi termelési szint hányadosával értelmezett elátottságot is mutatja. Ennek a világtermelésre értelmezett átlagos értéke 41, de az OPEC-országokra 82 év, viszont a fejlett országokat tömörítő OECD-re csupán 9,7, és az EU-ra még ennél is jóval kevesebb. Vagyis a fejlett országok függő helyzete tartósnak ígérkezik, amiben a kőolajkutatástól minőségi változást nem lehet remélni. A világ kőolajszükségletének 61,9%-a az OECD-országokban jelentkezik, viszont a termeléshez csupán 28,4%-os arányban járulnak hozzá. A termelés és felhasználás regionális megoszlását a 7. ábra mutatja, Európa korábbi kiszolgáltatottságán javított az északi-tengeri norvég és angol termelés, de az alacsony ellátottság (21. táblázat) miatt ez nem ígérkezik tartósnak.

A lelőhelyek felderítése és termelésbe vétele között évtizednyi idő telik el. Időigényes a geofizikai, geológiai és hidrológiai körülmények feltárása és a rezervoárban található vagyon felmérése, amire a termelési és technológiai terv alapul. A rezervoárok felkutatásában és azok kiaknázásának tervezésében minőségi változást eredményezett a háromdimenziós (3D) szeizmikus mérés és a számítógépes modellezés. Néhány évet vesz igénybe a termelőkutak kialakítása, a csőhálózatok és a különféle felszíni létesítmények megépítése is. A kőolajmezők termelési élettartama átlagosan negyven év körül mozog, a rezervoárgazdálkodástól és az üzemvitel módjától függően.

A kútúrás technikája mind a fúrási sebesség, mind az elérhető mélység tekintetében állandóan fejlődik. Az elérhető sebesség a kőzetek keménységétől és a rétegek szerkezetétől függ, értéke 0,3 és 60 m/óra közé esik. A kutatófúrások már a 10 km-es mélységet is meghaladják, a fúrási költségek azonban a mélység függvényében rohamosan nőnek. A termelőkutak a rezervoár elhelyezkedésétől függően pár száz és pár ezer méter közötti mélységből hozzák felszínre az olajat, átlagos napi hozamuk 10–100 tonna, de ettől mind lefele, mind felfele jelentős eltérések is előfordulnak. A ferde és később a horizontális fúrás technikájának kifejlesztése nagymértékben kiszélesítette mind a kutatás, mind a kitermelés lehetőségeit. Az utóbbi különösen a tengeri termelésben nyitott új utakat, egyetlen felszállóvezetékkel továbbítva több termelőkút termékét, ilyenkor a kutaktól kiinduló vezetékeket a felszálló vezeték talpontjánál kialakított gyűjtő szerelvényhez vezetik. A tenger alatti termelési mód azonban nem olcsó a bonyolult követelményeket kielégítő és költséges termelőberendezések miatt, és nem veszélytelen a zord tengeri körülmények (viharok, nagy hullámok, északon jéghegyek, nehéz megközelíthetőség stb.) következtében.

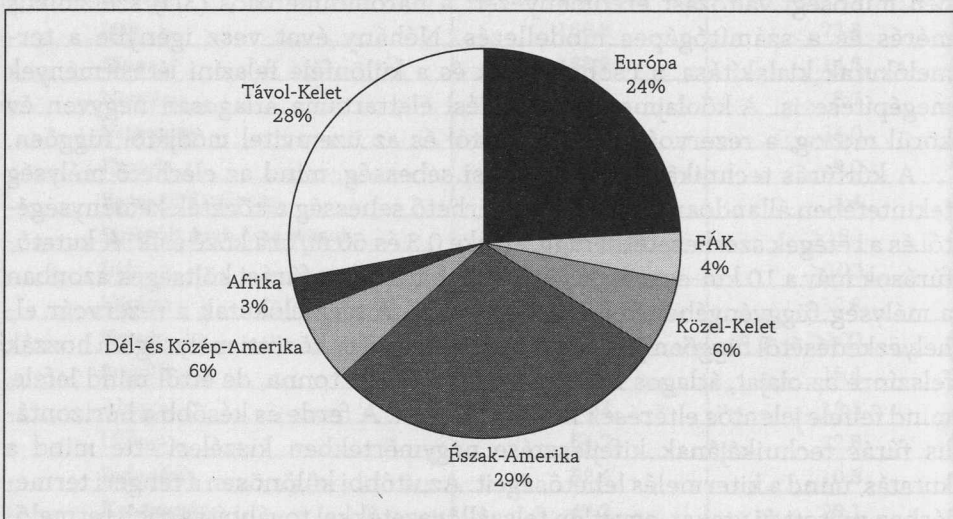
7a. ábra

A kőolajtermelés regionális megoszlása



7b. ábra

A kőolaj-felhasználás regionális megoszlása



A kútképzés körülményeitől függően szükség lehet egynél több koaxiális bélésű beépítésére, a legbelső bélésűsövön belül helyezkedik el a kőolajat felfele továbbító termelőcső, amit a kitermelni kívánt rétegnél perforálnak. Esetleg az oldalán elzárható nyílásokat alakítanak ki, más rétegek termelésbe vétele, vagy felülről más közegek (pl. segédgáz) bevezetése érdekében.

Ha egyidejűleg több rétegből kívánnak termelni, lehetséges több termelőcső behelyezése is. A több cső lehetőséget teremt egyidejűleg több közeg különböző irányú áramoltatására, amit megfelelő csőszakaszokon elhelyezett szerelvényekkel lehet terelni. Az áramlások irányítására, szabályozására és lezárására szolgáló legfontosabb szerelvények a kút tetején kialakított „kará-csonyfában” helyezkednek el. A kutakba időnként segédanyagokat is juttatnak, a kőzetek áteresztőképességének növelésére (reperesztés, savazás), gátakat képző adalékokkal akadályozzák meg víz vagy homok nemkívánatos bejutását a termelőcsőbe.

A kőolajtermelésben elsődleges, másodlagos és harmadlagos eljárásokat különböztetnek meg. Az elsődleges eljárásoknál a termelés lényegében az olajra ható felhajtóerőre alapul, a másodlagosaknál a felhajtó hatást különféle közegek benyomásával növelik, a harmadlagosaknál pedig a porózus tároló kőzeten belül növelik az olaj mozgékonyosságát. A szárazföldi olajbányászat hatékonysága meglehetősen alacsony, az átlagos kitermelési együttható 0,3-0,4, vagyis a rezervoárban levő olaj 60-70%-át nem sikerül a felszínre hozni. A másodlagos és harmadlagos eljárásokkal a kihozatal több százalékkal növelhető, de ezek alkalmazását a földtani körülmények, illetve a költségek nem mindig teszik lehetővé. A magyar kőolajtermelés csúcsidőszakában a kihozatal 42%-át elsődleges, 41%-át másodlagos és 17%-át harmadlagos termelési mód jellemezte, de a csökkenő kőolajár gazdaságtalanná minősítette a másodlagos és harmadlagos eljárásokat. A döntés ezek beszüntetésére azonban aligha bizonyul időtállóknak. A tenger alatti termelés kihozatala nagyobb, átlagosan 40% körüli, és a kutak átlaghozama is bővebb. A lehetőségek és a realitások alapján nem várható, hogy a világ kőolajtermelésének átlagos kitermelési együtthatója 1-2 évtizeden belül 0,5 fölé emelkedjen, vagyis a kőolaj fele a föld méhében marad.

A kőolajmezők egy részében a kúttalphoz érkező kútáram energiája elég nagy a kőolaj felszínre emeléséhez, a kőolaj külső beavatkozás nélkül kijut a felszínre. E felszálló termeléshez a felhajtóerőt biztosíthatja az olaj feletti gázsapka nyomása, ami a pórusokból kiszorítja maga előtt az olajat. A nyomás csökkenésével a kutak hozama is csökken. Felhajtóerőt képvisel az olaj alatt elhelyezkedő víz hidrosztatikus nyomása is, ahogy a víz felemeli maga előtt az olajat. A víz tökéletesebben kiszorítja a pórusokból az olajat, mint a gáz, az ilyen kutak hozama mindaddig állandó, amíg a víz szintje el nem éri a termelőcső talppontját, akkor a kút elvizesedik.

A termelés előrehaladtával a rétegenergia csökken, azt kívülről bevezetett energiával kell kiegészíteni. Ennek egyik lehetősége, hogy külső forrásból folyamatosan vagy szakaszosan segédgázt nyomnak a béléscsőbe, és azt többnyire a talppontnál, esetleg egy feljebb fekvő nyílásnál vezetik be a termelőcsőbe. E gázliftes termelésnél az olajjal keveredő gáz növeli a felhajtó hatást, a kőolajtermelés néhány százalékánál ezt a lehetőséget Magyarországon is

kihasználják. Ha a felhajtó energia erősen csökken, illetve nagy viszkozitású olajoknál eleve kevés, akkor szivattyúzásra van szükség, ez jellemzi a világ olajtermelésének 15-20%-át, a magyar arány is hasonló. A mélyszivattyús eljárásnál a kút mélyén elhelyezett szivattyú hozza a felszínre az olajat, a hajtómotor vagy a felszínen, vagy a szivattyúval összeépítve a kútban van elhelyezve. Régebben a felszínről rudazattal mechanikusan működtetett hajtást alkalmaztak, ami azonban csak kisebb mélységig hatásos. A korszerű megoldás közepes mélységig a villamos, az alatt pedig a hidraulikus hajtás.

A másodlagos termelés történhet gáz visszanyomásával a gázsapkába, víz benyomásával az olajréteg alá, vagy e két módszer kombinálásával. A gáz lehet az olajtermelés kísérőgáza, lehet sűrített levegő vagy szén-dioxid. A víz származhat külső forrásból vagy az olajtermelésből, de a szükséges mennyiség meghaladhatja a termelt olaj mennyiségét, és a besajtoláshoz nagy nyomás (150-350 bar) szükséges. A másodlagos eljárások csak az előfordulások egy részénél alkalmazhatók, mivel hatásosságuk függ az olaj viszkozitásától, valamint a környező kőzetek tulajdonságaitól és szerkezetétől. A rezervoár részletes ismeretétől függ, hogy mely kutaknál történik a besajtolás, és melyek a termelőkutak. Régebben akkor tértek rá a másodlagos termelésre, amikor az elsődleges termelés kimerült. A tapasztalatok szerint a vagyont nagyobb mértékben lehet kiaknázni a két eljárás együttes alkalmazásával, ezért gyakran már a felszálló termelés alátámasztására is beiktatják. A 2000-2400 m mélyen mészkő-dolomitban fekvő, a karsztvízzel hidrodinamikus kapcsolatban levő nagylengyeli nehézőlaj termelését a gázsapka megnyomásával segítették. A víz és más fluidumok nagynyomású besajtolása – főleg a kemény kőzetekben – előidézhetheti a rétegek repesztését, ami az átbocsátás és kihozatal növekedését eredményezi. E célból néha föld alatti robbantásokat is alkalmaznak.

A harmadlagos eljárások (angol terminológiával EOR [*Enhanced Oil Recovery*, fokozott olajkitermelés] eljárások) közegek benyomásával és adalékokkal az olaj mozgékonyságának növelését és a környező kőzetekben az átbocsátás javítását célozzák fizikai és kémiai folyamatokkal. Miután alkalmazhatóságuk erősen függ az olaj minőségétől és a lelőhely jellegétől, a célszerű eljárást egyedileg kell kikísérletezni. Nehéz olajoknál a viszkozitást csökkentő termikus módszerek a legcélravezetőbbek. Ezek egy részénél forró vizet vagy gőzt sajtolnak be, ami az olaj hőkiterjedését, viszkozitásának és felületi feszültségének csökkenését eredményezi, sőt bizonyos mértékű desztillációt és oldást is. A szükséges ráfordítás nagy, például 1 tonna járulékos olajtermeléshez 4-40 tonna gőzt kell besajtolni 40-90 bar nyomáson. Egy másik eljárásnál az olajat a föld alatt meggyújtják, az égést levegő befúvásával táplálják, az égési zóna előrehaladva maga előtt tolja az olajat. Ennek sem kicsi a ráfordítása, hiszen az olaj 10-20%-a elég és a többletkihozatalhoz tonnánként 2000 m³ levegőt kell befújni. Növelhető a hatékonyság vízgőz bekeverésével, a keletkező vízgáz szintén részt vesz a reakcióban és így a levegőszükséglet is csökken. Nagyon nagy visz-

koztatású olajnál stimuláló eljárás is számításba jöhet, a kútnál váltakozva alakítanak ki termelő és injektáló periódusokat, és gőzbesajtolás helyett vagy mellett viszkozitáscsökkentő oldószer bejuttatása is lehetséges.

Könnyű olajoknál a harmadlagos módszereket gyakran a másodlagos eljárásokkal kombinálva alkalmazzák, és többnyire vegyszeradagolással párosítják. A besajtolt vízhez adagolt nátronlúg vagy más felületaktív anyag (pl. karbonátok, alkáli-szilikát oldatok) módosítják a kapillaritást és a felületi feszültséget, a kőzetfelületek hajlamosabbak lesznek vízzel nedvesedni, mint olajjal. Az additív olajtermeléshez tonnánként 5-10 kg felületaktív anyag adagolására van szükség. Az is előfordul, hogy a felületaktív közeget iszap formájában nyomják be, és puffer közzel választják el a víztől, hogy az ne mossa ki az adalékot. Egyes olajok szén-dioxiddal oldatot vagy elegyet alkotnak, ami duzzadáshoz és az olaj viszkozitásának csökkenéséhez vezet. Karbonátos kőzetekben a CO_2 -nek felületaktív hatása is van. A CO_2 -t vízzel vagy inert gázzal együtt, esetleg azzal váltakozva nyomják be. Az 1000-1500 m mélyen homokkőben található Budafa-Lispe-Lovászi mezőben az intermedier-parafinos olaj mozgékonyabbá tételére szén-dioxidos földgáz benyomása bizonyult hatékonynak, ezt követően vízbesajtolással hajtották ki az olajat. A besajtoló víz, és különösen a benyomott kis viszkozitású gáz hajlamos arra, hogy elszivárogon a rétegből. Ennek megakadályozására a víz esetében további adalékokra is szükség lehet (például megszilárdulva gátat képző poliakrilamidra), gáz esetében az olajban oldódó C_2 - C_6 frakció benyomására. Arra is van példa, hogy az olajat a vele azonos viszkozitású, a felületeket nedvesítő – víz, olaj és adalékanyagok (biopolimerek, poliakrilamid) keverékéből álló – emulzióval szorítják ki, az emulziót pedig sós vízzel hajtják előre.

A felszínre hozott olajból a szállíthatóság érdekében el kell távolítani a nemkívánatos alkotókat. A kísérő gázokat kigázosítással szeparálják, a nyert nedves gázt földgázra és légköri viszonyok között cseppfolyós gazolinra bontják. Az oldott gázokat ellenáramban haladó gázzal ragadják ki az áramló olajból (stabilizálás) nehogy a szállítás hőmérsékletén elpárologva zavarják az áramlást. A szuszpendált szervesanyagokat ülepitéssel vagy centrifugálással választják ki.

Teljesen új technológiák kifejlesztésére vezetett a tengeri termelés. A kutatófúrásokhoz kezdetben fix állványokat használtak, nagyobb vízmélységnél egyre inkább kutatóhajók vették át ezt a szerepet. A part menti selfeken megindult termelés hamar áterjedt a mélyebb vizekre, kifejlesztették a mély (400–1000 m), majd az ultramély (>1000 m) tengereken alkalmazható módszereket. Brazília partjai előtt már közel 2 km mély tenger alatti termelés folyik, és több helyen készülnek 3-4 km mély víz alatti olajvagyon kiaknázására. Néhány száz méter tengermélységig a tenger fenekére támaszkodó fix fedélzeteket (platformok) alkalmaznak, kisebb mélységig merev lábakkal, nagyobb mélységnél leereszthető lábakkal ellátott úsztatható fedélzettel.

Kereken ezerméteres tengermélységig használhatók a fenékhez horgonyokkal rögzített, feszített platformok, ennél mélyebb tengereken úszó (lebegő) fedélzetek jönnek számításba, amelyeket számítógéppel vezérelt, dinamikusan pozicionált rendszerek tartanak stabil helyzetben. A tengeri termelést nehéz körülmények jellemzik, vízmozgásokkal (hullámozgás, árapály, áramlások), talajmozgásokkal (erózió, süllyedés, földrengés), az élővilág hatásaival (lerakódások, rongálás) és az időjárás szélsőségeivel kell számolni.

Mintegy 200 m-nél sekélyebb tengerekben a kitermelt olajat csővezetékben is partra lehet juttatni, mélyebb vízben vagy nagy távolságnál a platformon gyűjtött terméket tartályhajókkal szállítják el. A termelőfedélzetek rendszerint több kútból gyűjtik össze az olajat, a fedélzeteket hajlékony felszállócső kapcsolja össze a tenger fenekén kialakított távműködtetett kútfejjel, vagy több kút termékét összegyűjtő állomással. A fedélzetek alkalmasak hajók és helikopterek fogadására, az üzemvitelhez szükséges személyzet és berendezések elhelyezésére. Terjednek a tenger fenekére telepített állomások a termelési és áramlási folyamatok vezérlésére, valamint a tenger szennyezésének megakadályozására (kitörésgátlók, automatikus elzárók csőtörésnél), sőt a feldolgozást előkészítő feladatok (tisztítás, szeparálás) ellátására is. Vizsgálják a tenger fenekére telepíthető fúróberendezések lehetőségét is. A kifejlesztett bonyolult berendezések csúcstechnikát képviselnek, ennek ellenére előfordultak katasztrófák, a teljes személyzet pusztulásával járó tűzvészek vagy viharban felborult platformok miatt.

A kőolaj piaci árát elvileg a kereslet és kínálat alakulásától függő határköltség szabja meg, amit a rendelkezésre álló technológiával az adott gazdasági körülmények között a még kitermelésre érdemes legnagyobb önköltségű előfordulás jelöl ki. A tényleges árat azonban gazdaságon kívüli körülmények ettől eltérítik, egyrészt állami beavatkozások, másrészt monopóliumok érvényesülnek. Az állami költségvetés jelentős bevételi forrása az energiahordozók forgalmát terhelő adó, ami Európában a kőolajtermékek fogyasztói árában a termelési költség 2-3-szorosát is elérheti. Más jellegű gazdasági szabályozók (bányajáradék, vám, exportilleték stb.) sem ritkák, az állami szándékok (a hazai kitermelés ösztönzésére, az import mérséklésére) érvényesítésére. Nem ritka a nagyhatalmak (főleg USA és Oroszország) politikai indíttatású szerepvállalása sem a piacra juttatott kőolajmennyiségek befolyásolásával. Az olajár befolyásolása eszköz is lehet a világpolitika alakításában, így a magas olajárral támogatni lehetett az orosz exportot a gazdasági kilábalás érdekében, vagy az olajár leszorításával mérsékelni sikerült a 2001-ben kibontakozó nagy receszsiót. Hosszú ideig a hatalmas olajvállalatok monopolhelyzete játszott nagy szerepet az olajár meghatározásában, ma az OPEC kartellmegállapodásainak van alapvető jelentősége.

Az olajárnak rendkívül nagy szerepe van a gazdaságban, mivel nemcsak a kőolajtermékek árát szabja meg, hanem a többi energiahordozó ára is ahhoz

igazodik. Az energiaárak pedig megjelennek minden termék és szolgáltatás költségei között, befolyásolva a gazdaság versenyképességét és a lakosság életszínvonalát. Ezért a kormányok és a gazdaság szereplői feszült figyelemmel követik a tőzsdén jegyzett marker kőolajok ármozgását, és már kisebb változásokra is élénken reagál a tőzsde, a pénzpiac, a tőkemozgás és az üzleti világ konjunktúrája. A magyar nemzetgazdaságban különösen érzékenyen függ a kőolajártól az infláció és a fizetési mérleg egyensúlya.

Az olajtermelés tényleges önköltsége erősen függ az olaj minőségétől, a földtani körülményektől és a termelés technológiájától. A 22. táblázat néhány olajforrás és helyettesítési eljárás önköltségének becsült arányát mutatja. A táblázat érzékelteti, hogy egyrészt az önköltségek között nagyságrendi különbségek is előfordulnak, másrészt a legkedvezőbb előfordulások hatalmas többletjövedelmet biztosítanak.

Miután a kőolajok minősége a lelőhelytől függően nagyon eltérő, árak nem egységesek. Az európai tőzsdéken az Északi-tenger angol szektorából származó Brent-olaj, az amerikai tőzsdéken a West Texas Intermediate árat tekintik iránymutatónak (markernek), ezeken túlmenően néhány más olajminőség, például az iráni nehéz (Irán), Es Sider (Líbia), Urál (Oroszország), könnyű arab (Szaúd-Arábia), Dubai (Egyesült Emirátusok), Forcados (Nigéria) árat is jegyzik.

A 8. ábra a kőolaj világpiaci árának alakulását szemlélteti 1972 és 2000 között USD/bbl-ben, a folyó árak 1986 előtt könnyű arabra, ezt követően Dubai olajra vonatkoznak. A reálár és a nominálár különbségét a dollár inflációja okozza (az átszámítás 1972-es értékre az USA hivatalos GDP deflátorával történt).

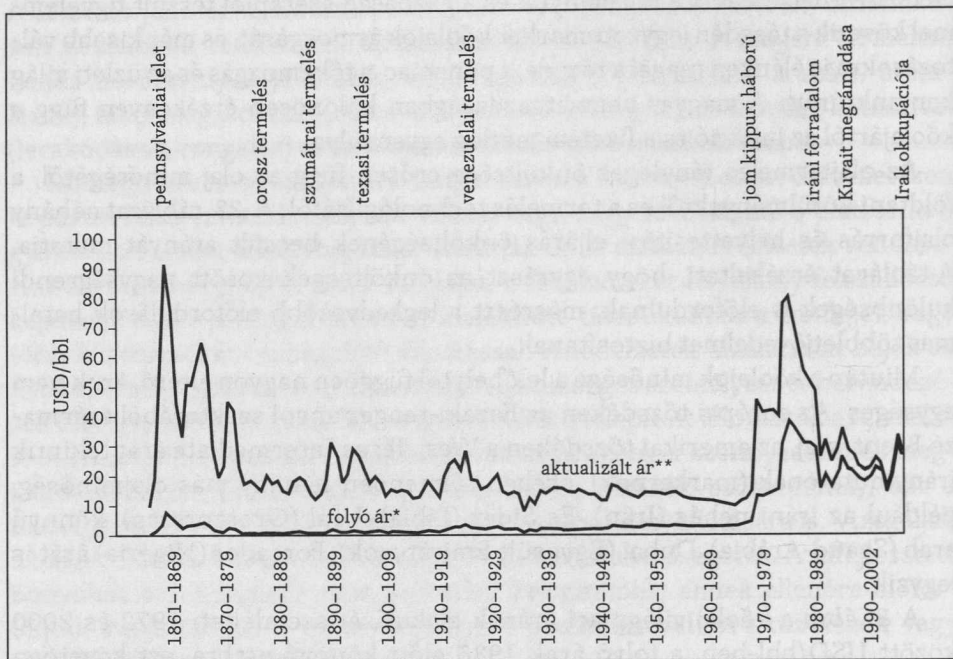
Sok vita tárgya a kőolajárak jövőbeli alakulása. A szakértők szerint az 1970-es évek olajkrízisének megismétlődése kizárható, de az árszínvonal fokozatos lassú emelkedése valószínűsíthető. Ez mindenekelőtt azon múlik,

22. táblázat

Néhány olajforrás és helyettesítő eljárás önköltségének becsült aránya

Olajforrás	Relatív önköltség
Perzsa-öböl, Észak-Afrika	1
Nigéria	3
Venezuela	6
Egyesült Államok	9
Alaszka, Északi-tenger	12
olajpala, bitumenes homok	24
szén cseppfolyósítása	36

A kőolajárak alakulása



* 1861–1944: US átlag, 1945–1985 arab könnyű, 1985–2002 Brent

** 2002-es USD árfolyamon.

hogy a leggazdagabb, olcsó olajforrások kiapadását nehezebben hozzáférhető, drágábban kiaknázzható vagyon művelésbevitelével kell ellentételezni (gyengébb minőségű kőolajokat, zord klímaövezetekből, nagyobb mélységből, a tenger alól, kihozatalnövelő másodlagos és harmadlagos eljárásokkal). Hosszabb távon az alacsony olajár is árfelhajtó hatású, mivel nem ösztönöz nyersanyagkutatásra és termelőberuházásokra, ami idővel csökkenti a kínálatot. Az ár-emelkedés felső határát az olajhelyettesítő eljárások önköltsége jelöli ki. Az IEA prognózisa 2020-ra olyan kőolajárat valószínűsít, ami már a nem konvencionális olaj térhódítását is lehetővé teheti. Néhány extra nehéz kőolaj ki-termelése már megkezdődött. Az olajár emelkedése kibővíti a művelelő előfordulások körét, ami azonban nem jár gyors termelésnövekedéssel.

A prognózisok szerint a következő évtizedekben a világ kőolajigénye tovább nő, bár az olaj részaránya az energiamérlegben csökkenő. Az igények kielégíthetőségéről megoszlanak a vélemények, az IEA a 2030-as évekig nem tételezi fel, hogy az ellátást forráshiány akadályozná, bár az OPEC-en kívüli kőolajtermelés tetőzését 2010 táján várja, egyes nézetek szerint néhány évtizeddel később a világtermelés visszaesése is elkezdődik. A fejlett országokban

alapvetően a közlekedés fejlődése szabja meg a kőolaj-felhasználás alakulását. A fejlődő országokban – főleg ahol nincsenek hazai energiaforrások és a vezetékes energiaellátó hálózatok kiépítettsége is elégtelen – ott a vasúton vagy közúton könnyen szállítható kőolajtermékek hasznosítása hőfejlesztésre is jelentős lehet még erőművi tüzelőanyagként is.

A világkereskedelemben a legnagyobb mennyiségben szállított áru a kőolaj, a forgalom összesített éves mennyisége 1,6 Gt, amihez járul 0,4 Gt termékexport. Az export közel felének forrása a Perzsa-öböl térsége (909 Mt/év), Dél- és Közép-Amerika részesedése 12% körül mozog (241 Mt/év), a FÁK szállításai mintegy 10%-ot fedeznek (198 Mt/év), Észak-Afrika (134 Mt/év), illetve Nyugat-Afrika (148 Mt/év) kivitele 7-8%-ot tesz ki. A legnagyobb importáló térségek: Egyesült Államok (25,7%), Nyugat-Európa (23,7%), Ázsia csendes-óceáni térsége (19%), Japán (13%). Az Európai Unió kőolajimportjának arányát 2020-ra 95%-ra becsülik, jelenlegi behozatalának legfőbb forrásai politikai és gazdasági szempontból labilis térségek, az import 39%-a származik a Közel-Keletről, 23%-a a FÁK-ból és 20%-a Észak-Afrikából.

A kőolaj világkereskedelmének mintegy 90%-a a világtengereken, többnyire több száz kt kapacitású tartályhajókkal történik. A legnagyobb – 200–250 kt-nál nagyobb BRT-ju (bruttó regiszter tonna, a teljesen terhelt hajó súlya) – szupertankerek 300–500 m hosszú, 40–80 m széles, 20–35 m merülésű hajóóriások, amelyek között jó néhány kapacitása 0,5 Mt-t is meghaladja. A tankerek élettartama rövid (megközelítően 15 év) az olajból kiüledő korrozív iszaplerakódás következtében. A tengeri szállítás költsége nem éri el a kőolajár 10–15%-át. A szupertankerek versenyképességét még az sem rontja, hogy a Szezei- és a Panama-csatornán csak a kisebb merülésű hajók tudnak áthaladni (mintegy 150 kt-ig), így a nagyobbak kerülő útvonalakra kényszerülnek, például a Perzsa-öbölből csak Afrika megkerülésével juthatnak el Európába. A legnagyobbak fogadására a hagyományos kikötők alkalmatlanok, ezek megközelíthetősége biztosítja a kisebb tankhajók létjogosultságát. Ahol a nagy merülés és a hajóóriások mozgásterét biztosítható volt, ott bővítették a kikötőket, ahol nem, ott újakat építettek, vagy úszó szigeteket létesítettek az átszivattyúzáshoz. A tengeri forgalom módot ad a kőolajimport származási helyének és szállítási útvonalának szabad megválasztására, vagy szükség esetén módosítására. Sajnos beszerzési lehetőségeink mozgásterét korlátozza, hogy Európa legfontosabb kőolajkikötőitől (Rotterdam, Hamburg, Trieszt) távol vagyunk, és csővezetékes kapcsolatunk sincs azzal az európai csőhálózattal, amelyeken a kikötők elérhetők, mert az adriai-tengeri Krk-szigeten található Omisaljából kiinduló Adria-vezeték független a hálózattól.

Szárazföldön a kőolajat legolcsóbban csövön lehet szállítani, ha a vezetéket egyenletes és nagy kihasználás jellemzi, mert ilyenkor az állóeszközterhek fajlagos értéke kicsi. A kőolajimport csövön kényszerkapcsolatot jelent, amit csak több beszerzési forrás és eltérő szállítási útvonalak lazítanak. Az évente

több tíz Mt kőolaj szállítására képes csővezetékeket Európát átszövő hálózatba kapcsolták össze, amelynek csomópontjait a tengeri kikötők és a kőolajfinomítók alkotják. Az így kialakult párhuzamos szállítási lehetőségek nagyban növelik az ellátásbiztonságot. Hazánk kőolajimportjának zöme egy, a Volga menti Szamarából induló, több országot ellátó magisztrális kelet-nyugati csővezeték két leágazásán keresztül érkezik. A számos országot átszelő vezeték hossza meghaladja az 5000 km-t, kapacitása 100 Mt/év. Megállapodás született e vezeték összekapcsolására az Adria-vezetékkel. A magyar ellátás tartálékát biztosító Adria-vezeték több Jugoszláv utódállam területén halad keresztül, üzemét a balkáni háborúk éveken keresztül akadályozták. Mindkét ellátási útvonalunkat bizonytalanságok terhelik, ellátásbiztonságunkat nagymértékben növelné kapcsolódásunk az európai csőhálózathoz Ausztrián vagy Olaszországon keresztül. Némi tartalékot jelent kapcsolatunk Szlovákiával egy 3 Mt/év kapacitású vezetékkel.

A magyar kőolajszükségletet mind nagyobb arányban kell importból fedeznünk, mivel a források kimerülése miatt a hazai termelés szerepe zsugorodik. A szükségletet nálunk is a közlekedés fejlődése szabja meg, a kőolajtermékek felhasználása hőfejlesztésre a magas árak miatt fokozatosan visszaszorul. A prognózisok a közlekedési és szállítási teljesítmények lassú növekedésével számolnak, az üzemanyag-felhasználás ennél enyhébb emelkedését várják. A magyar gépjárműállomány kerekén 3 millió, amiből 2,5 millió a személyautó és 0,5 millió az egyéb jármű (teherautó, autóbusz, motorkerékpár), a járműpark évente néhány százalékkal bővül, és nem elhanyagolható a külföldről érkező tranzit- és turistaforgalom üzemanyag-szükséglete sem. Más járművek (vasút, hajók, légi forgalom, hadsereg), valamint mobil munkagépek (mezőgazdaság, építőipar stb.) üzemanyag-felhasználása is számottevő. Az igénynövekedést csak részben ellensúlyozza az energetikai hatások javulása, aminek legígéretesebb területe a forgalom- és fuvarszervezés. A fajlagos üzemanyag-felhasználás csökkentése a motorkonstrukciók és a járművek tökéletesítésével nem lebecsülendő, de hatása csak lassan érvényesül, és költségkihatása jelentős.

A kőolaj helyettesítése

Gyakran születnek fenyegető jóslatok a világ kőolajvagyonának közeli kimerüléséről. Ez az aggodalom egyelőre nem igazolódik, sőt az előző két évtizedben a vagyon gyorsabban nőtt a felhasználásnál. A kőolajellátás több évtizedig nincs veszélyben, de tagadhatatlan, hogy a vagyon véges, és idővel szembesülni kell a források elapadásával. A kőolaj helyettesítése, illetve pótlása hosszú ideje foglalkoztatja a szakmát. A második világháború, majd az 1970-es évek olajkrízise nagy lendületet adott a helyettesítő megoldások fejlesztésének, a

nem konvencionális kőolajvagyon hasznosításával, illetve a szénből és a növényi anyagokból történő folyékony szénhidrogének előállításával. Ahogy a kőolaj ára csökkent, úgy halványodtak el a helyettesítő megoldásokhoz fűződő remények, és zsugorodtak a nagy ívű kutatási-fejlesztési programok (mint például az USA államilag koordinált Syncrude programja). A távolabbi jövő üzleti lehetőségeire számítva a fejlesztés persze teljesen nem szűnt meg, sőt elvétve, a legígéretesebb eljárásokkal kisléptékű termelés is folyik.

A nem konvencionális olaj-előfordulások – az olajhomok és olajpala – közelekhez kötött szénhidrogéneket tartalmaznak. A geológusok szerint a nem konvencionális olaj mennyisége nagyságrenddel haladja meg a konvencionális olajvagyon, és regionális eloszlásuk is sokkal egyenletesebb. Nagyobb arányú kiaknázásuk feltétele a jelenleginél jóval magasabb kőolajár. Komoly hátrány, hogy termelésük nagyon tőkeigényes, a technológiáknak sok vízre van szükségük, és el kell helyezni a nagy mennyiségű meddőt, valamint a feldolgozásból származó és a környezetet veszélyeztető hulladékot is.

Az olajhomok (szurokföld) többféle erősen viszkózus szénhidrogén-tartalmú anyag közös megnevezése. A bennük levő szénhidrogén lehet erősen viszkózus nehéz vagy ultra nehéz olaj, kátrány, bitumen vagy aszfalt. Feltételezik, hogy az ilyen előfordulásokban a kőolaj a lebomlás stádiumában van, és könnyű frakcióit már elvesztette.

Az olajhomok egytonnányi mennyiségéből 60-130 kg szénhidrogént – nehéz és ultra nehéz olajokat, valamint bitument – lehet kinyerni. A termékek hidrogénben szegények, viszont gyakran jelentős a kéntartalmuk. A dúsbabb ultra nehéz olaj-előfordulásokat néhol már kitermelik, a legjelentősebb üzemszerű termelés Kanadában (Athabasca-völgy) és Venezuelában (Orinoco-övezet) folyik. Az alkalmazott *in-situ* módszerek nem térnek nagyon el a konvencionális nehéz olajoknál alkalmazott másodlagos és harmadlagos kitermelési eljárásoktól. Többnyire a mozgékonyság növelésére a kutakba gőz, füstgáz vagy forró víz beszajtolásával hőt juttatnak be. Helyenként oldószert, emulgálószert és gázt is hozzáadnak, sőt föld alatti égetéses termelés is előfordul. Az utóbbinál a termelőkúttól visszafele haladó égetés bizonyult hatásosabbnak, amikor az olaj a meleg zónán keresztül áramlik. Az *ex-situ* megoldásoknál bányászati módszerekkel – főleg külfejtéssel – termelik ki az olajhomokot, gyakran hő bevezetésével csökkentve a viszkozitást, és a további hasznosításhoz a bánya közelében dolgozzák fel. A termékből termikus és kémiai módszerekkel nyerik ki a bitument, illetve a nehéz olajat. A szeparálás és molekulabontás más módszereivel (ultrahanggal, centrifugálással, dielektromos hevítéssel, mikrobákkal) is kísérleteznek. Az Athabasca-völgyben nátronlúg forró vizes oldatával történik a feltárás, majd a terméket krakkolják, és a fejterméket hidrogénnel telítik. A nehéz olajok szállításához különleges eljárásokra (melegítés, hígítás, vizes emulzió) van szükség, a venezuelai Orinoco-völgy nehéz olaját 30% vízzel alkotott emulzió (Orimulsion) formájában to-

vábbítják. Az ultra nehéz olajok kezelésének megkönnyítésére a minél mélyebb helyszíni feldolgozásra törekednek (termikus szeparáció, hidrokrakkolás, oldószeres aszfaltkivonás).

Az olajpala lamináris szerkezetű, törésfelületekkel tagolt, nagy molekulású szilárd szénhidrogéneket tartalmazó márgás anyag. A szervetlen és a szerves anyagok aránya, mennyisége és összetétele a keletkezés körülményeitől függ, az egyidejűleg lerakódott ásványi só és elhalt élőlények mennyisége időszakos ingadozásának megfelelően. A szénhidrogének mintegy 10%-a bitumen, ami sok szerves oldószerben oldható, a többi kerogén, ami egy háromdimenziós heteroatomos oldhatatlan polimer, 3000 feletti molekulaszúlyal. A kerogénmolekulákat oxigén és kén keresztkötések egyetlen óriásmolekula mátrixává kapcsolják össze. Egyes feltételezések szerint a kerogén a kőolajképződés fázisában levő anyag. Az olajpálát tulajdonképp a kerogén tartja össze, eltávolítása esetén a többi komponensből por marad vissza.

Az olajpálát használják útpépítéshez, talajjavításhoz, adalékként építőipari anyagokhoz, Svédországban uránércként (U koncentrációja átlagosan 0,3%, de egyes lencsékben 0,58%), Skóciában pedig nitrogénvegyületek alapanyaga. Orvosi célra már a 14. században vontak ki belőle olajat (sebolajként ma is használják), később technológiai célokra is desztillálták (sziklaolaj), de e szerepből a kőolaj teljesen kiszorította. Olajpala sokfelé található, a legjelentősebbek az észak-amerikai formációk, kis mennyiségben Magyarországon is előfordul. Néhány országban kisebb mennyiségben energetikai célra is hasznosítják, a sok (20-30%) szerves anyagot tartalmazók fűtőértéke 15-17 MJ/kg, így közvetlenül is eltűzelhető. A nagy nedvesség- és hamutartalmúak fűtőértéke 6-11 MJ/kg, ezeknél inkább a kinyerhető olajjal és gázzal tüzelnek.

Az első világháború óta többször vetődött fel a kőolaj pótlása palaolajjal, a húszas években az Egyesült Államokban az ígéretes területek nagy felvásárlási hulláma is kibontakozódott. Az olajpalából kőolajszerű anyag kinyerésére több technológiát dolgoztak ki, de ezek még távol vannak a versenyképességtől. Ezért általában csak kis léptékű, az eljárások kipróbálását célzó termelés folyik. A koncentrációtól függően egy tonna olajpalából 30-200 kg olaj nyerhető ki. Az olajpálát hagyományos bányászati módszerekkel fejtik ki, főleg külfeljtésekben. A palából a kerogént hőbontással lehet kivonni, ennek érdekében a kitermelt kőzetet retortákban 370-540 °C hőmérsékleten dolgozzák fel. A technológiák a retorta jellegében (függőleges vagy vízszintes), a hőközlés módjában (külső vagy belső hevítés, esetleg melegített kerámiagolyókkal, homokkal vagy őrölt palával), az anyagtovábbítás kialakításában (betáplálás alulról vagy felülről, a termék elvezetése alul folyékony halmazállapotban, vagy felül gőz formájában) térnek el egymástól. Laboratóriumi körülmények között vizsgálják a hőközlés más lehetőségeit (lézer, mikrohullám, kémiai reakciók) is. A pirolízis egyrészt nagy sűrűségű és viszkozitású, magas derme-

déspontú és erősen szennyezett kőolajszerű anyagot, másrészt különféle melléktermékeket (ammónia, kén, alacsony fűtőértékű gáz, gyenge minőségű koks) eredményez. Az eljárások széles skáláját próbálták ki néhány kt/nap kapacitású kísérleti üzemekben. A termékek a feldolgozott kőzetnek legfeljebb 15-20%-át teszik ki. Mivel a nyert termék csövön nem szállítható, a bánya mellett tisztításra és bizonyos mértékű raffinálásra szorul. Nagy problémája a technológiának a visszamaradó hatalmas mennyiségű meddő kőzet és a rendkívül nagy – a termelt olaj többszörösét kitevő – vízigény. A termelés a kőolaj jelentős drágulása esetén is csak nagy mennyiségben lenne kifizetődő. Az olajválság időszakában grandiózus olajpala-termelési elképzelések láttak napvilágot, hatalmas bányákkal, feldolgozó üzemekkel és természetesen óriási beruházási költségekkel. E tervek azonban a viszonyok konszolidációja után hamar tárgytalanná váltak.

Kísérleteznek a föld alatt retortaszerűen kialakított térségben az olajpala *in-situ* pirolízisével is, amihez a hőt a benyomott földgáz égése szolgáltatja. A pala kis permeabilitása miatt a hőhordozó áramlását biztosító csatornát is ki kell alakítani (nagy nyomású közeg beszajtolásával, robbantással, villamos árammal stb.). Az *in-situ* kísérletek eredményei egyelőre nem biztatóak.

Folyékony halmazállapotú szénhidrogén-molekulákat szénből is elő lehet állítani, ha megfelelő hőmérsékleten és nyomáson, katalizátorok és reagensek segítségével kötések hoznak létre a karbon- és hidrogénatomok között. A szén-cseppfolyósítási eljárásokat a két világháború között fejlesztette ki az elegendő saját kőolajjal nem rendelkező Németország és Japán. Több eljárást dolgoztak ki, amelyek katalizátorokkal, szélsőséges hőmérséklet- és nyomásvizonyok között, megfelelő reagensekkel kényszerítik ki a karbon- és hidrogén-atomok összekapcsolódását. A világháború után a kialakított nagyüzemi termelést gazdaságtalansága miatt leállították.

Az egyik alapvető eljárás a szén pirolízisére alapul (Bergius-eljárás). Először hőközléssel a szénlepárláshoz hasonló folyamatban szétbontják a szénmolekulákat, majd több lépésben nagy nyomás alatt hidrogén hozzákapcsolásával alakítják ki a nyersolaj vegyületeihez hasonló molekulaszervezetet. A szén rendszerint nehézolajban pépszerű zagy formájában, vagy folyadékban szuszpendálva táplálják be. Sokféleképp alakítható a reakciótér (retorta, fluidágy, forgókemence), a hőközlés módja, a reagensek keverése, de különbségek vannak a katalizátorok anyagában és a paraméterek megválasztásában is. A reakciók az első fázisban 200-300 bar nyomáson, 400-480 °C hőmérsékleten zajlanak le, hidrogénadagolással katalizátorok segítségével, az eljárás 200-325 °C forráspontú középolaj mellett gázt és szilárd maradékot (koks vagy kátrány) is szolgáltat. A második fázisban ugyancsak katalitikus reakcióval gőzfázisú hidrogénezés, majd krakkolás következik. A kinyerhető szénhidrogének főleg gyűrűs szerkezetűek, az előállítható benzin oktánszáma alacsony. Az eljárással a második világháborúban Németországban számos üzem több

millió tonna üzemanyagot állított elő. A pirolízises technológiát több irányban fejlesztették tovább, elsősorban a szerény olajkihozatal növelésére. A keletkező gáz és folyadék arányát a hőmérséklet változtatásával, illetve azoknak a reakcióterben való tartózkodási idejével lehet befolyásolni, a gáz összetétele a legerősebben a nyomás mértékére reagál. A továbbfejlesztés eljárásai (Toscoal, COGAS, COED, Lurgi-Ruhrgas, Garret stb.) a technológiai fázisok részleteiben térnek el egymástól. A pontos körülmények és különösen a katalizátorok összetétele többnyire üzemi titok.

A Bergius-eljárás továbbfejlesztése a hidrofrakcionálás is (CONSOL-, PAMACO-, H-oil-, H-coal-, Exxon-, Gulf-, Ruhröl- stb. eljárások), a hidrogént a cseppfolyósító reaktorba gázalakban, vagy hidrogént leadó oldószerben táplálják be. A hidrogénezés többnyire fluidágyban katalizátorral történik, 25-70 bar nyomással és 400-450 °C-on. Az oldószeres finomító eljárásnál az aromatikusan oldószerbe adagolt szénport közepes nyomású hidrogénatmoszférában alakítják át. Szűrés és tisztítás után 180 °C olvadáspontú és 37 MJ/kg fűtőértékű, viszonylag tiszta tüzelőanyagot nyernek, amit az Egyesült Államokban erőművi célra sikerrel alkalmaznak.

Az elterjedtebb Fischer-Tropsch szintézishez a szenet teljesen elgázosítják, a szén-monoxidhoz hidrogént keverve szintézisgázhoz ($\text{CO} + \text{H}_2$) jutnak, majd katalitikus reakciókkal főleg egyenes láncú szénhidrogéneket állítanak elő. A reakciók légköri nyomáson is kialakulnak, de 10-30 bar előnyösebb, a célszerű hőmérséklet pedig 170-210 °C. Az eljárás jó minőségű gázolajat, de gyenge benzint szolgáltat. A második világháború idején ezzel az eljárással is sok millió tonna üzemanyagot gyártottak. A technológia berendezéseinek és paramétereinek változtatásával a módszernek sokféle továbbfejlesztett változatát (pl. Synthoil, Lurgi, CSF, SASOL) dolgozták ki. Az apartheid miatt embargó alatt állt Dél-afrikai Köztársaságban 1955 óta állítanak elő Fischer-Tropsch szintézissel folyékony szénhidrogéneket (SASOL), az elgázosítás Lurgi-generátorokban vízgőz és oxigén befúvással történik. A második lépésben cirkulációs fluidágyban könnyű szénhidrogéneket, fixágyban nehéz szénhidrogéneket állítanak elő.

Az 1970-es években sok energiát fektettek az eljárások korszerűsítésébe és továbbfejlesztésébe. A legambiciózusabb az amerikai nemzeti program volt (Synfuel), amibe a piaci lehetőségek reményében minden nagyobb energiaipari vállalat bekapcsolódott saját technológiájával. Hasonló tevékenység más fejlett országokban is kibontakozódott (például Németországban, Egyesült Királyságban, Japánban stb.), de az olajárcsökkenés a reményeket elsorvasztotta. Takaréklángon azonban tovább zajlott a K+F tevékenység, főleg a multinacionális olajvállalatok és energetikai gépgyártók finanszírozásával, hogy egy esetleges alternatív útra is felkészüljenek.

A szén-cseppfolyósítási eljárások energetikai hatásfoka nagyon különböző, amit lényegesen befolyásol a hidrogéngyártás energiaszükséglete. A hid-

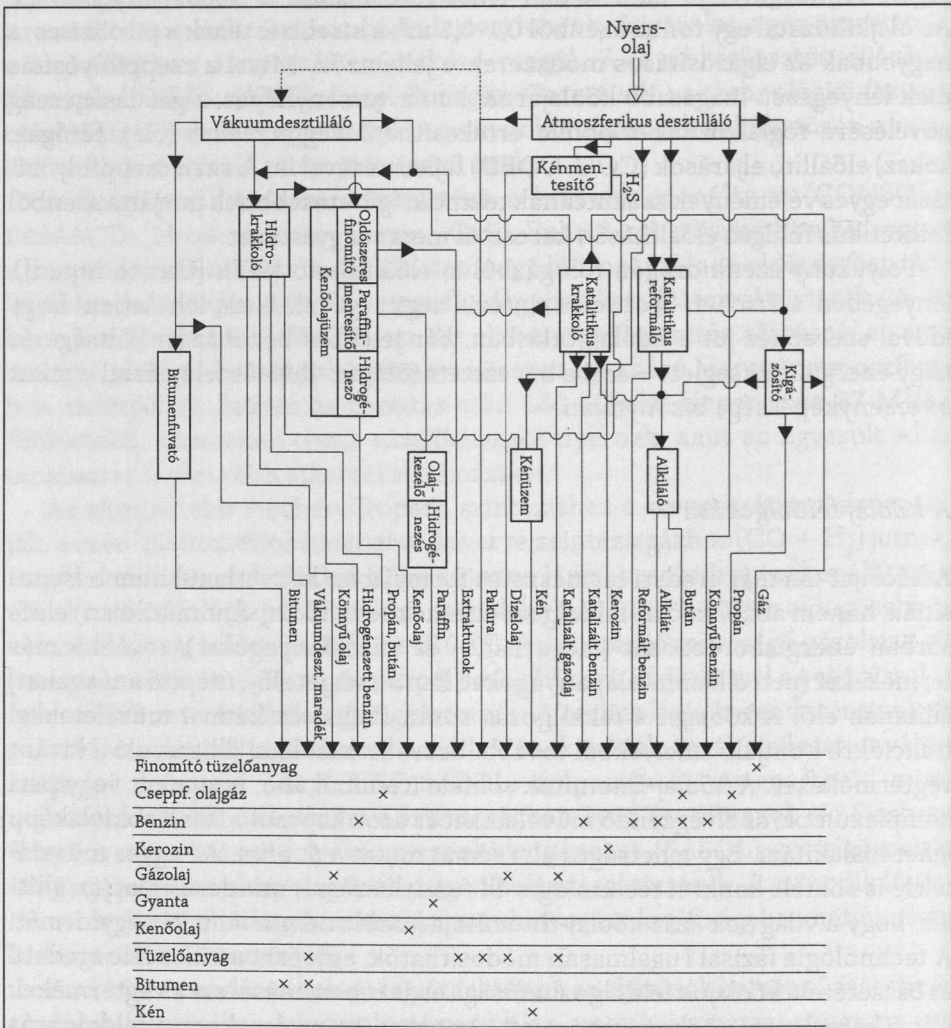
rogén gyártására változatosak a lehetőségek, gőzreformálás, parciális oxidáció, gőz-vas eljárás, a szilárd maradék kigázosítása stb. jöhet számításba. Hidrogén segítségével jó hatásfokkal lehet leválasztani a kénszennyezést is. Az olajkihozatal egy tonna szénből 0,1-0,5 m³, a kisebb értékek a pirolízises, a nagyobbak az elgázosításos módszerekre jellemzők. Mivel a cseppfolyósítás csak lényegesen magasabb kőolajárnál lenne versenyképes, a gazdaságosság növelésére foglalkoznak többféle értékesíthető végterméket (olaj, fűtőgáz, kokszt) előállító eljárások (COG, COED) fejlesztésével is. A szén cseppfolyósítást egyes vélemények zsákutcának tekintik, ígéretesebbnek tartják a szénből szintetikus földgáz előállításán keresztül metanol gyártását.

Folyékony szénhidrogén földgázból is előállítható (GTL [Gas to liquid]), lényegében a Fischer-Tropsch szintézis segítségével. Nem lehetetlen, hogy idővel szerephez jut a kőolajpótlásban, bár jelentős beruházási költsége és nagy energiaszükséglete – ami a bevezetett földgáz 45%-át felemészti – miatt a versenyképessége bizonytalan.

A kőolaj feldolgozása

A kőolajat ma már eredeti természetes formájában közvetlenül nem hasznosítják, hanem abból kőolaj-feldolgozó üzemekben (kőolaj-finomítókban) elsősorban energiahordozókat (motorhajtó- és tüzelőanyagokat), továbbá más termékeket (petrolkémiai alapanyagokat, kenő-, szigetelő-, útépitő anyagokat) állítanak elő. A kőolajat a feldolgozás során fizikai és kémiai műveletekkel frakciókra bontják, amelyekből további beavatkozásokkal állítják elő a kívánt végtermékeket. A kőolaj-finomítók sokféle üzemből álló, bonyolult vegyipari komplexumok, az elvégzendő műveleteket és azok kapcsolódásait sokféleképp lehet kialakítani. Egy lehetséges elvi sémát mutat a 9. ábra. Az egyes műveletekre is sokféle konkrét technológia áll rendelkezésre, mindezek alapján állítják, hogy a világ sok száz kőolaj-finomítója között nem találni két egyformát. A technológia fázisai rugalmasan módosíthatók, egyrészt a különféle eredetű és összetételű kőolajok feldolgozhatósága érdekében, másrészt a végtermékek iránti kereslet változékonysága miatt. Az egyes üzemszempontokban a feldolgozás módját befolyásolni lehet a hőmérséklet, a nyomás, az anyagáramok összetétele és sebessége, a reakcióterben való tartózkodási idő változtatásával, katalizátorok és adalékanyagok megválasztásával. Az alpműveletek mellett különféle kisegítő folyamatokra is szükség van, tisztítás, nem kívánt alkotók kivonása, melegítés, hűtés stb. Különösen fontos a szükséges termikus és mechanikai energia biztosításához a racionális energiagazdálkodás kialakítása (hulladékhő-hasznosítás, a veszteségek csökkentése, kapcsolt energiatermelés), mivel a technológiák önfogyasztása megközelíti a feldolgozott kőolaj energiaértékének 10%-át.

Kőolaj-finomító folyamatábrája



A kőolaj-feldolgozók technológiájának kialakítását erősen befolyásolják a gazdasági szempontok, a kőolajár, a termékek értékesíthetősége (kereslet, piaci ár, minőségi követelmények), a beruházások költsége és azok megtérülése. Jelentős szerepe van a környezetvédelmi követelményeknek is. A magyar kőolaj-feldolgozó technológiát az utóbbi években számottevően módosították, és jó néhány további beruházás van előkészületben, hogy a termékek maradéktalanul eleget tudjanak tenni az EU szigorodó előírásainak. Az unió „Auto Oil 1” programja követelményeket támaszt egyrészt az üzemanyagok

megengedett, illetve a gépkocsik által kibocsátott szennyezőanyag-tartalmára. Végrehajtása jelentős csökkenést eredményezett a legkedvezőtlenebb kibocsátások (CO, benzol, NO_x , VOC, SO_2 , korom) terén, valamint az üzemanyagok tulajdonságait rontó alkotók (oleffinek, PAH) visszaszorításában. Egyeztetés alatt áll a következő fázis a kibocsátások további csökkentésére, ami a CO_2 emisszió mérséklésére is kiterjed (a jelenlegi 170-180 g/km-ről 10 éven belül 120 g/km-re).

A feldolgozás előtt a kőolajat meg kell tisztítani a nemkívánatos alkotóktól. A vizet és a lebegő ásványokat a legegyszerűbb üleptéssel kiválasztani, a stabilabb emulziókat villamos erőterrel koaguláltatják, és úzik ki az olajból. Az utóbbi eljárás a sótalánítást is megoldja. A kőolajat a feldolgozás kezdetén stabilizálják, néhány bar nyomáson és 170-220 °C-on eltávolítják az alacsony hőmérsékleten párolgó éghető gázokat, propánt (C_3H_8), butánt (C_4H_{10}), etánt (C_2H_6) és könnyű benzint, hogy ne zavarják a technológiát. Az éghető gázokat részben hőfejlesztésre hasznosítják, a nagyon gyúlékonyakat elfáklyázzák, a hőfejlesztésre használt propánt és butánt nagy nyomáson cseppfolyósítva forgalmazzák (LPG [Liquefied Petroleum Gas, cseppfolyósított kőolajgáz] Magyarországon PB-gáz).

A megfelelően előkészített kőolajat lepárlással frakciókra bontják. Az első lepárlás légköri nyomáson történik, a 300 °C-nál alacsonyabb forráspontú párlatok leválasztására. A hőcserélőkben előmelegített, majd csökkenecében felmelegített kőolajat elgőzölögtetik, és frakcionálótoronyba vezetik. Ebben egymás felett elhelyezett, folyékony fázist tartalmazó tálcákon áramlik keresztül a gőz, a felfele áramló gőzfázisból kondenzálódó folyadékfázis lefele áramlik, a tálcákon a különböző forráspontú frakciók kvázi egyensúlya alakul ki, a kívánt forrásponthoz tartozó tálcáról a frakciót kivezetik a toronyból. A legalacsonyabb hőmérsékleten a gázok (metán, etán, propán, bután) távoznak, ezt követően a forráspontoknak megfelelően a motorhajtó üzemanyagok (fehéráru) – benzin, petróleum, gázolaj – választhatók le. E párlatok nem késztermékek, további feldolgozással módosítják a molekulaszervezetet, kivonják a nemkívánatos alkotókat, majd adalékokkal javítják a termék tulajdonságait.

Az atmoszferikus desztilláció maradéka a 0 °C körül dermedő pakura. Az atmoszferikus desztillációnál a hőmérséklet további növelése a molekulák hőbomlását okozná, ezt a nyomás csökkentésével lehet elkerülni. A 25-70 mbar-on végzett vakuumdesztilláció kiinduló anyaga a pakura, amiből gázolajat és 350 °C-nál magasabb forráspontú kenőolajpárlatokat nyernek, a desztilláció maradéka bitumen, illetve kevésbé erélyes lepárlásnál a bitumen és paraffinos kenőolajok keverékéből álló gudron.

A termékek osztályozására többféle rendszer használatos, a fehérárun belül megkülönböztetik a 35-215 °C forrpontú vegyületekből álló benzint, a 150-300 °C forráspontúakat tartalmazó petróleumot és a 180-380 °C forrásponttartománnyal jellemezhető gázolajat (dízololaj). Más kategorizálás is

A kőolajtermékek megoszlása 2000-ben

Termék	Megoszlás, %		
	nemzetközi átlag	Európai Unió	magyar viszonyok
benzin	29	25	31,5
középtermékek	37	43	34,1
fűtőolaj	17	15	23,5
egyéb	17	17	10,9

használatos, például 40–300 °C forráspontú ($\gamma = 0,625$ – $0,840$ kg/l fajsűrűségű) könnyű, és 300 °C feletti forráspontú ($\gamma > 0,840$) nehéz termékek megkülönböztetése, illetve könnyű, közepes és nehéz termékek szerinti osztályozás 40 °C ($\gamma = 0,625$), 250 °C ($\gamma = 0,825$) és 350 °C ($\gamma = 0,900$) határpontokkal, a lepárlási maradékok a fenéktermékek. A csoportokon belül a frakciók további típusait is megkülönböztetik, például a benzinek között gázbenzint (<65 °C forrásponttal), könnyű benzint (65–100 °C), középbenzint (100–150 °C) és nehéz benzint (150–200 °C).

A kőolajtermékek megoszlása a 23. táblázatban látható, a középtermék petróleumok és gázolajok összefoglaló megnevezése, az egyéb termékek nem energetikai rendeltetésűek: vegyipari alapanyagok, kenőanyagok, bitumen, parafingyanta, petrolkoksz stb. Láthatóan Magyarországon nagyobb hányadot fordítunk hőfejlesztésre mint a fejlett országok, ugyanakkor kisebb a nem energetikai hasznosítás. Jelenlegi felhasználásunk benzinből kereken 1,3 Mt és gázolajból 1,9 Mt.

A fehéráru, valamint a petrokémiai alapanyagok iránti kereslet növekedése a feldolgozás mélységének növelésére ösztönzi a kőolajipart, a fűtőolaj-előállítás terhére. Az erre szolgáló másodlagos eljárások többsége a lepárlási maradékokból fehéráru előállítását célozza. Első lépésben eltávolítják a további feldolgozást zavaró kén- és nitrogénvegyületeket, a szerves fémvegyületeket (különösen a V-ot és Ni-t tartalmazókat), és a kolloidálisan diszpergált aszfalténeket. Ezt követően kerül sor a fehéráru-kihozatal növelését szolgáló műveletekre, legnagyobbbrészt a nagyobb molekulákat kisebbre törő destruktív eljárásokra (krakkolás). A legkorábban a termikus krakkolást vezették be, amelynél a pakurát 400–600 °C hőmérsékleten és 10–70 bar nyomáson bontják le, terméke benzin, fűtőolaj, petrolkoksz és gázok. Eredeti célra történő alkalmazása mára erősen visszaszorult, elsősorban petrolkoksz gyártására és enyhébb paraméterekkel viszkozitás csökkentésére használják. A katalitikus krakkolás alacsonyabb hőmérsékleten történik, kiinduló anyaga egyaránt lehet pakura vagy vákuumdesztillációs párlat, a fehérárun kívül petrokémiai

alapanyagokat (főleg könnyű olefineket) és gázokat szolgáltat, a legnehezebb termékeket esetleg visszacirkuláltatják. A hidrokrakkolásnál a molekulák katalitikus bontása hidrogénatmoszférában történik (6-18 MPa nyomáson, 370-410 °C hőmérsékleten), szelektívebb és jobb minőségű középtermékeket szolgáltat és a kénmentesítést is megoldja, fontos mellékterméke az oktánszám növelésére használt izobután. A lényegében enyhe termikus krakkolást jelentő viszkozitástörés (visbreaking) célja, hogy a nagy viszkozitású fűtőolajokból kisebb viszkozitású fűtőolaj-keverőkomponenseket állítson elő. Elnyújtott termikus krakkolással a fűtőolajat teljes egészében fel lehet dolgozni úgy, hogy a fehéráru mellett jó minőségű, kohászati igényeket is kielégítő petrolkoksز keletkezzen. A másodlagos feldolgozás jellegének és mértékének megválasztása a gazdaságosságtól függ, figyelembe véve, hogy a másodlagos feldolgozás létesítményeinek fajlagos beruházása mintegy háromszor annyiba kerül, mint az elsődlegeseké, és az üzemeltetési költségek aránya is kereken kétszeres.

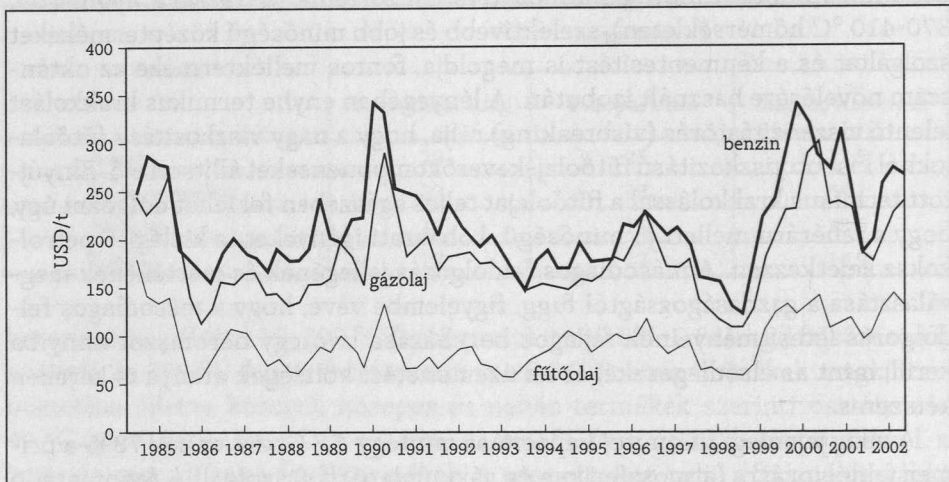
A világ jelenlegi finomítói kapacitása mintegy 4,7 Gt/év, ennek 78%-a primer feldolgozásra (atmoszferikus és vákuumlepárlás) szolgál. A fennmaradó (22%) másodlagos feldolgozói kapacitás 53%-a katalitikus krakkoló, 15% hidrokrakkoló, 18% viszkozitástörő és termikus krakkoló és 14% koksizó kapacitás. A létesítményeket átlagosan 83-84%-ra használják ki. Az utóbbi évtizedben egyre több üzem létesült az olajországokban, de a feldolgozás 58%-a az OECD-országokban folyik (ezen belül 22-22% Európában és az USA-ban).

Az elsődleges magyar feldolgozói kapacitás kereken 10,5 Mt/év, ennek mintegy negyede kihasználatlan. A másodlagos kapacitások folyamatosan bővültek, ennek megfelelően csökkent a fűtőolaj-termelés. A hazai fehéráru kihozatal a feldolgozott kőolajnak mintegy kétharmada, ennek, valamint az olefinek arányának növelését tervezik a gudron teljes feldolgozásával. Ez a szénhidrogén-erőművek jövőbeli tüzelőanyag-ellátásában, valamint a téli csúcsidőszakban a földgázról fűtőolajra áttérő pufferfogyasztók ellátásában gondokat okozhat.

Energetikai szempontból a belső égésű motorok üzemanyagainak és a hőfejlesztést szolgáló fűtő- és tüzelőolajoknak van jelentősége, de az energiamérlegekben a számbavétel egyensúlyának bemutatására a többi terméket is energiaértékével tartják nyilván. A fehéráruigény szerkezete alapvetően a közúti járműforgalom alakulásától és a motorkonstrukciók megoszlásától függ. A fehérárúnak van energetikán kívüli hasznosítása is, a legtöbb frakció oldószer és vegyipari alapanyag, a könnyebb benzinpárlatokat és a petróleumot világításra és főzésre is használják.

A kőolaj-feldolgozás átlagos költsége 30 USD/t körül mozog, amit alapvetően az üzemanyagok viselnek. A kőolajtermékek termelői ára nagyjából követi a kőolajét, de a tényleges kereslet okozta eltérésekkel, amiben viszont

Kőolaj-termékárak alakulása



szezonális változások is érvényesülnek. Nyáron az autós turizmus mértéke befolyásolja az üzemanyagárakat, ősszel a mezőgazdasági munkák hatása érzékelhető, télen a tüzelőolaj-kereslet és a tüzelőolajár függ a fűtési hőmérséklet alakulásától. A kereslet kielégíthetőségét, és ezen keresztül az árakat számottevően befolyásolja a készletek értéke, különösen az Egyesült Államokban felhalmozott nagy mennyiségek szerepe jelentős. A termékárak alakulását mutatja a kőolajár erőteljes változásának utóbbi két évtizedes időszakára a 10. ábra. Átlagosan a benzin a kőolaj árának 1,5-1,8-szorosa, a gázolajé a kőolaj 1,2-1,5-szöröse, a fűtőolajé pedig 0,8-0,9-szerese, de ezektől piaci és spekulációs hatásokra jelentős eltérések is előfordulhatnak. A magyar árképzés a mediterrán kikötői árakhoz igazodik, ezek az utóbbi években erősen ingadoztak, a 95-ös benzin 230 és 410 USD/t között, a gázolaj 230 és 290 USD/t között.

Az üzemanyagok fogyasztói árát a költségvetési politika lényegesen eltérítheti a termelői ártól. Az Európai Unió országaiban, de Magyarországon is az üzemanyagok fogyasztói árának 60-70%-a állami jövedelem. Ez nálunk egy magas kulcsú általános forgalmi adóban, egy fix összegű jövedéki adóban és a benzin esetében készletezési díjban valósul meg. Az Egyesült Államokban az adó az európainak a felét sem éri el, ez magyarázza az ottani olcsó üzemanyagárakat.

Az üzemanyagok közül a benzin a kisebb teljesítményű, szikrával gyújtó Otto-motorok hajtóanyaga. A benzint többféle minőségben forgalmazzák, amelyeket többségében a személygépkocsik, a motorkerékpárok és egyes kis teherautók használnak fel. A dugattyús motorokkal hajtott légcavaros repü-

lőgépek speciális követelményeinek kielégítésére a repülőbenzin szolgál. Ugyancsak benzinnel üzemelnek a nem villamos hajtású kerti kisgépek és kézi szerszámok.

Ha az üzemanyag kompressziótűrése nem elegendő, a robbanáshullámok kopogásként hallható járulékos ütéshullámokat okoznak. A motorbenzinek fontos tulajdonsága az oktánszámmal jellemzett kompressziótűrés, amit egy szabványosított motorkonstrukcióban vizsgálnak annak megállapítására, hogy milyen mértékű sűrítésnél jelentkezik detonációszerű robbanások formájában a kopogás. Az oktánszám az izooktán részaránya a normál heptánnal alkotott olyan keverékben, amely a vizsgált benzinnel azonos módon viselkedik (0 az n heptán, 100 az izooktán oktánszáma). Régebben ólomtetraetil adagolással növelték az oktánszámot, de az ólom környezetszennyező szerepe miatt az így kezelt benzin forgalmazását az EU legtöbb országában – és Magyarországon is – beszüntették. Ennek következtében nőtt az oktánszám-növelő technológiák szerepe és a benzin minőségét javító komponensek bekeverésének jelentősége.

A benzint az oktánszám növelésére többnyire katalitikusan reformálják, a 450-530 °C-on és 30-40 baron végzett művelet során a telített szénhidrogéneket aromásokká, a láncszerkezetűeket gyűrűs szerkezetűvé alakítják, az eljárás melléktermékeként hidrogént is szolgáltat. Ugyancsak az oktánszám növelését célozza, de kevésbé elterjedt az izomerizálás, a parafinok átalakítása izoparafinokká a benzinyűrű lebontásával és hidroizomerizációjával. Használatos a hidrogénatomok helyére különféle gyököket beépítő alkilezés is, ennek során izobután és olefinek reakciójával az alacsony szénatomszámú molekulákból magasabb szénatomszámúakat állítanak elő.

A benzint szennyező alkotók közül a sokféle vegyületben előforduló kén a legkellemetlenebb, mert mérgezi a háromutas katalizátorokat és növeli a CO, NO_x és VOC emissziót, katalitikus konverteres gépkocsiknál pedig H₂S kibocsátást okoz erősen dúsított üzemanyagnál, például a motor hidegindításánál. A jelenlegi európai és magyar előírások 50 ppm kéntartalmat tolerálnak, de már megjelent a további csökkentés igénye 5-10 ppm alá, távlatilag a tökéletesen kénmentes üzemanyag lesz a cél. Ugyancsak törekvés a benzoltartalom csökkentése (lehetőleg 1 térfogat százaléka alá), valamint az emissziók mérséklése érdekében a felső leválasztási hőmérséklet csökkentésével az aromások és olefinek arányának visszaszorítása, esetleg oxigéntartalmú alkotók adagolásával. Az égéstermékek között mérgező hatású szénhidrogének is kikerülnek, egyesek – így a benzpirén – rákkeltők. A benzin párolgása – ami nem elhanyagolható veszteségforrás – szintén környezeti ártalom. Egyes szennyezőkre maga a benzin is érzékeny.

Adalékokat használnak a benzin megfelelő konzisztenciájának biztosítására, az oxidáció, jegesedés, gyantaképződés megakadályozására, a porlasztáshoz szükséges illékonyság biztosítására. Ugyancsak adalékok segítségével

akadályozzák az égéstermékek lerakódását a motorban, s védekeznek a korrózió és rozsdásodás ellen, kenik a mozgó alkatrészeket, csökkentik a kibocsátásokat stb.

A gázolaj a nagyobb teljesítményű, kompressziós gyújtású dízelmotorok üzemanyaga. A gázolajjal nagyobb kompresszió érhető el, mint benzinnel, így mintegy 12%-kal több hasznos energiát lehet nyerni. A gázolaj gyulladási képességét a cetánszámmal jellemzik, amit a cetán részarányával értelmeznek alfa-metil-naftalinnal alkotott keverékben, ha gyúlékonysága megegyezik a vizsgált gázolajével.

A gázolaj tulajdonságait adalékokkal is javítják, hogy ne legyen hajlamos kokszképződésre, vagy lerakódásokra, hogy alacsony dermedéspontot és megfelelő viszkozitást biztosítsanak a jó tárolhatóság és szivattyúzhatóság érdekében, az égéstermékében ne legyen sok korom stb. A gázolajnál is törekednek a kéntartalom csökkentésére, jelenleg 50 ppm, később 30 ppm, majd távolatilag 10 ppm alá.

A gázturbinás sugárhajtóművek kerozin üzemanyaga 150-250 °C forráspontú petróleumból különféle adalékokkal előállított keverék. A kerozintól a nagy magasságban uralkodó alacsony hőmérséklet miatt alacsony fagyáspontot igényelnek, hogy nyomokban se tartalmazzon nedvességet, ami megfagyva az áramlást akadályozhatja. Ugyanezen okból követelmény, hogy ne legyen hajlamos sem oxidálódásra, sem kokszképződésre. A hajtómű hűtésében játszott szerepe miatt fontosak a termikus tulajdonságai is.

A magas olajár visszaszorította a kőolajtermékek hőfejlesztésre való alkalmazását. A magyar szabvány tüzelő- és fűtőolajokat különböztet meg, ami viszont nem általános nemzetközi gyakorlat. A tüzelőolajok különböző fajtái lepárlási frakciók, azok lényegében gázolaj és más desztillációs párlatok különböző arányú keverékei. A fűtőolajok a lepárlás magas dermedéspontú és nagy viszkozitású maradványai. Mindkét tüzelőanyagfajta fűtőértéke 42 MJ/kg körül helyezkedik el, felhasználhatóságuk fontos jellemzője sűrűségük és viszkozitásuk, továbbá a dermedés-, lobbanás- és gyulladáspont. Jellemzésükre időnként a lefejtéshez, illetve porlasztáshoz szükséges minimális hőmérsékletekből képzett törtet használják. Követelmény, hogy hidegben üledékképződés nélkül tárolhatók legyen, valamint hogy tüzelése kormozás- és hamumentes legyen. Fontosabb tulajdonságaik a 24. táblázatban láthatók. A háztartási tüzelőolajtól a nehéz fűtőolaj felé haladva a sűrűség, a viszkozitás, a dermedéspont, a lobbanáspont és manipuláció szempontjából mértékadó hőmérsékletek növekvő tendenciát mutatnak. Hasonló irányban nő a nemkívánatos szennyezőanyagok koncentrációja, mivel azok a lepárlás során a nehezebb frakciókban dúsulnak fel, ha nem gondoskodnak a kivonásukról. A legkellemetlenebb szennyező a kén, ami többnyire a nehéz molekulákhoz kapcsolódik. A kénmentes termékeket vagy kis kéntartalmú kőolajból nyerik, vagy kénmentesítő eljárást alkalmaznak. A többnyire szerves vegyületekben

Tüzelő- és fűtőolajok jellemzői

Jellemezők	Tüzelőolaj			Fűtőolaj			
	háztartási	könnyű	kén- mentes	általános	kén- mentes	kénes	nehéz
sűrűség 20 °C-on	0,82–0,87	0,82–0,87	0,9–0,96	0,9–0,95	0,93–0,97	0,93–0,96	0,97–0,99
viszkozitás 20 °C-on	12	30,4					
50 °C-on			30	30			
100 °C-on					35	35	168
dermedéspont határa, °C	-5/+5	-5/+10	-5/+5	-5/+5	+55	+55	+50
max. kéntartalom, %	1	2	1	2	1,2	3	5
max. hamutartalom, %	0,02	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
lobbanáspont határa, °C	55	55	55	55	100	100	130
max. víztartalom, %	nyomok	0,5	0,5	0,5	2	2	2
fűtőérték, MJ/kg	41,9–42,7	41–42,7	41–42,7	41–42,7	39,8–41	39,8–41	39–42

(például merkaptánok) formájában található kén kivonására többféle eljárás használatos, rendszerint hidrogén bevezetésével kénhidrogénné (H_2S) redukálják, amiből elemi kenet vagy kénsavat nyernek. A nagy légfelesleg előmozdítja a magas hőmérsékletű korróziót, mindenekelőtt az alacsony forrponútú vanádium jelenlétében.

A tüzelőolajok többféle minőségben kerülnek forgalomba, többségük környezeti hőmérsékleten folyékony és jól porlasztható. Az elsősorban helyiségfűtésre használt háztartási tüzelőolaj (HTO) tulajdonképpen gázolaj. Szociálpolitikai okokból hosszú ideig jóval alacsonyabb adókulccsal forgalmazták, mint az üzemanyagot, ezért a HTO-t a megkülönböztetés érdekében megfeszítették. Az árdifferencia nagyarányú visszaélésekre adott módot, a festés eltávolításával a terméket magasabb áron üzemanyagként forgalmazták. Ez az „olajszőkítés” az árkülönbség megszüntetéséig a magyar olajmaffia hatalmas jövedelmi forrásává és a korrupció melegágyává vált.

Az igényesebb nagyobb berendezések (sütőipari és hőkezelő kemencék, szárítók, nagy konyhák) tüzelőanyaga a könnyű tüzelőolaj, ami gázolaj és parafinos párlatok keveréke. Környezetvédelmi követelmények vagy kényes technológiák kielégítésére használják a kénmentes tüzelőolajat. Az általános tüzelőolaj gázolaj és pakura keveréke, központi fűtésekhez és kisebb kemencékhez használják, viszkozitása nagy, ezért a tüzelés előtt 50–60 °C-ra kell felmelegíteni. Az EU a tüzelőolajok kéntartalmának visszaszorítását is előírta, jelenleg 0,2%-ra, 2008-ig pedig 0,1%-ra.

A fűtőolajok a lepárlás maradványai, magas dermedésponttal és nagy viszkozitással, sűrűségük 0,9 kg/l feletti érték, gyulladáspontjuk 50 °C felett van.

Csak nagyobb tüzelőberendezésekben alkalmazhatók, mivel mind a szállításhoz, mind a tüzeléshez melegítésük szükséges. Az olaj lefejtéséhez $<50\text{ }^{\circ}\text{E}$ ($380\text{ mm}^2/\text{mp}$) viszkozitás szükséges, a vezetéken történő továbbításához $<22\text{ }^{\circ}\text{E}$ ($167\text{ mm}^2/\text{mp}$) és a porlasztáshoz $<2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{E}$ ($11,8\text{--}21,2\text{ mm}^2/\text{mp}$). Több változatban forgalmaznak fűtőolajokat, de $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt egyik típus viszkozitása sem éri el a porlasztáshoz szükséges értéket. A könnyű kénmentes fűtőolaj bizonyos olajok pakurája, ezt főleg a kohászatban és a kénre érzékeny technológiák kemencéiben használják. A kénos fűtőolaj pakura és desztillációs termékek keveréke, ipari kazántelegek és cementipari kemencék tüzelőanyaga. A közepes fűtőolaj a könnyű és nehéz termékek keveréke, kevésbé igényes kemencékhez és kazánokhoz használják. A nehéz fűtőolaj bitumentartalmú pakura, amit nagy ipari és erőművi kazánokban tüzelnek el. Erőművi tüzelőanyagként hasznosítják a nagy viszkozitású gudront is. Fűtőolajoknál az uniós határérték 1% kéntartalom, de ez alól az illetékes bizottság indokolt esetben felmentést adhat.

A kőolajtermékektől megkívánt fizikai és kémiai tulajdonságokat állami előírások és termékszabványok írják elő, a hazai követelmények illeszkednek az EU követelményeihez. Az előírások időnként módosulnak, ahogy az alkalmazás igényei és a műszaki lehetőségek módosulnak. Különösen fontossá váltak a szigorodó környezetvédelmi követelmények, az üzemanyagokban előforduló nemkívánatos anyagok (kén, benzol, ólom stb.) megengedhető koncentrációjára. Az üzemanyagok összetételének összhangban kell lenni a motorkonstrukciókra vonatkozó előírásokkal, amelyek az égéstermékekben kibocsátott szennyezőket (CO , NO_x , VOC stb.) is limitálják. Az előírások vonatkoznak a szállításra, tárolásra és egyéb manipulációs műveletekre, figyelembe véve a tűz- és robbanásveszélyt is. Természetesen az üzemanyagoknak meg kell felelni az erőgépek működési módjából adódó igényeknek is. A szokványos anyagjellemzőkön – sűrűség, viszkozitás, lobbánáspont, dermedéspont, komponensek lepárlási hőmérséklet szerinti megoszlása, szennyezők koncentrációja – túlmenően speciális követelményeket is ki kell elégíteni.

Az üzemanyagok helyettesítése

A kőolajellátás feszültségei és a környezetszennyezés gondjai intenzív kutató-fejlesztő munkát gerjesztettek a motorhajtó üzemanyagok helyettesítésére. Üzemanyagok előállítása szénből vagy biomaszból (metanol, etanol, biodízel stb.), gázok használata üzemanyagként (földgáz, PB-gáz), villamos hajtás (akkumulátorral, tüzelőanyag-cellával, napelemmel) a legfontosabb irányok. Bár sokféle megoldás bizonyult megvalósíthatónak, a versenyképességtől azonban még távol vannak, és a távolság megőrzésében mind az OPEC, mind a nagy olajtársaságok egyformán érdekeltek. Ugyanakkor egyes államok már

kedvezményekkel ösztönzik a fejlesztésüket. A rakétatechnikában szerzett tapasztalatok alapján kísérleteket végeznek gépkocsik és repülőgépek üzemanyagaként folyékony hidrogén alkalmazására. A biomasszából előállított motorhajtó anyagok versenyképességének egyik feltétele a jelenleginél jóval magasabb olajár vagy a termék dotálása. Sokat áldoznak a villamos autó fejlesztésére is, ez alapvetően a kémiai áramforrások fejlesztésén múlik. A járműtechnikában a helyettesíthetőség legfontosabb követelménye az üzemanyag energiakonzentrációja, a benzinben közel háromszázszor annyi energia tárolható, mint egy azonos súlyú hagyományos ólomakkumulátorban. A tüzelőanyag-cellák alkalmazása főleg a nagyobb önsúlyú járművek hajtására várható.

Sokan a metanolban (metil-alkohol, CH_3OH) látják a távolabbi jövő legfontosabb folyékony üzemanyagát, amivel a benzin is helyettesíthető. Jelenleg a metanol a szerves vegyipar többféle termékének alapanyaga, gyártása többnyire szintézisgázra ($\text{H}_2 + \text{CO}$) alapul, ami sokféle karbontartalmú anyagból (szén, kőolaj, földgáz, lepárlási maradék, aszfalt, olajpala, biomassza stb.) előállítható, de az ipari nagy mennyiségű gyártás földgázból vagy kőolajpárlatokból indul ki. A szintézisgázt parciális oxidációval vagy gőzreformálással állítják elő, például a 25. táblázat 24. képletében jelzett reakcióval.

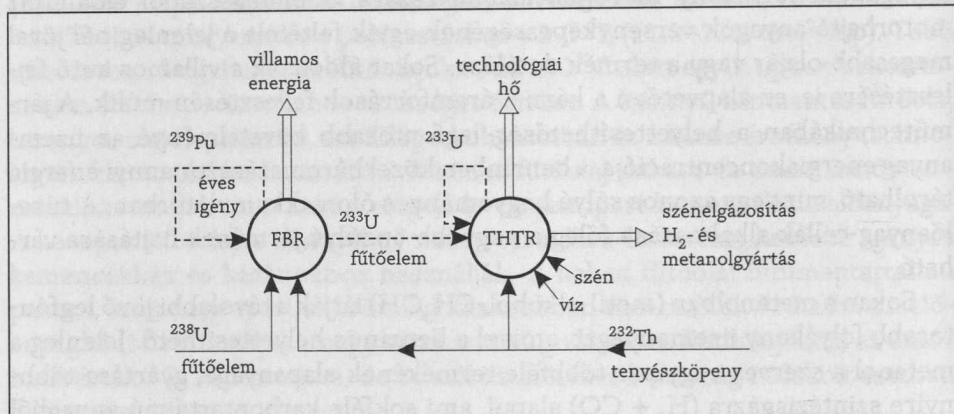
A szintézisgázból többnyire nagy nyomáson, 900°C -on Ni katalizátorok segítségével állítják elő a metanolt a 25., illetve 26. reakciókkal. Kis léptékben levegőhiányos elgázosítás is számításba jöhet, mint például a fa száraz lepárlásával (faszesz). A metanol eredetileg a faszénkészítés mellékterméke volt. Szénből is előállítható metanol, a teljes elgázosítást követő metanizáció révén nyert szintetikus földgázból. A metanolgyártás jelenlegi technológiája a bevezetett szénhidrogén fűtőértékének mintegy harmadát felemésztí, ezért az energetikai szempontból pazarló eljárás. Viszont ígéretesnek tartják a gyártást magas hőmérsékletű atomreaktorral, szén és víz bázisán. A szén elgázosítása biztosíthatja a szén-monoxidot, a vízbontás pedig a hidrogént. Az eljárás felértékeli a szén szerepét, hiszen konvencionális cseppfolyósítással két karbon atomból nyerhető kereken egy metanolmolekula, ha a szén helyett a hő atomreaktor szolgáltatja, két metanolmolekula állítható elő, a vízből nyert hidrogén hozzáadása a metanolkihozatalt négy molekulára növeli. Az energia-

25. táblázat

Gázok szintézise

Képlet	Termék	Reakció
24	szintézisgáz	$\text{C}_x\text{H}_y + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow (x+y/2)\text{H}_2 + x\text{CO}$
25	metanol	$2\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
26	metanol	$3\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$

Nukleáris metanolgyártás



mérleg is hasonlóan alakul, 1 MJ fűtőértékű szén eltüzelése 0,4 MJ villamos energiát szolgáltat, kémiai SNG-gyártással a kihozatal 0,65 MJ-nyi gáz, magas hőmérsékletű reaktor hőjével helyettesítve a széntüzelést a gáz hőértéke ~1 MJ, a nukleáris energiával előállított hidrogén hozzáadása 2 MJ fűtőértékű metanolt szolgáltat. Ilyen alapon a metanol, mint energiahordozó nagy szerephez juthat, hiszen a bőséges szénvagyonra és vízre alapulna a gyártás. Az elképzelés tovább finomítható az energiabázis tekintetében is (11. ábra), ha a magas hőmérsékletű reaktor üzemanyaga ^{233}U , és ezt olyan szaporító reaktorból nyerik, amit csak természetes összetételű anyagokkal (^{238}U és ^{232}Th) működtetnek. E technológia életképességére a válasz évtizedek múlva várható.

A metanol kompressziótűrése nagy, de fűtőértéke (22,7 MJ/kg) feleakkora, mint a benziné. Égési hőmérséklete is alacsonyabb, ami a környezetszennyezés szempontjából előnyös, viszont párolgáshője magas (1,1 MJ/kg), a benzinének mintegy négyszeresét teszi ki, elpárolgatatása 10 °C alatt előmelegítést igényel. Hátránya, hogy a fémeket korrodálja, a műanyagokat lágyítja, és az emberre mérgező.

A porlasztó változtatása nélkül a metanol 10-15%-os arányban hozzákeverhető a benzinnel. Ez növeli az oktánszámot, de csökkenti a teljesítményt és a jármű hatóságát. A metanol önálló alkalmazásához a motorkonstrukciót módosítani kell, az alacsony fűtőérték ellensúlyozására üzemanyagban gazdagabb keveréket előállító porlasztóra van szükség, és lehetővé kell tenni kipufogógázzal az üzemanyag előmelegítését, mert a hidegindítás gondot okoz. Főleg korrozív és mérgező jellege miatt használata üzemanyagként lekeült a napirendről, viszont előnyös alapanyagként tekintik más folyékony üzemanyagok szintéziséhez. Ezek közül különösen az MTBE-t (metil-tercier-

butil-éter) tekintik ígéretesnek, amivel a benzint közvetlenül helyettesíteni lehet. Ennek fűtőértéke és oktánszáma magas, a vizet alig oldja, és nem szennyez – 5-10% arányban adalékolják is benzinekhez. Kutatások folynak metanolból metán, valamint zeolit katalizátorral benzin előállítására. Foglalkoznak azzal az elképzeléssel is, hogy szokványos tartályhajókban földgázból gyártott metanol szállításával váltsák ki a cseppfolyósított földgáz bonyolult és veszélyes tengeri szállítását. Erőművekben is lehetségesnek tartják a fűtőolaj helyettesítését metanollal.

Nagy reményeket fűznek egy másik alkoholtípushoz, az etanolhoz (etil-alkohol, spiritusz, C_2H_5OH) is. Szintézise kőolajtermékekből vagy földgázból nem gazdaságos, előállításának célszerű útja az erjesztés növényi eredetű szénhidrátokból. Az anaerob erjesztésében több ezer mikroorganizmus-fajta – leginkább élesztő baktériumok – vesz részt, ezek segítségével a biomasszából cukrot, majd abból alkoholokat (etanol, metanol) állítanak elő. Erre különféle növényi anyagok alkalmasak, a cukornövények (cukorrépa, cukornád, takarmányrépa, cirok), a nagy keményítő tartalmúak (kukorica, gabona, burgonya, csicsóka), a lignocellulózok (fa, szalma, kukoricaszár), különféle ipari hulladékok (melasz, tejsavó, fűrészpor), még a bor lepárlása is számításba jöhet. A 26. táblázat egyrészt 1 liter etanol előállításához szükséges termékmennyiséget, másrészt egy közepes nagyságú gépkocsi éves üzemanyag-szükségletét fedező terület méretét mutatja be.

Mérsékelt égövön a befektetendő gépi munka, a felhasználandó kemikáliák és a begyűjtés energiaértéke kétségesse teheti a pozitív energiamérleget. Etanol kizárólagos használatához módosítani kell a motorkonstrukciót, mivel nagyobb kompresszióviszonyra van szükség. Az üzemanyag-adagolás kisebb módosításával gázolajhoz 50%-os, benzinhoz 20%-os arányban hozzákeverhető. Magyarországon a világháború alatt motalkó néven forgalmaztak is benzin-etanol keveréket, az USA-ban most is működnek ilyen „gasohol” kutak.

26. táblázat

Etanol előállításának jellemzői

Növény	Szükséges termés, kg/l	Területigény, ha/gépkocsi, év
cukornád	14,3	0,49
manióka	5,5	1,43
cukorköles	12,6	0,38
rizs	3	2,5
kukorica	3	2,5
gabona	3	2,5
burgonya	9	1,29
cukorrépa	11,8	0,53

27. táblázat

Etilalkohol-kihozatal átlagos értékei

Növény	l/ha
cukorrépa	3248
csicsóka	4230
cirok	3200
kukorica	2115
burgonya	1861
búza	1767
zab	927
rozs	900

Brazíliaiban nagyléptékű etanolprogramot (Proalcool) valósítottak meg cukornád és manioka fermentálásának bázisán, de a nagy kőolaj-előfordulások felfedezése után versenyképessége csökkent, a program megtorpant.

A hazai körülmények között különféle növényekből erjesztéssel kinyerhető etilalkohol mennyiségét mutatja a 27. táblázat.

Az alkoholok közös hátránya, hogy tárolás közben a környezetből vizet vesznek fel, és a vízzel oldatot alkotnak. Keverékeknél üzemviteli nehézséget okoz, hogy alacsony hőmérsékleten, illetve víz jelenlétében a benzin-alkohol keverék fajsúly szerint rétegződik (fázisszeeparáció). Korrozív hatásuk is van, gőznyomásuk is magas. Az üzemi tapasztalatok sem mindenben kedvezőek, ezért a figyelem a továbbfeldolgozás felé fordult, főleg ETBE (etil-tercier-butiléter) előállítására etanol és izobután keverékéből, továbbá n-butanol szintetizálása is számításba jöhet.

Katalitikus kémiai reakciókkal metánból, valamint más gázokból nemcsak metanolt, hanem más folyékony üzemanyagokat is elő lehet állítani (GTL = Gas to Liquid), például földgázból dimetilétert (DMA). Ilyen anyagot tüzelő erőmű létesítése folyamatban van. Újabb vizsgálatok szerint a földgázból előállított gázolaj kevésbé szennyez, mint a kőolaj lepárlásából nyert.

A hidrogéngazdálkodáshoz kapcsolódva vetődik fel a hidrazin (H_2N-NH_2) használata tüzelőanyagként. Jelenleg főleg a vegyiparban használják, de alkal-mazzák rakéták és tengeralattjárók üzemanyagaként is. Ebben a folyadékban a legnagyobb a súlyegységre eső hidrogéntartalom, fűtőértéke 16 MJ/kg. Előnye, hogy nem tartalmaz karbont, így környezetszennyező hatása kicsi. Egyszerűen és olcsón szállítható. Főleg tüzelőanyag-cellák üzemanyagának szánják.

Az olajos növényekből (elsősorban repce és napraforgó) magvaiból is lehet motorhajtó olajokat sajtolni (biodízel). Ezek igénytelenebb berendezésekben – egyszerűbb mezőgazdasági gépek hajtására, vagy tüzelőolaj helyettesítésére – közvetlenül is használhatók. A biodízel hasonló a gázolajhoz, azzal jól

28. táblázat

Növényolaj-kihozatal átlagos értékei

Növény	kg/ha
napraforgó	740
repce	696
szója	856

keverhető, a keverék mintegy 5%-os arányig a meglévő motorkonstrukciókban is alkalmazható, de a biodízel önálló alkalmazásához módosítani kell a konstrukciót, elsősorban a sokkal nagyobb viszkozitás ellensúlyozására. Nagy viszkozitásuk miatt a gázolaj helyettesítésére motorokban kevéssé, erre csak tovább feldolgozva alkalmazhatók. A biodízel fűtőértéke némileg elmarad a dízelolajétól, dermedéspontja magasabb, egyes szerves anyagok oldására hajlamos, lerakódásai csökkenthetik a motorok élettartamát, kipufogógázának a szaga irritáló, ez azonban adalékokkal ellensúlyozható. A növényi olajok triglicerid anyagából finomításukat követően észterezés útján zsírsav metilésztert (FAME, Fatty Acid Methyl Ester) lehet előállítani, csökkentve a viszkozitást és a hajlamot a kokszolódásra. A repceolajat lúgos közegben katalizátoros átészterezéssel metanollal reagáltatva nyerik a repceolaj-metilésztert (RME).

Évente 1 ha területen 2,5-3 t repcemag termelhető, annak olajtartalma ~40% amiből 30-35% (~1 t) metilészter állítható elő. A repce nedves és hűvös körülményeket kedvelő növény, aminek a hazai klíma kevéssé felel meg, ezért a magyar termésátlag (1,5 t/ha) mintegy fele a nyugat-európainak. A hazai termesztésnél az is gond, hogy a repcét 4-6 éves vetésforgóval célszerű termesztetni. A hazai feltételek mellett sajtolással, illetve oldószeres kivonással nyerhető olajmennyiség a 28. táblázatban látható.

A biodízel stabilitásával kapcsolatban vannak még gondok, egyrészt a fény és a levegő az észtereket gyorsan öregíti, másrészt a biodízel hajlamos víz abszorbeálására, ami előmozdíthatja a szerves anyag bomlását okozó mikrobiológiai környezet kialakulását. Az égéstermékekben viszonylag nagyobb az aldehidek, többgyűrűs aromások és az NO_x aránya, de kevesebb a CO, aeroszol és a hidroxid kibocsátása. A biodízel használatának legfőbb gondja, hogy önköltsége magasabb a gázolajárnál, csak állami támogatással versenyképes. Ezért gyártása nem annyira energetikai, mint inkább agrárpolitikai kérdés, mert hasznosíthatók a mezőgazdasági termelésből kivont földek, és foglalkozást biztosít a falusi lakosoknak. Az EU 2010-ig a motorikus üzemanyagokban 5,75%-os piaci részarányt és az üzemanyagokban 1%-os bekeverési arányt irányzott elő a növényi eredetű üzemanyagokból. Ehhez állami támogatásra van szükség, mert előállításuk önköltsége 2,5-3-szorosa a kőolajtermékének.

A biomassza hasznosítására folynak kutatások hidrogenizációs eljárásokkal is. A vizes zagy formájában retortába táplált biomasszához 100-200 bar nyomáson, 240-380 °C hőmérsékleten szén-monoxidot és vízgőzt, valamint 5%-os arányban alkáli katalizátort (például NaCO_3) adagolnak. A reakció fő terméke egy tonna száraz biomasszából 300 liter nehéz paraffinos olaj, jelentős oxigén- és nitrogén-tartalommal, de kevés kénnel.

Gáznemű tüzelőanyagok

Az éghető gázoknak jelentős szerepe volt a termikus technológiák és különösen a vegyipar fejlődésében. Régebben ilyen gázokat többnyire a szén elgázosításával vagy lepárlásával állították elő. Az energiagazdálkodásban új fejezetet nyitott a vezetékes gázszolgáltatás, kezdetben a gázvilágításhoz, később a városi lét elválaszthatatlan feltételévé váló városi gáz forgalmazásához. A 20. század közepe táján világhódító útjára indult a földgáz, s kiszorította a piacról az éghető gázok többi fajtáját. Előnyei révén jelenleg a legkedveltebb tüzelőanyag, ezért részaránya az energiamérlegben folyamatosan és gyorsan nő. Elsősorban hőfejlesztésre használják a tüzelőberendezések teljes teljesítményspektrumában, de gyorsan terjed alkalmazása az erőművekben, sokirányúan hasznosítható vegyipari alapanyag, valamint megjelent a motorhajtó üzemanyagok között is.

Földgázforrások

Megoszlanak a vélemények, hogy a földgáz a kőolajéhoz hasonló körülmények között a szapropléból, de attól függetlenül keletkezett-e, vagy pedig a kőolaj lebomlásából származik. A földgázleletek mintegy harmada a kőolajjal társulva fordul elő, a felette elhelyezkedő gázsapkában, illetve a rezervoárban uralkodó hőmérséklettől és nyomástól függően a kőolajban oldva. A földgáz-előfordulások kétharmada a kőolajtól függetlenül található, de a kőolajéhoz hasonló geológiai formációkban.

A földkéregben található gázelőfordulások összetétele nagyon változatos, energetikai szempontból földgáznak a túlnyomóan szénhidrogén-tartalmúakat tekintik. A legfontosabb alkotóelem a metán (CH_4), de a földgáz gyakran tartalmaz magasabb szénatomszámú alkotókat, főleg etánt (C_2H_6), propánt (C_3H_8), butánt (C_4H_{10}), esetleg pentánt (C_5H_{12}) és más szénhidrogéneket is. Légköri viszonyok között az etán, propán, bután (C_2 - C_4 frakciók) gázneműek, a pentán, hexán, heptán (C_5 - C_7) és néhány ennél magasabb szénatomszámú szénhidrogén a rezervoárban uralkodó körülmények között gáznemű, de a talajszinten a harmpontjuk alatt folyékony halmazállapotban csapódnak ki

(NGL, Natural Gas Liquid). A feldolgozás szempontjából száraz és nedves földgáz különböztetnek meg. A jó minőségű, száraz földgázok metántartalma 80-99%, az etán 1-5%-ot tesz ki és a C_3 - C_5 összetevők 1-2% alatt vannak. A száraz gáz alig tartalmaz légköri viszonyok között cseppfolyósítható komponenseket, a magasabb szénszámú összetevők koncentrációja 12 g/m^3 -nél kisebb. A nedves földgáz a kőolajjal együtt található kísérő gáz (dúsnak vagy zsírosnak is nevezik), amiben a metán mellett etán, propán, bután, izobután, pentán, izopentán, hexán, heptán, kevés oktán is előfordul, aromás olajok esetében toluol és benzolgőz is. A nedves gázban a metán részaránya 30-40% alá is csökkenhet, az etán és a propán mértéke elérheti a 20-25%-ot, és a C_4 - C_5 frakciók is kitehetnek néhány százalékot. A tárolórendszerben az olaj telített, ha felette szabad gáz található, és telítetlen, ha a gáz teljes egészében az olajban oldva fordul elő. A gáz kiválása az olajból a buborékponton indul meg, ami a hőmérséklettől és nyomástól függ. A tárolóközetben uralkodó rétegnyomás csökkenése előmozdítja a gázkiválást, amit a talajszinten a nyomás csökkentésével lehet fokozni, a kiléptetett gőzök koncentrációja 300 g/m^3 -t is elérhet. Némi földgáz található a tárolórendszerben lévő vízben is.

A földgázban a szénhidrogénekén kívül más gázok is előfordulnak, így szén-dioxid, kén-hidrogén, nitrogén, hélium, argon, merkaptánok, radon stb. A 0,1-0,2%-nál nagyobb kén-hidrogén-tartalmúakat savanyú gáznak nevezik. A földgázban található a közetekből elragadott lebegő szilárd részecskék is, valamint vízgőz. A nem éghető alkotók csökkentik a földgáz fűtőértékét, ha nagy mennyiségű éghetetlen gázzal elegyedik a szénhidrogén, indokolt az alacsony fűtőértékű vagy gyenge minőségű földgáz megnevezés. Ennek hazai mennyiségét $\sim 31 \text{ Gm}^3$ -re becsülik. A 20-30 térfogatszázaléknál kisebb éghető anyagot tartalmazó gázokat inertnek, az $\sim 50\%$ -nál többet tartalmazókat inertesnek nevezik. A magyar ásványvagyon-nyilvántartás szerint légköri viszonyok között a földgázvagyon 70%-ának fűtőértéke $> 30 \text{ MJ/m}^3$, 30 és 18 MJ/m^3 közé esik a vagyon 10%-a, és 20%-nak a fűtőértéke $< 18 \text{ MJ/m}^3$. Az alacsony fűtőértékű gázokat gazdaságtalan szállítani, az ilyen gázlencséknek főleg helyi hasznosítása jöhet számításba. Kriotechnikai módszerekkel vagy abszorbensekkel gazdaságossá válhat az inert alkotók leválasztása ipari nyersanyagként, vagy földgázhiány esetén a fűtőérték megnövelésére. A hazai előfordulásokban főleg N_2 és CO_2 található, a 10%-nál kisebb CO_2 tartalmú gázokat szénhidrogéngáznak tekintik, az alacsonyabb fűtőértékű szén-dioxidos kevert gázoknál a CO_2 tartalom 33-75% között van, ezek helyszíni erőművi hasznosítására vannak elképzelések. A 75%-nál magasabb CO_2 tartalmú gázokat elsősorban szénsavgyártásra hasznosítják (Répcelakon).

Az éghetetlen alkotók eltérő aránya miatt a földgáz-előfordulások fűtőértéke is eltérő. Ennek következtében a fűtőérték az ország területén nem mindentől azonos, a kisebb különbségek abból adódnak, hogy az adott ellátási terület melyik forrásból táplálják. A szabvány $\pm 5\%$ ingadozást enged meg.

A világ műrevaló földgázvagyon

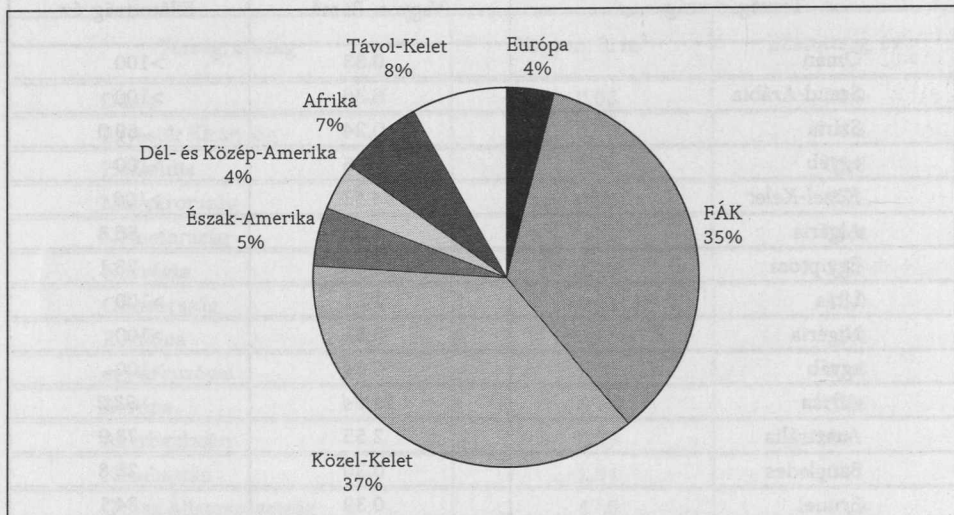
Térség, ország	Vagyon, Bi m ³	Ellátottság, év
Dánia	0,08	10,0
Egyesült Királyság	0,70	6,8
Hollandia	1,76	25,6
Magyarország	0,08	26,1
Németország	0,32	18,4
Norvégia	2,19	33,5
Olaszország	0,23	15,0
Románia	0,10	9,4
egyéb európai	0,33	27,6
<i>Európa</i>	<i>5,79</i>	<i>17,6</i>
Azerbajdzsán	0,85	>100
Kazahsztán	1,84	>100
Orosz Államszövetség	47,6	81,2
Türkmenisztán	2,01	38,2
Ukrajna	1,12	61,7
Üzbegisztán	1,87	33,0
egyéb FÁK	0,02	51,1
<i>FÁK</i>	<i>55,31</i>	<i>81,8</i>
Egyesült Államok	5,19	9,8
Kanada	1,70	9,3
Mexikó	0,25	7,1
<i>Észak-Amerika</i>	<i>7,14</i>	<i>10,0</i>
Argentína	0,76	21,1
Bolívia	0,68	>100
Brazília	0,23	25,2
Kolumbia	0,13	20,7
Trinidad és Tobago	0,66	36,8
Venezuela	4,19	>100
egyéb	0,18	>100
<i>Dél- és Közép-Amerika</i>	<i>6,83</i>	<i>66,2</i>
Bahrein	0,09	10,0
Egyesült Arab Emírátsok	6,01	>100
Irak	3,11	>100
Irán	23,00	>100
Jemen	0,48	>100
Katar	14,40	56,2
Kuvait	1,49	>100

29. táblázat folytatása

Térség, ország	Vagyon, Bi m ³	Ellátottság, év
Omán	0,83	>100
Szaúd-Arábia	6,36	>100
Szíría	0,24	59,0
egyéb	0,5	>100
<i>Közel-Kelet</i>	<i>54,51</i>	<i>>100</i>
Algéria	4,52	56,3
Egyiptom	1,66	73,1
Líbia	1,31	>100
Nigéria	3,51	>100
egyéb	0,84	>100
<i>Afrika</i>	<i>11,84</i>	<i>98,2</i>
Ausztrália	2,55	73,9
Banglades	0,30	26,8
Brunei	0,39	34,1
India	0,76	26,9
Indonézia	2,62	37,1
Kína	1,51	48,3
Malajzia	2,12	42,2
Pakisztán	0,75	35,8
Pápua Új-Guinea	0,35	>100
Thaiföld	0,38	20,0
Vietnam	0,19	80,2
egyéb	0,69	34,1
<i>Távol-Kelet</i>	<i>12,61</i>	<i>40,4</i>
<i>Világ összesen</i>	<i>156,03</i>	<i>61,9</i>

A világ műrevaló földgázvagyona 2002 végén 156 billió m³ volt, a jelentősebb előfordulások a 29. táblázatban láthatók. A világ földgázvagyonának regionális megoszlása (12. ábra) egyenletesebb, mint a kőolajé, de a fejlett országok ellátottsága így is kicsi, a világfelhasználás 54%-át képviselő OECD-tagországokban található a vagyon 9,9%-a, a fogyasztás 15,2%-át kitevő Európai Unió csupán a vagyon 2%-ával rendelkezik. A legjelentősebb a FÁK majdnem 40%-os részesedése a világ vagyonából, valamint a Közel-Kelet 38%-nyi vagyona, és számottevőek az afrikai lehetőségek is. Az utóbbi időben jelentős készleteket találtak a tengerek alatt és a sarkkörön túli területeken. Az IEA a világ végső konvencionális földgázvagyont – az Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának felmérése alapján – 320 billió m³-re becsüli, de az irodalomban ettől lényegesen eltérő, akár 600 billió m³-es adatok is találhatóak.

A világ műrevaló földgázvagyonának regionális megoszlása



A magyar szénhidrogénvagyonnak mintegy 70%-át teszi ki a földgáz, a műrevaló mennyiség kerekén 90 Mrd m^3 , de abból csak ~ 32 Mrd m^3 -t tartanak gazdaságosan kitermelhetőnek. Egyesek nagy mélységben még jelentős előfordulásokat tételeznek fel, de kétséges, hogy gazdaságos-e kitermelése. A magyarországi földgáz-előfordulásokról az első írásos emlék a 18. század elejéről maradt fenn. Kisebb előfordulások hasznosítására már a 19. században sor került, de a nagyobb arányú kiaknázás csak jóval később indult meg. Az első jelentős földgáz-előfordulást 1958-ban tárták fel Hajdúszoboszlónál, Algyőn a termelés 1966-ban indult meg, számottevő még a vagyon Pusztaföldvár és Szank térségében. Fontos lelőhelyek más térségekben (Battonya, Endrőd, Kardoskút, Kiskunhalas, Kisújszállás, Lovászi, Nagykorú, Orosháza, Szeghalom, Üllés,) is vannak. A túlnyomórészt pliocénkori homokkőrétegekben talált szénhidrogének metántartalma 89-96%. A hazai kitermelés eddig összesen 192 Mrd m^3 .

A földgáz hasznosítása

A földgáz ismerete hosszú múltra tekint vissza a felszíni gázkibúvások révén. Kirkuk (Irak) közelében 4000 éve ég a felszínre kitörő gáz, az ókori Közép-Keleten a tűzimádók földgázforrások fölé építették templomaikat. A gyakorlati hasznosításra azonban csak a 20. században került sor, a földgáz karrierje néhány évtizeddel később indult el, mint a kőolajé, mert hiányzott a szállításhoz szükséges infrastruktúra.

Az 1920-as években a csőgyártás és a nyomásnövelésre alkalmas kompresszorállomások fejlődése lehetővé tette nagy mennyiségű földgáz nagy távolságra történő továbbítását. Ez a földgázzal rendelkező régiókban utat nyitott a felhasználás rohamos bővülése előtt, s teljesen kiszorította a szénből fejlesztett városi gázt a vezetékes ellátásból. A szállítási technika fejlődése kiterjesztette az ellátható területek határát, a cseppfolyósított földgáztechnika kifejlesztése óta a tengerek sem jelentenek akadályt. Visszaszorulóban van az a gyakorlat, hogy a fogyasztóktól távoli előfordulásoknál, szállítási infrastruktúra híján a földgázt elfáklázzák. A kitermelt földgáz legnagyobb része ma már kereskedelmi forgalomba kerül. Egyes szénhidrogénmezőkön a kőolaj-kihozatal növelésére a kísérőgázt visszanyomják a rezervoárba (másodlagos termelés).

A kőolajtól független előfordulásokból és a kőolaj feletti gázsapkából a gázt saját nyomása hajtja a felszínre. Ez a tetemes rétegyomás a 100 bart is elérhet. A száraz gáz 60-80%-át lehet ilyen módon kinyerni, vízelárasztással a kitermelés 85-95%-ra növelhető. A kihozatal növelése érdekében az áteresztőképesség fokozására a rezervoár kőzetét néha robbantással vagy más módon repesztik vagy fellazítják. A kőolajban oldott földgáz kitermelését a kőolajtermelés módja és mértéke szabja meg, a szeparálás az előkészítő létesítményekben történik.

A kitermelt földgázt a szállításra elő kell készíteni, ami a mezők közelébe telepített földgázüzemekben történik. A gázban elragadott szilárd szennyező anyagok kiüledve dugulást okozhatnak és a vezetékeket koptatják, s a por néha nehézfémeket is tartalmaz. Eltávolításuk mechanikai úton vagy elektrosztatikus leválasztókkal történik. Többnyire szeparátorokkal választják le a gázhoz keveredett folyadékokat. A nedvességet szárítással, hűtéssel vagy glikolos abszorpcióval lehet eltávolítani, de célszerű eleve megakadályozni a rétegvíz nagyobb mértékű felszínre kerülését – vízben duzzadó polimeroldatot juttatva a kútba –, ami a pórusfalakhoz tapadva akadályozza a víz áramlását. A víz sókkal savakat hoz létre, és a gáz halmazállapotú szénhidrogénekkel szilárd, kristályos hidrátok képzésére hajlamos, amelyek a csővezetékben és a szelepeken válnak ki. A szállításhoz kellemetlen szennyezők a szerves savak, az agresszív rétegvíz vagy a kiváló gázhidrátok. A szállításhoz el kell távolítani a szén-dioxidot is, mert vízzel korrozív szénsavat alkot, s e folyamatot a magas nyomás és hőmérséklet gyorsítja. Erre leginkább ellenáramban abszorbenseket (alkáli sók, vas-oxid, dietil-amin) használnak. Adszorbensekkel távolítják el a kénhidrogént, nehogy vasszulfidot képezve elektrolitikus korróziót, illetve H_2 hatására ridegedésben megnyilvánuló feszültségkorróziót okozzon a vezetékekben és a fogyasztóberendezésekben.

A teljes körű hasznosítás érdekében a nedves gázt gázolintelepeken fizikai eljárásokkal száraz gázra és nyers gázolinra (főleg pentán és hexán) választják szét. Soványabb gázoknál a gázolint aktív szenes vagy szilikagéles adszorpcióval kötik le, kihasználva, hogy a nagyobb molekulású komponenseknek na-

gyobb a hajlama az adszorpcióra. Használatos a nyomás alatti kioldás is egy petróleumfrakcióval, mert a magasabb forráspontú frakciók jobban abszorbeálódnak. Alkalmaznak kompressziót is a hőmérséklet csökkentésével, amikor a C_3 -as és ennél több szénatomot tartalmazó komponensek cseppfolyós halmazállapotba kerülnek. Ugyancsak így távolítható el a nitrogén és az esetleg előforduló hélium is. A szállíthatóság is megkívánja a harmatpont alatt kicsapódó, illetve a nagy nyomáson kifagyó gőzök eltávolítását, mert a nagy szállítási nyomáson akadályozhatják az áramlást, ezzel súlyosan veszélyeztetik a kompresszorok üzemét is. A nyers gazolint nyomás alatt desztillálják, egyrészt cseppfolyósított propán-bután gázt (PB-gáz), másrészt 35-100 °C közötti forráspontú komponensekből álló stabilizált gazolint nyernek. A stabil gazolint többnyire benzinekhez adalekolják, de más célú hasznosítása is előfordul (például oldószerként).

A propán és bután forráspontja légköri nyomáson -40 °C körül van, ami a nyomás növelésével emelkedik, 4-10 bar nyomáson cseppfolyósítva palackokban forgalmazzák. A forgalomba kerülő PB-gáznak mintegy 60%-a származik a földgázfeldolgozásból és 40% a kőolaj-finomítás mellékterméke. A magyar szabvány a C_2 - C_5 frakciók elegyét tekinti PB-gáznak. A PB-gázt egyrészt a gázhálózattól távol fekvő fogyasztók használják a földgáz helyettesítésére, főleg háztartási célokra, másrészt gépkocsik motorhajtóanyagaként is alkalmazzák. Néhány település a földgázhálózathoz történő későbbi csatlakozás reményében helyi PB-gázelosztó rendszert épített ki (falugáz), ezek összesített forgalma ~2 Mt/év. Az áremelkedések következtében az ilyen lokális hálózatok vonzereje elveszett.

A gázfelhasználás népszerűségét műszaki és gazdasági körülmények magyarázzák. A földgáz tüzeléstechnikai tulajdonságai kitűnőek, jól keveredik a levegővel, így kis légfelesleggel nagyon jó hatásfokkal égethető el, az égési hőmérséklete magas, a tüzelés egyszerűen szabályozható, a láng akár oxidáló, akár redukáló jelleggel kialakítható. A fogyasztóberendezések kis beruházási költséggel gyorsan létesíthetők, kevés karbantartást igényelnek, üzemvitelük egyszerű és könnyen automatizálható. A földgázzal valósítható meg a környezetet a legkevesébb szennyező tüzelés, nem képződik sem hamu, sem korom, a kén-dioxid és VOC emisszió jelentéktelen, viszont a nitrogén-oxid-kibocsátás a magas égési hőmérséklet következtében számottevő. A metánveszteség némileg növeli az üvegházhatást, viszont a hidrogén magas részaránya következtében a fosszilis tüzelőanyagok közül a földgáz égése jár a legkevesebb szén-dioxid-kibocsátással. Nagy berendezésekben az energetikai hatásfok a nyomás hasznosításával expanziós nyomásejtő berendezésekben (dugattyús Stirling motorral vagy gázturbinával) javítható.

A világ földgáztermelése 2002-ben 2,5 billió m^3 (olajegyenértéke 2,3 Gt) volt, ezzel fedezték a világ energiaszükségletének negyedét. A földgáztermelés 2002. évi alakulását a 30. táblázat mutatja be. A 13. ábrán a felhasználás és

A világ fontosabb földgáztermelői

Térség, ország	Termelés, Mrd m ³ /év	Részarány, %
Dánia	8,4	0,3
Egyesült Királyság	103,1	4,1
Hollandia	59,9	2,4
Magyarország	2,5	0,1
Németország	17,4	0,7
Norvégia	59,9	2,4
Olaszország	15,1	0,6
Románia	10,8	0,4
egyéb európai	19,1	0,5
<i>Európa</i>	<i>296,2</i>	<i>11,5</i>
Azerbajdzsán	4,8	0,2
Kazahsztán	12,3	0,5
Orosz Föderáció	554,9	22,0
Türkmenisztán	49,9	2,0
Ukrajna	17,2	0,7
Üzbegisztán	53,8	2,1
egyéb FÁK	10,4	0,4
<i>FÁK</i>	<i>703,3</i>	<i>27,3</i>
Egyesült Államok	547,7	23,2
Kanada	183,5	7,0
Mexikó	34,8	1,6
<i>Észak-Amerika</i>	<i>766,0</i>	<i>29,7</i>
Argentína	33,1	1,4
Bolívia	5,4	0,2
Brazília	9,1	0,3
Kolumbia	6,2	0,2
Trinidad és Tobago	18,8	0,5
Venezuela	27,3	1,4
egyéb	2,1	0,1
<i>Dél- és Közép-Amerika</i>	<i>102,0</i>	<i>3,9</i>
Bahrein	9,2	0,4
Egyesült Arab Emírátságok	45,0	1,6
Irán	64,5	2,3
Katar	29,3	1,0
Kuvait	8,7	0,3
Omán	14,8	0,2
Szaúd-Arábia	56,4	2,0

30. táblázat folytatása

Térség, ország	Termelés, Mrd m ³ /év	Részarány, %
egyéb	2,6	0,2
<i>Közel-Kelet</i>	<i>231,5</i>	<i>8,9</i>
Algéria	80,4	3,5
Egyiptom	22,7	0,6
Líbia	5,7	0,3
Nigéria	17,7	0,3
egyéb	6,7	0,2
<i>Afrika</i>	<i>133,2</i>	<i>5,1</i>
Ausztrália	34,5	1,3
Banglades	11,2	0,4
Brunei	11,5	0,5
India	28,4	1,1
Indonézia	70,6	2,9
Kína	32,6	1,0
Malajzia	50,3	1,8
Pakisztán	20,9	0,8
Thaiföld	18,9	0,7
egyéb	16,5	0,5
<i>Távol-Kelet</i>	<i>295,4</i>	<i>11,5</i>
<i>Világ összesen</i>	<i>2510,1</i>	<i>100,0</i>

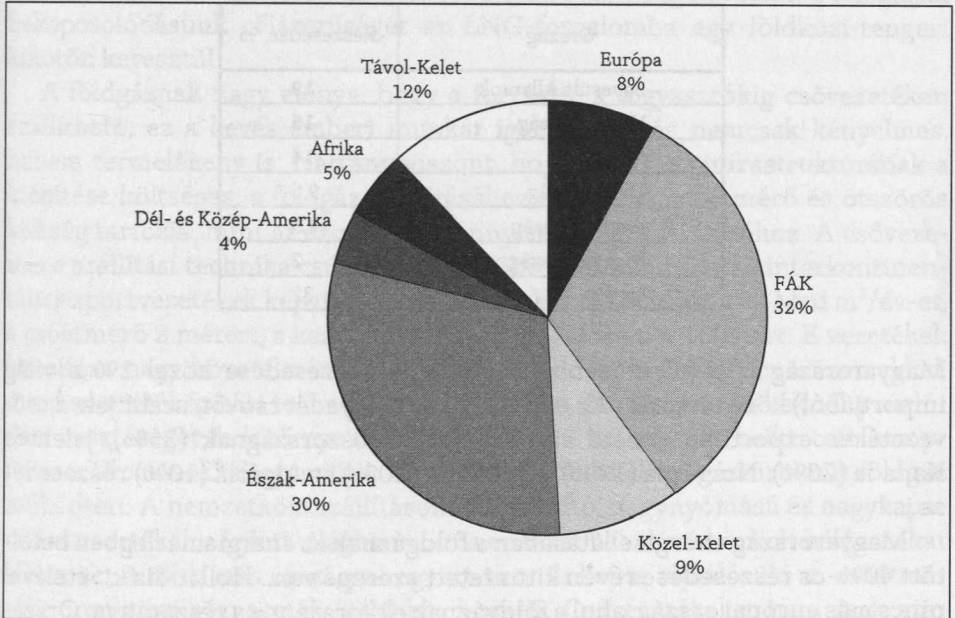
a termelés regionális megoszlása szerepel, a helyzet annak köszönhetően kiegyensúlyozottnak tűnik, hogy a fejlett ipari régiók – közte az EU is – alacsony ellátottságuk ellenére forszirozott ütemben termelik ki készleteiket. Így az OECD szükségletének 92,5% át, az EU pedig 64%-át a régión belülről fedezi. A magyar földgázkihozatal csúcsértékét az 1980-as években érte el 7,5 Mrd m³/év-vel, azóta a rezervoárgazdálkodás érdekében fokozatosan csökken, jelenlegi értéke 3 Mrd m³/év.

Az előrejelzések a szállító csővezetékkel rendelkező térségekben a világ földgázfelhasználásának gyors növekedését várják. Ebben a sokirányú hasznosítás mellett jelentős szerepet játszik a gázturbinás erőművek térhódítása is. A világ földgázszükséglete globálisan valószínűleg kielégíthető, de regionális ellátási feszültségek kialakulhatnak az olcsó források kiapadása, vagy szállítási nehézségek miatt.

Az elmúlt évtizedben az energiahordozók külkereskedelmében leggyorsabban a földgáz forgalma bővül, az import növekvő szerepet játszik a világ földgázellátásában. Jelenleg a világ szükségletének már több mint 21%-át behozatalból fedezi, a legfőbb importőröket a 31. táblázat tünteti fel.

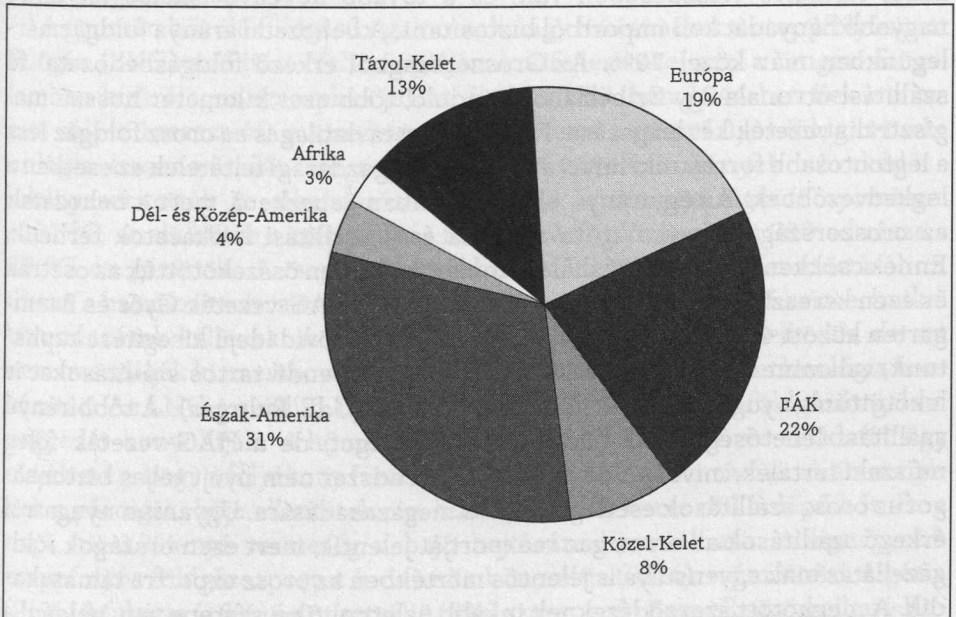
13a. ábra

A földgáztermelés regionális megoszlása



13b. ábra

A földgázfelhasználás regionális megoszlása



A földgázimport megoszlása

Ország	Részesedés, %
Egyesült Államok	19
Németország	15
Japán	14
Olaszország	9,5
Franciaország	8,5
Magyarország	2
egyéb	32

Magyarország is a jelentősebb importőrök (részesedése közel 2% a világ importjából) közé tartozik. Az export háromnegyedét csövön szállítják, a csővezetékes exportban vezető szerepe van Oroszországnak (35%), jelentős Kanada (26%), Norvégia (13%), Hollandia (10%) és Algéria (10%) részesedése is.

Magyarország energiaellátásában a földgáznak az energiamérlegben betöltött 40%-os részesedése révén kitüntetett szerepe van, Hollandia kivételével nincs más európai ország, ahol a földgáznak ekkora lenne a részaránya. Országunk 3125 településéből 2596 (kb. 3 millió háztartás) kapcsolódik a földgázhálózathoz. A földgázellátás energiahelyzetünk legsebezhetőbb pontja, mert a hazai termelés visszaesőben van, és a tovább növekvő szükséglet mind nagyobb hányadát kell importból biztosítani. A behozatal aránya földgázmérlegünkben már közel 70%. Az Oroszországból érkező földgázbehozatal fő szállítási útvonala egy Szibériából kiinduló, több ezer kilométer hosszú magsztrális vezeték két leágazása. Feltehetőleg távlatilag is az orosz földgáz lesz a legfontosabb forrásunk, mivel a szállítási és gazdasági feltételek ez esetben a legkedvezőbbek. Az egyirányú ellátás azonban sebezhető, mert a behozatalt az oroszországi infrastruktúra romlása és a szállítási kockázatok terhelik. Ennek csökkentésére földgázhálózatunkat 1997-ben összekötöttük az osztrákkal és ezen keresztül a nyugat-európai rendszerrel (HAG-vezeték Győr és Baumgarten között 4,5 Mrd m³/év kapacitással), amin rövid idejű kisegítést kaphatunk, valamint néhány éves Mrd m³/év nagyságrendű tartós szállításokat is lekötöttünk nyugat-európai gáztársaságoknál (GdF, Ruhrgas). A többirányú szállítási lehetőség növeli az ellátásbiztonságot, de a HAG-vezeték főleg műszaki tartalék, mivel a nyugat-európai rendszer nem nyújt teljes biztonságot az orosz szállítások esetleges tartós megszakadására. Ugyanis a nyugatról érkező szállítások az orosz gáz reexportját jelentik, mert ezen országok földgázellátásának egyensúlya is jelentős mértékben az orosz exportra támaszkodik. A megkötött szerződéseknek inkább üzletpolitikai szerepe van, például a

tárgyalási pozíciók erősítése az ártárgyalásoknál. Ellátásbiztonságunk jelentős növelését földgázimportunk forrásainak diverzifikálása jelentené (például Észak-Afrikából vagy Norvégiából). Az ellátásbiztonság növelésére vizsgálják bekapcsolódásunk célszerűségét az LNG-forgalomba egy földközi-tengeri kikötőn keresztül.

A földgáznak nagy előnye, hogy a forrástól a fogyasztóig csővezetéken szállítható, ez a kevés emberi munkát igénylő ellátás nemcsak kényelmes, hanem termelékeny is. Hátrány viszont, hogy ennek az infrastruktúrának a kiépítése költséges, a földgáz szállításához kétszeres csőátmérő és ötszörös költség tartozik, mint az azonos hőmennyiségű olaj szállításához. A csővezetékes szállítási technika csúcát a néha több ezer kilométeres interkontinentális exportvezetékek képviselik, kapacitásuk meghaladhat 100 Mrd m³/év-et, a csőátmérő 2 métert, a kezdőnyomás megközelítheti a 100 bart. E vezetékek létesítése nagy követelményeket támaszt mind az acélcsőgyártó üzemekkel, mind a vezetéképítési technológiával szemben. Hosszú vezetékeknél a súrlódási veszteséget fedező nyomásesést 150-200 km-enként beiktatott kompresszorállomásokkal egyenlítik ki, melyek több MW-os gázturbináit földgáz működteti. A nemzetközi szállításokat bonyolító, nagynyomású és nagykapacitású vezetékek a fejlett világban kontinenseket behálózó hurkolt hálózatokat alkotnak. A több más országgal együtt bennünket is tápláló, 1,5 m csőátmérőjű orenburgi gázvezeték 3000 km hosszú. Csővezetékeket nem csak szárazföldön fektettek, rövidebb és sekélyebb tengerszakaszok áthidalására (például Észak-Afrika és Dél-Európa között) tengerfenékre leengedett csővezetékeket is helyeztek el.

A gyorsan bővülő földgázforgalomnak nagy lökést adott a cseppfolyósított földgáz (LNG) szállítási technológiájának kifejlesztése, ami a tengeri forgalomban kizárólagos szerephez jutott. Egy, az USA-ban 1944-ben bekövetkezett súlyos katasztrófa évtizedekre visszavetette a cseppfolyós földgáz-technológia hasznosítását, de a szállítási és tárolási igények növekedése kikényszerítették az alkalmazását. A metán forrpontra légköri nyomáson -161 °C, ez alá hűtve a cseppfolyós földgáz térfogata kereken 800-ad része a 20 °C-os gázénak. A cseppfolyósításhoz, a konzisztencia fenntartásához, illetve a hasznosításhoz szükséges elpárologtatáshoz megfelelő kriotechnikai berendezések kellenek. A nyomás növelésével a forrpontra emelkedik, de ezt nem használják ki, mert tovább növelné a robbanásveszélyes technológia kockázatát. Az LNG-t szállító tankerek ma már a nemzetközi földgázforgalom negyedét bonyolítják. A hőmérséklet stabilizálásának kényes feladatát úgy oldják meg, hogy a folyékony fázis felett annyi metángőzt szívznak el, amennyinek a párolgási hője ellentételezi a hőszigetelésen keresztül belépő hőt. Ez a napi 0,2-0,3%-nyi veszteség a hajó hajtására használható. A legnagyobb cseppfolyós földgázexportot Indonézia bonyolítja (31%), számottevő Algéria (21%), Malajzia (16%) és Ausztrália (8%) szerepe, de nem elhanyagolható Ka-

tar, Brunei és az Egyesült Arab Emírátságok 5-6%-os részesedése sem. Számos további ország a közelmúltban kezdte el az LNG-szállítást, és néhány milliárd $\text{m}^3/\text{év}$ kapacitással többfelé épülnek további terminálok a cseppfolyósítás és elgőzölgeltetés feltételeinek megteremtésére. A tengeri gázzállítás fajlagos költsége kereken hatszorosa az olajszállításénak, a szállítás és a halmazállapot-változtatási folyamatok mintegy 20%-nyi veszteséggel járnak.

Cseppfolyós földgáz szárazföldi szállítására is létesültek már rövid csővezetékek, de nagyobb távolságra a hőszigetelés és hűtés költsége nem teszi gazdaságossá alkalmazásukat. Olyan módszerrel is kísérleteznek, hogy a csővezeték elején betáplált folyékony földgáz fokozatosan elpárolog a vezetékben és gázként érkezik a végponthoz. Komoly jövője van viszont a cseppfolyós földgáz tárolásának, valamint kisebb mennyiségek tartálykocsis szállításának. Kettősköpenyű, hőszigetelt fémtartályokban csak kisebb mennyiségek tárolhatók, fejlesztik a földbe vájt tárolók létesítését talajfagyasztással.

A hazai gázellátási rendszer különböző nyomású vezetékekből áll. A földgázforrásokat, az import fogadó állomásokat és a fogyasztói súlypontokat összekötő gerinchálózatot 300-900 mm átmérőjű nagynyomású (64 bar) vezetékek alkotják. Ebből átadó állomásokon keresztül leágazó elosztóvezetéseken látják el a nagyfogyasztókat és a településeket, Budapestet 40 baros körgyűrű szolgálja ki. Főleg nagyfogyasztók és távoli települések ellátását nagyközépnomású (<25 bar) vezetékek biztosítják, a többségében 6 baron üzemelő középnomású elosztórendszer táplálja a fogadóállomásokat, melyekből a fogyasztókat ellátó 20-33 mbar kisnyomású, vagy 75-100 mbar növelt kisnyomású vezetékek kiindulnak. Az olcsó földgáz korában a települések mindent elkövettek bekapcsolódásuk érdekében a vezetékes gázellátásba, a jelenlegi és a várható piaci viszonyok kérdésessé tették számos leágazás működtetésének gazdaságosságát.

A földgázfogyasztók nagy részénél a terhelés időben egyenetlen. Egyrészt napszaki ingadozás érvényesül, a háztartások életritmusának vagy az üzemek műszakbeosztásának megfelelően, másrészt szezonális különbségek, főleg a fűtési igény következtében. A fogyasztás sztochasztikus ingadozásának ellensúlyozására üzemviteli tartalékok szolgálnak. Gömb alakú fémtartályokban 30-50 m^3 , sorba kapcsolt hengeres tartályokban akár 100 000 m^3 -ek tárolására is van mód. Néhány órás tartalékot maga a kiterjedt csőhálózat is biztosít, részben az abban levő gázmenyiség, részben a nyomás csökkenthetősége révén. Gyakorlat a reggeli nyomás megemelése a csőhálózatban a tárolható mennyiség növelésére.

A szezonális különbségek áthidalása már nehezebb feladat. A magyarországi települések több mint 70%-a, és a háztartásoknak kereken háromnegyede van bekapcsolva a földgázhálózatba. Az ország gázfelhasználásának csaknem felét a háztartások és a kommunális szektor veszi igénybe, aminek legnagyobb részét fűtésre fordítják. A téli csúcsterhelés maximuma 82 $\text{M m}^3/\text{nap}$ (3,6

M $\text{m}^3/\text{óra}$), a nyári és téli csúcsterhelések aránya 6-7 M m^3/nap , ekkora változásokat a termeléssel nem lehet gazdaságosan követni, ezért nagy mennyiségű tárolására van szükség. Erre leginkább nagy gázátnemeresztő felületekkel határolt föld alatti térségek jöhetnek szóba, a leggyakrabban leművelt olaj vagy gázmezőkbe nyomják be nyáron a földgázt, ahonnan azt télen lehet visszanyerni. Akviferekben is tárolnak gázt, ezek víztartalmú 3-120 m vastag porózus homokrétegek, amelyekből a 30-90 bar nyomással besajtolt gáz kiszorítja a vizet, majd az az ürítés során visszaáramlik. Felhagyott mélybányák, robbantással kialakított föld alatti térségek, sörétegből vízzel kioldott üregek is hasznosíthatók gáztárolásra. Magyarországon a leművelt szénhidrogén-tároló kőzeteket (Hajdúszoboszló, Zsana, Pusztaderics, Kardoskút, Algyő) használják tárolásra, azok összesített kapacitása az éves felhasználásnak kerekén harmada (~4 Mrd m^3). A tárolási kapacitás gázellátásunk szűk keresztmetszete, az ellátás biztonsága további tárolók létesítését kívánja meg. A tárolók feltöltéséhez 90-160 bar nyomással mintegy 190 napra van szükség, a kivehető teljesítmény néhányszor 10 M m^3/nap . A tárolt gáz teljes mennyiségét nem lehet visszanyerni, a tárolóteret légköri nyomáson kitöltő „párnagáz” visszamarad. A csúcsterhelés csökkentéséhez hasznosan járulnak hozzá az olyan ipari pufferfogyasztók, amelyek ellátása – megfelelő tarifális ösztönzés hatására – csúcsidőszakban megszakítható, illetve télen alternatív tüzelőberendezéseikben földgárról tüzelőolaj vagy fűtőolaj használatára térnek át. A folyékony tüzelőanyagok drágulása azonban erősen visszavetette e megoldás gazdasági vonzerejét. Az üzemviteli és szezonális tartalékokon felül a szállítások zavarán átsegítő stratégiai tartalékokra is szükség van, aminek mértékére az Európai Unió irányelve a fogyasztás 25%-át ajánlja. Ennek megvalósítása nálunk még várat magára. Növelné a magyar téli csúcsterhelés elláthatóságának biztonságát a magisztrális gázvezetésekről egy harmadik leágazás kiépítése.

A földgáz használata óvatosságot igényel, mert 1-14% földgáz-levegő arány között robbanásveszélyes. Színtelen, szagtalan jellege miatt szivárgása nehezen érzékelhető, ezért a felismerhetőség érdekében etil- vagy metilmerkaptán hozzáadásával szagosítják. A balesetek elkerülésére a láng esetleges kimaradása után reteszelni kell az újragyulladás lehetőségét, amire az ibolyántúli sugárzást érzékelő lángőröket vagy elektronikus szenzorokat használnak, és a tüzelőberendezéseket csak előzetes átszellőzés után szabad újból üzembe helyezni. Az energiaellátás területén a legtöbb balesetet a földgáz szakszerűtlen használata okozza, amit többnyire a karbantartás hibájára, vagy a berendezések használatára vonatkozó előírások megszegésére lehet visszavezetni. A robbanások többsége lakóépületekben következik be, de néha nagyobb térséget érintő súlyos katasztrófák is előfordulnak a magisztrális vezetékek sérülése következtében. Fokozottan tűz- és robbanásveszélyes a cseppfolyósított földgáz, egy-két súlyos tűzvész kiindulópontja volt az elpáro-

logtatókban bekövetkezett robbanás. A cseppfolyós földgáz felszínére került víz hirtelen párolgása gőzrobbanást is kiválthat.

A világ műveival földgázvagyonra ugyan sok évtizedre elegendő, de nagyobb távlatban számolni kell a források szűkülésére. A földgáz helyettesítésére első helyen a nem konvencionális földgázforrások jöhetnek számításba, a becslések szerint ezekben a vagyon többszöröse a konvencionálisnak. A nem konvencionális földgáz-előfordulások közül a legtöbb reményt a feketeszénlencsékben található tetemes metán kiaknázásához fűzik, aminek a kinyerése néhány helyen már folyik. A metán kitermelésére többféle lehetőség van, például kioldható a fúrólukakba juttatott metanollal vagy dimetiléterrel, s szabadabbá tehető a metán mozgásához az út a nyomás csökkentésével visszivattyúzás révén. A CO_2 benyomás is számításba jöhet, aminek nagyobb affinitása van a szénhez, és lehetővé teszi a metán deszorpcióját, N_2 benyomásával is lazítani lehet a metán kötődését a szénhez. Vannak kőzetekhez (homokkő, Devon-kori palák) kötődő metán-előfordulások is, de ezek bányászatanak lehetősége tisztázatlan. Hasonló a helyzet a geonyomásos földtani zónákban rendkívül nagy nyomású vízben oldott földgáz hasznosításával is. Újabban a figyelem a hideg tengerekben sokfelé található metángázhidrátok felé fordult, ezeket a jégkristályszerkezetbe ágyazott metán klatrátokat alacsony hőmérséklet és főleg a nagy nyomás tartja össze. Egy m^3 metánhidrát mintegy 5000 m^3 földgázt tartalmaz, összesített metántartalmukat mintegy 21 Pm^3 -re becsülik. A földgáz-helyettesítés legfontosabb lehetőségét azonban a szénből előállított gázok jelentik.

Az ellátásnak nemcsak a rendelkezésre állás a kritikus kérdése, hanem az ár is. Ugyan a földgáztermelés önköltsége viszonylag alacsony a többi tüzelőanyaghoz viszonyítva, de a piaci ár igazodik a kőolajéhoz, és annak tartósan magas ára a földgáz drágulását vonja maga után. Észak-Amerikában hosszú ideig a földgáz árának stabilitásában bíztak, bár egyes előrejelzések ellátási zavarokat jósoltak. Ezt igazolta a 2000–2001-ben kialakult kaliforniai villamosenergia-ellátási krízis, amiben az erőműépítés elmaradása mellett a földgázellátási nehézségek is közrejátszottak. Nemcsak a villamosenergia-árak, hanem a földgázárak is megugrottak, súlyos gazdasági zavarokat okoztak, és drasztikus állami beavatkozásokat kényszerítettek ki.

Európában a földgázforgalom a szállítási lehetőségekhez kapcsolódó, hosszabb időre kötött szerződésekre alapul, melyekben igyekeznek tompítani a piaci áringadozások hatását is. A termelők biztonságát védik a gyakran alkalmazott TOP (take or pay) szerződések, amelyek szerint a vásárlónak akkor is ki kell fizetnie a meghatározott időszakra lekötött földgáz árát, ha nem veszi át, az EU az ilyen szerződések gyakorlatát leépítendőnek tartja. Az Európai Unió elindította a földgázpiac liberalizálását, 2004-től a nem háztartási fogyasztók, 2007-től az összes fogyasztó szabadon választhatja meg a beszerzés forrását. Csatlakozásunkat követően ezek a határidők ránk is érvényesek.

A jó minőségű földgázok termelői ára a kutaknál erősen függ a lelőhelytől, az önköltség 1-3 USc/m³, az exportár Európában 3-4 USD/GJ (~12-16 USc/m³) körül mozog. Az LNG cif ára 1-2 USD/GJ-al magasabb, főleg a tengerentúl nagy a szórása. Azonos hőtartalom figyelembevételével a földgáz átlagos termelői ára az alacsony kéntartalmú tüzelőolaj árát követi jelentős fáziseltolással, mert a kereskedelmi megállapodások többnyire a 9 havi átlag-árat tekintik mértékadónak. Ha a kőolajnak a századfordulón érvényesülő magas árszintje tartós marad, óhatatlan a földgáz drágulása is. Ennek mértéke egyelőre bizonytalan, de jelentős áremelkedés lényeges változásokat idézhet elő energiapolitikánkban, akár még a gázturbinás erőművekkel kapcsolatos eufória is megtörhet. Az ellátás egyoldalúsága és az árat terhelő kockázat óvatosságra int a földgázigények túlzott növelésében. A behozatal nagy aránya miatt a hazai árképzésnél logikus az importárhoz igazodni, ami körül ütközik a lakossági terhek mérséklésére törekvő kormány és a költségek megtérülését igénylő szénhidrogénipar érdeke. A fogyasztói gázárak eltérítése a piaci áraktól gazdasági anomáliák forrása, egyrészt helytelen energetikai döntésekre orientál, másrészt megingatja a befektetők bizalmát. Helyesebb a társadalmi problémákat adminisztratív árleszorítás helyett kompenzációval ellensúlyozni, a rászorulókat szociálpolitikai támogatásban részesíteni. A hazai földgázellátás liberalizációja elkerülhetetlenné teszi az árak fokozatos kiigazítását. Jelenleg a lakossági fogyasztók ~60%-kal fizetnek kevesebbet, mint az európai országok lakosai, az ipari fogyasztóknál a különbség csupán 10-15%.

Gyártott gázok

Az energetikai célra előállított gázok többsége néhány éghető gázkomponens (32. táblázat) keveréke, a legnagyobb szerepet a szén-monoxid, a hidrogén és a metán játssza. A komponensek aránya és az előállítás módja nagyon változatos, így a gyártott gázoknak széles a választéka.

Éghető gázok előállítása szénből már több mint két évszázados múltra tekint vissza, módszereként két fő iránya a kigázosítás és az elgázosítás. A kigázosítás során a szenet levegő kizárásával lepárolják, a szén termikus lebontása közben egyéb termékek mellett gáz is fejlődik, ami a feldolgozott szén hőértékének 20-40%-át képviseli. A szénből nyert gázok sorát a kokszgyártáshoz kapcsolódó világítógáz gyártása nyitotta meg, ami a széleskörűen hasznított városi gáz elődje volt. Az első regionális energiaellátó művek a városok gázvilágítására létesültek. Az első gázgyárat Londonban létesítették 1814-ben, amit számos követett, a közcélú gázművek száma a 19. század utolsó évtizedeire már sok ezerre rúgott. Magyarországon már 1816-ban történt kísérlet a „légszesz” alkalmazására, de az első városi gázgyárat csak 1856-ban

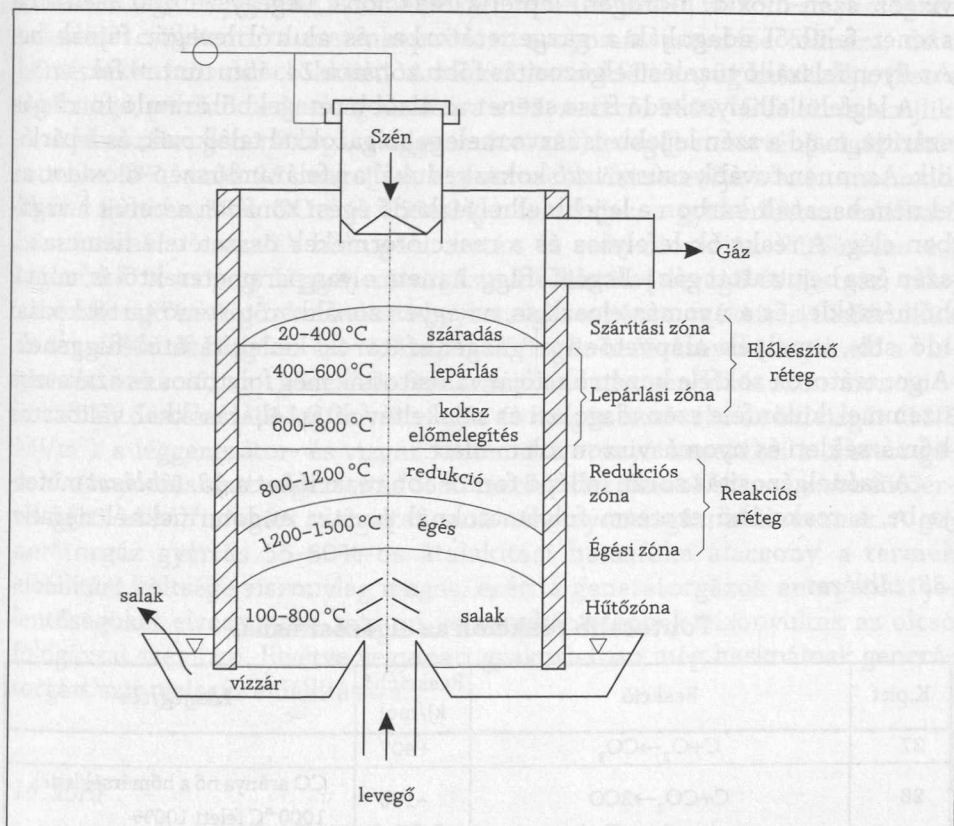
A fontosabb elemi gázok jellemzői

Gáz	Összetétel	Fűtőérték	
		MJ/kg	MJ/m ³
hidrogén	H ₂	120,5	10,8
szén-monoxid	CO	10,1	12,7
metán	CH ₄	50,2	35,9
etán	C ₂ H ₆	47,7	64,6
propán	C ₃ H ₈	46,5	93,9
bután	C ₄ H ₁₀	45,3	122,6
pentán	C ₅ H ₁₂	42,2	146,0
hexán	C ₆ H ₁₄	45,2	173,7
heptán	C ₇ H ₁₆	45,2	198,6
etilén	C ₂ H ₄	47,2	59,6
benzol	C ₆ H ₆	40,8	141,8

alapították Pesten. A városi gázt elsősorban lángkőszemek és zsírkőszemek magas hőmérsékletű leparlásával állították elő, majd a szén minőségétől és a leparlás módjától függően sokféle technológia honosodott meg, később szokássá vált más éghető gázok (kamragáz, generátorgáz, svélgáz, vízgáz, nyomásgáz, földgáz, bontott gáz) bekeverése is. A szénbázisú városi gázgyártás energetikai hatásfoka 60-70%, 1 tonna szénből a kihozatal 250-400 m³ között mozog. A városi gáz megkívánt fűtőértéke⁸ 17-21 MJ/m³, a szabványok nem szabályozzák a gáz összetételét, de előírják a megkövetelt tulajdonságokat (nyomás, gyulladási hőmérséklet, gyulladási sebesség, robbanási határok stb.). Különösen fontosak a biztonsági követelmények, mivel a jelentős szén-monoxid-tartalom miatt a városi gáz mérgező.

A földgázzal ellátott térségekben a szénbázisú városi gázgyártás versenyképtelenné vált, és azt fokozatosan felszámolták. A városi gázra kiépített elosztó csőhálózatot és fogyasztó berendezéseket bizonyos átalakításokkal a nagyobb fűtőértékű és magasabb nyomású földgáz fogadására is fel lehet használni. A fogyasztó berendezéseknél figyelembe veendő, hogy a földgáz lassabban ég, 25-30 cm/mp-es égési sebessége a városi gázra jellemző 70-85 cm/mp-es sebesség felét sem éri el, ezért a földgáztüzelésnek nagyobb a levegőigénye, és azonos időtartam alatt több füstgáz képződik. Eltérőek a gyulladási körülmények is, míg levegővel a városi gáz 6-35% térfogataránynál gyullad, földgáznál ez 4-17%-os aránynál következik be. A csőhálózatoknál a földgáz szárító hatása miatt a tömítéseket kell másképp kialakítani, esetleg műanyag béléscső behúzásával szüntethető meg a szivárgás.

Elgázosítás zónái



A koksizálás mindig együtt jár gázfejlődéssel. A vaskohászatban használt kokszt gyártásának mellékterméke a kamragáz (koksztgáz), ami sokféle komponensből áll (metán, szén-monoxid, szén-dioxid, hidrogén, vízgőz, kén-hidrogén, szén-diszulfid, szerves kénvegyületek, nitrogén, ammónia, benzol, fenol, kátránygőzök, hidrogén-cianid, naftalin stb.), fűtőértéke $14\text{--}21 \text{ MJ/m}^3$. A meleg gázt lehűtés után tisztítják, egyrészt az értékes vegyipari anyagok kinyerésére, másrészt a csővezetéki szállítást és a tüzelést kedvezőtlenül befolyásoló komponensek kivonására. A kamragázt fűtésre használják, elsősorban magának a koksztolókamrának a hevítésére, egy időben a városi gázhoz is hozzákeverték. A svélezés során nyert svélgáz fűtőértéke $8\text{--}12 \text{ MJ/m}^3$, többnyire hőfejlesztésre szolgál, de az eljárás használata erősen visszaszorult.

Nagyszámú eljárást fejlesztettek ki a szén elgázosítására, aminek célja éghető gáz előállítása a szénmennyiség minél nagyobb hányadából. Az elgázosítás fontos szerepet játszott a fűtőgázok és a vegyipari folyamatok kiinduló

anyagát képező szintézisgázok előállításában. A generátorgázok különféle típusainak fejlesztéséhez az izzó szenet különféle gázokkal (levegő, oxigén, vízgőz, szén-dioxid, hidrogén) léptetik reakcióba. Legegyszerűbb esetben a szenet felülről adagolják a gázgenerátorba, és alulról levegőt fújnak be. Az ilyen felszálló tüzelésű elgázosítás főbb zónáit a 14. ábra tünteti fel.

A legfelül elhelyezkedő friss szenet az alsóbb rétegekből áramló forró gáz szárítja, majd a szén lejjebb csúszva melegebb gázokkal találkozik, és lepárlódik. Az innen tovább csúszó izzó koks redukálja a feláramló szén-dioxidot, az el nem használt karbon a lejjebb elhelyezkedő égési zónában a befűt levegőben elég. A reakciók lefolyása és a reakciótermékek összetétele nemcsak a szén és a bejuttatott gáz jellegétől függ, hanem olyan paraméterektől is, mint a hőmérséklet és a nyomás eloszlása, az egyes zónákban történő tartózkodási idő stb., amelyek alapvetően a gázgenerátorok kialakításától függenek. A generátorok sokféle konstrukcióját valósították meg folytonos és szakaszos üzemmel, különféle szénadagolási és salakeltávolítási eljárásokkal, változatos hőmérsékleti és nyomásviszonyok mellett.

A szénelgázosítás során fellépő fontosabb reakciókat a 33. táblázat mutatja be, a reakcióhő exoterm folyamatoknál pozitív, endotermeknél negatív.

33. táblázat

Fontosabb reakciók az elgázosításnál

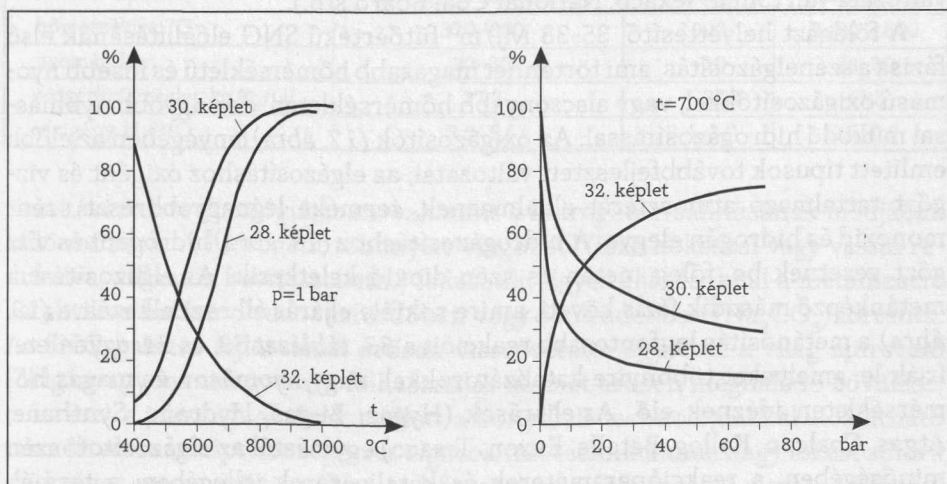
K:plet	Reakció	Reakcióhő kJ/mól	Megjegyzés
27	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	+407	
28	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	-160	CO aránya nő a hőmérséklettel, 1000 °C felett 100%
29	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	+246	
30	$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	-108	1000 °C felett
31	$C + 2H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2$	-89	1000 °C alatt
32	$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$	+88,5	a metán aránya csökken a hőmérséklet növekedésével
33	$CO + 3H_2 \rightleftharpoons CH_4 + H_2O$	+217	metánosítás
34	$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O$	+164	metánosítás
35	$2CO + O_2 \rightleftharpoons 2CO_2$	+567	1000 °C alatt
36	$2CO \rightleftharpoons CO_2 + C$	+160	
37	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	+42	hidrogénkonverzió
38	$n(CO + 2H_2) \rightarrow (CH_2)_n + nH_2O$		
39	$nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$		szintézisegyenlet
40	$nCO + (n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nCO_2$		szintézisegyenlet
41	$(3n+1)CO + (n+1)H_2O \rightarrow C_nH_{2n+2} + (2n+1)CO_2$		szintézisegyenlet

Az endoterm reakcióknál gondoskodni kell a hő beviteléről is. A három legfontosabb reakció hőfok- és nyomásfüggése a 15. ábrán látható, a szén-monoxid és hidrogén fejlődését a hőmérséklet-növelés növeli, viszont a nyomás növekedése csökkenti; a metánképződést a nyomás növelése fokozza, de a hőmérséklet-növelés csökkenti. A reakciókat sokféle anyag katalizálja, illetve inhibitalja, például nedvesség hatására a 35. reakció 1000 °C felett is lezajlik.

A klasszikus generátorgáz (léggenerátorgáz) levegőben történő elgázosítás terméke (27., majd 28. reakciók), legfontosabb összetevője a szén-monoxid, ideális esetben 35% CO-t és 65% N_2 -t tartalmaz, a gyakorlatban található benne néhány százalék hidrogén, metán és szén-dioxid is. Fűtőértéke 4,4 MJ/m³ körül mozog. Léggenerátorgáznak tekintik a levegő és füstgáz, valamint a levegő és vízgőz befűtésével nyert elgázosítás termékeit is, fűtőértékük az összetételtől függően 4,2–7,5 MJ/m³. Vízgőz befűtésével állítják elő a vízgázt (30. reakció), ami közel fele-fele arányban hidrogénből és szén-monoxidból áll, fűtőértéke 11,6 MJ/m³. A vízgáz és oxigén keveréke az oxivízgáz (11,5 MJ/m³), a léggenerátor- és vízgáz különböző arányú keverékei a „kevert gázok”. A nyomás alatti elgázosítás több metánt tartalmazó és magasabb fűtőértékű (16–18 MJ/m³) gázt szolgáltat, amit néha nyomásgáznak neveznek. A generátorgáz gyártás 55–60%-os átalakítási hatásfoka alacsony, a termék előállításának költsége viszonylag magas, ezért a generátorgázok energetikai jelentőségüket elvesztették, miután versenyképtelennek bizonyultak az olcsó földgázzal szemben. Elvértve vegyipari gyakorlatban még használnak generátorgázt szintézisgáz előállítására.

15. ábra

Reakciók hőfok- és nyomásfüggése

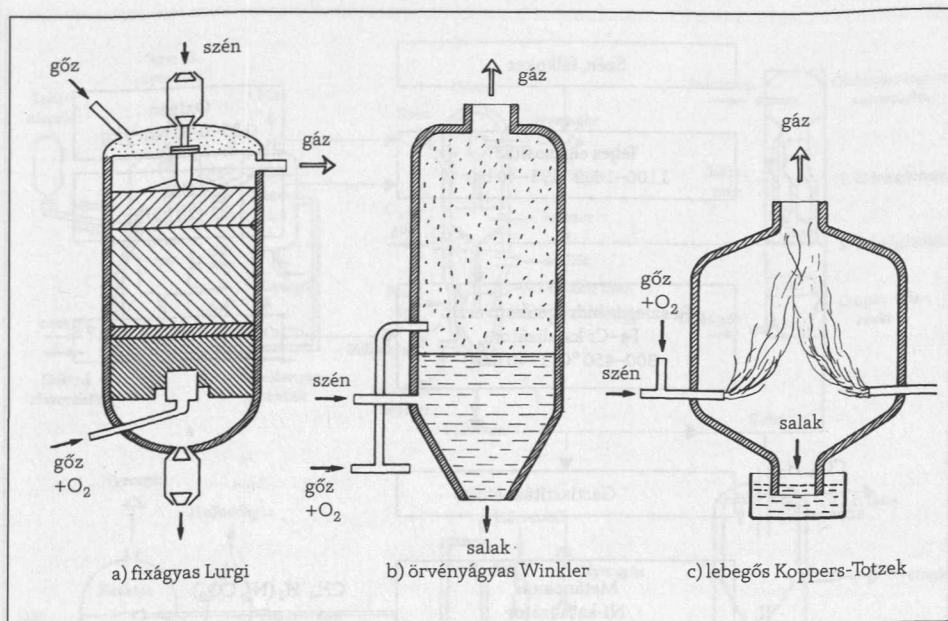


Az 1970-es évek olajkrízise a gáznemű tüzelőanyagok szénbázisú helyettesítése érdekében az elgázosításnak új lendületet adott. A technika fejlesztésére két irányzat bontakozott ki, a könnyebben megvalósítható út az alacsony fűtőértékű gáz előállítása, a nehezebb a földgáz helyettesítése. Az alacsony fűtőértékű gáz (fűtő-, gyenge gáz) előállítására számos nagyüzemi eljárást fejlesztettek ki, és erőművi hasznosítása – főleg gáz-gőz kombinált ciklussal összeépítve – átlépett a versenyképesség küszöbén (IGCC). Összetételében hasonlít a tisztított generátorgázhoz, fűtőértéke $10\text{--}12\text{ MJ/m}^3$, s miután a legtöbb környezetszennyezőt a gyártás során kivonják, használatos a „clean gas” (tisztá gáz) megnevezés is.

A leggyakrabban a tüzelőanyagra meglehetősen érzéketlen Lurgi-eljárás valamelyik válfaját alkalmazzák fix vagy cirkulációs fluidágyas kivitelben. A reaktorban a megfelelően előkészített $3\text{--}30\text{ mm}$ szemcseméretű szenet ellenáramban nagy nyomáson ($\sim 20\text{ bar}$) oxigénnel és vízgőzzel léptetik reakcióba. A fejlesztett $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ -os gázban éghető komponensek: CO , CH_4 és H_2 , amelyek égéshője a szén fűtőértékének mintegy 85% -a. Ezenkívül található a termékben CO_2 , H_2O és a pirolízis különféle szilárd és gáznemű termékei, melyeket megfelelő eljárásokkal ki lehet szűrni. Az $1000\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten és 10 baron zajló magas hőmérsékletű fluidágyas Winkler-eljárás költségesebb, de tisztább terméket szolgáltat. A Koppers-Totzek eljárás még magasabb hőmérsékletet igényel $24\text{--}30\text{ bar}$ nyomással, főleg porszenek elgázosítására alkalmas, a nedvességtartalomra kényes, ezért a szén előzetes szárítására is szükség lehet. A három eljárás elve a 16. ábrán, főbb jellemzői a 34. táblázatban láthatók. A Lurgi-generátornak a legkisebb az oxigénszükséglete, viszont nagy a vízigénye. A Lurgi- és Winkler-generátorok levegővel is üzemeltethetők, ami ugyan lényegesen csökkenti a költséget, de természetesen a termelt gáz fűtőértékének rovására. Mindhárom eljárásnak számos továbbfejlesztett változata van (Shell, Texaco, National Coal Board stb.).

A földgázt helyettesítő, $35\text{--}38\text{ MJ/m}^3$ fűtőértékű SNG előállításának első fázisa a szénelgázosítás, ami történhet magasabb hőmérsékletű és kisebb nyomású oxigázosítókkal, vagy alacsonyabb hőmérsékleten, de nagyobb nyomással működő hidrogázosítással. Az oxigázosítók (17. ábra) lényegében az előbb említett típusok továbbfejlesztett változatai, az elgázosításhoz oxigént és vízgőzt tartalmazó atmoszférát alkalmaznak, terméke legnagyobbreszt szén-monoxid és hidrogén elegye. A hidrogázosításhoz (18. ábra) hidrogént és vízgőzt vezetnek be, főleg metán és szén-dioxid keletkezik. Az elgázosítást a metánképző második fázis követi, amire sokféle eljárás áll rendelkezésre (19. ábra), a metánosítás legfontosabb reakcióit a 33. táblázat 33. és 34. egyenletei írják le, amelyeket többnyire katalizátorokkal, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten idéznek elő. Az eljárások (Hygas, Bi-gas, Hydrane, Synthane, Atgas, Coalcon, Kellog, Batelle, Exxon, Texaco) egymástól az elgázosított szén minőségében, a reakcióparaméterek és katalizátorok jellegében, a termék

Elgázosítási eljárások



34. táblázat

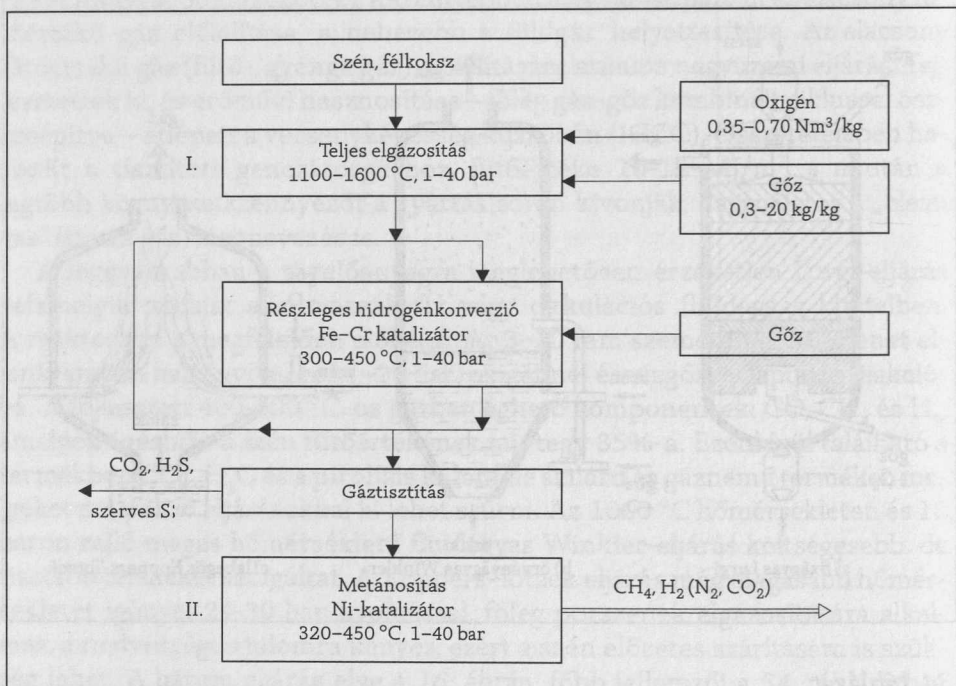
Elgázosító eljárások

	Lurgi	Winkler	Koppers-Totzek
reaktor típusa	fix vagy cirkulációs ágy	fluidágy	szállóporos
hőmérséklet, °C	370–600	1000	1400–1600
nyomás, bar	20–30	10	24–30
oxigénszükséglet, kg O_2 /GJ	17,2	34,4	47,3
vízigény, H_2O/O_2	3,5–5,5	3,4–3,7	0,5–0,7

tisztításának technológiájában, valamint a hidrogén előállításának módjában különböznek. A hidrogént többnyire vízgőzből (izzó koksszal vagy vassal redukálva, villamos hevítéssel stb.) fejlesztik. Egyes eljárásoknál a metanizáció katalitikus hatású olvadt vasfürdőben vagy sóolvadékokban (Na_2CO_3) történik. Az SNG-gyártás fejlesztését erősen visszavetette egyrészt a világ műrevaló földgázvagyonának gyors, a felhasználás ütemét erősen meghaladó bővülése, másrészt a jelenlegi gázárak mellett a bonyolult technológiákkal előállítható termék versenyképtelensége. Az elgázosítási technikáknak nagy lökést adna a szükséges magas hőmérséklet és hőmennyiség fedezésével a magas hőmér-

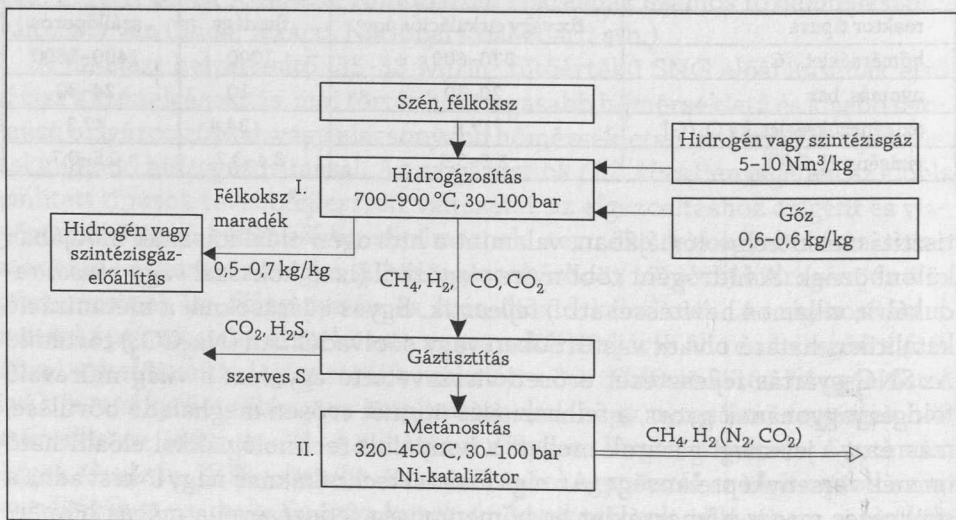
17. ábra

Oxigénérátoros elgázosítás

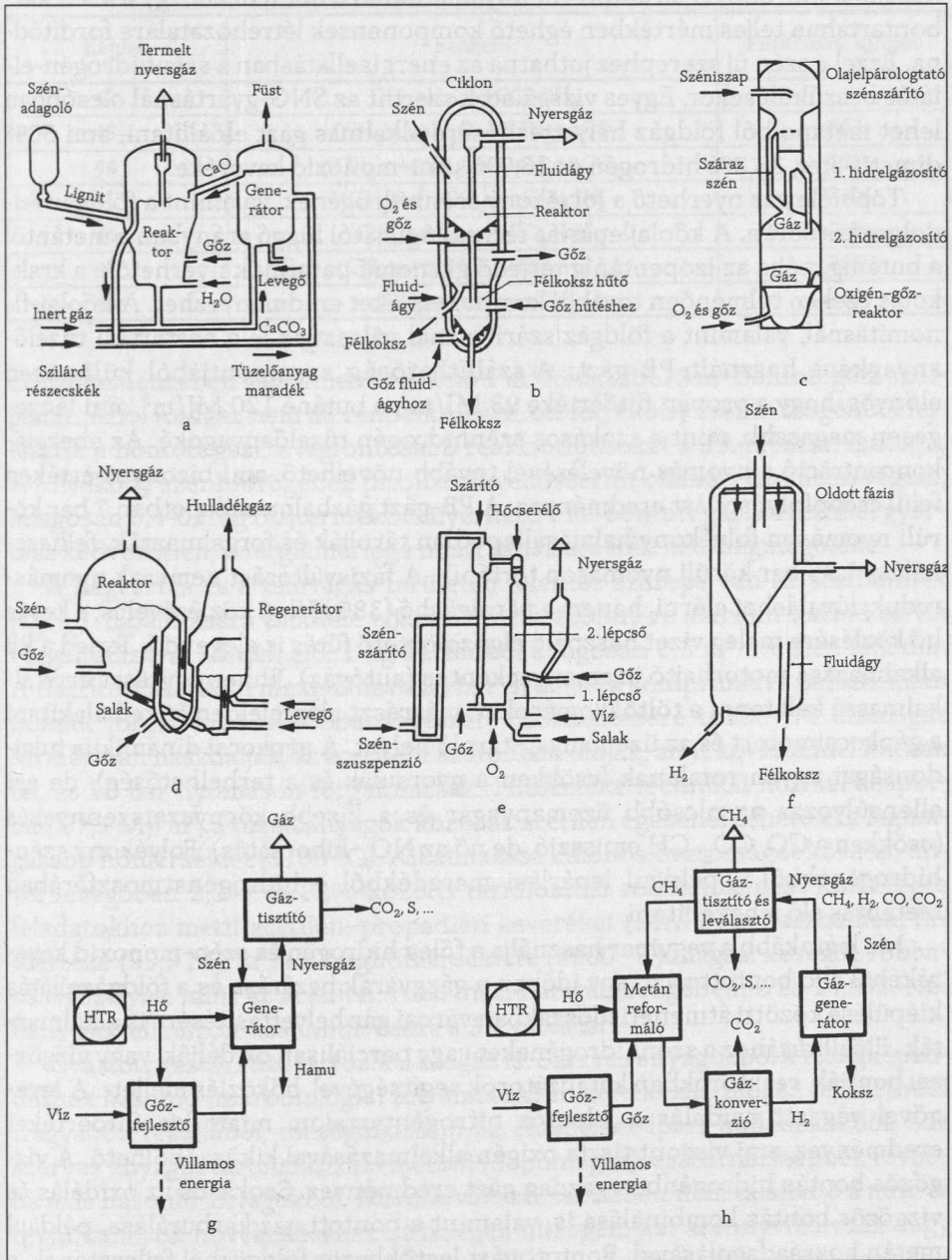


18. ábra

Hidrogénérátoros elgázosítás



Szintetikus földgázgyártási eljárások



a) szén-dioxid akceptoros, b) Synthane eljárás, c) Hy-gas eljárás, d) Coalcon eljárás, e) Bi-gas eljárás, f) Hydrane eljárás, g) gőzös nukleáris, h) hidrogén nukleáris

sékletű atomreaktorok megjelenése. Az ilyen alloterm elgázosításhoz nincs szükség oxigénre, és a karbonnak azt a 30-40%-át is gáz előállítására lehet hasznosítani, amivel az autoterm folyamatoknál a hőt fedezik, így a szén karbontartalma teljes mértékben éghető komponensek létrehozatalára fordítódna. Ezzel a szén új szerephez juthatna az energiaellátásban a szénhidrogén-el-látás beszűkülésekor. Egyes vizsgálatok szerint az SNG-gyártásnál olcsóbban lehet metanolból földgáz helyettesítésére alkalmas gázt előállítani, ami 50% dimetil-éter, 33,3% hidrogén és 16,7% szén-monoxid keveréke.

Többféle gáz nyerhető a folyékony szénhidrogének, valamint a földgáz fel-dolgozása során. A kőolajleparlás technológiájától függő arányban a metántól a butánig, néha az izopentánig terjedő gáznemű parafinok nyerhetők, a krak-kolás ezeken túlmenően további komponenseket eredményezhet. A kőolaj-fi-nomításnál, valamint a földgáz szárításánál választják le a háztartási tüzelő-anyagként használt PB-gázt. A szállíthatóság szempontjából különösen előnyös, hogy a propán fűtőértéke 93 MJ/m^3 , a butáné 120 MJ/m^3 , ami lénye-gesen magasabb, mint a szokásos szénhidrogén tüzelőanyagoké. Az energia-koncentráció a nyomás növelésével tovább növelhető, ami bizonyos értéken felül cseppfolyósodást eredményez. A PB-gázt gázhalmazállapotban 7 bar körüli nyomáson folyékony halmazállapotban tárolják és forgalmazzák, felhasználása 1,35 bar körüli nyomáson történik. A fázisváltozást nemcsak nyomás-redukcióval lehet elérni, hanem a párolgáshő (380 kJ/kg) közlésével is, e kevés hő közlésére meleg vizet használó elgőzöltető fűtés is elegendő. Terjed a PB alkalmazása motorhajtó üzemanyagként is (autógáz). Ehhez egyrészt erre al-kalmassá kell tenni a töltőállomásokat, másrészt megfelelően át kell alakítani a gépkocsimotort és az üzemanyag-tároló helyet. A gépkocsi dinamikus tulaj-donságai ugyan romlanak (csökken a gyorsulás és a terhelhetőség), de ezt ellensúlyozza az olcsóbb üzemanyagár és a kisebb környezetszennyezés (csökken a CO , CO_2 , CH emisszió, de nő az NO_x -kibocsátás). Folyékony szén-hidrogénekből – például leparlási maradékból – hidrogénatmoszférában metánt is elő lehet állítani.

Ma leginkább a vegyipar használja a főleg hidrogén és szén-monoxid keve-rékéből álló bontott gázt, egy időben a gázgyárak bezárása és a földgázellátás kiépülése közötti átmeneti időszakban városi gáz helyettesítésére is alkalmaz-ták. Előállításához a szénhidrogéneket vagy parciálisan oxidálják, vagy vízgőz-zel bontják, reaktorokban katalizátorok segítségével, hőközlés mellett. A leve-gővel végzett oxidálás a jelentős nitrogéntartalom miatt kis fűtőértéket eredményez, ami viszont tiszta oxigén alkalmazásával kiküszöbölhető. A víz-gőzös bontás hidrogénben gazdag gázt eredményez. Szokásos az oxidálás és vízgőzös bontás kombinálása is, valamint a bontott gáz karburálása, például metán hozzáadagolásával. Bontott gázt legtöbbször földgázból fejlesztenek, a metán vízgőzös bontása például 750°C -on Ni katalizátor jelenlétében a 43. reakció (35. táblázat) szerint játszódik le. Ez a többnyire folyamatosan műkö-

Bontási reakciók

Képlet	Reakció	Reakcióhő, kJ/mól
42	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	
43	$(\text{CH}_2)_n + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2n\text{H}_2 + n\text{CO}$	-207
44	$(\text{CH}_2)_n + 2n\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3n\text{H}_2 + n\text{CO}_2$	-165
45	$(\text{CH}_2)_n + n/2\text{O}_2 \rightarrow n\text{CO} + n\text{H}_2$	+110
46	$(\text{CH}_2)_n + n\text{O}_2 \rightarrow n\text{CO}_2 + n\text{H}_2$	+395
47	$(\text{CH}_2)_n + 3n/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + n\text{H}_2$	+395
48	$(\text{CH}_2)_n + n\text{H}_2 \rightarrow n\text{CH}_4$	+54

dő csökkenésében végbemenő reakció 1 m³ földgázból 2 m³ bontott gázt szolgáltat. Ahol földgáz nem áll rendelkezésre, ott folyékony szénhidrogénből fejlesztik a bontott gázt, a legfontosabb reakciótípusokat a 35. táblázat mutatja. A folyékony szénhidrogének pirolízisét rendszerint ciklikus üzemben végzik, átlagosan 0,4-0,6 kg olajtermékből nyerhető 1 m³ bontott gáz. Benzinből gyártása kedvezőtlen, energiamérlege miatt kihalásra ítélt szükségmegoldás.

A hegesztés és a fémvágás területén jelentős szerepe van az acetilénnek (C₂H₂). Előállítására többféle eljárás létezik, többnyire kalcium-karbid és víz reagáltatásával állítják elő, 1 kg karbidból átlagosan 0,3 m³ acetilén fejlődik. A tisztított acetilént maximálisan 25 bar nyomásra komprimálva palackokban hozzák forgalomba. A robbanásveszély csökkentésére többnyire disszugáz formájában használják, az acetilént acetonban oldják, amit kovafölddel itatnak fel, és 15 bar nyomáson forgalmazzák. Fűtőértéke technikai normál állapotban 57,1 MJ/m³, a tüzelőanyagok közül az acetilén égésénél érhető el a legmagasabb hőmérséklet (3100 °C). Alkalmazása különös óvatosságot követel, mivel levegőben 2,5% és 82% közötti tartalomnál robbanóképes. Különleges feladatokhoz metil-acetilén-propadién keveréket (MAPP) is használnak, fűtőértéke (95,3 MJ/m³) és lánghőmérséklete (2900 °C) magas, kevésbé robbanásveszélyes, mint az acetilén, robbanási határai levegőben: 2 és 14,5%. Néhány gáz jellemzőit hasonlítja össze a 36. táblázat.

Gyártott gázok közé tartozik a biogáz is. Szerves anyagokból a tőzegképződéshez hasonló mikrobiológiai folyamatokban keletkezik. Biogáz fejleszthető trágyából, fekáliából, mezőgazdasági és élelmiszer-ipari hulladékokból, sok szerves anyagot tartalmazó szemétből (deponiagáz), csatornaiszapból, továbbá más hasonló anyagokból. Mivel a városi szemétben nem található a mikroorganizmusok növekedéséhez szükséges nitrogén, azt szennyvízüledék vagy kémiai tápanyag hozzákeverésével kell pótolni. Szilárd szerves anyagok feldolgozásánál az energetikai kihozatal 60%-ot is elérhet. Az alapanyagtól és a fermentációs eljárástól függően a biogáz nagyrészt szén-dioxid és metán ke-

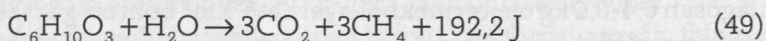
36. táblázat

Néhány technikai gáz égéstechnikai jellemzője

Jellemző	Hidrogén	Földgáz	Propán	Acetilén	MAPP
fűtőérték, MJ/m ³	10,8	36	93	57,1	95,3
sűrűség, kg/m ³	0,089	0,85	2,0	1,17	1,95
max. láng hőmérséklet, °C	2400	2800	2870	3100	2900
robbanási határok levegőben, %	4–76	4–17	2–11	2,5–82	2–14,5
O ₂ szükséglet égésnél, m ³ /kg	2,7	2,0	2,14	1,11	1,28

veréke (37. táblázat), valamint a kiinduló anyagoktól függően H, N, S tartalmú vegyületeket is tartalmaz. A fűtőérték ugyancsak az összetételtől függ, a trágyából nyert biogáz alacsonyabb értéke szarvasmarhára és sertésre, a magasabb fűtőérték baromfira vonatkozik.

Az átalakulás legfőbb reakciótípusát a



egyenlet írja le. Biogáz előállítására többféle eljárás lehetséges, leginkább a baktériumos fermentálás használatos levegőtől elzártan nedves és meleg környezetben. Az anaerob erjesztésben több ezer mikroorganizmus-fajta – leginkább élesztő baktériumok – vesz részt, ezek a szerves anyagot előbb cukrokra bontják, majd abból alkoholokat állítanak elő, amikből főleg CH₄ és CO₂ keverékéből álló gáz fejlődik, és inert szilárd anyag marad vissza. A mérsékelt égővön a fermentáláshoz a baktériumok optimális életfeltételeit fűtéssel kell biztosítani, a pszichofil baktériumtörzsek <25 °C-t, a mezofilok 20–45 °C-t és a termofilek 40–70 °C-t igényelnek.

A cellulózból mintegy fele-fele arányban keletkezik szén-dioxid és metán, laboratóriumokban 1 tonna biomasszából megközelítően 300 m³ metánt állítanak elő, a gyakorlatban megvalósított létesítmények kizozatala azonban jóval kisebb. Főleg nagy állattartó telepeken (500 kg-os élősúlyt meghaladó nagyalatlából legalább 70–100 darab, vagy ezzel egyenértékű sertésállomány)

37. táblázat

Biogázok jellemzői

Nyersanyag	CH ₄ , %	CO ₂ , %	Fűtőérték, MJ/Nm ³
települési hulladék	50	50	15–18
állati trágya	65	35	20–23
szennyvíziszap	70	30	18–26

jöhet számításba a hígtrágyát feldolgozó nedves eljárás. A biogáz melléktermékeként nyerhető iszap folyékony hányada trágyaként, nitrogénben gazdag száraz része talajjavításhoz használható. A mezőgazdasági üzemekben szakszosan üzemelő kamrarendszert is használnak, amiben először levegővel erjesztik a biomasszát. Amikor az aerob fermentáció $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőmérsékletet ér el, anaerob fermentációs szakasz következik. E levegőtől elzárt erjesztés $30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleten optimális, ilyenkor a kamrát fűteni kell, ami a fejlődő gáznak mintegy 20%-át emésztí fel. A fermentálás az etanolgyártás kiinduló fázisa is lehet, főleg nagy cellulóztartalmú anyagokból. Kínában és Indiában több millió biogázgyártó létesítmény működik. A magyar mezőgazdaságban a biogáz nem bizonyult versenyképesnek a földgázzal, és a nagy állattartó telepek elsovadása sem kedvezett e technika terjedésének.

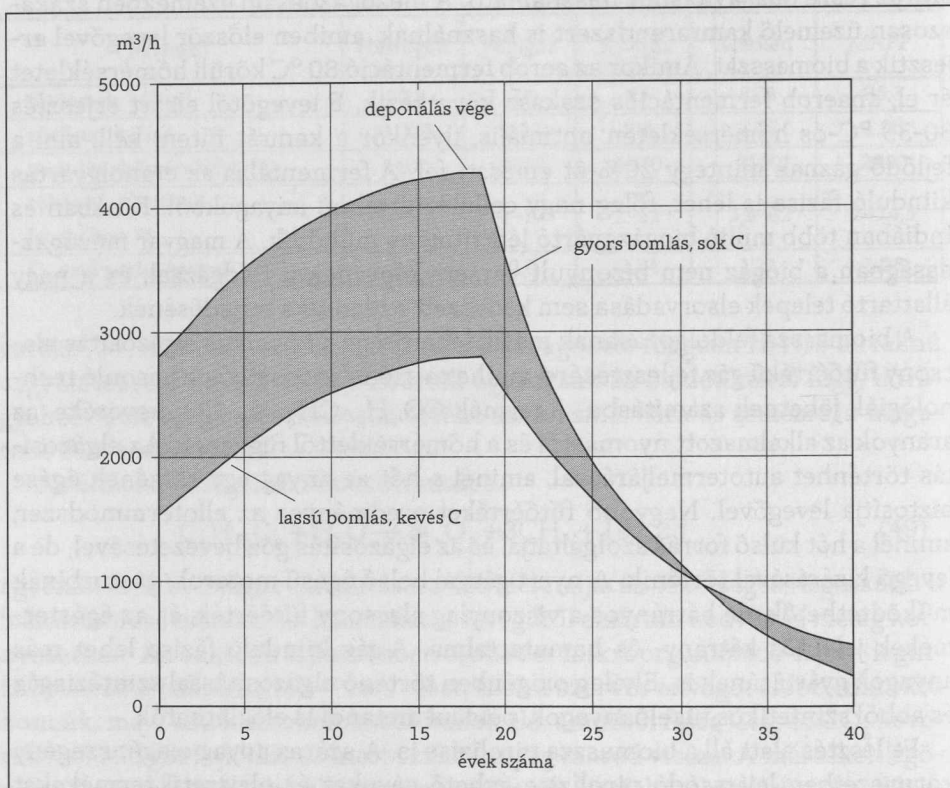
A biomassza feldolgozásának másik lehetősége a termikus elgázosítás alacsony fűtőértékű gáz fejlesztésére, amihez a szénelgázosításhoz hasonló technológiák jöhetnek számításba. A termék CO , H_2 , CH_4 , N_2 , CO_2 keveréke, az arányok az alkalmazott nyomástól és a hőmérséklettől függenek. Az elgázosítás történhet autotermeljárással, aminél a hőt az anyag egy részének égése biztosítja levegővel. Nagyobb fűtőértéket eredményez az alloterm módszer, aminél a hőt külső forrás szolgáltatja, és az elgázosítás gőz bevezetésével, de a levegő kizárásával történik. A nyert gázzal belső égésű motorok, gázturbinák működtethetők, de hátrányos a viszonylag alacsony fűtőérték, és az égéstermékek jelentős kátrány- és hamutartalma. A gáz kiinduló fázisa lehet más anyagok gyártásának is. Elvileg oxigénben történő elgázosítással szintézisgáz és abból szintetikus tüzelőanyagok, például metanol is előállíthatók.

Fejlesztés alatt áll a biomassza pirolízise is. A száraz anyag oxigénszegény környezetben lejátszódó pirolízise éghető gázokat és olajszerű termékeket eredményez. Az alacsonyabb hőmérsékleten ($300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) folytatott pirolízis környezetszennyezése kisebb, a magasabb hőmérsékleten ($800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) végzett viszont több értékes mellékterméket szolgáltat. A lepárlás 1 tonna városi szemből 450 m^3 metánban dús gázt, 110–150 liter folyadékot (olajok, aldehid, metanol, fenol, víz) és faszénhez hasonló, többféle szilárd anyagot tartalmazó maradékot eredményez. A hulladék térfogata 75–80%-kal, súlya 85–90%-kal csökken, szemben az égetés 40–50%-nyi salakjával. A néhány ezer tonna szemetet feldolgozó kísérleti üzemek kedvezőbb üzemeltetési költséget ígérnek, mint a hagyományos szeméthelyezésé.

A sok szerves anyagot tartalmazó hulladékok (mint a háztartási szemet, szennyvíziszap, hígtrágya) zárt lerakóiban magától is kialakul $20\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on zajló anaerobbomlás. Míg a biogázfejlődés biogáztelepeken viszonylag gyors, a hulladéklerakókban kialakuló deponiagáz keletkezése lassú, többnyire évekig tartó folyamat (20. ábra). A deponiagáz jellege függ a szemet összetételétől, a lerakás és az üzemvitel módjától. A szeméttelen 15–20 év alatt 1 tonna hulladékból $150\text{--}200\text{ m}^3$ deponiagáz fejlődik, aminek 40–50%-a metán,

20. ábra

Depóniagáz fejlődése



30-40%-a szén-dioxid, 5-20%-a nitrogén, s fűtőértéke $14-15 \text{ MJ/m}^3$. A gáz elvezetésére a korszerű lerakók eleve alagsövezéssel készülnek, és a lerakás befejezése után gázkutakat is kialakítanak. A csatornaiszap 1 m^3 -éből átlagosan 10 m^3 csatornagáz fejlődik, fűtőértéke ($23,5 \text{ MJ/m}^3$) magasabb, mint a depóniagázé, mivel metántartalma 65%, és a CO_2 részaránya pedig 35%.

Hulladékgázok

Számos ipari folyamat melléktermékeként keletkeznek éghető hulladékgázok. Ezek éghető komponensei többnyire megegyeznek a gyártott gázokéval, de rendszerint sokkal több nem éghető összetevőt tartalmaznak, ennek következtében fűtőértékük alacsony. A legjelentősebb hulladékgáz a nagyolvasztókból magas hőmérsékleten túlnyomással távozó kohógáz (torokgáz), aminek éghető része főleg CO. Összetételét a nyersvasgyártás technológiája szabja

meg, függ az adagok összetételétől, a gyártott nyersvas minőségétől, a kokszt és a bevitt szénhidrogének arányától, az oxigénbefúvás mértékétől és az üzemmódtól. Átlagos összetétele: 28% CO, 12% CO₂, 55% N₂, 3% H₂, 2% CH₄ és némi vízgőz, fűtőértéke 3,5-4 MJ/m³. Normálállapotra átszámítva egy tonna nyersvas gyártásánál 1800-4000 m³ kohógáz képződik, de a gázfejlődés nem egyenletes. Mind a mennyiség, mind az összetétel véletlenszerűen ingadozik, és a redukció előrehaladtával a képződése csökken. A kohászati technológia fejlődésével csökkenő tendenciát mutat a kohógázképződés. A kohógázt maga a kohászat hasznosítja, kazánok és kemencék fűtésére, esetleg magasabb fűtőértékű gázzal dúsítva. A kohógáz a redukciós zónát 1350 °C körül hagyja el és a magával vitt jelentős mennyiségű hőt 200-400 °C-ra hűtve egyes anyagok előmelegítésére is hasznosítani lehet. A kohógáz nyomása erőgépben expandáltatva is hasznosítható.

Lényegesen kisebb mennyiségben más pirometallurgiai folyamatoknál is keletkeznek hulladékgázok. A konvertergáz az oxigénbefúvásos konverteres acélgyártásnál képződik, átlagosan 60-70 m³/t acél arányban. A gáz 90%-a CO, fűtőértéke 8,5-12,5 MJ/m³, a konvertert 1600 °C-on hagyja el. A konverter üzemi ciklusainak megfelelően szakaszosan áll rendelkezésre, ami a hasznosításnál némi nehézséget okoz, így gőzfejlesztésre és előmelegítésre használják.

Ugyancsak főleg szén-monoxid az éghető része az acélötvöző kemencékben képződő kohófüstnek, alkalmazása különös körülményt követel, mert többnyire mérgező alkotókat is tartalmaz. Fűtőértéke 8,5-12,5 MJ/m³, mennyisége 600-1000 m³/t acél. Többnyire csak a hőtartalmát hasznosítják, és a környezetre veszélyes alkotók tisztítóberendezésekben történő kivonását követően elfáklázzák. A színesfém-kohászati eljárásoknál (például alumínium és réz elektrolízisének) felszabaduló kohófüst hasznosítását az agresszív és mérgező alkotók nehezítik, elfáklázásuk a szokásos gyakorlat. A kémiai technológiákból gyakran származnak olyan szénhidrogéngőzök és éghető hulladékgázok, amelyeket a robbanásveszély elkerülésére elfákláznak. Ha mennyiségük és fűtőértékük számottevő, akkor energetikai hasznosításukra is sor kerül.

Hidrogéngazdaság

Először Verne egyik regényében (1870-ben) jelent meg a hidrogén, mint tüzelőanyag, de sok időnek kellett eltelti, amíg az Apolló-programban betöltött kulcsszerepéig eljutott. Sokan a jövő energiahordozójának a hidrogént tekintik, amivel háttérbe lehetne szorítani az ásványi tüzelőanyagokat. A hidrogén nagy előnye, hogy hasznosítása nem jár környezetszennyező anyagok kibocsátásával, mert égésterméke víz. Ezért egyes zöld mozgalmak egyenesen a

környezetvédelem kulcskérdésének tekintik a hidrogéngazdaság kiépítését, különösen ha előállítása megújuló energiákra támaszkodik. Realisabbnak tűnik az atomenergiára alapozott hidrogéngazdaság, a hidrogént vízből éjszakai árammal fejlesztve elektrolízissel vagy pirokémiai úton magas hőmérsékletű reaktorral bontva. A hidrogén szélesebb körű alkalmazása azonban még jelentős kutató-fejlesztő munkát igényel mind az előállítás és szállítás, mind a felhasználás területén.

A hidrogén színtelen, szagtalan, íztelen gáz, forráspontja légköri nyomáson $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, kis sűrűsége és kis viszkozitása következtében illékony. Szobahőmérsékleten katalizátor vagy szikra hatására lép reakcióba az oxigénnel, a hidrogéntűz gyorsan terjed, lángja nem látható. Az oxigénnel alkotott 2:1 arányú keveréke szikra hatására robban (durranógáz), a klórral alkotott 1:1 arányú keveréke fény hatására ugyancsak robban. A robbanásveszély és a tűz terjedése főleg zárt térben veszélyes, szabadban a hidrogén kis molekulásúlya következtében gyorsan elillan. Nagy a tömegegységre eső kémiai energiája ($141,8\text{ MJ/kg}$) és szabad entalpiája (120 MJ/kg), de sűrűsége a normál állapotra jellemző gázállapotban kicsi, ezért $12,8\text{ MJ/m}^3$ -es fűtőértéke kereken harmada a földgázénak. A hidrogén az emberi szervezetre nem mérgező, és nem szennyezi a környezetet.

Az energetikában a hidrogén izotópjai is szerepet játszanak. Az atommagban a proton mellett egy neutron is tartalmazó deutérium (D) stabil izotóp, a természetes hidrogénben átlagosan 0,015% található. Egyes nukleáris reaktortípusok moderátoranyaga nehézvíz (D_2O vagy DHO). Az atommagban két neutronot tartalmazó trícium (T) radioaktív, előfordulása a természetben ritka. A trícium gyenge β -sugárzó, felezési ideje 12,5 év, a magreakciók terméke és az atomerőművek környezetszennyező anyagainak egyike. A deutérium és a trícium a fúzió tervezett üzemanyagai.

A hidrogént jelenleg sokoldalúan használják a vegyiparban műtrágyagyártáshoz ammónia előállítására, metanol, propilén, hidrazin termelésére, élelmiszerek kezeléséhez, zsírok telítéséhez, a kőolaj-feldolgozás fontos segédanyaga (hidrogénezéshez, kéntelenítéshez, krakkoláshoz stb.), kitűnő hűtőközeg, rakéták üzemanyaga. Alkalmazzák autogénhegesztéshez, lángvágáshoz, a kohászatban érc redukcióhoz, és sok más feladatra. E sokirányú hasznosítás fontos ismereteket szolgáltat az energetikai felhasználás megvalósításához. Az energetikai célú hidrogéngazdaság gondolata az 1970-es években erősödött fel, nagy szerepet szánva a hidrogénnek egyrészt az energiaátvitelben, másrészt, mint tüzelőanyagnak és motorhajtó üzemanyagnak. Az űrhajózás és a petrolkémia tapasztalatai alapján a hidrogénnel kapcsolatos veszélyforrások uralhatók.

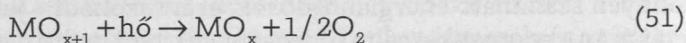
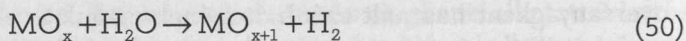
A troposzférában szabad hidrogén olyan kis koncentrációban fordul csak elő, hogy onnan gazdaságosan nem lehet kinyerni. A természetben vegyileg kötött formában nagy mennyiségben hidrogén, elsősorban vízben, de számta-

lan szerves és szervetlen vegyületben is. Kinyeréséhez legalább a reakcióhőt közölni kell, ezért a hidrogén nem bővíti a primer energiabázist (ezzel ellentétes nézetek gyakran jelennek meg a népszerűsítő irodalomban). A világtermelés évente kereken 400 Mrd m^3 , de ezt legnagyobbbrészt maguk a felhasználók állítják elő, kereskedelmi forgalomba ennek csupán 5%-a kerül. A vegyipar hidrogénszükségletét legnagyobbbrészt szénhidrogénekből – elsősorban földgázból – állítják elő pirolízissel, a metán és a vízgőz közötti reakció segítségével (például a 35. jelű reakció szerint), a reakciótermék hidrogén és szén-dioxid. Előállítható kőolajtermékből is, nyomás alatti katalitikus oxidációval, parciális oxidációval, esetleg reformálással, katalizátorral vagy anélkül. A nyersanyagként használt szénhidrogének maguk is előnyös tulajdonságú, könnyen szállítható energiahordozók, ezért azokból – jelentős energiabefektetés árán – energetikai célra hidrogént gyártani nyilván nem érdemes. Régebben szénbázisú hidrogénfejlesztés is folyt, vízgőzbecfúvással (lényegében vízgázgyártáson keresztül). A szén tulajdonképpen a segédanyag szerepét töltötte be, harmada a hőfejlesztést biztosította, a többi a vízbontás energiáját és a szén-oxidok képződését fedezte. A szénbázisú hidrogéngyártás azonban versenyképtelenné vált, az elgázosítás valószínűleg egyszerűbb és olcsóbb utat jelent gáznemű tüzelőanyagok előállítására szénből.

A hidrogén energetikai alkalmazásának egyik kulcskérdése olcsó előállítása. Az egyik irányzat a hidrogén fejlesztése vízből elektrolízissel, másképpen nehezebben hasznosítható energiák felhasználásával. A víz elektrolízisének gazdaságossága egyrészt a villamos energia árán, másrészt a melléktermékként fejlesztett oxigén értékesíthetőségén múlik. Az elektrolízishez a vezetőképesség biztosítására a vízhez adalékanyagot kell keverni (például 25% kálilúgot), és folyamatosan biztosítani kell a koncentráció állandóságát. Az elektródákon 1:2 arányban válik ki O_2 és H_2 , az elkerülhetetlen veszteségek miatt az elméletileg szükséges 12,8 MJ/m^3 -nél több, átlagosan 15,2 MJ/m^3 energiát kell bevezetni. Egy óra alatt 1 m^3 hidrogén leválasztásához 2,39 kA áram szükséges, a cellafeszültség elméletileg 1,48 V, de a veszteségek miatt $\geq 1,65$ V szükséges. A leválasztás hatásfokának felső határa 85%, de a gyakorlatban csak 65-70%-ot érnek el. A vízbontás hatékonyságának növelésére születtek elképzelések a nyomás és a hőmérséklet emelésével, katalizátorok alkalmazásával, gőzfázisban végzett vízbontással 1000 °C körül, cirkónium tartalmú porózus elektrolitban stb., de ezek ipari alkalmazására még nem került sor. Hőerőművekkel az eredő energetikai hatásfok meglehetősen alacsony (10-12%), a vízbontás rossz hatékonyságát tovább csökkenti a villamosenergia-fejlesztés vesztesége. Ezért az elektrolízis főleg vízerőmű és atomerőmű (nagy távlatban esetleg naperőmű) más fogyasztók számára nem értékesíthető áramtermelésével ígértes (például éjszakai árammal). Jelenleg az iparilag gyártott hidrogénnek csupán néhány százalékát állítják elő elektrolízissel. A vízbontásnak értékes mellékterméke az oxigén, annak racionális felhasználása nagyban növeli a hidrogénfejlesztés gaz-

daságosságát. Nagy mennyiségű oxigént igénylő technológiák (vas- és acélgyártás, oxigénes szénelgázosítás, szén-monoxid-fejlesztés mészkőből stb.) ebben jelentős szerepet játszhatnak.

A legtöbb reményt a termokémiai vízbontáshoz fűzik. A víz pirolízise 2500 K felett kezdődik, a disszociáció hatásfoka 80% körül mozog, de fennáll a rekombináció és visszahűlés veszélye. Ezért a figyelem inkább olyan lépcsőzetes reakciók felé irányul, amelyek alacsonyabb hőmérsékleten (800-1000 °C) teszik lehetővé a vízbontást. A kutatások sokféle anyagkombinációval folynak, a legígéretesebbek a fém-oxidokkal és fém-halogenidekkel kialakított lépcsőzetes reakciók. A folyamatokat M jelű fém oxidjával az



reakciótípusok jellemzik. A lehetséges reakciók száma meghaladja a százat, de anyagtechnológiai okokból csupán néhánynak van realitása, a legígéretesebbek a klór- és jódvegyületek. Az átalakulásokat Fe-Cl, vagy Fe-S katalizátorokkal elő lehet mozdítani, de a termikus hatásfok 40-50%-nál nem jobb. Számításba jöhetnek fémhidrideket reoxidáló reakciók is. Kísérleteznek jobb átalakítási hatásfokot ígérő más utakkal is, így a víz fotolízisével, a bontási energia egy részét plazma ibolyántúli sugárzásával közölve. Biokémiai reakciók is elképzelhetők, vannak hidrogént fejlesztő baktériumok (például a bíorbaktérium) és fénnel hidrogén leadására stimulálható kék (zöld) algák. Egyes baktériumokban és algákban található hidrogenáz enzim kölcsönhatása Fe és Ni tartalmú fehérjékkel hidrogén felszabadulásával jár. Ígéretes kísérletek folynak hidrogénfejlesztésre vízből fotokatalizátorok segítségével, amire olyan szilikonlapkás csip szolgál, amelynek egyik felén Co-Mo ötvözet, másikon Fe-Ni oxid van. Gazdaságos vízbontást ígér a magas hőmérsékletű atomreaktorok alkalmazása is.

A hidrogén csővezetékes szállíthatóságát tanúsítják olyan regionális hálózatok, amelyeket többfelé iparvidékek hidrogénnel történő ellátására alakítottak ki. A Ruhr-vidéken például több mint 60 éve üzemel egy 25 bar nyomású 210 kilométernyi csőhálózat. A tapasztalatok eloszlatták azt a gyakran felmerülő aggodalmat, hogy a kis molekulásúlyból fakadó nagy mozgékonyosság révén a hidrogén megszökik a porózus hegesztési varratokon keresztül, viszont a csövek anyagának megválasztását befolyásolja, hogy a hidrogén bizonyos ötvözeteket nagy nyomáson elridegit. A hidrogén szállítására felhasználhatók a meglévő földgázvezetékek is, de a szükséges nagyobb nyomás biztosításához 4-5-szörös kompresszorteljesítmény szükséges. A hidrogén csővezetéki szállítására sokféle más elképzelés is felmerült, mint például szupravezetős kriokábel belsejében, koaxiális csőrendszer belső csövében semleges gáz nyomása alatt, cseppfolyósítva 14-20 K-en stb., de ezek megvalósítása csak rövid távolságra képzelhetők el.

Elvileg nagy mennyiségű hidrogén tárolható föld alatti üregekben, leművelt gázmezőkben, akviferekben. A gyakorlatban csak kisebb mennyiségek tárolására került sor nagy nyomáson komprimálva tartályokban, ekkor viszont a robbanásveszély különös figyelmet kíván. Ez a hidrogéntárolás legolcsóbb módja, de a tárolt gáz sűrűsége a folyékony üzemanyagok (így a benzin) tizedét is alig éri el. A kriotechnika fejlődése megnyitotta az utat a cseppfolyós tárolás előtt, amit az űrtechnikában mind a rakétáknál, mind a kilövőállomásokon széleskörűen alkalmaznak is. Azonos térfogatban egy nagyságrenddel több hidrogén tárolható folyékony halmazállapotban, mint nagynyomású gázban, ez viszont ötszörös költséggel jár a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb hőmérséklet biztosítása miatt. Figyelemre méltó lehetőség a szilárd halmazállapotban való tárolás, az egyes fémhidrideknél a hidrogén megkötése, illetve felszabadítása a hőmérséklet és a nyomás változtatásával reverzibilis módon szabályozható. Az erre használható vegyületek általános képlete AB_5H_6 , ahol A többnyire valamelyik lantanida ritkaföldfém, B pedig Ni vagy Co. A LaNi_5 gyök például $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on 2,5 bar nyomás mellett 1 cm^3 anyagban $1\text{ dm}^3\text{ H}_2$ -t köt le, ami a hasonló térfogatú cseppfolyósított hidrogén tömegének kétszerese. A keletkezett LaNi_5H_6 -ból a hidrogén 1 bar nyomáson felszabadul. Ugyancsak reverzibilis, hőbevezetéssel, illetve elvonással vagy nyomásváltoztatással szabályozható hidrogénkapcsolatot lehet kialakítani magnéziummal és titánnal. A FeTiH_2 egységnyi térfogatában több a hidrogén, mint a cseppfolyós halmazállapotú hidrogénben, de a tömegarány rosszabb. Bizonyos víz-hidrogén keverékek 30 baron és $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül hexagonális kötésben fagyaszthatók meg, ami tárolásra szintén számításba jöhet. A szilárd kötési technológia ígéretes, de költséges.

Tüzelőanyagként a hidrogén legfőbb előnye, hogy az oxigénnel vízzé ég el, és nem változtatja meg a bioszféra összetételét. Gyorsabban ég a földgáznál, a láng hőmérséklete magasabb, és az égési határfok is jobb, viszont azonos térfogatú hidrogénmennyiség kereken harmadannyi hőt szolgáltat, mint a földgáz. Mellékhatásai vannak, egyrészt a magas hőmérsékleten NO_x is képződik, másrészt nagy mennyiségű égése a mikroklimát befolyásolhatja a páratartalom növekedésén, valamint a ködképződés és az esők gyakoriságán keresztül. Perspektív lehetőség a láng nélküli tüzelés, katalizátorral idézve elő az oxidációt $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőmérsékleten, ami az NO_x képződést is kiküszöböli.

A folyékony hidrogén kis fajsúlya és magas égéshőmérséklete révén kitűnően bevált nagy rakéták hajtására, az űrobjektumok jelentős hányadának fellovésénél folyékony hidrogén és oxigén üzemanyagot használnak. Ígéretesek a repülőgépek sugárhajtására végzett kísérletek komprimált hidrogéngázzal, az üzemanyag kis súlya mellett járulékos előny kedvező hűtési tulajdonsága. Sokféle kísérletet végeztek hidrogénnel üzemeltetett dugattyús motorokkal. Az eredmények a hagyományos motorkonstrukciókkal is kedvezőek, a jó üzemi tapasztalatokat azonban ellensúlyozza a hidrogén tárolásának gondja,

különösen járművek esetében, mert az e célra alkalmas berendezések súlya és térfogata többszöröse a benzintartályokénak. Komprimált gáz használatakor az üzemanyag-ellátás miatt szállítandó súly a benzinhoz képest 15-szörösére, a térfogat 25-szörösére nő a nyomásállékonyosság és a robbanásveszély ellensúlyozása miatt. Folyékony hidrogén alkalmazásához az alacsony hőmérsékletet biztosító hűszigetelés és hűtőrendszer a súlyt háromszorosra és a térfogatot négyszeresre növeli. A fémhidridben való tárolás ötszörös súlyt és négyszeres térfogatot kíván meg. Megfelelő átszellőztetéssel annak is elejét kell venni, hogy a párolgási veszteség ne robbanjon, ezért aránya a levegőben 4%-ot nem haladhat meg. A szokványos közlekedési eszközökben a hidrogén a jelenlegi előállítási technológia magas költsége miatt még nem versenyképes.

A hidrogén szerepének kilátásait nagyban növelte a tüzelőanyag-cellák fejlődése. Az űrhajózásban szinte kizárólag hidrogénnel működő tüzelőanyag-cellákat alkalmaznak. A szélesebb körű alkalmazás feltételeinek megteremtésére sokirányú K+F tevékenység folyik. Ez elsősorban a gépkocsikban (első lépésben autóbuszokban) történő hasznosításra irányul, aminek kulcskérdése az üzemanyag-ellátás módja. Valószínűleg itt várható a legkorábban a hidrogén üzemanyagként való gyakorlati alkalmazása. Az egyik irányzat a folyékony üzemanyag-ellátáshoz hasonló hidrogén-kúthálózat kiépítését tartja szükségesnek, és a gépkocsikra csak a hidrogén tárolásának és a tüzelőanyag-cellák működtetésének feladata hárulna. Néhány országban 2000-ben megnyíltak az első komprimált hidrogén-üzemanyagot árusító kutak. Egy kiterjedt hidrogén-infrastruktúra kiépítése azonban rendkívül nagy költséget jelent, aminek a finanszírozhatósága egyelőre valószínűtlen. A másik irányzat a jelenlegi infrastruktúrára alapoz, a hidrogénfejlesztés feladatát a járművekre terhelve. Mivel benzinből hidrogént magas hőmérsékletű reformálással lehet előállítani, nagyobb kilátása van az üzemanyag-ellátásra a metanolnak, mert abból alacsonyabb hőfokon lehet a hidrogént előállítani. Mind a kőolajipar, mind a gépkocsigyártók sokat áldoznak e távlati elképzelések támogatására.

A hidrogén legnagyobb jövőjét a földgáz megdrágulása, vagy az ellátás nagy beszűkülése esetén a távolsági energiaátvitelben (300-400 km felett) látják. Egyelőre a hidrogén szállítása sokkal drágább, mint a földgázé, azonos energiamennyiség átvitelének költsége mintegy két-háromszoros, viszont a hidrogén szállítása csövön lényegesen olcsóbb, mint a villamos energiáé távvezetékben. Az előnyt azonban felemésztí a vízbontás és a végponton az eltüzeléssel történő villamosenergia-fejlesztés költsége. Nagy előnye a hidrogénnek a villamos energiával szemben a tárolhatósága. Magának a villamos energiának a közvetett tárolására is vannak elképzelések, például a völgyidőszakban atomerőművek áramával előállított hidrogénben, amiből csúcsidőszakban lehet villamos energiát fejleszteni. Az is felmerült, hogy a fogyasztóktól távoli erőművekből, így a sivatagi naperőműből vagy tengeri erőműből hidrogénben szállítsák el az energiát. Ma még nem ítéltethető meg a hidrogén jövőbeli kilátá-

sa, az energiaátvitelben nemcsak a villamos energiával lesz versenyben, hanem az SNG-vel és a metanollal is, amit befolyásol majd az atomenergia és a szén szerepének alakulása is. Az Egyesült Államokban hidrogénre alapozott kísérleti erőmű épült, aminek tevékenysége a vízbontástól kezdve a tároláson keresztül a teljes vertikumot felöleli, tartós teljesítménye 600 kW, amihez csúcsidőben tüzelőanyag-cellával 50 kW, Stirling-motorral 25 kW járul. Hasonló rendszer létesítését tervezik az Európai Unióban is.

Figyelmet érdemlő kezdeményezés a hidrogén használata nagy távolságú hőszolgáltatásra. Az erre alkalmazott Adam-Eva rendszernél reaktorban hőközléssel a



reverzibilis endoterm reakciót hozzák létre. A metán-vízgőz keverékből hőközléssel szén-monoxid-hidrogén keverék keletkezik, az így nyert hideg gázt nagy távolságra lehet szállítani, a felhasználás helyén pedig 1 baron és 200 °C-on expandáltatva ellentétes irányban történik az átalakulás, miközben felszabadul a kötési energiák rejtett hőként tárolt különbsége.

Exoterm reakciók

A tüzelőanyagokon kívül sok anyag van, amely exoterm reakciókban képes munkavégzésre használható energiát átadni a környezetének. Ilyenek a robbanóanyagok is, amelyeket mechanikai munkavégzésre a haditechnikán kívül polgári célokra is hasznosítják. A robbantástechnikát használják a bányászatban és a mélyépítésben közetek fellazítására és fejtésére, építmények lebontására, a gépiparban nagynyomású alakításra, a szerelőiparban impulzusszerű erő kifejtéshez stb. A robbanásnál nagyon gyors égés zajlik le, ami rövid ideig rendkívül nagy teljesítményt szolgáltat annak ellenére, hogy a legtöbb robbanóanyag fűtőértéke kicsi, 2,5-7 MJ/kg. Például 1 kg 6,3 MJ energiatartalmú nitroglicerinnel robbanása 10⁻⁵ mp alatt mintegy 600 GW teljesítményt ad le. A kémiai robbanóanyagok mindig tartalmaznak hidrogént, oxigént és gyakran karbont is, a nagy sebességű reakciók kialakulásának kedvező körkötésben. A nagy hatású robbanás kezdeményezésére iniciáló robbanóanyagok szolgálnak, amelyek külső hatásokra (ütés, hőközlés, dörzsölés) meggyulladnak. A legfontosabb iniciáló anyagok közé tartozik a higany-fulminát, az ólom-acid és a diazo-dinitro-fenol. Az iniciáló anyag gyulladása gyorsan detonációba megy át, ami megindítja a nagy tolóhatású robbanóanyag égését. A nagy hatású – brizáns – anyagok sokkal érzékenyebbek, meggyújtva nem robbannak, azt csak meghatározott környezeti feltételek esetén az iniciáló anyag detonációja váltja ki. A brizáns anyagok egy csoportját szénhidrátok és alkoholok salétromsavészterei alkotják, ilyenek a nitro-cellulóz, a nitro-keményítő, a

nitro-glicerín, az etilén-glikol-dinitrát (nitro-glikol), a pentanitrit-tetranitrát (nitropenta). Sok más nitrovegyület is brizáns, így a trinitro-toluol (trotil, TNT), a nitro-naftalinok, a trinitro-xilol (xilil), a trinitro-fenol (pikrinsav), a ciklotrimetilén-trinitroamin (hexogén), a ciklotetrametilén-tetramin (oktogén), a trinitro-fenil-metil-nitramin (tetril). Keverékek is használatosak, például az ammonitok (ammónium-nitrát alapúak, vagy nátrium-nitrát és ammónium-klorid keveréke), dinamit, oxilikvit. A robbanóanyagok egy csoportjánál az égés nem megy át detonációba, de a fejlődő gáz kiterjedése közben nagy hajtóerő alakul ki, ezek a lőporok. Robbanásveszélyes munkahelyeken a robbanóanyagokat különféle fizikai hatásokkal helyettesítik, például cseppfolyós CO_2 kiterjedésével, nagy nyomású levegőpatronnal stb.

Az üzemanyagok különleges csoportját alkotják a rakéta-hajtóanyagok. A rakéták hajtásához a tolóerőt kifejtő munkaközegre és a munkaközeget felmelegítő hőforrásra van szükség. A hőforrás égésen kívül más eredetű (így nukleáris, villamos, nap-, plazma-, lézerenergia) is lehet, ami kifejezésre jut a rakéta megnevezésében is. A munkaközeg a hőforrással magas hőmérsékletre felmelegített gáz, aminek kiterjedése biztosítja igen nagy kiáramlási sebességgel a tolóerőt. A kémiai rakéta-hajtóanyagok mindkét szerepet betöltik, a hajtóanyagokban levő tüzelőanyag szabályozott kémiai reakcióban az oxidálószerrel egyesülve szolgáltatja a hőt, a reakció terméke a munkaközeg. A munkaközeggel szembeni követelmény a nagy égéshő, a disszociáció magas hőmérséklete, valamint a nagy gyorsulás érdekében a reakciótermék kis molekulaszáma. A rakétatechnika és az űrhajózás lehetőségei jórészt a hajtóanyagok fejlődésén múltak. A rakétatechnika eredményei sok más területen is alkalmazást nyertek (fegyverek, tengeralattjárók, pilótaülések katapultálása, gépkocsik légzsákja). Nagyon sok anyagkombináció jöhet számításba, de csak kevés felel meg az alkalmazás gyakorlati követelményeinek (ár, beszerezhetőség, ütésállóság, tárolhatóság, veszélytelenség, katonai alkalmazásnál a munkaközeg nehéz detektálhatósága radarral és lézerrel stb.). A hajtóanyagok folyékony és szilárd halmazállapotúak lehetnek, a folyékonyakkal jóval nagyobb teljesítmény érhető el, egyrészt nagyobb a fajlagos reakcióhőjük, másrészt a reakcióhőből csak a párolgáshőt kell fedezni, az olvadáshőt nem.

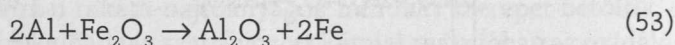
A folyékony rakéta-hajtóanyagok egy vagy több komponensből álló tüzelőanyagot és oxidánst tartalmaznak. Folyékony tüzelőanyagként a hagyományos üzemanyagok (benzin, kerozin) mellett más szerves vegyületeket (benzol, hidrazin, dimetil-hidrazin, ammónia, anilin, furfurool, etil-alkohol, pentaborán) is alkalmaznak, s nagy teljesítményt tudnak elérni a cseppfolyós hidrogénnel. Az oxidálószer többnyire oxigén (gyakran folyékony halmazállapotban), de egyes kombinációkban ózon, fluor és fluorvegyületek, nitrogén-oxid, salétromsav és más anyagok alkalmazása is előfordul. Cseppfolyósított gázokkal (hidrogén, oxigén) nagy fajlagos impulzus érhető el, amihez azonban kriotechnika alkalmazására van szükség.

Exoterm reakciók

Technológia	Reakció	Fejlődő hő, MJ/kg	Megjegyzés
elemi kéngyártás	$H_2S + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + S$ $2H_2S + SO_2 \rightarrow 2H_2O + 3S$	6,9 1,5	
pirit pörkölése	$2FeS_2 + 5,5 O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2$ $3FeS_2 + 8O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 6SO_2$	6,7 6,2	
kénsavgyártás	$SO_2 + 1/2 O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$	2,3 1	nitróz eljárás katalitikus eljárás
ammónia szintézis	$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$	3,3	katalizátorral, 300 bar, 300 °C
salétromsavgyártás	$2NO + O_2 + H_2O \rightarrow \frac{1}{3} HNO_3 + \frac{2}{3} NO + \frac{1}{3} H_2O$ $NO + NO_2 + H_2O \rightarrow \frac{1}{3} HNO_3 + \frac{2}{3} NO + \frac{1}{3} H_2O$ $2N_2O_4 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4HNO_3$	1,8 0,9 0,95 1	katalizátorral, több- lépcsős reakció katalizátorral, több- lépcsős reakció
ammónium-nitrát műtrágya	$NH_3 + HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3$	1,8	
karbamid előállítás	$2NH_3 + CO_2 \rightarrow NH_2CONH_2 + H_2O$	1,55	
mésznitrogén-gyártás	$CaC_2 + N_2 \rightarrow CaNCN + C$	3,5	
sósavgyártás	$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$	5	vízben elnyelve +73,5J
nátrium-peroxid előállítása	$2Na + O_2 \rightarrow Na_2O_2$	6,5	
acetilénygyártás	$CaC_2 + 2H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$ $4CH_4 + 2,5O_2 \rightarrow C_2H_2 + CO + CO_2 + 5H_2 + 2H_2O$	5 21	
tetraklórétán előállítása	$C_2H_2 + 2Cl_2 \rightarrow CHCl_2 - CHCl_2$	3,9	
acetaldehid előállítása	$C_2H_2 + H_2O \rightarrow CH_3 - CHO$	3,2	
akrilsav-gyártás	$C_2H_2 + CO + H_2O \rightarrow CH_2 = CH - COOH$	2,9	
paraffin klórozása	$CH_n Cl_{4-n} + Cl_2 \rightarrow CH_n Cl_{5-n} + HCl$	1,3	
etil-klorid klórozása	$C_2H_4 + HCl \rightarrow CH_3CH_2Cl$	0,85	
etil-alkohol hidratálása	$C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$	1	
metanol-szintézis	$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$	2,8	
benzol klórozása	$C_6H_6 + Cl_2 \rightarrow C_6H_5Cl + HCl$	0,85	
ftálsavanhidrid- gyártás	$C_{10}H_8 + 4O_2 \rightarrow \text{ftálsavanhidrid} + 2H_2O$	19,8	

A szilárd hajtóanyagok előnye, hogy a tárolás és a kezelés egyszerűbb. Kis tolóerőt lőporokkal, többnyire nitro-glicerinben oldott nitro-cellulóz formájában is biztosítani lehet, nagyobb tolóerőhöz azonban nagyobb energiatartalmú anyagok szükségesek. Ezek lehetnek műanyagba vagy nitro-cellulózba ágyazott heterogén szerkezetek, amelyekben a tüzelőanyag fémpor (gyakran Al, néha Be), illetve ezek hidridjei, az oxidáns pedig kristályos anyag (többnyire ammónium-perklorát, de más alkáli-perklorátok vagy alkáli-nitrátok is előfordulnak). A tulajdonságok befolyásolására adalékanyagok is használatosak, nagy teljesítményhez a boránok (bór-hidrogének) kerültek előtérbe.

A vegyipari, kohászati, élelmiszer-ipari és más technológiákban számos más jellegű exoterm reakció is fontos szerepet játszik, egyrészt az endoterm folyamatok fenntartásában, másrészt a reakciófeltételek (hőmérséklet, nyomás) biztosításában. Néhány fontosabb példát a vegyipar területéről a 38. táblázat mutat be. Más szakterületeken is bőségesen találhatók exoterm reakciók, például 3000 °C-nál is magasabb hőmérséklet előállítására szolgál a fém-oxidokat redukáló aluminotermikus reakción alapuló termit eljárás, amelynél vas-oxid és alumíniumpor keverékében a



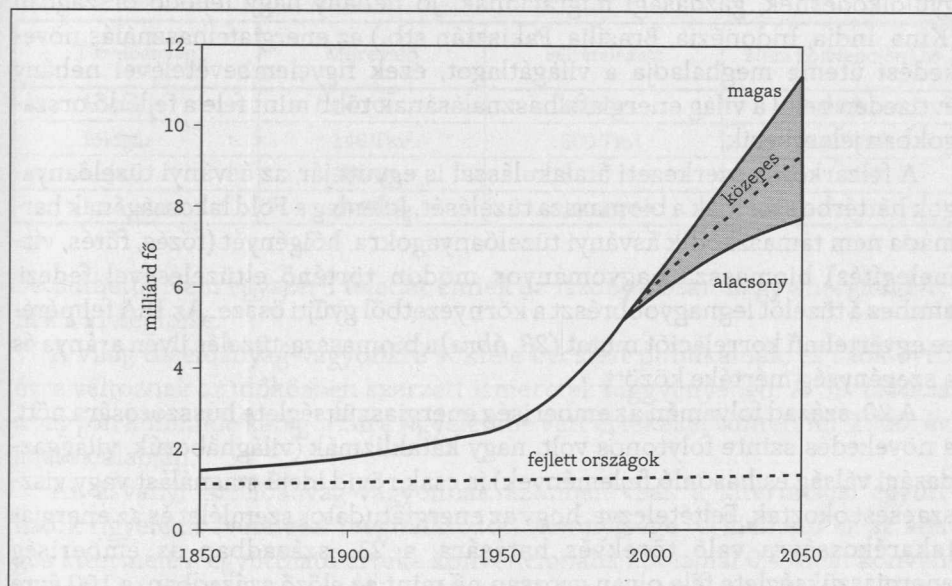
reakció játszódik le.

Mi várható a jövőben?

Nagy kérdés, hogy az ásványi tüzelőanyagok megőrzik-e a 21. század energiaigényeinek a kielégítésében jelenlegi domináns szerepüket. Az emberiség energiaszükséglete lassabban mint a 20. században, de tovább növekedik. A fejlett országokban további gazdasági növekedés feltételezhető, és az életkörülmények is javulni fognak, az ehhez szükséges energiatöbbletet azonban csak részben ellensúlyozható energiatakarékossággal és az energetikai hatások javításával. Ezért ezekben a régiókban nem kerülhető el az energiafelhasználás növekedése. A fejlődő világ országaiban az energiatakarékosságra kevéssé lehet alapozni, hiszen alig van miből megtakarítani energiát, ugyanakkor több körülmény az energiafelhasználásuk dinamikus növelését indokolja. Az ENSZ demográfiai prognózisa szerint a Föld lakossága néhány évtizeden belül a jelenlegi 6 milliárról 8-10 milliárdra nő (21. ábra), és a növekmény döntő része a fejlődő országokban következik be. Ehhez energiafelhasználási többlet is tartozik, hiszen a Föld minden új lakosát táplálni és ruházni kell, lakóhelyre, iparcikkekre van szükségük, igényük. A fejlődő világ gazdasági elmaradottsága és a mostoha életkörülmények tükröződnek az egy főre eső energiafelhasználásban is (22. ábra), a hatalmas lemaradást csak az energiaforrások bővítésével lehet csökkenteni. A felzárkózás gyorsítása nemcsak az

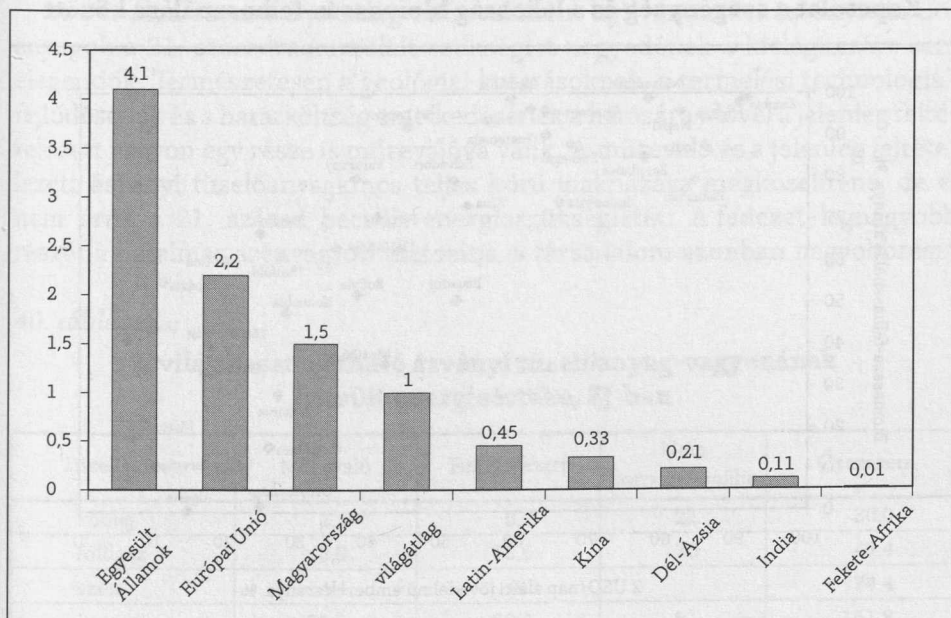
21. ábra

Az ENSZ prognózisa a Föld lakosságának alakulására



22. ábra

Fejenkénti energiafelhasználás



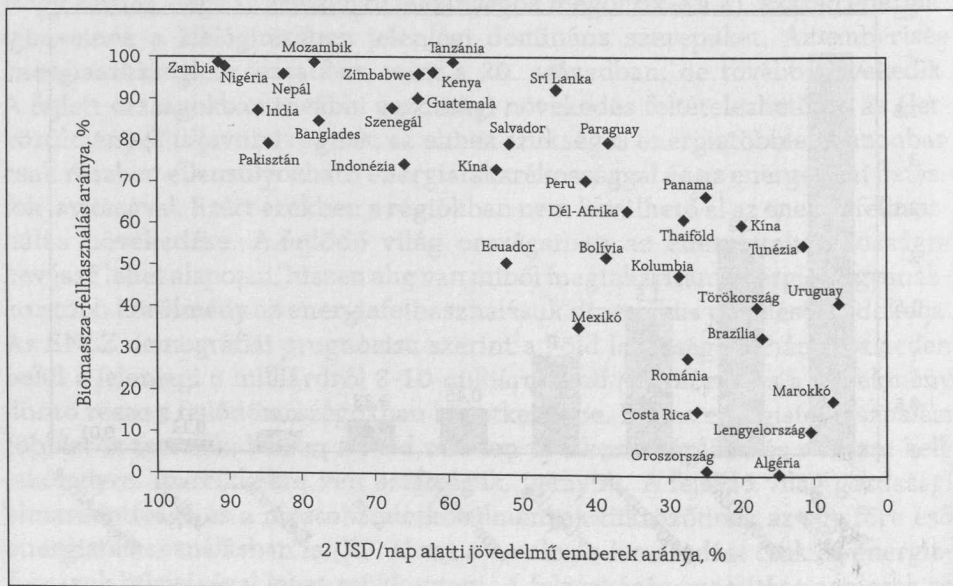
érintett térségek érdeke, hanem a fejlett országoké is, hiszen ez a táptalaja a civilizáció létét fenyegető fundamentalizmusnak, terrorizmusnak, etnikai gyűlölködésnek, gazdasági migrációnak. Jó néhány nagy fejlődő országban (Kína, India, Indonézia, Brazília, Pakisztán stb.) az energiafelhasználás növekedési üteme meghaladja a világátlagot, ezek figyelembevételével néhány évtizeden belül a világ energiafelhasználásának több mint fele a fejlődő országokban jelentkezik.

A felzárkózás szerkezeti átalakulással is együtt jár, az ásványi tüzelőanyagok háttérbe szorítják a biomassza tüzelését. Jelenleg a Föld lakosságának harmada nem támaszkodik ásványi tüzelőanyagokra, hőigényét (főzés, fűtés, vízmelegítés) biomassza hagyományos módon történő eltüzelésével fedezi, amihez a tüzelőt legnagyobbbrészt a környezetből gyűjti össze. Az IEA felmérése egyértelmű korrelációt mutat (23. ábra) a biomassza-tüzelés ilyen aránya és a szegénység mértéke között.

A 20. század folyamán az emberiség energiaszükséglete hússzorosára nőtt, a növekedés szinte folytonos volt, nagy kataklizmák (világháborúk, világ gazdasági válság és hasonló fejlemények) is csak rövid idejű stagnálást vagy visszaesést okoztak. Feltételezve, hogy az energiatudatos szemlélet és az energia-takarékosságra való törekvés hatására, a 21. században az emberiség energiaszükséglete fele olyan gyorsan nő mint az előző században, a 100 évre kumulált energiaszükséglet mintegy 120 ZJ-ra (olajegyenértékben ~2,5 Tt)

23. ábra

Kapcsolat a szegénység és a lakosság biomassza-felhasználása között



A világ tüzelőanyag-vagyona

Tüzelőanyag	Műrevaló	Feltételezett	Nem konvencionális
kőolaj	140 Gt	400 Gt	2500 Gt
földgáz	146 Tm ³	600 Tm ³	2000 Tm ³
szén	984 Gt	5 Tt	
biomassza	40 EJ/év	230 EJ/év	

becsülhető. Nem egyszerű feladat ennek az iszonyatosan nagy energiaigénynek a kielégítése.

A világ tüzelőanyag-vagyonára sokféle becslést publikálnak, és azok évről évre változnak az időközben szerzett ismeretek függvényében. A 39. táblázat a vagyon különféle kategóriáira figyelembe vett értékeket tünteti fel, 2000. évi adatok alapján.

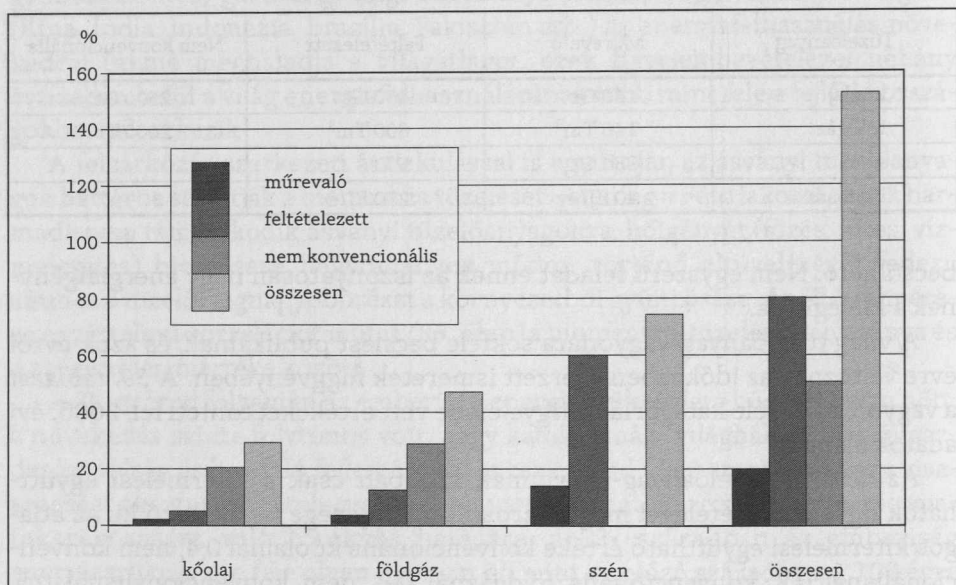
Az ásványi tüzelőanyag-vagyonnak azonban csak a kitermelési együtt-hatók figyelembevételével meghatározott mennyisége termelhető ki, az átlagos kitermelési együtt-ható értéke konvencionális kőolajnál 0,4, nem konvencionálisnál 0,2, konvencionális földgáznál 0,8, nem konvencionálisnál 0,5, szénnél pedig 0,5. A vagyon ezek figyelembevételével meghatározott energia-értéke látható a 40. táblázatban, illetve a 21. század kumulált energiaszükség-lethez viszonyított arányuk a 24. ábrán.

A 24. ábra szerint a jelenleg műrevalóként nyilvántartott ásványi tüzelő-anyagok a 21. századra kumulált szükséglet negyedének a kielégítésére sem elegendők. Természetesen a geológiai kutatásoknak, a termelési technológiák fejlődésének és a határkötség emelkedésének a hatására idővel a jelenleg felté-telezett vagyon egy része is műrevalóvá válik. A műrevaló és a jelenleg felté-telezett ásványi tüzelőanyagkincs teljes körű kiaknázása megközelítené, de el nem érné a 21. század becsült energiaszükségletét. A fedezet legnagyobb részét a hatalmas szénvagyon biztosítja, a társadalom azonban nagyobbbrészt

40. táblázat

**A világ hasznosítható ásványi tüzelőanyag-vagyonának
becsült energiaértéke, ZJ-ban**

Tüzelőanyag	Műrevaló	Feltételezett	Nem konvencionális	Összesen
kőolaj	2,3	6,7	21	30,0
földgáz	3,9	13,5	30	47,4
szén	14,4	60		74,4
összesen	20,6	80,2	51	151,8

A világ tüzelőanyag-vagyona és a százéves szükséglet aránya

szénhidrogéneket igényel, amikből a műrevaló és feltételezett vagyon kevés a szükséglet kielégítésére. A feszültség csak a nem konvencionális szénhidrogén-előfordulások figyelembevételével oldható fel, ezek kiaknázásával az ásványi tüzelőanyagok – bár szűkösen – fedezni tudnák a kumulált szükségletet.

A bemutatott becslés csak elvi lehetőség a szükségletek fedezésére, az ásványvagyon jelentős részének tényleges kitermelését politikai, gazdasági, földtani, műszaki, szállítási, környezetvédelmi és egyéb okok korlátozni fogják. Ezért valószínű, hogy az ásványi tüzelőanyagok szerepe csökken, és az energiaellátás más lehetőségei előtérbe kerülnek. A szerkezetváltás egyik legerőteljesebb oka az ásványi tüzelőanyagok drágulása lesz, ahogy a legkedvezőbb előfordulások elapadása miatt költségesebben kitermelhető ásványvagyon kiaknázására kell áttérni. Ez a folyamat a kőolajnál már elkezdődött, hiszen a kitermelést megkezdték Alaszkában és az Északi-tengeren, sőt megindult a mélytengeri és egyes nem konvencionális előfordulások termelésbe vétele is. A költségek alakulását mutató 22. táblázat szerint a legdrágább és legolcsóbb előfordulások önköltsége között a különbség nagyságrendi, a nem konvencionális olaj a legdrágább konvencionális olaj költségének duplájába, a szén cseppfolyósítása pedig háromszorosába kerül.

Az ásványi tüzelőanyagok használatát mind erősebben mérsékli a környezetvédelem. Jelenleg a figyelem előtérében a légszennyező égéstermékek állnak. A legtöbb légszennyező kibocsátásának csökkentésére már léteznek jól

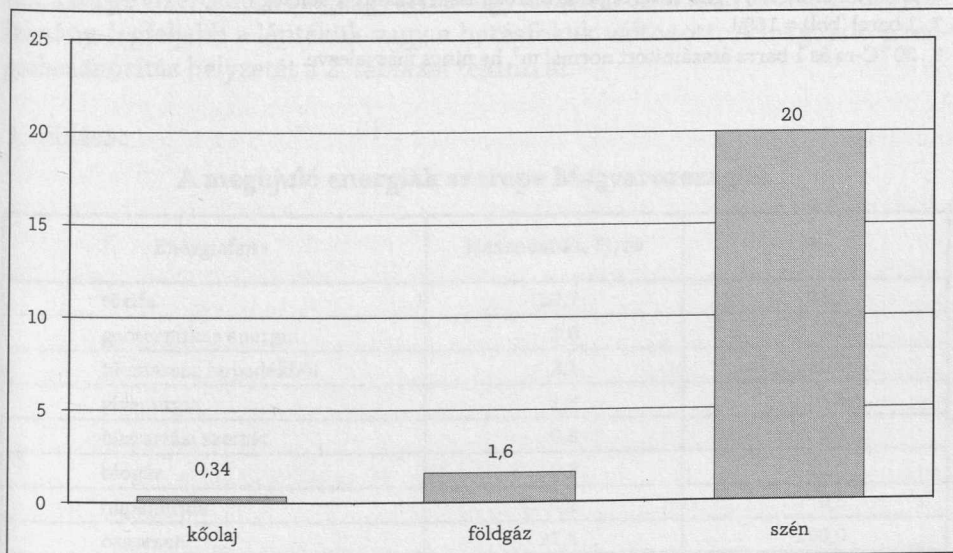
bevált eljárások – természetesen többletköltség árán. Nem áll azonban rendelkezésre nagyléptékben alkalmazható módszer az üvegházhatás főszereplőjének, a szén-dioxidnak a visszatartására, és sokan kétlik ennek gazdaságilag elviselhető lehetőségét a jövőben is. Egyelőre kevesebb figyelem irányul a szilárd hulladékokra, de idővel nagyobb hangsúlyt kap majd a meddőhányók, zagyterek, ülepítők, kolmatációs halmok, hulladéklerakók sorsa, többek között a nemkívánatos anyagok (így a mérgek, nehézfémek, radionuklidok stb.) szétszóródásának veszélye miatt. Költségnövelő tényező a használatból kivont területek rehabilitációja is, ami ma már magától értendő igény.

A világ energiaszerkezete korábban is csak lassan módosult, az ásványi tüzelőanyagok háttérbe szorulása sem lesz gyors folyamat. Ennek első eleme, a szén részarányának csökkenése már jó ideje tart, és elkezdődött a kőolaj súlyának mérséklődése is. Igaz, e változások a szén- és kőolajtermelés növekedése közben zajlanak, de e növekedési ütemek elmaradnak az energiaszükséglet mögött.

A magyar energiagazdaság erősen függ a nemzetközi viszonyok alakulásától. A világpolitikának és a világ gazdaságnak az energiahelyzetet befolyásoló váratlan fejleményei miatt az elmúlt fél évszázadban szinte évtizedenként radikálisan módosítani kellett energiapolitikánkat. Ezért előretekintően tájékozódnunk kell a tüzelőanyagokkal kapcsolatos várható fejleményekről, forrásaink diverzifikálásával idejében fel kell készülnünk a tüzelőanyagokat kiváltó energiahordozók alkalmazására.

25. ábra

A magyar tüzelőanyag-vagyon és az éves energiaszükséglet aránya



A magyar tüzelőanyag-vagyon nagyon szerény. A 25. ábrában a 2002. évi teljes magyar energiaszükségletéhez viszonyítva tüntettük fel a nyilvántartásokban szereplő mennyiségeket. A legjelentősebb a szénvagyon, de gyenge minősége és a lencsék kedvezőtlen geológiai adottságai miatt a mélyműveléses bányászat versenyképtelenné vált, a bányákat sorra bezárják. Egyedül a kifejtéssel termelhető lignit erőművi hasznosítását tartják ígéretesnek, ami hőérzékben a szénvagyon felénél valamivel többet tesz ki, de egyre nehezebb megszerezni a lakosság hozzájárulását az új bányák nyitásához. Szénhidrogénvagyonunk minősége jó, de mennyisége kicsi, és a geológusok nagyléptékű új leleteket nem remélnék, a koncesszióban végzett kutatások is csak kis előfordulásokat találtak. Ásványi tüzelőanyag-vagyonunk tehát csak a szükségletek kis hányadának fedezésére elegendő és nem is hosszú ideig, aminek egyenes következménye, hogy a jövőben meglehetősen nagy importtal számoljunk e területen. Tüzelőanyagként ugyan számításba jöhet még a biomassa is, de ez szükségleteink csak kis hányadának fedezésére lenne elegendő.

Jegyzetek

- 1 A megkülönböztetés érdekében az ásványt szénnek, az elemet karbonnak nevezzük, de a vegyületekben megtartva a szokásos megnevezéseket, pl. szén-dioxid.
- 2 A tényleges és maximálisan lehetséges nedvességtartalom aránya.
- 3 Az elektromos és a termikus teljesítmény megkülönböztetésére szolgál az e , illetve i index.
- 4 A kritikus hőmérséklet és nyomás felett a víz csak gőz halmazállapotban fordulhat elő, e paraméterekhez viszonyítva különböztetik meg a szubkritikus és szuperkritikus állapotot.
- 5 Egyezményes Tüzelő Anyag ($29,3 \text{ MJ/kg} = 7000 \text{ kal/kg}$ fűtőértékű szén).
- 6 Cost, insurance, freight, fuvardíjjal és biztosítással számított költség.
- 7 1 barel (bbl) = 169 l.
- 8 20°C -ra és 1 barra átszámított normál m^3 , ha nincs más jelezve.

Megújuló energiaforrások

Az emberiség legősibb energiaforrásai megújuló energiafajták, az izomerő és tüzelőanyagként a biomassa voltak. Az elmaradottabb, szegény országokban ma is ezek jelentik a legfontosabb energiabázist. A technikai fejlődés első lépései az ókorban megújuló természeti erők a szél majd a folyók energiájának hasznosítására törekedtek. A világ jelenlegi energiamérlegében a biomassa – mindenekelőtt a tűzifa – aránya 10% körül mozog, és a vízenergia is mintegy 6%-ot képvisel, vagyis a megújuló energia részaránya eléri a 15-20%-ot. A fejlett országokban ez a hányad azonban sokkal kisebb, Magyarországon is csupán 3,5%, aminek a legnagyobb része a tűzifa eltüzeléséből származik (1. táblázat).

A megújuló energiák hasznosítására nagyok a várakozások. Ennek révén azt remélik, hogy a fosszilis és fissziós primer energiahordozók háttérbe szorításával kiküszöbölhetők vagy legalább radikálisan mérsékelhetők az energiaellátást kísérő problémák, a természeti erőforrások kizsákmányolása, a környezetszennyezés, a társadalmi aggodalmak. A megújuló energiák kiaknázását a korszerű technológiai lehetőségek felhasználásával gyakran „nem konvencionális” jelzővel szokás megkülönböztetni, bár ez erőltetettnek tűnik, hiszen alig van olyan megjelenési formájuk, aminek a felhasználására nem került volna már sor a történelem folyamán. A biomasszából erjesztett alkohol, a törpe vízerőmű, a biogázgyártás vagy a szélturbina nem radikálisan új találmány, legfeljebb a léptékük vagy a hatásfokuk változott. A megújuló energiahasznosítás helyzetét a 2. táblázat tekinti át.

1. táblázat

A megújuló energiák szerepe Magyarországon

Energiafajta	Hasznosítás, PJ/év	%
tűzifa	29,7	78,7
geotermikus energia	3,0	7,9
biomassa hulladékból	2,1	5,5
vízenergia	1,8	4,8
háztartási szemét	0,8	2,1
biogáz	0,2	0,5
napenergia	0,2	0,5
összesen	37,8	100,0

A megújuló energiák hasznosítása

Energiafajta	Kiforrott technológia	Fejlesztés tárgya	Távlati lehetőség
közvetlen napsugárzás	növénytermesztés szárítás vízmelegítés épületfűtés üvegházhatás a mezőgazdaságban vízmelés	passzív hasznosítás napelem naperőmű	űrerőmű
szél	vitórlás hajó vitórlázó repülőgép szélmalom szélerőmű		
szárazföldi vízfolyások	vízimalom vízerőmű		depressziók hasznosítása
tengeri energiák	árapály erőmű	hullámenergia	hőfokkülönbség sótartalom-különbség tengeráramlások
biomassza	tüzelés szemétegetés biogázgyártás	üzemanyaggyártás	hidrogénfejlesztés
geotermia	vízmelegítés épületfűtés erőmű balneológia mezőgazdasági hasznosítás	forró sziklák hasznosítása	

A megújuló energiák mindegyike, sőt a Földön hasznosítható összes primer energiafajta közvetlenül vagy közvetve a Nap tevékenységére vezethető vissza. Földünk a Nap hatására kondenzálódott égitestté, anyaga vagy a Napból löködt ki, vagy a Nap ragadta magával a csillagközi tér porából. A Nap szabja meg a Föld mozgását és hőtartalmát, melegíti és megvilágítja bolygónkat, alakítja az életfeltételeket meghatározó éghajlatot és időjárást, ami többek között számos megújuló energia – a szél, a vízkörforgásból táplálkozó vízfolyások, a tengeri áramlások és hőfokkülönbségek, a szél gerjesztette hullámzás stb. – forrása. A fotoszintézis révén magát a biológiai létet is a napsugárzás tartja fenn. Az árapály létrehozásában ugyan a Hold szerepe jóval nagyobb, mint a Napé, de a Földből kiszakadt Hold is a Napnak köszönheti a

létét. A fosszilis ásványi tüzelőanyagok mondhatni napenergia-konzervek, amelyeket a fotószintézis révén keletkezett biomasszából hoztak létre a földkéregben érvényesülő hatások. Gyakran a Föld anyagából táplálkozó geotermikus energiát is megújulónak tekintik, annak ellenére, hogy a rezervoárok hőtartalma kimeríthető.

Tulajdonképpen bizonyos fókig a természetben előforduló energiafajták mindegyike megújul, de egyeseknél – például az ásványi tüzelőanyag-képződésnél – ennek az üteme nagyon lassú, sokkal kisebb, mint a kiaknázása. Az energiagazdálkodás szempontjából csak azon természeti erőket célszerű a megújulók közé sorolni, amelyeket legfeljebb a keletkezés ütemében lehet hasznosítani, ilyen ütemben viszont állandóan újratermelődnék. Az emberi érdek ennek az áthágására is talál módot, példa erre a gátlástalan erdőirtás. A megújuló energiaforrásokra az is jellemző, hogy kiaknázás híján a potenciális lehetőség hasznosítatlanul elvész, a beeső napsugárzás visszaverődik a világűrbe, a folyók belefolynak a tengerbe, a hullámozás lecsillapodik, a növényzet elpusztul stb.

A megújuló energiák felelnek meg a legjobban a fenntartható fejlődés követelményének, hiszen hasznosításuk nem korlátozza a következő generációk lehetőségeit, és környezetszennyező hatásuk is viszonylag kicsi. E vonzó tulajdonságaikkal nyerték meg a környezetvédők szimpátiáját és a kormányzatok támogatását. Az is közrejátszott, hogy mint belföldi energiaforrások, növelik az országok energetikai ellátásbiztonságát, és csökkentik az importfüggést. Világszerte ambiciózus programok születtek a megújuló energiahasznosítás részarányának növelésére, jelentős állami támogatást biztosítottak a technikai megoldások fejlesztésére, és különféle módszerekkel – adókedvezmény, beruházási hozzájárulás, kedvezményes hitel, előnyös értékesítési tarifák stb. – ösztönzik a tényleges megvalósítást. Még olyan elképzelés is napvilágot látott, hogy a 21. század végére a nap- és szélenergiára támaszkodva teljesen kiküszöböljük az ásványi tüzelőanyagok és a nukleáris energia használatát. Jelenlegi ismereteinket figyelembe véve azonban az ilyen elképzelések keresztülvihetetlenek.

Az erőteljes ösztönzés és a jelentős kedvezmények ellenére a megújuló energiák nehezen hódítanak teret. Ennek a legfőbb akadálya viszonylag nagy fajlagos beruházási költségük, aminek több oka van. A legjelentősebb, hogy a megújuló energiák térbeli teljesítménysűrűsége kicsi, ezért nagy felületről kell a szükséges energiát összegyűjteni (pl. 3. táblázat), sok anyagot igénylő és ezért költséges létesítmények segítségével. A 3. táblázathoz hozzáfűzhető, hogy a geotermikus villamosenergia-fejlesztés fajlagos mutatói sem kedvezőek. Továbbnöveli a létesítési költséget, hogy energiaellátásra akkor is szükség van, amikor nem süt a nap, nem fúj a szél, alacsony a folyók vízhozama, vagy kicsi a termésátlag, ezért ezen időszakok áthidalására vagy energiatárolókat kell létesíteni, vagy más energiafajtára támaszkodó háttérkapacitást. Az is

3. táblázat

Villamosenergia-fejlesztés fajlagos területigénye

Energiaforrás	Területigény, m ² /kW
hőerőmű	1-4*
vízenerőmű	10-30
termikus naperőmű, napelem	20-60
szélenerőműtelep	50-150
energiaültetvény	4000-6000

* bányáknál

költségnövelő, hogy a vízenerőművek kivételével az átalakítási hatások alacsony, ezért a különféle szolgáltatásokhoz – pl. villamosenergia-fejlesztéshez vagy vízmelegítéshez – hőértékben többször annyi megújuló energiára van szükség, mint tüzelőanyagra.

A hátrányokat mérsékelni fogják az intenzív kutató-fejlesztő munkával kialakítandó jobb konstrukciók, valamint a tömeggyártás. Egyes megoldások, pl. a szélenerőművek és a napenergiát termikusan hasznosító síkkollektorok a kedvező meteorológiai adottságú területeken már elértek a gazdasági versenyképesség küszöbére. Különösen előnyös a helyzet, ha a fogyasztókat nem zavarja a rendelkezésre állás ingadozása, pl. a fogyasztás szezonális egybeesik az energiafejlesztés számára kedvező időszak alakulásával, vagy ha a megújuló energiával működő áramforrás együttműködő villamosenergia-rendszerhez kapcsolódik.

Tekintettel a közös jellemzőkre, a megújuló energiafajták közül a biomassza célszerűbb a tüzelőanyagok között tárgyalni (lásd az előző fejezetet), a geotermikus energia pedig leginkább a hőhordozók kérdéseire kötődik (bővebben lásd az erről szóló fejezetet).

Napenergia

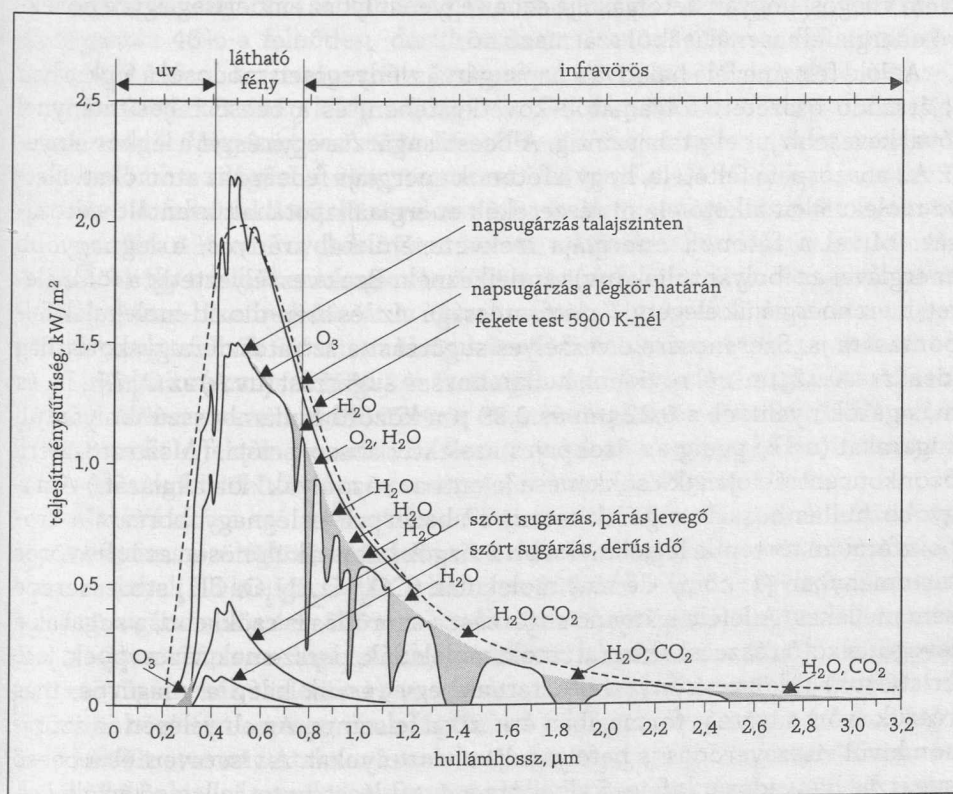
Nem véletlen a primitív népek napimádata, a Nap teremtő ereje, képessége a természet megújítására már korán erre a hatalmas energiaforrásra irányította az emberek figyelmét. Bár a napsugárzás közvetlen technikai hasznosítására időnként voltak próbálkozások, meglepő módon e mindenütt érvényesülő természeti erőforrás nagyarányú energetikai kiaknázására csak a 20. század vége felé kezdtek gondolni az emberek.

A Nap sugárzása

A Nap energiája a belsejében 20-50 millió fokban hőmérsékleten zajló fúzióból származik, aminek teljesítményét 300 YW-ra becsülik. Ez hevíti 6000 K körüli hőmérsékletre a napgolyót övező fotoszférát, és ez a burok sugározza ki az elektromágneses hullámokat a világűrbe. A 1. ábra egyik görbéje mutatja a Nap elektromágneses sugárzásának spektrumát a földi légkör határán. A sugárzás energiájának 99%-a a 0,15 és 4,0 μm közötti hullámsávba esik, maximuma a látható kék fénynél ($\lambda=0,474 \mu\text{m}$) van, a 4 μm -nél hosszabb hullámok teljesítménye gyakorlatilag elhanyagolható. A Nap felszínén időnként nagyenergiájú folyamatok zajlanak (napfoltok, napkitörések, protuberanciák, napfáklyák), e naptevékenységek azonban csak az elektromágneses sugárzásoknál sokkal kisebb teljesítményű – elsősorban elektronokból és protonokból álló – korpuszkuláris sugárzást befolyásolják, az elektromágnesest nem. A Napból kilépő részecskesugárzás teljesítménye 6 nagyságrenddel marad el

1. ábra

A napsugárzás frekvenciaspektruma



a Nap elektromágneses sugárzása mögött. A Nap elektromágneses sugárzása az idő folyamán gyakorlatilag állandó, de geológiai korszakok léptékében előfordulhatnak ismeretlen eredetű ingadozások (pl. jégkorszak). A Napból kiáramló energia- és anyagáramok naponta 363 Gt tömegvesztést okoznak, ennek ellenére a Nap tömege 10 milliárd év alatt csupán 0,01%-kal csökken. A saját galaxisunkból és más galaxisokból származó, a rádióhullámoktól a röntgensugarakig terjedő spektrumot átfogó kozmikus sugárzás teljesítménye ugyancsak 6 nagyságrenddel kisebb a napsugárzásnál.

A napsugárzás teljesítménye a közepes Nap-Föld távolság helyén $1,39 \text{ kW/m}^2$ (ez a napállandó), ekkora fajlagos teljesítmény érvényesül a földi légkör külső határán a sugárzás irányára merőleges felületen. Mivel a Nap-Föld távolság a Föld enyhén elliptikus pályája miatt kismértékben változik, a napállandó a Föld helyzetétől függően $\pm 3\%$ -os határok között változik. A Föld $1,28 \cdot 10^8 \text{ km}^2$ területű síkmetszete a napsugárzás fluxusából 177 PW teljesítményt metsz ki, ami a Nap teljes sugárzásának milliárdnyi hányadát sem éri el. E teljesítmény folyamatos besugárzása alapján a Földre eső energia évente 5,6 YJ. A Föld termikus egyensúlyát az biztosítja, hogy a beeső napsugárzás energiájával egyenlő a világűrbe visszavert és kisugárzott energia összege. Nem világos, hogyan befolyásolja ezt az egyensúlyt az emberiség egyre növekvő energiafelhasználásából származó hő.

A Föld felszíne felé haladva a napsugárzás lényegesen módosul a légkörben lejátszódó összetett folyamatok következtében, és a beeső teljesítménynél jóval kevesebb jut el a talajszintig. A beeső sugárzás egy részét a légkör elnyeli. Az abszorpció feltétele, hogy a fotonok energiája fedezze az atomokat, illetve molekulákat alkotó elemi részecskék energiaállapotának kvantált változását. Mivel a fotonok energiája frekvenciájukkal arányos, a legnagyobb energiával az ibolyántúliak (uv) rendelkeznek. Ezek veszélyeztetik a földi életet, mert energiájuk elegendő a létfontosságú víz- és szén-dioxid-molekulák felbontására is. Szerencsére e veszélyes sugárzást a sztratoszféra gyakorlatilag kiszűri, a $0,22 \mu\text{m}$ -nél rövidebb hullámhosszú sugárzást (uv A) az O_2 , N_2 , H_2 és más gázok nyelik el, a $0,22 \mu\text{m}$ és $0,29 \mu\text{m}$ közötti hullámhosszú ibolyántúli sugarakat (uv B) pedig az ózonpajzs szelektív abszorpciója. (A sztratoszféra ózonkoncentrációjának csökkenése jelenti az „ózonlyuk” kialakulását.) A nagyobb hullámhosszú sugarak tetemes abszorpciója legnagyobbbrészt a troposzférában történik, legjelentősebb a vízgőz hatása, különösen az infravörös tartományban (1. ábra), de más molekulák (CO_2 , O_2 , N_2O , CH_4 stb.) szerepe sem mellékes. A lefele irányuló sugárzást a szóródás is csökkenti, a sugarak a levegőt alkotó részecskékbe (atomok, molekulák, porszemek, vízcseppek, jégkristályok) ütközve irányt változtatnak, egy részük kilép a világűrbe, más részük szórt sugárzás formájában érkezik a felszínre. Az elnyelésen és szóráson kívül visszaverődés is befolyásolja a viszonyokat. A visszavert és a beeső sugárzás hányadosát kifejező albedóra a 4. táblázat mutat jellemző értékeket.

4. táblázat

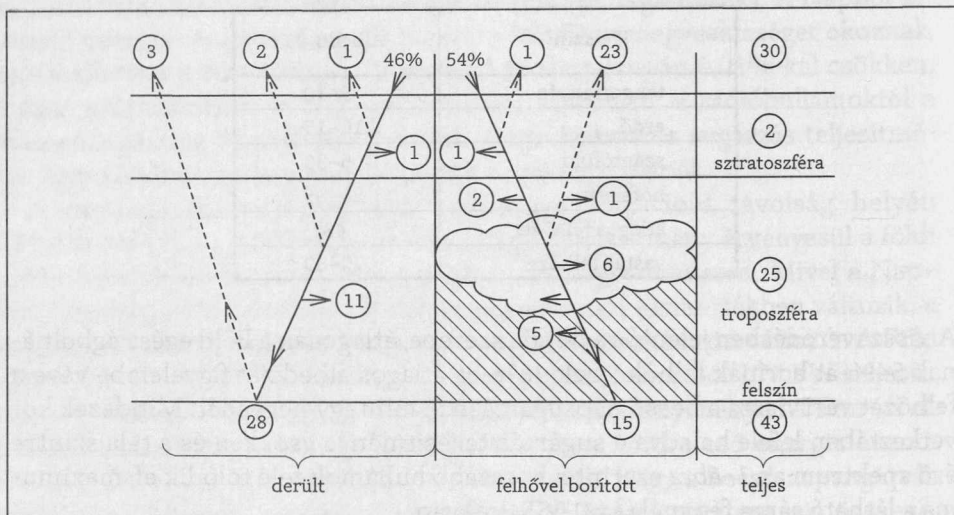
Felszínek albedójának értékei

Felszín	Albedó, %
tengerfelszín	5–10
erdő	10–15
szántóföld	5–30
hófelszín	50–95
átlagos felhőzet	48
vastag felhőzet	70–80

A visszaverődésben jelentős a felhők szerepe, átlagosan a Föld egész égboltjának 54%-át borítják felhők, ezek 48%-os átlagos albedóját figyelembe véve a felhőzet veri vissza a beeső napsugárzásnak mintegy negyedét. Mindezek következtében lefele haladva a sugárzás teljesítménye csökken és a talajszintre érő spektrum az 1. ábra szerint a hosszabb hullámok felé tolódik el, maximuma a látható sárga fénynél ($\lambda=0,555 \mu\text{m}$) van.

A beeső napsugárzás sorsát sematikusan a 2. ábra szemlélteti. A beérkező napsugárzás 46%-a felhőtlen, derült területen éri a Földet, e teljesítményhányadból 1%-ot a sztratoszféra ózonpajzsa, 11%-ot a troposzféra nyel el, szóródás következtében kilép a világűrbe 3%, és a felszínről ugyancsak 3% visszaverődik. Vagyis a beeső 46%-ból 12%-ot elnyel a légkör, 6% közvetlenül visszaverődik a világűrbe, és a megmaradó 28%-ot nyeli el a felszín a derült területen. A felhővel borított területet éri a beeső napsugárzás 54%-a, ebből az ionoszféra 1%-ot elnyel és 1%-ot kiszór, a felhők feletti légrétegek 2%-ot nyelnek el, így a felhőket a sugárzás 50%-a éri. A felhők felső rétegeiről 24% verődik vissza, de ennek 1%-át is elnyeli a levegő, így csak 23% jut ki a világűrbe. Maguk a felhők 6%-ot, az alattuk levő sűrű légrétegek 5%-ot abszorbeálnak, a felszínre csupán 15% jut. Összegezve, a Földet érő napsugárzásnak kerekén 30%-a visszaverődik, 27%-át elnyeli a légkör és 43%-a ($76 \text{ PW} = 2,4 \text{ YJ/év}$) jut a Föld felszínére, amiből a kontinensek és a tengerek közötti felületarányuk megfelelően 29%-a jut a szárazföldekre ($22 \text{ PW}=0,7 \text{ YJ/év}$).

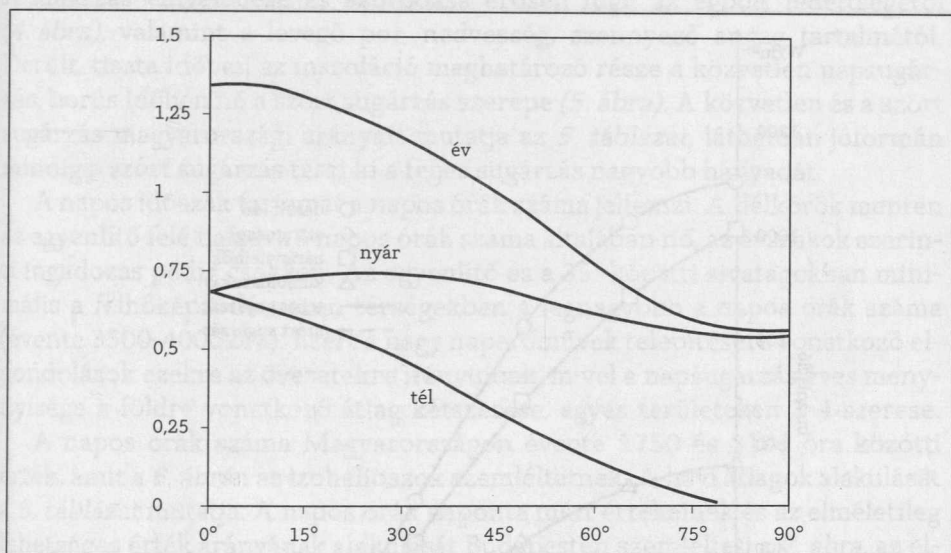
A Napból származó sugárzáshoz földi eredetű (terresztriális) infravörös sugárzás párosul, a légkörben és a felszínen elnyelt energia ugyanis hővé alakul, és ez az elnyelt hő kisugárzódik. E közegek 200–300 K hőmérsékletének megfelelően sugárzásuk a 4 és 100 μm közötti infravörös tartományba esik, maximuma 10 μm táján van. Sugárzásuk spektrumát lényegesen módosítja a levegőben levő részecskék szelektív abszorpciója. Az energiaviszonyok alakulásában megkülönböztetett szerepe van a légkörben található üvegházgázoknak, e legáltalább kétféle atomot tartalmazó molekulák (pl. H_2O , CO_2 , CH_4) szelektíven elnyelik, illetve kisugározzák az infravörös hullámokat. Az üvegházgázok felszín

A beeső napsugárzás mérlege (százalékos értékek)

felé irányuló sugárzása hozza létre az üvegházhatást, aminek következtében a bioszféra hőmérséklete átlagosan mintegy 30 °C-kal magasabb, mint amekkora lenne üvegházgázok nélkül. Ezt a hatást növelik az emberi tevékenység – jó részét a tüzelés – során kibocsátott üvegházgázok. A légkör energiaegyensúlya ismétlődő elnyelési, kisugárzási, visszaverődési és szóródási folyamatok közepette meglehetősen bonyolult alakul. Mivel a beeső napsugárzásnak közel negyedét köti le a vízkörfolyamat fenntartása, az energiaviszonyokat jelentősen befolyásolja az ennek során kialakuló halmazállapot-változások közben elvont, illetve felszabadult rejtett hő. Az elpárolgztatásban a tengerek szerepe természetesen sokkal nagyobb, mint a szárazföldeké. Ugyancsak befolyásolják az energia-egyensúlyt a felszínről hőt konvekcióval felszállító turbulens légáramlások is, a magasabb hőmérsékletnek megfelelően a kontinensek hőátzármaztatása valamivel erősebb, mint a tengereké.

A bonyolult kölcsönhatások eredményeképp a felszínt érő sugárzás – az inszoláció – két típusa különböztethető meg, a Napból érkező közvetlen sugárzás és a többféle eredetű diffúz szórt sugárzás. A közvetlen sugárzás a légkör abszorpciók hatásaival gyengített 0,29-4,0 μm hullámhosszú elektromágneses rezgés, legnagyobb része a 0,38 és 0,78 μm közötti spektrumba eső látható fény, a 2,5 μm -nél hosszabb hullámok szerepe már nagyon kicsi. A szórt sugárzás többféle hatás eredője, része a légkörben szétszórt napsugárzásnak a felszín felé irányuló hányada, a légkör hőtartalmának megfelelően kisugárzott infravörös hullámok lefelé irányuló összetevője, valamint a relatív helyzetétől függően a felszín által visszavert fény egy része és a felszín

Sugárzási energia a földrajzi szélesség függvényében



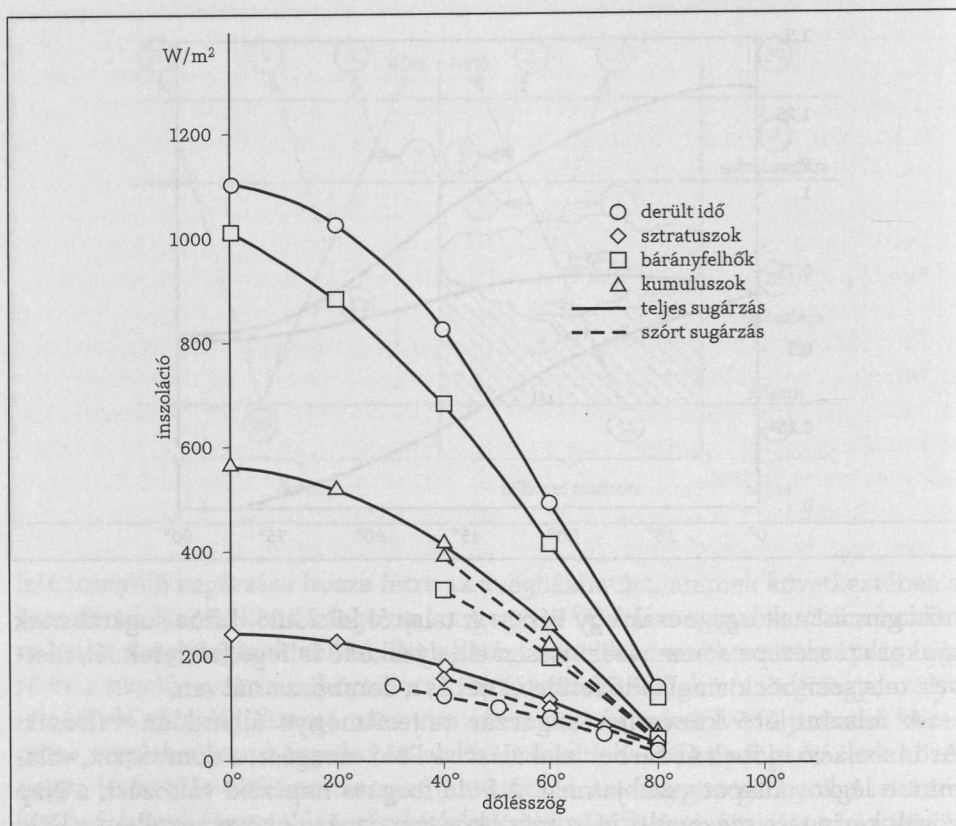
hősugárzásának ugyancsak egy része. A talajról kiinduló diffúz sugárzásnak gyakorlati szerepe a nem vízszintesen elhelyezkedő felfogó felületeknél, illetve a talajszintből kiemelkedő felületeknél és a domborzatnál van.

A felszínt érő közvetlen sugárzás teljesítménye állandóan változik. Az inszoláció időbeli és térbeli alakulását a Föld mozgása, a domborzat, valamint a légkör állapota szabja meg. A Föld forgása napszaki változást, a Nap körüli keringése szezonális változást okoz, a mozgások következtében a Föld egyes pontjainak a Naphoz viszonyított relatív helyzete folyamatosan módosul, ez szabja meg a Nap észlelt „pályáját”.

A napfény csillagászatilag meghatározott időtartama az északi féltekén a nyári napforduló (június 21.) idején a leghosszabb, utána a nappalok rövidülnek, majd a téli napfordulót (december 22.) követően hosszabbodnak, a tavaszi és őszi napéjegyenlőség idején a nappalok hossza 12 óra. Annak következtében, hogy a Föld forgástengelye 23,45 fokos szöget zár be a keringés pályasíkjára emelt merőlegessel, a nyári fél évben a Nap felé forduló északi félteke sokkal több sugárzást ér, a téli fél évben pedig sokkal kevesebb. A földrajzi szélességtől függően a közvetlen sugárzás eltérő szögek alatt éri a felszínt, a hatásos fluxus a beeső sugárzás iránya és a felület normálisa közötti szög koszinuszával arányos, a szög a Föld mozgásának megfelelően folyamatosan változik. A földrajzi szélesség szerepét a napi inszolációra a 3. ábra mutatja nyári, téli és évi átlagokra. A maximális sugárzás déli időpontjától távolodva csökken a beesési szög, és nő a sugárzást elnyelő légréteg vastagsága.

4. ábra

A felhőzet és a dőlésszög hatása az inszolációra



5. táblázat

A közvetlen és a szórt sugárzás aránya Magyarországon

%	Hónapok												Éves átlag
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
közvetlen	27	35	39	42	44	47	48	48	46	46	26	29	44-46
szórt	73	65	61	58	56	53	52	52	54	54	74	71	56-54

A domborzat szerepe egyrészt a sugárzás leárnyékolásában nyilvánul meg, a völgyekben rövidül a napos időszak. Másrészt szerepe van a tengerszint feletti helyzetnek is, mivel magasabban vékonyabb az elnyelő troposzféra réteg. Magyarország területének 85%-a síkság és alacsony dombvidék, így a

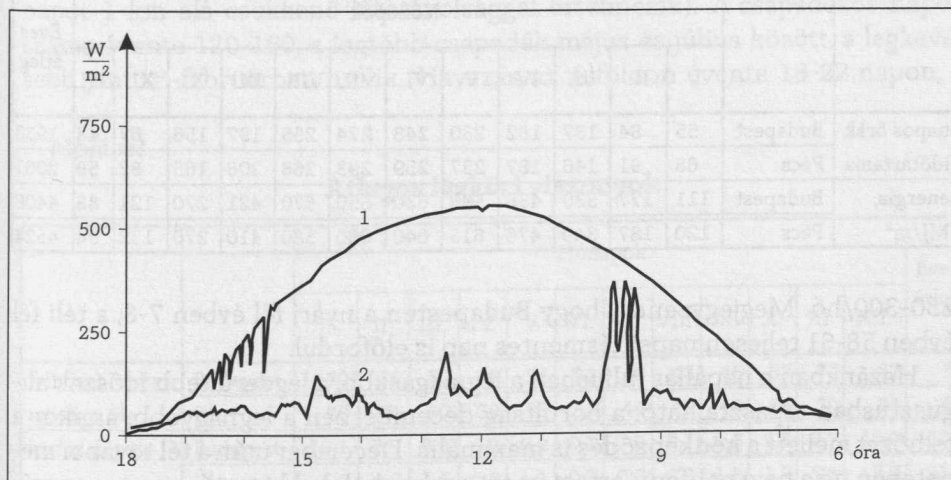
domborzati viszonyok befolyása kicsi. Jelentős viszont a légkör szerepe, amelynek összetétele és állapota függ a változó meteorológiai viszonyoktól. A sugárzás elnyelődése és szóródása erősen függ az égbolt fedettségétől (4. ábra), valamint a levegő por, nedvesség, szennyező anyag tartalmától. Derült, tiszta időben az inszoláció meghatározó része a közvetlen napsugárzás, borús időben nő a szórt sugárzás szerepe (5. ábra). A közvetlen és a szórt sugárzás magyarországi arányait mutatja az 5. táblázat, láthatóan jóformán mindig a szórt sugárzás teszi ki a teljes sugárzás nagyobb hányadát.

A napos időszak tartamát a napos órák száma jellemzi. A délkörök mentén az egyenlítő felé haladva a napos órák száma általában nő, az évszakok szerinti ingadozás pedig csökken. Az egyenlítő és a 35° közötti sivatagokban minimális a felhőképződés, ezen térségekben a legnagyobb a napos órák száma (évente 3500-4000 óra). Ezért a nagy naperóművek telepítésére vonatkozó elgondolások ezekre az övezetekre irányulnak, mivel a napsugárzás éves mennyisége a földre vonatkozó átlag kétszerese, egyes területeken 3-4-szerese.

A napos órák száma Magyarországon évente 1750 és 2100 óra közötti érték, amit a 6. ábrán az izohelioszok szemléltetnek. A havi átlagok alakulását a 6. táblázat mutatja. A napos órák naponta mért értékeinek és az elméletileg lehetséges érték arányának alakulását Budapesten szemlélteti a 7. ábra, az eloszlás meglehetősen szeszélyes. Az arány éves átlagban 0,45, a nyár közepén 0,55-0,60-as érték is gyakori, de télen nem ritka a 0,15-0,20-as arány sem. A sokévi átlag alapján a napos órák száma télen 40-90/hó, nyáron viszont

5. ábra

A napsugárzás teljes intenzitása vízszintes felületen

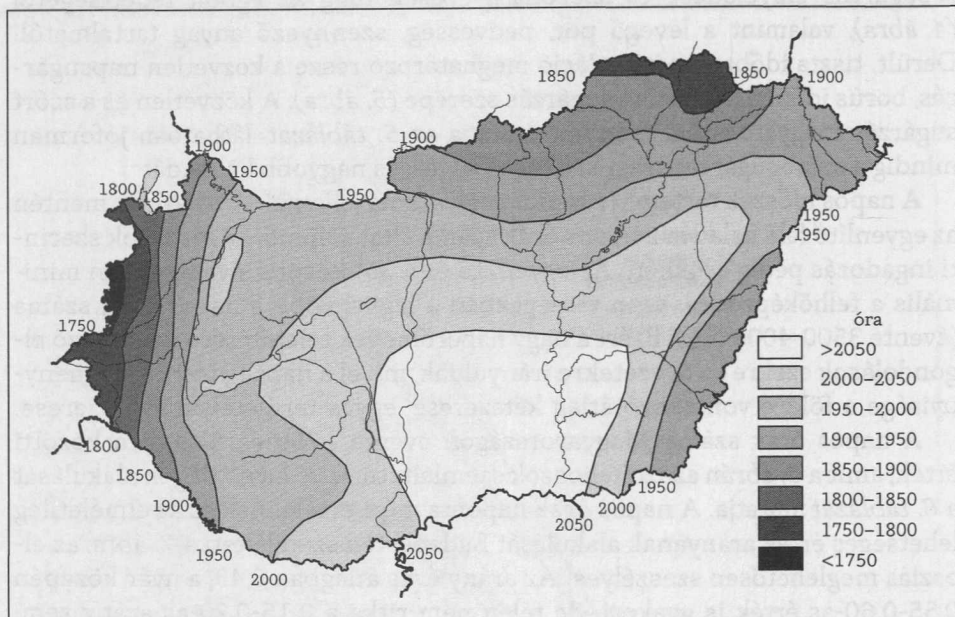


1. március 26-án derült időben,

2. április 4-én borús időben

6. ábra

A napsütéstartam évi összegének területi megoszlása Magyarországon



6. táblázat

Napos órák havi és évi átlaga

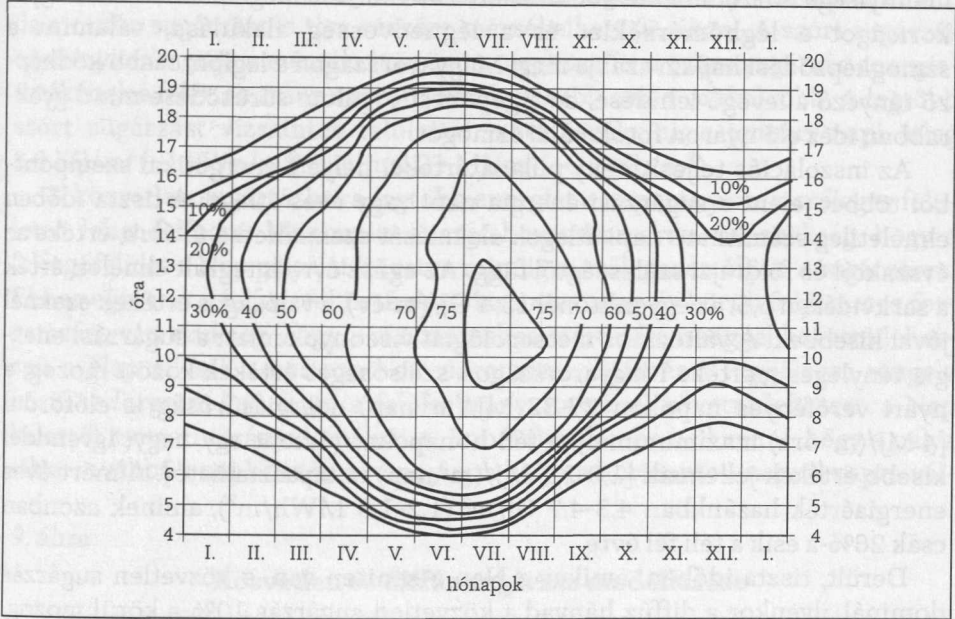
		Hónapok												Éves átlag
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
napos órák időtartama	Budapest	55	84	137	182	230	248	274	255	197	156	67	48	1933
	Pécs	68	91	146	187	237	259	293	268	206	165	82	59	2061
energia, MJ/m ²	Budapest	111	177	330	438	598	630	650	570	421	270	121	88	4406
	Pécs	120	187	340	476	615	640	660	580	410	270	132	94	4524

250-300/hó. Megjegyzendő, hogy Budapesten a nyári fél évben 7-8, a téli fél évben 58-61 teljesen napsütésmentes nap is előfordul.

Hazánkban a napállás júliusban a legmagasabb, a legderültebb időszak augusztusban tapasztalható, a borultság decemberben a legnagyobb, amikor a felhőzet mellett a ködképződés is maximális. December után a tél további menetében nő a havi napfénytartam, mert gyakran alakul ki tartós magasnyomású légköri képződmény, ami megakadályozza a felhőképződést, és a napmagasság is emelkedik. A legtöbb napsütést az ország középső részének déli fele

7. ábra

A napfénytartam átlagos alakulása Budapesten



kapja, a legkevesebbet a Nyugat-Dunántúl és az Északi-Középhegység, bár a Kékestetőn kiemelkedően magas a napos órák száma.

A csapadékos, ködös időszakok arányát a 7. táblázat érzékelteti (a ködös napot 1 km alá csökkenő látótávolsággal értelmezik). A csapadékos napok száma évente 120-160, a legtöbb csapadék május és július között, a legkevesebb január–februárban hullik. Havazás az Alföldön évente 18-22 napon, a

7. táblázat

Átlagos légköri viszonyok

		Hónapok												Éves átlag
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
felhőzet mennyisége, %	Budapest	70	65	59	58	54	52	46	43	46	57	71	77	58
	Pécs	70	64	60	60	53	51	44	40	46	56	70	74	57
ködös napok száma	Budapest	10,1	7,5	3,4	0,7	0,2	0,1	0	0,1	0,6	2,5	7,7	10,9	48,8
	Pécs	5,7	4,2	1,5	0,6	1,1	0,7	0,6	0,9	1,3	1,7	5,3	7,9	31,5
csapadék, mm	Budapest	32	31	29	38	55	63	52	51	40	33	52	40	516
	Pécs	39	32	38	55	63	84	61	63	47	37	56	44	619

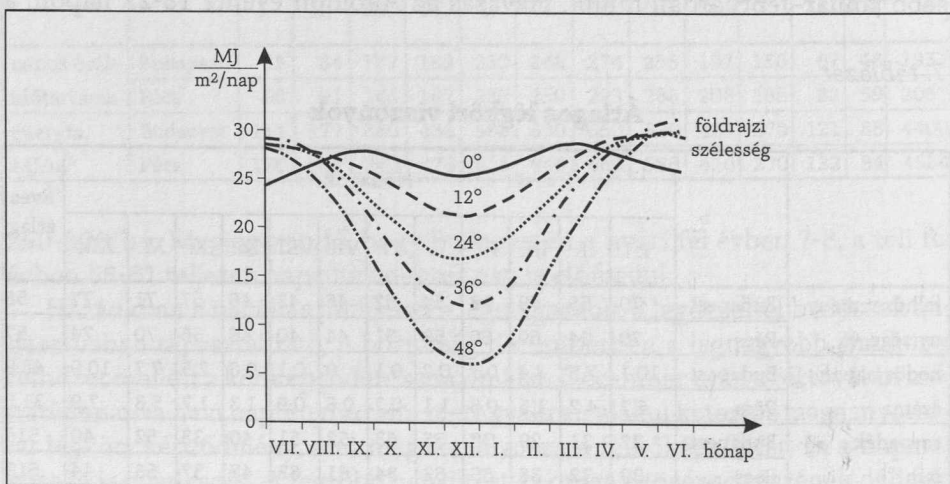
dombvidéken 25-30 napon, és 900 m felett 50-60 napon fordul elő, évente mintegy 80 napon fordul elő valahol az országban jégeső. A havas csapadék mennyisége 40-70 mm, de 400 m felett 100 mm-t is meghaladhat. A ködgyakoriságot a léghőmérséklet és a légnedvesség alakulása, valamint a szmogképződési hajlam szabja meg, Magyarországon a legfontosabb ködképző tényező a levegő lehűlése, de a gépkocsiforgalom sűrűsödése mind gyakrabban idéz elő nyáron fotokémiai szmogot.

Az inszolációs teljesítmény pillanatértékei helyett energetikai szempontból többet jelent a sugárzási energia napi vagy éves átlaga. A tiszta időben elméletileg számítható napi átlagok alakulását szemlélteti a 8. ábra, értéke az évszaktól és földrajzi szélességtől függ. Az egész évre integrált elméleti érték a sarkvidéken 5,5, az egyenlítőnél 13,4 GJ/(m²év), a valóságos értékek ezeknél jóval kisebbek. A változatos meteorológiai viszonyok miatt a sugárzási energia tényleges mértéke Magyarországon szélsőséges értékek között mozog, a nyári verőfényes napokon 27-32 MJ/(m²·nap) energiasűrűség is előfordul [4 MJ/(m²·óra) maximummal], a téli hónapokat viszont egy nagyságrenddel kisebb értékek jellemzik [1,9-2,1 MJ/(m²·nap) is tapasztalható]. A mért éves energiaérték hazánkban 4,3-4,7 GJ/m² (1,2-1,3 MWh/m²), aminek azonban csak 26%-a esik a téli fél évre.

Derült, tiszta időben, amikor a Nap a zeniten van, a közvetlen sugárzás dominál, ilyenkor a diffúz hányad a közvetlen sugárzás 10%-a körül mozog. A közvetlen sugárzás maximumát jelentő déli időponttól távolodva nő az abszorpció és a szórás szerepe, és ezzel a diffúz sugárzása is, ami napkeltekor és napnyugtakor a teljes sugárzás felét is elérheti. Természetesen az időjárás

8. ábra

Átlagos napi energiabesugárzás

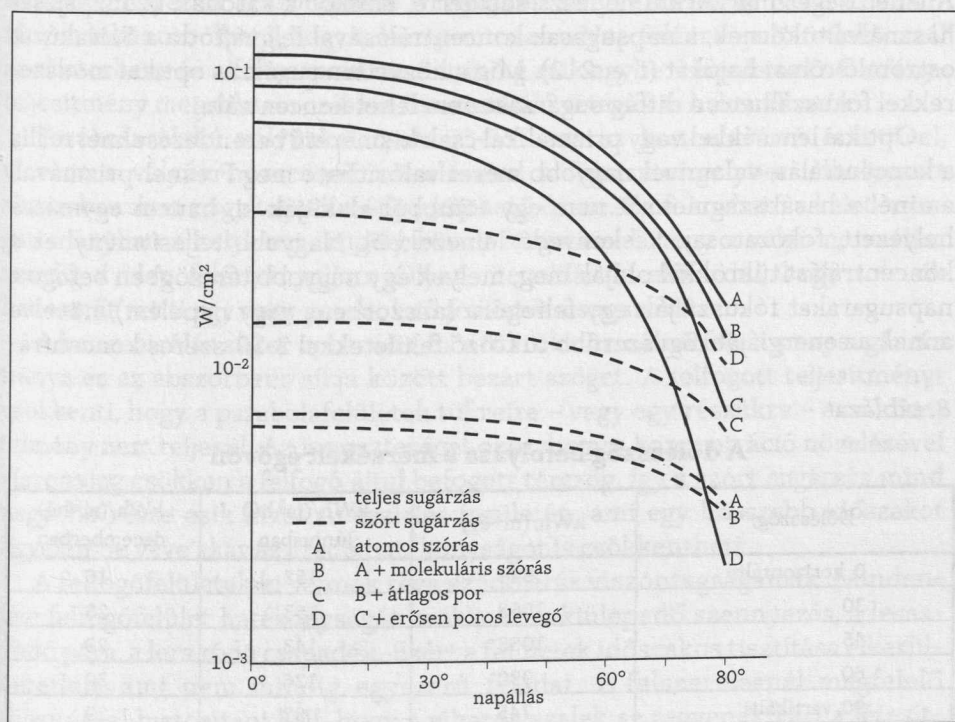


szerepe jelentős, fedett égbolt, köd, poros levegő, nagy nedvességtartalom vagy szennyezett levegő megnöveli a szórt sugárzás arányát, vastag felhő, sűrű köd, intenzív aeroszol szennyezés a közvetlen sugárzást teljesen el is nyelheti, de a diffúz sugárzást is tört részére mérsékelheti (9. ábra). A szórt sugárzás egyévnyi energiája a mérsékelt égövön megközelíti a teljes sugárzás energiaértékének a felét, az arány nyáron jóval kevesebb, télen sokkal több. A legtöbb szórt sugárzást vízszintes felülettel lehet érzékelni, a januári napi átlag $3,6 \text{ MJ/m}^2$ ($\sim 1 \text{ kWh/m}^2$), a júliusi 21 MJ/m^2 ($\sim 6 \text{ kWh/m}^2$).

A közvetlen sugárzásból a legtöbb energiát a nap irányára merőleges felületen lehet felfogni. Maximális energiahozamhoz arra van szükség, hogy a felfogófelület a Nap pályáját követve mindig merőlegesen álljon a sugárzásra. Ehhez egyrészt a felfogófelületnek a vízszintes tengely körüli folyamatos forgatására van szükség, hogy a vízszinteshez mért dőlésszöggel követni lehessen a Nap állását a horizonthoz viszonyítva. Másrészt függőleges tengely körül is forgatni kell, hogy a felület irányultságával követni lehessen a Nap keletről nyugatra irányuló pályáját. Ennél figyelembe kell venni, hogy a pálya síkja, továbbá a napkelte és a napnyugta helye a horizonton napról napra vál-

9. ábra

Közvetlen és diffúz sugárzás modellezése



tozik északi, illetve déli irányban tolódva el az évszakok változásának megfelelően. A nappálya zenitje, valamint a napkelte délkeleti és északkeleti, illetve a napnyugta délnyugati és északnyugati szélső helyzetei a megfigyelési pont földrajzi szélességétől függenek. A Nap mozgásának követésére érzékelőkkel vezérelt motorokkal mozgatott felfogó felületeket (heliosztátok) alkalmaznak. Ilyen bonyolult szerkezetek az energiahozam maximalizálására csak igényes berendezéseknél fizetődnek ki.

Kevésbé igényes berendezéseknél a felfogó felületek helyzetét rögzítik, például háztetőkre, vagy állványokra szerelve. Az égtájak szerinti irányultságban a déli a legkedvezőbb, de csupán néhány százalék energiaveszteség származik az attól eltérő állásszögből a délkeleti és délnyugati irányok között. A vízszinteshez mért dőlésszög a napéjegyenlőség napjain akkor optimális, ha megegyezik az adott hely délkörének szögével. Ha főleg a nyári fél évben van szükség energiára, akkor kedvezőbb egy enyhébb, inkább horizontális ($\sim 20^\circ$ -kal kisebb, mint a délkör) pozíció, a téli fél évben pedig egy meredekebb, inkább vertikális ($\sim 20^\circ$ -kal nagyobb) dőlésszög célszerű. Természetesen a rögzített dőlésszöggel felfogható energia kisebb, mint ami a Nap pályáját követő megoldással lehetséges, de az eltérések nem szélsőségesen nagyok (8. táblázat).

Nagy teljesítménysűrűség eléréséhez optikailag koncentrálják a sugárzást. A lehetőséget már Arkhimédész felismerte, amikor a katonák bronzpajzsát használva tükörnek, a napsugarak koncentrálásával felgyújtotta a Szirakúzást ostromló római hajókat (i. e. 212). Míg a közvetlen sugárzás optikai módszerekkel fókuszálható, a diffúz sugárzást nem lehet koncentrálni.

Optikai lencsékkel vagy prizmákkal csak kisméretű berendezéseknél reális a koncentrálás, valamivel nagyobb méret valósítható meg Fresnel-prizmával, aminél a hasábszegmenset nem egy tömbből alakítják ki, hanem egymásra helyezett, fokozatosan keskenyedő lemezekből. Nagyobb teljesítményhez a koncentrációt tükrökkel oldják meg, melyek egy nagyobb térszögben befogott napsugarakat fókuszálják egy felfogóra (abszorbens vagy napelem), növelve annak az energiáját. Egyszerűbb tükröző felületekkel 2-10-szeres koncentrá-

8. táblázat

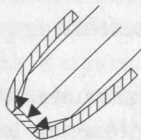
A dőlésszög befolyása a mérsékelt égövön

Dőlésszög, °	kWh/(m ² ·év)	kWh/(m ² ·hó) júniusban	kWh/(m ² ·hó) decemberben
0, horizontális	944	153	16
30	1068	153	25
45	1053	143	29
60	990	126	30
90, vertikális	745	82	29

Optikai koncentrátorok



a) parabolatükör



b) Winston-tükör

cio valósítható meg, nagyobb koncentráció érhető el parabola alakú tükröző felületekkel, amik kialakíthatók kis sík tükördarabkák sokaságából, vagy hajlékony fólián kialakított fényvisszaverő felülettel. A legnagyobb, akár több ezerszeres koncentrációt – és ezzel nagyon magas (1000-2000 °C) hőmérsékletet – lehet elérni paraboloid reflektorokkal, melyeknél az abszorbenst a fókuszpontba kell helyezni. Ez a konstrukció szempontjából kényelmetlen elhelyezkedés megkerülhető a koncentráció némi csökkentése árán a Winston-tükörrel, melynél a visszaverő felületek a fókuszpont helyett a paraboloid fenekére helyezett abszorbensre irányítják a fényt (10. ábra). Ezzel az a hátrány is kiküszöbölhető, hogy a nem pontosan a Nap felé irányuló reflektornál az abszorbens és a fókuszpont nem mindig esik egybe. Napelemeknél a fényt teljesítmény megsokszorozására fluoreszkáló rétegek is használhatók.

Parabola alakú vályúkkal csak 50-150-szeres koncentráció érhető el, viszont a vályúk hosszának növelésével a fókuszpontban elhelyezett abszorbensben nagy teljesítmény gyűjthető össze. Ez fokozható a kelet-nyugati irányban elhelyezett tengely körüli forgatással, hogy a vályú normálisa mindig a Nap felé irányuljon. Olyan megoldás is előfordul, hogy sok sík heliosztát vetíti egy nagy paraboloid felületre a sugarakat.

A koncentrálás akkor optimális, ha a tükrök normálisa felezi a napsugárzás iránya és az abszorbens síkja között bezárt szöget. A felfogott teljesítmény csökkenti, hogy a parabolafelületek tükreire – vagy egy részükre – ez a követelmény nem teljesül. Az is veszteséget okoz, hogy a koncentráció növelésével viszonylag csökken a felfogó által befogott térszög, így a szórt sugárzás mind nagyobb része esik kívül az észlelés területén, ami egy hosszabb időszakot figyelembe véve akár az eredő hatékonyságot is csökkentheti.

A felfogófelületek ki vannak téve az időjárás viszontagságainak. Mindenféle felfogófelület hatékonyságát csökkenti a kiüledő szennyezés, a lecsapódó pára, a lerakódó csapadék. Ezért a felületek időszakos tisztítása elkerülhetetlen, ami nem mindig egyszerű feladat. A felszerelésnél megfelelő rögzítéssel biztosítani kell, hogy a viharos szelek se tegyenek kárt a létesít-

ményben, de a mozgatható felületek elállítódása az erős szél hatására nem mindig kerülhető el.

A napenergia hasznosítása

A földet érő napsugárzás hatalmas teljesítményében sokan energiaszükségleteink korlátlan kielégítésének lehetőségét látják. Az üvegházhatás, az ózonlyuk, a savas esők, az élővizek kipusztulása során tapasztalhattuk, hogy viszonylag kis arányú emberi beavatkozások milyen súlyos következményeket okoztak a természet egyensúlyában. Nincs ez másképp a napenergia kiaknázásánál sem, hiszen a Napnak nagyon sokirányú szerepe van a természet rendjében. A Nap hőt és fényt biztosít a földnek, fenntartja a víz körforgását, a fotoszintézist, a légköri és tengeri áramlásokat, működteti az időjárást, és egyáltalán nem biztos, hogy minden szerepéről tudomásunk van. Ezért óvatosan kell megítélni, hogy mennyit szabad elvonni technikai célokra a napsugárzásból, a Nap természetes szerepének sérelme nélkül? Talán egy ezrelék még tolerálható mérték, bár meggondolandó, hogy a teljes földi élet fenntartását biztosító fotoszintézisre fordított energia nem éri el ezt az arányt. A realitások figyelembevételével a szárazföldekre jutó 22 TW egy ezrelékét, vagyis 22 PW-t (~ 700 EJ/év) célszerű a hasznosítható potenciál felső határának tekinteni, ami a világ jelenlegi energiaszükségletének a kétszeresét sem éri el.

Sajnos a napenergiát nagyon rossz hatékonysággal tudjuk kiaknázni. Eleve nagy hátrányt jelent, hogy a napos órák a legelőnyösebb adottságú térségben sem haladják meg az év harmadát, és gyakran még a negyedét sem teszik ki. A besugárzott energia jelentős hányada különféle okokból elvész. A tartószerkezetek helyfoglalása és a berendezések kiszolgálhatósága, valamint a kölcsönhatások (pl. árnyékolás) kiküszöbölése miatt a felfogóeszközök felülete eleve kisebb, mint a besugárzott terület. További veszteség forrása az állásszög és dőlésszög eltérése az optimálistól, különösen rögzített felfogó felületeknél. Veszteséget jelent, hogy a szórt sugárzás nagy része gyakran kiesik a felfogóeszközök látószögéből, az optikai koncentrátorok legnagyobb része pedig egyáltalán nem tudja azokat érzékelni. A berendezések többsége a frekvencia spektrumnak csak egy részét tudja hasznosítani, pl. az elektronikus eszközök főleg a látható fényt. Az energiaátalakítás (pl. fotovillamos-hatással vagy hőkörfolyamattal) hatásfoka szintén alacsony, ritkán haladja meg a 20-25%-ot. Mindezek együttesen elkedvetlenítően alacsony eredő hatásfokot eredményeznek, gyakran a hasznos energia éves átlaga a besugárzott napenergia néhány százalékát is alig éri el. A veszteségek és hatásfokok figyelembevételével a napenergia reálisan kiaknázható potenciálja kisebb, mint a világ jelenlegi tényleges összenergia szükséglete. Így illúzió annak feltételezése, hogy a napenergia akár önmagában is meg tudná oldani a 21. század energia problémáját.

A realitásokkal ellentétben időnként megjelennek olyan vélemények, hogy a világ energiaellátását nagy távlatban a napenergia fogja biztosítani. Erre az egyik irányzat nagy naperőművek létesítését ajánlja napfényben gazdag területeken, onnan látva el a napsütésben szegényebb országokat. Az erőművek telepítésére a trópusi-szubtrópusi övezet sivatagait, az egyenlítő-közeli tengereket vagy a világűrt ajánlják, a nyert energiát a sivatagi és úrbeli elhelyezésnél villamos energiával, illetve a tengeri és sivatagi változatnál ott gyártott tüzelőanyaggal (hidrogén, metanol stb.) szállítva el. Elvileg ilyen koncepciók elképzelhetők, de megvalósíthatóságuk még távlatilag sem tűnik reálisnak. A sivatagi telepítéshez még nem fejlesztették ki a nagy naperőműveket, és a szükséges nagy mennyiségű hűtővíz biztosítása is korlátot jelent. A tengeri szénhidrogén-termeléshez kifejlesztett eszközpark ugyan hasznosítható energetikai célokra is, de nagyléptékű *off-shore* vegyi művek létesítésére még elképzelések se születtek. Valószínű, hogy még a műszaki problémáknál is nagyobb akadályt jelent a politikai lehetőségek hiánya, hiszen a koncepciók megvalósításához nagyon stabil és biztonságos nemzetközi együttműködésre lenne szükség, aminek a feltételei belátható időn belül aligha teremthetők meg. Az űrbe kihelyezett naperőmű elemei már működnek az űrhajókban, de a feljuttatás költségei jelenleg horribilisek (400-500 USD/kg).

A nagyléptékű hasznosítás másik irányzata a decentralizált ellátásban látja a jövőt, melyben az energiafogyasztók saját napkollektoraikkal biztosítják az önellátást. Ez az elképzelés decentralizált településformát tételez fel, mivel a nagyvárosokban nehéz elegendő felületet találni a sugárzás összegyűjtéséhez, még ha a kollektorok vagy napelemek burkoló vagy árnyékoló épületelemek szerepét is betöltik. A napenergiára alapuló autonóm ellátás lehetőségét egyrészt az korlátozza, hogy a föld jelentős részén kevés a napsütés, másrészt a társadalmi mozgások – különösen a fejlődő világban – az urbanizáció irányába mutatnak, és nem a szétszórt települések felé.

A jövőben várható a napenergia jelentős térhódítása, de nem a voluntarista globális koncepciók szerint, hanem fokozatosan, a helyi adottságoktól függően, ahogy sikerül olcsó berendezéseket és eszközöket kifejleszteni. A vízmelegítésre használt síkkollektorok kedvező meteorológia adottságú térségekben már elérték a versenyképesség küszöbét, és a napelemek is teret hódítanak a villamos hálózattól távol fekvő fogyasztóknál. A szélesebb körű hasznosítás versenyképessége azonban – főleg a magas fajlagos beruházási költség miatt – még várat magára. Ezért jelenleg a napenergia csak járulékos energiaforrás szerepét tudja betölteni helyi igények kielégítésére, napos időszakban, kiegészítő jelleggel. A műszaki fejlődés azonban szélesíteni fogja az alkalmazhatóság körét, ami ösztönzést és támogatást érdemel, hogy e folyamatosan megújuló, és a környezetet kevésbé szennyező erőforrást minél nagyobb arányban hasznosítsák. A napenergia hasznosítása az 1970-es

1980-as években fellendült, majd az energiaárak csökkenésének hatására visszaesett, amit a század végén újabb fellendülés követett.

A Magyarországot érő napsugárzás 1 ezrelékes mértéke ~ 400 PJ/év, ami a hasznosítás hatásfokát figyelembe véve a jelenlegi éves összenergia felhasználás 10%-a körüli hányadát tudná fedezni. A napenergia ilyen mértékű kiaknázásához az 1%-es arányt figyelembe véve az ország területéből mintegy 100 km^2 -t kellene lefedni. Ezt az elméleti potenciált azonban a szezonális megoszlás és az időjárás alakulása nagymértékben leértékeli. Ennek ellenére az ország mostoha energiahelyzete indokolja, hogy minél nagyobb arányban törekedjünk ennek az erőforrásnak a kiaknázására, mivel a napsugárzás kevés hazai energiaforrásaink egyike.

A napenergia-hasznosításnak nagy a fajlagos területigénye. Kisméretű eszközök viszonylag könnyen elhelyezhetők a szerkezeti elemekben, illetve ha nem ütközik az esztétikai követelményekbe, az épületek tetején vagy más felületein. A nagyléptékű rendszerek elhelyezésére főleg más célra nem használható térségek jöhetnek számításba a napos régiókban.

A napenergia passzív hasznosításának legősibb módja a növénytermelés a fotoszintézis révén. Ugyancsak széles körű – és többnyire nem is tudatos – az épületek passzív energiahasznosítása, ami a napsugárzás minél nagyobb mértékű begyűjtését, az energia tárolását és célszerű elosztását igényli. Ezzel az épületek fűtésében, hűtésében, világításában sok energiát lehet megtakarítani, aminek elveiről már ókori szerzőknél is lehet utalásokat találni. A fűtési energia csökkenthető az épületnek a nap járását optimálisan kihasználó tájolásával, a sugárzást nagymértékben átengedő nagy üvegfelületek alkalmazásával, az árnyékolt épületrészek hőveszteségének minimalizálásával, a szélről védett telepítéssel, valamint hőtároló épületelemekkel. Jelentősen csökkenthetők a hőveszteségek az épületek külső térelhatároló szerkezeteinek megfelelő kialakításával (réteges falszerkezetek, légréses fal- és tetőszerkezetek, utólagos külső hőszigetelés stb.). Nagy a nyílászárók szerepe, a megfelelő szigetelésen kívül az optikai tulajdonságok befolyásolásával (pl. többréteges, illetve szelektív átteresztőképességű üvegezés). Számos olyan konstrukció is megjelent, melyek az üvegházhatás elvét alkalmazó épületelemek kialakításával növelik az épületek hőhasznosítását. Ezek régóta alkalmazott példái a „napterek”, amik a napsugárzást gyűjtő üvegezett felületű előterek (veranda, tornác, lodzsa, télikert), melyekből a hő megfelelő nyílásokon keresztül jut a belső helységekre. A napfényt tükröző, irányító és terelő szerkezetekkel, üvegszálkábeles vezetéssel csökkenthető a világításra fordított energia és a természetes keringés elősegítésével a hűtés energiaszükséglete. A napenergia aktív és passzív hasznosításának kombinálásával fűtést egyáltalán nem igénylő kísérleti épületeket is sikerült kialakítani. A passzív napenergia-hasznosítás nehezen tör utat, ritkán van hajlandóság a lassan megtérülő többletköltségek vállalására, és a tájékoztatlan-ság is nagy a lehetőségekről. A hatékonyság növelésére különféle épületszer-

kezeteket fejlesztenek: szelektív és változó fényáteresztő képességű, valamint vákuum vagy gáztöltésű ablakszerkezeteket; a fényátbocsátást villamos vagy termikus vezérléssel ellátott üvegeket; kis sugárzású bevonatokat; hőtároló és hőszigetelő anyagokat; átlátszó szigeteléseket, fázisváltó hőtárolást stb. Tulajdonképpen ebbe a körbe tartozik egyes fogyasztóberendezés napsugárzástól függő vezérlése is (pl. a közvilágításé).

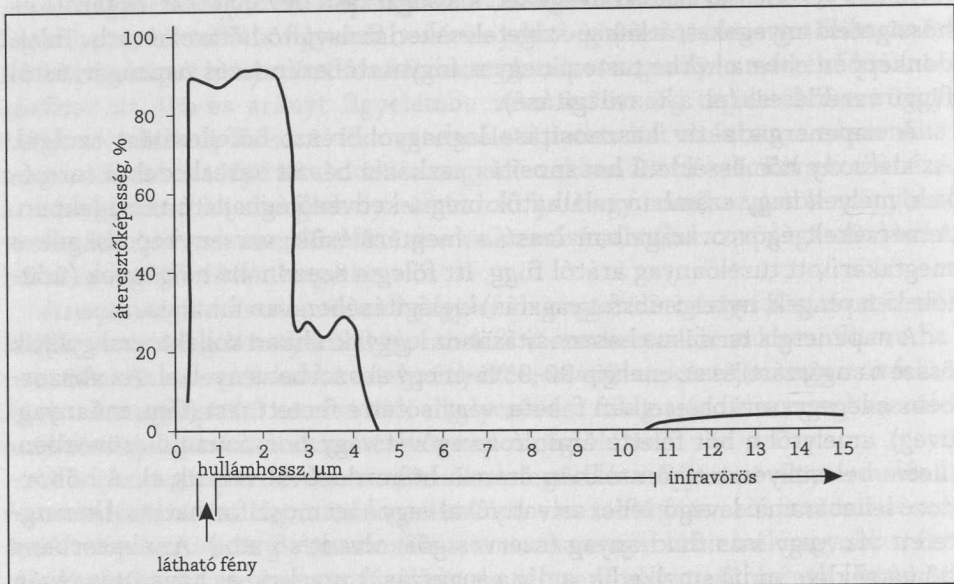
A napenergia aktív hasznosítása legnagyobbbrészt hőfejlesztést szolgál. Az alacsony hőmérsékletű hasznosítás eszközei bevált kereskedelmi termékek, melyek nagy számban találhatók meg a kedvező éghajlatú térségekben. A mérsékelt égöv országaiban lassú a megtérülésük, versenyképességük a megtakarított tüzelőanyag árától függ. Itt főleg a szezonális hőigények (üdülők, kempingek, nyári csúcsgyógyászat) kielégítésében van fantázia.

A napenergia termikus hasznosításához leggyakrabban kollektorral gyűjtik össze a sugárzást, és az energia 90-95%-át egy abszorbens nyeli el. Az abszorbens a legegyszerűbb esetben fekete, vagy sötétre festett test (fém, műanyag, üveg), amelyről a hőt felette áramló levegővel vagy hozzásimuló csövekben, illetve belesüllyesztett járatokban áramló hőhordozóval vezetik el. A hőhordozó lehet áramló levegő, lehet szivattyúval vagy a termoszfion hatással keringtetett víz, vagy más fluid anyag (szerves gőz, olvadt só stb.). Az abszorbens hőmérséklete addig emelkedik, amíg a sugárzás, konvekció és hővezetés révén leadott teljesítménye el nem éri az abszorbeált sugárzás teljesítményét. A konvekció az áramlások szabályozásával befolyásolható, a hasznosítható hő növelhető a hőelvitel fokozásával, a hőhordozó áramlási sebességének növelésével, turbulens áramlással vagy alacsony forráspontú folyadék elpárologtatásával. A hővezetés hőszigeteléssel (légréteg, vákuum, üveg, műanyag stb.), a kisugárzás az infravörös hullámok kilépésének megakadályozásával (pl. visszaverő felülettel vagy át nem eresztő réteggel) ellensúlyozható. Az utóbbinak legegyszerűbb módja az üvegházhatás kiaknázása, az abszorbens elé helyezett üveglappal, ami a látható fény 85-90%-át át bocsátja, de az infravörös sugaraknak legfeljebb 1-2%-át (11. ábra). Hasonló hatás érhető el megfelelő optikai tulajdonságú műanyag fóliával is, aminek súlya és ára sokkal kisebb. Hatékony az abszorbensre felvitt szelektív bevonat hatása is, amit sötét fémekből, fém-oxidokból vagy félvezető anyagokból lehet előállítani.

Üvegházhatást a mezőgazdaságban régóta alkalmaznak. A növényházak üveglapja és a fóliasátrak műanyagborítása a napsugarakat átengedi, a felmelegedett talaj és a növényzet infravörös kisugárzását viszont jórészt visszaveri, így a hő nagy része a zárt térben marad. A műszaki megoldások közül a legnagyobb mértékben a síkkollektorok terjedtek el, a világon üzembe helyezett készülékek felülete meghalad több tízmilliónyi m^2 -t (Magyarországon 45 000 m^2). A síkkollektorokat egyszerű kivitel jellemzi (12. ábra), rendelkezésre állásuk nagy, mivel a szórt sugárzást is hasznosítják. A hőhordozót csak mérsékeltén lehet felmelegíteni, nagyon igényes kivittel 100 °C-ot némileg

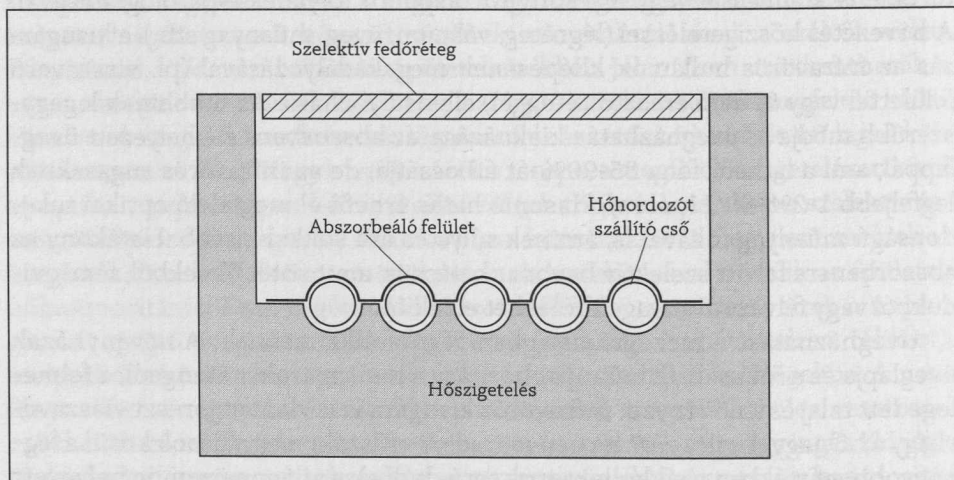
11. ábra

Síküveg fényáteresztő képessége



12. ábra

A síkkollektor elve



meghaladó hőmérséklet is elérhető. Az egyszerű megoldások hatásfoka ritkán halad meg 20-30%-ot. A hatásfok növelhető a hőszigetelést javító kettős üveglappal, az üveglap alatt kialakított vákuummal, az üveglapra felvitt sze-

lektív bevonattal, vagy kedvező jelleggörbájú, kevés vastartalmú üveg alkalmazásával.

A síkkollektorok napfényben gazdag térségekben használati melegvíz-készítésre versenyképes megoldássá váltak, és széleskörűen el is terjedtek. Mivel a kinyerhető hő a nap állásától függően változik, hőtárolással kell áthidalni az ingadozást. Rendszerint tartályban tárolnak 70-80 °C-os meleg vizet, egy háztartás egy napi használati melegvíz-szükséglete néhány m³-rel megoldható. A vízforgalmat egyszerűbb esetben a termoszfionhatás szabályozza, igényesebb megoldásnál – főleg ha együttműködik más típusú víz-melegítéssel – hőfokvezérelt szivattyú. Elsősorban nyári melegvíz-szolgáltatásra a mérsékelt égövön is teret nyernek a síkkollektorok, megfelelő energiatárolással és hagyományos melegvíz-készítéssel kiegészítve. Alkalmazhatók a síkkollektorok mezőgazdasági létesítmények fűtésére, uszodák vizének melegítésére, sőt alacsony hőmérsékletű technológiai hőigények, pl. szárítás fedezésére is. A lakásfűtésre irányuló törekvések kevés sikerrel jártak, egyrészt nehéz áthidalni a fűtési idény és a napos időszak szezonális különbségét, másrészt nagy felület tartozik a szükséges energiamennyiség összegyűjtéséhez (a szükséges kollektorfelület a fűtendő lakásterületnek mintegy fele). Leginkább pótfűtésre jöhet számításba a napenergia az átmeneti időszakokban, mert így nincs szükség a nehezen megoldható szezonális energiatárolásra. Ilyen járulékos szerepre távfűtéshez csatlakozó kísérleti telepek is létesültek. A hőtárolásnak sokféle lehetősége van, előfordulnak néhány hétre elegendő megoldások is, sőt a berlini parlament számára szezonális tárolást is megvalósítottak. Létesültek a vizet sótalanításhoz elpárolgató berendezések is, hogy a tengervíz 0,7-4,5%-os, illetve a rétegvizek 0,2-0,5%-os sókoncentrációját az ivóvízre előírt <0,15%-ra csökkentsék. Az ilyen megoldásokat azonban más eljárások (fordított ozmózis, elektrodialízis napelemekkel, esetleg uv-sugarakkal kombinálva a baktériumok megölésére) háttérbe szorították. Erősen koncentrált fénysugarak fotókatalízis révén a víztisztításban is szerephez juthatnak.

Koncentrátorokkal fejlesztettek ki magasabb hőmérsékletre is kollektorokat, parabolavályús kollektorok fókusz tengelyébe helyezett abszorbenssekkel 250-300 °C érhető el. Szelektív réteggel bevont vákuumcső tengelyébe helyezett abszorbenssel 500-600 °C-ot sikerült megvalósítani. Optikai koncentrátorral egyszerű tűzhelyek is készültek, azonban kevésbé terjedtek el, mert csak napsütés idején működnek, a készüléket mozgatni kell a nap követésére, és alkalmazása befolyásolja az étkezési szokásokat (pl. reggel és este nincs melegítési lehetőség). Nagyon magas hőmérséklet elérésére többféle kísérleti napkemence létesült, a legnagyobb nagy tisztaságú fémek előállítására 1 MW_t teljesítménnyel a Pireneusok francia oldalán. Ebben 21 000 sík heliosztát vetíti a fényt egy hatalmas paraboloid felületre, ami a sugarakat egy 45 cm átmérőjű abszorbensre koncentrálja, és így 3800-4000 °C-ot tudnak előállítani.

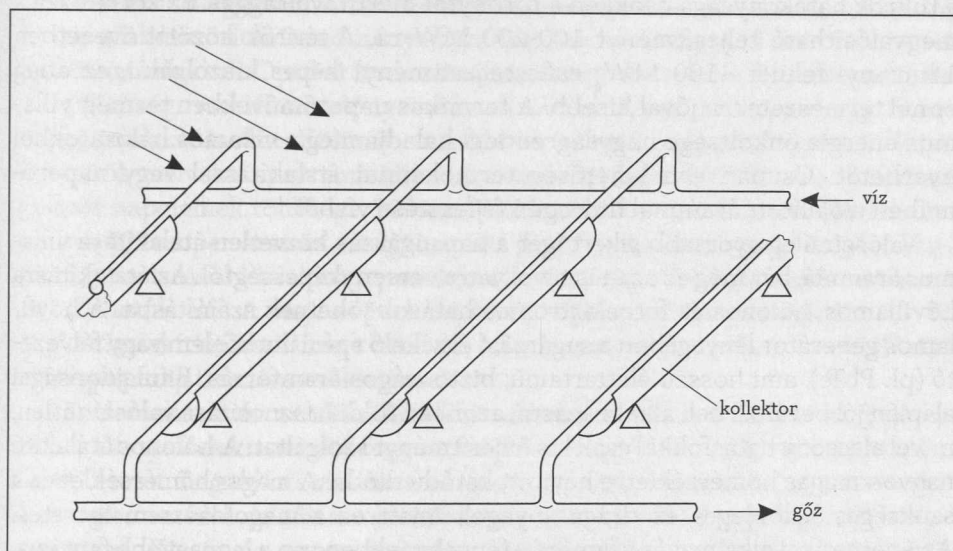
A napenergia termikus hasznosításának egy további lehetősége mechanikai munka végzése a felhevített hőhordozóval működtetett hőerőgéppel. Erre már a 19. században voltak példák sajtók, prések és más berendezések hajtására. Vilamos hálózatoktól távol fekvő, napos térségekben terjednek napenergiával működtetett erőgépek vízemelésre. Hűtésre és légkondicionálásra is ígéretes a napenergia alkalmazása hőerőgépekkel, mivel az energiaszükséglet időszaka egybeesik a sok napsütésével, de egyelőre a hűtőgépek ára visszatartó hatású. Szerves gőz munkaközegű erőgépek alkalmazására adnak módot a magas sótartalmú, néhány m mélységű naptavak, és a tó a hőtárolást is megoldja. Ezekben a sókoncentráció, és ezzel arányosan a hőmérséklet lefele nő, a tó fenekén akár $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ is kialakulhat, ahol fel lehet melegíteni a hőkörfolyamat munkaközegét. Érdekes gondolat a napkémény, aminek a fenekén az üveglappal fedett talaj hője légáramot ébreszt, ami a kéménybe helyezett szélturbinát működteti.

Jelentős fejlesztő munkát fordítanak olyan naperőművek kialakítására, melyeknél az abszorbens hőerőgéphez fejleszt munkaközeget. Parabolavályúkból álló kollektorok rendszerével („napfarm”) létesültek kísérleti berendezések 100 MW_e teljesítménytartományban (13a. ábra). A több száz m hosszú kollektorrendszer tengelyében kialakított csőkiágásban kering a munkaközeg. A befagyás és a korrózió elkerülésére munkaközegként gyakran $300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os forrpontú olajokat (hexafluór-benzol, perfluor-n-hexán, tiofén) használnak. A hosszú kollektorrendszer azonban költséges és karbantartásigényes, a hőhordozó keringtetése energiaigényes és veszteséggel jár, ezért vonzóbb a toronyra helyezett abszorbenssel kialakított erőmű.

A toronyerőműnél a nagyszámú, néhány m^2 felületű heliosztát egy $\sim 300\text{ m}$ magas torony tetején elhelyezett abszorbensre koncentrálja a sugarakat (13b. ábra), aminek a belsejében helyezkedik el a munkaközeg csőrendszere. Kisebb a hővesztesége egy alul fényáteresztő ablakkal ellátott üreges gömb abszorbensnek, melynek a belsejébe belépő sugarak hevítik a csöveket. Az abszorbens többnyire a napsütés egyenetlenségét kiegyenlítő hőtároló anyag, olvadt só (pl. nátrium-, illetve kálium-nitrát) vagy olaj, ami hőcserélőn keresztül melegíti fel a munkaközeget. A megépült kísérleti berendezések $\sim 10\text{ MW}_e$ teljesítményűek, az eddig üzembe helyezett prototípusok összegzett teljesítménye néhány 100 MW . Az erőműben konvencionális gőzturbinák használhatóak, mivel az abszorbens $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó hőmérséklete is elérhető. Munkaközegként nitrogén és hélium is számításba jöhet gázturbinák számára, kísérleteznek Stirling-motoros megoldással is. A termikus naperőművek hatásfoka alacsony, az energetikai képet az is rontja, hogy hőveszteség akkor is fellép, amikor nem süt a nap. A termikus naperőművek működéséhez tartós és erős közvetlen sugárzás szükséges, az ilyen éghajlatú száraz térségekben viszont a munkaközeg kondenzálásához szükséges nagy hűtővízigény kielégítése gondot okoz. A torony és a heliosztátok költsége, valamint a területigény jelentős. A szükséges terület sugara a torony magasságának többszöröse,

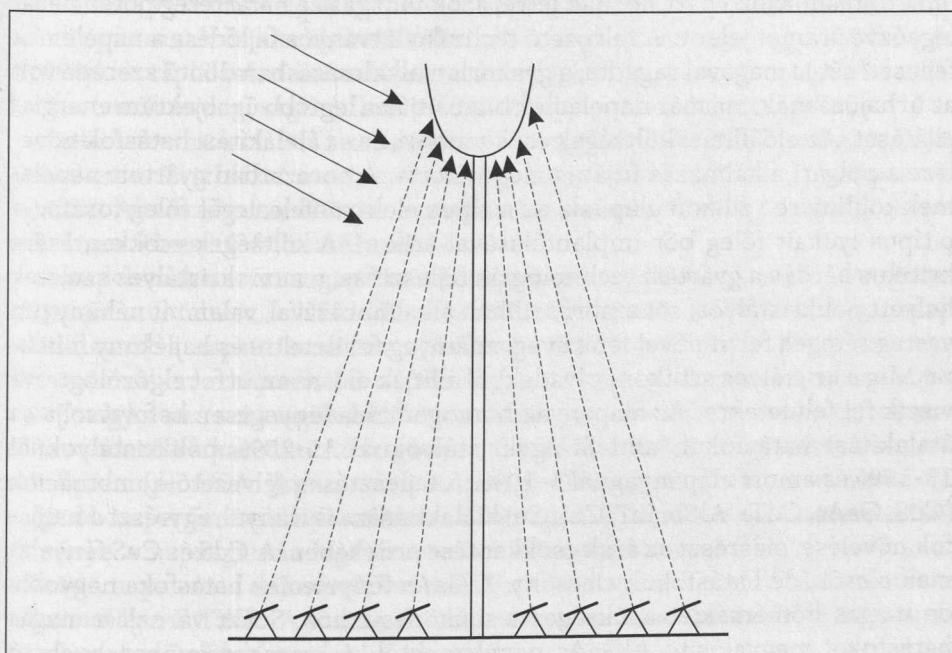
13a. ábra

Napfarm elve



13b. ábra

Naptorony elve



hogy elkerüljék a heliosztátok egymást árnyékoló hatását, a felület mintegy 30%-os arányban borítható be. A heliosztátok területfoglalása 4-8 ha/MW, de a tükrök hatékonysága csökken a toronytól mért távolsággal. Ez korlátozza a megvalósítható teljesítményt 100-200 MW-ra. A térítők közötti övezetben 1 km²-nyi felület ~100 MW_e csúcsteljesítményt képes kiszolgálni, az átlag ennél természetesen jóval kisebb. A termikus naperőművekben termelt villamos energia önköltsége nagyságrenddel haladja meg a villamos hálózatokból nyerhetőt. Csupán elvi lehetőség termokémiai átalakítással vagy naperőműben előállított árammal hidrogén fejlesztése vízből.

Valószínűleg gyorsabb sikert ígér a napsugárzás közvetlen átalakítása villamos árammá, bár még ez az út is távol van a versenyképességtől. Az átalakításra hővillamos, hőionos és fotoelektromos hatások jöhetnek számításba. A hővillamos generátor lényegében a sugárzást érzékelő speciális hőelem vagy félvezető (pl. PbTe), ami hosszú élettartamú, biztonságos áramforrás. E tulajdonságai alapján jól bevált űrbeli alkalmazásra, azonban földi hasznosítása valószínűtlen, mivel alacsony hatásfokkal csak kis teljesítményt szolgáltat. A hőionos átalakító nagyon magas hőmérsékletre hevített katódú dióda. A magas hőmérséklet és a szükséges különleges és drága anyagok miatt ez a megoldás sem ígéretes. Az energetikai alkalmazás számára a fényelemekben van a legnagyobb fantázia.

A fotoelektromos hatást már 1839-ben felfedezték (Becquerel), de a fejlesztésnek a nagy ösztönzést a félvezetőkben kialakuló folyamatok felismerése (1950, Bell-laboratórium) adta. A p-n átmenetű félvezetőkben a fénykvantumok töltéshordozó párt hoznak létre, azok mozgása a határréteg potenciálját legyőzve áramot jelent. A félvezető technika látványos fejlődése a napelemek fejlesztését is magával ragadta, a gyakorlati alkalmazásban döntő szerepe volt az űrhajózásnak, ma már napelemek biztosítják a legtöbb űrobjektum energiaellátását. Az előállítási költségek csökkentése, és az átalakítási hatásfok növelése a polgári alkalmazás útját is megnyitotta. A sorozatban gyártott napelemek többnyire szilikon alapúak, az n típus elektronfeleslegét főleg foszfor, a p típus lyukait főleg bór implantálásával érik el. A költségek csökkentésére kritikus kérdés a gyártási technológiák fejlesztése, a monokristályos szeletek helyett polikristályos, sőt amorf szilikon alkalmazásával, valamint néhány μm vastag rétegek felvitelével fém, üveg, műanyag felületekre és hajlékony fóliákra. Míg a kristályos szilikont olvadékból állítják elő, az amorft elgőzöltetve viszik fel felületekre. Az alapanyag homogenitása lényegesen befolyásolja az átalakítási hatásfokot, ami Si egykristályoknál 15-20%, polikristályoknál 13-17% és amorf alapanyagnál 5-10%. A fejlesztés új félvezető-kombinációk (CuS, GaAs, CdTe, AlSb, InP, CuInSe) kialakítására is irányul, egyrészt a hatásfok növelése, másrészt az árak csökkentése érdekében. A CdS és CuS fényelemek olcsók, de hatásfokuk alacsony. A GaAs fényelemek hatásfoka nagyobb, de magas hőmérséklet szükséges a működésükhöz. Sokat várnak a magas hatásfokot megvalósító AlGaAs napelemektől. A kereskedelembe kapható

napelemek hatásfoka jelenleg 10% körül mozog, az elméletileg elérhető maximum 40-50%, de a gyakorlati korlát közel 25%. Laboratóriumokban már sikerült 20%-ot is meghaladó értéket elérni, a tapasztalatok szerint egy évtizedet igényel a laboratóriumi eredmények átültetése a sorozatgyártásba – valamivel kisebb hatásfokkal. Optikai koncentráció alkalmazásával is foglalkoznak, de a fénysűrűség növelésére előnyösebbnek tartják a lumineszcens vagy holografikus megoldásokat. Különösen sokat várnak több olyan réteg sorba kapcsolásától, melyek a spektrum eltérő frekvenciáit hasznosítják. A sorozatban gyártott napelemek többsége 100 cm^2 felületen $\sim 0,5$ volt feszültséggel maximum 2,5 amper áramot szolgáltat. Az ilyen napelemek soros és párhuzamos kapcsolásával kialakított panelekkel tetszőleges teljesítményű rendszerek állíthatók elő. A nagy erővel folytatott fejlesztés eredményeként 30 év alatt az átalakítási hatásfokot sikerült háromszorosára növelni, az előállítási költséget pedig tizedére csökkenteni.

Napelemeket már sokféle feladatra alkalmaznak. A mW tartományban erősen elterjedtek kisméretű fogyasztási cikkek (pl. órák, kalkulátorok) táplálására. Bevált megoldás a villamos hálózattól távoli helyeken információtechnikai berendezések, jelzők és műszerek energiaellátása W nagyságrendű napelemekkel. Kieső, de napos helyeken napelemekkel működtetett 1-2 kW teljesítményű szivattyúkat használnak vízemelésre.

A fejlesztés fő célkitűzése a napelemes erőművekre irányul, melyek inverterek segítségével az együttműködő országos hálózatba is beiktathatók. Egyelőre csak a villamos hálózattól távol fekvő fogyasztók, pl. elszigetelt háztartások világításának és kisebb készülékeinek energiaellátására, vagy kihelyezett készülékek táplálására használnak akkumulátorral puffertolt megoldásokat. Kínában milliós nagyságrendben valósítottak meg ilyen rendszereket.

Az IEA szerint az OECD-országokban a napelemek kumulált teljesítménye 2001-ben a 9. táblázat szerint alakult. A leggyorsabb fejlődés Japánban, az Egyesült Államokban és Németországban tapasztalható, ezek az országok járnak élen a félvezető-fejlesztés terén is.

A napelemek a szórt sugárzást is hasznosítják, így kevésbé napos övezetekben is jól működnek, felhős időben is működőképesek, és akkumulátorokkal áthidalhatók a napsütésmentes időszakok. Alkalmazásuk jóformán minden klímaövezetben elképzelhető. A hőerőgépes naperőművekkel szemben előnyük, hogy nincs szükségük hűtővízre. A mozgó alkatrészeket nem tartalmazó berendezések karbantartási igénye kicsi, és kezelésük is egyszerű. Számos országban (pl. USA, Japán, Németország, Olaszország) sokat áldoznak a nagyobb naperőművek fejlesztésére, a legnagyobb kísérleti berendezés teljesítménye a napsugárzás legintenzívebb időszakában $10\text{ MW}_{\text{csúcs}}$, a világon működő napelemes erőművek összesített teljesítménye $\sim 1\text{ GW}$ és a termelt villamosság $\sim 1\text{ TWh}$. A szakértői vélemények 1-2 évtizeden belül várják a napelemes erőművek versenyképességét.

9. táblázat

Üzembe helyezett napelemek teljesítménye

Ország, térség	Teljesítmény, MW
Ausztria	6,6
Dánia	1,5
Egyesült Királyság	2,7
Finnország	2,8
Franciaország	13,9
Hollandia	20,5
Olaszország	20,0
Németország	194,7
Norvégia	6,2
Portugália	0,9
Spanyolország	9,1
Svájc	17,6
Svédország	3,0
<i>Európa</i>	<i>299,6</i>
Egyesült Államok	167,8
Kanada	8,8
Mexikó	15,0
<i>Amerika</i>	<i>191,6</i>
Ausztrália	33,6
Izrael	0,5
Japán	452,2
Korea	4,8
<i>Közel- és Távol-Kelet</i>	<i>491,1</i>
<i>OECD összesen</i>	<i>982,2</i>

Az űreszközök erőművi hasznosítása jó ideje foglalkoztatja az emberek fantáziáját. Egyes elképzelések csupán kihelyezett tükrökre irányultak, melyek nehezen ellátható területekre (pl. távoli szigetek) verik vissza az energiaforrásból felirányított sugarakat. Fénysugarak terjedését erősen befolyásolná a felhőzet és a légkör állapota, számottevő energia továbbításához nagy felületek szükségesek, melyeket a relatív helyzet függvényében állítani is kell. E hátrányok elesnének mikrohullám alkalmazásánál, amikor a műhold csupán egy reléállomás szerepét töltené be.

Az űrbe kihelyezett naperőmű (SSPS, Satellite Solar Power System) első gondolatát még sci-fi témának tartották, ma már tekintélyes szervezetek (NASA, a japán MITI) foglalkoznak ezek tervezésével. Az első elképzelések

még az űrhajón elhelyezett hőerőgépekkel irányozták elő a villamosenergia-fejlesztést, később a napelemek szerepe vitathatatlanra vált. A geostacionárius pályán keringő naperőmű teljesítménye gyakorlatilag állandó, mert az év 99%-ában a Föld árnyéka nem érvényesül, és időjárási körülmények sem befolyásolják a működését. A NASA tervei között szerepel egy 12 000 km-es magasságban keringő, 8 km magas, torony formájú 400 MW-os erőmű, valamint egy geostacionárius pályán keringő 5 GW-os létesítmény, $\sim 30 \text{ km}^2$ felületű napelemekkel. Az egyenáramú energiát 2,5 GHz-es mikrohullámmá alakítva 1 km-es antennával tervezik a földre sugározni egy 100 km^2 felületű vevőantennára. Nyitott kérdés a mikrohullámú fluxus hatása a repülőgépekre és madarakra. Vizsgálják az energia továbbítását lézersugárral is, bár az életveszélyes az élőlényekre. Ugyan az űrerőmű elemei már működnek az űrben, a megvalósítás még nagyon távoli remény. A létesítési költség nagyságrenddel haladná meg a földi telepítésű erőművékéét, mivel a Föld körüli pályára juttatás fajlagos költsége 20 000 USD/kg, a 35 kt-ra becsült súlyú 5 GW-os erőműnek csak a pályára juttatása sok százmilliárd dollárba kerülne.

Szélenergia

Légmozgások

A légtömegeket egyrészt az elnyelt napsugárzás, másrészt a Föld felszíne által kisugárzott infravörös sugárzás melegíti. Mivel e hatások térben és időben változatosak, a légkörben hőmérséklet- és sűrűségkülönbségek keletkeznek, nyomáskülönbségeket okozva. A nyomáskülönbségek kiegyenlítődére légmozgások és áramlások alakulnak ki, a légtömegek hőenergiájának egy része mozgási energiává alakul. Ugyan a légmozgások pályájának kialakításában a nyomásviszonyok az elsődlegesek, azt más erők és körülmények is lényegesen befolyásolják. Szerepe van a gravitációnak, a Föld forgása okozta Coriolis, valamint centrifugális erőnek, a súrlódásnak, lényegesek a levegő energiaviszonyait befolyásoló körülmények: a hőmérséklet, a sűrűség, a nedvességtartalom és annak fázisváltozásai, valamint a talajszint közelében a felszín felépítése. A sokféle hatás következtében mind függőleges, mind vízszintes irányban bonyolult térbeli mozgások keletkeznek, legnagyobb részét a troposzférában.

A légmozgások komplikált rendszerében általános és helyi szeleket, valamint ciklonokat különböztetnek meg. Az általános légkörzést az egyenlítő és a pólusok klímája közötti különbség gerjeszti, ennek hatására a magasban az egyenlítő felől a pólusok felé tartó áramlás alakul ki, a talajszinten pedig ezzel ellentétes irányú. Ezeket az áramlásokat azonban módosítják egyrészt a Föld forgásából származó erők, másrészt a Föld alakjának a hatása, mivel a sarkok felé szűkülő áramlási csatornának gyorsító hatása van. A különféle hatások

következtében az egyenlítőnél, a 30° körüli szubtropikus térrészben (itt helyezkednek el a sivatagok), valamint az $50-60^\circ$ táján lévő szubpoláris régióban szélmentes övezetek alakulnak ki. Az egyenlítő és a szubtropikus övezet között kialakuló passzátszél meglehetősen egyenletes, $5-6$ m/mp sebességgel fúj évente $290-330$ napon keresztül, legszabályosabban az óceánok felett, az északi féltekén északkeleti, a délin délkeleti irányból. A mérsékelt égövön az általános légmozgást nyugati – de sokkal egyenetlenebb – szél képviseli, a poláris régióban pedig keleti.

Az általános szélrendszerre regionális és helyi szelek, valamint ciklonok és turbulenciák szuperponálódnak, a korszerű felfogás a regionális szeleket is az általános légmozgás részének tekinti. Ilyen regionális szél a viszonylag egyenletes monszun, ami azt a különbséget egyenlíti ki, hogy az óceánok hőmérséklete sokkal kevésbé követi a téli és nyári klíma különbségeit, mint a kontinensek. A monszun télen a tenger felé fúj, nyáron esőt hozva a tenger felől, a Medárd körüli hazai esős időszakot is a monszun nyúlványának tekintik. Partvidéken a napi felmelegedés változása is okozhat gyenge kiegyenlítő szelet, pl. a Balatonon nappal a tó felől (tavi szél), éjjel a tó felé (parti szél) fújó szelet. A mérsékelt égövön hegyvidéken is előfordul helyi szél, különösen nyáron a reggeli felmelegedés a hegyre feláramló, az esti lehűlés a völgybe lenyomuló széllel.

A ciklonok a hideg és meleg légtömegek találkozásánál kialakuló határfelületről indulnak ki, függőleges tengely körül forgó mozgással. E néhány napos képződmények gyakran több hullámban vonulnak el, sebességük változó, átlagosan $6-9$ m/mp, hazánk területére legtöbbször nyugatról érkeznek. A trópusi ciklonoknak vannak hatalmas energiájú pusztító formációi is (hurrikán, tájfun). Viszonylag kis kiterjedésű forgószelek a tornádók, melyek tölcsérének külső felületén romboló erejű nagy szélsebesség alakul ki.

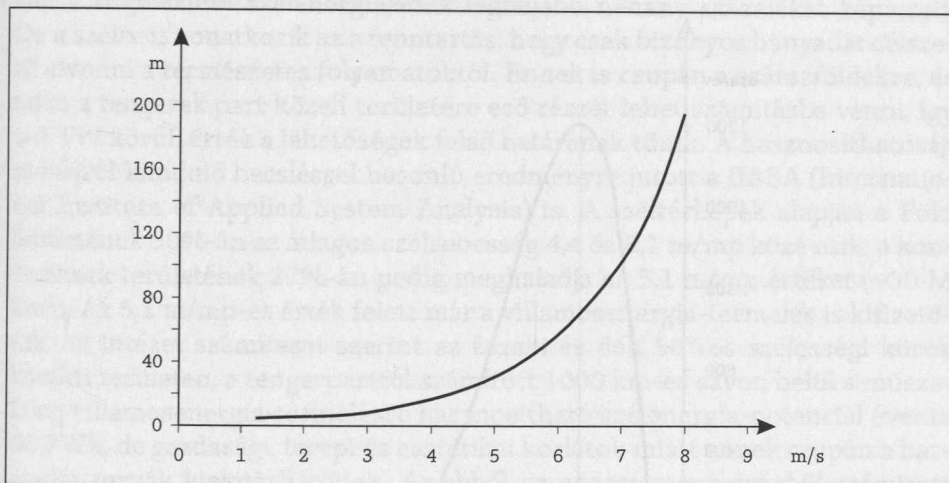
A szél vízszintes irányú sebességének értéke a magasság függvényében többnyire deformált haranggörbe szerint alakul, aminek $1-2$ km magasságban van a maximuma. A felszínen a légmozgás sebessége viszonylag kisebb a sűrűlódás miatt, a szél irányát és sebességét számottevően befolyásolja a felszín topográfiája (domborzat, erdőség, beépítettség stb.). A sűrűlódás a talajszinten turbulenciát okoz, ami még 1 km magasan is érzékelhető. Az is perturbációk forrása, hogy az áramló légtömegek összetétele és állapota sem homogén. A sokféle hatás következménye, hogy a szél ritkán egyenletes, lökések, ingadozások alakulnak ki. A felszín feletti határrétegben a szélsebesség növekedését (14. ábra) a z_1 és z_2 magasság között a

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (1)$$

összefüggés ír le, ahol v a vízszintes szélsebesség, és az α kitevő értéke $\sim 0,14$.

14. ábra

A szélesség és magasság függése



A szélenergia meghatározó jellemzője a szélesség, a ρ sűrűségű levegőben a szélre merőleges A felületen a szélnyomás a v szélesség négyzetével, a P teljesítmény pedig a sebesség köbével arányos (2. képlet). A 10. táblázat érzékelteti, hogy milyen nagy mértékben függ az elméletileg számítható teljesítmény a sebességtől.

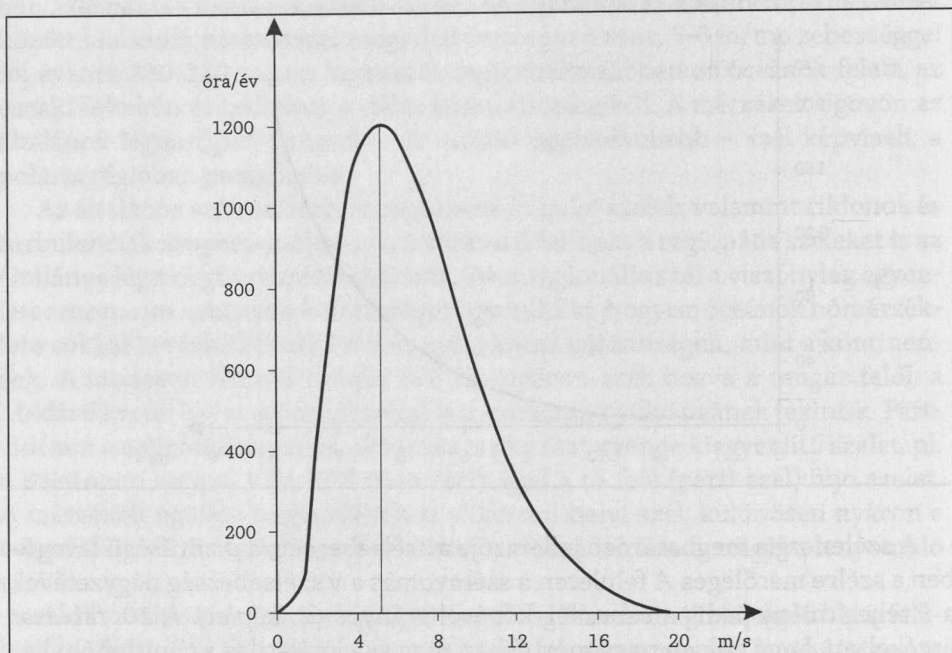
$$P = \frac{\rho A v^3}{2} \quad (2)$$

A legtartósabb széljárás a tengereken, valamint a nyílt tengerpartokon érvényesül, a parttól a kontinens belseje felé távolodva a súrlódás 150-200 km-en belül erősen lecsökkenti a sebességet. Jelentős lehet a szélenergia a hegyekben is, valamint az áramlás felgyorsulására módot adó kiterjedt fennsíkokon. A kontinensek belseje felé haladva a széljárás szeszélyesebbé válik, a 15. ábra

10. táblázat

Az elméleti teljesítmény a szélesség függvényében

Szélesség, m/sec	Szélnyomás, N/m ²	Elméleti teljesítmény, W/m ²
1	0,63	1
5	15,6	125
10	63	1000
15	140	3350

A szélsébség gyakorisága Közép-Európában

a szélsébség éves megoszlását mutatja Közép-Európában, a legvalószínűbb érték jó közelítéssel a középérték 0,67-szerese, ami az adott esetben 5,3 m/mp (a függvényt többnyire Weibull eloszlással közelítik). Az éves átlagsebességben egyik évről a másikra 25%-os különbségek is előfordulnak. A legtöbb szélenergia a tengerparti övezetekben nyerhető [$\sim 2,4 \text{ MWh}/(\text{év}\cdot\text{m}^2)$], a hegyvidékeken kevesebb [$\sim 1,6 \text{ MWh}/(\text{év}\cdot\text{m}^2)$], és az egyéb helyeken 1-0,1 $\text{MWh}/(\text{év}\cdot\text{m}^2)$.

A széljárás hazánkban meglehetősen szeszélyes, gyakran fordul elő szélcsend is. A sokéves megfigyelések szerint az évi átlagos sebesség Budapesten 1,8 m/mp, Debrecenben 2,5 m/mp, Szegeden 2,7 m/mp, Keszthelyen 3,0 m/mp, és csupán az ország legszelesebb északnyugati sarkában, Mosonmagyaróváron éri el a 4,9 m/mp-et. A havi átlagok 1,5 és 6,0 m/mp között ingadoznak, de többnyire 3,0 m/mp alatt vannak. Ezek a mérések azonban a talajszint feletti értékeket mutatják, még kevés adattal rendelkezünk az energetikai minősítéshez használt 10 m-es magasságban, valamint a szélturbinák méreteire jellemző magasabb (20-150 m) rétegekben. Ezek pótlása folyamatban van.

A légmozgásokból nyerhető energia becslését nagy bizonytalanság jellemzi. A napsugárzás teljesítménymérlege alapján a légkörben elnyelt energia tel-

jesítménye mintegy 150 TW. A szél energetikai hasznosítására legfeljebb a talajszint feletti 100-200 m-es határrétegben kínálkozik gyakorlati lehetőség, ami a troposzféra szélenergiájának legfeljebb néhány százalékát képviseli. De a szélre is vonatkozik az a fenntartás, hogy csak bizonyos hányadát célszerű elvonni a természetes folyamatoktól. Ennek is csupán a szárazföldekre, és talán a tengerek part közeli területére eső részét lehet számításba venni, így 1-2 TW körüli érték a lehetőségek felső határának tűnik. A hasznosíthatóság oldaláról kiinduló becsléssel hasonló eredményre jutott a IIASA (International Institute of Applied System Analysis) is. A széltérképek alapján a Föld felületének 50%-án az átlagos szélesebesség 4,4 és 5,1 m/mp közé esik, a kontinensek területének 27%-án pedig meghaladja az 5,1 m/mp értéket (~30 M km²). Az 5,1 m/mp-es érték felett már a villamosenergia-termelés is kifizetődik, az intézet számításai szerint az északi és déli 50°-os szélességi körök közötti területen, a tengerparttól számított 1000 km-es sávon belül a műszakilag villamosenergia-termelésre hasznosítható szélenergia-potenciál évente 26 PWh, de gazdasági, terepi és esztétikai korlátok miatt ennek csupán a harmadát tartják kiaknázhatónak. Az ebből az energiamennyiségből számított éves átlagteljesítmény ugyancsak 1 TW körül mozog. Akárhogy számítjuk is a lehetőségeket, a szélenergiával a világ jelenlegi összesített 4,5 TW-nyi erőmű kapacitásának csupán egy részét lehetne szelerőművekkel helyettesíteni.

Magyarországon a hasznosítható szélenergia mértékének a megítélése bizonytalan, mivel ehhez nem állnak rendelkezésre elegendő ismeretek. Mindenesetre az átlagos szélesebesség kis értékét és a szélcsendes időszakok tartamát figyelembe véve a kilátások nem nagyon biztatóak, a szélenergia hasznosítása az összes hazai energiafelhasználás 1%-át sem igen érheti el.

A szél hasznosítása

Az emberek korán felfigyeltek a fákat hajlítgató és a tárgyakat magával sodró szél erejére, amit igyekeztek saját céljaikra is hasznosítani. Talán csónakok mozgatása volt az első gyakorlati fejlemény, a tengerparti népek már sok ezer évvel ezelőtt nagyobb hajóik hajtására is befogták a szelet. A szél szárnyán alakították ki az ókori mediterrán kolóniákat, és a szél hajtotta a portugál karavellákat a nagy földrajzi felfedezésekre, majd az újkori gyarmatbirodalmak megalapítására.

A szélkerekeket is több ezer éve használják őrlőmalmok működtetésére, vízszivattyúzásra, gépezetek hajtására, az ilyen feladatokra alkalmazott kis szélmalomok száma a világon jelenleg meghaladja a milliót. A szélmalomok manapság elsősorban vízemelésre szolgálnak, kieső területeken állatok itatására, kisléptékű öntözésre, vízkultúrák működtetésére. A szélturbinák legjelentősebb alkalmazása a villamosenergia-termelés, ami az utóbbi évtizedben

gyorsan bővült. A jelenlegi gazdasági és műszaki feltételek mellett mechanikai munkavégzésre a szélenergia hasznosítása ott gazdaságos, ahol a 10 m-es magasságban a szélsébség átlaga meghaladja a 3 m/mp-et, így a kis teljesítményű szélturbinák majdnem mindenütt számításba jöhetnek. A villamosenergia-termelés gazdaságossága a 4-5 m/mp-et meghaladó átlagos szélsébségnél kezdődik (pl. legalább fél éven keresztül >4 m/mp).

A villamos hálózatoktól távol fekvő, vagy tartalékelátásra igényt tartó kisfogyasztók számára hasznosak az akkumulátortöltő szélturbinák, így hidalva át a korlátos működési idő és a teljesítményingadozás nehézségeit. Ezek teljesítménye 100-1000 W, a turbinák átmérője <5 m. Gyengén villamosított területeken (pl. Kína) gyorsan terjednek. A villamos hálózattól távol fekvő települések ellátására 10-100 kW-os önálló egységeket is alkalmaznak, de a tipikus megoldás kapcsolódásuk a villamosenergia-rendszerhez.

A szélerőművek fejlődésének az 1970-es évek olajkrízise adott hatalmas lökést, a fejlődésben Dánia és Kalifornia játszott élen járó szerepet, amihez később számos kedvező széljárású ország zárkózott fel. Néma állami támogatással (beruházási hozzájárulás, adókedvezmény, a villamos energia előnyös átvételi ára) a szélerőművek versenyképessé váltak, kedvező körülmények között a támogatás csökkenthető. A világon működő szélerőművek összesített teljesítményét 32 GW-ra becsülik, ami 2002-ben ~ 65 TWh-t fejlesztett. Az elmúlt évtizedben a kapacitás több mint tízszeresére nőtt, a leggyorsabb fejlődés Németországban, Spanyolországban és Dániában volt tapasztalható. A szélerőmű-kapacitásnak több mint fele az Európai Unióban található. Számos országban vannak ambiciózus szélerőmű-építési programok, Magyarországon néhány kísérleti berendezést (Inota 250 kW, Kulcs 600 kW) helyeztek üzembe, és továbbiakat terveznek (Moson).

A legtöbb működő szélerőmű teljesítménye a 100 és 700 kW teljesítménytartományba esik, de a teljesítmény növelése állandó törekvés, és már működnek néhány MW-os egységek is. A stabil hálózati kapcsolathoz biztosítani kell a frekvencia állandóságát, amit a fordulatszám automatikus szabályozásával lehet elérni. A jó hatásfok érdekében a korszerű szélerőművekben két eltérő fordulatszámú generátort alkalmaznak, ~ 10 m/mp szélsébség alatt a kisebb, afelett a nagyobb fordulatszámút iktatva be. Kedvező adottságú helyeken gyakran szélerőműtelepeket létesítenek, a több egység működtetése növeli a gazdaságosságot és megkönnyíti az üzemvitelt. A területtel való takarékoskodás érdekében *off-shore* létesítéssel is foglalkoznak, Dánia partja előtt 15-20 km-re, a nyílt tengeren 80 darab 2 MW-os szélerőműből álló telepet már létre is hoztak, a 6-14 m mély vízbe telepített egységek közötti távolság 500 m, így a teljes területfoglalás 20 km^2 . Norvégia előtt $16 \times 2,5$ MW-os telep létesítés alatt áll.

A szélturbinákat kis teljesítményűnek tekintik 10 kW alatt, nagy teljesítményűnek 100 kW felett, és közepesnek a 10 és 100 kW közötti tartományban.

A 14. ábra arra utal, hogy a szélkerekeket célszerű minél magasabbra helyezni a nagyobb szélesség eléréséhez, a korszerű szélturbinákat 30-120 m magas tornyokra helyezik, az első 5 MW-os egységhez 200 m magas szerkezetet terveznek. A villamosenergia-fejlesztésre használt szélturbinák kapacitáshelyzetét tekinti át a 11. táblázat.

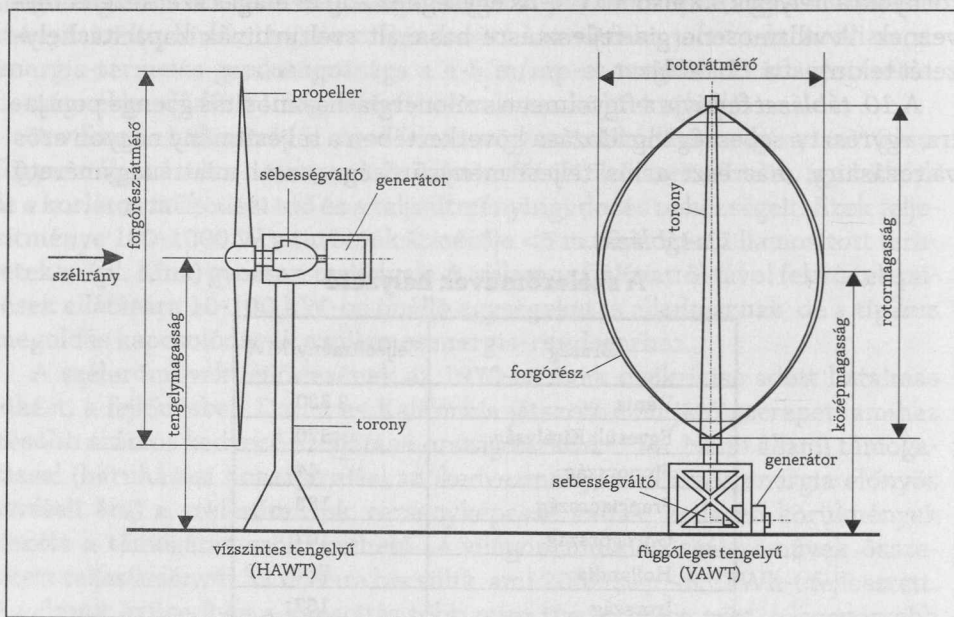
A 10. táblázat felhívja a figyelmet a szélenergia-hasznosítás gyenge pontjaira, egyrészt a sebesség ingadozása következtében a teljesítmény nagyon erős változásaira, másrészt a kis teljesítménysűrűségekre, ami miatt nagyméretű

11. táblázat

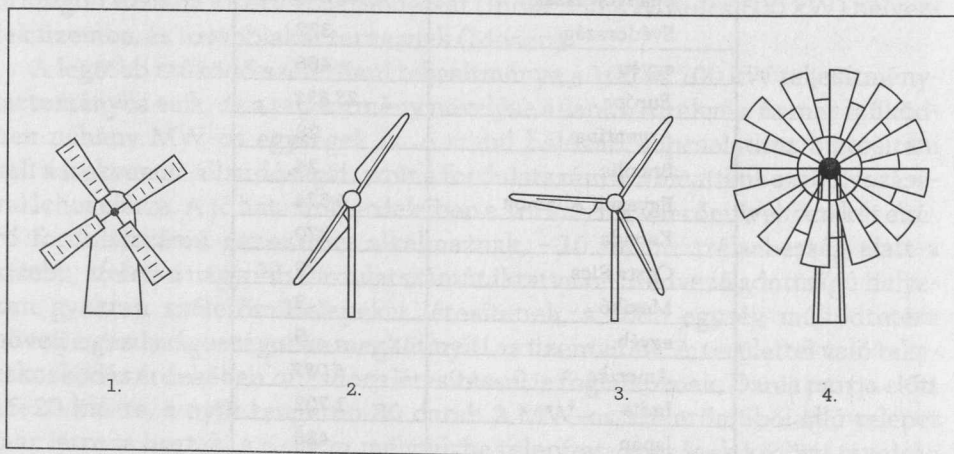
A szélenergia-művek helyzete

Ország	Teljesítmény, MW
Dánia	2 880
Egyesült Királyság	570
Finnország	44
Franciaország	183
Görögország	167
Hollandia	727
Írország	167
Németország	11 968
Olaszország	806
Portugália	204
Spanyolország	5 043
Svédország	372
egyéb	466
<i>Európa</i>	<i>23 832</i>
Argentína	28
Brazília	24
Egyesült Államok	4 674
Kanada	270
Costa Rica	79
Mexikó	3
egyéb	9
<i>Amerika</i>	<i>5 087</i>
India	1 702
Japán	486
Kína	473
egyéb	255
<i>Távol-Kelet</i>	<i>2 916</i>
<i>világ</i>	<i>32 037</i>

A szélkerekek tengelyrendezése



Vízszintes tengelyű szélturbinák



1. holland malom,
2. két propellerlapátos,
3. három propellerlapátos,
4. soklapátos

berendezésekre van szükség. A legvalószínűbb sebesség környezetében a hasznos teljesítménysűrűség csupán $40\text{--}60\text{ W/m}^2$, és a nagy sebességek tartományában is csak kW/m^2 nagyságrendű. Nagy teljesítményt csak nagy átmérőjű szélturbinákkal lehet elérni, $100\text{--}200\text{ kW}$ -hoz $20\text{--}40\text{ m}$ -es, $1\text{--}2\text{ MW}$ -hoz $60\text{--}120\text{ m}$ -es átmérőjű berendezésekre van szükség.

A széljárás ingadozása miatt a szélerőművekkel ténylegesen fejleszthető energia és az elméletileg lehetséges maximum aránya, a kapacitástényező ritkán halad meg $20\text{--}25\%$ -ot, és csak kivételesen fordul elő 50% . Szélcsendben, valamint a sűrűlódás miatt kis szélesebességnél ($2,5\text{--}4\text{ m/mp}$ alatt) a szélturbinák működésképtelenek. Nagy szélesebességnél ($20\text{--}25\text{ m/mp}$ felett) a szerkezetek épségét veszélyeztető erőhatások miatt kell a turbinákat leállítani.

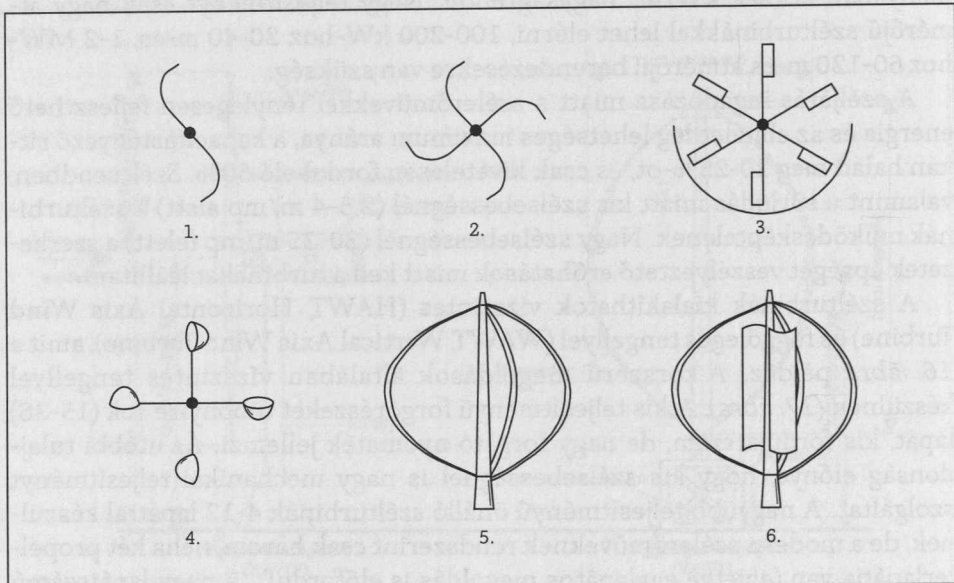
A szélturbinák kialakíthatók vízszintes (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) és függőleges tengellyel (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine), amit a 16. ábra példáz. A korszerű megoldások általában vízszintes tengellyel készülnek (17. ábra). A kis teljesítményű forgórészeket többnyire sok ($15\text{--}36$) lapát, kis fordulatszám, de nagy forgató nyomaték jellemzi. Az utóbbi tulajdonság előnye, hogy kis szélesebességnél is nagy mechanikai teljesítményt szolgáltat. A nagyobb teljesítményű önálló szélturbinák $4\text{--}12$ lapáttal készülnek, de a modern szélerőműveknek rendszerint csak három, néha két propellerlapátja van (elvétve egylapátos megoldás is előfordul). A nagy lapátszámú szélturbinákat kis fordulatszám, a kis lapátszámúakat nagy fordulatszám jellemzi. A nagy fordulatszám különösen villamosenergia-termelésnél előnyös, mert kisebb áttétel szükséges a nagy fordulatszámú generátor hajtására.

Az első ókori szélmalomok függőleges tengellyel készültek, de később teljesen átadták a helyüket a vízszintes tengelyűeknek. Ma is kísérleteznek függőleges tengelyű megoldásokkal (18. ábra), melyek legfőbb előnye, hogy a turbinához csatlakozó berendezések (sebességváltó, generátor, szabályozók stb.) a talajszinten helyezkednek el, míg a vízszintes tengelyűeknél a turbinával egybeépítve a torony tetején. E karbantartási és üzemviteli előny azonban nem egyenlíti ki a magasban érvényesülő nagyobb szélesebesség és jobb hatásfok fölényét, ezért a függőleges tengelyű megoldások nem versenyképesek.

A lapátokra ható szélerő egyrészt a szélirányba mutató szélnyomást fejt ki, másrészt arra merőleges felhajtóerőt gyakorol. A függőleges tengelyű turbinákat a szélnyomás, a vízszintes tengelyűeket a felhajtóerő forgatja, a tengely körüli forgatónyomaték nagysága a szélesebességen kívül függ a lapát alakjától és állásszögétől. A leadott teljesítmény a szögsebesség és a tengelyre érvényesülő forgatónyomaték szorzata. Az aerodinamikai viszonyok szerepe különösen a vízszintes tengelyű szélturbináknál nagy, ezeket gyakran a gyorsjárási tényezővel (λ) jellemzik, ami a lapátok végén forgás közben érvényesülő sebesség és a zavartalan szélesebesség aránya, modern megoldásoknál a lapátok alakjától és számától függő értéke 6 és 20 között fekszik (19. ábra). A lapátok csúcán a sebesség többnyire $50\text{--}100\text{ m/mp}$, amihez $40\text{--}60$ 1/perces for-

18. ábra

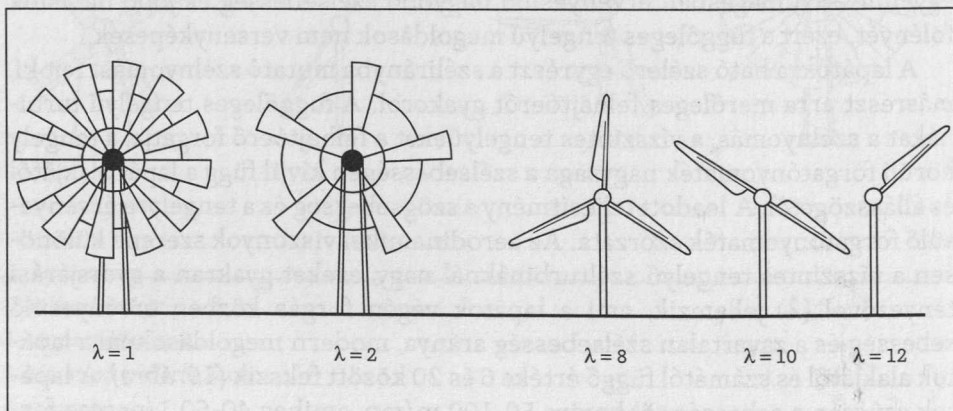
Függőleges tengelyű szélturbinák



1. egylapátos Savonius,
2. kétlapátos Savonius,
3. síklapátos,
4. kanalas rotor,
5. Darrieux,
6. Darrieux-Savonius

19. ábra

Gyorsítási tényezők



dulatszám tartozik. A lapátok módosítják a légáramlás képét, ezzel hatást gyakorolnak a szomszédos lapátok viszonyaira, ezért a hatásfok függ a lapátszámtól, a tapasztalatok szerint a három propellerlapátú vízszintes tengelyű szélturbinák hatásfoka a legnagyobb. Figyelembe véve a szerkezetek méreteit, a lapátok kerületi sebességét és az ezekből, valamint a szélnyomásból származó erőket, néhány MW-nál nagyobb teljesítményű szélérőművek aligha valósíthatók meg. Régebben a lapátokat fából, acélból, alumíniumból készítették, napjainkra az üvegszállal erősített poliészter vált uralkodóvá.

Mivel a szél iránya változó, a vízszintes tengelyű szélturbináknál a függőleges tengely körüli elfordítással (csűrés) gondoskodni kell a beállításról a szél irányába. Egyszerűbb szerkezeteknél terelőlapáttal, korszerű berendezéseknél elektronikus vezérléssel oldják meg ezt a feladatot. A szélérőművek lapátjai a repülőgépek légcsoncsavarjaihoz hasonlóak, alakjukat az aerodinamika törvényszerűségeinek figyelembevételével alakítják ki. A nagy teljesítményű szélérőműveknél a lapátokat hossz tengelyük körül is forgatni lehet, hogy állásszögük változtatásával minden szélesebségnél maximális teljesítményt szolgáltatassanak, illetve túl nagy szél esetében csökkentsék a szélnek kitett felületet és a felhajtóerőt.

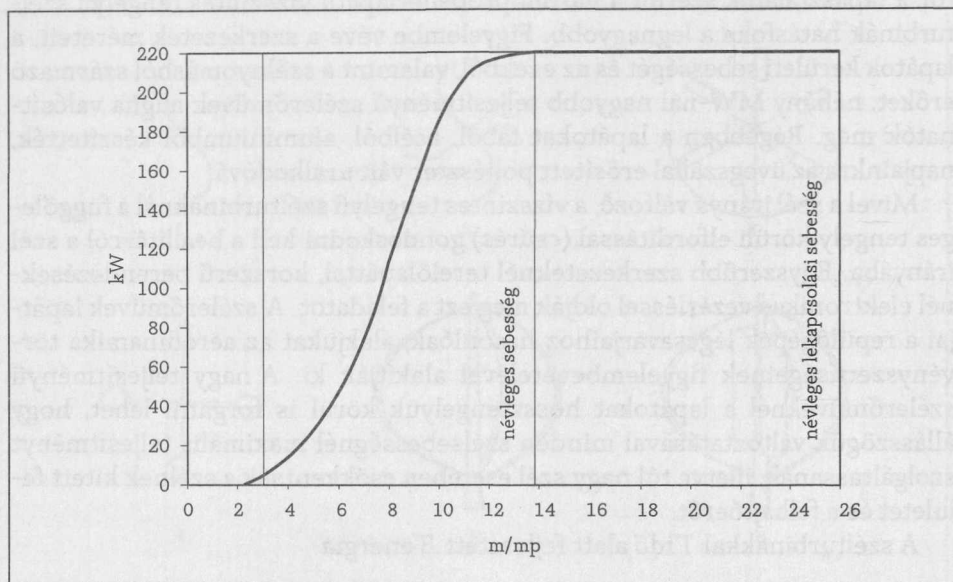
A szélturbinákkal T idő alatt fejlesztett E energia

$$E = K \bar{v}^3 A T \quad (3)$$

ahol a $\bar{v}$ vizsgált időszak alatti átlagos szélesebség, A a lapátok súrolta felület és a K tényező egyrészt a szélesebség eloszlásától, másrészt a turbina tulajdonságaitól függ (értéke 2,5 körül mozog). Az elkerülhetetlen áramlási és egyéb veszteségek, valamint a szélkereket elhagyó levegő sebessége miatt a levegő mozgási energiájának csak egy részét lehet kiaknázni. A legvalószínűbb teljesítményre méretezett szélgenerátorok energetikai hatásfoka a sebesség függvényében maximumot mutat. A hasznosítható teljesítmény és az elméleti érték aránya az optimális sebességnél éri el a maximumát, az optimum helyétől távolodva gyorsan csökken mind a kisebb, mind a nagyobb sebességek irányában. Az átalakítási hatásfok elméleti maximuma 59%, de a veszteségek miatt 40-45%-nál jobb érték nem érhető el. Egy vízszintes tengelyű háromlapátos szélérőmű tipikus jelleggörbéje látható a 20. ábrán. A jelleggörbe a névleges szélesebségnél éri el a névleges teljesítményt.

A hazai szélesebségek alapján kinyerhető teljesítmények (a mérések alapján számított átlag az Alföldön 70 W/m^2 , a legszelesebb északnyugati térségben $160\text{-}180 \text{ W/m}^2$) és a gazdaságosság küszöbértékeinek összevetése alapján a szélenergia nem játszhat túl nagy szerepet a magyar energiagazdaságban. Elsősorban a kisebb szélesebségre kialakított szélmotoroknak van jövője 2-4 m átmérőjű szélkerekekkel, kiegészítő feladatok ellátására. A villamosenergia-termelés csak magasabb energiaárak mellett ígér gazdaságosságot.

Szélerőmű jelleggörbéje



A szélturbinák legjelentősebb környezeti hatása a zaj. Ez egyrészt a sebességváltók mechanikai zajától származik, másrészt a levegő sebességváltozása által okozott aerodinamikai zajtól. A szélerőművek tövénél a zaj tetemes lehet, de mivel a távolság kétszereződése a zajforrástól ~6 dB-lel csökkenti a zajszintet, 150-200 m-re már a lakóterületekre előírt érték alá csökken. Kedvezőtlen esetben a szélturbinák által visszavert elektromágneses hullámok interferenciát okozhatnak, különösen a tv-vételt és a mobiltelefonok működését zavarhatják. Elsősorban a magas szélerőműveknél gyakori panasz a tájkép rontása, főleg csoportos telepítésük esetében. A környezetvédők a turbinák madárpusztító hatását is kifogásolják, ami különösen akkor jelentős, ha a telephely a madarak vonulási útjába esik. Egyes megfigyelések szerint a helyben élő madarak alkalmazkodnak a létesítményekhez. Szélerőműtelepeknél, a kölcsönös zavartatás elkerülése érdekében, a fajlagos területfoglalás nagy, de ez nem akadályozza a terület mezőgazdasági hasznosítását.

Vízenergia

A vízenergia hasznosítása több ezer évre tekint vissza. Valószínűleg az áramlással működtetett vízemelő szerkezeteknek (noria) az ókori folyami kultúrákban voltak az első példái. Az első gabonaörelő vízimalmok időszámításunk

előtt néhány száz évvel jelentek meg a Közel-Keleten, Európába Nagy Sándor közvetítésével jutottak el. Az ókori görögök már használtak kis teljesítményű vízikerekeket, a rómaiak nagyobb teljesítményűek előállítására is képesek voltak, de alkalmazásukat Vespasianus császár tiltotta, hogy ne okozzanak munkanélküliséget. De terjedésüket nem lehetett meggátolni, a Római Birodalomban már nagy számban elterjedtek, kezdetben főleg gabonaörlésre, később sok más nagyobb teljesítményt igénylő feladatra is.

A vízikerek technikai kivitelét (alulcsapott és felülcsapott megoldások) folyamatosan korszerűsítették, ezért mind nagyobb teljesítmény szolgáltatására váltak alkalmassá. Idővel a vízenergia vált a legfontosabb mechanikai energiaforrássá, egyik-másik berendezés teljesítménye már 100 kW-t is elért. A 18–19. században már sok tízezer 1-50 kW teljesítményű vízikerek működött Európában őrlőmalmok, bányaszivattyúk, emelőberendezések, fűrésztelepek, kohók fűjtatóinak működtetésére, vasművek, papírgyárak, szövődék, fonodák kiszolgálására. Ahol nagy erő kifejtésére volt szükség, ott a vízikerek vált a manufaktúrák fő hajtóerejévé, ennek a szerepnek azonban véget vetett a gőzgép feltalálása.

A 19. század közepén feltalált vízturbinákat kezdetben csak a vízikereket felváltó mechanikai erőgépekként alkalmazták, de a villamos energia megjelenése alapvetően megváltoztatta a helyzetet. A vízerőművek új lendületet adtak a vízenergia hasznosításnak. Mechanikai munkavégzésre a vízturbinák helyi hasznosításra ugyan vannak még példák (gabonaörlés, öntözés, fűrészelés, kisipari erőforrás stb.), de ez a szerep a villamosenergia-termeléshez viszonyítva ma már jelentéktelen. Jelenleg a világ villamosenergia-szükségletének közel ötödét fedezik a vízerőművek.

A hidropotenciál

A Föld felszínére érkező sugárzásnak 23%-a (~ 40 PW), fordítódik a víz körforgásának fenntartására. Ennek nagy részét (20,7%) a víz elpárologtatása teszi ki, a többi az elpárolgatatott víz szállítását, a csapadék és a felszíni vízfolyások fenntartását szolgálja. Mintegy 2-3 MJ munka szükséges ahhoz, hogy 1 kg víz a szabad vízfelszínekről elpárologjon és a vízgőz a felhőképződés szintjéig felemelkedjen. Ennek az energiának a legnagyobb része azonban a mi számunkra elvesz, a csapadékképződés során a gőz kondenzálódásakor felszabaduló hő a felhőket melegíti, a csapadék (eső, hó, jég) mozgása közben fellépő súrlódási és ütközési veszteség is a légkör hőtartalmát növeli, és ugyancsak veszendőbe megy a felhő és a felszín közötti távolságra eső potenciális energia. A nedvesség a légkör tömegének 0,16%-a, a levegő vízkészlete átlagosan 14 Tt, ami 10 naponta cserélődik, és abból naponta átlagosan 1,4 Tt csapadék hullik ki. A földre hulló csapadék évenkénti tömege ~ 500 Tt, amiből

kereken 100 Tt hullik a szárazföldekre. A lehulló csapadék jelentős hányada azonban elszivárog, újra elpárolog vagy a növények tápanyagellátását szolgálja, így csupán egy része (~20-30%-a) gyűlik össze a felszíni vízfolyásokban. Figyelembe véve a felszín átlagos ~800 m-es tengerszint feletti magasságát, a kontinensekre hulló csapadék globális potenciális energiája évente 160-240 EJ-ra (~40-60 PWh) becsülhető. A vízfolyásokban a vízrészecskéknek a gravitáció hatására a tengerig vezető útjuk során jelentős ellenállást kell leküzdeniük, energiájukat az áramlási veszteség (súrlódás, örvénylés) emésztí fel. Emberi hasznosításra az egész potenciálnak csupán az a kis hányada jöhet számításba, amivel csökkenteni tudjuk a tengerig vezető út során felemésztett energiát.

A vízfolyás hasznosítható potenciális energiájának növeléséhez csökkenteni kell az áramlási veszteséget, ami a sebesség, valamint a súrlódási ellenállás mérséklésével érhető el. Ebben nagy szerepe van a folyószabályozásnak (medervonal kiegyenesítése, töltésépítés, medercsatornázás) és a vízepítési műtárgyaknak, különösen a duzzasztásnak, ami lelassítja a vízfolyást. A súrlódás csökkenését eredményezi, ha a vizet a természetes medertől eltérő, kisebb áramlási veszteséget okozó pályán vezetik, ami lehet a felszínen kialakított üzemvízcsatorna, a föld belsejében kialakított alagút, vagy külön vezetett nyomócső. Az így kialakított pálya a természetes medernél rendszerint rövidebb, és fala is simább.

A hasznosíthatóságnak vannak műszaki korlátai, pl. ha túl kicsi az esés-magasság vagy a vízhozam, illetve kedvezőtlenek a topológiai körülmények. Fennállhatnak gazdasági akadályok, mindenekelőtt a túlságosan magas fajlagos létesítési költség, és érvényesülhetnek környezetvédelmi korlátok is. Mindezek számításba vételével a hidrológusok a világ ténylegesen még kiaknázzható vízenergia-potenciálját mintegy 15 PWh/év-re (~54 EJ) becsülik, a lehetőségek regionális megoszlása a 12. táblázatban látható.

12. táblázat

A világ vízerő-potenciáljának regionális megoszlása

Régió	Vízerőkészlet, PWh/év		
	elméleti	műszakilag hasznosítható	gazdaságos
Európa	3,2	1,2	0,8
Ázsia	19,4	6,8	3,6
Észak- és Közép-Amerika	6,3	1,7	1,0
Dél-Amerika	6,8	2,6	1,6
Afrika	4,0	1,7	1,0
Ausztrália-Óceánia	0,6	0,3	0,1
világ	40,3	14,3	8,1

Ezek alapján – a vízerőművekre jellemző szerényebb kihasználási tényezők figyelembevételével – a szárazföldi vízfolyásokra még telepíthető erőművi kapacitás lehetséges mértéke ~2-3 TW. Ez a jelenleg működő vízerőművek kapacitásának 3-4-szeresét jelenti, de a világ összesített erőművi kapacitásának csupán felét-kétharmadát teszi ki. E szerint a szárazföldi vízfolyások önmagukban még a világ jelenlegi villamosenergia-szükségletét sem tudnák fedezni.

A nagy vízhozamú időszak területenként eltérő időpontokban alakul ki, a magas hegyekben (pl. az Alpokban) a hóolvadás miatt tavasszal, a közép-hegyekben (pl. a Pireneusokban) többnyire az őszi esős időszakban, az eltérés előnyös kooperációkra ad módot villamosenergia-szállításokban. A vízjárás egyenetlenségét és a tarifakülönbséget használja ki egy osztrák-magyar villamosenergiacsere-egyezmény is, az osztrákok nyáron szállítanak áramot vízerőműveikből alacsonyabb tarifával, amit télen kevesebb árammal ellentételezünk hőerőművekből magasabb tarifával. A konstrukció nálunk számottevő tüzelőanyag megtakarítását eredményezi, náluk a felesleges vízenergia értékesítését.

A vízgyűjtő területeken csapadékban gazdag és szegény évek váltakoznak, ennek következtében a vízhozamban egyik évről a másikra is jelentős eltérések lehetnek mind az éves mennyiségben, mind annak időbeli eloszlásában. Ha az egyenetlenséget nem lehet tározással kiegyenlíteni, a vízhiányos évben az erőmű az átlagosnál sokkal kevesebb villamos energiát tud szolgáltatni. A hidraulicitásban, ami az évente ténylegesen hasznosított vízenergia viszonya a sokévi átlaghoz, 1:3 arányú eltérések is előfordulnak. A változó vízjárás miatt a vízerőművek kapacitását nem az átlagos vízhozamra, hanem a lehetséges maximumra építik ki, ennek következtében kapacitástényezőjük (0,4-0,5) jóval alacsonyabb, mint a hőerőművéké.

A villamosítás kezdetén a kedvező hidropotenciállal rendelkező országok sorra építették ki vízerőműveiket, főleg a nagy esésmagasságot biztosító hegy-

13. táblázat

Vízerőmű-kapacitások regionális eloszlása 2000-ben

Régió	Beépített teljesítmény, GW	Termelés, TWh/év
Európa	173	567
Ázsia	225	754
Észak- és Közép-Amerika	157	703
Dél-Amerika	108	512
Afrika	20	76
Ausztrália-Óceánia	13	42
Világ	700	2 645

vidéken. Ahogy a villamosenergia-átvitel feszültségét növelni lehetett, az elszigetelt helyi ellátást fokozatosan nagyobb területre kiterjedő kooperáció váltotta fel, ami lehetővé tette az áram elszállítását a távol fekvő vízerőművekből is. A rohamosan növekvő igényeket azonban csak néhány kivételes adottságú területen lehetett elsősorban a hidropotenciálból kielégíteni (pl. az alpesi és a skandináv országokban), másutt a hőerőművek kaptak domináns szerepet, de mintegy 30 szerencsés adottságú országban ma is a vízerőművek képviselik a villamosenergia-ellátás alapvető forrását. A vízerőművek regionális eloszlását mutatja a 13. táblázat.

A legtöbb vízenergiát hasznosító országok láthatók a 14. táblázatban. A világ vízerőmű-kapacitásának több mint fele a fejlett országokban található, az Európai Unióban a vízerőművek részaránya az erőművek kapacitásában 12,8%.

A második világháború után a vízerőmű-építés üteme visszaesett. Sok fejlett országban elfogytak az olcsón kiaknázható legkedvezőbb lehetőségek (pl. Nyugat-Európában és Japánban a gazdaságosan kiaknázható potenciál kétharmadát kiépítették), ezért az utóbbi évtizedben főleg a fejlődő világban került sor nagy vízerőművek építésére. Ugyan még sok helyen – főleg Dél-Amerikában, Afrikában és Ázsiában – van lehetőség nagy vízerőművek létesítésére, az erre irányuló szándékok gazdasági és környezetvédelmi okokból többségükben lekerültek a napirendről. Az alacsony tüzelőanyagárak mellett a magas fajlagos beruházási költségű és lassan megtérülő megoldások elvesztették a versenyképességüket, ezért számos vízerőmű-építési tervet vetettek el, vagy halasztottak el bizonytalan időre. A fogyasztói centrumoktól távol fekvő erőműveknél közrejátszott a nagy távolságú energiaszállítás jelentős többletköltsége is. Az 1970-es évektől a beruházási hajlandóságot a környezetvédelmi mozgalmak felerősödő ellenzése, valamint az engedélyezési eljárások ezzel összefüggő elhúzódása is visszavetette.

A környezetvédelmi ellenzés hatására számos fejlett országban tilalmat vezettek be nagy vízerőművek létesítésére, előtérbe került viszont az 5-10 MW-nál kisebb teljesítményű törpe (kis) vízerőművek népszerűsítése. Ezek többnyire átfolyó erőművek, még kismértékű víztározás is csak nagyon ritkán fizetődik ki. Kis beavatkozást indokolnak a folyó jellegébe, így elmaradnak a környezetvédelmi aggályok. Jelentős hányaduk helyi igényeket szolgál ki, és főleg a fejlődő világban nem kapcsolódnak kooperáló villamosenergia-rendszerhez. Ilyenkor telepítésük a fogyasztók közelében célszerű, hogy ne legyen szükség költséges kiszolgáló infrastruktúrára és nagy távolságú energiaszállításra. A kis teljesítményű vízerőmű fajlagos beruházási költsége nagy, amit a konstrukció és a szabályozás egyszerűsítésével igyekeznek ellensúlyozni. A törpe vízerőművek összesített teljesítménye jelenleg néhány GW, a világon kiépíthető kapacitást 20-50 GW-ra becsülik, egyes országokban (pl. Kínában) grandiózus programokat hajtanak végre.

14. táblázat

Vízerőművi villamosenergia-termelés 2002-ben

Ország	Fejlesztett villamos energia, TWh	Részarány, %
Ausztria	36	1,5
Belgium	2	0,1
Bulgária	2	0,1
Csehország	2	0,1
Finnország	10	0,4
Franciaország	60	2,5
Németország	23	1,0
Görögország	5	0,1
Izland	6	0,1
Írország	1	0,3
Olaszország	44	1,8
Litvánia	1	0,1
Norvégia	118	5,0
Lengyelország	4	0,1
Portugália	6	0,2
Románia	14	0,6
Szlovákia	6	0,2
Spanyolország	24	1,0
Svédország	60	2,5
Svájc	33	1,4
Törökország	20	0,8
Egyesült Királyság	7	0,3
egyéb európai	20	1,0
<i>Európa</i>	<i>503</i>	<i>21,4</i>
Argentína	30	1,3
Brazília	258	10,9
Chile	21	0,9
Egyesült Államok	233	9,8
Equador	7	0,7
Kanada	314	13,3
Kolumbia	30	1,3
Mexikó	23	1,0
Peru	16	0,7
Venezuela	66	2,4
egyéb amerikai	72	3,1
<i>Amerika</i>	<i>1059</i>	<i>44,8</i>

14. táblázat folytatása

Ország	Fejlesztett villamos energia, TWh	Résarány, %
Kazahsztán	44	0,3
Oroszország	149	6,3
Ukrajna	9	0,4
Üzbegisztán	6	0,3
egyéb FÁK	40	1,5
<i>FÁK</i>	<i>248</i>	<i>8,8</i>
Irán	4	0,2
egyéb közel-keleti	3	0,1
Közel-Kelet	7	0,3
Egyiptom	12	0,5
Dél-Afrika	3	0,2
egyéb afrikai	58	2,5
<i>Afrika</i>	<i>74</i>	<i>3,1</i>
Ausztrália	15	0,6
Banglades	1	0,1
Kína	223	9,4
India	68	2,8
Indonézia	8	0,4
Japán	82	3,5
Malajzia	7	0,3
Új-Zéland	22	0,9
Pakisztán	18	0,8
Fülöp-szigetek	7	0,3
Dél-Korea	5	0,2
Tajvan	6	0,3
Thaiföld	6	0,3
egyéb	44	1,8
<i>Távol-Kelet</i>	<i>512</i>	<i>21,6</i>
<i>világ</i>	<i>2403</i>	<i>100,0</i>

A vízenergia hasznosítása

A vízerőművek P teljesítményét a turbinák által hasznosított H esés magasság és a feldolgozott V vízmennyiség

$$P = gVH \quad (4)$$

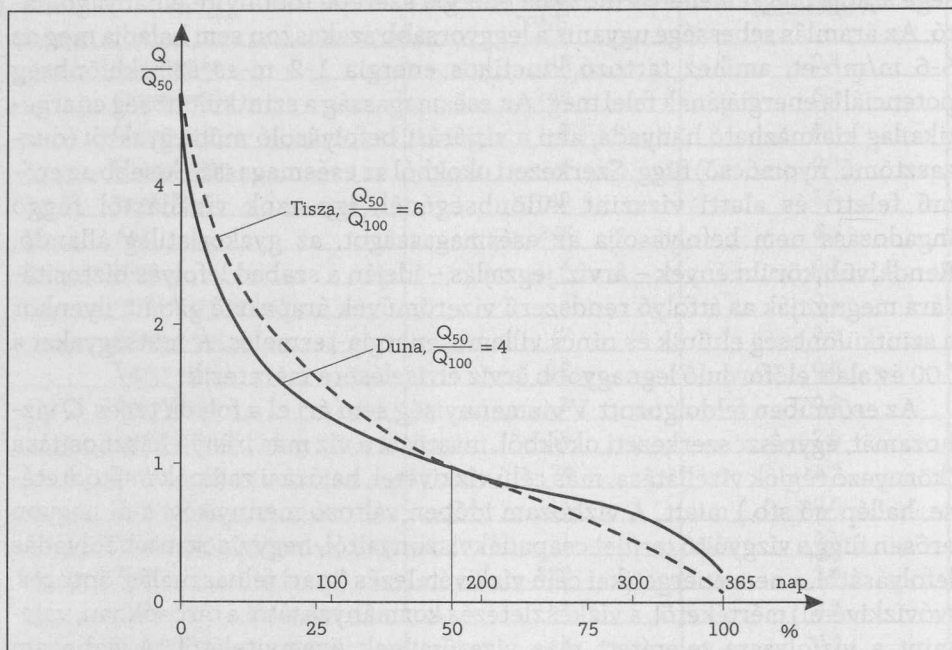
szorzata szolgáltatja, $g=9,81 \text{ m/mp}^2$ a nehézségi gyorsulás. Az áramló víz potenciálját elsősorban a vízfolyás domborzati viszonyoktól függő szintkülönbsége szabja meg, emellett a mozgási energia szerepe többnyire elhanyagolható. Az áramlás sebessége ugyanis a leggyorsabb szakaszon sem haladja meg az 5-6 m/mp-et, amihez tartozó kinetikus energia 1-2 m-es szintkülönbség potenciális energiájának felel meg. Az esésmagasság a szintkülönbség energetikailag kiaknázható hányada, ami a vízjárást befolyásoló műtárgyaktól (duzzasztómű, nyomócső) függ. Szerkezeti okokból az esésmagasság kisebb az erőmű feletti és alatti vízszint különbségénél, így azok vízállástól függő ingadozása nem befolyásolja az esésmagasságot, az gyakorlatilag állandó. Rendkívüli körülmények – árvíz, jégzajlás – idején a szabad lefolyás biztosítására megnyitják az átfolyó rendszerű vízerőművek árapasztó gátjait, ilyenkor a szintkülönbség eltűnik és nincs villamosenergia-termelés. A műtárgyakat a 100 év alatt előforduló legnagyobb árvíz elviselésére méretezik.

Az erőműben feldolgozott V vízmennyiség sem éri el a folyók teljes Q vízhozamát, egyrészt szerkezeti okokból, másrészt a víz más irányú hasznosítása (környező régiók vízellátása, más célú vízkivétel, hajózási zsilipek működtetése, hallépcső stb.) miatt. A vízhozam időben változó mennyiség, ami nagyon erősen függ a vízgyűjtő terület csapadékvizonyaitól, hegyvidéken a hóolvadás lefolyásától, a nem energetikai célú vízkivételezés (ipari felhasználás, öntözés, ivóvízkivétel) mértékétől, a vízkészletezés kormányzásától a tározókban, valamint a vízfolyásra telepített más vízerőművek üzemvitelétől. A vízhozam valószínűségi változó, amit csak hosszabb időt átfogó statisztikai adatok alapján lehet jellemezni. A vízhozam szélső értékei között nagyságrendi különbség is mutatkozhat, például a Duna legkisebb vízhozama Budapestenél a sok évtizedes időszak alatt $Q_{\min}=700 \text{ m}^3/\text{mp}$, legnagyobb vízhozama pedig $Q_{\max}=8500 \text{ m}^3/\text{mp}$ volt.

A 21. ábra példaként a Duna és a Tisza átlagos vízhozamának tartamgörbéit mutatja 1 éves időtartamra a napok, illetve az év százalékban mért hányadának függvényében, a viszonyítási alap a Q_{50} közepes vízhozam. Az ábra szerint a Tisza vízjárása egyenlőtlenebb mint a Dunáé. Az energiahasznosítás számára fontos a tartós rendelkezésre állás, a Duna esetében pl. az év 95%-ában lehet legalább $Q_{95}=1100 \text{ m}^3/\text{mp}$ vízhozammal számolni, és 182,5 napon keresztül érvényesül a közepes $Q_{50}=2260 \text{ m}^3/\text{mp}$ -es vízhozamnál nagyobb érték.

A vízerőművek teljesítménye alapján megkülönböztetnek mikro (<100 kW), mini (100-1000 kW), kis (1-10 MW) és nagy (>10 MW) erőműveket. A legnagyobbak teljesítménye 10 GW-ot is meghalad, jelenleg a Brazília és Paraguay határfolyóján, a Paranán Itapu-nál épült erőmű áll a teljesítménylista élen 12,6 GW-al, de a Jangcen a „Három szurdok” térségben 18 GW-os óriás épül. Az esésmagasság alapján 10 m alatt kisesésű, 10 és 100 m között közepes és 100 m felett nagyésésű létesítményeket különböztetnek meg. A nagy esésmagasság még viszonylag kis vízhozamnál is számottevő teljesítményt szol-

Vízhozamtartam-görbék



gálat, de ha a vízhozam is nagy, akkor ez a villamosenergia-termelés legolcsóbb módja. A kisesésű erőművek többnyire átfolyó jellegűek, víztározásra nemigen van lehetőség, számottevő teljesítményükhöz nagy vízhozamra van szükség. Ennek következtében igénybe vehető teljesítményük erősen függ a vízgyűjtő területük csapadéviszonyaitól és a vízjárástól. Az esésmagasság kialakításához hosszú szakaszon kell visszaduzzasztani a folyót, ami jelentős partvédelmet kíván meg, a szükséges épített műtárgyak (gát, töltés) viszonylag terjedelmesek. Mindez a kisesésű vízerőműveknél magas fajlagos beruházási költséget okoz, amit alapvetően a topológiai viszonyok szabnak meg. Folyóink jellegéből következően hazánkban csak kisesésű vízerőművek létesítése képzelhető el, szerény teljesítményekkel (15. táblázat).

A vízerőműveknek nagy előnye az energiatározás lehetősége, mivel a villamosenergia-rendszerek más módon nem tudnak viszonylag gyorsan igénybe vehető nagy mennyiségű energiát tárolni. Ennek nemcsak a rendszerszabályozásban vagy a szezonális ingadozások kiegyenlítésében van jelentősége, hanem a megújuló energiahajtók fokozott hasznosításában is, hogy át lehessen hidalni azokat az időszakokat amikor nem állnak rendelkezésre. Víztározós erőműveknél gyakran kerül sor többletkapacitások utólagos beépítésére is csúcsergia előállítására. A hegyekben rendszerint kínálóznak olyan völgy-

Néhány magyar folyó vízhozama

Folyó	Mérés helye	Vízhozam, m ³ /mp	
		Q ₅₀	Q ₉₅
Bodrog	Sárospatak	66	14
Dráva	Barcs	450	240
Duna	Budapest	2260	1100
Hernád	Hernádnémeti	24	6
Körös	Gyoma	47	10
Mura	Letenye	190	92
Rába	Körmend	27	10
Tisza	Szeged	550	170

szakaszok, amelyek völgyzáró gátakkal elrekeszthetők a víz összegyűjtésére. A közepes és nagyeesű vízerőművek gátjai mögött többnyire kialakítanak ilyen, a vízjárás szezonális egyenlőtlenségeit áthidaló víztározókat, néhol az aszályos évek hatását ellensúlyozó hatalmas víztömegek összegyűjtésére is mód van. Ezeknél a vízerőműveknél csővezeték szállítja a vizet az alsó szinten elhelyezett turbinákhoz, többnyire a kőzetekben kialakított aknában. Nagy szintkülönbségnél a csővezeték alsó szakaszán tetemes nyomás alakul ki (10 méterenként 1 bar).

A vízerőművek lelkét jelentő vízturbinák a 19. század közepén jelentek meg, ezt követően rohamosan fejlődtek mind szerkezeti megoldásuk, mind teljesítőképességük tekintetében. A vízturbinák hatásfoka erősen csökken a névleges teljesítménynél kisebb terhelésnél, ezért az erőművön belül a terhelést több turbinára osztják meg, mindig csak annyit üzemeltetve, hogy az eredő hatásfok az optimális közelébe essen. A vízturbinák nagy előnye, hogy teljesítményüket könnyen és gyorsan lehet szabályozni.

A nagy vízerőművek létesítése kiterjedt vízepítési munkákkal jár együtt, a világ legnagyobb méretű épített létesítményei vízerőművek műtárgyai. A duzzasztáshoz gátakat, a vízgyűjtéshez víztározókat kell kialakítani, az árvízvédelem hosszú partszakaszok megerősítését igényli gátakkal, a duzzasztóműbe árapasztó zsilipeket kell beépíteni, hajózható folyókon a forgalmat lebonyolító zsiliprendszereket kell létesíteni, gyakran a turbinák kiszolgálására is jelentős létesítményekre (üzemvízcsatorna, nyomócső) van szükség. A létesítéshez rendszerint számottevő infrastruktúra kiépítésére (közlekedés, közművek, lakások, energiaszállítás) is szükség van. Mindezek következtében a vízerőművek nagyon beruházásigényesek, amit némiképp ellensúlyoz hosszú élet-tartamuk. Jó néhány 100 évnél régebben épült létesítmény is üzemben van,

melyeknek csupán a gépészeti berendezéseit kellett időnként felújítani. A nagy beruházási költségek többnyire akkor térülnek meg, ha az energetikai hasznosítás a térség vízgazdálkodási problémáinak komplex megoldásával párosul. Ebbe tartozik az árvízveszély megszüntetése a partvédelem kiépítésével, valamint tározók révén a vízjárás kiegyenlítésével. Ugyancsak fontos lehet stabil hajóút kialakítása a duzzasztás segítségével, öntözési és egyéb víz-igények kielégítése az egyenletesebb vízhozammal, a növényzet tápanyagellátásához a talajvízszint stabilizálása, üdülési övezetek kialakítása a víztározókkal, haltenyésztés lehetővé tétele, vízi sportok feltételeinek a megteremtése stb. A komplex szerep, valamint a nagy beruházási költség és a lassú megtérülés miatt állami szerepvállalás nélkül ritkán létesülnek nagy vízerőművek.

A sokrétű kölcsönhatás egyben a környezetvédelmi ellenzés legfőbb indoka. A leggyakoribb ellenérv, hogy az erőműépítés hosszabb szakaszon megváltoztatja a folyó, valamint környezetének életfeltételeit és mikroklímáját, ami módosítja az élővilágot, esetenként értékes fajok eltűnését is okozva. A gátak és töltések megváltoztatják a folyó vízjárását, hordalék- és üledékviszonyait, a gátak felett kiülededés, alatta erózió jellemzi a viszonyokat. A gátak alatti folyószakaszon a víz hajlamos a meder erodálására, hogy pótolja a gáttal viszszafogott hordalékot (ez zajlik a Duna magyarországi szakaszán). A tározóknál az eliszaposodás és kolmatáció, valamint ennek hatása az élővilágra a leggyakoribb aggályok. A műtárgyak befolyásolják a környezetben a talajvíz szintjét, ami szintén visszahat az élőhelyek alakulására, sőt az emberi tevékenységek lehetőségeire is (mezőgazdaság, halászat, üdülés, esztétikai érték). A folyószabályozás és a tározók építése jelentős területek elárasztásával járhat együtt, ami szükségessé teheti települések és a lakosság áttelepítését, megtörve emberek megszokott életvitelét. Különösen nagy térfogatú tározótavaknál félnek a gátszakadás katasztrofális hatásának lehetőségétől, bár ennek a valószínűsége nagyon kicsi (a világon létező 15 000 gát közül 6-10 évente fordul elő 1 gátszakadás, vagyis a kockázat 10^{-5} /év nagyságrendű). Sok vita zajlik a nagy tömegű gátak hatásáról a talajmozgásokra, esetleg a földrengésveszély fokozására. Nehezíti a megítélést, hogy egyes folyamatok csak hosszú idő után stabilizálódnak. Az erőteljes ellenzés következtében a vízerőműveket – tiszta és megújuló jellegük ellenére – gyakran kirekesztik a fenntartható fejlődés megoldásai közül, legfeljebb a törpe vízerőműveket fogadva be a kívánatos környezetbarát létesítmények közé.

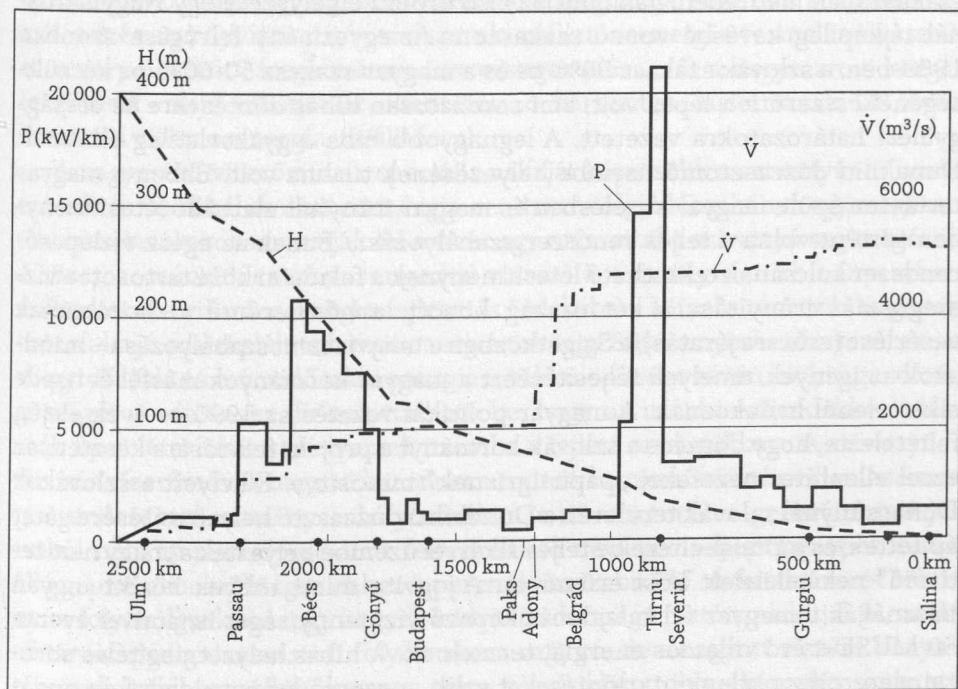
A vízerőmű-építés már a múlt században elindult Magyarországon (az első Csernahévízen létesült 1878-ban), de a Kárpátokban épült sok kis vízerőmű ma már nem esik magyar területre. A hazai vízenergia-potenciál nagyon kicsi, elméleti értékét 100 PJ/év-re teszik, amiből reálisan csupán 16 PJ/év (~4,5 TWh/év) építhető ki. A kis esésmagasság miatt a fajlagos beruházási költségek magasak, ezért versenyképesség csak komplex regionális vízhasznosítási programok (árvízvédelem, hajózás, öntözés, üdülési központ stb.) keretében

valósulhat meg. Így épült meg a Tisza rendezése során a két legnagyobb teljesítményű vízerőművünk, Tiszalökön (1954, 12 MW) és Kiskörén (1973, 26 MW). 24 telephelyen van néhány nagyon régen létesült kis vízerőművünk (Kesznyéteny, Ikervár, Gibárt, Felsődobosza, keleti és nyugati törpe vízerőművek), összesen 55 MW teljesítménnyel.

A 15. táblázatból kitűnik, hogy legnagyobb hidropotenciálunk a Dunán van, a folyó energetikai hossz-szelvényét a 22. ábra mutatja, feltüntetve az esés és vízhozam alakulását kívül a hosszegységre eső teljesítményt is. Ebből látható, hogy a középfolyás jellegű magyar szakaszon a kiaknázható teljesítmény nagyon kicsi. Vannak elképzelések néhány kisebb erőmű építésére a Duna Budapest alatti szakaszán, továbbá 20-25 telephelyen a Tiszán, a Dráván, a Rábán, a Maroson, a Szamoson, a Körösökön, a Hernádon, a Sajón, valamint a paksi atomerőmű hűtővizének melegvíz-csatornájában (7,2 MW), de ezek jelenleg a környezetvédők nagyon erős ellenzésébe ütköznek. Sajnos a vízerőművek nem jelenthetnek számottevő hozzájárulást a magyar energiamérleghoz, szerepük elsősorban a rendszerszabályozásban és a csúcsergia fedezésében lehet jelentős.

22. ábra

A Duna energetikai hossz-szelvénye



A Magyarországot érintő legnagyobb vízerőmű építési elképzelés a Gabčíkovo (Bős)–Nagymaros vízlépcsőrendszer (BNV) volt. A nagymarosi vízerőmű építésére az első ajánlatot svájci cégek tették az 1920-as években, majd létesítése a következő évtizedben is többször felmerült a komplex vízhasznosítási tervekben. Kizárólag villamosenergia-termelésre az energetikusok sohasem tartották megvalósításra érdemesnek, csupán más célú komplex hasznosítás keretében. A többféle változat közül kiválasztott terv szerint a Duna egy részét Dunakilitinél egy üzemvízcsatornába vezették volna át, a 700 MW-os bősi erőmű működtetésére. Az üzemvízcsatorna Ásványrárónál tér vissza az eredeti Duna-mederbe, aminek visszaduzzasztása a 146 MW-os nagymarosi erőműre hárult volna. A költségek és a rendszerben termelt villamos energia fele-fele arányú megosztását tervezték a két ország között. A szlovák–magyar államközi szerződés aláírására – sokéves huzavona után – 1977-ben került sor. A rendszerváltást megelőző években a környezetvédők ellenvetéseit felkarolta a politikai ellenzék, a vízerőmű elleni demonstrációk és publikációk a politikai elégedetlenség legfontosabb kifejezésévé váltak. A közhangulat lecsillapítása érdekében a kormány elvetette a projekt megvalósítását. Sajnos az ügy azóta is politikai szimbólum maradt, megkötvén a döntéshozók kezét a racionális kibontakozás keresésében.

A kinyerhető teljesítmény némi csökkentése árán egyszerűbb és olcsóbb megoldás lehetett volna egy átfolyó vízerőmű a Duna magyar–szlovák határszakaszának medrében, valamint az alsó erőmű elhelyezése egy Nagymarosnál tájképileg kevésbé vonzó szakaszon. Az egyezmény felrúgása azonban 1989-ben, a szlovák szakasz 90%-os és a magyar szakasz 50-60%-os készült-ségénél ésszerűtlen lépés volt, ami sorozatosan hibás döntésekre és országgyűlési határozatokra vezetett. A legnagyobb hiba a gyakorlatilag elkészült Dunakiliti duzzasztómű üzembe helyezésének tilalma volt. Ebben a magyar területen épült, magyar kezelésben és magyar irányítás alatt álló létesítményben történt volna a teljes rendszer szabályozása. Ennek az egész vízlépcsőrendszer kulcsának tekinthető létesítménynek a feladatai közé tartozott a vízmegosztás irányítása a két ország között, a bősi erőmű vízhozamának vezérlése (csúcsra járatás), a Szigetközben a talajvízszint szabályozása – mindazok az igények, amelyek teljesítéséért a magyar kormányok másfél évtizede sikertelenül hadakoznak. A magyar politikai vezetés az 1990-es évek elején feltételezte, hogy döntése a szlovák kormányt a projekt feladására készíti, az ezzel ellentétes nézeteket „papírtigrisnek” minősítve. E helyett a szlovákok Dunacsúnynál szlovák területen a Dunakiliti duzzasztó helyettesítésére gátat építettek, és a Dunát elterelve teljes sikerrel üzembe helyezték a „nagy nemzeti mű”-nek tekintett bősi erőművet. A jogvita miatt többek között ingyen használják a magyar fél tulajdonát képező vízmennyiséget is, amivel évente 50 MUSD-t érő villamos energiát termelnek. A hibás helyzetmegítélés sorozatosan rossz parlamenti döntéseket szült, a szerződés egyoldalú felmondá-

sát, a lehetőségek hibás megítélését a nemzetközi bíróságon, a duzzasztás tilalmát fenékküszöbbel a Szigetköz talajvízproblémájának megoldására. (A drágán beszerzett, gázolajjal működtetett, zajos és környezetszennyező szivattyúkat végül szégyenszemre le kellett szerelni, mert a felül átemelt víz alul visszafolyt a Dunába, mivel a közlekedő edények törvényét nem lehet parlamentari határozatokkal megerősíteni.) Hiába mondják ki sorozatos határozatok a gátépítés tilalmát, arra előbb-utóbb rákényszerülünk. Csak azzal lehet ellensúlyozni a Duna vízszintjének folyamatos süllyedését, mert a folyó erodálja a medret, hogy pótolja a vízből hiányzó hordalékot. A nem kopó sziklahátak egyre jobban kiemelkednek a mederfenékből, akadályozva a hajózást (az év harmadában ez a magyar szakasz a szűk keresztmetszet a Duna-Rajna-Majna nemzetközi vízi út kihasználásában). A folyó vízszintsüllyedése csökkenti a környezet talajvízszintjét, a növényzet tápanyagellátását és az ivóvízbázist. Ha pedig gát épül, pazarlás lenne azt nem kihasználni villamosenergia-termelésre.

A hibás döntések hatalmas kárt okoztak az országnak. Eltekintve a presztízsvesztéstől és a szlovák-magyar viszony megterhelésétől, dollármilliárdok mentek pocsékba semmiért. Szlovákia élvezi a rendszer minden előnyét (árvízvédelem, villamosenergia-termelés, hajózás és a pozsonyi kikötő kiépítése, talajvízszint-szabályozás, természetvédelem, sport- és üdülési lehetőség). Magyarországra pedig csak hátrányok hárulnak: egy feleslegessé vált duzzasztómű romjai, a Szigetköz vízellátásának gondja, elmaradt árvízvédelmi töltések és szennyvíztisztító rendszerek, a villamosenergia-termelés elvesztése, a csepeli kikötő forgalmának összezsugorodása, sőt a nagymarosi körgát felépítését, majd elbontását ellentételező kártérítés Ausztriának, 20 éven keresztül villamosenergia-szállítással.

A nagyeesű vízerőművek speciális válfaját képviselik a szivattyús-tározós erőművek. Ezeknél a villamosenergia-rendszer völgyidőszakában egy magasan elhelyezett tározóba nyomják fel a vizet egy reverzibilis szivattyú segítségével. A vizet a csúcsidőszakban engedik vissza, a szivattyút turbinaüzemben működtetve a villamosenergia-fejlesztés érdekében. Mivel a reverzibilis gépek hatásfoka jó, a betáplált villamos energia mintegy 80%-a nyerhető vissza, ami a völgyidőszaki és csúcsidőszaki energia értékkülönbsége révén kitűnő gazdaságosságot eredményez. Ennek tudható be, hogy az utóbbi évtizedekben több száz ilyen létesítményt helyeztek üzembe a fejlett országokban. A szivattyús-tározós vízerőművek nagyon hasznosan tudnak közreműködni a villamosenergia-rendszer teljesítményszabályozásában is, mivel a turbina-generátor üresjáratból néhány másodperc alatt felterhelhető névleges teljesítményére, és az álló gépnél sem szükséges ehhez 1 percnél hosszabb idő. A felső tározót többnyire folyóvölgyekben vagy hegyek kedvező adottságú platóin alakítják ki, az alsó tározó pedig duzzasztott folyószakasz vagy tó, de elhagyott vízzáró bányatérsegek is felhasználhatók erre a célra. Hazánkban több elképzelés született

hegytetőn kialakítandó tározóra (a Pilis, a Börzsöny és a Zemplén-hegység területén), megvalósításukat azonban a környezetvédők megakadályozták.

Vízérőművek létesítésére nemcsak a folyókon vannak elképzelések, hanem esésmagasság kialakítására módot adó más körülmények között is. Egyelőre csupán elvi lehetőség a tengerszintnél mélyebben fekvő depressziók hasznosítása. Ilyen mélyen fekvő területek többfelé találhatók (pl. Holt-tenger), de mesterségesen is kialakíthatók egy tengeröböl elzárásával. Az abban kialakuló tó szintjét a párolgás szabja meg, a forró égövön különösen erős a nap párologtató hatása. A tengerből csatornán keresztül a depresszióba vezetett víz működtetheti a turbinákat, a kialakítható szintkülönbség 50-80 m-t is elérhet, amire GW-os erőművek telepíthetők. A felvetett koncepciók (Egyiptom, Vörös-tenger, Perzsa öböl) realitása kétséges, egyrészt a szükséges mérnöki munkák túlságosan nagyszabásúak, másrészt nehéz felmérni az ökológiai következményeket (pl. a tavak sótartalmának növekedése a párolgás következtében). Még a Földközi-tenger depresszióként történő hasznosítása is felvetődött a Gibraltári-szoros lezárásával, mivel a beömlő folyók vízhozama nem éri el a párolgás mértékét.

Ahol olaj- és vízvezetékeknél a nyomás csökkentésére van szükség, ott turbinák segítségével hasznosítható az energiaveszteség mechanikai munkavégzésre vagy villamosenergia-termelésre.

Tengeri energiák

A megújuló energiák között gyakran esik szó a hatalmas tengeri energiákról. Az árapály, a hullámok, a tengeri áramlatok, valamint a tengeri sótartalomkülönbség révén nyerhető teljesítményt néhány TW-ra becsülik, a tengeri hőmérséklet-különbségeket pedig két nagyságrenddel nagyobbra. Ezek teljesítménysűrűsége azonban kicsi, az energiát nagy térrészből kell kinyerni, ezért a versenyképesség gyenge, amit tovább ront az energiaszállítás jelentős költsége, mivel többnyire a fogyasztói központoktól távol állnak rendelkezésre. A tengerek energiájának hasznosítására különleges esetekben – pl. kis szigetek ellátására – kerülhet sor, a nagyobb mértékű kiaknázást azonban csak távoli lehetőségnek tekintik. A kutatások kezdeti jellege miatt a környezeti hatások is kevésbé tisztázottak, az ülepedés, a vízi élővilág és madárpopuláció módosulása, ártalmas anyagok feldúsulása, befolyás a hajózásra és a parti élet-körülményekre a leggyakrabban felvetett kérdések, néha a szén-dioxid-körfolyamat megzavarása is felmerül.

A legkiforrottabb megoldás az árapály hasznosítására áll rendelkezésre, aminek teljesítményét csillagászati adatokból számolva 3 TW-ra becsülik. Az árapály keletkezésében a legnagyobb szerepe a hold vonzásának van, annak hatására az óceánok vízszintje erősen felemelkedik a hold felőli és

kevésbé az ellentétes oldalon. Az erők különbségét nagyjából kiegyenlíti a forgó Föld és a körülötte keringő Hold közös forgástengelye körüli forgásból származó centrifugális erő hatása. Ezekhez adódik hozzá a Nap jóval kisebb mértékű (mintegy 32%-ot kitevő) vonzereje, mindezek következtében napon-ta kétszer apály és dagály alakul ki. A Föld forgásának megfelelően a dagály nyugat felé vándorol, 24,8 órás periódusidővel, amire szuperponálódik a Nap 12 órás periódusidejű hatása. Két dagályhullám között 12 óra 25 perc telik el, de a Hold keringése következtében a csúcsérték időpontja naponta mintegy 50 percet késik. Az égitestek mozgásai további kisebb ciklikus változásokat is előidéznek. Az óceánok közepén a vízszintváltozás mértéke az idő során szinuszosan változik, a mintegy 14 napos időkülönbséggel fellépő maximális és minimális dagály aránya kétszeres értéket is meghaladhat. A legnagyobb dagály a Föld, a Hold és a Nap tavaszi együttállásakor lép fel, a legkisebb az őszi oppozíciókor (amikor a Hold és a Nap iránya derékszöget alkot). A szintkülönbség értékét erősen módosítják a partviszonyok, a kontinentális talapzatok alakja, valamint az öblözetek, főleg a hullámok visszaverődése és rezonancia révén. A beltengerek közepén a dagály cm, partján dm nagyságrendű, a nyílt óceánokon 1 m körüli, az óceánok egyes partvidékein, főleg a folyótorkolatok tölcészerű összeszűkülésében feltorlódnak a víz szintkülönbsége rendkívül nagy értéket is elérhet. Az Atlanti-óceán partján a dagály átlagosan 3 m körüli, de Kanada keleti partján 15-20 m-es vízjáték is előfordul, az angol és francia partvidék egyes pontjain a csúcsérték 14 m.

Az árapály hasznosításának lényege egy magasabban fekvő víztározó és a tengerszint közötti esésmagasság kiaknázása kisesésű vízerőművel. A tározót a legegyszerűbb egy folyótorkolatban kiépíteni, zsilipekkel vezérelve a víz be- és kiáramlását. Erőművi hasznosításra csak előnyös topográfiai körülmények között érdemes törekedni. Elvileg 3 m-es szintkülönbség már hasznosítható, de gazdaságos megoldáshoz rendszeresen legalább 5-10 m-re van szükség. Az ígéretes helyek nem nagyon gyakoriak, de a felderített lehetőségek mintegy 120 GW (200 TWh) kiaknázására adnának módot.

A villamosenergia-termelés többnyire apályidőszakban történik, amikor a dagály időszakában feltöltött víztárolóból leengedett vizet dolgozzák fel a turbinák. Ellentett irányú üzem is elképzelhető, amikor a turbinák a dagály időszakában működnek. Mindkét esetben csak az árapály periódus felében folyik energiatermelés, ezt egyenletesebbé lehet tenni mindkét irányban működő turbinával, ami azonban nemcsak bonyolult és költséges konstrukciót jelent, hanem az irányváltás következtében jelentős időkiesést és energiaveszteséget is. Csupán elvi lehetőség két vízmedence létesítése, melyek vízszintjét úgy vezérlik, hogy mindig álljon rendelkezésre valamelyiknél esésmagasság, esetleg szivattyús-tározós üzem mód is kialakítható reverzibilis turbinákkal. Gondot okozhat, hogy a teljesítmény 0 és egy változó maximum között hullámzik, a Hold járásának megfelelően, ami nem illeszkedik a fogyasztás ritmusához.

Az eddig megvalósult legnagyobb árapály erőmű a Rance torkolatánál (Franciaország) létesült, 240 MW teljesítménnyel. Több országban építettek 0,5-15 MW-os kísérleti erőműveket. Az üzemeltetési tapasztalatok általában kedvezőek, de a fejlesztett áram – a magas beruházási költség miatt – drága. Ezért jelentős árapály erőművek megvalósítását nem tervezik, viszont foglalkoznak az árapály hatására létrejött vízáramok kinetikus energiájának hasznosításával – különösen tengerszorosokban – a tengerbe merülő turbinákkal. Ez nem előzmények nélküli elképzelés, hiszen az Atlanti-óceán partján már időszámításunk előtt léteztek olyan malmok, melyek folyótorkolatokban az árapály vízmozgását hasznosították. Norvégiában 20 darab 300 kW-os turbinával kísérleti erőművet létesítenek a tengeri vízáramra, a várt önköltség meglehetősen magas. Hasonló létesítményt építenek ki az angol tengerpart előtt is.

Az utóbbi évtizedben felerősödött a hullámozás hasznosítására irányuló törekvés. A tenger hullámozása véletlenszerűen alakul, amiért a kinyerhető teljesítmény jellege is ingadozó. A hullámokat a vízfelszín felett áramló szél gerjeszti, amire a helyenként kialakuló turbulenciák további hullámokat ültethetnek, és így többféle hullám eredője alakul ki. Ha a hullámok elég magasak, a szél tolóereje fel is erősítheti azokat. Az energiaátszármaztatás mértéke a szél sebességétől és behatolásának mélységétől, a hullám potenciális energiája annak magasságától függ, kinetikus energiája a terjedés sebességétől. A hullámok teljesítménye arányos a hullám periódusidejével és a hullám magasságának négyzetével. Az Északi-tengeren pl. az átlagos hullámmagasság 1,5 m, 6 másodperces periódusidővel. A hullámok energiataralma meglepően nagy, 1 m hosszú hullámfront teljesítménye 1 m-es hullámmagasságnál 1 kW, 2 m-es hullámoknál 10 kW, 5 m hullámmagasságnál 100 kW és 13 m magasságnál már 1 MW nagyságrendű. Miután a hullámozás lassan csillapul, a tenger energiatarolóként is viselkedik. Az Atlanti-óceánon szerzett tapasztalatok szerint csupán az idő 1%-a hullámmentes, és hasonló időtartamú a szélsőségesen nagy hullámokat okozó viharos időszak. Mély tengerekben a terjedési sebesség a periódusidőtől függ, a nagy hullámok gyorsabban haladnak, mint a kicsik, és veszteségük is kicsi. Sekély tengerekben a terjedés sebessége a vízmélységtől függ, és ha az összemérhető a hullám hosszával, jelentős a súrlódási veszteség. Ugyancsak tetemes a tengerpartnak ütköző hullámok vesztesége a turbulencia következtében. A hullámozó vízben az energia lefele csökken, az energia legnagyobb része a hullámhossz negyedének megfelelő felső vízrétegben koncentrálódik. A hullámenergia kiaknázható mértékét 2 TW-ra becsülik, feltételezve, hogy arra gyakorlati lehetőség valószínűleg csak a partok közelében van.

Az 1970-es éveket követően több száz szerkezetet fejlesztettek ki a tengeri hullámok energiájának hasznosítására. Ezek vagy a hullámhegy és a hullám völgy szintkülönbségének megfelelő potenciális energiát aknázzák ki, vagy a

vízcsepscék körmozgásának és haladásának megfelelő kinetikus energiát. A potenciális energia hasznosításának egyik lehetősége egy olyan turbina, amit a hullámmal feltöltött tározó szintkülönbsége működtet. Más szerkezetek azt a nyomáskülönbséget aknázzák ki, amit szelepekkel elválasztott kamrákban hoznak létre a vízszintkülönbségekkel. A körpályán mozgó vízcsepscék kinetikus energiáját olyan aszimmetrikus profilú úszókkal igyekeznek hasznosítani, melyeknek felső része követi a vízfelszín mozgását, alsó része pedig köríven elfordul. Egyes szerkezetek a hullámmal mozgatott elemek relatív elmozdulását áttételek segítségével turbinák működtetésére használják, a működtetés gyakran légoszlop vagy vízoszlop segítségével történik.

Eddig ténylegesen a tengerparton kialakított, vagy a tengerfenékhez rögzített berendezéseket hoztak létre, többnyire 50-150 kW teljesítménnyel (főleg bóják és világítótornyok ellátására), de létesítettek 1 MW-os kísérleti szerkezetet is. A mély vízben úszó berendezésekkel nagyobb teljesítmény nyerhető, de a magas költségek miatt ilyenek kivitelezésére nem került sor.

Az óceánokban uralkodó hőmérséklet-különbség kiaknázásának gondolata már 1881-ben felvetődött (d'Arsonval), hőkörfolyamat segítségével (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion). A trópusi és szubtrópusi tengerek felszínén a vízhőmérséklet mintegy 25 °C, de néhol 28-30 °C-ot is elér, ugyanott 1000 m mélyen ~5 °C uralkodik. A 20-25 °C körüli hőmérséklet-különbség nyílt, zárt vagy hibrid körfolyamatban dolgozható fel. A számításba jöhető térséget 60 M km²-re becsülik, és az elméleti potenciál sok TW. A zárt ciklusban alacsony hőmérsékleten párolgó folyadékot (pl. ammónia) lehet a felszíni meleg tengervízzel elpárologtatni, és a mélyből felszivattyúzott hideg vízzel lecsapatni. A nyílt ciklusnál a tengervíz a munkaközeg és annak elpárolgását a nyomás csökkentésével érik el, majd munkavégzés után lehűtik. A körfolyamatnak nagyon alacsony a hatásfoka (6-9%), amit a hatalmas vízmennyiségek áramoltatása és a segédüzem egyéb eszközei 2,5-4%-ra csökkentenek. Az eljárást sikeresen kipróbálták (1930, Claude), létesült néhány 10-100 kW teljesítményű berendezés, és vannak tervek 10-20 MW elérésére is. A műszaki nehézségek jelentősek, a folyók vízhozamával összemérhető hatalmas vízmennyiségek (MW-onként 3-4 m³/mp) áramoltatása, az ezerméteres szintkülönbségek áthidalása néhányszor 10 m átmérőjű csövekkel, hőátzármaztatás hatalmas felületű (MW-onként 3-4·10³ m²) hőcserélőkkel komoly nehézségeket jelent. Versenyképességet egyelőre nem várnak, a módszer vonzerejét növelheti, hogy a nyílt ciklus egyben sótalanításra is használható.

Csupán elvi lehetőség az édesvíz és a tengervíz sótartalmának különbségéből származó, ozmotikus nyomáskülönbség kiaknázása. Ez a mintegy 240 m esés magasságnak megfelelő energiaérték a folyók torkolatánál 0,65 kWh/m³-t képvisel, vagyis az óceánba befolyó 1 m³/mp vízhozam 2,34 MW-t ér. Ha a világ összes folyóját félig áteresztő membránokkal ilyen mértékű munkára

fognák, 2,6 TW-t nyernének. Nagyságrenddel nagyobb koncentrációkülönbség jelentkezik a föld mélyén található ásványi sókban gazdag rétegvizek és az édesvíz között. A ténylegesen megvalósítható eljárások (fordított ozmózis, a gőznyomáskülönbség hasznosítása) elviselhetetlenül nagy költséggel járnának.

Néha a tengeri áramlások hasznosítása is felvetődik, bár ennek energetikai megítélése meglehetősen bizonytalan. A víz egyenetlen felmelegedése, valamint az általános légkörzés szele gerjeszti az óceánok általános vízkörzését. Ennek hatására a felszínen 1-3 m/mp sebességű meleg áramlások alakulnak ki az egyenlítőtől a sarkok irányába, a mélyben pedig ellentett irányú hideg áramlás zajlik. A tengeráramok 10-100 M m³/mp vízáramokat jelentenek, de a kis sebesség és a kis teljesítménysűrűség következtében a potenciáljuk valószínűleg nagyságrenddel marad el a felszíni vízfolyások potenciálja mögött. Hasznosításukra csupán nagyon vitatható elképzelések láttak napvilágot, pl. a Golf-áramból (átlagos szélessége 50 km, közepes mélysége 120 m, átlagos sebessége 2 m/mp, teljesítménye ~25 GW) 1 GW kinyerésére lehorgonyzott vízikerekkel. Természetesen a kis sebességű áramlást csak nagyon rossz hatásfokkal lehetne hasznosítani, az áramlásnak a vízikerek sebességszökkenő hatására bekövetkező kiszélesedésének pedig beláthatatlan lenne a következménye az időjárásra.

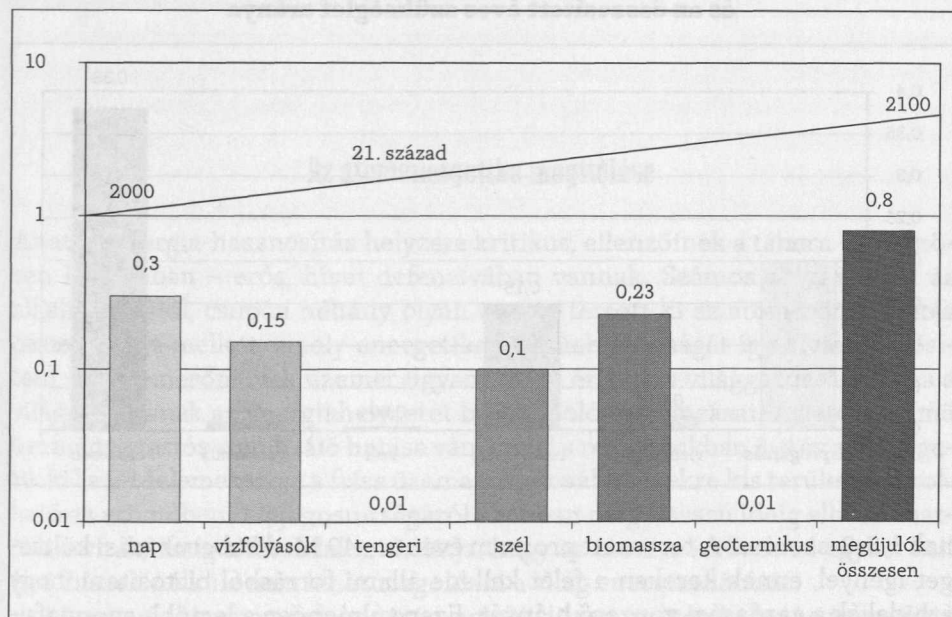
Kilátások

A megújuló energiák hasznosítása kevésbé terheli a föld erőforrásait, és viszonylag csekély környezetszennyezéssel jár. Alkalmazásuk már ezért is ösztönzést és támogatást érdemel, amire a legtöbb kormány preferenciákat alkalmaz. Egyelőre azonban nehezen hódítanak teret, aminek legfőbb oka viszonylag magas fajlagos beruházási költségük. Hátráltatja terjedésüket a rendelkezésre állás bizonytalansága, valamint az alacsony átalakítási hatásfok is.

A támogatás eredményeként a megújuló energiahasznosítás teret fog nyerni, a műszaki fejlesztés, a tömeggyártás, valamint a tapasztalatok mérsékelni fogják az alkalmazás akadályait, kedvező körülmények között egyes megoldások már most elérkeztek a versenyképesség küszöbére. Azt azonban a legsikeresebb fejlesztési tevékenység sem tudja megváltoztatni, hogy valójában kiaknázható mértékük nem olyan kimeríthetetlenül nagy, amint azt sokan feltételezik. Ezért illúzió azt várni, hogy az ásványi tüzelőanyagok és az atomenergia helyettesítését, illetve pótlását kizárólag a megújuló energiákra támaszkodva meg lehet oldani.

Ha minden reális lehetőséget figyelembe veszünk, önmagában a megújuló energiák összessége sem tudná fedezni a világ jelenlegi energiaszükségletét, a 21. század végén jelentkező többszörös igénynek pedig csupán a tört részét

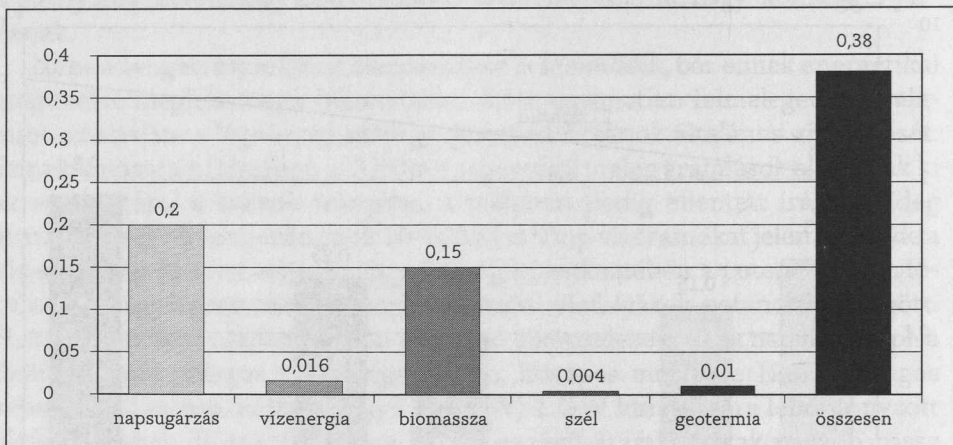
A világ évenként reálisan hasznosítható megújuló potenciáljai



tudnák kielégíteni. Ezt szemlélteti a 23. ábra, amin a 21. század energiaszükségletének alakulását szembesítettük a megújuló energiákból évente reálisan nyerhető energiamennyiségekkel. Természetesen a tudomány új felismerései és a technika új lehetőségei módosíthatják a képet, de alapvetően más megítélést aligha eredményezhetnek. Ezért a megújuló energiák fontos lehetőséget jelentenek, de csupán hozzájárulást és nem radikális megoldást képviselnek a világ energiaellátásában. Az Európai Unió korábban célul tűzte ki, hogy a megújuló energiák részarányát 2010-ig 12%-ra növeli, de ennek teljesülése nehézségekbe ütközik.

A megújuló energiák a magyar energiaellátásban is csupán kiegészítő szerepet tudnak betölteni, aminek mértékét a 24. ábra érzékelteti. A jelenlegi hasznosítás mértéke az 1. táblázatban látható. Állami szerveink egy évtized alatt a megújuló energiák hasznosításának megduplázását kívánják elérni, pályázatok és pénzügyi támogatás segítségével. Az így nyerhető hőenergia a 2000. évi szint kétszeresére (72 PJ), a villamos energia hatszorosra (6 PJ) nőne. Ehhez a legnagyobb lehetőségeket az energiaültetvények kialakításában, a szerves hulladékok hasznosításában, a növényi eredetű motorhajtó üzemanyagok előállításában, a nap és a geotermikus energia kiaknázásában látják. Eltekintve a szilárd biomassa közvetlen eltüzelésétől, a megújuló forrásokból nyert tüzelő- és üzemanyagok előállítási költsége az ásványi tüzelőanyagoké-

**A magyarországi reális megújuló energiapotenciálok
és az összesített éves szükséglet aránya**



nak 1,5-3-szorosa. A tervezett program évente ~40 Mrd Ft beruházási költséget igényel, ennek kerekén a felét kellene állami forrásból biztosítani, hogy áthidalják a gazdasági vonzerő hiányát. Ezen túlmenően a legtöbb energiafajtánál ártámogatásra is szükség van, adókedvezmények vagy másféle dotációk formájában, ami évente szintén kitesz néhány Mrd Ft-ot. E jelentős forrásigény is azt támasztja alá, hogy a megújuló energiák gyors térhódítása nem tételezhető fel – bár az kívánatos volna.

Nukleáris energia

Az atomenergetika megítélése

Az atomenergia-hasznosítás helyzete kritikus, ellenzőinek a táborá – különösen Európában – erős, hívei defenzívában vannak. Számos ország elállt az alkalmazásától, csupán néhány olyan ország tartott ki az atomerőmű-építés célszerűsége mellett, amely energetikai ellátásbiztonságát így kívánta erősíteni. Az atomerőművek üzemét ugyanis nem érintik a világgazdaságnak és a világpolitikának az energiahelyzetet befolyásoló hullámzásai. Az atomerőmű üzemének tartós stabilizáló hatása van, mivel a reaktorokban 3-4 év alatt „égetik ki” a fűtőelemeket, és a friss üzemanyag további évekre kis területen tárolható az erőműben. Létjogosultságáról azonban még hosszú ideig elhúzódhatnak a viták, amíg a társadalom belátja, hogy az atomerőművekkel együtt kell élni, hiszen nélküle nem lehet megoldani a világ energiaellátását.

Nincs még egy ipari tevékenység, amelyik ilyen mélyen be lenne ágyazódva a tudományba, és nincs még egy ipari tevékenység, amelyiknek a hitelességét a társadalom jobban kétségbe vonná. E sajátos ellentmondásra a szakma története ad választ. A 20. század elején az atom szerkezetéről és tulajdonságairól kialakult első, tudományosan megalapozott felismeréseket a tudomány rohamos fejlődése követte. Szinte minden év meghozta a maga szenzációs új felfedezését, amiből a magyar tudósok is kivették a részüket (Hevessy, Szilárd, Wigner, Teller), többségük sajnos csak emigrációban. Az ismeretek rohamosan bővülő új világában szinte lehetetlen volt előre látni a fejleményeket, még az egyik legkiválóbb Nobel-díjas, az atomfizikus Rutherford, az angol Royal Society elnöke is úgy vélte az 1930-as években, hogy fantomokat kerget, aki a magenergia gyakorlati hasznosítására gondol. Ehhez képest egy évtizeden belül ledobták az első atombombát, és egy további évtized múlva üzembe helyezték az első atomerőművet.

Sajnálatos módon az atomenergia alkalmazásának inkubátorait a katonák működtették. Ez az „eredendő bűn” mindvégig árnyékot vetett a nukleáris technikára, hiszen a nukleáris energia Hiroshima és Nagaszaki bombáival lépett a történelem színpadára, az első reaktorok az atombombákhoz szükséges plutóniumot termeltek, és hadihajókat hajtottak. A hidegháború évtizedeiben a civilizáció pusztulásával fenyegető atomfegyverek hatalmas arzenáljai tartották rettegésben az emberiséget. Hosszú ideig az alapvető ismeretek is féltve őrzött katonai titkok voltak.

A hadsereg patronálásának azonban volt pozitív hozadéka is. A bomba-fejlesztő Manhattan-projekt keretében létrehozott nagy laboratóriumok sora alapozta meg a „nagy tudomány”-t. E soha nem látott méretű és felszereltségű kutatóintézetek több ezer munkatárssal hatalmas szellemi potenciált képviseltek. A háború múltával minden magára adó ország kiépítette az atomkutatás intézményeit, Magyarország a Központi Fizikai Kutató Intézetet (KFKI). Később ezek interdiszciplináris tevékenységéből nőttek ki más tudományok (pl. biológia, úrkutatás, környezettudomány) bázisai is.

Az ötvenes évek hidegháborús időszakát követő enyhülés kaput nyitott az atomenergia békés alkalmazása előtt. Ezt a lehetőséget az emberiség második tűzgyújtásának minősítették, ambiciózus atomprogramok születtek, amiknek nagy lendületet adott az olajkrízis. Világszerte nagy számban épültek az atomerőművek. Ezt az eufóriát törte meg a Three Mile Island (TMI) atomerőmű balesete 1979-ben Harrisburgban (USA). Ugyan nem volt közvetlen egészségkárosító hatása, de a pánik és a félelem felhívta a figyelmet a súlyos következmények lehetőségére. Néhány országban népszavazás döntött az atomprogram elutasításáról, több állam moratóriumot vezetett be az atomerőművek építésére. Ausztriában egy teljesen kész létesítmény üzembe helyezését vetették el, az Egyesült Államokban a harrisburgi balesetet követően nem született újabb rendelés atomerőműre. Tovább csökkentették a bizalmat az információk a kísérleti atomrobbantások maradandó hatásairól és a kiszivárgott hírek az atomhatalmak katonai létesítményeinél valamint a dúsító és újrafeldolgozó üzemekben bekövetkezett környezetszennyező balesetekről [Hanford (USA), Cseljabinszk (SzU), Windscale, Sellafield (UK), La Hague (F), Sanhszi (Kína) Tokai-Mura (Japán)]. A végső kiábrándulást azonban a csernobili szörnyűség (1986) idézte elő. A katasztrófa nemcsak az érzelmeket és indulatokat szabadította el, hanem a szakma hitelét is aláasta. Az emberek jelentős része az életét és egészségét fenyegető veszélyt látott az atomerőművekben, amelyek félelmetes, és érzékszervekkel nem észlelhető hatásoknak teszik ki az emberiséget. A kiszolgáltatottság érzése erősen befolyásolta a közhangulatot, ami politikaformáló erővé vált. Az antinukleáris mozgalmak erőteljes propagandával, egyesek még erőszakos akciókkal is igyekeztek az érzelmekre hatni, indulatokat szítani. A politikai döntéseket nem a viszonyok tárgyyszerű elemzése motiválta, hanem a szavazatvesztés veszélye. Néhány ország harcosan atomerőmű-ellenessé vált, s másokat is ennek követésére ösztönzött. A politikai nyomás hatására egyes országokban (például Svédország, Németország) még a jól működő atomerőművek idő előtti leállítását is elhatározták.

Sokan úgy vélték, hogy az atomenergia hasznosítása csak átmeneti epizód volt az energetika történetében, és ezt az uralhatatlan veszélyt ki kell iktatni a technika eszköztárából. A fejlett országok jelentős részében az atomenergetika állami támogatása visszaszorult, és az üzleti körök érdeklődése is elapadt. Ezek nyomán megindult a szellemi és az ipari bázis leépülése. A szakma

elvesztette vonzerejét, a tehetséges fiatalok érdeklődése más szakmák felé fordult, még a működő létesítményeket üzemeltető személyzet szakmai utánpótlása is veszélybe került. Közel egy időben esett vissza az államok tudományfinanszírozási készsége, és sorvadt el a befektetők érdeklődése az atomenergetika iránt. A nagy tudományos intézetek profilt váltottak, tevékenységük más, jobban támogatott szakmák felé fordult. A prognózisok reális lehetőségként számoltak az atomenergetika leépülésével.

Az atomenergia ellenzői elsősorban azzal érvelnek, hogy az erőművi balesetek és a radioaktív hulladékok veszélyeztetik a lakosság egészségét és biztonságát, továbbá, hogy a hasadóanyagok hasznosítása növeli a nukleáris fegyverek elterjedésének veszélyét. A félelem nem volt teljesen indokolatlan, de a társadalmi nyomás és a műszaki fejlődés eredményeképp gyakorlatilag sikerült a félelem okait kiküszöbölni. Ennek sikeréről azonban a társadalom nincs meggyőződve, a tájékoztatatlanságra alapuló hiedelmek és téves információk táplálják az atomerőművektől való félelmet, és éltetik az antinukleáris törekvéseket.

A negatívumok publikálására hajlamos média számára hálás téma az atomenergia okozta veszélyek bemutatása, ami felerősíti az emberek ellenérzését. A bonyolult összefüggések közérthető bemutatásának nehézségével küszködő, defenzívába szorult szakma alig tudta hallatni a hangját. A kockázatok hangsúlyozása elfedte az atomenergetika előnyeit, a környezetbarát jelleget, az üvegházgázok kibocsátásának jelentéktelen mértékét, az ellátásbiztonság erősítését, a külső költségek beépülését az önköltségbe, a műszaki fejlődést ösztönző szerepet stb. Az atomerőművekkel kapcsolatos ellenérzésre adható válaszok elfogadtatásához szívós és kitartó tájékoztató tevékenységre van szükség. A félelmek oldásában fontos az őszinte, nyílt tájékoztatás a nukleáris létesítmények működéséről és problémáiról, valamint a gyors, tárgyyszerű információ az esetleges üzemzavarokról. A társadalom aktív támogatásának a megnyerése az atomenergia jövőjének kulcskérdése. A bizalom erősítés fontos tényezője a megfelelően felkészült, független biztonsági hatóság (Magyarországon Országos Atomenergia Hivatal), ami csak a biztonsági követelmények maradéktalan teljesülése esetén engedélyezi a létesítmények működését.

Az objektív tények újabban mintha kezdenének áthatolni a félretájékoztatás kódén, terjed az a vélemény, hogy az atomenergia felhasználása nem szándék vagy ízlés kérdése, hanem szükségszerűség. Figyelembe véve az ásványi tüzelőanyagok drágulását és környezetszennyezését, valamint a megújuló energiák hasznosítható potenciáljának korlátait, egyre erősödik a felismerés, hogy nagyobb távlatban az atomenergia hasznosítása nélkül nem lehet kielégíteni a világ energiaszükségletét. A jól megkonstruált és szakszerűen működtetett atomerőművek sok évtizedes tapasztalata bizonyítja a veszélytelen üzem lehetőségét, és környezetbarát szerepét. Ezeknek a kérdéseknek meghatározó szerepe van az új atomerőmű-generáció tervezésénél. Nagy figyelmet érdemelnek az Egyesült Államokban történő fejlemények, ahol több

jel utal már az atomenergetika reneszánszának kezdetére, de említhetnénk Finnországot is, ahol a parlament döntése alapján egy új atomerőművi blokk létesítésére kerül sor.

A bizalomerosztás szempontjából is nagy jelentősége van a nemzetközi együttműködésnek. Ennek fontos részét képezi a nemzetközi szervezetek [IAEA, International Atomic Energy Agency (Nemzetközi Atomenergia Ügynökség – NAÜ, ENSz szervezet), NEA, Nuclear Energy Agency, (Atomenergia Ügynökség, OECD-szervezet), WANO, World Association of Nuclear Operators (Atomerőműveket Üzemeltetők Világszövetsége), EC, European Commission (Európai Bizottság, EU-szervezet) stb.] által szervezett konferenciák sora, ahol megosztják az új tudományos ismereteket, valamint a gyakorlatban szerzett tapasztalatokat. Az ismeretek talaján sok irányelv és ajánlás is keletkezik, amelyeket az országok jogszabályok és szabványok formájában hasznosítanak.

Az atommag mint energiaforrás

A nukleáris energetika tevékenysége és problémái nem érthetők meg azon alapvető fizikai összefüggések ismerete nélkül, amelyek leírják az atommagokat alkotó nukleonok viselkedését, és azok kölcsönhatásait a szerkezeti anyagokkal. Bár a nukleáris energia hasznosításában és a folyamatok befolyásolásában nagyon sok tapasztalat halmozódott fel, gyakran szembesülünk új jelenségekkel, amelyek e meglehetősen bonyolult technika továbbfejlesztésére ösztönöznek.

A Z rendszámú, M tömegszámú elem atomjának magjában Z számú proton és $N = M - Z$ számú neutron található. Az elemek nagy részénél azonos számú protonhoz különböző számú neutron kapcsolódhat, így M -nek több értéke lehetséges, a Z rendszámú elem izotópjainak megfelelően. Jelenleg az elemeknek kereken 1400 izotópját ismerjük, ezek közül 280 stabil, a többi instabil – radioizotóp –, ami ionizáló sugárzás kibocsátása közben bomlik (lásd a függelék).

A nukleonokat (protonok, neutronok) összetartó magerők biztosítják a mag kötési energiáját, az elemek egy nukleonra eső kötési energiájának alakulását az 1. ábra mutatja, az értékek 1 és 9 MeV/nukleon¹ közé esnek.

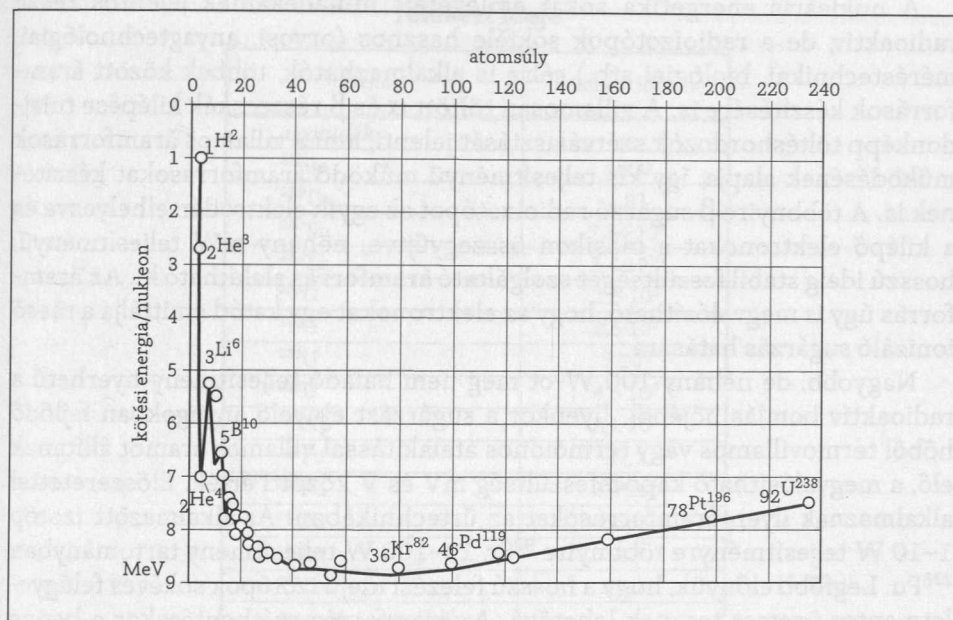
A nukleonok energiája csak meghatározott diszkrét értékeket vehet fel, a lehetséges kvantált változásokat elemi részecske kilépése vagy beépülése kíséri. Az ilyen magátalakulásokat általában a

$$\sum_{i=1}^n M_{1i} + \frac{W_1}{c^2} \rightarrow \sum_{i=1}^l M_{2i} + \frac{W_2}{c^2} \quad (1)$$

összefüggés írja le. A képletben W_1 a közölt és W_2 a felszabadult energia, M_{1i} illetve M_{2i} az átalakulásban részt vevő i -edik elemi részecskék tömege az átalakulás előtt, illetve után, c a fénysebesség. A kötési energia változásának

1. ábra

Nukleonokra jutó kötési energia



fedezete a tömegváltozás, ennek során a tömegek összege megváltozik, de a nukleonok számának összege változatlan marad, viszont változhat az egyéb elemi részecskék száma. Az atommagot összetartó kötési energia egy hányada spontán vagy mesterségesen előidézett magreakciók során szabadulhat fel.

A spontán magátalakulások külső energia befektetése nélkül ($W_1=0$) következnek be, ezek leggyakrabban előforduló válfaja a radioizotópok bomlása, ionizáló sugárzás kibocsátása közben (α vagy β sugárzás, amit gyakran γ foton kilövelése követ). Mintegy 40 természetes eredetű és 1100 atomreaktorokban, vagy részecskegyorsítókban előállított mesterséges radioizotóp ismeretes. A radioizotópok kötése nem stabil, a stochasztikus jellegű bomlást az

$$n = n_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

függvény írja le, t idő alatt a radioizotópok száma n_0 -ról n -re csökken, a λ bomlási együttható által megszabott ütemben. A kezdeti aktivitás a

$$T_f = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

felezési idő alatt csökken a felére. A bomlás ütemét megszabó felezési idő minden állapotjellemzőtől független anyagállandó, értéke izotóponként

nagyon eltérő, vannak μmp -es és vannak Gév-es felezési idejű izotópok. Néhány technikai szerepet játszó izotóp felezési ideje az 1. táblázatban látható.

A nukleáris energetika sokat emlegetett hulladékainak jelentős része radioaktív, de a radioizotópok sokféle hasznos (orvosi, anyagtechnológiai, méréstechnikai, biológiai stb.) célra is alkalmazhatók, többek között áramforrások készítésére is. A villamosan töltött α és β részecskék kilépése tulajdonképp töltéshordozók szétválasztását jelenti, ami a villamos áramforrások működésének alapja, így kis teljesítményű működő áramforrásokat készítenek is. A többnyire β sugárzó radioizotópot az egyik elektródán elhelyezve és a kilépő elektronokat a másikon összegyűjtve, néhány mW teljesítményű, hosszú ideig stabil feszültséget szolgáltató áramforrás alakítható ki. Az áramforrás úgy is megvalósítható, hogy az elektronokat egy katód emittálja a ráeső ionizáló sugárzás hatására.

Nagyobb, de néhány 100 W-ot meg nem haladó teljesítmény nyerhető a radioaktív bomlás hőjéből. Ilyenkor a sugárzást elnyelő anyagokban fejlődő hőből termovillamos vagy termoionos átalakítással villamos áramot állítanak elő, a megvalósítható kapocsfeszültség mV és V közötti érték. Előszeretettel alkalmaznak ilyen áramforrásokat az űrtechnikában. Az alkalmazott izotóp 1–10 W teljesítményre többnyire ^{90}Sr , 10–100 W teljesítmény tartományban ^{238}Pu . Legfőbb előnyük, hogy a hosszú felezési idejű izotópok sokéves felügyeletmentes üzemet tesznek lehetővé. Az áramforrás szétbontásakor a benne levő radioaktív anyag sugárveszélyes, ezért csak megfelelő őrzéssel, vagy megközelíthetetlen helyeken alkalmazhatók.

A gerjesztett magreakciókat elemi részecskék ütközésével közvetített energiabefektetés hozza létre. Kis energiájú kölcsönhatás csak az atom mozgásmennyiségét módosítja, vagy az elektronburokban hoz létre változást (gerjesztés, ionizálás). Nagy energiáhatás a magban is változásokat okozhat, részecskebefogást, proton átalakulását neutronná vagy neutronból proton képződését, és az energetikailag legfontosabb folyamatokat: maghasadást és magegyesülést. Ha a magreakció módosítja a neutronok számát, megváltozik az M tömegszám, és más izotóp jön létre, a protonszám módosulása pedig a Z rendszám változását vonja maga után, és más elem keletkezik.

A nukleáris energia nagyarányú hasznosítását az atommagokat alkotó nukleonok kötési energiája egy részének felszabadítása teszi lehetővé, ami számottevő tömegváltozással jár. Az 1. ábra szerint az egy nukleonra eső kötési energia csökkenésének – vagyis jelentős energiaszabadulásnak – két lehetősége van. Az egyik a görbe minimumától jobbra eső szakaszon a nehéz elemek hasadása közepes rendszámúakra (fisszió), a másik a balra eső szakaszon egyes könnyű elemek egyesítése nehezebb atommá (fúzió). Folyamatos energiateherrel szolgáló szabályozott reakciót egyelőre csak hasadás segítségével tudunk megvalósítani, fegyverek töltetében robbanást mindkét lehetőség alapján létre tudnak hozni. Egy időben kezdték alkalmazni a nukleáris robban-

1. táblázat

**Technikailag fontos radioizotópok
felezési ideje**

Izotóp	Felezési idő, év
<i>aktinidák</i>	
²²⁶ Ra	1600
²²⁸ Th	1,91
²³⁰ Th	$7,54 \cdot 10^4$
²³² Th	$1,4 \cdot 10^{10}$
²³³ U	$1,6 \cdot 10^5$
²³⁴ U	$2,5 \cdot 10^5$
²³⁵ U	$7 \cdot 10^8$
²³⁸ U	$4,5 \cdot 10^9$
²³⁷ Np	$2,1 \cdot 10^6$
²³⁸ Pu	87,7
²³⁹ Pu	$2,4 \cdot 10^4$
²⁴⁰ Pu	6563
²⁴¹ Pu	14,4
²⁴⁴ Cm	18,1
<i>hasadási termékek</i>	
⁸⁵ Kr	10,8
⁹⁰ Sr	28,1
⁹³ Zr	$1,5 \cdot 10^6$
⁹⁴ Nb	$2,3 \cdot 10^5$
⁹⁹ Tc	$2,1 \cdot 10^5$
¹²⁶ Sn	$1,1 \cdot 10^5$
¹²⁹ I	$1,6 \cdot 10^7$
¹³¹ I	8,1 nap
¹³³ Xe	5,3 nap
¹³⁴ Cs	2
¹³⁵ Cs	$2,3 \cdot 10^6$
¹³⁷ Cs	30
<i>aktiválási termékek</i>	
³ H	12,3
¹⁴ C	5730
³⁶ Cl	$3 \cdot 10^5$
⁵⁵ Fe	2,7
⁵⁹ Ni	$7,5 \cdot 10^4$
⁶⁰ Co	5,3
⁶³ Ni	96
<i>ősanyag</i>	
⁴⁰ K	109

tásokat polgári feladatokra is, például nagyléptékű földmunkákhoz, föld alatti üregek kialakításához, szénhidrogén-termelés fokozására. Ezek a kezdeményezések azonban nagyon éles társadalmi ellenállást váltottak ki, egyrészt a környezet szennyezésének veszélye miatt, másrészt az ilyen tevékenységet nehéz megkülönböztetni a fegyverfejlesztést szolgáló robbantásoktól. Időközben az ilyen alkalmazásoktól elálltak, mivel nemzetközi egyezmény (CTBT, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, 1996) a nukleáris robbantások minden módját tiltja.

Ha a magreakciók során csökken a kötési energia, a felszabaduló különbséget az atomból kilépő részecskék (hasadványok, neutronok, fotonok stb.) szállítják el. A neutronok rendszerint nagy energiával lépnek ki a magból, majd energiájukat más részecskékkel ütközve fokozatosan elvesztik. Energiájuk (és ennek megfelelő sebességük) alapján gyorsneutronokat (energiájuk >100 keV), intermedier neutronokat (100 eV–100 keV), lassú (epitermális) neutronokat (0,033–100 eV) és termikus neutronokat ($<0,033$ eV) különböztetnek meg.

A természetben előforduló atomok közül neutronokkal ütközve csak az urán ^{235}U -is izotópja hajlamos hasadásra, ezért szerepe az atomenergetikában meghatározó. Az uránnak sok izotópja létezik, azok tömegszáma 227 és 240 közötti érték lehet. A természetben található urán azonban mindig a 2. táblázat szerinti három komponensből áll.

A ^{235}U -on kívül néhány mesterségesen létrehozott – a természetben nem található – aktinida neutronokkal ütközve szintén hasadóképes, ezeket főleg gyors neutronok befogásával tenyésztanyagokból lehet létrehozni, így a ^{238}U -ból ^{239}Pu , a ^{232}Th -ból ^{233}U , illetve a mesterségesen létrehozott ^{240}Pu -ból ^{241}Pu állítható elő. A magreakciók során nemkívánatos hasadóanyagok is létrejönnek (amerícium, neptúnium, curium stb. egyes izotópjai), de ezek mennyisége nem számottevő.

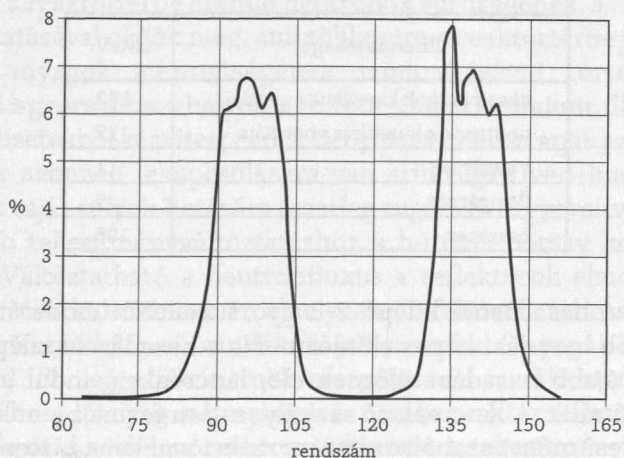
A magátalakulások bekövetkeztének valószínűségi jellege van. A hasadás során az uránatom magja két közepes tömegszámú, nagy sebességgel mozgó töredékatom magjára esik szét. Mivel a nukleonok konfigurációja sokféle

2. táblázat

A természetes urán összetevői

Izotóp	Felezési idő, év	Koncentráció, %	Sugárzás	
			jellege	energiája, MeV
^{238}U	$4,51 \cdot 10^9$	99,28	α, γ	4,21
^{235}U	$7,13 \cdot 10^8$	0,72	α, β	4,52
^{234}U	$2,48 \cdot 10^5$	0,005	α, γ	4,76

Hasadványok gyakorisága



módon alakulhat, ennek megfelelően sokféle hasadvány keletkezhet. Ezek között 35 elem mintegy 300 féle izotópja fordulhat elő a 70 és 160 tömegszámok közötti tartományban, előfordulásuk valószínűsége a 95, illetve 140 tömegszámok közelében helyi maximumot vesz fel (2. ábra). Az első maximumnál főleg Br, Kr, Sr, a másodiknál legnagyobbbrészt Cs, I, Xe izotópok keletkeznek. A felszabaduló energiának mintegy 83%-át a hasadványok kinetikus energiája szállítja el, ami környezetükkel ütközve lefékeződik, és hővé alakul (3. táblázat). A felszabaduló energia fennmaradó hányadát a kilépő 2-3 gyors neutron, valamint nagy energiájú γ sugárzás, α részecske, neutrínó szállítja el, ezek energiájának nagy része az ütközések során szintén hővé alakul. Egy ^{235}U atommag hasadása átlagosan 195 MeV ($\sim 0,3$ pJ) energia felszabadulásával jár, ennek figyelembevételével 1 g ^{235}U egyenértéke kerekén 80 GJ (~ 2 t olajegyenérték), illetve az atomenergetikában használt mértékegységben ~ 1 MWnap. A legvalószínűbb energiamérleg a 3. táblázatban látható, a 195 MeV-ből egy nukleonra 0,83 MeV jut.

A hasadás valószínűsége (illetve az azzal arányos „hatáskeresztmetszet”) erősen függ a neutronok sebességétől. Az ezt leíró jelleggörbék hasadóanyag-típusonként eltérőek, és más sebességtartományban mutatkoznak szélső értékek. Attól függően különböztetik meg a termikus és gyors reaktorokat, hogy a magreakciókban a termikus vagy a gyors neutronok játsszák a főszerepet.

Annak a valószínűsége, hogy egy termikus neutron egy ^{235}U maggal ütközve neutronbefogás után hasadást vált ki, kerekén 0,84. Ez a nagy valószínűség magyarázza, hogy a ^{235}U uránizotóp a mai termikus reaktorok alapvető

3. táblázat

A ^{235}U hasadásának legvalószínűbb energiamérlege

Energia jellege	MeV
hasadványok kinetikus energiája	162
neutronok kinetikus energiája	17
γ sugárzás	11
β sugárzás	5
összesen	195

üzemanyaga. A hasadásnál kilépő 2-3 gyors neutron moderátor anyagban lelassítva újabb hasadást képes előidézni. Ha a hasadásnál kilépő neutronok legalább egy újabb hasadást idéznek elő, láncreakció indul el, a folyamat önfenntartóvá válik. A láncreakció szabályozatlan formája a nukleáris robbanás, stabil teljesítményt szabályozott láncreakcióval lehet biztosítani. Az egymást követő hasadások során egy neutron által átlagosan előidézett, hasadásra hasznosítható neutronok arányát kifejező k sokszorozási tényező, illetve annak 1-gyel csökkentett értéke, az r reaktivitás jellemzi a folyamatok jellegét. A láncreakció önfenntartó szintjét a kritikus állapot jellemzi ($k = 1$, $r = 0$), szubkritikus állapotban ($k < 1$, $r < 0$) a láncreakció lefékeződik, szuperkritikus állapotban ($k > 1$, $r > 0$) viszont felerősödik.

A láncreakció feltétele, hogy elég sok termikus neutron ütközzön kellő számú ^{235}U atommal. Természetes uránból, illetve azt tartalmazó vegyületekből készített fűtőelemek esetén a ^{235}U kis koncentrációja miatt ennek valószínűsége kicsi. Az ütközések számának növelésére vagy sok gyors neutronot kell termikus sebességre lelassítani moderátor anyagok alkalmazásával, vagy fel kell dúsítani a ^{235}U atomok koncentrációját. A moderátor szerepre olyan kis tömegszámú atomok alkalmasak, amelyek kevésbé hajlamosak a neutronok befogására. A legjobb moderátor a nehézvíz (D_2O), és a grafit, ezek alkalmazásával még természetes uránban is létrehozható a láncreakció. Moderátorként számításba jöhet a berillium, és egyes szerves anyagok is. A legolcsóbb moderátor a természetes „könnyű”-víz (H_2O), de ez természetes uránban nem biztosítja a láncreakció feltételét. Láncreakció a ^{235}U -ön kívül a ^{233}U , ^{239}Pu és ^{241}Pu atomokkal is létrehozható.

Ha a termikus neutronok sűrűsége nem elég nagy, növelni kell a ^{235}U izotópok koncentrációját (pl. a könnyűvízes reaktorokhoz a 0,72%-ról 3-5%-ra). Ekkor kellő mennyiségű hasadóanyag jelenléte biztosítja az ütközések elég nagy valószínűségét, ennek küszöbértéke függ a hasadóanyag jellegétől és koncentrációjától, a geometriai elrendezéstől, és a jelen levő egyéb szerkezeti anyagoktól, főleg a moderátortól és a neutronokat visszaverő „reflektortól”.

A reaktorok stabil, stacioner üzemének a feltétele a tartós kritikus állapot. Az energetikai reaktorok stabil üzemét a teljes terhelés és az üresjárat között minden teljesítményszinten biztosítani kell. A gyakorlatban a teljesítményszabályozást a reaktortérbe áramló neutronok sűrűségének, a neutronfluxusnak a változtatásával oldják meg, ami többnyire a reaktortérbe juttatott neutronelnyelő anyagok mennyiségének módosításával történik. A vizes reaktoroknál a gyorsabb szabályozáshoz bór- (néha kadmium, illetve hafnium) tartalmú ötvözetekből készített rudak benyúlását változtatják az aktív zónába. Ha a reaktor azonnali lekapcsolására van szükség, a védelmek biztosítják, hogy a rudak saját súlyuk hatására (esetleg rugóerővel gyorsítva) csússzanak be. A lassúbb teljesítményszabályozáshoz a hűtővíz bórsav koncentrációját módosítják. Változtatható a neutronfluxus a reflektorok elmozdításával is, ezek az aktív zóna külső felszínén elhelyezkedő felületek sebességszökkentés nélkül verik vissza a kilépni szándékozó neutronokat (anyaguk berillium, grafit vagy urán). Elvileg a fűtőelemek mozgatásával is változtatható az aktív zónában levő hasadóanyag mennyisége és ezzel a reaktor teljesítménye. Teljesítményszökkentés közben a reaktor szubkritikus, teljesítménynövelés során pedig szuperkritikus. A hirtelen teljesítménynövekedés a reaktor megszabadását eredményezné, ami ellen a reakciót fékező automatikus beavatkozó szervek védenek, egyes típusoknál – így a könnyűvízeseknél – a reaktor inhere ns fizikai tulajdonságai is megakadályozzák a megszabadást.

Az atomenergetika nagy ígérete a fúzió. A felszabadítható energia fajlagos értéke jóval meghaladja a hasadás során nyerhetőt, a reakcióban részt vevő tömegek 1%-a alakítható át energiává, ami többszöröse a fisszió fajlagos értékének. Az 1. ábra szerint a ${}^4\text{He}$ magot kiugróan magas tömegdefektus jellemzi, magreakciókkal ennek az elemnek a felépítése könnyű atomokból különösen nagy energia felszabadulásával jár. A lehetséges reakciók (4. táblázat) közül jelenleg a figyelem előterében a deutériumot és tríciumot héliummá egyesítő reakció ($\text{D} + \text{T}$) áll (4. táblázat, 6. képlet), mert a ma reálisan elérhető

4. táblázat

Fúzió lehetőségei

Képlet	Reakció	W_2 , MeV
4	$\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$	3,25
5	$\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{H} + \text{p}$	4
6	$\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$	17,6
7	$\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p}$	18,3
8	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{p}$	12,8
9	${}^6\text{Li} + \text{D} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	17,3
10	${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	17,3

hőmérsékleten ennek a hatáskeresztmetszete a legnagyobb. A felszabaduló energia 20%-át a He atommag, 80%-át a kilépő neutron kinetikus energiája szállítja el.

A fúzió pozitív energiamérlegű, tartós és szabályozott módját azonban még a fizikai laboratóriumokban sem sikerült megvalósítani. A vezető ipari országok sokat áldoznak a fúzióval kapcsolatos kutatásokra, és jelentős nemzetközi együttműködést alakítottak ki. A kutatások igen költségesek, mert a tapasztalatok szerint a berendezések léptékének növelése visz közelebb a fúzió feltételeinek a megteremtéséhez.

A fúzióhoz szükséges deutérium forrása a víz, így a tengerek szinte korlátlan deutériumforrást képviselnek. A természetes vizekben a deutérium tömegaránya 0,15%, minden 6700. hidrogénatom deutérium, D_2O vagy DHO molekulákban. A nehézvíz kivonására kidolgozott technikák állnak rendelkezésre. Miután a fúziónál 1 kg He keletkezése 620 TJ felszabadulásával jár, a világtengerek $1,5 \cdot 10^9$ km³-nyi vizében levő $1,9 \cdot 10^{14}$ t deutérium $5,7 \cdot 10^{31}$ J energiát képvisel, ami 11 nagyságrenddel haladja meg a világ jelenlegi éves energiafelhasználását. A nehézvíz-koncentráció 1%-os csökkentése a fogyasztás jelenlegi szintjén 1 milliárd évet meghaladó ellátottságot jelentene.

A D-T reakcióhoz szükséges trícium a vízben csak nyomokban fordul elő, azt magreakciókkal a fúziónál kilépő neutronnal lehetne előállítani lítiumból. A lítium 6-os, esetleg 7-es izotópjá neutronbefogás után tríciumra és héliumra bomlik. Így a D-T reakción alapuló fúzió tulajdonképpen szaporító reaktoros megoldás lenne, amelynek üzemanyagai a hidrogénizotópok, tenyészanyaga pedig a lítium. A világ lítiumvagyonának feltételezett mértéke a D-T reakcióval fejleszthető energia nagyságrendjét a fosszilis tüzelőanyag-vagyon nagyságrendjére korlátozza. Ezt a korlátot feloldaná a D-D reakció (4., 5. képletek), ami ugyan fajlagosan sokkal kisebb energia felszabadulásával jár, de nem függ a lítiumvagyontól. A D-D reakció hatáskeresztmetszete a jelenleg megvalósítható hőmérsékleten két nagyságrenddel kisebb, mint a D-T reakcióé, az azonos hatékonysághoz nagyságrenddel magasabb hőmérséklet szükséges, ezért a fúzió lehetőségének igazolására irányuló kísérletek a könnyebben és gyorsabban megvalósítható deutérium-trícium reakcióra összpontosítanak.

A fúzió előállításához plazmaállapotra van szükség. A magas hőmérsékletű plazmában a pozitív töltésű deutérium és trícium ionok villamosan taszítják egymást. Hőmozgásukban nagy kinetikus energiával kell rendelkezniük, vagy ezzel egyenértékű, magas hőmérséklettel, hogy kölcsönhatásba kerüljenek. A minimális érték 10^8 K (10 keV), aminek már a többszörösét is sikerült előállítani. A magas hőmérséklet elérésére sokféle lehetőség van: a plazma Joule-vesztése, nagyfrekvenciás fűtés, az ionok gyorsítása mágneses és villamos erőterrel, lézerbesugárzás, részecskék nagy energiájú belövése stb.

Az önfenntartó fúziónak elég nagy reakciógyakoriság is feltétele, amihez kellően nagy számú ion viszonylag hosszú idejű jelenlétét kell biztosítani.

A hidrogénionokat időnként plazmapuskával injektálják a reakcióterbe – a pontos adagolás és időzítés bonyolult vezérlési feladatot jelent. A számítások szerint minimálisan 10^{14} – 10^{15} ion/cm³ ionsűrűsége van szükség, amit már több berendezésben is túlhaladtak. Ez a sűrűség nagy vákuumnak felel meg, egy néhány GW-os reaktor reakcióterében az egyidejűleg jelenlevő D-T keverék mennyisége csupán néhány gramm.

A harmadik kritérium a minimális együttmaradási idő, ami legalább egy másodperc. Ez a fúzió egyik kulcskérdése, mert nehéz feladat ennyi ideig összetartani a plazmát a villamos taszítóerőkkel szemben. Erre leginkább mágneses teret használnak, a legtöbb megoldásnál zárt toroidális rendszerben (TOKOMAK). A mágneses tér radiális aszimmetriáját ellensúlyozni kell, erre használható egy szuperponált mágneses tér (STELLATOR), vagy a plazma MA erősségű áramának tere is. Az áramvonalak összehúzódnása növelheti az összetartást az impulzusokkal gerjesztett toroid rendszerben (teta pincs). Növelhető az energiasűrűség mágneses tükrös rendszerben; ez egy hengeres reakcióter, amelynek végén a mágneses erőtér ellentétes irányúra változtatja az ionok mozgását. A több irányból belőtt MJ energiájú, ns tartamú lézer-impulzusokkal is megakadályozható a hidrogén pellet tágulása (SHIVA). Foglalkoznak elektronsugár- és nehéz ionsugárnyalábok, valamint α -sugarak hasonló célú felhasználásával is.

A fúzió három feltételét (hőmérséklet, részecskekoncentráció, együttmaradás időtartama) külön-külön már sikerült elérni, az EU kísérleti berendezésében (JET, Joint European Torus, 1997) néhány perces időtartamú fúziót is már megvalósítottak, azonban a hosszabb idejű stabil állapot létrehozása még várat magára. Ennek teljesülését egy nemzetközi együttműködéssel megvalósítandó, csaknem 10 milliárd dollárba kerülő hatalmas méretű berendezéstől (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor, nemzetközi kísérleti fúziós reaktor) várják, aminek létrehozása azonban finanszírozási nehézségek miatt húzódik. A szabályozott fúzió demonstrációjától azonban még hosszú út vezet az ipari megvalósításig. Az elképzelések szerint a fúziós erőműnél a legbelül elhelyezkedő plazmát vákuumszigetelés fogja körülvenni. A fúzió során keletkező He ionok energiájukat a plazmának adják át, a plazma pedig energiájának jelentős részét hűtött felfogó felületekre sugározza ki. A neutronok és a γ -sugárzás energiáját hűtött köpenyek alakítják át hővé, ezek anyaga vagy hűtőközege lehet a trícium tenyésztésanyagául szolgáló lítium is. A szükséges nagy mágneses teret kriotechnikailag hűtött szupravezetős tekercselések biztosítják.

A konstrukció megalapozásához azonban létre kell hozni a fúziós reaktor elemeinek és rendszerének fejlesztését szolgáló kísérleti berendezések sorát, amihez bonyolult elméleti és kísérleti problémák, valamint nehéz anyagtechnológiai és konstrukciós kérdések várnak megoldásra. Például meg kell oldani 10^8 K hőfokkülönbség hőszigetelését, ki kell fejleszteni a szélsőségesen

nagy igénybevételeknek (hőmérséklet, sugárzás, mágneses tér, erózió stb.) ellenálló szerkezeti anyagokat, biztosítani kell a különleges anyagok (deutérium, trícium, lítium) áramoltatását és szétválasztását, a reagensek adagolását, a fúzió indítását és szabályozását stb. A becslések – a sikeres fizikai áttörést követően – ezek időigényét 4-5 évtizedre teszik. Századunk első felében tehát nem számíthatunk a fúzióra.

Növeli a fúzió vonzerejét, hogy végterméke stabil, kémiaiilag semleges hélium, aminek nincs semmiféle környezetszennyező hatása. A reaktor biztonságos, a reakciótérben olyan kis mennyiségű anyag van, hogy termonukleáris robbanás kizárt, az üzemanyag-ellátás, a hűtés vagy egyéb funkció megszüntése pedig egyszerűen a fúzió megszakadását eredményezi, különösebb következmények nélkül.

A hasadóanyag-potenciál

Urán a Föld felszínén nagy mennyiségben fordul elő, de meglehetősen szétszórtan, átlagos koncentrációja $3\text{--}4\text{ ppm}^2$. Az urán-előfordulások jellege változatos, az uránásványok száma mintegy 150. Az uránérctelepek egy része magmatikus differenciálódás során dúsult fel, az átlagosnál nagyobb uránkoncentráció a magma megszilárdulása közben alakult ki savanyú kőzetekben, főleg gránitokban, mértéke néhányszor 100 ppm is lehet. A kőzetképződés során is dúsult az urán az ércképző elemekkel és más illékony alkotókkal a maradék olvadékban, és főleg a hidrotermikus járatokban ülepedett le, a kialakult telérekben az uránkoncentráció néhány százalékot is elérhet. Üledékes dúsulás is előfordult, az urántartalmú kőzetek eróziója során az urán vizes oldatba lépve eltávozott az anyakőzetből, majd kicsapódva konglomerátumokban, görgeteges kőzetekben másodlagosan feldúsult. A másodlagos dúsulás számára különösen kedvezőek voltak a körülmények a fluviális eredetű homokkőrétegekből álló medencékben (ez jellemzi a hazai előfordulásokat permi homokkőben). Kőzetekben előszeretettel válik ki az urán szerves anyagok vagy pirit redukáló hatására, így néhány százalékos koncentrációjú lencsék és telérek is képződtek. Az erózió során kioldott és vizes oldatban maradó urán végső soron a tengerbe jut, valószínűleg így alakult ki a tengerek átlagosan $3,3\text{ ppb}^3$ uránkoncentrációja.

Az uránérctelepek felderítését megkönnyíti a felszínen érzékelhető radioaktív sugárzás, illetve gázáteresztő fedőkőzet esetén kimutatható a bomlásból származó radon. A γ -sugárzás szelektív mérésével elhatárolható az uránérc az ugyancsak sugárzó tórium és káliumércektől. Mivel az urán hajlamos a vegyületképzésre és az oldódásra, jól alkalmazhatók geokémiai vizsgálatok is. Természetesen a telepek behatárolását és elhelyezkedésük körülményeit csak fúrásokkal lehet tisztázni.

Az uránbányászat a nagy urán-oxid-tartalmú ércek kinyerésére indult meg, a kongói uránszurok telepeken az U_3O_8 koncentráció a 60%-ot is elérte. A gazdag előfordulások kimerülésével egyre soványabb ércek termelésére tértek át, jelenleg elsősorban a gránitokban, homokkövekben, konglomerátumokban feldúsult ércelőfordulásokat aknázzák ki, ezekben a 0,3-0,1%-os koncentrációt is művealónak tekintik. A hazai uránbányászat már a 0,1%-nál soványabb ércek kitermelésére is rákényszerült, méghozzá 1000 m alatti előfordulásokból. Néhol az uránt melléktermékként termelik ki, arany-, réz-, foszfátércekkel vagy olajpalával.

Konvencionálisnak tekintik az urán-előfordulást, ha azt fő terméként termelik ki, hagyományos bányászati módszerrel (külfejtéssel vagy mélyműveléssel), illetve kilúgozással, továbbá, ha az urán lényeges mellékterméke más bányászott ércnek (például arany- vagy rézbányászathoz). A nem konvencionális előfordulások közé sorolják a nagyon alacsony koncentrációjú, ma gazdaságosan nem kitermelhető lehetőségeket (például a tengervízben), valamint a lényegtelen melléktermékeket (pl. foszfátokban, monacit homokban, szénben, lignitben, fekete palában).

Az uránvagyonot többnyire nem a koncentráció, hanem a termelési költség alapján osztályozzák. A hidegháború megszűntével az uráneércből kinyert U_3O_8 koncentrátum (sárga pogácsa, yellow cake) tőzsdei cikké vált, amit a világpiacra a fontnyi mennyiség⁴ dollárban mért költségével jegyeznek, a szokásos kategóriahatárok: 10, 15, 30, 50 USD/lb, újabban terjed a kg használata is (1 USD/lb=2,2 USD/kg). A fémurán árát rendszerint kilogrammra vonatkoztatják, a kialakult szokásos költséghatárok: 25, 40, 80, 130 és 260 USD/kg. Az átszámítást az oxid áráról az $1 \text{ USD/lb } U_3O_8 = 2,6 \text{ USD/kg U}$ összefüggés szolgáltatja. Az atomerőmű-programok visszaesése miatt a kereslet lanya, ennek következtében az uráneércár nyomott, jelenleg 10 USD/lb körül mozog. Az urán legnagyobb részét azonban nem a spot piacon szerzik be, hanem a fűtőelemek szállítására kötött tartós szerződések alapján. A leggazdagabb telepek kimerülése után gazdasági szempontok fogják eldönteni, hogy a soványabb ércek bányászatára is sor kerül-e, vagy az uránvagyon hatékonyabb kiaknázását biztosító eljárások (újrafeldolgozás, szaporítás stb.) kerülnek előtérbe. Egyelőre azonban inkább a bányák bezárása jellemzi a helyzetet.

A világ uránvagyonát a megkutatottság mértéke és a kitermelés költsége szerint kategorizálva tartják nyilván. Az adatok hosszú ideig katonai titkot képeztek, amit egyes régiókban még ma sem oldódottak fel teljesen, ezért az adatokat jelentős bizonytalanság jellemzi. A legjelentősebb urán-előfordulásokat fémben mért értékekkel az 5. táblázat mutatja be. A művealóság határát jelenleg fémuránra vetítve 40 USD/kg-nál vonják meg, a világnak ennél olcsóbban kitermelhető vagyona a nyilvántartások szerint ~1 Mt (ami ~1 ZJ energiaértéknek felel meg a jelenlegi termikus reaktorokban hasznosítva), de előfordulnak ennek kétszeresét kitevő becslések is. A 40-130 USD/kg kategóriában

A legjelentősebb uránvagyonok kt-ban

Ország	RAR*		EAR I**	EAR II***	SR****
	<40 USD/kg	<130 USD/kg	<130 USD/kg	<130 USD/kg	
USA	n. a.	355	n. a.	1273	2198
Kanada	285	326	106	150	700
Dél-Afrika	121	293	76	4	1113
Namíbia	67	180	107		
Brazília	56	162	100	120	500
Oroszország	64	140	36	105	1000
Üzbegisztán	65	83	47	68	102
Ukrajna	n. a.	81	50	4	231
Nigéria	44	71	18		
Mongólia	10	61	21		1390
Kína	1770				
világ összesen	1044	2964	1150	2295	9164

n.a. = nincs adat.

* RAR: Reasonably Assured Resources: ismert, felmért, jelenlegi technológiával kitermelhető és feldolgozható.

** EAR I. Estimated Additional Resources I.: ismert készlet kiterjesztése, nincs felmérve, kevésbé biztos, de valószínű.

*** EAR II. Estimated Additional Resources II.: feltételezett, közvetett indikációval.

**** SR, Speculative Resources: spekulatív készletek.

feltárt vagyon 3-4,5 Mt, a járulékos vagyont 4-6 Mt-ra becsülik és a 130 USD/kg-nál olcsóbb reménybeli vagyont 10-12 Mt-ra teszik. Megjegyzendő, hogy a szárazföldek felszínének eddig csupán 8-10%-át kutatták meg uránra. A nem konvencionális előfordulások közül kiemelkedik a foszfátokban található 50-200 ppm koncentrációjú ~22 Mt uránmennyiség, amit a műtrágya melléktermékeként 40-90 USD/kg-ért lehetne kitermelni. A tengervízben található ~4 Gt urán, termelési költsége mintegy 340 USD/kg U lenne.

A jelenleg nyilvántartott magyar uránvagyon az EAR I. kategóriában 18,4 kt és az EAR II. kategóriában 12,8 kt, de nem műrevalók, mert a kitermelés 80-130 USD/kg tartományba esne.

Az uránérc kitermelésének 80%-a az ércbányászat hagyományos módszereivel történik, a világtermelés 47%-a külfejtésből, és 34%-a mélyművelésből származik. A felszín alatt mintegy 120 m-nél nem mélyebben elhelyezkedő előfordulásokat érdemes külfejtéssel kitermelni, a mélyebben fekvő telepeket pedig mélyműveléssel. Az uránérc rendszerint száraz formációk-

ban található, ami a kitermelést megkönnyíti. Sajnos a homokkőben elhelyezkedő mecseki uránbányánkat nem ez jellemezte, abból nagy mennyiségű vizet kellett kiemelni a termeléshez, és a környezet ivóvízbázisainak megóvása érdekében a vízemelést a felhagyott bányából is folytatni kell, ellenkező esetben a föld alatti vízárak radioaktív szennyezést juttathatnának az ivóvízbe. A mecseki uránércbányában a néhány száz méter mélyen az 1956-ban elindult termelés az évtizedek során 1000-1100 m mélységig jutott, szükségszerűen egyre nagyobb önköltséggel. A bányából 42 év alatt 46 Mt kőzetet termeltek ki, amiből ~21 kt fémuránt nyertek. A magas költség miatt az 1990-es évek elején a bánya bezárására döntés született, amit szociálpolitikai okból néhány évvel később visszavontak, s a paksi atomerőművet a világpiaci árnál lényegesen magasabb átvételi ár megfizetésére kötelezték. Ez a konstrukció azonban tartósan nem volt fenntartható, ezért a bányát 1997-ben végleg bezárták.

Sikeresen alkalmazzák főleg homokkőből az urán in situ kémiai kilúgozását, a literenként 20-200 mg koncentrációjú oldatot csővezetéken továbbítják a fúrólyuktól a feltárás helyére. A világ urántermelésének 14%-át így termelik ki. Az eljárás azonban nehézfémek szennyezésével veszélyeztetheti a vízbázisokat. Mintegy 5%-ra tehető az egyéb módszerek aránya, a más bányatermékek melléktermékeként kibányászott, valamint a felszínen kilúgozással (perkoláció) kinyert urán.

Az uránbányászat veszélyes tevékenység, a bányászokat elsősorban a kőzetpor okozta szilikózis és a radioaktív sugárzás fenyegeti, de a mozgásszervi és a rezgés okozta ártalmak is jelentősek. Magának a kőzetnek a sugárzása nem intenzív, viszont a fejtés következtében kiszabadulhatnak belélegezhető, a szervezetre ártalmas gázok, amelyek közül különösen a radon veszélyezteti az emberek egészségét, ezt intenzív szellőztetéssel lehet ellensúlyozni. Nagyon poros munkahelyeken a por lecsapódására is sort kell keríteni. A sugárzás szintjének csökkentésére a meddőhányókon és az egyéb hulladéktárolóknál is szükség van.

A mecseki ércbányában a dúsabb bányaterméket az ércdúsítóba szállították, a soványabbat perkolációs halmokra, ahol az urán mintegy 60%-át nátrium-karbonátos kilúgozással kinyerve törekedtek további feldolgozásra érdemes termékhez jutni. A bánya környékén meglehetősen sok enyhén sugárzó hulladék gyűlt össze, az ércbánya meddőhányói (50 Mt), a kilúgozott perkolációs halmok (7 Mt), az ércfeldolgozás szilárd maradékai, valamint ülepítő medencékbe helyezett zagyá (20 Mt). Ezek sugárvédelmére és az elfoglalt területek rekultivációjára több évtizedes program készült. Figyelmet érdemlő fejlemény, hogy a felhagyott bányából kiemelt vízben oldott urán van, amit vízkezeléssel ki kell vonni, így kis mennyiségben, de tovább folyik urántermelés.

Hasadóanyag-bázisnak tekinthetők a tóriumérccek is, bár ennek energetikai hasznosítására még nem került sor. A tóriumérccek mennyiségét az urán-

vagyon többszörösére becsülik, a földkéregben található tórium átlagos koncentrációja 12 g/t, ami az uránkoncentráció három-négyszerese. A nagyobb koncentrációjú előfordulások legtöbbször tóriumtartalmú kőzetek elmállása során dúsultak fel. Többnyire a ritka földfémekkel együtt fordul elő, rendszerint más elemekkel együtt érceket alkot, a tiszta tóriumásványok ritkák. Legfontosabb érce a monacithomok. A világ ismert tóriumvagyonát 4 Mt-ra becsülik (ennek 44%-a RAR) aminek közel fele Amerikában és mintegy harmada Európában található. A tórium feldolgozási technológiája nem annyira kidolgozott, mint az urané, kifejlesztése több országban kutatás tárgya. A tórium az uránnál alacsonyabb rendszámának köszönhetően a láncreakcióban nem keletkezik plutónium, más aktinidák mennyisége is kevesebb, ami enyhíti a hulladékproblémát.

A fenntartható fejlődés szempontjából előny, hogy a szerencsére csökkenő katonai igényeken túl az energetikán kívül más ágazatnak nincs igénye uránra, és a tórium más irányú felhasználása (főleg vegyipari katalizátor és adalékanyag formájában) jelentéktelen.

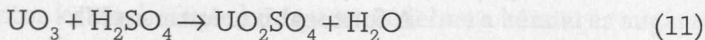
Üzemanyagciklus

A kitermelt hasadóanyagértől sok fázisból álló, bonyolult technológiájú üzemanyagcikluson keresztül vezet az út a reaktorokban hasznosítható üzemanyagig, majd a hasznosítás után a „kiégett,” fűtőelem további sorsához. A technológiát eredetileg katonai célokra fejlesztették ki, amit a polgári alkalmazásokhoz lényegesen módosítottak. Az üzemanyagciklus fejlesztése jelenleg is sokoldalú kutató-fejlesztő tevékenység tárgya. A technológiai fázisok kapcsolatának jellegét a 3. ábra szemlélteti, de ehhez képest lényeges eltérések lehetségesek a technikai követelményektől és a politikai döntésektől függően.

Az üzemek technológiája bonyolult, egyrészt védekezni kell a kémiai ártalmak és a sugárzás ellen, másrészt a láncreakció elindulásának elkerülésére elejét kell venni a kritikus tömeg kialakulásának. Ezen túlmenően biztosítani kell a nemkívánatos személyek hozzáférését megakadályozó fizikai védelmet is. Az üzemek létesítése tőkeigényes, és csak nagy léptékben gazdaságos. Ezért megvalósításuk Magyarországon még távlatilag sem képzelhető el.

A bányatermék tonnánként legfeljebb néhány kg urán-oxidot tartalmaz, a feldolgozás első fázisa ennek a kinyerése. A bánya mellé telepített ércdúsítóban a kibányászott kőzetet törés, aprítás, néha flotálás után golyós vagy csőmalmokban vizes iszappá őrlik, majd kémiai eljárással kivonják belőle az uránércet. Tekintettel a feldolgozásra kerülő ércek sokféleségére, telephelyenként egyedi eljárásokat dolgoznak ki a feltáráshoz. Többnyire savas vagy lúgos eljárást alkalmaznak, de előfordulnak más technológiák is. A leggyakoribb a kén-

savas feltárás, ami az

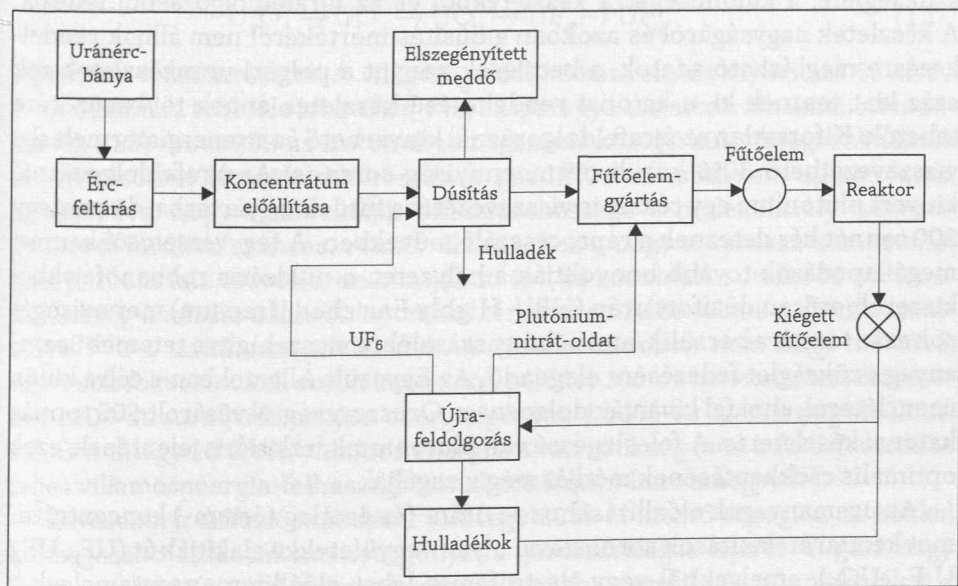


reakción alapul, s ez volt a magyar gyakorlat is. Alkalmaznak só- és salétrom-savas feltárást is, a lúgos eljárások főleg karbonátokat használnak. Biokémiai kilúgozási módszerek is terjednek, baktériumok segítségével nyerik ki az uránt az ércből. A tóriumércek feltárása szintén savas vagy lúgos eljárásokkal történik, további feldolgozásának módja hasonlít az uránéhoz.

Az oldott uránvegyületet szűréssel vagy ülepítéssel különítik el az iszaptól, ezt követően az oldatból többnyire ioncserélő gyantákkal, néha szerves oldószerral vagy csapadékképzéssel választják ki. A gyulladás és a kémiai robbanás elkerülésére a folyamatokat vagy inert gázatmoszférában végzik, vagy nedves porral dolgoznak. Minden műveletnél elengedhetetlen a sugárvédelem, és gondoskodni kell az elfolyó radioaktív szennyvizek hatástalanításáról is. A szűrt és koncentrált anyagot kemencékben szárítják, azután pörkölik és tisztítják. A kivonásnál alkalmazott anyagoktól függően az ércfeldolgozás végterméke vagy tiszta urán-oxid (U_3O_8), vagy urán-oxidot tartalmazó nátrium-diuranát ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$), vagy ammónium-diuranát ($[\text{NH}_4]\text{U}_2\text{O}_7$) koncentrátum. A koncentrátumot sárga színe miatt nevezik sárga pogácsának, annak urán-oxid tartalma 80% körüli érték. (Vannak a sárgától eltérő színű koncentrátumot szolgáltató technológiák is, ami azonban nem érinti a megnevezést.)

3. ábra

Üzemanyagciklus elvi sémája



6. táblázat

A fontosabb urántermelők

Ország	Termelés, t fémurán/év
Kanada	8 500
Ausztrália	6 445
Nigéria	2 910
Namíbia	2 900
Oroszország	2 600
Üzbegisztán	2 300
Kazahsztán	2 000
Egyesült Államok	1 800
Ukrajna	1 000
Dél-Afrika	950
Kína	650
Csehország	606
Gabon	550
Franciaország	465
<i>világ</i>	<i>34 242</i>

A világ termelése jelenleg kereken 35 kt/év fémurán, a legnagyobb termelők és exportőrök a 6. táblázatban láthatók.

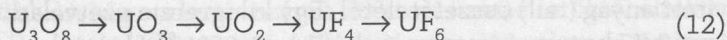
A világ urántermelése kevesebb mint az atomerőművek 64 kt/év körüli szükséglete, a különbséget a készletekből és az újrafeldolgozásból fedezik. A készletek nagyságáról és azokban a dúsítás mértékéről nem állnak rendelkezésre megbízható adatok, a becslések szerint a polgári uránkészletek sok száz kt-t tesznek ki, a katonai rendeltetésű készletek ennek többszörösére tehetők. Kiforratlan az újrafeldolgozásnál kinyerhető és az energiatermelésbe visszavezethető 30% körüli uránmennyiség sorsa is. Az újrafeldolgozásnál kinyert plutónium egy részét is visszavezetik a fűtőelemgyártásba, de mintegy 200 tonnát készleteznek a reprocesszáló művekben. A fegyverzetcsökkentési megállapodások tovább bonyolítják a helyzetet, a nukleáris robbanófejekből kisserelt erősen dúsított urán (HEU, Highly Enriched Uranium) mennyiségét sok száz tonnára becsülik, ami néhány százalékra visszahígítva tetemes üzemanyag-szükséglet fedezésére elegendő. Az Egyesült Államokban e célra külön üzem létesül, ahol fel kívánják dolgozni az Oroszországtól vásárolt 500 tonnás katonai készletet is. A feleslegessé vált plutóniumkészletek is jelentősek, ezek optimális csökkentésének módját még vizsgálják.

Az üzemanyagok előállításához az urán- (és esetleg tórium-) koncentrátumot kémiai átalakítások sorozatával olyan vegyületekké alakítják át (UF_6 , UF_4 , U_3F_8 , UO_2), amelyekből vagy tiszta fémet lehet előállítani, vagy amelyek a

további technológiai lépések legalkalmasabb kiinduló anyagai. E konverziós technológiáknál fontos követelmény a környezet védelme a kémiai és sugárzó anyagok szennyezése ellen.

Természetes összetételű uránból készült üzemanyagot csak néhány, grafit-tal és nehézvízzel moderált reaktortípusnál használnak, és abból készülhet a szaporítóreaktorok tenyészköpenye is. Dúsítatlan uránból a fűtőanyagot tiszta uránfémből vagy fémötvözetből készítik (például Al, vagy Bi felhasználásával), hogy a kritikus tömeget kisebb térfogatban ériék el. A könnyűvízes reaktorokban növelt 235-ös uránizotóp koncentrációjú dúsított uránt használnak. Enyhe dúsításra tértek át a gazdaságosság javítása érdekében a gázhűtésű reaktoroknál, s ezt tervezik a nehézvízes CANDU-reaktoroknál is. A 235-ös izotóp <10%-os koncentrációját enyhe dúsításnak, 10 és 60% között közepes, és >60% estében erős dúsításnak tekintik, a robbanószerkezetekben alkalmazott HEU koncentrációja 90% körül mozog.

A dúsításához a sárga pogácsából többnyire nagy tisztaságú urán-hexafluorid gázt állítanak elő. Az első lépés a koncentrátum tisztítása, különösen fontos a neutronok befogására hajlamos, és ezzel az atomhasadást fékező „mérgek”, a B, Cd, Li és ritka földfémekből álló szennyeződések eltávolítása. Ezt követően kémiai és termikus folyamatok sorozatából álló konverziós eljárással állítják elő az urán-hexa-fluoridot (forráspontja légköri nyomáson 57°C). A leggyakrabban alkalmazott konverziós eljárásnál salétromsavban oldják a sárga pogácsát, a kiszűrt uranil-nitrátból urán-oxidokat állítanak elő, majd megfelelő nyomáson és hőmérsékleten hozzák létre az UF₆ végterméket. Az átalakítások sorrendje



lépéseken vezet keresztül. A világ UF₆ előállító konverziós kapacitása 65 kt/év.

A dúsításra többféle lehetőség van, az ipari gyakorlatban alkalmazott módszerek a 235-ös és 238-as izotópok tömegszáma közötti különbséget aknázzák ki. Az elsőnek létesült dúsítóművek gázdiffúziós módszert alkalmaztak, kihasználva, hogy a molekulák diffúziósebessége a molekulasúly négyzetgyökével fordítva arányos. A szétválasztáshoz a nagy nyomásra komprimált gázt porózus falú csövön áramoltatják át, és a fal két oldalán uralkodó nyomáskülönbség hatására a kisebb nyomású térrészben feldúsulnak a kisebb atomsúlyú ²³⁵U-t tartalmazó molekulák. A dúsulás azonban nem nagy mértékű, ezért sok fokozatot kell sorba kapcsolni, például 3%-os koncentráció eléréséhez 1200-at. Az eljárás nagyon energiaigényes, 1 t 3%-os üzemanyag előállításához mintegy 10 GWh villamos energiára van szükség (ami a fűtőelemciklus teljes villamosenergia-felhasználásának több mint háromnegyede).

Kevesebb, a diffúziós módszer mintegy 10%-át kitevő energiát, de sokkal költségesebb eszközállományt igényel a gázcentrifugás eljárás. A gázt nagy fordulatszámú (60 000/perc) ultracentrifugákba vezetik, és a molekulákat a

centrifugális erő segítségével osztályozzák, a kisebb molekulasúlyú komponensek a tengely közeléből vezethetők el. Bár a dúsításhoz elég mintegy 20 centrifugát sorba kötni, a szükséges mennyiség biztosításához nagyon sok centrifugát kell párhuzamosan kapcsolni, így az elemek összesített száma több mint a diffúziós eljárásnál. A később létesült dúsítóművek centrifugás eljárásra alapultak, és ezt tartják a közeljövő legígéretesebb módszerének.

Nagy reményeket fűztek a szétválasztáshoz lézersugár segítségével, amikor a fotonokkal szelektíven ionizált 235-ös uránatomokat villamos erőterrel lehet kiválasztani. Az eljárást egyrészt urán fémgőzben, másrészt UF_6 gázban fejlesztették, de az utóbbi időben a várakozások elhalványultak.

A kutató-fejlesztő munka más lehetőségekre is irányul. A legkisebb beruházást a szétválasztó fűvókás rendszer igényli, amelyben a hidrogénáramban felgyorsított, nagy sebességű gázáramot elterelik, és az így kialakuló centrifugális erő végzi az osztályozást. A különleges profilú fűvókákat a mikroelektronika technológiájával alakítják ki, a szükséges elemek száma kicsi, de az energiaszükséglet a diffúziós eljárásét is meghaladja, ezért az eljárás drága. Kutatják a szeparáció lehetőségét mágneses, valamint rádiófrekvenciás térrel plazma állapotú uránban, mivel e terekben az eltérő tömegszámú izotópok viselkedése is eltérő. Felvetődött a diffúziós és centrifugás eljárás kombinációja örvénycsövekben. Enyhén dúsított urán előállítására dolgoztak ki kémiai eljárást is, ioncserélők segítségével.

A dúsítási munka jellemzésére vezették be a szétválasztási munka (SWU, Separative Work Unit) megegyezésen alapuló mérőszámát, ami bonyolultan függ a dúsítás mértékétől, valamint a nyersanyag és a visszamaradó elszegényített anyag (tail) összetételétől. Egy kilogramm szétválasztási munka szükséges 3,77 kg természetes uránból 1 kg 1,65% ^{235}U tartalmú dúsított urán előállításához, az elszegényített anyagban a ^{235}U koncentrációja 0,355% lesz. Egy kg 3%-ra dúsított urán előállításához 4,3 kg szétválasztási munka szükséges, ha 0,2%-os elszegényítést engednek meg, a szükséges nyersanyag ilyenkor 5 kg. Ha viszont a visszamaradó anyagban 0,35%-os koncentrációt irányoznak elő, a szeparációs munka 3 kg-ra csökken, a szükséges nyersanyag viszont 7,2 kg-ra nő. Mintegy 100-120 k (SWU) dúsítási munka szükséges egy 1 GW-os LWR-reaktor egyéves üzemanyag-szükségletének biztosításához.

Egy GWnap villamosenergia-fejlesztéséhez átlagosan 0,45-0,6 t természetes uránra és 0,3-0,45 t dúsítási munkára van szükség, a visszamaradó elszegényített urán mennyisége az üzemanyag 6-8-szorosa. A dúsítóműveknél felhalmozódott elszegényített urán mennyiségét 1 Mt-ra becsülik, amit többnyire acélhordókban folyékony UF_6 formájában tárolnak. Korábban az volt az elképzelés, hogy a visszamaradó elszegényített urán a szaporítóreaktorok üzemanyaga lesz, e helyett – mivel ezeknek a reaktoroknak a fejlesztése elakadt – a dúsítóüzemek melletti tárolókban várják sorsukat (egyedül páncéltörő lövedékekben hasznosítják töltőanyagként, nagy tömegszámuk miatt).

Jövőjükre – a tenyésztésen kívül – különféle elképzelések születtek: temetés oxid formában, visszadúsítás után (például HEU-val „megsózva”), vagy plutóniummal keverve hasznosítása reaktorban.

Az atomfegyverek nukleáris tölteteiben nagyon erősen dúsított uránra van szükség, így a dúsítás az egyik kapcsolat a polgári és katonai alkalmazás között. A dúsítók hosszú ideig az atomnagyhatalmakban katonai felügyelet alatt álltak, a technológiák szigorú katonai titkot képeztek. A dúsításhoz szükséges üzemek beruházási költsége igen magas, és csak nagy léptékben kifizetődő. Az erőmű-építési programok idővel a polgári célú dúsítók létesítését is napirendre tűzték, de egyrészt a gazdaságos méret érdekében, másrészt a monopolhelyzetek elkerülésére országcsoportok közös üzemeit hozták létre, az URENCO-t Anglia, Hollandia és Németország, illetve az EURODIFF-et Franciaország, Belgium, Spanyolország és Olaszország, később kisebb létesítményeket más országok (Japán) is kiépítettek. A világ összesített dúsítási kapacitása jelenleg kb. 145 kt/év, illetve 56 millió SWU/év. Ez a kapacitás elegendő lenne a világ jelenlegi erőmű-kapacitásának a háromszorosára is. Mára az atomfegyverekben az uránt erősen háttérbe szorította a plutónium, és ezzel az urán dúsítása kényes technológiából piaci tevékenységgé változott. A katonai megrendelések elmaradása, és az erőművi igények visszaesése felesleges dúsítási kapacitásokat eredményezett, ennek nyomán a szolgáltatás árai is mérséklődtek.

A dúsítatlan vagy dúsított üzemanyagokból a reaktorok konstrukciójának megfelelő fűtőelemeket kell készíteni. Míg világszerte csupán néhány konverziós és dúsítóüzem működik, gazdaságossági érdekek miatt, a fűtőelemek előállításában a legtöbb ország – a kevés számú reaktort üzemeltetőktől eltekintve – önellátó. E kapacitások összessége hasadóanyag-tartalomra vetítve a könnyűvízes reaktoroknál 10 kt/év, a gázhűtésűeknél 1,5 kt/év, és a CANDU-reaktoroknál 3,5 kt/év. Az utóbbiaknál a nehézvíz előállítása is kényes feladat.

A dúsítás befejeztével a fűtőelemgyártáshoz az UF_6 gázból valamilyen szilárd halmazállapotú uránvegyületet állítanak elő. A könnyűvízes reaktorokban UO_2 porból kötőanyaggal oxidkerámiai módszerekkel szinterizált üzemanyagot használnak. E célra kb. 1 cm átmérőjű és néhány cm magas pasztillákat készítenek, amelyek keramikus anyaga erős fizikai és kémiai hatásoknak is ellenáll. A többnyire cirkónium ötvözetből, néha különleges acélból készített burkolatban egymásra helyezett pasztillákból alakítják ki a fűtőelemrudakat. A burkolattal szemben követelmény a hermetikusság és a szélsőséges igénybevételek elviselése. A megfelelő szerkezeti elemekkel összefogott fűtőelemrúd-kötegek alkotják a kazettákat (Pakson egy kazettában 126 fűtőelemrúd van), a reaktorok üzemanyaggal kapcsolatos műveleteit a kazeták mozgatásával végzik. A paksi reaktorok mindegyikében 349 kazetta található, ebből 312-ben dúsított üzemanyag van, ezekből évente 90-et cserélnek. A teljes kiegészítés négy évet vesz igénybe. 37 kazettában szabályozórudak

helyezkednek el, ezek alsó részén szintén kisebb mennyiségű üzemanyag helyezkedik el. A reaktorban összesen 42 t urán található, egy kazettában pedig mintegy 110 kg.

Karbidokkal jobb hővezetőképességet lehet elérni, mint az oxidokkal. A magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorokban gyakran karbid fűtőelemeket alkalmaznak, de ezek vizes reaktorokban nem használhatók, mert a vízzel reakcióba lépnek. Nagy reményeket fűznek a nitrid üzemanyagokhoz, mivel jó hővezetőképességük révén magas hőmérsékleten alkalmazhatók. A hulladékkezelés szempontjából külön előnyük, hogy pirokémiai módszerekkel reprocesszálhatók. Vizsgálják szilicid- és szulfidvegyületek alkalmazhatóságát is. Hogy a kiégett üzemanyagból a plutóniumot ne lehessen kinyerni, fejlesztenek olyan inert mátrixú anyagokat, amelyekben fizikai vagy kémiai kapcsolatban megbonthatatlanul megkötik a Pu-t. Hasonló célból foglalkoznak fluoritban rögzített plutóniummal is (szikla jellegű üzemanyag).

Külön figyelmet érdemel a Dél-afrikai Köztársaságban megvalósuló atomerőmű, amelynek üzemanyagát szakaszos áramlásban tartott részecskék alkotják. Ezek magja 650-850 μ átmérőjű 10%-ra dúsított urán-oxid mikrorészecske (pebble), amit több rétegben moderáló hatású karbid anyaggal vonnak be, a végső alak átmérője mintegy 6 cm. A nagyszámú részecskét a tervezett kiégetésig hatszor áramoltatják át a reaktoron.

Az atomenergetika hajnalán voltak elképzelések a folyamatos üzemanyagpótlás érdekében folyékony fűtőanyaggal, például uránsó vizes oldatával, folyadékban egyenletesen szuszpendált hasadóanyaggal, esetleg pasztaszerű képlékeny konzisztenciájú anyaggal üzemeltetett reaktorokra, azonban a technológiai nehézségek miatt ezek nem valósultak meg. A magas hőmérsékletű reaktorokhoz a kutatások újraéledtek sóolvadékban oldott tórium-fluoridos üzemanyagokkal, mert az olvadékban egyrészt megvalósítható a kiégett üzemanyag folyamatos reprocesszálása, másrészt a hosszú élettartamú hulladékok transzmutációja.

A láncreakció következtében olyan folyamatok is kialakulnak az üzemanyagban, amik korlátozzák az energiafejlesztés lehetséges időtartamát. Egyrészt a hasadványok között neutronbefogó atomok – „mérgek” – is megjelennek, például Xe, Kr, Sm, amelyek a láncreakciót lefékezik. Másrészt a hasadványok egy része gáznemű, ezek mennyisége és nyomása az idő előrehaladtával nő, s veszélyezteti a fűtőelemburkolat épségét és hermetikusságát. Ezek következtében a fűtőelemekben lévő hasadóanyagnak csupán egy hányadát lehet ténylegesen energiafejlesztésre hasznosítani. Ezt jellemzi a kiégetési szint, ami a tömegegységből nyerhető energia. Urán esetében 1%-nyi hasadóanyag kiégetése 9,13 GWnap/t-nak felel meg. Jelenleg urán-oxid fűtőelemeknél termikus reaktorokban 30-40 GWnap/t kiégetés érhető el, gyorsreaktorokban ~100 GWnap/t. A fémuránból készült fűtőelemek kiégetési szintje alacsony, karbidos fűtőelemeknél 50-60 GWnap/t-ás kiégetést terveznek.

A kiégetési szint elérésekor a fűtőelemeket cserélni kell. Könnyűvízes reaktorok fűtőelemeit 3-5 év alatt égetik ki (Paks jelenleg tér át a 4 éves periódusidőre, de tervezik az 5 évre alkalmas fűtőelemek alkalmazását). Miután a reaktorokban a neutronfluxus nem egyenletesen oszlik el, a fűtőelemeket az egyenletesebb kihasználás érdekében időnként átrendezik. A tartálytípusú reaktoroknál a fűtőelemek átrendezésére évente-másfél évente kerül sor, miközben azok egyharmadát újakra cserélik. Az átrakáshoz néhány hetes üzemszünetre van szükség. A gázhűtésű és a csatornatípusú reaktoroknál nincs szükség a reaktor leállítására, mert az átrakásra és cserére üzem közben van mód, golyós üzemenyagnál a cserét az áramlás folyamatosan biztosítja.

A nukleáris potenciál bővítése

Az urán energetikai potenciáljának hasznosítása a jelenlegi reaktortípusokkal nagyon rossz hatékonysággal történik. A könnyűvízes reaktorok (LWR, Light Water Reactor) a potenciálnak mintegy 0,5%-át aknázzák ki, valamivel jobb a nehézvízes reaktorok (HWR, Heavy Water Reactor) 1%-os aránya, a magas hőmérsékletű reaktoroknál 2-3%-os hasznosulást remélnek. Ha a villamosenergia-fejlesztéshez szükséges hőkörfolyamat hatásfokát is figyelembe vesszük, a mutatók még sokkal rosszabbak. Ilyen hatékonysággal a világ műrevaló uránércvagyonából (<40 USD/kg) a jelenleg domináns termikus reaktorokkal kinyerhető energia a műrevaló kőolajvagyon harmadát sem éri el. Még a drága előfordulások (<130 USD/kg) figyelembevételével sem ígéri a műrevaló fosszilis tüzelőanyag-vagyon meghaladását.

A hasznosítás növelésére a jelenlegi technika mellett is vannak lehetőségek. Néhány százalékos többletet eredményez a dúsításnál a 235-ös izotóp nagyobb arányú kinyerése a természetes uránból, vagyis a visszamaradó urán elszegényítésének fokozása. Jelenleg az elszegényítést átlagosan 0,3%-ig folytatják, az érc drágulása vagy ellátási feszültségek esetén a gazdaságosságon múlik, hogy érdemes-e ezt 0,2-0,15%-ra csökkenteni. Növelhető a dúsítás mértéke is, könnyűvízes reaktoroknál a szokásos 3-3,8%-ról 4-4,5%-ra, nehézvízeseknél 0,7%-ról ~1,2%-ra. Technológiai korszerűsítéssel növelhető a fűtőelemek kiégetésének mértéke is, például nyomottvízes reaktoroknál (PWR, Pressurized Water Reactor) 45 GWnap/t-ról 60 GWnap/t-ra (később esetleg 80-ra), forralóvízes reaktoroknál (BWR, Boiling Water Reactor) 35 GWnap/t-ról 50 (75) GWnap/t-ra, a nehézvízes reaktoroknál akár többszörözés (7→20 GWnap/t) is megoldható.

Jelentősen javítja a kihasználást a kiégett fűtőelemek újrafeldolgozása (reprocessálás), ha a hasadóképes alkotókat visszavezetik az energiatermelésbe. A LWR-reaktorok kiégett fűtőelemében 0,8-1,0% ²³⁵U és a kiégetés mértékétől függően 0,4-0,6% ²³⁹Pu található. A Pu visszavezetése a fűtőelem-

gyártásba mintegy 12%-kal csökkenti a friss uránigényt. Az urán visszavezetésével további csökkenés lenne elérhető, de ezzel nem élnek a reaktorból kikerült urán sugárzásának magas szintje miatt, ami bonyolítaná a fűtőelemciklus technológiáját. Az újrafeldolgozással szemben erős a társadalmi és politikai ellenállás, mert hozzáférhetővé válik a plutónium, aminek viszonylag kis mennyisége elég a kritikus tömeg – és így robbanószerkezet – létrehozásához. Ezért a polgári felhasználást célzó újrafeldolgozást elsőként az Egyesült Államok tiltotta be, amit később más országok is követtek. Az USA politikai és gazdasági nyomással sikertelenül törekedett a reprocessálás tilalmának általánossá tételére, mert néhány állam (Anglia, Franciaország, Japán, Oroszország) kitartott mellette, egyrészt az energetikai lehetőségek teljesebb kiaknázása, másrészt a hulladékelhelyezés gondjának enyhítése érdekében. Később kisléptékű reprocesszáló művek másutt is megvalósultak.

Jelenleg mintegy 6 kt/év-re tehető a reprocesszáló művek összesített kapacitása, amivel évente ~3 kt nehézfémeket dolgoznak fel. A világon évente keletkező kiégett fűtőelemekben ~10,5 kt nehézfém található, amiből az erőművekben és az újrafeldolgozó művekben eddig mintegy 250 kt nehézfém halmozódott fel (abban mintegy 2 kt Pu), a reprocesszálókból visszamaradt feldolgozatlan plutónium mennyisége ~200 t. Egyre valószínűbb, hogy az újrafeldolgozás át fogja törni az ellenállást, mert azonos irányban hat más fontos feladatokkal: az energiabázis bővítésével; a nagy aktivitású radioaktív hulladék mennyiségének csökkentésével; a felesleges katonai hasadóanyag-készletek felszámolásával.

Az újrafeldolgozás előtt a kiégett fűtőelemeket néhány évig víz alatt tárolják, miközben csökken a sugárzás és a hőfejlődés mértéke. Az újrafeldolgozásra több technológiát dolgoztak ki, legáltalánosabban a PUREX (Plutonium Uran Extraction) eljárást használják. Ez a pihentetés után a fűtőelemek feldarabolásával kezdődik, majd forró salétromsavval kioldják az üzemanyagot, és különválasztják a szerkezeti anyagokat. A vizes savas oldatból tributil-foszfátban oldva vonják ki az uránt és a plutóniumot (valamint a neptúniumot). Jó néhány más nedves technológia is fejlesztés alatt áll, a száraz eljárások pirokémiai módszerrel választják szét a hasadóanyagokat magas hőmérsékleten olvasztott kloridsóban.

Az újrafeldolgozás igen kényes művelet, mivel nagy mennyiségű, erősen sugárzó veszélyes anyag válik hozzáférhetővé. Az erős sugárzás miatt a technológia távkezelt és nagymértékben automatizált. Gondoskodni kell a kiszabaduló (főleg radioaktív H, C, Kr, I, Pu izotópokat tartalmazó) gázok és a nagy aktivitású (H, Co, Sr, Sb, Ru, I, Cu izotópokat, transzuránokat és hasadványokat tartalmazó) folyékony hulladékok kezeléséről és elszigeteléséről is.

A plutónium kezelése nagy elővigyázatosságot igényel, ami fokozott biztonsági és őrzési követelményekkel jár együtt. A plutónium tárolása körülményes, a tárolótartály törése is bekövetkezhet, mert egyrészt maga a plutóni-

um a hőmérséklet növekedésével erősen kiterjed, másrészt a fejlődő gázok nyomása is jelentős (ezért a szállításnál háromszoros védőburkolatot alkalmaznak). Többéves tárolása problematikus, mert bomlása során erősen sugárzó amerícium képződik, amit el kell távolítani. Kémiai mérge is, bár veszélyességének mértéke vitatott. A plutónium rideg és alacsony forrponútű, fémekkel reakcióra hajlamos anyag, ezért önmagában nem, csak vegyületekben vagy ötvözetekben alkalmas üzemanyag. A nukleáris nagyhatalmak ma az atomfegyverekből kisserelt felesleges plutónium készleteik leépítésére keresik a megoldásokat. A plutónium jövője lehet a közvetlen temetés, lehet hasznosítás a jelenlegi könnyűvízes reaktorokban, vagy jövőbeli felhasználása a gyorsreaktorokban. A legracionálisabbnak üzemanyagként történő felhasználásuk tűnik, felhívítva, energiatermelő reaktorokban.

A plutónium hasznosításához az urán és a plutónium oxidjaiból kevert fűtőanyagot (MOX, Mixed Oxide) gyártanak, amiben a ^{239}Pu aránya 5-10%, és ennek következtében feleslegessé válik az urán dúsítása. A jelenlegi könnyűvízes reaktorok töltetének mintegy harmadát lehet konstrukciós változtatás nélkül MOX-fűtőelemekkel helyettesíteni, de az üzemvitel kisebb módosítására ilyenkor is szükség van, és tekintettel a plutóniumra, fokozott biztonsági és őrzési feladatokat is meg kell oldani. Néhány országban (főleg Nyugat-Európában és Japánban) terjed az ilyen fűtőelemek használata, több tucatra tehető a MOX fogadására alkalmassá tett könnyűvízes reaktorok száma, és a gyorsreaktorokban is hasznosíthatók. A MOX-fűtőelemek is reprocessálhatók, esetleg többször is, de a ciklusok során romló hasadóanyag-mérleggel, mert reaktormérgek és a nemkívánatos elemek (például Cm és többféle Pu izotóp) dúsulnak fel, ezért az újrafeldolgozást 2-3-nál többször nem tartják célszerűnek. A MOX-fűtőelemek gyártására képes összesített kapacitás jelenleg 190 t/év, amivel évente 10-12 t Pu dolgozható fel. Eddig összesen 35 t Pu-t tápláltak vissza a fűtőelemgyártásba (~750 t nehézfémbe), de ilyen ütemmel nehezen lesz felszámolható az eddig felhalmozott 200 t-ás polgári plutóniumkészlet, nem beszélve az ennél sokkal nagyobb felesleges katonai készletekről. Ezért is tekintik sokan a MOX-gyártást átmeneti megoldásnak a plutóniumot is hasznosító gyorsreaktorok megvalósulásáig. A plutóniumtárolás és -kezelés gondjainak elkerülésére az újrafeldolgozás ütemét gyakran a MOX-szükséglet alakulásához illesztik, ami együtt jár a kiégett fűtőelemek hosszabb idejű tárolásával.

Az újrafeldolgozást eredetileg a katonai hasadóanyag-szükséglet fedezésére dolgozták ki, később a szaporító reaktorok üzemanyag-ellátására szánták, jelenleg a cél leginkább a nagy aktivitású radioaktív hulladékmennyiség csökkentése. A nukleáris üzemanyagciklust sokféleképp lehet kialakítani, aminek egyik kulcskérdése a kiégett fűtőelemek sorsa. Ennek eldöntését az országok egy része függőben tartja, várva a döntést befolyásoló politikai, gazdasági és műszaki körülmények fejleményeit. Néhány ország a kiégett fűtőelemek köz-

vetlen eltemetése mellett foglalt állást (így USA és Svédország), hogy mentesüljenek a további politikai huzavonától. A közvetlen temetésnél a legtovább a ^{99}Tc és a ^{237}Np radioaktivitása érvényesül, mintegy 400 ezer év alatt csökken az eredő aktivitás a természetes háttérsugárzás felére. Az amerikai kongresszus és a finn parlament már ki is jelölte a végleges elhelyezés telephelyét. Az újrafeldolgozás pártolói (például Franciaország, Japán, Oroszország) nemcsak a kiégett fűtőelemek energiaértékének a hasznosulását tekintik előnynek, hanem a temetendő nagy aktivitású hulladékok mennyiségének lényeges csökkenését is. Az urán kivonása után a kiégett fűtőelemek eredeti nehézfém tömegének 3-4%-át kitevő hasadványok maradnak vissza (főleg hosszú élet-tartamú ^{99}Tc és ^{129}I), ami kiegészül a mintegy 1%-nyi plutóniummal, ha azt nem kívánják üzemanyagként hasznosítani. Ezt a hulladékot bórszilikát üvegbe foglalják, az így nyert temetendő térfogat a kiégett fűtőelem eredeti térfogatának mintegy 10%-a. Egy tonna fűtőelemből az újrafeldolgozás után $0,115\text{ m}^3$ nagy aktivitású, $0,35\text{ m}^3$ közepes aktivitású és némi szuperkompaktált kis aktivitású hulladék elhelyezéséről kell gondoskodni.

A reprocessálásnál mód van a láncreakció során keletkező kis mennyiségű hasadóképes egyéb transzuránok elválasztására és hasznosítására is. Ezek mennyisége a plutónium néhány százalékának felel meg, a neptúnium a plutóniummal együtt vonható ki, az ameríciumot és az abból keletkező curiumot külön eljárással kell szétválasztani a hasadványoktól. Ezzel nemcsak a nagy aktivitású hulladék mennyisége csökken, hanem e gyorsneutronok hatására hasadó transzuránok hozzájárulnak az energiatermeléshez is.

Az atomenergetikai potenciál nagyarányú bővítésére az ad módot, hogy néhány izotóp – a tenyésztanyagok – neutronok befogásával gerjesztett magreakciók során hasadásra hajlamos izotóppá alakul át. A ^{238}U gyors neutronok hatására hasadóképes ^{239}Pu -má alakul, ezzel a természetes urán nagy része energetikailag hasznosíthatóvá válik, a potenciál elméletileg 140-szeresére, gyakorlatilag mintegy 70-90-szeresére nő. Tenyésztés magukban a termikus reaktorokban is zajlik, és a keletkező plutónium egy része részt is vesz az energiatermelésben, másik része a kiégett fűtőelemben található. A termikus reaktorokban fejlesztett hőenergia tetemes hányada – reaktortípustól függően 30-60%-a – plutónium hasadásából származik. A hasadóanyag-viszonyokat a konverziós tényezővel jellemzik, ami a reaktorban képződő ^{239}Pu és a láncreakcióban elhasznált ^{235}U tömegének aránya. Néhány termikus reaktortípusra a konverzió mértéke a 7. táblázatban látható, e reaktorokat közös megnevezéssel konverterreaktoroknak is nevezik. Jellemzőjük, hogy a tenyésztett és a láncreakcióban elhasznált hasadóanyag domináns része nem azonos elem. Míg a konverterreaktorokban a konverziós tényező egynél kisebb, a szaporítóreaktorokban az egynél nagyobb.

A 238-as urán nagymértékű hasznosítására a lehetőséget a szaporítóreaktorok kínálják. Ezekben az energiatermelő fűtőelemeken kívül tenyész-

7. táblázat

Konverziós együtthatók

Reaktortípus	Konverziós tényező, g/g
nyomottvízes (PWR)	0,28–0,35
forralóvízes (BWR)	0,31–0,38
gázhűtésű-grafitmoderált (GGR)	0,23
fejlett gázhűtésű (AGR)	0,34
nehéztvízes (HWR)	0,57–0,6

anyagokat tartalmazó tenyészköpenyeket is elhelyeznek, amelyekben több hasadóanyag keletkezik, mint amennyit az energiatermelés elhasználna, innen származik a reaktor megnevezése. A tenyészköpenyekből az újrafeldolgozás szokásos módszerével nyerhető ki a hasadóanyag. A ^{238}U -ból a ^{239}Pu -t a hasadásnál keletkező gyorsneutronokkal lehet tenyészteni (ez magyarázza a gyorsreaktor megnevezést), ezért az ilyen szaporítóreaktorokban nincs szükség moderátorra. A szaporítás mértékét nemcsak a konverziós tényezővel jellemzik, hanem a kettőzési idővel is, ami alatt a tenyésztéssel előállított hasadóanyag mennyisége megegyezik a reaktor eredeti töltetével. Ez függ a fűtőanyagciklus jellegétől is, mert magában foglalja a tárolás és reprocessálás időszükségletét is. A megvalósult gyorsreaktorokkal a kettőzési idő 20 év körüli, de reálisnak tartják ennek leszorítását 5-10 évre. Egy időben ambiciózus tervek születtek olyan erőműrendszerekre, amelyekben a konverter- és szaporítóreaktorok megfelelő arányával kiküszöbölhető az uránbányászat és a dúsítás, mert a tenyésztéssel több konverterreaktor látható el üzemanyaggal.

Több országban sikeresen megvalósítottak szaporítóreaktorokat (a legnagyobbat Franciaországban, Superphenix, 1,2 GW), de a technika egyelőre lekerült a napirendről. A reaktorok drágák voltak, és az atomprogramok visszaesése miatt tulajdonképp nem is volt igény a hasadóanyag-kínálat bővítésére. A programok visszafogásának azonban a legfőbb oka a társadalmi ellenzés a plutónium szerepe miatt, ráadásul kisebb üzemzavarok visszatérően nyugtalanították is a közvéleményt. Jelenleg sehol sem készülnek szaporítóreaktorokkal energetikai rendeltetésű plutóniumgyártásra, de az opciót nem lehet kizárni, ha a világ energiahelyzete ezt megkívánja.

A szaporításnak egy másik útját kínálja a tórium, mivel a ^{232}Th -ból termikus neutronbefogással hasadóképes ^{233}U állítható elő. A ^{233}U a leghasadóképesebb atom termikus és epitermális neutronok esetében. Több országban, különösen a nagy tóriumvagyonnal rendelkező Indiában jelentős program folyik a tóriumos reaktorok kifejlesztésére. Olyan üzemanyagciklus fejlesztése is cél, amelynél nincs tenyészköpeny, hanem az uránnal egyszer beindított reaktor fűtőelemeiben a $\text{Th} \rightarrow \text{U}$ konverzió fedezi a folyamatos energiaszolgá-

tatáshoz szükséges hasadások mértékét. A ThO_2 jó hővezető, ezért alkalmas anyag magas hőmérsékletű reaktorokhoz is. A hulladékkezelés szempontjából nagy előny, hogy egyrészt a Th alacsony rendszáma következtében az üzemanyagciklusban nem keletkezik plutónium, kevés képződik egyéb aktinidákból is, a leányelemek is gyorsan lebomlanak, másrészt a ThO_2 oxid-forma nagyon stabil, és nem alakul át más oxidokká.

Tenyésztéssel még egy mesterséges hasadóanyag állítható elő, a ^{241}Pu a ^{240}Pu -ból, de ennek az energetikai szerepe nem számottevő, egyrészt a tenyésztés maga is mesterségesen létrehozott izotóp, másrészt rövid a felezési ideje.

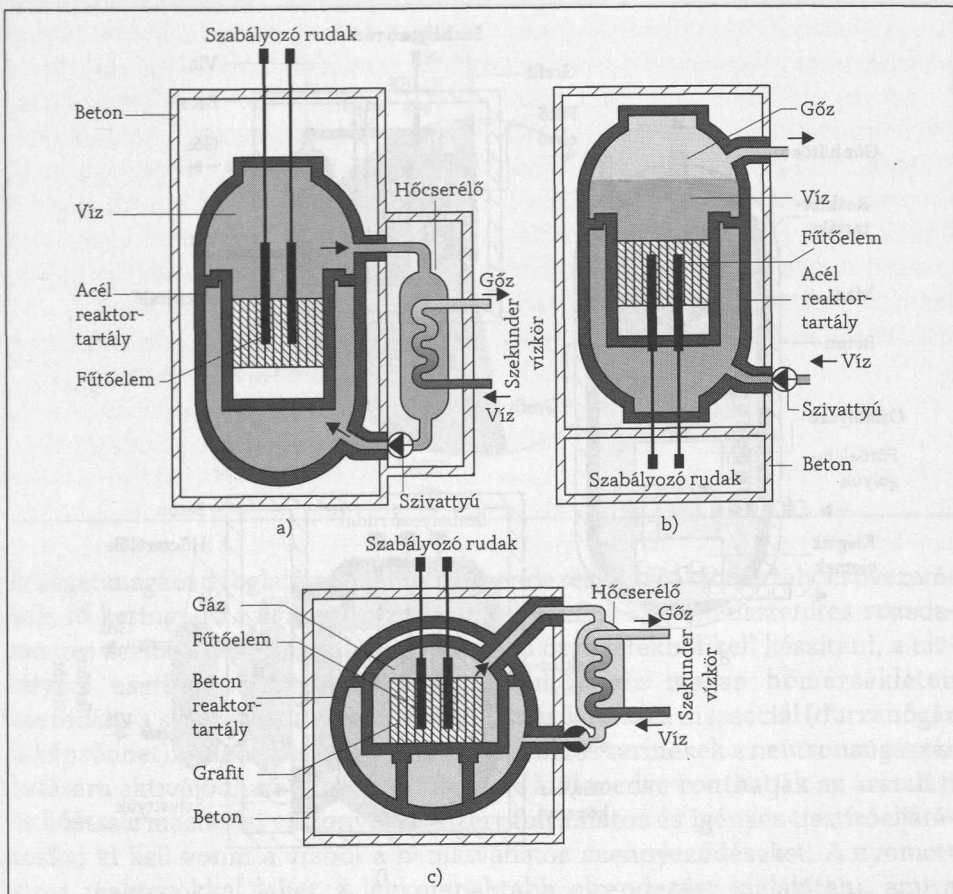
A ^{238}U -ból és a ^{232}Th -ból tenyésztéssel kinyerhető hasadóanyagok figyelembevételével a világ nukleáris energiapotenciálja nagyságrenddel haladja meg az ásványi tüzelőanyagok összesített ismert és feltételezett vagyonát.

Az atomenergia hasznosítása

Az atomenergia nagyléptékű alkalmazása atomreaktorokban a láncreakcióban fejlődő hő hasznosításával történik. A katonai rendeltetésű létesítmények továbbfejlesztéséből születtek a villamosenergia-termelő atomerőművek, amelyek első, kisléptékű példányait 1951 és 1956 között helyezték üzembe (USA, Anglia, Szovjetunió, Franciaország). A katonai gyökereket jelzi, hogy az első erőmű-prototípusok szinte mindenütt gyorsreaktorok voltak, erős dúsítással, hasonlóan a plutóniumtermelő reaktorokhoz.

Az atomenergiát majdnem kizárólag villamos energia termelésére alkalmazzák. A konstruktőrök az 1950–60-as években sokféle atomreaktor-típust terveztek, amelyek közül azonban csak néhány vált iparilag megvalósítható, érett megoldássá. A fontosabb reaktortípusok elvét mutatja be a 4. ábra. A reaktorok a fűtőelemek, a moderátor és a hűtőközeg anyagának jellegében, valamint azok térbeli elrendezésében térnek el egymástól. A legnagyobb mértékben a könnyűvízzel moderált és hűtött reaktortípusok terjedtek el, a jelenleg működő atomerőművek 80%-át ez a rendszer jellemzi (5. ábra). A természetes víz olcsó és könnyen kezelhető hűtőközeg, hőátadási tényezője és fajhője nagy, viszkozitása kicsi, anyagjellemzőit a sugárzás alig befolyásolja. Külön előnye, hogy a hűtésen kívül a moderátor szerepét is be tudja tölteni, de mivel a víz nemcsak fékezi a neutronokat, hanem egy részüket el is nyeli, a kritikus tömeg csak néhány százalékra dúsított urán-oxid üzemanyaggal biztosítható. Hátrányos viszont, hogy a víz kritikus hőmérséklete alacsony (374°C 226 bar-nál), ami a folyékony halmazállapotú hűtőközeg lehetséges hőmérsékletét 350°C körül korlátozza, egyben behatárolva a turbina munkaközegének felső hőmérsékletét a hőkörfolyamatban. (Visszatérő javaslat a hőmérsékletkorlát feloldására a munkaközeg túlhevítése tüzeléssel működő kazánban, de a nuk-

Reaktortípusok

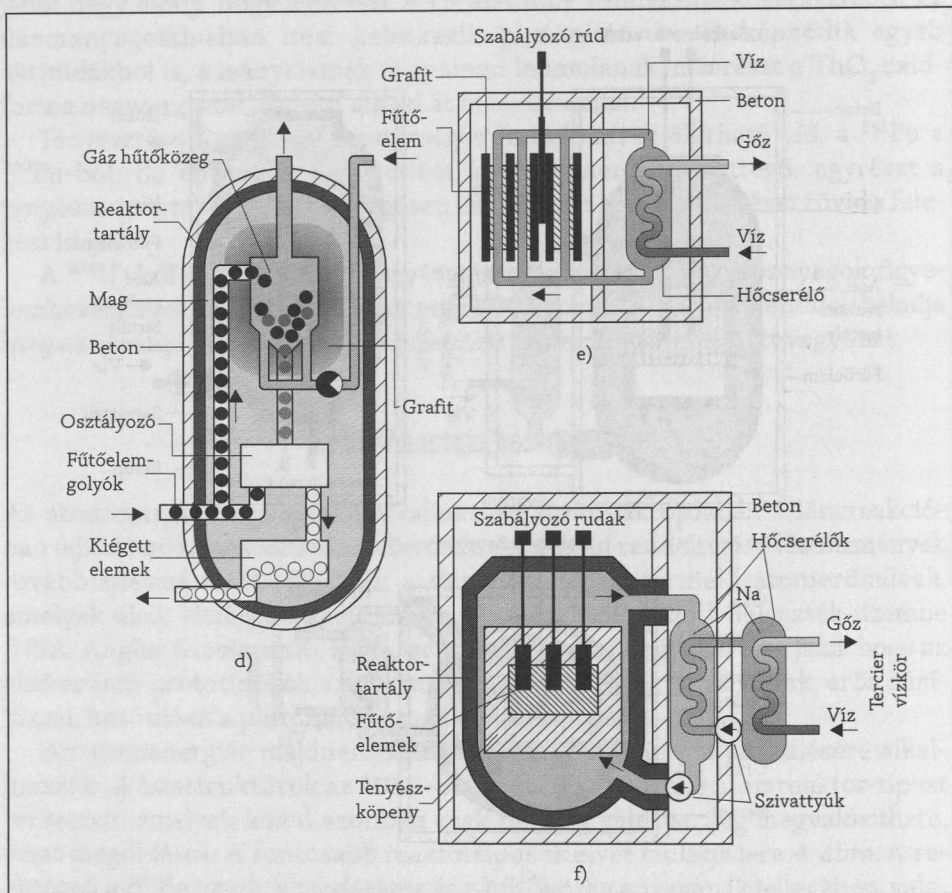


a) nyomottvízes, b) forralóvízes, c) gázhűtésű

leáris technika ötvözése tüzelőberendezésekkel sem biztonsági, sem üzemi szempontból nem kívánatos.)

A könnyűvízes reaktorok szélsőséges mechanikai, termikus, kémiai és sugárzási igénybevételeknek kitett, vastag falú reaktortartályokban helyezkednek el. E nagyméretű tartályokat gyűrűből és domborított véglemezekből hegesztik össze, gyártásuk csúcstechnológiát követel meg. A feladatra évente néhány tartály elkészítésére alkalmas külön gyárak létesültek, ezek kapacitása szabta meg az építhető atomerőművek számát. A tartályon kialakított csatlakozásokhoz csatlakoznak a hűtővíz el-, illetve visszavezetésére szolgáló nagy átmérőjű csövek, továbbá számos átvezetés biztosítja a vezérléshez, mérésekhez és biztonságvédelmi rendszerekhez a szükséges kapcsolatokat. A reaktortartá-

Reaktortípusok

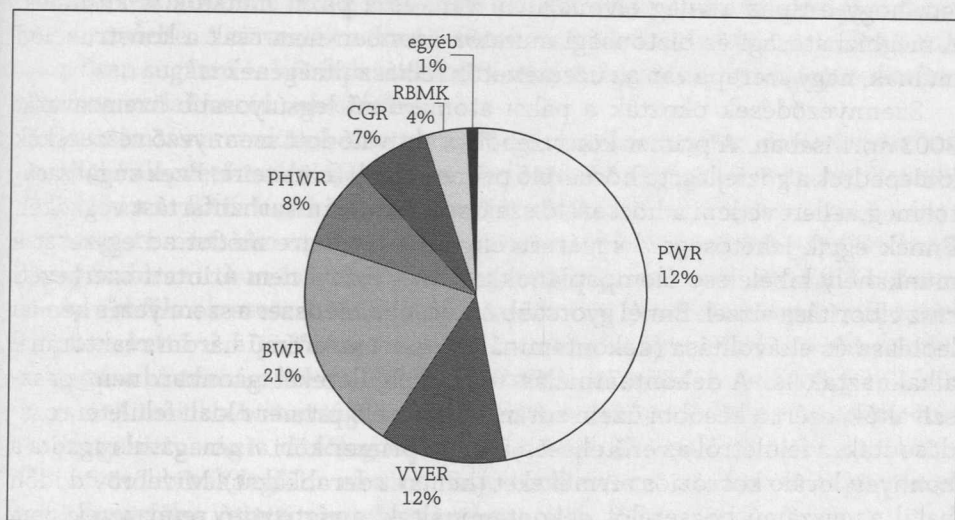


d) gázhűtésű, folytonos töltéssel, e) csatornatípus vízű hűtéssel, f) fémhűtésű szaporító

lyok az atomerőművek legnagyobb méretű és súlyú berendezései, ezek szabják meg a szállítási és emelési követelményeket. A megvalósítható méreteket a szárazföldi szállítás lehetőségei (vasúti úrszelvény, közutak görbületi sugara és megengedett tengelynyomása) korlátozzák. A reaktortartályok anyagának öregedése meghatározó szerepet játszik az atomerőművek élettartamában.

A világ összes energetikai reaktorának 60%-át a tengeralattjárók berendezéseiből továbbfejlesztett nyomottvízes típusok (PWR) teszik ki, amelyekben a víz forrását 120-160 bar körüli nyomással akadályozzák meg (Pakson 123 bar, a víz középhőmérséklete 282 °C). Ez nagyon komoly anyag- és gyártástechnológiai követelményeket támaszt, figyelembe véve a szélsőséges igénybevételeket, valamint a szigorú biztonsági előírásokat. A reaktor hűtő-

Reaktortípusok aránya



közegét magában foglaló primer kör berendezéseit (reaktortartály, csővezetékek, fő keringtető szivattyúk, armatúrák, gőzfejlesztők) ausztenites rozsdamentes acélból, vagy hasonló tulajdonságú ötvözetekből kell készíteni, a tartállynál esetleg plattírozott megoldással. A víz magas hőmérsékleten korrodálja a szerkezeti anyagokat, a sugárzás hatására disszociál (durranógáz is képződhet), a vízbe került korróziós és eróziós termékek a neutronsugárzás hatására aktiválódhatnak, és a felületekre kiüledve ronthatják az áramlási és hőátsharmasztatási viszonyokat. Ezért folyamatos és igényes tisztítóeljárásokkal ki kell vonni a vízből a nemkívánatos szennyeződések. A nyomott vizes reaktorokkal lehet a legkompaktabb elrendezést kialakítani, ami a viszonylag kis fajlagos beruházási költségekben is tükröződik.

A nyomottvizes atomerőművekben a primer körben keringő hűtővíz hőcserélőn (gőzfejlesztő) keresztül adja át a hőt a turbinát hajtó munkaközegnek. Az adott paraméterek mellett a gőzfejlesztő szekunder oldalán csak viszonylag alacsony hőfokú telített gőz fejlesztésére van mód, a szekunder körben a nyomás 45-60 bar (Pakson 46 bar), és a munkaközeg hőmérséklete mintegy 280 °C. A hőkörfolyamat alacsony felső hőmérséklete miatt az ilyen atomerőművek termikus hatásfoka alacsony, nem haladja meg a 31-32%-ot, ami lényegesen elmarad a korszerű hőerőművek hatásfoka mögött.

A paksi VVER 213 (Vodo Vodjannoj Energeticseszkij Reaktor) típusú atomerőmű is a nyomottvizes csoportba tartozik. Meglehetősen túlméretezett konstrukció, ami a beruházást drágítja ugyan, de a biztonság javára szolgál. Példaképp említhető a primer kör, vagy a hermetikus helyiségek túlzottan

nagy falvastagsága, a primer köri hűtés hat hurokra bontása a másutt szokásos kétfelé osztás helyett, a primer körben lévő nagy vízmennyiség stb. Nem véletlen, hogy e típus a világ élvonalában van, és a paksi mutatók is kitűnőek. A megbízhatósági és biztonsági mutatók azonban nem csak a konstrukción múlnak, nagy szerepe van az üzemeltetők felkészültségének is.

Szennyeződések okozták a paksi atomerőmű legsúlyosabb üzemzavarát 2003 áprilisában. A primer kör vizéből az aktiválódott szennyező részecskék kiüledtek a gőzfejlesztő hőcserélő primer oldali felületeire. Ezek sugárzásától meg kellett védeni a hőcserélő szekunder oldalán karbantartást végzőket. Ennek egyik lehetősége a sugárzás elnyelése, amire módot ad egyrészt a munkahely kibélelése ólompaplanokkal, másrészt a nem érintett szerkezeti rész elborítása vízzel. Ennél gyorsabb és olcsóbb módszer a szennyezés kémiai leoldása és eltávolítása (dekontaminálás), amit az erőmű három reaktoránál alkalmaztak is. A dekontaminálás után a felületeket azonban nem passziválták, ezért a későbbi üzem során a hőcserélő primer oldali felületei rozsdásodtak, a felületről az erőteljesen áramló primer körí víz magával ragadta a könnyen leváló korróziós termékeket (hematit darabkákat). Mivel rövid időn belül nagyszámú hőcserélőt dekontamináltak, a víztisztító rendszerek nem tudták kellő ütemben eltávolítani a szennyeződést, ezért az a reaktortérbe is bejutott, és a legmelegebb helyen – a fűtőelemeken – rakódott le (a magnetit kiüledési hajlama nő a hőmérséklet növekedésével). E kedvezőtlen tapasztalatok miatt tértek át a negyedik bloknál a védekezés másik módjára.

Az elszennyeződött fűtőelemek rosszabb hőátadása miatt csökkent a leadott teljesítmény, viszont nőtt a fűtőelemek hőmérséklete. Amikor a hőmérséklet növekedése már a fűtőelem-burkolat épségét veszélyezteti, a reaktort biztonsági okokból le kell állítani. A PAV vezetése az elszennyeződött fűtőelemek lecserélése helyett – gazdasági megfontolásokból – azok tisztítását határozta el, fűtőelemek tömeges tisztítására külföldön sem volt még példa. A tisztítótartályt és segédberendezéseit egy, a reaktorhoz csatlakozó, vízzel telt aknában helyezték el. Az oxálsavas tisztítási eljárás sikerén felbuzdulva az idő és költségtakarékosság érdekében a technológia intenzifikálását határozták el, 7 helyett 30 fűtőelemet magába foglaló tisztítótartály alkalmazásával. Az új megoldás konstrukciós hibájára a felületes engedélyezés nem figyelt fel, és a tevékenység biztonsági felügyelete is elmaradt. A súlyos üzemzavar néhány sikeres tisztítási kampány után következett be, amikor a 6. tisztítási folyamat végén a tartály felnyitását és a megtisztított fűtőelemek kiemelését elhalasztották, mert a daru a reaktor-karbantartás sürgősebbnek minősített feladatánál volt lekötve. Ezalatt a tisztítótartályban levő fűtőelemeket egy átmeneti állapotra méretezett kis teljesítményű szivattyúval kedvezőtlen áramlási viszonyok közepette hűtötték. A fűtőelemeket a radioaktív bomlás remanens hője túlmelegítette, egyesek burkolata felhasadt, és radioaktivitás került a reaktorcsarnokba, illetve onnan jelentéktelen mennyiségben

a környezetbe. Ekkor még ki lehetett volna emelni a fűtőelemeket, de a további késlekedés miatt azok továbbmelegedtek, majd a tartályfedél jóval későbbi felemelésekor beömlő hideg víz okozta hősokk a felhevült fűtőelemeket darabokra tördelte. A törmelék a tartály fenekére hullott (az urán összsúlya 3,6 t). Az erősen sugárzó és hőt fejlesztő törmelék összegyűjtése és végleges elhelyezése hosszadalmas és nehéz feladat.

Az üzemzavar senkinek sem okozott egészségkárosodást, és nem érintette az erőmű alapvető technológiai berendezését. Az anyagi kár viszont jelentős: a tönkrement fűtőelemek értéke, az elhárítás költsége, a blokk hosszú kényszerüznete miatt elmaradt villamosenergia-termelés és annak pótlása. Ennél is súlyosabb az itthon és külföldön elszenvedett presztízaveszteség. Az üzemzavar többféle ok szerencsétlen egybeesésének a következménye, ezek közül azonban kettő – a jövőre vonatkozó tanulság miatt – külön kiemelandó. Az egyik a biztonsági követelmények háttérbe szorulása a gazdasági érdekek mögött. A másik a biztonsági kultúra romlása, amiben szerepet játszott a túlzott magabiztosság is, de főleg a zilált, konfliktusokkal terhelt munkahelyi légkör. Az utóbbinak legfőbb oka a politikai indíttatású, gyakori és nagyarányú személycserék a vezető menedzsmentben.

A forralóvízes (BWR) erőművek aránya 21%. Ezek reaktorában megengedik a víz forrását, a reaktortartály felső részéből elvezetett nedves gőzt – cseppeválasztó berendezés közbeiktatásával – közvetlenül a turbinákba vezetik. Az erőmű felépítése egyszerűbb, mert nincs gőzfejlesztő. Mivel nem kell gátolni a forrást, a primer körben a nyomás mintegy fele a PWR rendszerrűének, ezért a berendezések falvastagsága és súlya kisebb. A valamivel magasabb hőmérséklet következtében a hatásfok is jobb. Hátránya viszont, hogy a primer kör határai kitolódnak, a reaktor hűtővíze egyben a turbina munkaközege is, a radioaktív szennyeződés ott is közvetlenül megjelenhet.

Gázhűtéssel magasabb hőmérséklet érhető el, mint vízhűtéssel, ami a termikus hatásfok szempontjából előnyös. Hűtésre olyan gázokra van szükség, amelyek nem korrozívak, nem aktiválódnak és nagy a hőkapacitásuk. A gáz rosszabb hőátadási tényezője miatt azonban nagyobb méretekre és a hűtőközeg intenzívebb áramoltatására van szükség, mint a vizes reaktoroknál. A levegő nem jöhet számításba, mert a nitrogén erősen neutronbefogó, és a szennyezők (Ar, C) aktiválódnak, a hidrogént kizárja reakcióhajlama a fémekkel. Az első francia és angol atomerőművek grafit moderátort és szén-dioxid hűtést alkalmaztak (GGR, Gas Grafit Reactor), az üzemanyag fémurán volt magnéziumötvözetből készült védőcsőben (Magnox reaktor). Később az Egyesült Királyságban áttértek acélburkolattal ellátott, enyhén dúsított urán-oxid fűtőelemekre, a hatásfokjavítás érdekében a hűtőközeg nyomásának és hőmérsékletének növelésére (AGR, Advanced Gascooled Reactor), de nagy méretük, valamint kedvezőtlen termikus tulajdonságaik miatt így sem bizonyultak versenyképesnek. Jelenleg a világon működő energiatermelő reaktó-

rok 7%-a gáz-grafitos, továbbfejlesztésük célja magasabb működési hőmérséklet elérése, ami szén-dioxiddal nem valósítható meg, mivel az 600 °C felett nem stabil. A nagy fajhőjű hélium a legígéretesebb, de kis sűrűsége miatt nagy nyomást kell alkalmazni, és nagy mennyiségeket kell áramoltatni. Tisztasága fontos, amit kirotechnikai szétválasztással biztosítanak. A főleg polifenilekből álló szerves gőzökkel kapcsolatos elképzelések nem váltak be, mert alacsony hőmérsékleten bomlanak.

Grafitmoderátor és a forrást is megengedő vízű hűtés jellemzi a szovjet tervezésű RBMK (Reaktor Bolsoj Moscsnoszty Kanalnogo) típusú reaktorokat, amelyben a dúsított urán fűtőelemek hatalmas grafit tömbben lévő csatornában helyezkednek el. A csernobili katasztrófa kiterjedésében jelentős szerepe volt a grafitnak, amely 10 napig tartó égésével táplált felhajtóerő sok kilométer magasságba emelte a kibocsátott radioaktív anyagokat, és így azokat a légáramlatok Európának szinte minden pontjára el tudták juttatni. Ilyen reaktorok csak a volt Szovjetunió területén működnek (Oroszországban, Litvániában és 2001-ig Ukrajnában), s a világ atomerőműparkjának 4%-át teszik ki. Létesítésüket több körülménnyel indokolták: nincs szükség a csak korlátozott számban és nagyon igényes technológiával előállítható reaktortartályra, a csatornák számának szaporításával a reaktor teljesítménye szinte tetszőlegesen növelhető, a fűtőelemeket üzem közben lehet cserélni, ezért magas a kihasználási óraszám, a hasadóanyag-hasznosítást javítja a konverzió nagy mértéke, a hűtőközeg magas állapotjellemzői jó termodinamikai hatásfokot biztosítanak. A hátrányok azonban sokkal jelentősebbeknek bizonyultak, és meghatározó szerepet játszottak a csernobili katasztrófa kialakulásában. A reaktor nagy mérete miatt egyrészt nem lehet kialakítani a nukleáris részeket teljesen körülölelő hermetikus konténmentet, ami egy balesetnél vissza tudja tartani a radionuklidokat. Másrészt a zóna nagy kiterjedése miatt nagyon bonyolult a neutronfluxus egyenlőtlenségeinek ellensúlyozása és az üzem szabályozása. Az utóbbival függ össze, hogy gőzfejlődés során bizonyos üzemállapotokban a reaktivitás hőfokkitevője pozitív, vagyis a reaktor labilissá válik. Az Egyesült Államokban az ilyen reaktorok polgári alkalmazását elvetették, mert szabályozhatóságukat és a biztonságukat nem tekintették kielégítőnek, de a titkoság légkörében ez a minősítés nem vált ismertté.

A csernobili katasztrófát egy kísérlet váltotta ki, amellyel meg akarták határozni, hogy a dízelgenerátorok indulásáig a turbógenerátorok tehetetlensége elég villamos energiát tud-e biztosítani az erőmű segédüzemeihez, ha megszakad a külső villamosenergia-ellátás. A szerencsétlenség a reaktor rossz konstrukcióján és sorozatos emberi mulasztásokon múlt. Egyrészt az RBMK reaktor kisebb teljesítményénél öngerjesztő folyamat alakulhatott ki, ekkor a víz elgőzölgése csökkenti a neutronelnyelő molekulák koncentrációját, a több neutron szaporítja a hasadások számát, a teljesítmény növekedése fokozza a gőzképződést stb. Másrészt a konstrukció nem akadályozta azokat

az üzemviteli utasításokat durván megszegő, sorozatos emberi beavatkozásokat, amelyek a baleset kifejlődéséhez vezettek (védelmek bénítása, tiltott teljesítményszabályozási mód, megengedhetetlen üzemi állapotok stb.). Mindezek következtében a reaktorteljesítmény a névlegesnek mintegy százszorosára nőtt, kiváltva a szélsőségesen nagy nyomást elérő gőz, valamint a kémiai reakciókban keletkező gáz robbanását.

A nehézvízzel moderált és hűtött reaktorok (PHWR, Pressurized Heavy Water Reactor) jól bevált típusa a kanadai CANDU (Canadian Deuterium Uranium) reaktor, ami a működő erőművek 8%-át teszi ki. Elterjedtségét az is magyarázza, hogy számos politikai függetlenségére kényes ország előnyben részesítette, mivel nem igényel dúsítást, amelyhez hosszú ideig csak az atomhatalmak rendelkeztek megfelelő dúsítóművekkel. Az aktív zónát nehézvízzel telt tartály (kalandria) öleli körül. Az UO_2 üzemanyag cirkónium ötvözetből készült csövekben helyezkedik el, e csövekben nyomás alatt kering a primer D_2O hűtőközeg, ami hőcserélőn keresztül adja át a hőt a szekunder könnyűvíz hűtőközegnek. A szekunder hűtőközeg elvileg lehet vízgőz, szén-dioxid, hélium, sőt szerves folyadék használata is szóba jött. Az erőművek természetes uránnal működnek, de a hatásfokjavítás érdekében enyhe dúsítás (1,2%) alkalmazása ennél a típusnál is felmerül. A működtetést könnyűvízes reaktorok kiégett fűtőanyagával készítik elő, mivel azokban a ^{235}U koncentráció megfelel a CANDU-k friss üzemanyagánál megkívánt értéknek. E megoldás viszont enyhítené a LWR reaktorok hulladékelhelyezésének gondját.

Jelenleg a világ 38 országában működnek villamos energiát szolgáltató atomerőművek, összesen 442 reaktorblokk, 357 GW összteljesítménnyel, a termelt villamos energia 2,3 PWh. Ez a világ villamosenergia-termelésének 17%-át fedezi, az Európai Unióban az arány 35%. Építés alatt áll 35 blokk 28 GW összteljesítménnyel. A főbb jellemzők országok szerinti alakulását a 8. táblázat mutatja.

Atomreaktorokat alkalmaznak a kikötőktől tartósan távol tartózkodó hajók (tengeralattjárók, repülőgép-anyahajók, jégtörők) hajtására is, de ennek elsősorban katonai jelentősége van. A polgári rendeltetésű atomhajtású hajók alkalmazását megghiúsította a kikötők környéki lakosság heves ellenzése.

Visszatérően keresik a módját, hogyan lehetne az atomenergiát a fogyasztók hőigényének a kielégítésére felhasználni, hiszen ez teszi ki az energiaszükséglet legnagyobb tételét. A mérsékelt égöv országaiban a felhasznált energia 30-40%-a a fűtést szolgálja. Számos atomerőmű szolgáltató hőt a közeli településeknek, de ez nagyon marginális tevékenység, a hatékony és nagyléptékű megoldás atomfűtőművek létesítése lenne. A nagy energetikai gépgyártó vállalatok jelentős része kidolgozott terveket 10-100 MW_t teljesítményű, inherens biztonságú fűtőművekre (például Pius, Termie, Slowpox stb.). Miután a szükséges hőmérséklet alacsony, és nincs szükség nagy nyomásra, könnyen biztosítható a környezetre veszélytelen üzem, így a létesítményeket akár nagyvárosok

8. táblázat

Atomenergia-hasznosítás 2002-ben

Ország	Teljesítmény, GW	Termelés, TWh	Primer energia*, PJ	Blokkok száma	Részarány a villamos- energia-termelésben, %
Belgium	5,71	41,4	529,2	7	58,0
Bulgária	3,54	18,1	163,8	6	41,6
Csehország	2,56	12,9	142,8	5	19,8
Egyesült Királyság	12,50	85,9	1 041,6	33	24,4
Finnország	2,65	18,7	252	4	30,6
Franciaország	63,10	378,2	4 263	59	77,1
Hollandia	0,45	3,5	37,8	1	4,2
Litvánia	2,37	12,7	130	2	77,6
Magyarország	1,80	14,2	151,2	4	39,1
Németország	21,30	152,8	1 839,6	19	30,5
Románia	0,65	6,1	54,6	1	10,5
Spanyolország	7,65	53,8	638,4	9	31,0
Svájc	3,30	23,7	268,8	5	36,0
Svédország	9,40	71,4	760,2	11	43,9
Szlovénia	0,67	4,4	480	1	39,0
Szlovákia	2,43	11,3	142,8	6	53,4
Európa	140,08	909,1	10 895,8	147	
Argentína	0,94	6,9	75,6	2	8,2
Brazília	1,90	4,5	42	2	4,3
Egyesült Államok	97,90	674,8	8 303,4	104	20,4
Kanada	10,30	87,5	798	14	12,9
Mexikó	1,37	10,2	109,2	2	3,7
Amerika	112,41	783,9	9 328,2	124	
Kazahsztán	0,07	0	4,2	1	0
Oroszország	21,24	108,8	1 310,4	30	15,4
Örményország	0,41	2,1	24	1	34,8
Ukrajna	11,20	79,6	777	13	46,0
FÁK	32,90	190,5	2 115,6	47	
Dél-Afrika	1,80	14,3	163,8	2	6,7
Dél-Korea	14,90	70,8	1 117,2	18	39,3
India	2,50	11,2	138,6	14	3,7
Japán	44,30	287	3 444	54	34,3
Kína	3,70	17	172,2	5	1,1
Pakisztán	0,43	0,5	4,2	2	2,9
Tajvan	4,88	36,3	1 117,2	6	n. a.
Ázsia-Afrika	72,51	437,1	6 157,2	101	
világ	357	2300	27 333,6	442	17

n. a. = nincs adat

* egyenértékű tüzelőanyag 33%-os átalakítási hatásokkal

területén is el lehetne helyezni. A kezdeti érdeklődést azonban derékba törte a csernobili katasztrófa, és az atomfűtőművek ügye lekerült a napirendről.

A hasznosítás kiterjesztésének egy másik iránya a magas hőmérsékletű ipari hőigény fedezése. A magas hőmérsékletű reaktorok főleg a kohászatban, szilikátiparban, nehézvegyiparban juthatnak szerephez. Távolilag jelentőssé válhat szerepük az energiaszerkezet módosításában is, például hidrogéngyártással termikus vízbontás útján, vagy mesterséges földgáz előállításával szénből. A feladatra gázhűtésű reaktorok (HTGR, High Temperature Gascooled Reactor) jöhetnek számításba. Eltekintve egy leszerelt amerikai létesítménytől, ilyen erőmű ipari méretben még nem valósult meg, de kisléptékben több prototípus igazolta a 600–700 °C-os hőmérsékletet szolgáltató reaktorok megvalósíthatóságát. A magas hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok moderátora grafit, célszerű hűtőközege hélium. Üzemanyaguk grafit vagy szilícium-karbid burkolattal nagyon magas hőmérsékletet is elvisel. Újabban már 900–1000 °C-os hőfokszinttel is foglalkoznak, figyelemmel a gázturbina-technikában bekövetkezett fejleményekre. A reaktorral szorosan összeépített gázturbinával és a villamos energiát kombinált ciklusban fejlesztve akár 60%-os erőművi hatásfokot is meg lehet célózni. Kiemelt nemzetközi figyelem kíséri a Dél-afrikai Köztársaságban (ESKOM) létesülő golyós üzemanyagotöltettel működő, magas hőmérsékletű PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) erőműtípust. Az előzetes információk szerint a 110 MW_e-os blokkokból álló erőmű versenyképes lesz a hagyományos hőerőművekkel, és megvalósul az inherens biztonság követelménye is, mert a természetes légáram a teljes hűtőközeg elvesztésekor is biztosítani tudja az elnyújtott alakú reaktorban fejlődő hő elszállítását. A HTGR reaktorokat sokféle üzemanyaggal lehet megvalósítani, elképzelhető természetes és különféle mértékben dúsított urán, plutónium, tórium és ezek keveréke. Az üzemanyag megválasztásával befolyásolható a hasadóanyag-tenyésztés mértéke, a konverzió különösen tórium üzemanyagnál magas, az egyenél nagyobb konverzió már átvezet a szaporítóreaktorok területére.

Az eredetileg a tenyészanyagok hasznosítására szánt szaporítóreaktorok (BR, Breeder Reactor) fejlesztése műszaki és gazdasági körülmények, valamint a társadalmi ellenzés miatt ugyan megrekedt, de újra az érdeklődés közepontjába került, mert többen ezekben látják a nagy aktivitású hulladékgondok megoldásával kecsegtető transzmutáció lehetséges eszközeit. Szaporítóreaktorokat mind termikus, mind gyors neutronokkal ki lehet alakítani. Az első lehetőséget a HTGR reaktorok példázzák, megfelelően kialakított üzemanyaggal az elérhető konverziós együttható 1–1,1. Gyorsreaktorokkal nagyobb, 1,25–1,4 körüli konverzió is elérhető. A gyorsreaktorokban nincs moderátor, és a hűtőközeggel szemben is követelmény, hogy nagyobb mennyiségben ne tartalmazzon neutronlassító könnyű atomokat. Ezért vagy nehézatomos folyékony fémek, vagy kis anyagsűrűségű gázok lehetnek alkalmasak a gyorsreaktorok hűtésére.

A megépített gyorsreaktorok többsége folyékony fémhűtésű (LMFBR, Liquid Metal Fast Breeder Reactor). A fémeket nagy hőátadási tényező jellemzi, viszonylag kis térfogatban nagy teljesítménysűrűséget lehet elérni, alkalmazásukhoz magas hőmérsékleten sem feltétel a nagy nyomás. A folyékony fémek szivattyúzásához azonban bonyolult berendezésekre van szükség, és a hűtőkörök leghidegebb pontjain is biztosítani kell az olvadáspontnál magasabb hőmérsékletet, nehogy a fém megdermedjen. A lehetséges anyagok (Hg, Pb, Li, K, Na, Bi stb.) közül a nátrium termikus tulajdonságai a legkedvezőbbek, olvadáspontja alacsony, forráspontja magas, 350-600 °C hőmérséklet tartományban folyékony halmazállapotú. Nukleáris tulajdonságai közül előnyös a kis neutronabszorpció, viszont hátrányos való hajlama. Ezért a megvalósított nátriumhűtésű rendszerekben három hűtőkört alkalmaztak, a primer hűtőkör és a turbina munkaközege közé egy második nátriumos hűtőkört iktattak, hogy az aktiválódott nátriumot a környezettől elszigeteljék. A nátrium az acélt és a cirkóniumot nem támadja meg, viszont a levegővel és vízzel heves reakcióba lép, az utóbbival hidrogén felszabadulása közben. Ilyen okból gyakran alakult ki nátriumtűz a berendezésekben, ami hozzájárult a szaporítóreaktorokba vetett bizalom megrendüléséhez. A levegővel történő inert gáz érintkezését védőatmoszférával gátolják, a kölcsönhatást a vízzel pedig nagyon gondosan kialakított hermetikus tömítésekkel.

A LMFBR reaktorok célszerű üzemanyaga 15-20% ^{239}Pu -tartalmú MOX, esetleg UC-PuC keverék. A tenyészsanyagot a reflektort helyettesítő tenyészköpenyben helyezik el, a keletkező hasadóanyagot a reprocesszáló művekben vonják ki a köpeny felbontása után. A tenyészköpenyeket évente cserélni kell, hogy a magreakciók közben keletkező neutronbefogó mérgek (^{234}U és ^{242}Pu) túlságosan ne szaporodjanak el. A reaktoroknak, miután kis nyomáson üzemelnek, nagy a hőtehetetlenségük, a reaktivitás hőmérséklet- és teljesítményfüggése pedig negatív, a nukleáris biztonságuk nagy.

Hűtőközeg szerepét más anyagok is betölthetik, Oroszországban nagy reményeket fűznek az ólom-bizmut keverékhez. Kísérleteznek sóolvadékokkal (MSBR, Molten Salt Breeder Reactor) is, például Li- és Be-fluorid sók alkalmazásával, amiben oldható a tórium-, illetve plutónium-fluorid fűtőelem. E kompakt homogén reaktorok folytonosan reprocesszálhatók, jól kivonhatók a ^{233}U láncreakciójának hasadványai és bomlástermékei. A gázhűtésű szaporítóreaktorokban a héliumot tartják a legmegfelelőbb anyagnak. Ukrajnában kísérleteztek N_2O_4 gázzal is, ami reverzibilis disszociáció révén nagy rejtett hő tárolására képes, viszont erősen mérgező hatású. Erősen dúsított üzemanyaggal természetes vízű gyorsreaktor is kialakítható, nem feltétlenül szaporítás céljára (például a tengeralattjárók reaktorai majdnem tiszta ^{235}U -nal üzemelnek).

Az atomerőmű-építés az 1970-es években lendült fel, később az atomerőműrendelések visszaestek (14. ábra), mégis valamennyi nagy gyártó fejleszt új konstrukciókat. E fejlesztés kulcskérdése a biztonságnövelés és a versenyké-

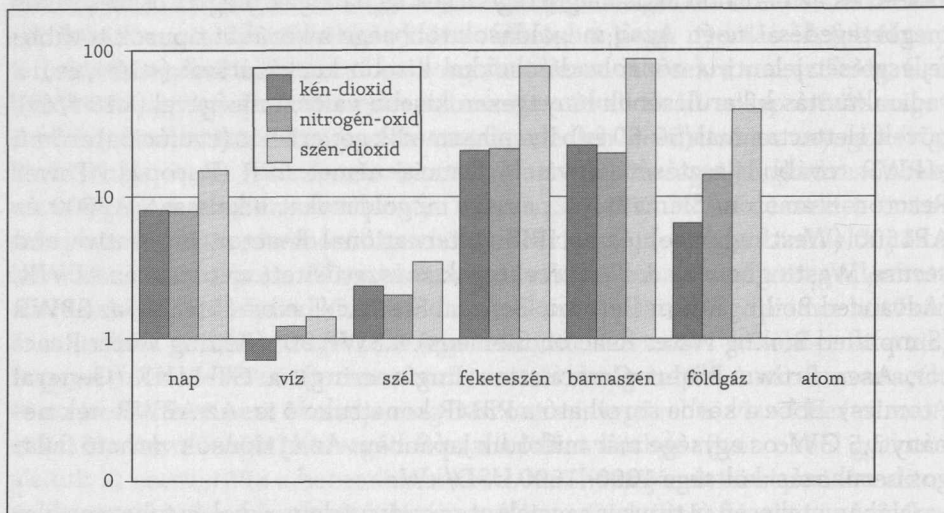
pesség. Az Egyesült Államokban azt tűzték ki célul, hogy az atomerőművek okozta balesetek kockázata ne haladja meg az összes balesetek kockázatának 1%-ét, és az okozott rákos megbetegedések se haladják meg az összes rákos megbetegedés 1%-ét. Az új megoldások többsége a korábbi típusok továbbfejlesztését jelenti, a zónaolvadás sokkal kisebb kockázatával ($<10^{-5}$ /év), a radioaktivitás kikerülésének lényegesen kisebb valószínűségével ($<10^{-6}$ /év), növelt élettartammal (50-60 év). Ilyen harmadik generációs (evolúciós) erőmű a PWR továbbfejlesztését képviselő francia-német EPR (European Power Reactor, Framatom-Siemens), a passzív megoldásokat alkalmazó AP600 és AP1500 (Westinghouse), és az IRIS (International Reactor, innovative and secure, Westinghouse). A BWR reaktorok korszerűsített változata az ABWR, (Advanced Boiling Water Reactor, General Electric-Tosiba-Hitachi), az SBWR (Simplified Boiling Water Reactor, Siemens), a BWR 90+ (Boiling Water Reactor, Asea Brown Boveri-Combustion Engineering), a GT-MHR (General Atomics). Ebbe a körbe sorolható a PBMR konstrukció is. Az ABWR-nek néhány 1,5 GW-os egysége már működik Japánban. Az új típusok várható fajlagos beruházási költsége 1000-1500 USD/kW.

Néhány teljesen új típus is megjelent passzív védelmekkel és inherens biztonságot ígérő megoldásokkal. Ezek gyakran korábban elvetett megoldások felelevenítését jelentik, például az olvadt sós rendszer. Negyedik generációs (innovatív) erőmű többek között a CANDU új típusa is. A nemzetközi szervezetekkel együttműködve 10 iparilag fejlett ország közös programot dolgozott ki (Generation IV.) a jövő ígéretes reaktortípusainak kifejlesztésére. Ezek: héliumhűtésű gyorsreaktor, ólomhűtésű gyorsreaktor, nátriumhűtésű gyorsreaktor, olvasztott sós reaktor, szuperkritikus vizes reaktor és nagyon magas hőmérsékletű reaktor (többek között hidrogéngyártásra). Az IAEA a teljes üzemanyagciklust is magában foglaló reaktorfejlesztési programot indított (INPRO, International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) több ország részvételével. Az utóbbi években felvetették a gyorsítóval vezérelt szubkritikus reaktor gondolatát is. Ennél a kritikus állapot megvalósításához szükséges neutronokat a gyorsító szolgáltatná, annak leállítással a láncreakció biztosan megszakad, ezzel védelmet szolgáltatva a reaktor megshaladása vagy termikus labilitása ellen. Sokan kétlik a szükséges nagy teljesítményű gyorsítók megvalósíthatóságát, ezért a megoldásnak nem az energia-termelésben látják a jövőjét, hanem a nagy aktivitású hulladék kezelésében.

A környezet terhelése

Az atomenergetika egyik nagy előnye, hogy – a közhiedelemmel ellentétben – kevéssé terheli a környezetet. Ezt támasztják alá a különböző energiaellátási módok hatását „bölcsőtől a koporsóig” szemléletben végzett összehasonlító-

A nukleáris változatra vetített relatív légszennyezés



sai. Ez az energiahordozók kitermelésétől a végső felhasználásig terjedő vertikumok vizsgálatát jelentő eljárás figyelembe veszi az egyes fázisok létrehozásához és működtetéséhez szükséges tevékenységek, valamint a hulladékok szerepét is, vagyis a következmények teljes körű számbavételére ad módot.

Légszennyező égéstermék-kibocsátást a nukleáris vertikum is okoz, egyrészt a szerkezeti anyagok gyártása során, másrészt az egyes tevékenységekhez nem atomerőműben fejlesztett villamos energiát és hőt is igénybe vesznek. A villamosenergia-termelő lehetőségek között azonban a nukleáris változat esetében a legkisebb az égéstermékek kibocsátása. A 6. ábra a nukleáris vertikumhoz viszonyítva relatív egységekben, logaritmusos léptékben mutatja be a többi változat kibocsátásait. Láthatóan az atomerőművek képviselik a leghatásosabb megoldást egyrészt a tiszta levegő biztosítására, másrészt az üvegházhatás korlátozására. Például a Paksi Atomerőmű annyi CO_2 -kibocsátást takarít meg, amennyi az összes többi hazai erőmű emissziója. (Szerepe meghaladja a hazai erdők szén-dioxid-elnyelő képességét is.)

Az atomerőműveket azonban nem a „hagyományos” légszennyezés, hanem a radioaktív anyagok kibocsátása alapján ítélik meg. A nukleáris energiatermelés specifikus veszélyét az ionizáló sugárzás jelenti. Miután az ionizáló sugárzás biológiai hatása kumulatív, a minősítés alapja az intenzitás időbeli integráljával meghatározott dózis. A biológiai következmények jellege szerint megkülönböztetett determinisztikus és sztochasztikus hatások választóvonal a 0,5-1 Sv körüli érték. A kétféle következmény összetévesztése sok zavar forrása. A determinisztikus következmény embereknél sugárbetegséget

jelent, a betegség súlyossága arányos a dózissal, enyhébb válfaja gyógyítható, súlyosabb esetben az élet hosszúságát csökkentő maradandó hatással jár, és néhány Sv-nél nagyobb dózison már rövid időn belül többnyire halálos kimenetű. Sugárbetegséget okozó nagy dózis elszenvedése csak a nukleáris berendezések közvetlen közelében baleseteknél, vagy az előírások súlyos megsértése során történhet. Ekkora dózis a csernobili katasztrófánál is csak a reaktor közvetlen közelében lépett fel, és csak az üzem területén lévőket veszélyeztetett, ezek közül 29 fő kapott halálos dózist, és mintegy 140 embert kellett akut sugárbetegséggel kezelni. Az üzemen kívül élő lakosságot csak a környezetbe kibocsátott radioaktív anyagok sugárzása érheti, ezek sugárzásának szintje legfeljebb sztochasztikus következmények kiváltására képes.

A sztochasztikus következményt a DNS molekulák módosulása okozza a sugárzás hatására, ami hosszú lappangási idő után nyilvánul meg. A következmény lehet néhány év, esetleg egy-két évtized után jelentkező rák, illetve az utódoknál fellépő genetikai mutáció, bár ez utóbbi az emberek esetében még nem egyértelműen bizonyított. A feltételezések szerint a sztochasztikus következmények kialakulásának valószínűsége arányos a dózissal, amit a tapasztalatok néhány száz mSv felett alátámasztanak. A lineáris kapcsolatot extrapolálják a kis dózisokra is, amire azonban tényleges adatok nem állnak rendelkezésre, mert egyrészt emberekkel kísérletek nem végezhetők, másrészt a rák nagyon sok lehetséges oka közül a sugárzás kizárólagos szerepe nem különíthető el.

Szakmai körökben erősen vitatott a kis dózisok szerepe, miután nem bizonyítható egy, a veszélyesség alsó határát kijelölő küszöbérték. Ilyenkor – a biztonság érdekében – az általános gyakorlat annak feltételezése, hogy bármilyen kis dózis is ártalmas (LNT = Linear No Threshold hipotézis). Ennek viszont ellentmondanak a mindig és mindenütt érvényesülő természetes eredetű háttérsugárzással kapcsolatos tapasztalatok. Mértékét a tengerszint feletti magasságtól függő kozmikus sugárzás és a felszín alatti kőzetek sugárzásának jellege befolyásolja, ennek következtében a Föld különböző régióiban nagyságrendi eltérések is tapasztalhatók. A kiugróan nagy háttérsugárzású térségekben nem szignifikáns a rákos megbetegedések nagyobb száma, ami arra utal, hogy az emberi faj bizonyára alkalmazkodott a háttérsugárzáshoz. Aligha lehet tehát a háttérsugárzás hatásánál sokkal kisebb dózisoknak ártalmas következménye. Hazánkban a háttérsugárzás okozta egyéni dózis éves átlagértéke 2,4 mSv körül ingadozik.

A sztochasztikus hatásokat a kollektív dózis figyelembevételével minősítik, ami a sugárzásnak kitett személyek egyéni dózisainak összege. Jelenleg azt feltételezik, hogy a lakosság körében 1 személy-Sv-nyi kollektív dózis 0,05 halálos és 0,12 nem halálos kimenetű rákos megbetegedést, valamint 0,01 genetikai mutációt okoz. A tudatosan védekező üzemi személyzetnél ennél valamivel kisebb értékeket vesznek figyelembe, tekintettel a védekezés lehető-

ségére és a rendszeres egészségi ellenőrzésre. A kollektív dózis értelmezése szerint azonos a kockázat, ha néhány fő nagy dózist kap, vagy ha nagyon sok embert ér nagyon kicsi dózis, ami különösen a háttérsugárzás hatásánál sokkal kisebb értékeknél nyilván elfogadhatatlan. (Az elv következetes alkalmazása a természetes háttérsugárzás hatására Magyarországon évente mintegy 1000 halálos kimenetű rákot indokolna.) A kollektív dózis tarthatatlansága élesen megmutatkozott a csernobili katasztrófa következményeinek értékelésénél, amikor a háttérsugárzás századrészének megfelelő dózisokat Európa teljes lakosságára összegezték. Az ilyen módon végzett elemzések alapján a katasztrófa áldozatainak számáról néhány ezer és sok százezer közötti adatok jelentek meg, ami érzékelteti a megítélés bizonytalanságát is. A nemzetközi szervezetekben (ICRP, International Commission on Radiological Protection, Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság, UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, ENSz Tudományos Bizottság a Nukleáris Sugárzások Hatására) megindult a kis dózisok megítélésének ártékelése, de amíg e hosszadalmas folyamat nem vezet eredményre, addig a korábbi gyakorlatot nem lehet mellőzni. (Újabban olyan kompromisszumra hajlanak, hogy kis dózisoknál a kollektív dózis és a kockázat között a lineárisnál enyhébb összefüggést fogadjanak el.)

A nukleáris vertikum normál üzemében a kibocsátások jelentéktelenek, az ebből származó dózis lényegesen kisebb a megengedett értéknél. Legfeljebb az üzemek munkavállalóinál okoznak csekély többletdózist, főleg a berendezések karbantartása során, de ez is belül van a szigorú határértékek korlátain. A karbantartás okozta kollektív dózis az üzemvitel minőségének egyik jellemzője (a paksi érték alacsony). Az atomerőművek közvetlen környezetében a normál üzem hatása a lakosságra nem is mérhető, mivel az a háttérsugárzás ingadozásának nagyságrendjében van. Ezért a hatást a mért kibocsátásból terjedési modell segítségével számítással határozzák meg, Pakson, az erőmű kerítésénél például az így kiszámított érték a háttérsugárzás 1–0,1 ezreléke között

9. táblázat

A paksi atomerőmű kibocsátásai 2000-ben a hatósági előírások százalékában

Kibocsátás a levegőbe		Kibocsátás vízbe	
radioizotóp	%	radioizotóp	%
nemesgáz	0,6	Trícium	61
Stroncium	0,4	Stroncium	1,4
Jód	0,01	korrozíós és hasadási termék	7,4
aeroszolkok	0,4		

mozog. Az erőmű kibocsátásainak szokásos mértékét a hatóság által meghatározott korlátokra vetítve a 9. táblázat mutatja be. Az atomerőművek és a nukleáris létesítmények környezetében élő lakosságra a normál üzem semmiféle veszélyt nem jelent.

Ma már elfogadott tény, hogy az atomerőművek normál üzeme veszélytelen. Az erőművek biztonságvédelme üzemzavarok esetében is megakadályozza számottevő radioaktivitás kijutását a környezetbe, ilyesmi csak nagyon súlyos baleseteknél következhet be. Atomerőműből csak Csernobilban került ki veszélyes mennyiségű radioaktivitás a környezetbe. Hasonló mértékű katasztrófa megismétlődése azonban a tapasztalatok alapján világszerte fogantatosított biztonságnövelő intézkedések következtében kizárható. A csernobilitól nagyságrenddel kisebb kihatású atomerőművi balesetek ugyan előfordulhatnak, ezek valószínűsége azonban rendkívül kicsi, és az ebből származó egészségi ártalmak mértéke sem haladja meg más jellegű ipari baleseteket.

Korábban az atomhatalmak katonai létesítményeiben, valamint az üzemanyagciklus üzemeiben is fordultak elő környezetszennyezést okozó üzemzavarok, de ezek okait sikerült kiküszöbölni. Időnként jelenleg is röppennek fel állítások az üzemanyagciklus üzemeinek környezetszennyezéséről és ennek egészségkárosító hatásáról, amit azonban a mértékadó vizsgálatok nem támasztottak alá.

Nukleáris biztonság

A nukleáris biztonság követelménye azt jelenti, hogy a nukleáris létesítmények megengedhetetlen mértékben senkit se veszélyeztessenek. A megengedhetetlen és a megengedhető közötti határt mindig egy társadalmi megállapodás jelöli ki. Ez érvényesül a munkavédelemnél, a környezeti ártalmakat okozó kibocsátásoknál, az egészségvédelemnél, a technológiai eljárások biztonságvédelmének, a tervezési irányelveknél, és sok más jogszabály és szabvány alkotásánál, sőt még a természeti csapások elleni védekezésnél is. Ennek egyik oka, hogy nem léteznek veszélytelen emberi tevékenységek. A veszélyek korlátozásának mértéke, figyelembe véve a műszaki lehetőségeket és a gazdasági elviselhetőséget, társadalmi kompromisszum eredménye. A másik ok, hogy az olyan hatásoknál, amelyeknél a küszöbérték elvi vagy gyakorlati okokból nem határozható meg, józan mérlegeléssel, a tudomány álláspontját figyelembe véve kell a határt megvonni. Ez burkoltan azt jelenti, hogy bármilyen szigorúak is az előírások, tökéletes védettség nem létezik, a társadalom legkevésbé védett, illetve legkevésbé ellenálló tagjainak a védelme teljes bizonyossággal nem garantálható. Ezen a veszélyesnek tartott tevékenységek betiltása is csak ritkán segít, mert a szolgáltatás hiánya, vagy a helyettesítő

megoldás több ártalmat okozhat. Példázza ezt az atomerőmű helyettesítése fosszilis tüzelőanyagokra épülő hőerőművekkel.

A nukleáris berendezések normális üzemében a közvetlenül kibocsátott radioaktív anyagok ionizáló sugárzása csak a létesítmények munkavállalóit veszélyeztetheti, a lakosságot nem érinti. A nukleáris üzemek dolgozói többnyire olyan baleseteket szenvednek, és olyan munkahelyi ártalmaknak vannak kitéve, mint más ipari üzemek munkavállalói. Nagyon ritkák a kifejezetten ionizáló sugárzás okozta ártalmak, s ezek is szinte mindig az üzemviteli utasítások és munkavédelmi előírások megszegéséből származnak. Az ionizáló sugárzás okozta balesetnek azonban hírértéke van csekély számú károsult esetében is. Ilyen balesetek az egyéb eredetű üzemi balesetek átlagánál jóval ritkábban fordultak elő kutató laboratóriumokban, dúsító- és újrafeldolgozó-üzemekben, fűtőelemgyárakban, nagyon ritkán atomerőművekben.

Az atomenergia ellenzőinek legfontosabb feltételezése, hogy a lakosságot a létesítményekből a környezetbe kerülő radioaktív anyagok ionizáló sugárzása veszélyeztetheti. A lakosságra megszabott egyéni dóziskorlát tört része a háttérsugárzás okozta dózisnak, mértéke jelenleg 1 mSv/év. Jogilag e határértéket meghaladó dózis tekinthető veszélyesnek. Miután az üzemi dolgozók tisztában vannak a veszélyek jellegével, és lehetőségük van a védekezésre is, számukra a jogszabályok magasabb dóziskorlátot szabnak meg, mint a lakosságnál. A dóziskorláttal összhangban határozzák meg a létesítmények emissziójának határértékét, az azt meghaladó kibocsátás csak súlyos üzemzavaroknál fordulhat elő. A kollektív dózis alapján végzett számítások azonban a határértékeknél kisebb dózisoknál (és a háttérsugárzásnál jóval kisebb értéknél is) számottevő kockázatra vezetnek, mivel az ártalomnak nincs küszöbértéke.

A kibocsátás okai közül az atomrobbanást ki lehet zárni, az – egyesek állításával szemben – Csernobilban sem következett be. A nukleáris üzemanyagciklus technológiáinál alapvető követelmény a kritikus tömeg elkerülése, láncreakció csak az atomreaktorokban alakul ki, ahol viszont a megszabadás elleni védelem alapvető követelmény. A paksi típusú nyomottvizes reaktoroknál például az véd a megszabadás ellen, hogy a reaktivitásnak negatív a hőfokfüggése, ami azt eredményezi, hogy a sokszorozási tényező csökken, ha a teljesítménynövekedés következtében a hőmérséklet nő, vagyis a folyamat magától lefékeződik. Ezeknél az erőműveknél a szokatlanul nagy hűtővízmennyiség is növeli a biztonságot, mivel a termikus folyamatok nagy időállandója sok időt biztosít az üzemzvari helyzetek értékelésére és a szükséges teendők átgon-dolására.

Mivel az atomerőműben található radionuklidok több mint 99%-a a fűtőelemekben található, az atomreaktorok legsúlyosabb üzemzavarát az aktív zóna olvadása jelenti, amikor a fűtőelemek burkolata megsérül, és kiszabadulhatnak a radioaktív anyagok. Az atomerőművek történetében ilyen zónaolva-

dás eddig csak két esetben, a TMI és a csernobili erőműnél következett be. A zónaolvadás oka a termikus egyensúly megbomlása, vagy a reaktor hőteljesítményének nagyon erős megnövekedése, vagy a hűtés elvesztése, illetve erős csökkenése miatt. Számos védelmi berendezés és automatikus beavatkozó szerv szolgál az ilyen állapotok megelőzésére, a működés leállítására, illetve az esetleg bekövetkező hiba ellensúlyozására, például üzemzavari tartalék hűtőrendszerek beiktatásával. A biztonsági filozófia azonban nem elégzik meg az aktív védelemmel, egymást körülölelő fizikai gátaakat kíván meg az esetleg kiszabadult radioaktivitás elszigetelésére (mélységben tagolt, többszintű védelem). E gátrendszer elemei: a hasadóanyag stabil oxidkeramikus szerkezetbe foglalása, a fűtőelemek szélsőséges hatásoknak ellenálló hermetikus burkolata, a nagy igénybevételekre méretezett primer kör, az esetleg kiszabadult aktivitás visszatartására szolgáló konténment (védőburkolat). A zónaolvadásnál kiszabadult radionuklidok nagy része a zóna olvadékába kerül, és csak az illékonyak (főleg nemesgázok, jód, cézium és trícium) juthatnak tovább gőzök és aeroszolok formájában. A konténmentben a fizikai elszigetelésen kívül különféle technológiai eljárások (szűrés, oldás, kicsapítás) feladata a mobillá vált radionuklidok visszatartása. A NAÜ ajánlása a zónaolvadás valószínűségének maximumára régi erőműveknél 10^{-4} /év, újaknál 10^{-5} /év értéket kíván meg, a konténment hermetikusságának egyidejű sérülését figyelembe véve az aktivitás környezetbe jutásának valószínűségére pedig egy további nagyságrendes csökkenést tart szükségesnek. A TMI erőmű zónaolvadásos baleseténél a konténment teljesítette a feladatát, és veszélyes mennyiségű aktív anyag nem került a környezetbe. A hazai intézmények többéves munkával (AGNES, Advanced General and New Evaluation of Safety) újra értékelték a paksi atomerőmű biztonságát, mind determinisztikus, mind valószínűségi elemzésekkel. A szovjet tervezésű atomerőművekről ez volt az első publikált jelentés, amit a nemzetközi szakmai közvélemény elismeréssel fogadott, és következtetéseit mértékadónak ismerte el. A javaslatok figyelembevételével az erőmű 60 Mrd Ft-os ráfordítás árán lényegesen megnövelte biztonságát, elérve a vele egykorú nyugati atomerőművek szintjét. A zónaolvadás kockázatát sikerült $5 \cdot 10^{-5}$ /év-re csökkenteni, és célul tűzték ki az új erőművekre ajánlott 10^{-5} /év szint elérését.

Csernobil kivételével atomerőművi üzemzavarok és balesetek nem okoztak egészségi ártalmakat a lakosság körében. Az erőművek veszélyességével kapcsolatban már a TMI baleset is félelmeket váltott ki, a csernobili katasztrófának pedig egyenesen elrettentő hatása volt. Felerősítette az érzelmeket, hogy a sajtó sok olyan eseményt, amelyek katonai létesítményekben, dűsítőkban, hadianyagraktárakban következtek be, összemosott erőművi balesetekkel. Radioaktív anyagok raktározásánál néhányszor valóban előfordult, hogy kémiai robbanás nagy mennyiségű anyagot juttatott a környezetbe. A legnagyobb ilyen jellegű baleset Szibériában (Kisztyum) egy katonai nagy aktivitá-

sú hulladéktárolóban következett be. Ez 74 PBq kibocsátásával sok ezer km² területet szennyezett el, 11 ezer embert kellett kitelepíteni, egyeseknél a tapasztalt dózis 100 mSv nagyságrendet is elért. (A tapasztaltak alapján világszerte olyan tűz- és robbanásvédelmeket fejlesztettek ki, ami elejét veszi az ilyen baleseteknek.) A pontatlan hírközlés miatt sokan úgy vélik, hogy az említett két erőművi baleseten kívül sok más erőművi szerencsétlenség is veszélyeztette a lakosságot, tehát az atomerőművek megbízhatatlan létesítmények.

Az RBMK reaktoroknál nincs teljes konténment, a csernobili katasztrófánál a fűtőelemekben található radioaktív anyagok mintegy 4%-a (12 EBq) jutott ki a környezetbe, legnagyobbbrészt nemesgázok, jód és cézium formájában. Az első napokban a jód játszotta a főszerepet, ami 1,5 millió embert figyelembe véve 220 k(ember·Sv) pajzsmirigydózist és 145 k(ember·Sv) egésztest dózist okozott. A későbbi időszakban a talajra kiüledett, illetve kimosott radioaktivitás, elsősorban a cézium hatása vált meghatározóvá, 10 ezer km²-en 270 ezer embert érintően >560 GBq/m² terheléssel, ~54 k(ember·Sv) kollektív dózist okozva. A pesszimista számítások a kollektív dózis alapján 50 év alatt a volt Szovjetunió területén néhány ezer többetrákra vezetnek, és hasonló eredményt szolgáltatnak Európa többi területére is. Eddig ténylegesen csupán pajzsmirigyrák eseteket tapasztaltak az erőmű körüli övezetben mintegy 2000 személynél, közülük 1%-ra tehető a halálos kimenetek száma. A 10 napig tartó kibocsátásból Magyarország területét két hullám érte el, az egyéneket ért sugárzás 50 évre számított kumulált hatása kevesebb, mint a természetes háttérsugárzás egyévi dózisének negyede.

A jó konstrukciójú és szakszerűen üzemeltetett atomerőműveknél rendkívül kicsi annak a valószínűsége, hogy egy balesetnél radioaktivitás kerülhet a környezetbe. Részben a csernobili katasztrófa tanulságai alapján a legtöbb működő atomerőmű biztonságát világszerte oly mértékben megnövelték, hogy a környezeti kibocsátás valószínűsége 10⁻⁶/év alá csökkent. Két szovjet tervezésű, régi reaktortípusnál (VVER 230, RBMK) ilyen mértékű biztonság-növelésre a teljes konténment hiánya nem adott módot, ezek mielőbbi leállítása nemzetközi igény. Azok az Európai Unióba belépni szándékozó országok, amelyekben ilyen reaktorok működnek (Bulgária, Litvánia, Szlovákia) kötelezettséget vállaltak a kifogásolt erőművek leállítására. A biztonságnövelő intézkedések hatására az a radioizotóp mennyiség, ami egy nagy balesetnél esetleg a környezetbe kerülhet, sok nagyságrenddel kevesebb a csernobili kibocsátásnál, még az említett két régi szovjet erőműtípusnál is, ezért kizárható ma már a csernobilihez hasonló méretű katasztrófa megismétlődése. A fentieket figyelembe véve az atomerőművek környezetében élők egészségi kockázata ma nem nagyobb, mint más ipari üzemek környezetében.

A laikusok számára azonban a valószínűségek és kockázatok nem meggyőző erejűek, ezért az atomerőművek új generációjánál azzal kívánják kiküszöbölni ezt a problémát, hogy inherens tulajdonságok zárják ki a környezet

veszélyeztetését. Erre többféle elképzelés látott napvilágot: az erőmű nukleáris részének föld alá telepítése, a szubkritikus reaktor neutronfluxusának külső vezérlése (például gyorsítóval), passzív rendszerű védelmek, túlmelegedésnél elpárolgó moderátor, biztos reaktorhűtés (PBMR) stb.

Nehezíti a tisztánlátást, hogy a médiában túlzott hírértéke van minden atomerőművi eseménynek. A más típusú erőműveknél a szokványosnak számító üzemzavarok érdektelenek, az atomerőműveknél azonban az ilyen eseményekről közleményt adnak ki, ami egyrészt a hiteles tájékoztatás érdekében fontos, másrészt viszont a veszélyesség érzetét fokozza. Az atomerőművek üzemeltetői törekednek valósághű információkat szolgáltatni az erőművek működéséről és üzemzavarairól. Az utóbbiak súlyosságának megítéléséhez értékes segédeszköz az a NAÜ által kialakított, és nemzetközileg elfogadott 7 fokozatú üzemzavarskála (INES, International Nuclear Event Scale), amibe az üzemek és hatóságok besorolják az eseményeket. A környezet veszélyeztetése az 5-ös fokozatnál kezdődik. A TMI baleset 5-ös, a csernobili 7-es besorolást kapott, 4-es fokozatú esemény 1953 óta kétszer fordult elő (egy reprocesszálóban, illetve egy konverziós üzemben). Évek óta a világban előfordult legsúlyosabb üzemzavarok is csak elvétve érték el a 2-es fokozatot. Ezért is váltott ki nagy nemzetközi figyelmet a paksi atomerőmű 3-as fokozatba sorolt üzemzavara 2003-ban.

A nukleáris biztonságot számos nemzetközi egyezmény, két- és többoldalú, valamint regionális megállapodás, továbbá nemzeti előírások szolgálják. Az atomerőműveket üzemeltető országok a Nukleáris Biztonsági Konvenció (Convention on Nuclear Safety, 1996) aláírásával garantálták a saját területükön működő létesítmények biztonságát, aminek megvalósulásáról a háromévente rendezett felülvizsgálati konferencián kell számot adniuk. Az első két felülvizsgálati konferencián (1999, 2002) a nemzetközi közösség a magyar helyzetet mind az erőmű működése, mind a jogszabályok és a hatósági felügyelet tekintetében elismerésre méltónak minősítette.

A biztonság növeléséhez nagymértékben hozzájárulnak az atomenergia területén működő nemzetközi intézmények (IAEA, NEA, UNSCEAR, WANO, Euratom stb.). Egyrészt nagyszámú és sokirányú rendezvényeikkel előmozdítják az új ismeretek széles körű elterjesztését, és a biztonsági kultúra erősítését. Másrészt irányelvek és ajánlások kidolgozásával, munkabizottságok működtetésével támasztják alá a korszerű megoldások meghonosítását a létesítmények működtetésében, a hatóságok tevékenységében. A közvélemény szempontjából is nagy jelentősége van, hogy kérésre a legtöbb nemzetközi szervezet vállalja tekintélyes és elfogulatlan külföldi szakértők bevonásával az erőművek és hatóságok tevékenységének alkalmi biztonságorientált felülvizsgálatát. Ilyenekre többször került sor nálunk is, rendszerint kedvező eredménnyel, de az IAEA vizsgálata a PAV 2003-as súlyos üzemzavarával kapcsolatban számos elmarasztaló megállapítást tett.

A magyar jogrend törvénnyel és több alacsonyabb szintű jogszabállyal írja elő a nukleáris biztonság érdekében szükséges teendőket. A létesítéssel és az üzemeltetéssel kapcsolatos tevékenységek engedélykötelesek, aminek teljesülését a nukleáris biztonsági hatóság ellenőrzi, engedélyeinek feltétele a biztonsági előírások maradéktalan teljesülése. A hivatal függetlensége és kompetenciája a biztonság fontos záloga.

A nukleáris technológia hatékony és biztonságos alkalmazásához szükség van magas színvonalú tudományos és technikai háttérre is. Ebbe beletartozik a gyakran csúcstechnológiát képviselő bonyolult berendezések tervezésére és gyártására felkészült ipar, a szakembereket képző oktatóintézmények, a problémák megoldására alkalmas kutatóbázis, valamint a független biztonsági hatóság. És természetesen mind az erőműben, mind a háttérintézményekben kitűnően képzett és hozzáértő szakemberekre van szükség. A sokirányú jogi és műszaki garanciák, valamint a nyílt tájékoztatás hatására oldódnak a nukleáris biztonsággal és a kibocsátásokkal kapcsolatos félelmek.

A hulladékok sorsa

Az atomenergia elleni fellépés célpontjává egyre inkább a radioaktív hulladékok (antinukleáris szakzsargonban „atomszemét”) válnak, mint sugárzó veszélyforrások. Az ellenzők a már létező hulladékok elhelyezését is gátolják, figyelmen kívül hagyva, hogy az jobb helyen van egy tárolóban, mint ideiglenes körülmények között. Így fellépésük tulajdonképpen a társadalom kockázatát növeli. A hulladékokat addig kell a bioszférától elszigetelni, amíg a spontán radioaktív bomlás következtében aktivitásuk nem csökken jelentéktelen értékre, vagyis veszélytelenné nem válnak. A felezési idő 20-szorosánál az aktivitás az eredeti érték milliomodára csökken, ami már elhanyagolható érték. A jelenlegi előírások a radioaktív hulladékokat a 10. táblázat szerint osztályozzák, de az erős hőfejlődésű és az α sugárzó hulladékokra további megkötések vonatkoznak. A hulladékokat a felezési idő szerint is osztályozzák, a 30 napnál kisebb felezési idejűek rövid élettartamúak, 30 nap és 30 év közöttiek közepes, és e felett hosszú élettartamúak.

10. táblázat

Radioaktív hulladékok osztályozása

Kritérium	Kis aktivitású	Közepes aktivitású	Nagy aktivitású
aktivitás-koncentráció, GBq/kg	<0,5	0,5–500	>500
dóziseltjesítmény*, μ Gy/h	<300	300–10 000	>10 000

* a felülettől 10 cm-re

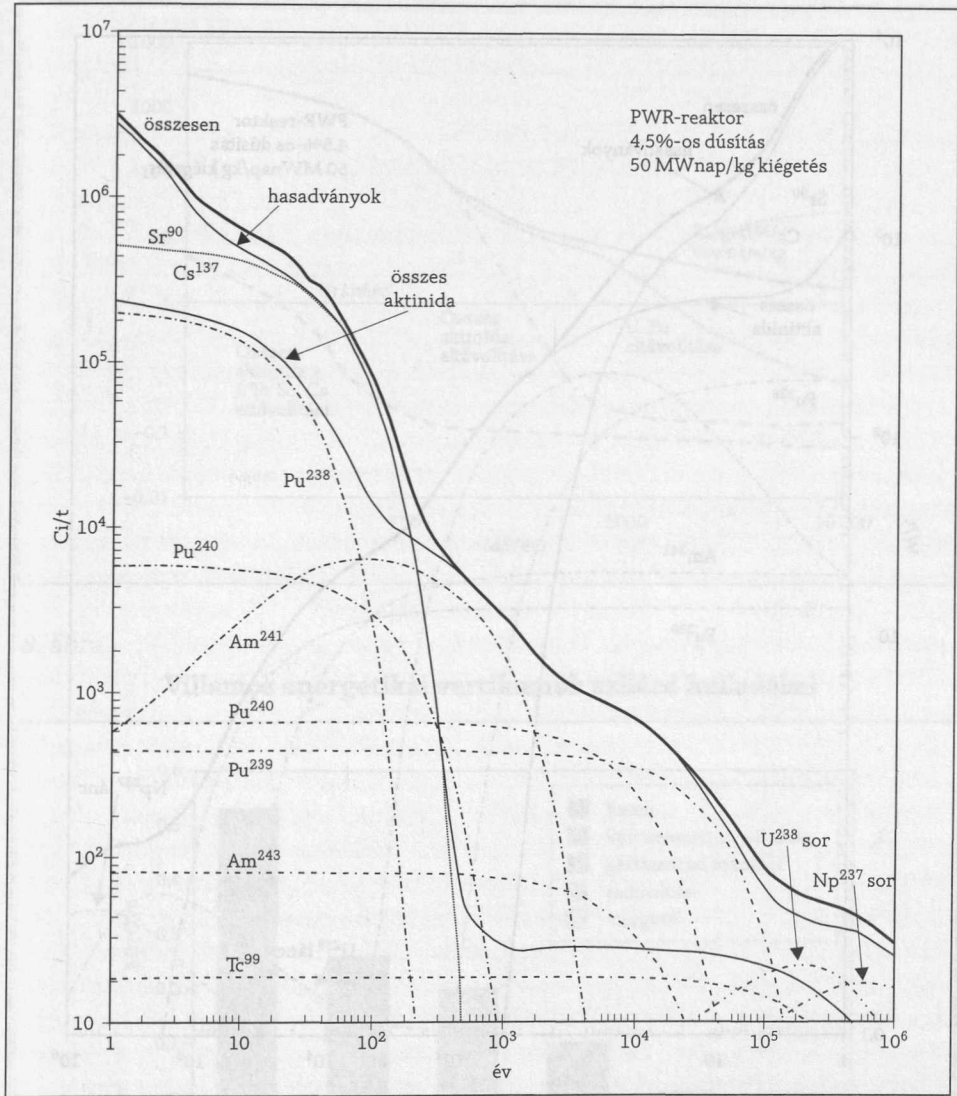
A hulladékok elhelyezésénél a műszaki gátaknak és a geológiai környezetnek együttesen biztosítani kell, hogy radionuklidok a különféle transzportutakon (migráció, diffúzió, vízáramok, felszívódás a növényzetben stb.) ne kerülhessenek a környezetbe. Az aktivitás mértékétől függően a befogadó létesítmények kialakíthatók a talajszinten, a felszín alatt, vagy pár száz méter mélyen, stabil geológiai formációban (sórétegben, tufában, agyagban, gránitban és más kristályos kőzetekben). A talajszinten hulladéktárolásra kialakított árkokat és teknőket a talajvíz behatolása ellen szigetelni kell, s gondoskodni a csapadék elvezetéséről, valamint a megtelt tárolókat időtállóan kell befedni. A lecsengés ideje alatt a környezet védelme érdekében ezen tárolók folyamatos ellenőrzése szükséges. A felszín alatti geológiai tárolók a lezárás után folyamatos felügyeletet nem igényelnek. A társadalmi ellenzés csökkentését szolgálja, hogy az elhelyezésnél a hulladék visszanyerhetőségére is töreksszenek. Erre előre nem látott problémák esetén kerülhet sor, vagy ha jobb megoldás kínálkozik a hulladékkezelésre, illetve ha igény merül fel az eltemetett radioaktív anyagokra.

Radioaktív atomok a természetben előforduló anyagokban is megtalálhatók. Az olyan nukleáris hulladékok, amelyek sugárzása összevethető a természetes anyagokéval, közönséges hulladékként kezelhetők (VLLW, Very Low Level Waste [nagyon kis aktivitású hulladék]), a mentességi szintet jogszabályok rögzítik. Nincs egységes felfogás ennek a küszöbértékére, egyesek $1 \mu\text{Gy/h}$ dózisteljesítményt tekintenek mérvadónak. A hulladékok zömét kitevő kis (LLW, Low Level Waste [kis aktivitású hulladék]) és közepes (ILW, Intermediate Level Waste [közepes aktivitású hulladék]) aktivitásúak felezési ideje többnyire 30 évnél kisebb, de legnagyobb hányaduknál sokkal rövidebb. A kis és közepes aktivitású hulladékokat legfeljebb néhány száz évig kell elszigetelni a környezettől. Ennek biztonságos megoldhatóságát több mint száz létesítmény tanúsítja világszerte (Magyarországon Püspökszilágyiban). E tárolók ugyan legnagyobb részét a nem atomerőművi hulladékok elhelyezésére létesültek, de a nem nagy aktivitású atomerőművi és a más eredetű radioaktív hulladékok jellege és összetétele között nincs lényeges különbség. Ilyen típusú új hulladéktárolók létesítését legfeljebb az érintett lakosság ellenérzése nehezíti, amit azonban többnyire sikerül ellensúlyozni megfelelő tájékoztatással és az érdekek figyelembevételével.

Gondot a nagy aktivitású hulladék (HLW, High Level Waste [nagy aktivitású hulladék]) elhelyezése okoz, aminek legnagyobb részét a kiégett fűtőelemek vagy az újrafeldolgozás maradéka jelenti. Ugyan az erőműből kikerülő radioaktivitás 95%-át a nagy aktivitású hulladékok képviselik, azok tömege az összes hulladéknak csak alig 5%-a. Ezekben nagy a hosszú felezési idejű izotópok – főleg aktinidák – aránya, ezért hosszú ideig kell biztosítani az elszigetelését, az üzemanyagciklus jellegétől függően nagyságrendben 10 000 évig, vagy még tovább (a kiégett fűtőelemek kezdeti $\sim 100 \text{ PBq}$ sugárzása kb. 10-20 ezer év után

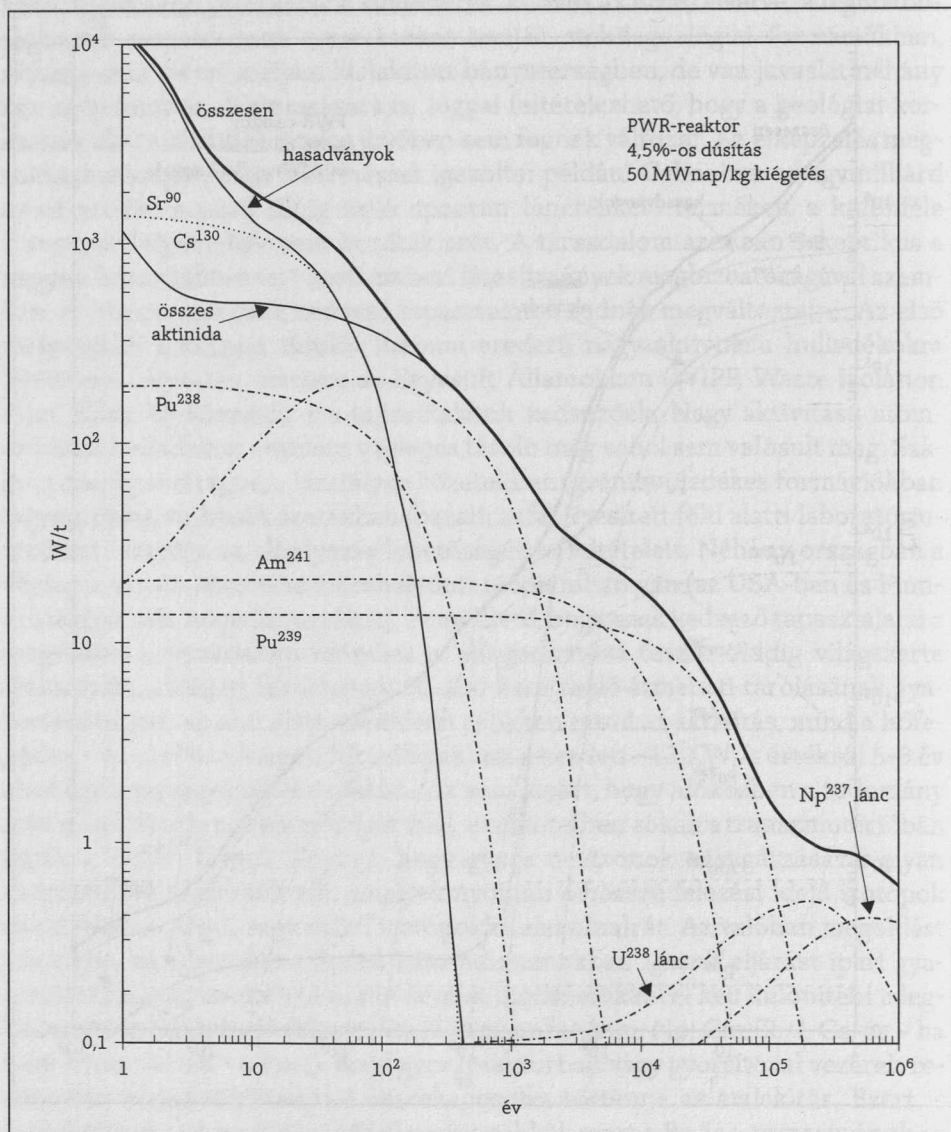
csökken az ércek sugárzásának szintjére, és a ^{239}Pu felezési ideje is ilyen nagyságrendű). Végleges elhelyezésükre többféle lehetőséget (mély tengerek fenékeire vagy a sarki jégtakaróba süllyesztés, kilövés az űrbe) elvetve, a legbiztonságosabb megoldásnak temetésüket tartják stabil geológiai formációkban, néhány száz méter mélyen kialakított bányatérsgében, de van javaslat néhány km mély furatok alkalmazására is. Joggal feltételezhető, hogy a geológiai korszakok alatt stabil alakzatok a jövőben sem fognak változni. Az elképzelés megvalósíthatóságát maga a természet igazolta: például Gabonban az egymilliárd évvel ezelőtti hosszú ideig zajló spontán láncreakció termékeit a különféle transzportfolyamatok nem hordták szét. A társadalom azonban szkeptikus a nagyon hosszú időre tervezett emberi létesítmények megbízhatóságával szemben, az ellenérzést csak kedvező tapasztalatok tudnák megváltoztatni. Az első mélységbeli geológiai tárolót katonai eredetű nagy aktivitású hulladékokra 1998-ban helyezték üzembe az Egyesült Államokban (WIPP, Waste Isolation Pilot Plant, Új-Mexikó), s a tapasztalatok kedvezőek. Nagy aktivitású atomerőművi hulladékok számára végleges tároló még sehol sem valósult meg. Számos ország sórétegben, kristályos kőzetekben (gránit), üledékes formációkban (agyag, pala), vulkáni kőzetekben (bazalt, tufa) létesített föld alatti laboratóriumokban vizsgálja az elhelyezés lehetőségét és feltételeit. Néhány országban a végleges tároló létesítése előrehaladott stádiumban van (az USA-ban és Finnországban már engedélyezték is). Remélhető, hogy ezek kedvező tapasztalatai a megoldást a társadalom számára is elfogadhatóvá teszik. Addig világszerte (Pakson is) a kiégett fűtőelemek 50-100 évre szóló átmeneti tárolásának gyakorlata terjedt el, ami alatt jelentősen csökken mind az aktivitás, mind a hőfejlődés – az utóbbi a kiégett fűtőelemekben a kezdeti $\sim 13 \text{ KW/t}$ értékről 5-6 év alatt egy nagyságrenddel csökken. Az sem kizárt, hogy időközben a tudomány más megoldásokra is lehetőséget talál, e tekintetben sokan a transzmutációban látják a kiutat. Ennek lényege, hogy gyors neutronok besugárzásával olyan magreakciók idézhetők elő, amelyek nyomán a hosszú felezési idejű izotópok rövid felezési idejű, vagy stabil izotópokká alakulnak át. Az valóban megoldást jelentene, ha sikerülne a fizikai laboratóriumokban igazolt eljárást ipari gyakorlattá fejleszteni. Ennek során kémiai módszerekkel el kell különíteni a legkellemetlenebb hosszú felezési idejű izotópokat (Am, Np, Cm, Tc, I, Cs, és – ha nem hasznosítják – a Pu-t), majd gyorsreaktorban vagy gyorsítóval vezérelt reaktorban energiatermeléssel összekapcsolva történne az átalakítás. Ezért is foglalkoznak az olvadt sós (MSR) reaktorokkal, mert a Pu és a transzuránok az olvadékokban maradnak, és abból egy, a reaktorral sorba kapcsolt kémiai létesítményben kiválaszthatók. A transzmutáció nemcsak a lebomlás idejét csökkenteni nagyságrendekkel (7c. ábra), hanem a kiégett fűtőelemek aktivitását (7a. ábra, $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$), hőfejlődését (7b. ábra), a temetendő radioaktív anyag mennyiségét is. A tóriumos reaktorok mellett szól, hogy a hulladékban sokkal kevesebb a transzurán.

Kiégett fűtőelemek hőfejlődése



Logikus lenne a sok kis nemzeti létesítmény helyett nemzetközi együttműködésben néhány közös hulladéktárolót kialakítani. Egy nemzetközi társaság (ARIUS, régebben PANGEA) közös hulladéktároló létesítésére törekszik nagy aktivitású hulladékoknak sivatagokban, de Oroszországban is születtek bértárolásra elképzelések. Egyelőre a közhangulat és a jogi szabályozás a közös megoldások ellen hat. A hulladékokkal kapcsolatos teendőkre is szüle-

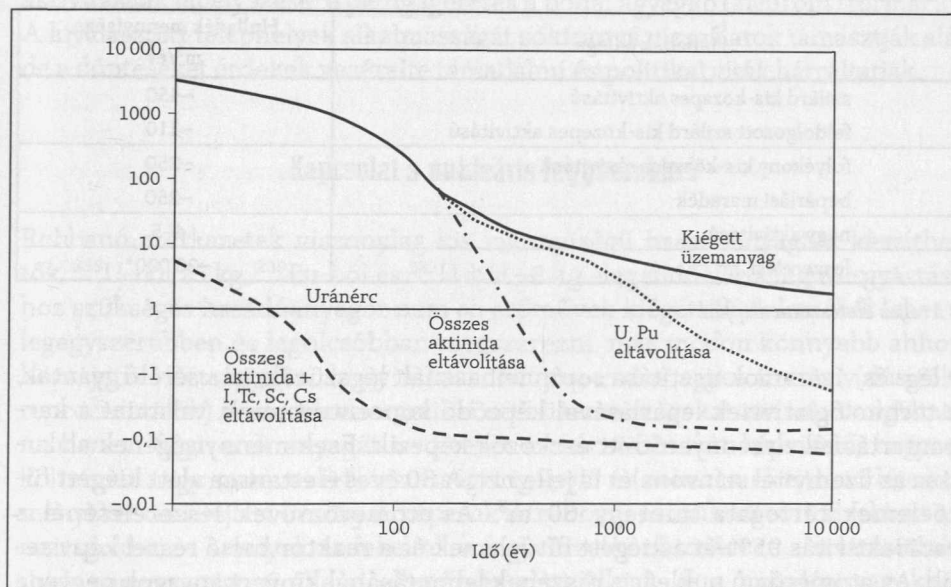
Kiégett fűtőelemek aktivitása



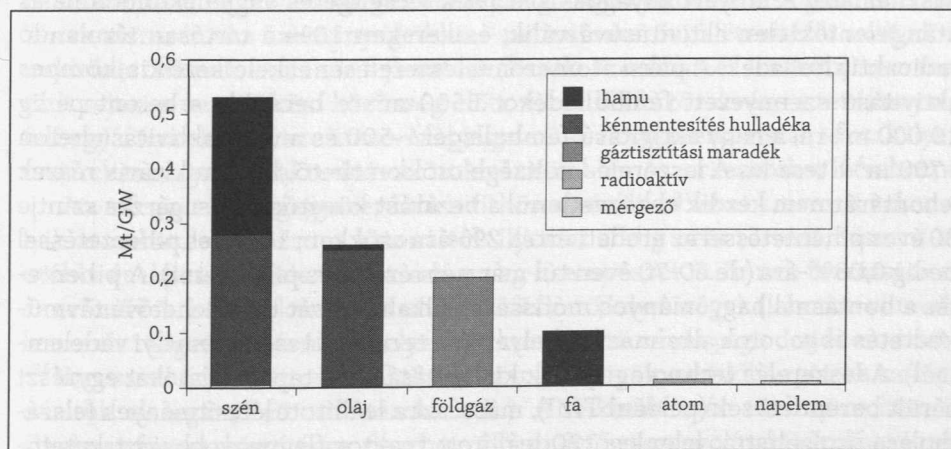
tett nemzetközi egyezmény, aminek teljesülését háromévenként felülvizsgálati konferencia ellenőrzi, erre első ízben 2003-ban került sor.

Az atomerőművi szilárd hulladékok mennyisége a más típusú erőművi hulladékokhoz viszonyítva nem nagy (8. ábra). A keletkező tríciumot és a nemesgázokat kibocsátják a környezetbe, az aeroszolokat és az illékony komponen-

Lecsengési idők a természetes uránérc aktivitásához viszonyítva



Villamos energetikai vertikumok szilárd hulladékai



seket szűrőkkel összegyűjtik, a hűtővízből ioncserélő gyantákkal kivonják, az aktivált tárgyakat (védőeszközök, munkaruhák, szerszámok stb.) összegyűjtik. A Pakson évente keletkező hulladékok hozzávetőleges mennyisége a 11. táblázatban látható. A kis és közepes aktivitású hulladékok jelentős részét

11. táblázat

Évente képződő radioaktív hulladékmennyiség a paksi atomerőműben

Hulladék jellege	Hulladék mennyisége, m ³ /év
szilárd kis-közepes aktivitású	~450
feldolgozott szilárd kis-közepes aktivitású	~110
folyékony kis-közepes aktivitású	~250
bepárlási maradék	~250
nagy aktivitású	4–5
leszerelési, m ³	~20 000*

* a teljes élettartam alapján

a lég- és vízáramok tisztítása során felhasznált légszűrők, ioncserélő gyanták, a technológiai vizek lepárlásával képződő koncentrátumok, valamint a karbantartásnál elszennyeződött eszközök képezik. Ezek mennyiségének alakulása az üzemvitel színvonalát is jellemzi. A 30 éves élettartam alatt kiégett fűtőelemek térfogata mintegy 60 m³. Az atomerőművek leszerelésénél a radioaktivitás 95%-át a kiégett fűtőelemek és a reaktor belső részei képviselik. Az atomerőmű nukleáris részének lebontásánál kinyert anyagok negyede közönséges hulladék, és hasonló hányadot tesznek ki a korlátozás nélkül tovább hasznosítható anyagok. A hulladékoknak mintegy negyede újra feldolgozható, a nagyon kis aktivitású fémek beolvaszthatók, a törmelék feltöltésre használható. A kinyert anyagok 10-15%-a lecsengetés vagy dekontaminálás után jelentéktelen aktivitásúvá válik, és kereken 10% a tartósan tárolandó radioaktív hulladék. A paksi atomerőmű leszerelésénél keletkező kis-közepes aktivitású szennyezett fémhulladékot 5500 m³-re becsülik, a betont pedig 10 000 m³-re, a nagy aktivitású fémhulladék ~500 és a nagy aktivitású beton ~700 m³-t tesz ki. A leszerelés költsége csökkenthető, ha a nukleáris részek lebontását nem kezdik el közvetlenül a bezárást követően. A sugárzás szintje 30 éves pihentetéssel az eredeti érték 2%-ára csökken, 100 éves pihentetéssel pedig 0,08%-ára (de 60-70 éven túl már nem érdemes pihentetni). A pihentetés a bontásnál hagyományos módszerek alkalmazását teszi lehetővé távműködtetés és robotok alkalmazása helyett (de természetesen személyi védelemmel). A leszerelés technológiájának kialakításához a tapasztalatokat egyrészt sérült berendezések (például TMI), másrészt a leállított létesítmények felszámolása szolgáltatta. Jelenleg 120 leállított reaktor (legnagyobb részben kutatóreaktorok, de a legelső atomerőművek is), valamint nagyszámú forgalomból kivont atomhajtású hajó várja sorsának végleges rendezését.

Összességében – 30 éves élettartamot feltételezve – 20-40 ezer m³ kis-közepes aktivitású és 15-20 ezer m³ nagy aktivitású hulladék elhelyezéséről kell gondoskodni Pakson, az élettartam hosszabbítása természetesen arányosan

növeli a hulladékot is. A hazai elképzelések szerint a kis-közepes aktivitású hulladék végleges elhelyezésére felszín alatti tároló létesül gránitban, a nagy aktivitásúak elhelyezésére pedig ígéretes a bodai agyagkő (aleurolit) formáció. A kiválasztott telephelyek alkalmasságát sokirányú vizsgálatok támasztják alá, de a döntéseket érdekek vezérelte társadalmi és politikai viták hátráltatják.

Kapcsolat a nukleáris fegyverekkel

Robbanó szerkezetek viszonylag kis mennyiségű hasadóanyagból készíthetők, ^{235}U -ból 25 kg, ^{239}Pu -ból és ^{233}U -ból ~8 kg elegendő. De a fegyvergyártáshoz szükséges hasadóanyagot nem az erőművek kiégett fűtőeleméből lehet a legegyszerűbben és legolcsóbban megszerezni, más módon könnyebb ahhoz hozzájutni. Kétségtelen, hogy a hasadóanyag-ciklus egyes üzei (dúsítók, reprocesszálók) nemcsak energetikai célú üzemanyagokat tudnak szolgáltatni, hanem fegyverek anyagát is. Ezeket a csúcstechnikát képviselő, nagyon költséges, nagy szakmai felkészültséget igénylő és nehezen elrejthető létesítményeket csak fejlett országok képesek létrehozni és működtetni. Ezekben az országokban – amelyek érdekelték a fegyverzetkorlátozásban – e létesítmények nagyon szigorú állami ellenőrzés alatt állnak, és a hasadóanyagokkal kapcsolatban szigorú elszámolási kötelezettségük van. A nem atomhatalmak területén működők nemzetközi ellenőrzésnek is tárgyai. Elvileg nem lehetetlen, hogy ezen üzemekből kis mennyiségű hasadóanyagot ellopjanak, de a robbanó szerkezetekhez szükséges mennyiség aligha juthat át a szigorú ellenőrzés rendszerén. Az üzemanyagciklus – nem atomerőmű létesítését szolgáló – nukleáris üzeinek titkos fejlesztése (Észak-Koreában és Irakban) nem maradt rejtve a nemzetközi közösség előtt, és az ENSz törekvése e tevékenység felhagyásának kikényszerítése. Megjegyzendő, hogy a terroristák is csak ilyen üzemek támogatásával tudnának nukleáris robbanószerkezeteket létrehozni.

Atomfegyvert a legegyszerűbben titkos vásárlással lehet szerezni valamelyik atomhatalom korrump katonáitól. Ilyesmi eddig nem történt, viszont az utóbbi években megjelent a hasadóanyag-csempészet is. Ennek forrásai nem az erőművek, hanem könnyebben hozzáférhető lehetőségek (laboratóriumok, leszerelt tengeralattjárók, amelyek reaktorának üzemanyaga majdnem tiszta ^{235}U , rosszul őrzött katonai raktárak, az uránbányák meddőhányói, az izotóp-dúsítók elszegényített urántárolói stb.). A felkínált urán többnyire nem is alkalmas fegyverkészítésre, de a hozzá nem értő csomagolás és tárolás veszélyeztetheti nemcsak az eladók és vevők egészségét, hanem a közelben tartózkodókat is. A hasadóanyag-csempészet visszaszorítására erőteljes nemzetközi együttműködés alakult ki.

Az erőművek kiégett fűtőelemeiből csak újrafeldolgozás útján lehet hasadóanyagot kinyerni, de az közvetlenül fegyverkészítésre alkalmatlan. Uránból

csak erősen dúsított, ~90% 235-ös izotóptartalmú anyag (HEU) felel meg a fegyvergyártás igényének, amit csak dúsítóművekben lehet előállítani, mert a kiégett fűtőelemekben a koncentráció 2% alatt van. A fegyvertiszta plutóniumnak 95-96% 239-es izotópot kell tartalmazni, ellenkező esetben a nem hasadóképes plutónium izotópok (^{240}Pu , ^{242}Pu) lefékezik a láncreakciót. A könnyűvízes reaktorok fűtőelemeiből kinyerhető plutóniumban a 239-es izotóp aránya 50% alatt van (grafitmoderált típusoknál valamivel nagyobb az arány), így az közvetlenül alkalmatlan fegyvergyártásra, a nemkívánatos izotópokat csak bonyolult és veszélyes kémiai eljárásokkal lehet elkülöníteni. A 233-as urán bomlástermékeinek jellege miatt alkalmatlan fegyvergyártásra.

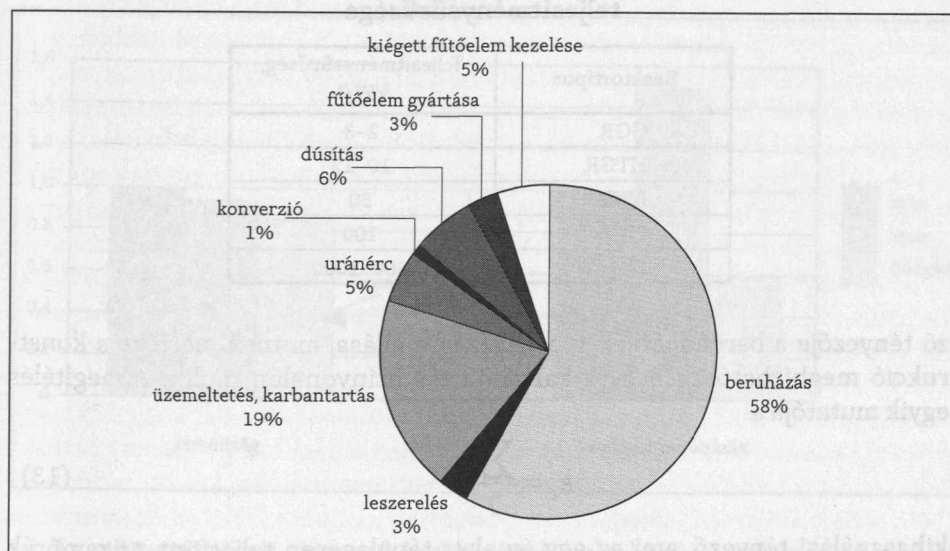
Az atomerőművek és a nukleáris fegyverkészítés még szigorúbb elhatárolása érdekében olyan fűtőelemek kifejlesztésével is foglalkoznak, amelyekből nem lehet elkülöníteni a hasadóanyagokat, például nagyon szilárd vegyületben, inert mátrixban, vagy kőzet jellegű formációban vannak megkötve.

Az atomfegyverek elterjedést leginkább politikai eszközökkel lehet megakadályozni. Erre hatásos és bevált nemzetközi együttműködés alakult ki, amelynek legátfogóbb eleme az ENSZ keretében kötött, és lejárat nélkül meghosszabbított atomsorompó-szerződés (NPT, Non Proliferation Treaty). Ennek atomfegyverrel nem rendelkező aláírói vállalták, hogy nem fejlesztenek ilyen fegyvereket, és nem törekszenek ilyenek birtoklására. A szerződés teljesülését szolgálja a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség szigorú ellenőrzése és felügyelete a hasadóanyagok, valamint a nukleáris létesítmények felett (safe-guard). Amikor néhány országban (Irak, Észak-Korea) a NAÜ ellenőrei titkos fegyverfejlesztés jeleit fedezték fel, a szervezet hatáskörét kibővítették a be nem jelentett nukleáris tevékenységek felderítésére is. Fontosak az atomfegyvermentes övezeteket létesítő regionális egyezmények, valamint az atomhatalmak megállapodása a robbantások tilalmáról. Korlátozza a fegyverfejlesztés lehetőségét a nukleáris technológiák szállítására alkalmas országok (NSG, Nuclear Suppliers Group) megállapodása is a kritikus berendezések, technológiák és ismeretek átadásának feltételeiről.

Gazdasági versenyképesség

Az atomerőművek jövőjének alapvető feltétele gazdasági vonzerejük. A jelenleg működő atomerőművek nagy többsége versenyképes, de néhány régióban az olcsó szén vagy földgáz a második helyre szorítja az atomerőművekben termelt villamos energia önköltségét. A könnyűvízes atomerőművek önköltségében a tőketerhek átlagosan 60%-ot, az üzemanyag ára mintegy 20%-ot, a működtetés és karbantartás költségei ugyancsak 20%-ot tesznek ki (9. ábra). Természetesen az egyes erőművek tényleges költségstruktúrája ettől eltérő, de nincsenek minőségi különbségek. Hasonló a paksi atomerőmű önköltség-

PWR-erőmű költségmegoszlása



gének a szerkezete is, bár az állóeszközterhek kisebbek, mert a beruházott vagyont a privatizáció előkészítése során irreálisan alacsonyra értékelték. Ellenben nem csak ezen múlik, hogy az atomerőmű az ország legolcsóbb villamosenergia-forrása.

Az atomerőművek magas tőkekölsége több körülményre vezethető vissza. Az erőművek főberendezései különleges követelményeknek megfelelő, bonyolult és ezért drága termékek. A beruházások nagy részét a nagyon szigorú biztonsági követelmények jelentik, egyes becslések szerint a létesítési költségek 60%-át is eléri a biztonság-, az egészség- és a környezetvédelemre szánt ráfordítás. Jelentős a tervezést, engedélyezést és megvalósítást átfogó létesítési idő hatása is, az erre az időszakra eső kamatterhek elérhetik a teljes létesítési költség 25-30%-át.

A beruházási költségek erősen függenek az atomreaktor típusától, egyrészt a szerkezetek eltérései miatt, másrészt a létesítmény eltérő terület-, illetve térfogatigénye következtében. Az utóbbi függ az aktív zónában megvalósítható teljesítménysűrűségtől, amire összehasonlító értékeket mutat a 12. táblázat. Azonos típus esetében is lényegesen eltérhet a telephelytől függő létesítési költség, a helyi árkülönbségek (telekár, gyártási költség, bérszínvonal, közterhek, hitelkockázat stb.) miatt.

A nagy tőkekerhek miatt az atomerőműveket általában alaperőműként működtetik, hogy a nagy állóeszközérték mielőbbi amortizálásának megkönnyítésére minél nagyobb kihasználást érjenek el. A kihasználás egyik meghatáro-

12. táblázat

Reaktortípusok aktív zónájának teljesítménysűrűsége

Reaktortípus	Teljesítménysűrűség, kW/l
GGR	2-3
HTGR	10-12
BWR	50
PWR	100
BR	500-1000

zó tényezője a berendezések rendelkezésre állása, aminek mértéke a konstrukció megbízhatóságán és a karbantartás színvonalán múlik. A megítélés egyik mutatója a

$$k_t = \frac{\sum \tau}{T} \quad (13)$$

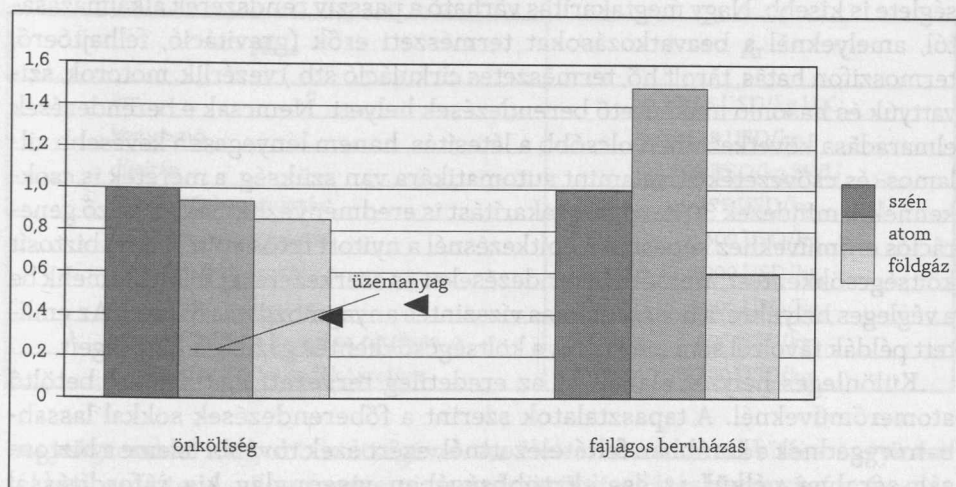
kihasználási tényező, ami az egy év alatt ténylegesen teljesített τ üzemórák összegének és a T éves időtartamnak (8760 óra) a hányadosa. A másik használatos mutató a

$$k_e = \frac{E}{P_n T} \quad (14)$$

kapacitástényező, ami a ténylegesen fejlesztett energia és az elméletileg lehetséges mérték hányadosa (P_n a névleges teljesítmény). Az időre (k_t) és energiára (k_e) vonatkozó mutatók összecserélése zavarok forrása. A rendelkezésre állás minőségét jellemzi az üzemzavarok okozta nem tervezett automatikus leállások évenkénti száma is, ami Pakson minimális, mert nem minden blokknál fordul minden évben elő. Ugyancsak összefügg a kihasználás mértékével a karbantartásra és az üzemanyag átrakására igénybe vett időtartam (könnyűvizes reaktoroknál 1-1,5 évente néhány hét).

Az is a minél egyenletesebb tartós terhelésre ösztönöz, hogy a teljesítményváltozások előmozdítják a reaktormérgek keletkezését, csökkentve a kiegészíthetőség mértékét és ezzel rontva a gazdaságosságot is. Ennek azonban annál nehezebb eleget tenni, minél nagyobb az atomerőművek részaránya az adott villamosenergia-rendszerben. Bizonyos teljesítménymarányon felül időnként (Magyarországon nyáron éjszaka) elkerülhetetlen a terhelés völgyidőszakában az atomerőművek teljesítményének csökkentése, egyes blokkok leállítása. Nagy részaránynál (például Franciaországban) a teljesítményszabályozásba az atomerőműveket is be kell vonni.

Alaperőművek gazdasági mutatói



Az atomerőművek versenyképességének kulcskérdése a beruházási költségek lényeges mérséklése, mert a jelenlegi árarányok szinte kizárják új atomerőművek létesítését. A 10. ábra a leghasználatosabb három alaperőműtípus jellemzőit hasonlítja össze német viszonyokra. E szerint a termelt villamos energia önköltségében nincs nagy különbség, a sorrend könnyen az ellentettjére fordulhat, ha a földgáz ára tartósan a kőolaj árszínvonalát követve magas marad. Nagy különbség mutatkozik viszont a fajlagos beruházási költségekben. Különösen fontos a létesítési költségek csökkentése a villamosenergia-ellátás jelenleg világszerte zajló liberalizációjának időszakában, amikor az erőmű-beruházásokban domináns szerephez jut a gyors megtérülést és a fajlagosan olcsó létesítményeket preferáló magántőke.

A konstruktőrök nagy erőfeszítéseket tesznek a létesítési költség jelentős csökkentésére, amire számos lehetőség kínálkozik. Első helyen említhető a tipizálás, ami olcsóbbá teszi a gyártást és szerelést, növeli a gyárakban történő előgyártás arányát, lerövidíti az engedélyezési és létesítési időt, ami a kamatterhek is mérsékli. Csökkenti a költségeket a blokkok sorozatos létesítése, és bizonyos értékig a blokkok nagyságától függő mérethatás is. Sokat lehet remélni a számítástechnikai lehetőségek szélesebb körű, a tervezéstől kezdve az üzemvitelig történő alkalmazásától. Ennek révén a bonyolult rendszer áttekinthetése, a folyamatok optimalizálása, az emberi hibák lehetőségének a kiküszöbölése jelentős megtakarítást tehet lehetővé. A védelmek és irányítástechnikai rendszerek digitalizálásával nagyszámú analóg eszköz válik feleslegessé, miközben nagymértékben nő a működés megbízhatósága. Jelentős költségcsökkenést ígér az önellenőrző, intelligens berendezések alkalmazása, amelyek a biztonság

csökkentése nélkül egyszerűsíthetik a bonyolult vezérlési és védelmi rendszereket. Az egyszerűbb felépítésű, kompaktabb konstrukciók hely- és térfogatszükséglete is kisebb. Nagy megtakarítás várható a passzív rendszerek alkalmazásától, amelyeknél a beavatkozásokat természeti erők (gravitáció, felhajtóerő, termoszifon hatás, tárolt hő, természetes cirkuláció stb.) vezérlik, motorok, szivattyúk és hasonló működtető berendezések helyett. Nemcsak e berendezések elmaradása következtében olcsóbb a létesítés, hanem lényegesen kevesebb villamos- és csővezetékre, valamint automatikára van szükség, a méretek is csökkennek, s mindezek 30%-os megtakarítást is eredményezhetnek az előző generációs erőművekhez képest. Az építkezésnél a nyitott tetős építési mód biztosít költségcsökkentést, aminél a berendezéseket és szerkezeteket felülről emelik be a végleges helyükre, a hosszadalmas vízszintes anyagmozgatás helyett. Az említett példák távolról sem merítik ki a költségcsökkentés gazdag lehetőségeit.

Különleges helyzet alakult ki az eredetileg tervezett élettidejüket betöltő atomerőműveknél. A tapasztalatok szerint a főberendezések sokkal lassabban öregednek a korábban feltételezettnél, ezért ezek további üzeme a biztonság sérelme nélkül az esetek többségében viszonylag kis ráfordítással (100-300 kUSD/MW) további évtizedekre meghosszabbítható. Az eredeti beruházás terheit a tervezett élettidő során már leírták, így a járulékos élettartam időszakában az önköltség közel fele az eredetinek. Ilyen olcsón egyetlen más típusú erőmű sem tud villamos energiát szolgáltatni. Néhány országban már éltek ezzel a lehetőséggel, különös figyelmet érdemel az Egyesült Államokban megindult folyamat. Az USA-ban 103 atomerőművi blokk működik, ezek élettartama közeledik a tervezett 40 év végéhez, így élettartamuk kiterjesztése napirendre került. Az első tizenhat blokk már megkapta a nukleáris biztonsági hatóság (NRC, Nuclear Regulatory Commission) engedélyét, a 40 év lejártával további 20 évig még üzemben tarthatók. Mintegy 20 további blokknál folyamatban van az engedélyezési eljárás, és az erőművek nagy többsége jelezte, hogy hasonló útra kíván lépni. A várható jelentős nyereség reményében megindult az öreg atomerőművek felvásárlása, az erőművek harmada már gazdát cserélt, a kezdeti alacsony árakat a kereslet már felnyomta az új létesítmények költségének mintegy negyedére. A becslések szerint az amerikai atomerőművek néhány éven belül 5-6 tőkeerős, szakmailag felkészült vállalat tulajdonában koncentrálnak, amelyek új atomerőművek létesítésére is készek a meglévő telephelyeken. A törekvést az amerikai kormányzat és a közvélemény is támogatja. A lakosság álláspontját erősen befolyásolja, hogy a nem elég előrelátó liberalizáció következtében 2000-ben és 2001-ben kapacitáshiány miatt a kaliforniai villamosenergia-ellátás sorozatosan összeomlott.

Nem kizárt, hogy az amerikai fejlemények az atomenergetika reneszánszát indítják el a világ más részein is. Vizsgálják az élettartam 10-20 éves meghosszabbításának lehetőségét és feltételeit a paksi atomerőműben is, ami az előzetes becslések szerint 100-150 Mrd Ft-ba kerülne, szemben egy új erőmű

13. táblázat

Könnyűvízes fűtőelemek költségei

Fázis	Ár
érc	20-25 USD/kg U_3O_8
konverzió	8 USD/kg
dúsítás	100 USD/kg SWU
UOX fűtőelem-gyártás	275 USD/kg
MOX fűtőelem-gyártás	1500 USD/kg
UOX újrafeldolgozás	1000 USD/kg
MOX újrafeldolgozás	1000 USD/kg
kiegített fűtőelem kezelése, tárolása	400 USD/kg
nagy aktivitású hulladék tárolása	300 USD/kg

nagyságrenddel nagyobb költségével. Az élettartam hosszabbítása nagymértékben erősítené villamosenergia-rendszerünk ellátásbiztonságát, és alacsony önköltségével hozzájárulna a villamos energia árszínvonalának leszorításához. Remélhető, hogy a 2003-as üzemzavar hatása nem lehetetleníti el az ehhez szükséges társadalmi és politikai háttér kialakítását.

A nukleáris beruházásokat jelentős kockázat is terheli. Egyrészt a fokozatosan szigorodó hatósági előírásokat nemritkán visszamenőleg is érvényesítik, ami pótlólagos ráfordításokat követelhet meg, ezzel rontva az eredeti beruházás megtérülését. Másrészt az atomenergiával kapcsolatos közhangulat változékony, s nem lehetetlen, hogy politikai döntés korlátozza az atomerőmű működését, sőt ilyen okból még idő előtti bezárásra is van példa. E beruházási hajlandóságot korlátozó kockázatot csak atombarát energiapolitikát garantáló állami magatartás tudja ellensúlyozni.

Az atomerőművek önköltségében az üzemanyag ára 15-25%-ot képvisel, a könnyűvízes reaktoroknál kereken 20%-ot. A fűtőelemek árának mintegy negyede a koncentrárum ára, a költségek nagyobb részét a gyártási fázisok (kémiai átalakítások, izotópdúsítás, oxidkeramikus eljárások, összeszerelés stb.) jelentik (13. táblázat). Ezek szerint az atomerőművek önköltségében csupán ~5%-ot képvisel az uránár, e kis hányad következtében annak változása viszonylag kicsit befolyásolja a termelt villamos energia önköltségét. Ezért az atomerőművek kevésbé kiszolgáltatottak a piac konjunkturális hatásainak. Jelenleg a sárga pogácsa tőzsdei ára 20-25 USD/kg, a különbség a szerződéses árak és a tőzsdei árak között megszűnt. Az atomerőmű-építés visszaesése következtében az urán jelenlegi nyomott piaci helyzete egy évtizeden belül aligha változik.

Az üzemanyagok területén a piaci viszonyok csak korlátozottan érvényesülnek, egyrészt a fűtőelemciklus üzemeinek kis száma, másrészt az állami tulajdon jelentős aránya miatt. Az üzemanyaggyártás ára jelenleg stagnál vagy

enyhén csökken, egyrészt jelentősek a kihasználatlan kapacitások, másrészt a műszaki fejlesztések is a költségcsökkentést szolgálják. A jelentős katonai készletek megjelenése is növeli a kapacitásfelesleget, helyettesítik a fűtőanyag-ciklus egyes fázisait (bányászat, konverzió, izotópdúsítás).

A természetes uránból készült fűtőelemek jóval olcsóbbak, mivel nem igényelnek dúsítást, ezeknél a sárga pogácsa kereken a költségek felét teszi ki. A MOX fűtőelemek előállítása az UOX (urán-oxid) fűtőelemek készítésének többszörösébe kerül (1000-1500 USD/kg MOX), ezért alkalmazásukat nem annyira a gazdaságosság indokolja, hanem a plutónium eliminálása. A reprocessálás (1000 USD/kg HM (Heavy Metal, nehéz fém) sem olcsó művelet.

Az üzemanyagköltség viszonylag kis súlyát a nagy energiakonzentráció magyarázza. Egységnyi hasadóanyag-tömeg energiaértéke hat nagyságrenddel haladja meg az azonos tömegű tüzelőanyag hőértékét. Ha a valóságos hasznosítás mértékét is figyelembe vesszük, még mindig négy nagyságrendes különbség érvényesül. Ezek az arányok befolyásolják a fűtőanyagciklus különféle műveleteinek fajlagos munka- és energiaigényét a bányászattól a fűtőelem gyártásig, a szállítási munkát, a hulladékmennyiséget stb., ami természetesen a költségekben is megmutatkozik.

Az üzemvitel és karbantartás költsége az üzemanyagköltséghez hasonló arányt képvisel. E más erőművekhez viszonyított magas mértéket egyrészt a biztonság érdekében végzett rendszeres és megelőző jellegű karbantartás indokolja. Másrészt az atomerőművek önköltsége tartalmazza a külső költségeket is (biztonságnövelés, környezet-ellenőrzés, egészségvédelem, hulladékelhelyezés, leszerelés, kárfelelősség, biztosítás, tájékoztatás stb.) szemben az energiaellátás más megoldásaival, amelyeknél csak egy részüket építik be az árba (díjak, adók, bírságok formájában) a jogszabályok nyomására. Az Európai Unió kiterjedt programot (ExternE) indított a külső költségek meghatározására a villamosenergia-ellátás különféle válfajai esetében, ennek eredményeit mutatja be a 14. táblázat. E szerint a nukleáris változat is a kis külső költségűek közé tartozik.

A külső költségek körébe tartozik az erőmű kárfelelősségét fedező biztosítás is. Nemzetközi konvenció szabályozza, hogy az atomerőmű vagy a nukleáris anyagok szállítási balesetéből származó károkért az erőmű 150 millió SDR (Special Drawing Right, az IMF elszámolási pénzegysége) erejéig felelős, függetlenül a vétkességtől vagy vétlenségtől. Az államnak további 150 millió SDR mértékéig kell felelősséget vállalnia, és ezen felül az atomerőműveket üzemeltető országok szükség esetén közös alapot hoznak létre az okozott károk ellentételezésére, kárhatár nélkül. Biztosítói intézetek nemzetközi konzorciuma vállalja a kártérítés fedezetét, ennek költsége az erőmű önköltségének néhány százaléka.

Ugyancsak külső költségnek tekinthető a hulladékok végleges elhelyezésének és az erőmű lebontásának költsége, amit egy erre a célra létrehozott alapról

**A villamosenergia-ellátás
külső költségei**

Energiabázis	Külső költség, EUR cent/kWh
szén, lignit	1,8–15
olaj	2,6–10,9
földgáz	0,5–3,5
víz	0,04–0,7
napelem	0,1–0,3
biomassza	0,1–5,2
szél	0,05–0,25
atom	0,3–0,7

finanszíroznak. Az erőmű évenkénti befizetéseiből (provízió) feltöltött alap szükséges mértékét a várható költségek és az erőmű élettartamának figyelembevételével határozzák meg. Az alap kezelésének gyakorlata országonként eltérő, önálló állami vállalat vagyona, elkülönített bankszámla, önálló állami alap fordul elő. Magyarországon az önálló állami alap (Nukleáris Pénzügyi Alap) az OAH kezelésében működik, az éves befizetések mértékét a diszkontálás figyelembevételével az Országgyűlés határozza meg. Mivel az alap legnagyobb részének felhasználására nagyon hosszú idő múlva kerül sor, a diszkontált jelen idejű részlet kicsi, az alapba történt befizetések a fejlesztett villamos energia árában néhány százalékot meg nem haladó hányadot tesznek ki.

A befizetések évenkénti meghatározását az indokolja, hogy kevés tényleges adat támasztja alá a végleges hulladékelhelyezés és az erőmű lebontásának költségét. Többnyire csak becslésekre lehet támaszkodni, ami az időközben szerzett ismeretek alapján állandó finomításra szorul. A figyelembe vett fajlagos költségek a kis-közepes radioaktivitású hulladékok temetésénél, a megoldás jellegétől függően 1000–8000 USD/m³. A fajlagos költségek nagy aktivitású UOX fűtőelemek átmeneti tárolásánál ~100–300 USD/kg, és végleges geológiai tárolásuknál 300–600 USD/kg, a reprocesszált és üvegbe ágyazott HLW hulladék tárolása pedig 200–300 USD/kg. A gyorsreaktorok hulladékának (MOX, tenyészköpeny stb.) elhelyezése drágább, 1000–2000 USD/kg. Az erőmű leszerelésének költségét blokkonként 300–500 MUSD-re teszik, mértéke függ a munkálatokat megelőző pihentetési időszak hosszától.

Az izotópdúsítás energiaigényességéből következtetve az antinukleáris mozgalmak időnként azt is állítják, hogy az atomerőművek teljes energiamérlege negatív. A 15. táblázatból kitűnik az ilyen állítások képtelensége.

Erőműtípusok energiafelhasználása a fejlesztett energia százalékában

Erőműtípus	Energiafelhasználás, %	
	üzembe helyezésig	összesen, 30 éves üzemidővel
nyomottvizes	3,0	5,5
forralóvizes	3,1	5,0
magas hőmérsékletű	4,3	6,3
nehézvizes	5,3	8,4
gyorsszaporító	4,8	6,0
olaj	1,4–2,8	5,0–9,5
szén	2,5–3,0	5,5
víz	2,3	2,3
nap	9,4	9,4

Az atomenergia kilátásai

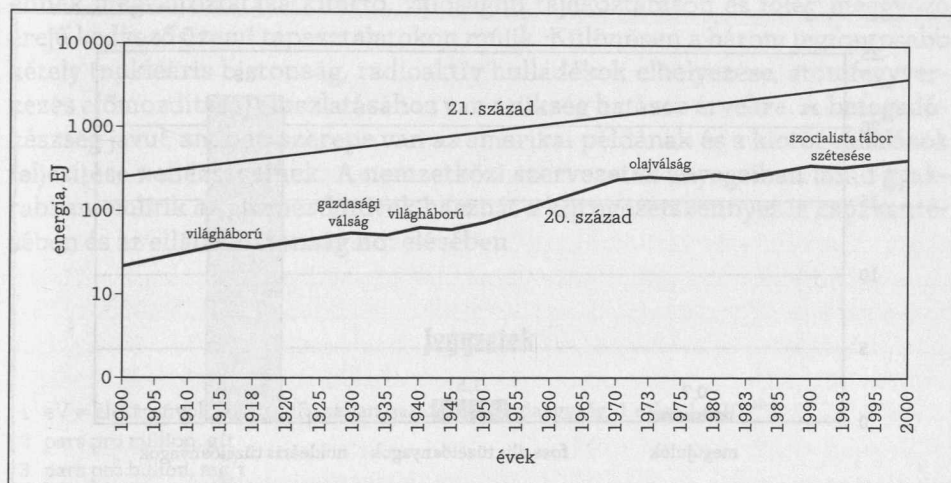
A világ összesített energiaszükségletének alakulását a 20. században a 11. ábra mutatja. A majdnem folyamatos növekedésben csak nagy kataklizmák okoztak átmeneti stagnálást vagy visszaesést, a 100 év alatt az energiafelhasználás hússzorosára nőtt. Az ábrán egy becslés is szerepel a 21. században várható szükségletre, de az energiatudatos szemlélet, és az energiatakarékosságra irányuló törekvés hatására fele akkora növekedési ütemmel. Ezért a következő 100 év során legfeljebb 3-5-szörösére emelkedik az energiafelhasználás, de az évszázad alatt kumulált energiaigény így is horribilis mennyiség, mértéke 100 ZJ nagyságrendű (néhány billió tonna olajegyenérték). Ennek biztosítása az emberiség nagy dilemmája.

A tüzelőanyagokkal foglalkozó fejezet 21. ábrája szerint az ásványi tüzelőanyagok – nagy erőfeszítések árán – fedezni tudnák a szükségletet. A teljes szükséglet fedezése azonban csupán elméleti lehetőség, az ásványi tüzelőanyag-vagyon nagy részét politikai, földtani, műszaki, gazdasági, szállítási és környezetvédelmi okokból nem fogják kiaknázni. A megújuló energiaforrások is csupán a szükségletek egy részének fedezésére elegendőek (lásd a *Megújuló energiaforrások* c. fejezet 23. ábráját a 235. oldalon). Mindez arra utal, hogy az atomenergia hasznosítását nem lehet elkerülni.

A jelenleg művealónak tekintett uránvagyon hasznosítása a jelenlegi technikával – ami alapvetően termikus reaktorokban a ^{235}U -ra alapul – nem vezet messze (12. ábra). Ezen a helyzeten még a sokkal drágább uránérczek figyelembevétele sem sokat változtat. Minőségi változást tesz viszont lehetővé a tenyésztés, ami módot ad az uránvagyon teljes kiaknázására, valamint a törímercek felhasználására is.

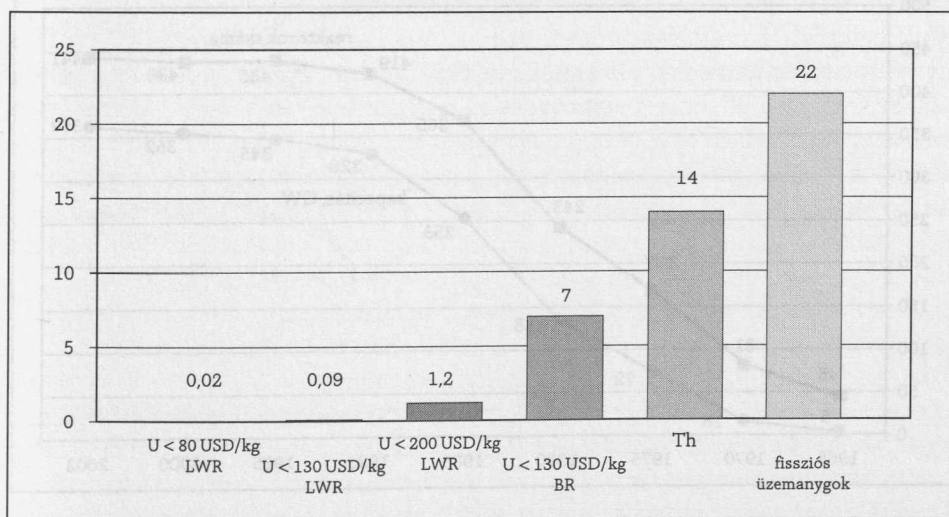
11. ábra

A világ primer energiafelhasználása



12. ábra

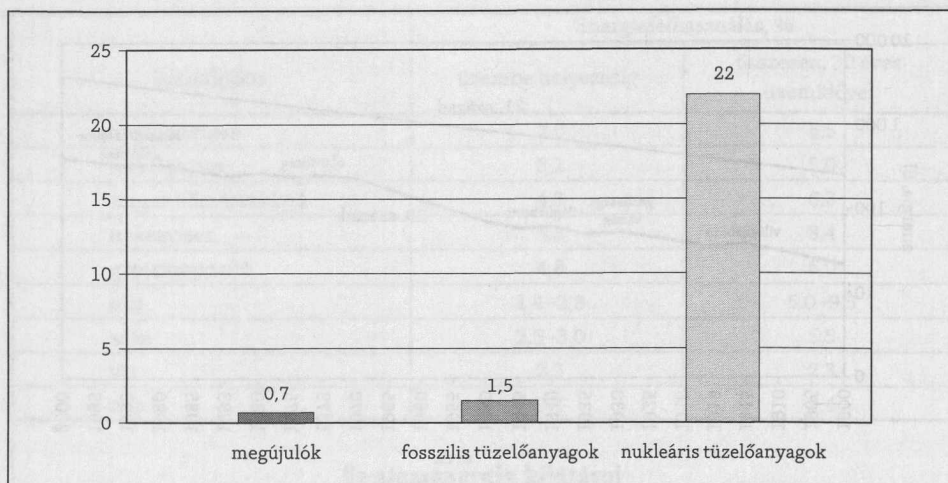
A világ hasadóanyag-vagyonának és a 21. század szükségleteinek aránya



A 21. század energiaszükségletének kielégítésére számításba vehető három irányt hasonlítja össze a 13. ábra, bemutatva a reális lehetőségek és a század kumulált szükségletének az arányait. Ez az összehasonlítás azt sugallja, hogy minél távolabbra tekintünk az időben, annál valószínűbb, hogy a világ

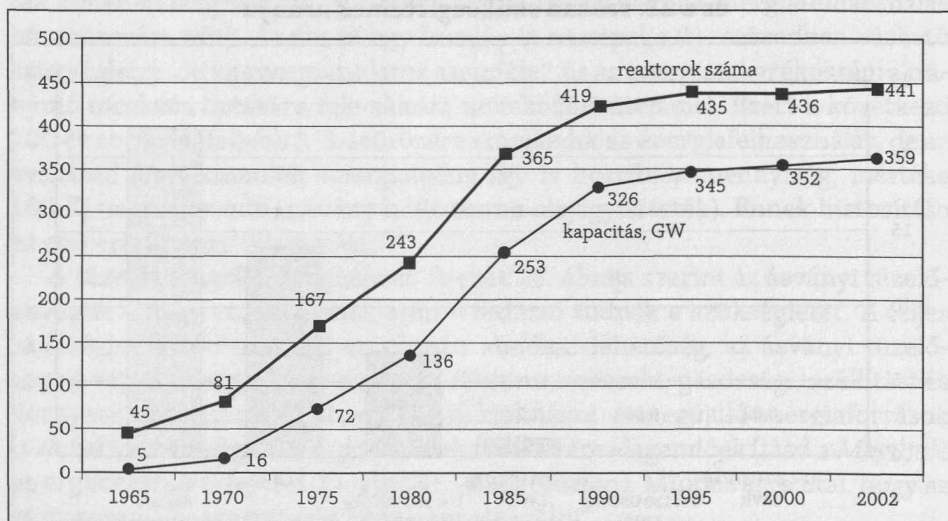
13. ábra

A világ lehetőségeinek és a 21. század szükségletének arányai



14. ábra

Az atomenergetika alakulása



energiaellátását nem lehet megoldani a hatalmas nukleáris lehetőségek kihasználása nélkül.

Annak, hogy az atomenergia valóban be tudja tölteni jövőbeli szerepét, két lényeges előfeltétele van. Az egyik a gazdasági versenyképesség, amiben a legfontosabb tényező a fajlagos beruházási költségek radikális csökkentése.

A másik a társadalmi elfogadtatás, ami jelenleg különösen Európában nem kedvező. Egyelőre stagnálás jellemzi az atomenergetika helyzetét (14. ábra), ennek megváltoztatása kitartó, valóságghű tájékoztatáson és főleg meggyőző erejű kedvező üzemi tapasztalatokon múlik. Különösen a három legfontosabb kétely (nukleáris biztonság, radioaktív hulladékok elhelyezése, atomfegyverkezés előmozdítása) elosztatásához van szükség hatásos érvekre. A befogadókészség javul, amiben szerepe van az amerikai példának és a kiotói vállalások teljesítése nehézségeinek. A nemzetközi szervezetek anyagaiban mind gyakrabban említik az atomerőművek hasznát a környezetszennyezés csökkentésében és az ellátásbiztonság növelésében.

Jegyzetek

- 1 eV = elektronvolt, az atomfizikában használt energiaegység, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- 2 pars pro million, g/t
- 3 pars pro billion, mg/t
- 4 1 lb = 0,4536 kg

Hőhordozók

Minden anyagi rendszer a belső energiájának megfelelő mennyiségű hőt tartalmaz, eszerint minden test, szerkezet, közeg tulajdonképpen hőhordozó. A geotermikus energiahasznosítás a földkéreg hőtartalmát aknázza ki. A hőszivattyúk a környezetükből (levegő, talaj, vizek), vagy technológiai folyamatok hulladékaiból kivont hővel csökkentik a szükséges energiát. A technológiai folyamatoknál is gyakran széleskörűen kell megvonni a vizsgálat határait, egy tüzelőberendezés energiamérlegében jelentős szerepe van a szerkezetekben és az égéstermékekben (füstgáz, salak, pernye) tárolt hőnek, a termikus gyártási folyamatoknál a termékek és a hulladékok hőtartalmát is figyelembe kell venni. A tárgyalás egyszerűsítésére azonban a továbbiakban csak az energia továbbításában és átszármaztatásában szerepet játszó hőhordozókra szűkítjük a figyelmet.

Hőhordozók tulajdonságai

A hőhordozók termikus viselkedését elsődlegesen hőtároló képességük – a hőkapacitás – és hőátszármaztatási tulajdonságaik szabják meg. A hőkapacitás az anyagi összetételtől és az állapotjellemzőktől (hőmérséklet, nyomás) függ. Egy m tömegű, c fajhőjű közeg q hőtartalmának Δq változása (hőközlés vagy hőelvonás) a hőmérsékletet T_1 -ről T_2 -re módosítja az alábbi összefüggés szerint

$$\Delta q = m \int_{T_1}^{T_2} c dT = m\bar{c}(T_2 - T_1) \quad (1)$$

A c fajhő hőfokfüggő, $\bar{c}$ az adott hőmérséklet-intervallumra vonatkozó átlagértéke, az $m\bar{c}$ szorzat a hőkapacitás. Gázoknál a fajhő értéke attól is függ, hogy a folyamat állandó nyomáson vagy állandó térfogaton zajlik-e, ennek megfelelően értéke c_p illetve c_v . A fajhő tipikus értékei az 1. táblázatban látható határok között mozognak.

A hőmérséklet-változás a közeg u belső energiájának a változásával arányos, de mivel a halmazállapot-változások állandó hőmérsékleten zajlanak, az 1. függvénynek ott szakadása van. Ilyenkor a belső energia ugrásszerűen változik a rejtett (latens) hővel. A halmazállapot-változás jelentős hőmennyiség

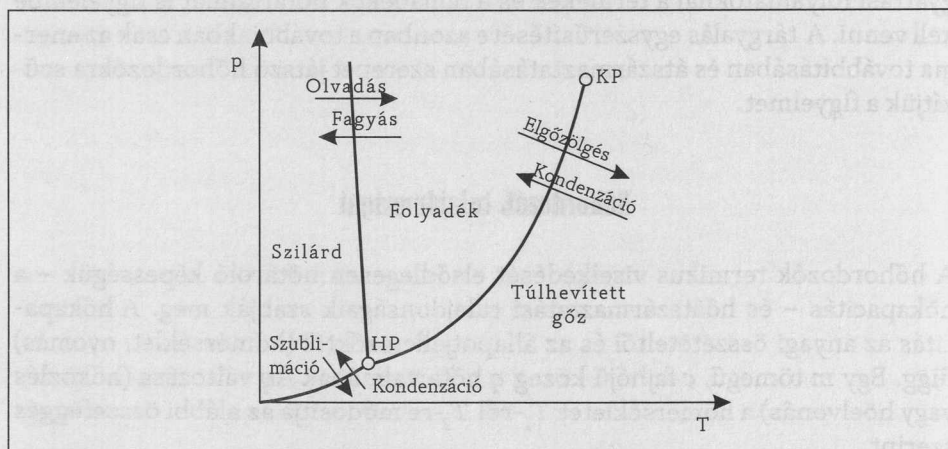
1. táblázat

Anyagok hőtechnikai jellemzői

Anyag	Fajhő, kJ/(K·kg)	Hőátadási tényező, W/(m ² ·K)
fémek	0,1–0,8	3–20
szilárd hőszigetelők	0,4–1,5	1–20
folyadékok	0,8–5,0	áramlásnál 200–10 000 forrásnál 6000–60 000
gázok, gőzök	0,8–13,0	lassú áramlásnál 3–20 gyors áramlásnál 10–100 forrásnál 6000–60 000

1. ábra

A víz fázisdiagramja



tárolására ad módot az energiahordozókban, például légköri nyomáson a víz elgőzöltetéséhez 2,26 MJ/kg, a jég megolvasztásához 335 J/kg szükséges. Ennek gyakorlati jelentősége van az energiatárolásnál, a távolsági hőszállításnál, valamint az energiaátalakításoknál.

Az állapotváltozások hőmérséklete nyomásfüggő, amit vízre az 1. ábrán bemutatott fázisdiagram példáz. A HP-vel jelzett hármasponton (+0,01 °C, 0,00612 bar) mindhárom halmazállapot lehetséges, a kritikus ponton (374,2 °C, 225,5 bar) felül csak gőzfázis létezik.

A belső energiát az anyagokat alkotó elemi részecskék hőmozgása testesíti meg. Ennek legnagyobb részét szilárd kristályokban a rácspontokban elhelyezkedő részecskék rezgése képviseli. Az olvadáshoz annyira kell növelni a részecskék mozgási energiáját, hogy az meghaladja a rácspontokat összetartó

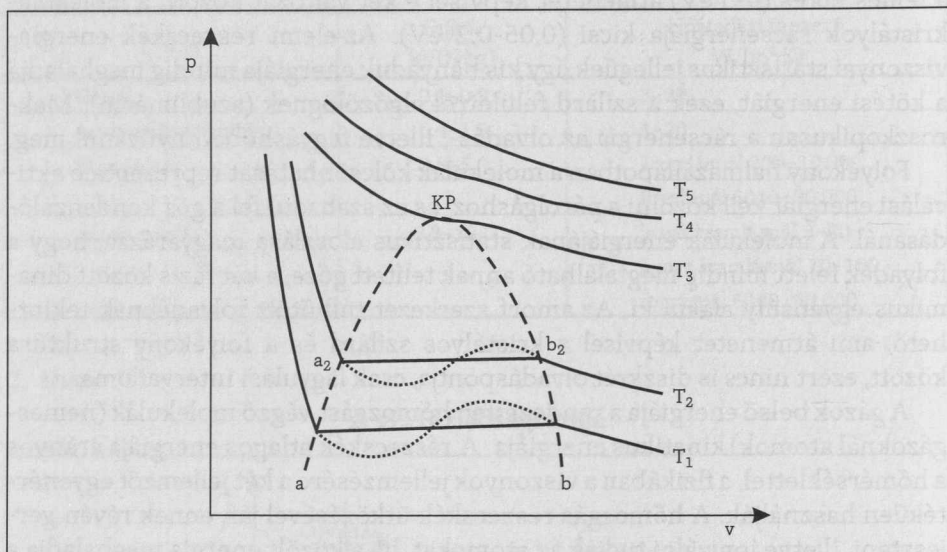
kötési, azaz a rácsenergiát. A rácsenergia ionos (heteropoláros) kötésű kristályoknál a legnagyobb (6-40 eV), atomos (kovalens) kötésnél jóval kisebb, a fémes kötés (4-5 eV) átmenetet képvisel e két változat között, a molekula-kristályok rácsenergiája kicsi (0,05-0,2 eV). Az elemi részecskék energia-viszonyai statisztikus jellegűek, így kis hányaduk energiája mindig meghaladja a kötési energiát, ezek a szilárd felületről elgőzölögnek (szublimáció). Makroszkopikusan a rácsenergia az olvadás-, illetve fagyáshőben nyilvánul meg.

Folyékony halmazállapotban a molekulák kölcsönhatását reprezentáló aktíválási energiát kell közölni a párolgáshoz, és ez szabadul fel a gőz kondenzálódásánál. A molekulák energiájának statisztikus eloszlása magyarázza, hogy a folyadék felett mindig megtalálható annak telített gőze, a két fázis között dinamikus egyensúly alakul ki. Az amorf szerkezet túlűtött folyadéknak tekinthető, ami átmenetet képvisel a kristályos szilárd és a folyékony struktúra között, ezért nincs is diszkrét olvadáspontja, csak lágyulási intervalluma.

A gázok belső energiája a rendezetlen hőmozgást végző molekulák (nemesgázoknál atomok) kinetikus energiája. A részecskék átlagos energiája arányos a hőmérséklettel, a fizikában a viszonyok jellemzésére a két jellemzőt egyenértékűen használják. A hőmozgás részecskék ütközésével jár, ennek révén gerjeszteni, illetve ionizálni tudják az atomokat, ha a közölt energia meghaladja a gerjesztési, illetve ionizálási energiát. A további hőmérséklet-növelés a molekulák mind nagyobb hányadának disszociációját eredményezi atomokra vagy gyökökre, még magasabb hőmérsékleten az atomok ionokra és elektronokra esnek szét, s kialakul a külön halmazállapotnak tekintett plazmaállapot.

Energetikai szempontból különösen fontos a forrás folyamatának részletesebb ismerete, amibe az izotermáknak a térfogat-nyomás koordinátarendszerben bemutatott 2. állapotábrája nyújt betekintést. Ezen az a jelű alsó határgörbétől balra eső területen az anyag folyékony halmazállapotban, a b jelű felső határgörbétől jobbra gőzfázisban van, a KP pont feletti izotermák hőmérsékletén csak gázként viselkedő gőzfázis lehetséges, ez alatti hőmérsékleten az izotermák vízszintes szakasza írja le a folyadék forrását. Forrás közben a folyadék a hőbevezetés ütemének megfelelően fokozatosan párolog el. Állandó hőmérsékleten történő hőközlésnél – például a T_2 hőmérsékleten – a folyadék nyomása és térfogata kezdetben az izoterma szerint alakul, majd az a_2 pontban elkezdődik a forrás. Az ezt követő vízszintes szakaszon a nyomás állandó, a b_2 pont felé haladva a térfogat nő, ahogy a víz egyre nagyobb hányada gőzölög el, és a b_2 pontot elérve a folyadék teljes egészében gőzzé vált. A gőztartalmat a gőzfázis x aránya jellemzi (a_2 pontban 0, b_2 pontban 1), a gőz az a_2 - b_2 tartományban nedves telített, a b_2 pontban száraz telített. A további hőközlést ismét görbült izoterma írja le, ebben a tartományban a gőz túlhevített. A bevezetett hő arányos a vízszintes szakasz hosszával, így az ábra azt is tükrözi, hogy a rejtett hő annál kisebb, minél magasabb hőmérsékleten következik be a forrás és a kritikus hőmérséklet (KP) felett zérus.

Gőz állapotábrái



A hőközlés a belső energia növelésén kívül többnyire külső munkát is fedez, aminek legegyszerűbb formája a hőkiterjedés. Az anyagok térfogatának növekedése munkavégzést jelent. Kondenzált (szilárd és folyékony) halmazállapotban a kiterjedés – és ezzel a munka – kismértékű, gáznemű anyagoknál viszont a nyomás és/vagy a térfogat módosulása jelentős energiaváltozást okozhat. A hőközlés nemcsak mechanikai munkát eredményezhet, hanem a munkavégzés más formái is lehetségesek, például kémiai reakció, oldás, struktúraváltozás, sugárzás, villamos áram, disszociáció, ionizáció. E folyamatok néha reverzibilisek (így az egyes kémiai reakciók, néha a disszociáció is), ami hőátzármaztatásra is hasznosító.

Ha hőközlés közben munkavégzés is történik, az 1. képlet módosul, a bevezetett dq hő egyrészt a du belső energiát növeli, másrészt dw munkát végez,

$$dq = du + dv \quad (2)$$

A termodinamika törvényei szerint az anyagi rendszerek a hőmérséklet kiegyenlítődése felé tartanak, ennek megfelelően a környezeti hőmérsékletnél magasabb hőfokon tárolt hő egy része a környezetnek adódik át. A hőátzármaztatás az anyagi minőségen kívül függ a geometriai elrendezéstől és a környezet jellemzőitől is, a hőközlés hővezetés, konvekció és sugárzás útján történhet. A hőközlés meghatározására egyszerűbb elrendezéseknél számítási algoritmusok állnak rendelkezésre, bonyolultabb konfigurációknál modellezésre van szükség.

Például egy nagy kiterjedésű, d vastagságú sík lemez felületegységén $T_1 - T_2$ hőmérséklet-különbség hatására hővezetéssel

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2) \quad (3)$$

hőmennyiség halad át az időegység alatt. A hővezetés fémek esetében játszik jelentős szerepet, azok λ hővezetési együtthatója 40–4000 W/(m·K), a hőszigetelő anyagoké legalább egy nagyságrenddel kisebb.

A szilárd testek felületéről, valamint folyadékok szabad felszínéről a mellettük áramló fluidumok konvekció útján szállítanak el hőt, illetve ellentétes irányú hőfokgradiens esetén a fluidum ad át hőt a felületnek. Például a T_1 hőmérsékletű sík felületegységről az azzal párhuzamos, homogén lamináris áramlású T_2 átlag-hőmérsékletű fluidum

$$q = \alpha(T_1 - T_2) \quad (4)$$

hőt szállít el. A hőátzármaztatás függ az áramlás sebességétől és jellegétől, az α hőátadási tényező (1. táblázat) a rejtett hő következtében kiugróan nagy forrás és kondenzáció közben.

A sugárzás különösen magas hőmérsékletnél jelentős, a T_1 és T_2 hőmérsékletű párhuzamos felületek között a sugárzás útján átadott hő

$$q = c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

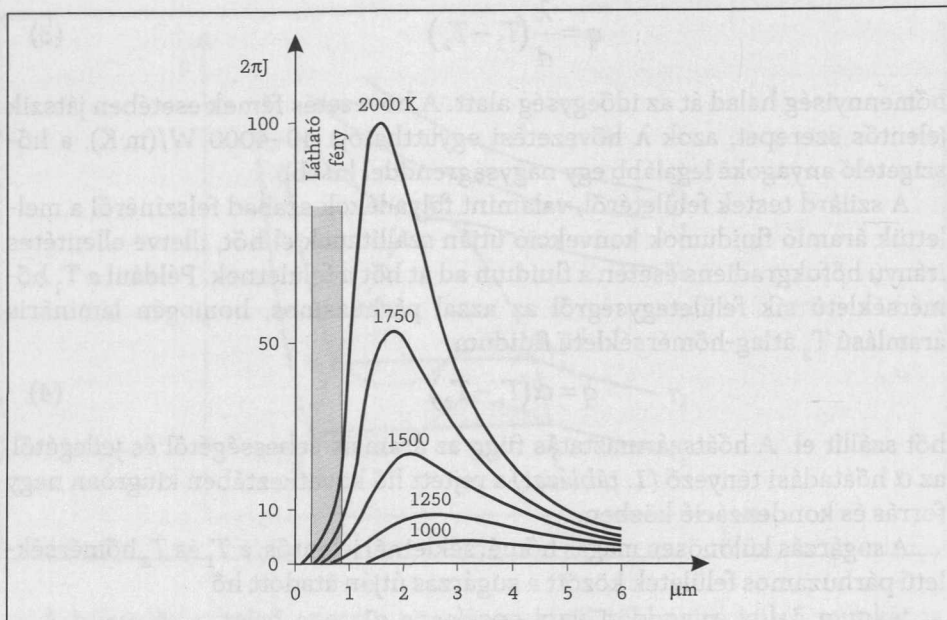
a c sugárzási együttható a felületek színétől és minőségétől függ, nagyságrendje 0,1–5 W/(m²·K). A sugárzás frekvenciaspektruma hőfokfüggő, az abszolút fekete test spektrumára ezt a 3. ábra szemlélteti, a hőmérséklet növekedése a színeképet a rövidebb hullámhosszak felé tolja el.

Hőtárolásra szilárd anyagok és folyadékok a legalkalmasabbak, a hő szállítására folyékony és gáznemű anyagokat használnak, hőerőgépek munkaközeg sokféle gáz és gőz lehet.

Szilárd hőhordozók

A berendezések szerkezeti elemeinek feladata nem korlátozódik erőik és mozgások átvitelére, hanem gyakran jelentős szerepük van a termikus folyamatokban is. A szilárd anyagok főleg mint hőszigetelők és hőtárolók játszanak szerepet, de időnként feladatuk van a hőátzármaztatásban is.

A veszteségek csökkentésében jelentős a hőszigetelő anyagok szerepe, azok köre szinte folyamatosan bővül. A hőt rosszul vezető anyagok a jó hőszigetelők, erre a célra magas hőmérsékleten többnyire keramikus anyagokat,

Abszolút fekete test sugárzási spektruma

vagy sok levegőt tartalmazó szervesen szálas, rostos (például üveg, bazalt és betiltásáig azbeszt) anyagokat alkalmaznak, alacsony hőmérsékleten pedig rendszerint műanyagokat használnak.

A hőtároló szilárd anyagok jelentős szerepet játszanak a felmelegedési és lehűlési időállandók kialakításában, például az épületelemek vagy a tüzelőberendezések és a kemencék hőálló bélései (samott, magnezit). Hőtárolásra kihasználható a nagy fajhő, valamint a nagy rejtett hő (halmazállapot-változások, reverzibilis kémiai reakciók, visszafordítható abszorpció). A legolcsóbb hőtároló anyagok nagy fajhőjű ásványi termékek, így kavics vagy agyag – hőkapacitásuk $0,6\text{--}1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Nagy hőkapacitása van néhány egyszerű szerkezeti anyagnak is, mint például a betonnak és az öntöttvasnak is. A fázisváltást használják ki a paraffingyantánál, aminek olvadás- (illetve dermedés-) pontja 38°C . A rejtett hőnek köszönhetően jelentős az olvasztott sók hőkapacitása (többnyire 250°C felett), különösen nagy az alkáli-fluoridoké és alkáliföldfém-fluoridoké, amelyek olvadáspontja 450 és 800°C közé esik. A sók azonban drágák, használatukat nehezíti korrozív hatásuk, és a magas hőmérséklet. Alacsonyabb hőmérséklet-tartományban ($0\text{--}150^\circ\text{C}$) számításba jöhetnek sóhidrátok is, valamint azok eutektikus keveréke, ezek melegítve elvesztik kristályvizüket, majd lehűtve újból megkötik azt, az így kiaknázható hőkapacitás $190\text{--}270 \text{ kJ/kg}$. A Glauber-só ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) elvesztett kris-

tályvizében részlegesen oldódik is (olvadáspontja 38 °C), de újrakristályosodása lassú. Reverzibilis kémiai folyamatok is számításba jöhetnek, például ólom-oxid redukciója és oxidációja, vagy hidrogén reverzibilis megkötése fémhidridekben, ami a reakcióhő elvonásával, illetve felszabadításával jár. Nedvszívó anyagokban, például szilikagélben is lehet hőt tárolni, amikor felmelegítve nedvességet adnak le, lekötve a párolgási hőt, lehűtésnél pedig e hő felszabadul, ahogy a nedvességet megkötik. Néhány hőtárolásra alkalmas anyag jellemzői a 2. táblázatban láthatók. Új hőtárolási lehetőségek keresésére ösztönöz a megújuló energiák hasznosítása, hogy át lehessen hidalni intermittens rendelkezésre állásukat.

A szilárd anyagok hőátzármaztatási szerepe gyakran a hőtároláshoz kapcsolódik. Példázzák ezt a regeneratív hőcserélők: hőálló belésüket füstgázzal felmelegítik, majd egy következő fázisban továbbadják a hőt a felmelegítendő levegőnek vagy más gáznak. Hasonló szerepe van a villamos tározós fűtőtestek 650 °C körüli hőmérsékletre felhevített magnezittöltésének. Néha hőszállítására is alkalmaznak szilárd anyagokat, például kerámia golyókat vagy agglomerált salakszemcséket egyes szénelgázosító eljárásoknál, olajpala feldolgozásnál. Részt vesz a hőszállításban minden olyan termék vagy egyéb

2. táblázat

Hőtároló anyagok

Anyag	Olvadáspont, °C	Sűrűség, kg/dm ³	Hőkapacitás	
			kJ/(K·kg)	MJ/(K·m ³)
víz		1	4,19	4,19
50% víz+50% etilén-glikol		1,05	3,47	3,64
beton		2,24	0,65	1,46
kavics		1,54	0,75	1,16
acél		7,9	0,5	3,9
bazalt		2,9	0,8	2,5
Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	65,6	1,43	190	272
NaOH·H ₂ O	64,4	1,68	272	454
NaC ₂ H ₃ O ₂ ·3H ₂ O	57,8	1,30	265	342
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48,3	1,65	209	346
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47,2	1,86	153	285
P ₁₁₆ paraffingyanta	46,7	0,78	209	163
FeCl ₃ ·6H ₂ O	36,1	1,62	223	361
Na ₂ CO ₃ ·12H ₂ O	36,1	1,52	265	402
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	33,9	1,44	251	363
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	31,7	1,46	251	367

anyag is, amely a környezettől eltérő hőmérsékleten távozik a technológiai folyamatból. Különösen nagy az elszállított hő, ha a technológiában halmaz-állapot-változás (olvadás, forrás) is történt.

Jó hővezetőképességet és magas hőátadási tényezőt kívánnak meg hőleadó fűtőtestekben és hűtőbordákban, hőcserélőkben, kazánok csőrendszereiben és hasonló szerkezetekben azoktól a fémektől, amelyeknek kifejezetten a hő átszármaztatása a feladata.

Folyékony hőhordozók

Folyadékokat leginkább hő tárolására és továbbítására használnak. A legjelentősebb és a legsokoldalúbban használt folyékony hőhordozó az olcsón és viszonylag bőségesen rendelkezésre álló víz. Fajhője kivételesen nagy [$4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], és hőátadási tényezője [$10^3\text{--}10^4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$] is magas. Kedvezőtlen, hogy légköri nyomáson viszonylag szűk hőmérséklet-tartományban van folyékony halmazállapotban. A folyadék állapotot 0°C alatt a nyomás csökkentésével, 100°C fölött pedig a nyomás növelésével lehet kiterjeszteni, a fagyáspont adalékkal is csökkenthető.

A természetben előforduló vízben mindig találhatók a műszaki alkalmazást zavaró oldott ásványi anyagok és szennyeződések. Ezért a víz többnyire tisztításra szorul, hogy csökkentsék a korrózió, a vízkőlerakódás és más nemkívánatos hatások veszélyét. A víztisztításra sokféle eljárás használatos az eltávolítandó anyag jellegétől és a tisztaság kívánt mértékétől függően (szűrés, üleptetés, derítés, lágyítás, vegyszeres kezelés, ioncserés tisztítás, ozmózis, mágneses kezelés, desztillálás). A víz állapotjellemzői és a vízben előforduló anyagok jellege befolyásolja a szerkezetek és edényzetek anyagának megválasztását, esetenként szükség lehet felületi védőbevonatokra, vagy rozsdálló fémek alkalmazására.

A vizet legnagyobb mennyiségben hűtésre használják, ez teszi ki az összes hazai ipari vízfelhasználás 80%-át. A legnagyobb hőmennyiséget a hőerőművek kondenzátoraiból kell elvonni, frissvíz-hűtésnél 1 GW kiadott teljesítményhez hagyományos hőerőműveknek $30\text{--}35 \text{ m}^3/\text{mp}$ hűtővízre van szükségük, atomerőműveknek $45\text{--}50 \text{ m}^3/\text{mp}$ -re. E nagy vízigény meghatározó szerepet játszik az erőművek telephelyének megválasztásában és technológiai rendszerének kialakításában. A több GW-os, nagy hőerőművek vízkivétele összemérhető a kisebb folyók vízhozamával. A visszavezetett felmelegedett hűtővíz megnöveli a befogadó víz hőmérsékletét. Az előírások egyrészt meg szabják az élővizekben megengedett legmagasabb hőmérsékletet, másrészt néhány $^\circ\text{C}$ -ra korlátozzák a hőmérséklet-növekedést, hogy ne romoljanak az élőlények életfeltételei. A bebocsátott melegvíz-csóva lassú elkeveredése miatt folyókban a visszahűlés hosszú szakaszon következik be, ami korlátozza

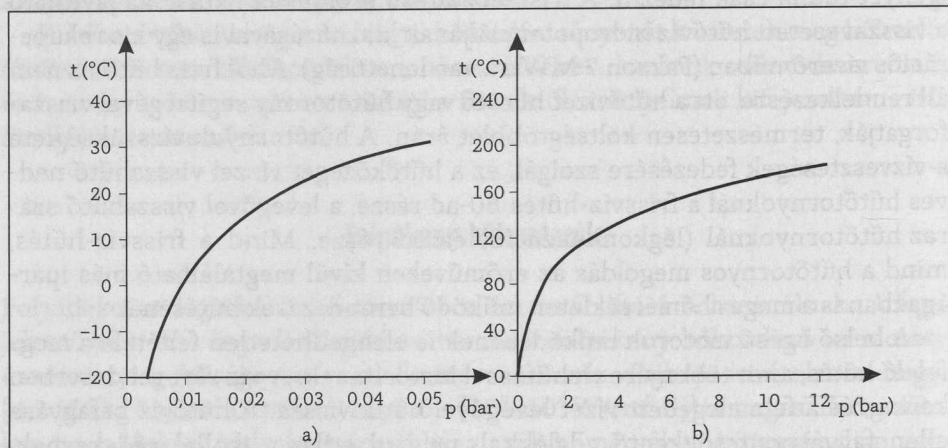
a vízkivétel lehetőségeit. Ezért nagy folyóink közül a Tisza körülbelül 1 GW, a Duna mintegy 5-7 GW további frissvíz-hűtésű hőerőművi kapacitás víz-igényét tudná csak fedezni. A friss-vízű hűtésű erőművek hatásfoka javítható a visszavezetett hűtővíz hidropotenciáljának kiaknázásával is egy kis rekupe-rációs vízerőműben (Pakson 7 MW-ra van lehetőség). Ahol friss hűtővíz nem áll rendelkezésre, ott a hűtővizet hűtőtó vagy hűtőtorny segítségével visszaforgatják, természetesen költségtöbblet árán. A hűtőtornyok vízszükséglete a vízvesztések fedezésére szolgál, ez a hűtőközeget vízzel visszahűtő száraz hűtőtornyoknál (légkondenzáció) ezred része. Mind a frissvíz-hűtés, mind a hűtőtornyos megoldás az erőműveken kívül megtalálható más iparágakban is a magas hőmérsékleten működő berendezések hűtésénél.

A belső égésű motorok működésének is elengedhetetlen feltétele a megfelelő hűtés, amit többnyire vízű hűtéssel biztosítanak. A víz zárt rendszerben kering, és a felmelegedett vizet levegővel hűtik vissza. A hűtővíz befagyása ellen fagyáspontcsökkentő adalékkal, például etilén-glikollal védekeznek. Kiterjedten használják a vizet magas hőmérsékleten működő technológiai reaktorok és munkagépek hűtésére. Gyakran a meleg termékeket is víz befecskendezéssel hűtik le (a metallurgiában, kősztyártásnál, egyes vegyipari termékeknél), a forráspont felett a hőelvonást a forrás rejtett hőjének megfelelően a gőzfejlődés fokozza. A hűtővízben jelentős hőmennyiség távozik, e hulladékhő hasznosításával növelhető az energetikai hatékonyság. A hasznosítás lehetőségét a távozó víz hőmérséklete szabja meg, a technológiában szerepet játszó közegek (tápvíz, égéslevegő, tüzelőanyag, reagensek stb.) felmelegítése, fűtés, használati melegvíz-készítés, esetleg mezőgazdasági hasznosítás (például talajfűtésre, üvegház fűtésére, haltenyésztéshez) is számításba jöhet.

A víznek jelentős szerepe van a hőellátásban is, erre fordítják a kivett nyers víz 7%-át. A vízben tárolt hő mennyisége arányos a hőmérséklettel, nagy hőteljesítmény szállításához a hőmérsékletet 100 °C fölé kell növelni. A forrás elkerülésére a vizet nyomás alá helyezik, mivel a nyomás növelésével a víz forráspontja emelkedik (4. ábra). Az 1. ábra szerint a víz hőmérsékletét folyékony halmazállapotban legfeljebb a kritikus pontig lehet növelni, de a gyakorlatban vizet folyékony halmazállapotban csak a 374 °C-nál jóval alacsonyabb hőmérsékleten alkalmaznak, hogy mérsékeljék a nagy nyomással járó technológiai követelményeket. A távfűtésben a kis túlnyomással jellemzett 115 °C-nál nem melegebb hőhordozót meleg víznek, a 115 °C-nál melegebb, 1,5–12 bar nyomáson továbbított forró víznek nevezik. Az atomtechnikában a nyomás alatt tartott folyékony halmazállapotú víz megnevezése nyomott víz.

A nagy nyomású forró víz a távfűtés preferált hőhordozójává vált, mert a vízben jelentős hőmennyiség tárolható, a hőmérséklet és a mennyiség szabályozása egyszerű, és jól szigetelt csövekben nagy távolságokat is gazdaságo-

A víz forrponjtjának nyomásfüggése



a) kis nyomáson, b) nagy nyomáson

san, kevés veszteséggel lehet áthidalni. A fűtő- vagy erőművekből elmenő víz felső hőfokhatára 170-180 °C, többnyire azonban az induló hőfok a külső hőmérséklettől függően csak 70-150 °C. A hőszolgáltatás rövid idejű zavarait a csőrendszer vizében tárolt nagy hőmennyiség segít áthidalni. A távfűtés hőhordozója az épületek hőközpontjaiban hőcserélőkön keresztül 40-70 °C-ra melegíti fel az épületek helyiségeinek fűtésére szolgáló vizet, illetve 45-50 °C-ra a használati meleg vizet. Ugyancsak víz a központi fűtések és az etázfűtések hőhordozója is.

A hőellátásban szerepet játszó víz szükséges paraméterei függenek a felhasználás jellegétől és az ellátás módjától. A fűtőtestekben keringő meleg víz hőmérsékletét a megérinthesége korlátozza, általában 70 °C alá. Az energiafelhasználás jelentős hányadát kitevő, tisztálkodásra, mosásra, konyhai célokra szolgáló használati meleg víznek (HMV) ki kell elégítenie az ivóvízzel szemben támasztott minőségi követelményeket. A központi- és távfűtésben szolgáltatott HMV hőmérséklete ritkán haladja meg az 50 °C-t (többnyire 45 °C a méretezés alapja). A főzéshez és mosáshoz szükséges magasabb hőmérsékletű meleg vizet egyedileg szokás előállítani.

A technológiai célokat szolgáló kazánok munkaközege rendszerint víz, de a legtöbbször gőzfejlesztés a cél. Anyagok melegítésére többnyire csak a 100 °C alatti tartományban használnak meleg vizet, néha 150-180 °C-t meg nem haladó hőmérsékletre forró vizet is. A ~180 °C feletti hőmérsékleteken a vízgőz lényegesen előnyösebb hőhordozó, mint a folyadék. A vízminőségi követelmények miatt többnyire zárt rendszerben keringtetik a vizet, így csupán a veszteségek pótlása jelent folyamatos vízfelhasználást.

A vízzel mint hőhordozóval szemben a legnagyobb követelményeket a vízhűtésű atomreaktorok támasztják. A könnyűvízes atomreaktorokban (LWR) a víz a fejlődő hő elszállításán kívül a neutronok lassítására szolgáló moderátoranyag szerepét is betölti. A nyomott vizes atomreaktorokban (PWR) a vízhőmérséklet 300 °C körül mozog 140-160 bar nyomással, a forralóvízes atomreaktorokban (BWR) kisebb a nyomás, mivel gőzképződést is megengednek, és magasabb a hőmérséklet. A BWR reaktorokban a felületi forrás következtében a hőátadás mintegy háromszorosára nő a PWR típusúak 40 kW/(m²K)-es értékéhez képest. Lokális forrás a PWR reaktorokban is kialakulhat termikus túligénybevétel vagy áramlási anomália következtében, a kétfázisú közeg az áramlási és hőátadási viszonyok megzavarásával üzemzavarokat okozhat. Az atomreaktorokban nagyon szigorúak a követelmények a víz kémiai és fizikai tisztaságával szemben, amit összetett vízkezelési eljárásokkal elégitenek ki. A szerkezetekről leváló korróziós és eróziós termékek, valamint a környezetből bekerült más szilárd és gáznemű anyagok is szennyezik a vizet, egyesek kémiai reakciókat is kiváltanak. Az erős neutronsugárzás a víz egy kis hányadát, valamint a vízbe került anyagok egy részét aktiválja. Egyes reaktortípusoknál (HWR) nehézvíz tölti be a moderátor szerepét, mivel a deutériumatomok kevésbé fogják be a neutronokat, mint a közönséges hidrogénatomok, így a láncreakcióhoz nem szükséges dúsítás.

A víz nagy hőtároló képességét nemcsak a fűtési rendszerekben aknázzák ki, hanem a villamosenergia-rendszer teljesítménygazdálkodásában is. Nagy vízterű termikus készülékek (bojlerek) fűtését hangfrekvenciás körvezérléssel lehet a csúcsidőszakban kiiktatni, illetve kis terhelésű időszakban visszakapcsolni. Technológiai létesítményekben, például kazánokhoz kapcsolva is használnak forró vizet hőtárolásra mind atmoszférikus nyomáson, mind nyomás alá helyezve. A víz hőtároló képessége adalékanyagokkal növelhető, de ez rendszerint növeli a viszkozitást, és rontja a hőátadást. Vízben oldott ammónia is számításba jöhet hőtárolásra, felmelegítés közben az ammónia elgőzölög, ami energiaelvonással jár, lehűlés során az ammónia elnyelődik, és felszabadul a gáz abszorpciós entalpiája.

A víztől eltérő folyékony hőhordozók használatát olyan szempontok indokolják, mint a korrózióveszély kiküszöbölése, más nemkívánatos kémiai reakciók elkerülése, egyes fizikai hatások (nedvesítés, oldás, hidratáció, disszociáció stb.) kivédése, vagy 100 °C felett a nagy nyomás elkerülése. A szerves folyadékok a hőhordozó szerep mellett gyakran más funkciókat is ellátnak, transzformátorokban a hűtőolaj villamosan szigetel is, a forgácsoláshoz az olaj-víz emulzió a hűtésen túl kenőanyag is. A kombinált funkciókra alkalmas hűtőfolyadékok köre állandóan bővül, főleg a petrokémia új anyagaival (például szilikonok). Néhány folyékony hőhordozó (illetve hőtároló) anyag alkalmazási tartományát a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat

**Folyékony hőhordozók alkalmazási
tartománya**

Hőhordozó	Tartomány, °C
víz	0–200
ásványolaj	–10–315
difenil, difenil-oxid	20–400
etilén-glikol	–40–100
benzol	–50–350
terfenil	200–400
olvadt sók	200–700
olvasztott fémek	200–700

Szerves vegyületeket elsősorban a vegyiparban (festék-, gyógyszer- és műszálgártás), de néhol a gépiparban is (olajhűtés, olajfürdő) használnak, a –45 és +400 °C közötti tartományban. Előnyük, hogy kémiaiilag semlegesek, fémekkel és vízzel nem lépnek reakcióba. Hátrányuk, hogy termikus stabilitásuk nem nagy, gyúlékonyak és egyesek robbanásveszélyesek, néhány vegyület mérgező is. Hőátadási tényezőjük és fajhőjük kisebb, mint a vízé, az olajoké 1,6–2,1 kJ/(kg·K). Alacsonyabb hőmérsékleten (250–300 °C-ig) a kőolajból nyert, viszonylag olcsóbb olajok a legelőnyösebbek. Használatukhoz nincs szükség nagy nyomásra, hidegen is szivattyúzhatóak, kicsi a sűrűlódásuk, kenőhatásúak, nem korrozívak, nincs fagyveszély, 300 °C alatt nem bomlanak. Magasabb hőmérsékleten is használatosak szerves folyadékok (naftalin, difenil, difenil-oxid, difenil-metán, etilén-glikol, glicerin, metil-naftalin és más aromások), egyes fenilszármazékokat atomreaktorok hűtésére is javasolták, mivel nem fogják be a neutronokat. A szerves vegyületek gőznyomása magas hőmérsékleten jóval kisebb, mint a vízé, például a difil (26,5% difenil és 73,5% difenil-oxid keveréke) gőznyomása 400 °C-on 10 bar. Magas hőmérsékletű technológiák hőálló és stabil ionos kötésű sóolvadékokat is használnak hűtésre, így kriolitot (Na_3AlF_6), vagy TiCl_4 -t, de ezek egyes anyagokkal szemben agresszívek.

Hő tárolására főleg olajat alkalmaznak (villanyfűtésű olajradiátorokban), de más folyadékok is számításba jöhetnek (így a reverzibilisen bomló ammónium-hidrogén-szulfát: 500 °C-on bomlik, s újraegyesülése jóval alacsonyabb hőmérsékleten következik be).

A hőhordozók külön csoportját képviselik a hűtőgépek és klímaberendezések hőkörfolyamataiban használt hűtőfolyadékok. Ezekkel szemben követelmény, hogy telítési hőmérsékletük 1 bar nyomáson a környezeti hőmérséklet alatt legyen, kritikus hőmérsékletük haladja meg a kondenzációs hőmérsékletet, dermedéspontjuk pedig legyen kisebb az elpárolgotatás hőmérsékleténél.

Az ésszerű méretek kialakításának feltétele, hogy a körfolyamatban a nyomás ne legyen se túl nagy, se túl kicsi. Nagy kompressziós hűtőberendezésekben többnyire ammóniát (NH_3) használnak, aminek olvadáspontja $-33\text{ }^\circ\text{C}$, párolgáshője $1,35\text{ MJ/kg}$, gőztenziója $0\text{ }^\circ\text{C}$ -on $4,4\text{ bar}$ és $20\text{ }^\circ\text{C}$ -on $8,7\text{ bar}$. Közepes és kis hűtőgépeknek hosszú ideig a különféle freonok voltak a kedvelt hűtőközegei. E klórozott fluorokarbonok, illetve hidro-fluorokarbonok alkalmazását és gyártását azonban nemzetközi egyezmény alapján beszüntették, mert fő okozói voltak a sztratoszférában az ózonlyuk kialakulásának. Helyettesítésükre nyomás alatt cseppfolyósított propán, bután, izobután, szén-dioxid és más folyadékok szolgálnak, $0\text{ }^\circ\text{C}$ feletti tartományban maga a víz is lehet hűtőközeg. Az abszorpciós gépeknél az oldószertől nemcsak jó abszorpcióképességet és kis oldáshőt kell elvárni, hanem a hűtőközegénél jóval magasabb forráspontot. Ammónia hűtőközeghez a legelterjedtebb oldószer a víz, víz hűtőközegnél lítium-bromid a célszerű oldószer, a különféle szerves anyagokat leginkább tetraetilén-glikol-dimetilén keverékben abszorbeáltatják. Hőszivattyúk munkaközegéül $\text{H}_2\text{O-KOH}$ elegyet is használnak.

A nukleáris technika vezetett a folyékony fémek használatára. Ezek előnye, hogy nagy hőigénybevételt bírnak el, magas hőmérsékleten is stabilak és hőállóak. Hőkapacitásuk és hőátadási tényezőjük nagy, a hőelvonást gyorsítja a fém jó hővezető képessége, ennek következtében a hőhordozóban egyenletes a hőmérséklet-eloszlás és a határfelületén kicsi a hőmérséklet-különbség. Gőznyomásuk kicsi, így nincs szükség nagy nyomásra a forrás elkerüléséhez, és kis nyomáson sem forrnak fel magas hőmérsékleten. Hőhordozóként az alacsony olvadáspontú fémek jöhetnek számításba, néhány ilyen fém jellemzői a 4. táblázatban láthatók.

Nátriummal a gyorsreaktorokban rendkívül intenzív hűtést sikerült biztosítani, a realizált hőátadási tényező néhányszor $10^5\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. A folyékony

4. táblázat

Hőhordozóként használható fémek

Fém	Olvadáspont, $^\circ\text{C}$	Forráspont, $^\circ\text{C}$	Sűrűség, kg/l	Fajhő, $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
Li	181	1370	0,534	0,34
Hg	-39	357	13,55	0,14
Bi	271	1477	9,9*	0,15*
Pb	327	1737	10,5*	0,15*
K	64	762	0,75*	0,77*
Na	98	877	0,85*	1,3*
22% K+78% Na	19	825	0,81*	1,1*
44% Na+56% Bi	125	1670	10,2*	0,15*

* $400\text{ }^\circ\text{C}$ -on

fémhűtés ára azonban meglehetősen bonyolult technológia a fémek kedvezőtlen tulajdonságainak ellensúlyozására.

A fémek agresszív anyagok, a környezetükkel kölcsönhatásba lépnek, és az emberi szervezetre károsak. Ezért a hőcserélőket, csővezetékeket és armatúrákat különleges, a kémiai hatásoknak ellenálló anyagokból készítik, és a tároló tartályokat inert gáznyomás alá helyezik. A rendszer külső fűtésével védekeznek a fém befagyása ellen, mivel dermedéspontja jóval magasabb a szobahőmérsékletnél. Fontos a tömítések hermetikussága, különösen a nátrium és kálium esetében, mivel vízzel érintkezve hevesen égnek. A nátriumos gyorsreaktorok vízgőzfejlesztő hőcserélőinek tömítési hibái súlyos tüzeseteket idéztek elő, ami hozzájárult a fejlesztés leállítását kikényszerítő közhangulathoz. Mindegyik fém hajlamos az oxidációra, egyesek (köztük a Na is) heves reakcióba lépnek a levegővel. A nátriumból oxigén jelenlétében dinátrium-oxid képződik, ami a fémeket korrodálja, és a hőátadást is rontja, mivel nem oldódik a folyékony nátriumban. Maga a nátrium is kölcsönhatásba lép a fémekkel, azokban migráció révén korrózióra hajlamos, vagy csökkent szilárdságú tartományokat alakíthat ki. Sugárzás hatására a nátrium aktíválódik, a ^{24}Na erős γ -sugárzó, kikerülésének megakadályozására szolgál az egymáshoz hőcserélőkön keresztül kapcsolódó három hűtőkörös rendszer. A legbelső hűtőkörben található aktíválódott Na-t a középsőben elhelyezkedő inaktív Na szigeteli el a külső körben keringő, forrásban levő víztől.

A kriotechnika térhódításához (LNG technika, folyékony H_2 alkalmazása, gáztisztítás, szupravezetés stb.) nagyon alacsony hőmérsékleten alkalmazha-

5. táblázat

Kriotechnikai hűtőgázok jellemzői

Jellemző	Hűtőgáz		
	He	H_2	N_2
forráspont 1 bar-nál, K	42	20,4	77,4
hármaspont hőfoka, K	–	14,0	63,2
sűrűség, kg/m^3			
folyadék a forráspontnál	125	71	804
gőz a forráspontnál	15,5	1,2	5,0
gáz, 0 °C-on, 1 bar mellett	0,18	0,09	1,25
párolgáshő, kJ/kg	21	458	197
entalpia a forráspont és 300 K között, kJ/kg	1560	3500	230
fajhő, 1 bar és 20 °C-on, kJ/kg	5,27	14,25	1,04
relatív előállítási költség	20	8	1

tó hűtőközegek szükségesek. Az erre a célra alkalmazható három legfontosabb cseppfolyós gáz jellemzői az 5. táblázatban láthatók.

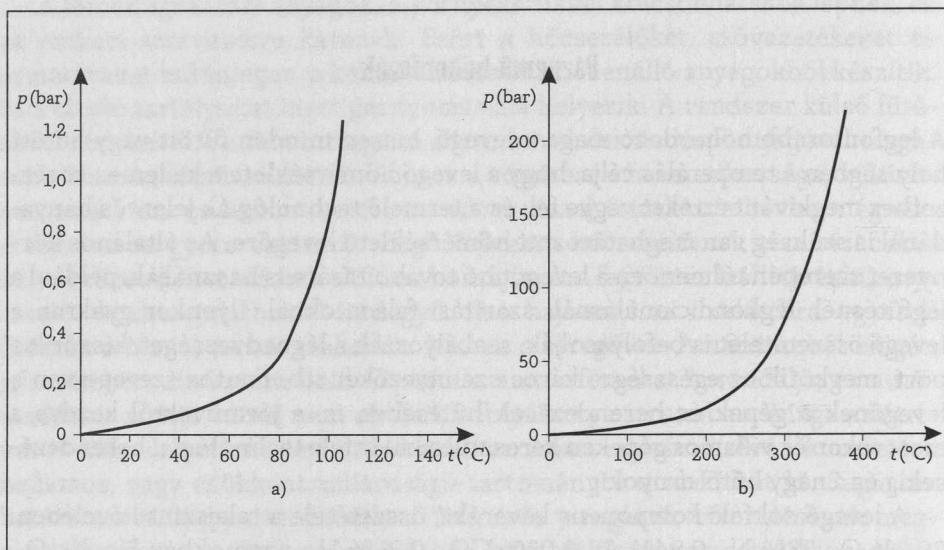
Gáznemű hőhordozók

A legfontosabb hőhordozó maga a levegő, hiszen minden fűtött vagy hűtött helyiségben a temperálás célja, hogy a levegő hőmérséklete a kellemes közérzethez megkívánt értéket vegye fel, és a termelő technológiák jelentős hányadánál is szükség van meghatározott hőmérsékletű levegőre. Az általános környezet szerepén túlmenően a levegőt hő továbbítására is használják, például a légfűtésnél, légkondicionálásnál, szárítási feladatoknál. Ilyenkor gyakran a levegő összetételét is befolyásolják, szabályozzák a légnedvességet, kiszűrik a port, megkötik az egészségre káros szennyezőket stb. Fontos szerepe van a levegőnek a gépek és berendezések hűtésében is, a járművektől kezdve a motorokon és villamos gépeken keresztül a különféle technológiai berendezésekig és a nagy hűtőtornyokig.

A levegő sokféle komponens keveréke, összetétele a talajszint közelében: 20,9% O_2 , 78% N_2 , 0,94% Ar, 0,03% CO_2 , 0,01% H_2 , nyomokban He, Kr, O_3 , Rn, ezenkívül a környezet jellegétől függően tartalmaz szerves és szervetlen port, szennyező gázokat (égéstermékeket), továbbá vizet gőz vagy cseppek formájában. A légnyomás a komponensek mennyiségével arányos parciális nyomások összege, ezek közül a legváltozékonyabb a nedvességé, aminek energetikai jelentősége is van. A vízgőz parciális nyomását szabad vízfelszín felett a hőmérséklet függvényében az 5. ábra mutatja, e szerint alakul a levegő nedvességtartalmának lehetséges maximális parciális nyomása. A görbe egyben azt is kijelöli, hogy a hőmérséklet függvényében mennyi lehet a maximális légnedvesség, amikor a levegő vízgőzzel telített. Szabad vízfelszíntől távol a levegő tényleges nedvességtartalma többnyire kisebb a telítési értéknél, és parciális nyomása is kisebb a lehetséges maximumnál. Adott hőmérsékleten a tényleges és a maximális parciális nyomások hányadosa a φ relatív légnedvesség, ha $\varphi = 1$, a levegő vízgőzzel telített, ha $\varphi < 1$, akkor telítetlen. A 6. ábra különféle légnedvességű görbék seregét mutatja, a φ_1 nedvességtartalmú és t_1 hőmérsékletű levegő állandó nyomáson lehűtve a t_h harmatponton telítetté válik, e hőmérséklet alatt a víz telítési érték feletti hányada kicsapódik, ami hő felszabadulásával jár. A telítetlen vízgőz $1 - \varphi$ aránynak megfelelő mennyiségű nedvességet képes még felvenni, ami a víz nagy párolgási hőjének megfelelően jelentős hőelvonással jár. Egyensúlyi állapotban egymással érintkező közegekben a relatív nedvességtartalom megegyezik, a szárítás levegővel az $1 - \varphi$ mértékű nedvesség felvevőképességen alapul. A szárítóberendezésekből kilépő nedves levegőből jelentős hőmennyiséget lehet kinyerni a nedvesség kicsapódásával. A légnedvességhez hasonlóan viselkednek más gőzök is a levegőben.

5. ábra

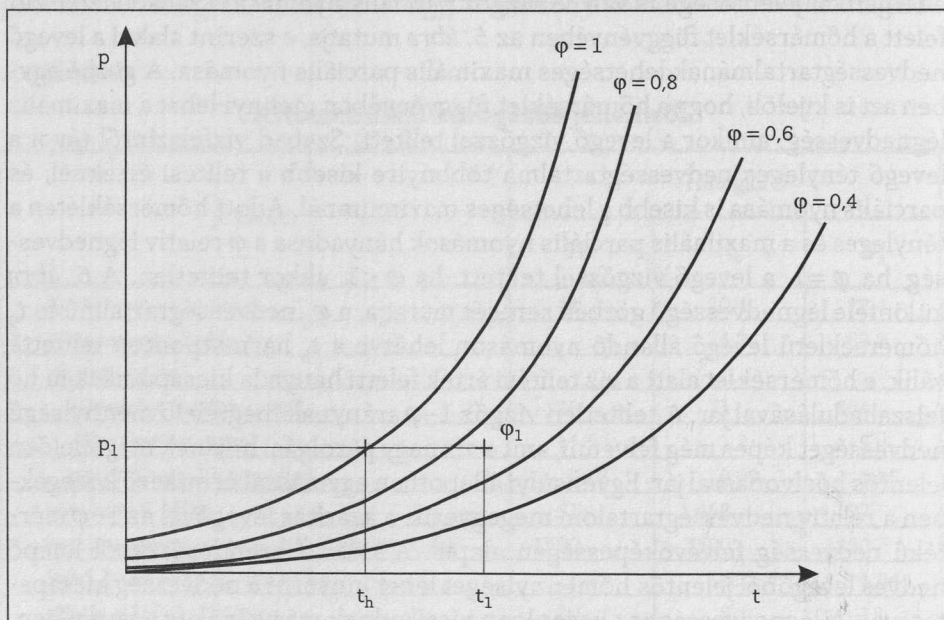
A víz gőznyomása



a) alacsony hőmérsékleten, b) magas hőmérsékleten

6. ábra

A relatív légnedvesség változása



A levegő hőtartalma sok termelési technológia hőmérsékletében jelentős szerepet játszik. A nagy kazánok tüzelési hatásfokát számottevően növeli az égéshez betáplált levegő előmelegítése 200–400 °C-ra a füstgázzal fűtött léghevítőkben. A különféle magas hőmérsékletű technológiai kemencéknél és reaktoroknál a hatásfoknövelés fontos eszköze a levegő előmelegítése hulladékhővel, például szénelgázosításnál, hidrogéngyártásnál, kohászati folyamatoknál stb. A nagyolvasztók égéslevegőjét (fűvőlevegő) léghevítőkkel 600–1200 °C-ra melegítik elő, ami nemcsak az energetikai hatásfokot növeli, hanem a minőséget is javítja. Gyakran meleg levegővel szárítják a nedves, higroszkópos anyagokat (mezőgazdasági termékek, élelmiszerek, szálas anyagok, nedves eljárással készült vegyipari termékek, szén).

A levegő legfőbb előnye korlátlan rendelkezésre állása. Azonban termikus és egyéb jellemzői nem a legkedvezőbbek, fajhője kicsi (1 kJ/kg), hőátadási tényezője sem nagy, amit például légfűtésnél vagy léghűtésnél nagy mennyiségek áramoltatásával kell ellensúlyozni. A termikus egyensúly azon múlik, hogyan alakul a hőcsere a levegő és a különféle hőleadó és hőfelvevő felületek között, amit a hőmérséklet-viszonyokon kívül a légmozgás jellege, a levegő anyagi összetétele (így a légnedvesség) és az állapotjellemzők (hőmérséklet, nyomás, térfogat) is befolyásolnak. A gyakorlati folyamatoknál a nyomás növekedését vagy a térfogat csökkenését hőmérséklet-emelkedés kíséri, ami visszahat a hőcserére a levegő és a környező testek között. A mesterséges légáramoknál e változásokat figyelembe kell venni, mert a cirkulációt előidéző berendezések (kompresszor, fűvő, ventilátor) szükségszerűen megváltoztatják az állapotjellemzőket. Hasonló változások természetes eredetű cirkulációnál is fellépnek, a külső eredetű nyomáskülönbségek kiegyenlítődése során, vagy a fajsúlykülönbségek miatt kialakuló gravitációs felhajtóerő hatására. Ez utóbbit az okozza, hogy a hőközlés hatására nemcsak a hőmérséklet nő, hanem a gáz ki is terjed, ami a sűrűség csökkenését eredményezi, a meleg levegő felemelkedik, és hőmérséklet szerinti rétegződés alakul ki. Ezen alapul a kémények huzata és a hűtőtornyok kürtőhatása is.

Tüzelőberendezésekben a hő nagy részét a füstgáz szállítja el, és származtatja tovább. Kazánokban csöveken és dobokon keresztül adja át a hőt a felmelegítendő hőhordozóknak, a különféle közegek (tüzelőanyag, levegő, víz) előmelegítése hőcserélőkön keresztül történik. Magas hőmérsékletet igénylő technológiák (kohászat, szilikátipar stb.) kemencéiben a füstgáz gyakran közvetlenül melegíti az anyagokat, ha azok nem kényesek a kémiai és mechanikai hatásokra.

A füstgáz összetétele és hőmérséklete a tüzelőanyagtól és a tüzelés módjától függ. Legnagyobb része N_2 (hacsak nem oxigénben zajlik az égés levegő helyett) és CO_2 , de számottevő mennyiségben található benne O_2 , CO , vízgőz, szilárd részecskék, valamint a tüzelőanyag jellegétől függően SO_2 , SO_3 , kénsavgőz (esetleg kénsavgőz), ammónia, fémgőzök és egyéb alkotók. Az égés

ingadozásai következtében a füstgáz tulajdonságai sem állandóak, és a hőátzármaztatás sem egyenletes. A füstgáz hőátadási tényezője kicsi, nagy előnye viszont, hogy nagyon magas hőmérsékleten (1000-1200 °C-ig) is stabil, és ehhez nem tartozik nagy nyomás. Sok anyag azonban nem viseli el a füstgáz magas hőmérsékletét, annak csökkentésére a gázt vagy hígítani kell levegő bekeverésével, illetve vízgőz befecskendezésével, vagy a hő egy részét hőcserélőn keresztül vonják el más hőhordozó felmelegítésére. A közvetlen hőátadást az is korlátozza, hogy a füstgáz egyes összetevői kémiai reakciókat, korróziót, eróziót, lerakódásokat okoznak, károsítják a kezelt anyagokat. A kén a metallurgiai folyamatokban növeli a leégési veszteséget, ridegíti a fémeket, elszínezi a szilikátipari termékeket, elszennyezi a finomkerámiákat, és rontja az üveg minőségét. Különösen veszélyesek a füstgázban levő savgőzök, amelyek a lehűlő füstgázból harmatpontjuk alatt kicsapódva korróziót okozhatnak. A harmatpont anyagfüggő, a kéntartalmú savaknál 100 és 160 °C között van. Ugyancsak korróziót okozhatnak magas hőmérsékleten az olvadt fém sók, így olajtüzelésnél a V_2O_5 és Na_2O eutektikuma. A nemkívánatos hatások elkerülésére néha megkötéseket tesznek a tüzelőanyag összetételére (például a kéntartalomra), vagy hőcserélő közbeiktatásával más hőhordozóra térnek át.

Tulajdonképp füstgáz tölti be a belső égésű motorok, gázturbinák és sugárhajtóművek munkaközegének a szerepét is. Ilyenkor azonban a tüzelőanyagok tisztaságával, esetleg adalékanyagok alkalmazásával törekednek a nemkívánatos kémiai és fizikai hatások kiküszöbölésére. Például a „tisza szén” kutatások egyik fontos feladata, hogy a szénelgázosítás termékét alkalmassá tegyék gázturbinák üzemanyagává.

A legsokoldalúbban használható gáznemű hőhordozó a vízgőz. Szerepét jellemzi, hogy a primer energiafelhasználásnak mintegy 30%-a gőzfejlesztésre szolgál, aminek kereken kétharmadát az erőművek hasznosítják. A gőz hőkapacitását a fajhőn kívül a nagy párolgáshő (2,26 MJ/kg) is befolyásolja, ami elérheti a teljes hőtartalom 90%-át is. Gőzhalmazállapot csak az állapotjellemzők bizonyos tartományában lehetséges (1. ábra), az elgőzölgés folyamata a 2. ábrán követhető.

A gőz munkapontjának megválasztásánál figyelembe kell venni az állapotjellemzők (hőmérséklet, nyomás, térfogat, nedvességtartalom) közötti kapcsolatokat. Azt is szem előtt kell tartani, hogy a víz gőznyomása a hőmérséklet növekedésével (5. ábra) rohamosan nő, ami zárt térben nagy mechanikai követelményeket támaszt a berendezésekkel szemben (enyhébb a követelmény, ha az elvezetett gőz ki tud tárgulni). A jól uralható nyomások (10-12 bar) mellett azonban csak 180-190 °C-ig lehet telített gőzt használni, ennél magasabb hőmérséklet-tartományban túlhevített gőzt alkalmaznak, ami a berendezések méretének növelésével és nyomásálló anyagok használatával jár.

A gőz hőátadási tényezőjének értéke hasonló, mint a gázoké, de a nagy párolgáshő következtében nagyságrendekkel megnő forrás közben [10^3 - $2 \cdot 10^4$

$W/(m^2 \cdot K)$] és a kondenzáció során [$6 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^4 W/(m^2 \cdot K)$]. A sok hőt igénylő ipari technológiák hőellátásában a 150–400 °C hőmérséklet-tartományban a telített vagy enyhén túlhevített gőz domináns szerepet játszik. A melegítés legegyszerűbb, legolcsóbb és leghatásosabb módja éles gőz közvetlen befűvése az anyagba, amiben a kondenzálódó víz abszorbeálódik. Azonban az anyagok nagy része a közvetlen gőzbefűjást nem viseli el. Néha a technológiai megmunkálás is gőzöléssel történik (0,05–3 bar nyomáson) anyagok kivonására, textíliák végső kikészítésére, vasalásnál alaktartás elősegítésére stb. Többnyire azonban zárt rendszerekben keringtetik a gőz hőhordozót kazánok, kemencék, reaktorok, autoklávok fűtésére, hőcserélőkben anyagok felmelegítésére. Gyakran gőzzel fűtik a melegalakítás munkaeszközeit is (hengerek, prések, sajtolók, húzópadok, vasalók). Leginkább telített gőzt használnak, amit a jó hőátzármaztatás érdekében teljes mértékben lekondenzáltatnak. A vízgőzt kis nyomáson főleg kompressziós hűtőgépekben hűtőközegként is használják.

Régebben előszeretettel használták 1–1,4 bar nyomású 100–110 °C-os gőzt központi fűtésre is (ritkán ennél kisebb és nagyobb nyomással is), ami a fűtőtestek levegőoldalán 80–90 °C-t eredményez. A gőzfűtés egyszerű és olcsó berendezéseket igényel, mivel a gőzt saját nyomása továbbítja, és a hőleadók mérete kicsi. Hátránya, hogy a rendszerben tárolt hőmennyiség kicsi, ezért gyorsan lehűl, és nehezen szabályozható. Emellett a nagy nyomású gőz veszélyes, ezért felügyeletet igényel. Hátrányos a fűtőtestek túl magas hőmérséklete is, mert a levegőt pörkölő hatásával kellemetlen közérzetet okoz. E hátrányai miatt a gőzfűtést kiszorította a melegvíz-fűtés, ezért csak olyan üzemekben alkalmazzák, ahol az technológiai hőellátáshoz kapcsolódik.

A gőzt a távhőszolgáltatásban is használják hőhordozóként, különösen erőművekből és kazántelegekből technológiai hőigények kielégítésére. A nyomás többnyire 1,5 és 10 bar közötti, a hőmérséklet ritkán haladja meg a 200–250 °C-t, a szállított hőmennyiség tetemes lehet, 100 MW_t nagyságrendet is elérhet. Gőztávvezetékekkel az áthidalható távolság a nyomásesés következtében lényegesen kisebb (≤ 5 km), mint forró vízzel. Az üzemeltetés és karbantartás is igényesebb a nagy nyomás és a korrózióveszély miatt. A kondenzvíz visszavezetése bonyolítja a rendszert, mennyisége változó, gyakran levegőt és gőzt is tartalmaz, magas hőmérséklete miatt korróziót és vízkőképződést okozhat. A hazai távhőszolgáltatás kétharmadát fedező villamosenergia-rendszer erőműveiből szolgáltatott hőhordozó közel fele-fele arányban gőz és forró víz.

Hőszállításra hideg gőzök alkalmazásával is foglalkoznak, melyek telítési nyomása szobahőmérsékleten 10–20 bar. Növelt nyomásuk fedezi a szállítási munkát, és a fogyasztás helyén rejtett hőjük leadása közben kondenzálódhatnak. Legígéretesebbnek az ammóniát tartják, de számításba jöhet a propán (fagyáspontja -188 °C), valamint más gázok is. Az elképzelések az erőművek hul-

ladékhőjének hasznosítására irányulnak, a gazdaságosság még nem bizonyított.

A gőz nagy rejtett hője kedvező lehetőség hőtárolásra is. A különféle megoldások (Ruths, Kiesselbach, Marguerre) lényegében nyomás alá helyezett kétfázisú rendszerek, amelyekben a víztükör felett telített gőz helyezkedik el. A hőmérséklet vagy nyomás változásának hatására gőz párolog el vagy kondenzálódik, miközben a tárolt hő csökken, illetve nő. Elsősorban ipari gőzkazánokhoz kapcsolódva csúcsigények fedezésére használatosak. Egyes megoldásoknál a vízszint szabályozásával oldják meg a tárolási funkciót a kazándobban.

Az első hőerőgépek a gőzgépek voltak, amelyekben a mechanikai munkát a gőz expanziója szolgáltatta, jobb munkaközeget tulajdonképp azóta sem találtak. A gőzgép volt az első ipari forradalom fő erőgépe, szerepe nem korlátozódott a helyhez kötött munkagépek hajtására, alkalmazása a nagyléptékű hajózás és a vasút megteremtésének is feltétele volt. A gőzgépek a 19. században hatalmas és bonyolult gépcsodákká fejlődtek, hogy azután bevonuljanak a műszaki múzeumokba, átadva helyüket korszerűbb utódaiknak, a gőzturbináknak (valamint a belső égésű és villamos motoroknak). A gőzturbinák korunk legnagyobb teljesítményű erőgépei, egységteljesítményük 4-5 GW_t-ot is elérhet. A gőz expanziójával működtetett dugattyúk visszaszorultak a kis gőzmotorok, valamint az egyszerűbb munkagépek (gőzkalapács, szivattyú, kompresszor stb.) működtetésére, amelyekben mérsékelt nyomás (8-12 bar) és hőmérséklet jellemzi a viszonyokat. Az erőművi gőzturbinák hőkörfolyamatának kezdő jellemzői többnyire szubkritikusak (<565-570 °C és <224 bar), szuperkritikus (>600 °C és 240-260 bar) paraméterek jellemzik a legnagyobb egységteljesítményű blokkokat, újabban az ezt meghaladó, ultraszuper-kritikus jellemzők (700 °C, 350 bar) alkalmazásával is foglalkoznak. A gőzkörfolyamat hatásfokát a tápvíz – esetleg többlépcsős – előmelegítésével, valamint a gőz túlhevítésével lehet növelni, ami a középnyomásra expandált gőz közbelső túlhevítésével még fokozható. A gőzt fejlesztő kazánok tápvizével szemben a minőségi követelmények (pH-érték, oldott oxigéntartalom, keménység, szennyeződések stb.) annál szigorúbbak, minél magasabb a gőz állapotjellemzőinek értéke. A korszerű vízkezelési eljárások lehetővé teszik ezek gazdaságos kielégítését.

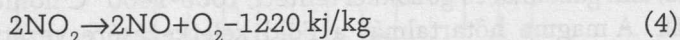
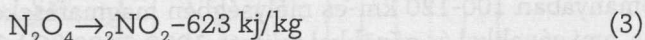
Régi törekvés, hogy az energiaátalakítás hatásfokát javítsák a teljesítménysűrűség növelésével, illetve a hőkörfolyamat határainak kitolásával. Ennek érdekében a víztől eltérő munkaközegek alkalmazásával is foglalkoznak, a víz-gőz körfolyamata fölé vagy alá beiktatott körfolyamattal. A felső hőfoktartományban gázok (például hélium), és olyan gőzök (higany vagy kálium) használhatók, amelyek kritikus pontját magasabb hőmérséklet jellemzi, mint a vizét, de jóval kisebb nyomáson. Az alsó hőfoktartományban használható munkaközegeket alacsony hőmérsékleten a vizénél jóval kisebb fajtérfogat jellemzi, például ammónia, propán, bután. A különleges munkaközegek azonban drá-

gák, ezért használatuk csak elvétve és nem sorba kapcsolt hőkörfolyamatokban fordul elő.

A nukleáris technikában hűtőközegként néhány más gáz használatára is sor került, amelyekkel a nyomás túlzott növelése nélkül magasabb hőmérsékletet lehet elérni, mint a vízhűtéssel. A magasabb hőmérséklet nemcsak a gőzkörfolyamat hatásfokának javulását eredményezi, hanem üzemviteli előnyökkel és beruházási költségmegtakarítással is jár. Lehetővé teszi ugyanis szokványos gőzturbinák alkalmazását, szemben a könnyűvízes atomerőművek telített gőzzel és jóval alacsonyabb hőmérsékleten üzemelő turbináival. Tovább javítható a gazdaságosság 750-800 °C felett gázturbinákkal. Még magasabb hőmérsékletre tervezik a gázturbinák egybeépítését a reaktorral. Mérsékelt nyomásnövelésre gázhűtésnél is szükség van, mert azzal lehet ellensúlyozni a gáz kis fajhőjét és rossz hőátadási tényezőjét. A nyomásnövelés némileg mérsékli a gázhűtés miatt szükséges nagy méreteket. A vízgőzön kívül csak néhány gáz rendelkezik az alkalmazáshoz szükséges kémiai és sugárstabilitással, kis neutronbefogási hajlammal. Ezek közé tartozik a hélium és a szén-dioxid. A grafittal moderált reaktorok kezdetben szén-dioxid hőhordozót alkalmaztak hűtésre, de az csak 380-400 °C-ig használható, mert magasabb hőmérsékleten megszűnik a stabilizása és kémiai reakciókra hajlamos, ezért a nukleáris technikából kiszorult.

A magas hőmérsékletű reaktorok legigéretesebb hűtőközege a hélium. E nemesgáz nem lép reakcióba a szerkezeti anyagokkal, stabilitását egészen magas hőmérsékleten is megőrzi, nem aktiválódik a sugárzások hatására. Fajhője ötször akkora, mint a levegőé, az elérhető hőátadási tényező $10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nagyságrendű, így viszonylag kis hőátadó felületek alkalmazhatók. Hőstabilitása használhatóvá teszi 800-1000 °C beömlési hőfokú jó hatásfokú gázturbinák munkaközegeként, a turbinák kerületi sebességét meg lehet növelni, mivel hangsebessége a levegőre vonatkozó érték háromszorosa. A hélium használatának kulcskérdése, hogy előnyös tulajdonságai csak nagy tisztasága esetén érvényesülnek, a nemkívánatos szennyezőket nagyon kis nyomáson, kriotechnikai eljárásokkal választják le. Üzem közben gáztömör hőcserélők alkalmazásával kell elejét venni a szennyeződésnek.

Kísérletek folytak szaporító reaktoroknál olyan gázok alkalmazásával, amelyek reverzibilisen disszociálnak, ami egyenértékű hőátadási tényezőjük megsokszorozásával. A választott N_2O_4 magas hőmérsékleten (450 °C-on és 140-170 bar nyomáson) hőfelvétel közben bomlik a



reakciók szerint, alacsony hőmérsékleten a folyamatok ellentétes irányban folynak le, miközben az 1,843 MJ/kg reakcióhő felszabadul. Az N_2O_4 gáz alkalmazását nehezíti, hogy mérgező és higroszkópos, s egyéb tulajdonságai (for-

ráspontja alacsony, párolgáshője kicsi) sem kedvezőek, ezért a kísérleteket beszüntették.

Előnyös hőátadási tulajdonságai vannak a hidrogénnek. Hőátadási tényezője a levegőének 1,35-szerese, hővezetési együtthatója 7-szeres, a levegőre vonatkoztatott sűrűsége 0,07, ami nagy áramlási sebesség elérésére ad módot. Léggöri nyomáson levegővel 4,1 és 74% közötti koncentrációránynál robbanóképes, ezért fontos a jó tömítés és a koncentráció folyamatos ellenőrzése. Az elegy 30%-os H_2 aránynál okozza a legnagyobb robbanó hatást 8 baros nyomáshullámmal. A hidrogéngáz jól bevált többek között nagy turbógenerátorok hűtésére, melyre rendszerint 97%-os koncentrációt tartanak 1,035–3 bar nyomással. Robbanásveszélyes környezetben villamos gépek hűtésére más semleges gázokat is alkalmaznak, például nitrogént. Magas átütési szilárdsága miatt a villamos berendezésekben a kén-hexafluorid is kedvelt közeg volt, de az ózonlyuk miatt betiltott gázok közé tartozik.

A hidrogén reverzibilis kémiai reakciójára (2. fejezet, 52. képlet) alapuló nagy távolságú hőszállítás továbbfejlesztésére vizsgálják szén-dioxid-hidrogén gázkeverék alkalmazását, aminek előnye, hogy a latens hőt hideg hőhordozó továbbítja, a termikus veszteség kicsi, így nagy távolságok is áthidalhatók.

Néhány fontosabb gáz hőtechnikai jellemzői a 6. táblázatban láthatók.

Geotermikus energia

Bolygónk tömege óriási mennyiségű hőt tárol, mértékét még becsülni is nehéz. A számítások szerint a kereken 7000 km átmérőjű mag belsejében 20 kbart meghaladó nyomás és több ezer fokos hőmérséklet uralkodik. A magot a környezettől a mintegy 2900 km vastag földköpeny zárja el, ami rossz hővezető lévén termikusan szigetel. A köpeny legkülső 30–50 km vastag rétegében a kutatófúrások már 15 km-es mélységet is elértek, de a gyakorlati tevékenység számára csak a legfelső, néhány km-es réteg jöhet számításba. A kéreg helyenként – főleg üledékes medencéknél – rendhagyó módon elvékonyodik, ezek a geotermikus anomáliák helyei. A Pannon-medencében például csak 24–30 km a kéreg vastagsága, ennek következtében hazánk területének 70%-án kivételesek a geotermikus viszonyok, és gyakoriak a hévforrások. A felső pannon homokkő a világ legnagyobb hévíztárolója. A köpeny felső tartományában 100–120 km-es mélységben magmafészkekben található a magma, ami gázokkal és gőzökkel telített, 1000–1400 °C hőmérsékletű kőzetolvadék. A magma hőtartalmát a Föld keletkezésére vezetik vissza, amikor a befogott hatalmas sebességű anyagrészek mozgási energiája a lefékeződés során hővé alakult. A magma hatása különösen az aktív övezetekben jelentős, a kontinentális táblák találkozásánál, a vulkáni tevékenység térségeiben, vagy ahol a magma előrenyomult a felszín irányába. A nagy nyomás alatt levő mag-

6. táblázat

Gázok jellemzői

Gáz	Molekula- súly	Sűrűség, kg/m ³	Forráspont, °C 1 barnál	Párolgáshő, kJ/kg forrásnál	Olvadáspont, °C	Olvadáshő, kJ/kg	Kritikus pont paraméterei		c_p 0 °C-on, kJ/(kg·K)	$\frac{c_p}{c_v}$
							t_{kr} , °C	p_{kr} , bar		
levegő	28,96	1,293	-194	196	-	-	-140,7	37,2	0,239	1,4
vízgőz	18,06	0,578	100	2260	0	333	374,2	225,5	0,447	1,33
ammónia	17,03	0,771	-33,4	1360	-77,7	29,3	132,4	111,5	0,492	1,32
hidrogén	2,02	0,089	-252,8	460	-259,2	58,5	-239,9	12,8	3,4	1,41
nitrogén	28,02	1,25	-195,8	198	-210	25,7	-147,1	33,5	0,249	1,4
hélium	4	0,178	-268,9	209	-	-	-267,9	2,26	1,25	1,66
szén-dioxid	44,01	1,977	-78,5	573	-56	184	31	73	0,197	1,31
metán	16	1,717	-161,4	553	-184	60	-82,5	45,7	0,49	1,30
propán	44	2,02	-44,5	420	-190	79	96	43	0,576	1,31
bután	58	2,7	0,5	386	-135	80	153	37	0,549	1,39
izo-bután	58	2,67	-10,2	367	-145	78	134	38	0,549	1,39

mát a hegységképző erők aktiválják, ezek hatására a földkéreg gyenge zónáiban, kéreghibákon, töréseken és hasadékokon keresztül felfelé nyomul az olvadt vagy plasztikus állapotú kőzet, de csak a vulkánokon keresztül jut ki a felszínre, egyébként megreked a kéreg alatt.

A földkéreg hője egyrészt a magmából származik, hőátzármaztatás révén, másrészt a kőzetekben előforduló radioaktív anyagok bomlásából. A radioaktív anyagok közül a ^{238}U , ^{232}Th és ^{40}K szerepe a legjelentősebb, ezek koncentrációja különösen nagy a gránitokban.

A kéregnek az energiahasznosítás szempontjából figyelmet érdemlő felszínközeli néhány kilométeres övezetében a termikus viszonyokat a kőzetek összetétele és szerkezete szabja meg. Különösen fontos a kőzetek porozitása, ami befolyásolja mind a hővezetőképességet, mind a víz-, illetve gőztárolás lehetőségét (7. táblázat). Nagy mennyiségű és egymással közlekedő pórusok vagy üregek esetében vizet tározó akviferek alakulhatnak ki.

A hő a mélyebb rétegekből egyrészt hővezetéssel, másrészt hőhordozókban jut a felszínre. A kőzetekben a hővezetés mértékét jellemző hővezetési tényező $1\text{--}3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, a felszínen érzékelhető teljesítmény néhányszor 10 és $100\text{ mW}/\text{m}^2$ nagyságrendben mozog, különösen aktív térségekben $300\text{--}500\text{ mW}/\text{m}^2$ -t is elérhet. Átlagértéke $60\text{ mW}/\text{m}^2$, vagyis átlagosan néhány hektárnyi területre jut 1 kW . A hővezetés olyan kis teljesítménysűrűséget szolgáltat, aminek gyakorlati hasznosítására nincs reális lehetőség. Ugyancsak kizárható a vulkanizmusban feltörő forró láva és agresszív gázok hasznosítása is. Érdeemi alkalmazásra csak a kedvező hidrogeológiai körülmények között kialakuló

7. táblázat

Kőzetek jellemzői

Anyag	Porozitás, %	Hidraulikus vezetőképesség, m/nap
<i>nem konszolidált üledékek</i>		
agyag	45–60	$<10^{-2}$
iszap	40–50	$10^{-2}\text{--}1$
homok, vulkáni hamu	30–40	1–500
kavics	25–35	500–10 000
<i>konszolidált üledékek</i>		
agyagkő	5–15	$10^{-8}\text{--}10^{-6}$
homokkő	5–30	$10^{-4}\text{--}10$
mészkő	0,1–30	$10^{-8}\text{--}10$
<i>kristályos kőzetek</i>		
bazalt	0,001–1	0,0003–3
gránit	0,0001–1	0,003–0,03
pala	0,001–1	$10^{-8}\text{--}10^{-5}$

rezervoárokból felszínre kerülő vízben tárolt energia tarthat számot, ami azonban a geotermikus energiának csupán morzsáit képviseli. A víz halmazállapota a kőzetekben uralkodó hőmérséklet- és nyomásviszonyoktól függ. A víz hőfokától függően alacsony ($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$), közepes ($90\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) és magas ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) hőmérsékletű előfordulásokat különböztetnek meg. A magas hőmérséklet kedvez a gőzfejlődésnek, különösen át nem eresztő zárórteg alatt fekvő akviferekben. A víz, illetve gőz esetenként természetes forrásokban tör fel, az energetikai hasznosítás azonban többnyire fúrt kutakra támaszkodik.

A Föld belseje felé irányuló hőmérséklet-növekedést jellemző hőfokgradiens a felszín közelében $0,02\text{--}0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, vagyis 100 m -enként átlagosan $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedik a hőmérséklet. Lefele haladva a gradiens nő, és a hőmérséklet a lineárisnál jobban emelkedik. Ugyancsak gyorsabb a hőfoknövekedés a magmaközei térségekben, a vulkáni övezetekben nagyságrenddel nagyobb gradiens is előfordul (Jáván $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$). A nyomásnövekedés 10 méterenként átlagosan 1 bar , de az akviferek kiegyenlítő szerepe módosítja a nyomáseloszlást, főleg ha felszíne felett az impermeábilis réteggel határolt gőzpárna alakul ki.

A Föld hasznosítható geotermikus hőmennyiségére nagyon eltérő és bizonytalan becslések vannak, a külső héj 10 km -es övezetére ZJ és 100 YJ között. Az eltérés azon is múlik, hogy a kéreg milyen vastag rétegét vesszük figyelembe, a 3 és 10 km mélységek közötti réteg hőtartalma nagyságrenddel haladja meg a 0 és 3 km közötti rétegét. A felszíni hőáram a Föld teljes felszínére 32 TW , ami évenként 1 ZJ energiát szolgáltat, ennek felére becsülik a radioaktív anyagok bomláshőjét. Az energia azonban nagyon diffúz, és kinyerésére csak az átlagosnál jóval nagyobb hőáramú térségekben érdemes törekedni, ha a nagy hőáram víz jelenlétével párosul. Ezért gyakorlatilag az elméletileg számított potenciálnál csak több nagyságrenddel kevesebb hasznosítható. Magas entalpiájú hőhordozó viszonylag ritkán fordul elő, főleg fiatal vulkanikus övezetekben, ahol a magma behatolása nyomán magas hőmérsékletű akviferek alakultak ki, esetleg gőzdóмок alatt. A nagy entalpiájú folyékony halmazállapotú rezervoárokból a vízhőmérséklet $200\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$, a nyomás a mélységgel arányos. A gőzdóмокban a nyomás $30\text{--}35\text{ bar}$, a hőmérséklet $150\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Egyes mély üledékes kőzetek alatt $150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os, rendkívül nagy nyomású ($280\text{--}560\text{ bar}$) forró víz található, gyakran oldott földgázt is tartalmaz ($1\text{--}2\text{ m}^3\text{gáz}/\text{m}^3\text{víz}$). E geonyomásos zónák kiaknázhatósága azonban technikailag még megoldatlan. Termálvizet is csak akviferekből lehet nyerni, de ezek megcsapolása csak egy kisebb tartomány hőtartalmát juttatja a felszínre. A kis entalpiájú rezervoárokból a hőmérséklet $100\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t nem haladja meg, a magyar előfordulások legnagyobbbrészt ilyenek, bár néhány nagy entalpiájú gőzelőfordulás is akad, kis volumennel.

Sokak nézetével ellentétben a geotermikus energia nem megújuló energiaforrás. A rezervoárok energiatartalmának a becslését sok bizonytalanság terheli, ami óvatossá teszi a beruházókat. Egyes forrásoknál a hőmérséklet és a

nyomás nagyon hosszú ideig állandó, másoknál váratlanul jelentős csökkenés tapasztalható. A nagy entalpiájú előfordulások kiaknázása során általános tapasztalat, hogy az idő múltával csökken a hőhordozók hőmérséklete, a rezervoárak hasznosíthatósága véges. A kis entalpiájú előfordulásoknál a kőzetekbe beszűrődő csapadék pótolhatja a forrás hozamát, de ez az egyensúly is sérülékeny. A hazai termálvíz-előfordulások rétegenergiája csökkenőben van, ami több okra vezethető vissza. A klímaváltozás következtében kicsi a vízutánpótlás, a nyomást fokozó gáz elszívárog, és az emberi beavatkozások is megzavarhatják a vízrendszer egyensúlyát. A bányászat túlzott vízkiemelésének hatására a dunántúli hévizeknek nemcsak a hozama csökkent, hanem a hőmérséklete is, ami csak részben regenerálódott a vízemelés visszafogása után.

A hévizeket már az ókorban is használták fürdésre, gyógyításra, lakóházak fűtésére, de a geotermikus energia szélesebb körű kiaknázására csak a 20. században gondoltak, amiben meghatározó szerepet játszott az olajkrízis. A potenciál gyakorlati megítélését sok körülmény befolyásolja, a rezervoárok jellege (kiterjedés, mélység, állapotjellemzők, a víz kémiai összetétele), a rezervoár kapcsolata a környezettel (kőzetek típusa és szerkezete, hidrogeológiai viszonyok), a kitermelés költsége, a fogyasztói igények, a környezetvédelem követelményei. A hő használati értéke hőfokfüggő, a nagy entalpiájú hőhordozóval villamos energiát lehet fejleszteni, az alacsonyabb hőmérsékleten rendelkezésre állóval csak alacsonyabb hőmérsékletű hőigények fedezhetőek (8. táblázat).

A nagy entalpiájú hőhordozóval az első villamos energiát fejlesztő geotermikus erőművet 1904-ben létesítették Olaszországban (Larderello). Ezt köve-

8. táblázat

Geotermikus energia alkalmazási lehetősége

Alkalmazás területe	Minimális hőfok, °C	Minimális vízhozam, m ³ /nap
uszoda	25–30	250
gyógyfürdő	40	250
örök fagy olvasztása	25	250
talajfűtés	25–30	500
melegház fűtése	40–50	500
használati meleg víz	40–50	1 000
fűtés	70–80	1000
hűtés	70	500
szárítás	100–120	250
<i>villamosenergia-fejlesztés</i>		
közvetlenül	120	10 000
binárisan	70	2 500

tően több országban (USA, Fülöp-szigetek, Mexikó, Olaszország, Új-Zéland, Japán stb.) létesítettek erőműveket, amelyek összesített teljesítménye $\sim 7 \text{ GW}_e$. Jelenleg a legnagyobb léptékű erőművi kiaknázás Kaliforniában (Geysers térségben) folyik, összesen $2,8 \text{ GW}_e$ teljesítménnyel. A geotermikus villamosenergia-fejlesztés helyzetét a 9. táblázat tekinti át. Az olajkrízis időszakában ambiciózus tervek születtek geotermikus erőművek létesítésére, azonban az olajárak lemorzsolódása e szándékokat visszavetette.

A gőzdómokból nyert száraz, túlhevített gőzt ($180\text{--}220^\circ\text{C}$, 8-10 bar) közvetlenül a turbinába lehet vezetni. Az alacsony beömlő hőmérséklet következtében a hőkörfolyamat hatásfoka kicsi, legfeljebb 10-15% érhető el. Az alacsony gőzparaméterek miatt a turbinák mérete nagy, ezért mintegy 150 MW_e -nél nagyobb egység teljesítményt nem alkalmaznak. Az erőművek nagy területet foglalnak el, mert egy blokk gőzigényét 15-20 kút tudja fedezni, mivel a kutak egyedi hőteljesítménye csupán néhány MW_t . A környezetvédelem és

9. táblázat

Geotermikus erőmű-kapacitások 2000-ben

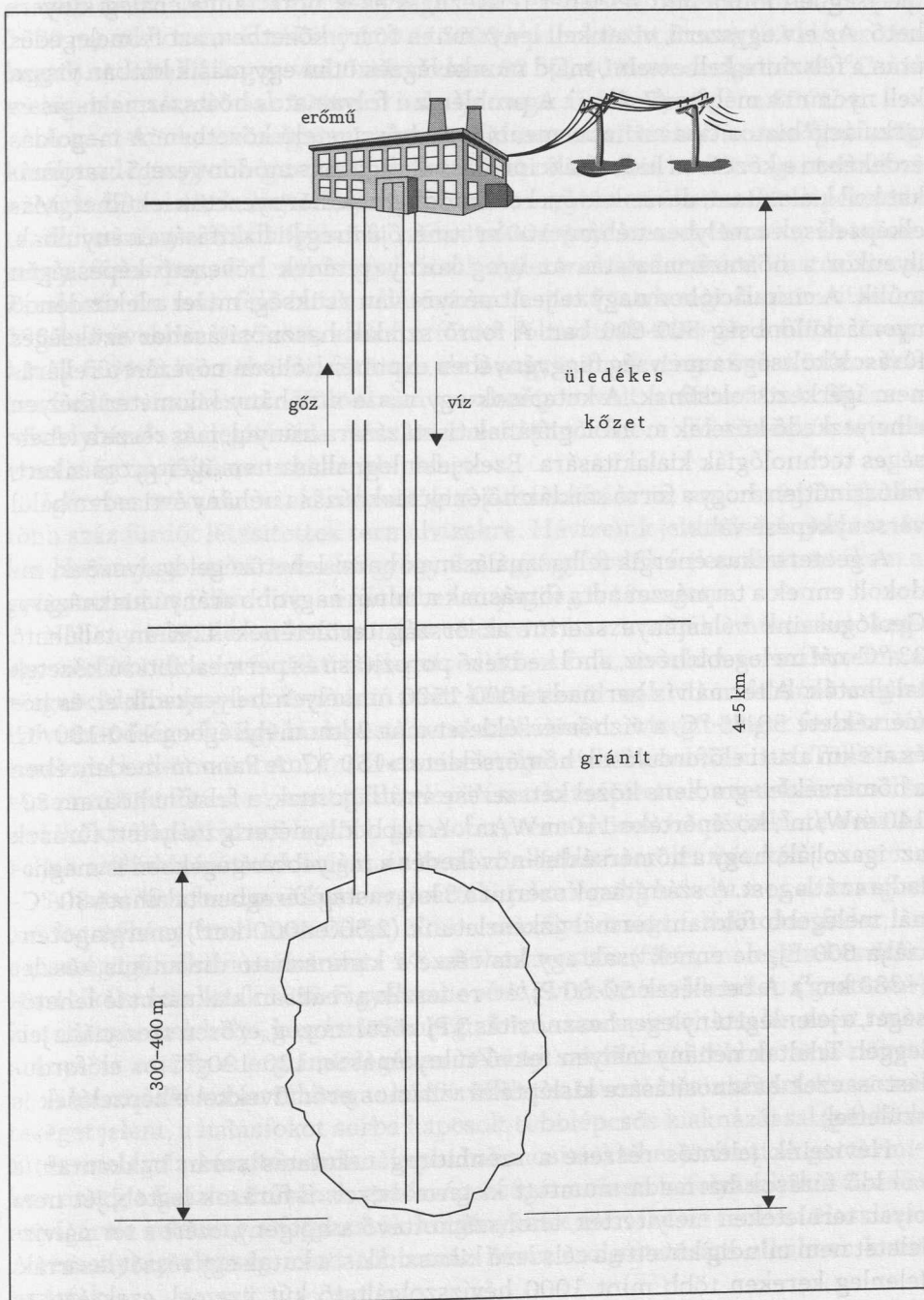
Ország	Kapacitás, MW	Részarány, %
Ausztrália	0,2	~
Costa Rica	142,5	1,8
Egyesült Államok	2228,0	27,9
Salvador	161,0	2,0
Etiópia	8,5	0,1
Franciaország (Guadalupe)	4,2	0,1
Fülöp-szigetek	1909,0	23,9
Guatemala	33,4	0,4
Indonézia	589,5	7,4
Izland	170,0	2,1
Japán	546,9	6,9
Kenya	45,0	0,6
Kína	29,2	0,3
Mexikó	755,0	9,5
Nicaragua	70,0	0,9
Olaszország	785,0	9,8
Oroszország (Kamcsatka)	23,0	0,3
Portugália (Azori-szigetek)	16,0	0,2
Thaiföld	0,3	~
Törökország	20,4	0,3
Új-Zéland	437,0	5,5
<i>világ</i>	<i>7974,6</i>	<i>100,0</i>

a rezervoárgazdálkodás érdekében a leválasztott vizet, valamint a kondenzátumot visszanyomják a talajba. Gondot okoznak a gőzben előforduló nem kondenzálódó gázok (CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2 , CH_4 , N_2 , Rn stb.), egyrészt rontják a hatásfokot, másrészt környezetszennyezők, egyesek korrozívak, sőt robbanó keverék kialakulása is előfordulhat. Ezért többnyire ezeket is kiszűrik, és visszanyomják a rezervoárba.

A rezervoárból kinyert vízben homok, szilárd ásványi részecskék, oldott sók (főleg Na és K kloridok, valamint karbonátok), nehézfémek, és a lelőhelytől függően más szennyezők találhatók, amelyek eróziót, korróziót, eltömődést okozhatnak. Ez korlátozza a szokásos gőzturbinák alkalmazását, mivel azok tiszta gőz feldolgozására készülnek. Az üzembiztonság rovására tett némi engedménnyel, gyakoribb karbantartással és felújítással a turbinákat $200\text{ }^\circ\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékletű, kis sótartalmú közegekre is használják. Nagyobb sótartalmú nedves gőz, illetve forró víz ($120\text{--}280\text{ }^\circ\text{C}$, $2\text{--}30\text{ bar}$) erőművi hasznosítására különleges megoldásokat kellett kidolgozni. A probléma egyik megoldása a vízfázis és a gőzfázis szétválasztása. A gőz kiléptetésére egyszeres vagy többszörös elgőzölögtetést alkalmaznak, a nyomás hirtelen lecsökkentésével (*flash*), ami leszállítja a forráspontot, ilyen módon a víz $20\text{--}30\%$ -át el lehet gőzölögtetni. Egy másik lehetőség bináris rendszer alkalmazása, a zárt körben keringő termálvízzel hőcserélőn keresztül alacsony forráspontú hőhordozót – izobutánt, pentánt – melegítenek fel, és azzal végeztetik a hőkörfolyamatot. A jó hőátzármaztatás érdekében ilyenkor megfelelő nyomás alkalmazásával kell elkerülni a flash-t. Mindkét esetben a környezet védelme érdekében a lehűlt vizet visszanyomják a rezervoárba. A különleges közegekhez speciális hőcserélők, szivattyúk és szerelvények szükségesek, megfelelő korrózió- és erózióállékonysággal. Szilárd hordalékot tartalmazó, erősen sós víz hasznosításához olyan impulzusturbinákkal is kísérleteznek, amelyek járókereikére fűvőkákból jut radiálisan a munkaközeg. Lapát nélküli turbinák is számításba jöhetnek, ezeknél a tengelyen elhelyezkedő tárcsákat a munkaközeg súrlódása mozgatja.

Az alacsony entalpiájú termálvizek energiatartalma $100\text{--}180\text{ kJ/kg}$, ami 2 nagyságrenddel kisebb a tüzelőanyagok energiatartalmánál. A $40\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$ -os víz gyakran természetes úton artézi forrásként jut a felszínre. Az $1500\text{--}2500\text{ m}$ -nél nem mélyebb rétegekből többnyire szivattyúval emelik ki a vizet. Alacsonyabb hőmérsékleten használati melegvíz-szolgáltatás, mezőgazdasági hasznosítás és balneológiai alkalmazás jöhet számításba (8. táblázat). A megfelelően magas hőmérsékletű víz távfűtésre és technológiai célokra is használható. A világ termikus hasznosításának összesített teljesítménye $\sim 15\text{ GW}_t$ ($\sim 200\text{ PJ/év}$). Az élen járók (Japán, Kína, Izland, a FÁK országai, Franciaország stb.) között volt Magyarország is, a Dél-Alföldön ellátott $\sim 1,5\text{ GW}_t$ -nyi fogyasztással.

Forrószikla-módszer



Néhány országban jelentős kutatómunka folyik a forró sziklák (főleg gránit) hasznosítására. Forró – 200-300 °C-os – kőzeteket néhány kilométer mélységben mindenütt fel lehet tételezni, s ezek hőtartalma elvileg kinyerhető. Az elv egyszerű, vizet kell lenyomni a forró kőzethez, azt felmelegedés után a felszínre kell emelni, majd munkavégzés után egy másik kútban vissza kell nyomni a mélybe (7. ábra). A probléma a folyamatos hőátzármaztatás és cirkuláció biztosítása az impermeábilis és hőszigetelő kőzetben. A megoldás érdekében a kőzetben hidrofrakcionálással, vagy más módon vezető csatornákat kell kialakítani, de azok idővel eltömődhetnek, környezetük lehűlhet. Más elképzelések a mélyben néhány 100 m átmérőjű üreg kialakítására irányulnak, ilyenkor a hőátzármaztatás az üreg környezetének hővezető képességén múlik. A cirkulációhoz nagy teljesítményre van szükség, mivel a leküzdendő nyomáskülönbség 300-600 bar. A forró sziklák hasznosításához szükséges fúrások költsége a mélység függvényében exponenciálisan nő, ezért az eljárás nem ígérkezik olcsónak. A kutatások egy része a néhány kilométer mélyen elhelyezkedő kőzetek morfológiájának tisztázására irányul, más része a lehetséges technológiák kialakítására. Ezek jelenlegi állása nem ígér gyors sikert, valószínűtlen, hogy a forró sziklák hőjének kiaknázása néhány évtizeden belül versenyképesé válik.

A geotermikus energia felhasználásának hazai lehetőségei kedvezőek, indokolt ennek a természet adta forrásnak a minél nagyobb arányú kiaknázása. Geológusaink véleménye szerint az ország területének 42%-án található 33 °C-nál melegebb hévíz, ahol kedvező porozitású és permeabilitású kőzetek találhatók. A termálvíz harmada 1000-1500 m mélyen helyezkedik el, és hőmérséklete 50-75 °C, a vízhőmérsékletet már 2 km mélységben 110-130 °C, és a 3 km alatti előfordulások hőmérséklete >150 °C. A Pannon-medencében a hőmérséklet-gradiens közel kétszerese az átlagosnak, a felszíni hőáram 80-140 mW/m², középértéke 110 mW/m². A több kilométerig mélyített fúrások azt igazolják, hogy a hőmérséklet-növekedés a mélyebb rétegekben is meghaladja az átlagost. A számítások szerint a 3 km vastag kéregben található 30 °C-nál melegebb földtani termálvízkészletünk (2,500-4000 km³) energiapotenenciája 600 EJ, de ennek csak egy kis része a kiaknázható dinamikus készlet (~380 km³). A becslések 50-60 PJ/év-re teszik a reálisan kiaknázható lehetőséget, a jelenlegi tényleges hasznosítás 3 PJ körül mozog, erősen szezonális jelleggel. Találtak néhány mélyen fekvő túlnyomásos, 120-190 °C-os előfordulást is, ezek hasznosítására kisléptékű villamos erőművekkel elképzelések is születtek.

Hévízeink jelentős részére a szénhidrogén-kutatás során bukkantak, a meddő fúrások harmada mutatott ki termálvizet. E fúrások legtöbbjét nem olyan területeken mélyítették, ahol számottevő a hőigény, ezért a termálvíz-leletet nem mindig követte a célszerű kihasználás, a kutak egy részét lezárták. Jelenleg kereken több mint 1000 hévízszolgáltató kút üzemel, ezek évente

~400 Mm³ (~1,1 Mm³/nap) meleg vizet szolgáltatnak. A kutak átlagos hőhoza-
ma 93 GJ/év, összesen ~40 PJ hővel, e hőnek azonban ténylegesen még a tize-
de sem hasznosul. A kutak mélysége 1000 és 2000 m közötti érték (az átlag
1620 m), vízhozamuk néhány 100 és 3000 l/perc között mozog (820 l/perc át-
laggal). A kutak átlagos vízhőmérséklete 62 °C, 40%-uk szolgáltat 45 °C-nál
melegebb vizet, de csak 10%-nál haladja meg a vízhőmérséklet a 80 °C-t.

A geotermikus energia magyarországi hasznosításában a mezőgazdaság
kínálja a legnagyobb gazdasági lehetőséget. Kitűnően bevált a geotermikus
energia kertészetek, hajtatóházak fűtésére, nagyüzemi állattartó telepek, kel-
tetők, terményszárítók (gabona, szálas takarmány, szemes termés és takar-
mány, fűszerpaprika, zöldség) hőszükségletének fedezésére, tartósításra,
aszalásra és más feladatok ellátására. A mezőgazdasági hasznosítás az
1980-es években tetőzött, ekkor a fűtött fóliasátrak 90%-át, a fűtött üveg-
házak 60%-át termálvízzel fűtötték, de a nagyüzemek megszűnése után a fel-
használás visszaesett. Különösen gazdaságos volt a fóliasátrak fűtése a
növényházak melegítésére már hasznosított vízzel, a fóliasátrából távozó
vizet még talajfűtésre is használni lehet.

Ígéretes termálvizeink balneológiai hasznosítása is, az ország területén
több száz fürdőt létesítettek termálvizekre. Hévízeink jelentős hányada érté-
kes hatóanyagokat tartalmazó gyógyvíz, a gyógyfürdők fejlesztését az állam a
gyógyturizmus fellendítése érdekében anyagilag is támogatja.

Néhány településen kommunális célokra is hasznosítják a hévizeket. Leg-
egyszerűbbnek a használati melegvíz-ellátás tűnik, azonban termálvizeink a
magas oldottanyag-koncentráció miatt közvetlenül csak ritkán felelnek meg az
ivóvízminőségnek. Egy budapesti kerület ellátását a Margit-sziget forrásairól
hamar be kellett szüntetni a csővezetékek teljes vízkövesedése miatt. Több fan-
tázia van a távfűtésben, amit több településen ki is építettek, e rendszereknél is
a vízkökviválás okozza a legtöbb gondot. A termálvizek hőmérséklete behatá-
rolja a szállíthatóság távolságát, és ezzel az ellátható terület méretét.

A hazai hévízhasznosítás energiaértéke jelenleg alig haladja meg az energia-
mérleg néhány tized százalékát, 30%-a mezőgazdasági feladatokat fedez, az
egészségügyi alkalmazás aránya 54, a hőhasznosítás (fűtés, melegvíz-készítés,
ipari alkalmazás) csak 16%. Figyelembe véve a vízhőmérsékleteket, a geotermi-
kus energia csak helyi, kiegészítő energiaforrás szerepét töltheti be, ezért rész-
aránya az ország energiamérlegében néhány százaléknál többre nem nőhet.

A hasznosítás után túl magas hőmérsékleten távozó hévíz hőtartalma vesz-
teséget jelent, a hatásfokot sorba kapcsolt többlépcsős kiaknázással (például:
fűtés–melegvíz-készítés–balneológiai hasznosítás) lehet javítani. A geotermi-
kus energia hasznosításának gazdaságosságát erősen befolyásolják a tüzelő-
anyagárak, valamint a fogyasztók hőigényének mértéke és területi eloszlása.
A versenyképtelenség miatt több száz hévíz szolgáltatására alkalmas kutat
lezártak.

A termálvizek nagy ásványianyag-tartalma üzemviteli és környezetvédelmi problémákat okoz. Az alkalmazásoknál az ásványtartalom megengedett mértékét előírják, a balneológiai felhasználásnál 50 g/l-t is tolerálnak, a kommunális szolgáltatásoknál 10 g/l a követelmény a vízkőlerakódás elkerülése miatt, de közvetlenül használati meleg vízként alkalmazva teljesíteni kell az ivóvízminőséget (<1 g/l). A felszíni vízfolyásokba kibocsátott hulladék vízben 2 g/l-t engednek meg. A sótartalom a mélységgel nő, az 1-2 kilométer mélyről származó vizekben 100-400 g/l a szokásos érték. Az üzemeltetés legnagyobb gondja a vízkőkiválás, ami a buborékpontnál kezdődik (többnyire már a terepszint alatt 30-60 m-rel). A hazai termálvizekre főleg karbonátos vízkő kiválása jellemző. A főleg CO_2 -t tartalmazó termálvizeknél a probléma a nyomás beállításával uralható, ha a szén-dioxid parciális nyomását megfelelő értéken tartják, nem képződik vízkő. A vízkőképződést inhibitorok bekeverésével is meg lehet előzni, a kiválást megakadályozó fizikai effektusok (ultrahang, villamos erőtér) is számításba jöhetnek. A már lerakódott vízkövet savazással lehet eltávolítani. Műanyag csövek, valamint különféle bevonatú acélcsövek alkalmazásával elejét veszik a vízben oldott sók és gázok (főleg oxigén, szén-dioxid, kén-hidrogén) korrozív hatásának. Gyakran szükség van a hévíz gáztalanítására is, a vízben lévő CH_4 , CO , N_2 , H_2S , a nyomokban előforduló etán, propán, bután kiválasztására, ami esetleg párosulhat a metán felhasználásával is.

A geotermikus energiahasznosításnál elejét kell venni annak, hogy az agresszív, egészség- és környezetkárosító anyagok a talajba, az élővizekbe vagy a légtérbe jussanak. Főleg a gőzben fordulhat elő szén-dioxid, ammónia, metán, hidrogén, nitrogén, bórsav, néha radon és higany is. Maga a kiemelt termálvíz is rendszerint erősen sós, mivel a meleg víz jobban oldja az ásványokat és a fémeket. A légszennyezés a rezervoár geokémiai viszonyaitól függ, a legkellemetlenebb a kén-hidrogén, ami 10 ppm felett egészségkárosító, de már $>0,002$ ppm esetében kellemetlen a szaga. Sokféle szennyező fordulhat elő a hulladék vizekben is. A környezetvédelem érdekében egyre inkább követelmény, hogy a technológiai ciklus végén a kiemelt hőhordozókat visszasajtolják a rezervoárba, ami sajnos a magyarországi alkalmazásokra még nem jellemző. A visszasajtolás természetesen energiabefektetést követel, s rontja az eredő energiamérleget. Ha a visszasajtolás nem lehetséges, a kibocsátandó közegeket megfelelő eljárásokkal tisztítani kell, ilyenkor a hőszennyezést is mérlegelni kell.

Nem ellensúlyozható a kűtképzésnél és az üzemzavarok során szükséges lefűvásnál a néha szuperszonikus sebességű szabad kiáramlás hatalmas hangja, és az erőmű közelében a csövekben sűrűlő közeg zaja sem jelentéktelen. Esetenként a talaj stabilitása is gondot okoz, egyrészt a felszín besüllyedése, másrészt szeizmicitás kialakulása révén – a visszasajtolás ezek veszélyét is csökkenti. A létesítmények területfoglalása számottevő, villamosenergia-termelésnél $0,2-0,3$ ha/MW_e, termikus hasznosításnál $\sim 1,6$ ha/MW_t.

A hőszivattyú fordított irányú körfolyamatot végző hűtőgép. A környezetet lehűtve abból hőt von el, és az így nyert energiával csökkenthető a terek fűtéséhez vagy anyagok melegítéséhez szükséges energia. A környezet lehet levegő, lehetnek természetes vizek – beleértve a geotermikus hőhordozókat –, lehet a talaj, vagy termikus folyamatokból származó hulladékhő. A talaj mélyebb rétegeinek a hőmérséklete meglehetősen stabil, a mérsékelt égövön a felszín alatt 2 méterrel mind a talaj, mind a talajvíz hőmérséklete gyakorlatilag állandóan $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül van.

Egy és tíz kW közötti teljesítményű hőszivattyúk kereskedelmi forgalomban kaphatók. Használhatók lakások és intézmények fűtésére, technológiai folyamatok hatásfokának növelésére. Különösen gazdaságosak a télen fűtésre, nyáron pedig hűtésre használható berendezések. Az energiatakarékosságra való törekvés jelentősen megnövelte a hőszivattyúk vonzerejét, versenyképessége a viszonylag magas beruházási költség ellenére a drága tüzelőanyagok mellett növekszik.

A legtöbb hőszivattyú kompressziós rendszerű, villamosmotor-hajtással. Ezekben a munkaközeget az elpárologtatóban nagy nyomáson és alacsony hőmérsékleten párologtatják el a környezetből elvont hő segítségével. Innen kompresszorral a kondenzátorba továbbítják, ahol lecsapódva leadja a párologshőt, amit hőcserélőn keresztül lehet hasznosítani. A hőszivattyú kondenzátorában a nyomás 20-22 bar, a hőfokszint $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$. A motorral felvett teljesítmény a leadott hő negyede-fele. A kompresszor hajtására belső égésű motorok is számításba jöhetnek.

Szaporodnak az abszorpciós elven működő hőszivattyúk is. Ezekben a cseppfolyós munkaközeget a környezetből elvont hővel párologtatják el, majd oldószerben oldják, és az oldás közben fejlődő hő hasznosítható. A munkaközeget az oldószerből ki kell vonni, és cseppfolyósítva újabb körfolyamatba lép.

Villamos energia

A villamos energia a legsokoldalúbban és legrugalmasabban hasznosítható, egyszerűen szállítható, könnyen szabályozható energiahordozó. Minden energiaszférából előállítható, és azzal a fogyasztói szükségletek jóformán minden változatát ki lehet elégíteni. A villamosság e sokoldalú alkalmazhatósága következtében alig akad olyan emberi tevékenység, amelyben ne játszana szerepet. Vonatkozik ez mind a termelő folyamatokra, mind a személyes szükségletek kielégítésére. Ennek következtében a villamos energiának jelentős szerepe van a gazdasági hatékonyság mértékében, valamint az emberi életminőség és életszínvonal alakulásában.

A fogyasztók számára nagyon vonzó a tiszta, a környezetet nem szennyező és könnyen kezelhető energiaszféra. A fejlett országokban a fogyasztók energiaszférájának 15-25%-át (egyesekben még többet is) tesz ki a villamos energia, ennek előállítására fordítják a primer energiaszférájának 30-45%-át, és az arány növekvő. Magyarországon az évenként változó arány a primer energiaszférájának 40%-a körül ingadozik.

A villamosság sokoldalú hasznosíthatósága következtében annak elterjedtségét gyakran az országok fejlettségének jellemzésére is használják, a sok villamos energiát fogyasztó országokban az életszínvonal is magas. Természetesen ez nem jelent szoros korrelációt, hiszen ezek a mutatók sok tényezőtől függenek, mint például az energia- és iparszerkezettől, az életvitel módjától, a háztartások gépesítettségétől, a termelőfolyamatok műszaki színvonalától, az időjárástól, és nem utolsósorban a villamosenergia-ellátás módjától. A fajlagosan legtöbb villamos energiát felhasználó országok helyzetét az 1. táblázat tükrözi, a mutatók 25 000 és 1000 kWh/(fő, év) között szóródnak.

A gazdasági tevékenység bővülése, a technológiák korszerűsítése, az életminőség javulása egyaránt járulékos szükségletet támaszt a villamos energia iránt, ezért az ilyen energiaszférájának a fejlett országokban is folyamatosan nő, telítési tendencia még a nagyon magas fajlagos felhasználású országokban sem jelentkezik. A fejlődő világban azonban ma is villamosítás nélküli területeken él viszont az emberiségnek több mint negyede. Az IEA felmérése korrelációt mutat a villamosítás mértéke és a szegénység aránya között (1. ábra). A legtöbb fejlődő országban kiemelt törekvés a villany eljuttatása minden településre, egyrészt a civilizáció terjesztése, másrészt a gazdasági felemelkedés érdekében. Míg az 1. táblázat élén álló országokban a bőségesen rendelkezésre álló, olcsó villamos energiát fűtésre is használják, Dél-Azsiában már az is

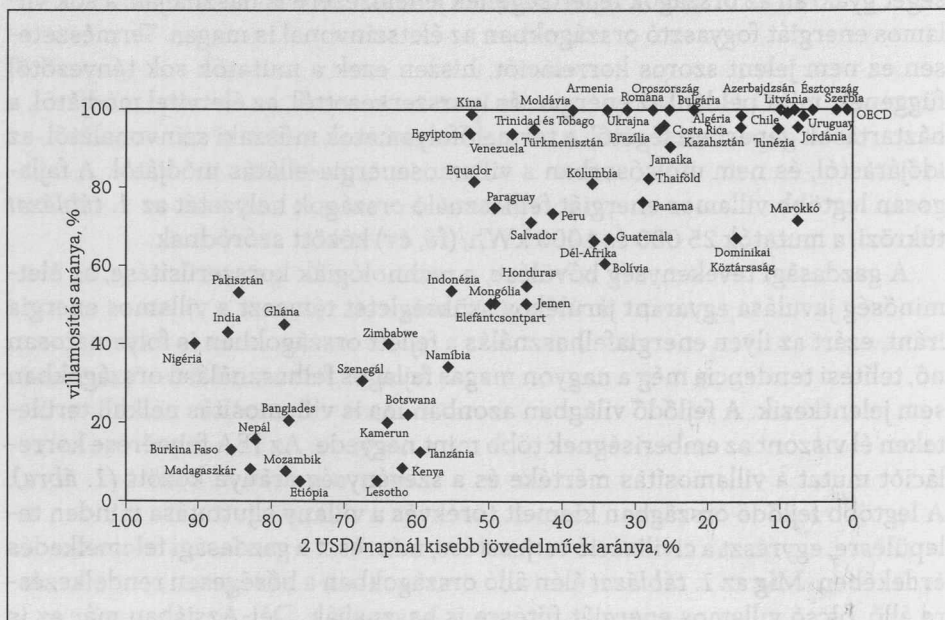
1. táblázat

Fajlagos villamosenergia-felhasználás 2000-ben

Ország	Fajlagos érték, kWh/lakos	Ország	Fajlagos érték, kWh/lakos
Norvégia	25 133	Hollandia	6 566
Izland	24 666	Dánia	6 528
Luxemburg	17 000	Egyesült Királyság	5 991
Kanada	16 942	Koreai Köztársaság	5 898
Svédország	15 607	Írország	5 816
Finnország	15 212	Csehország	5 679
Egyesült Államok	13 845	Spanyolország	5 253
Ausztrália	10 031	Olaszország	5 231
Új-Zéland	9 237	Görögország	4 679
Japán	8 332	Portugália	4 110
Belgium	8 204	Magyarország	3 340
Svájc	7 833	Lengyelország	3 220
Franciaország	7 306	Mexikó	1 816
Ausztria	7 012	Törökország	1 564
Németország	6 681	világ	2 343

1. ábra

Kapcsolat a villamosítás és a szegénység között



vívmány, ha legalább egy szobában világít a mennyezetről lelógó vezetékhez csatlakozó villanykörte.

A fejlődő világot sokkal kisebb mutatók jellemzik, ezekben az országokban a villamosítás társadalompolitikai ügy, és nagy erőfeszítéseket tesznek a villamos hálózatok bővítésére, hogy eljuttassák a villanyt az emberekhez. A villamosításnak kitüntetett szerepe van a civilizált életmód kialakításában, a nap hosszát megnövelő villanyvilágítás időt teremt a művelődésre és tanulásra, az elektronikus média ismereteket és információkat terjeszt, bővíti az emberek látókörét, közreműködik az oktatásban és képzésben, felhívja a figyelmet a lehetőségekre az életvitel javításában és a termelés hatékonyságának növelésében. A villamos gépek és eszközök az egyszerű munkafolyamatoknál is csökkentik a nehéz fizikai munkát (vízemelés, darálás, teheremelés és szállítás stb.), a bonyolultabb technológiai folyamatok gépesítése és automatizálása a termelékenység növelésének legfontosabb eszközei. Kiemelkedő Kína példája, ahol két évtized alatt 98%-os ellátottságot sikerült elérni, 500 millió falusi emberhez juttatva el a villanyt.

Magyarország az egy főre eső villamosenergia-felhasználásban az európai sereghajtók között szerepel. Némileg enyhíti ezt a megítélést, hogy a villamosenergia-igényes iparágak aránya (például színesfémkohászat) visszaszorult, és fűtésre csak elvétve fizetődik ki a villany. Hasonló lemaradás érvényesül a magyar háztartások fajlagos felhasználásában (1028 kWh/lakos) is, ami az életmód (gépesítettség, életvitel, világítási kultúra stb.) elmaradottságát tükrözi.

A villamosság jellemzői

A villamosenergia-ellátás minőségét egyrészt a rendelkezésre állás folytonossága szabja meg, másrészt az, hogy az elektrotechnikai jellemzők tulajdonságai mennyire felelnek meg a kívánatos mértékeknek. A legtöbb villamossággal összefüggő hatás az áramtól függ. Az áramvezetők ellenállásában vagy villamos ívben kialakuló veszteségét lehet hasznosítani hőfejlesztésre; az árammal felizzított testek, villamos ív vagy gázkisülés fénykibocsátása alkalmazható világításra; az áram erőhatása működteti a motorokat; áram hoz létre elektrokémiai folyamatokat, áramok változásain alapul az információtechnika stb. A villamos áram lényegében töltéshordozók elmozdulása. Az n koncentrációjú, q villamos töltésű és v sebességű töltéshordozók

$$j = nqv \quad (1)$$

áramsűrűséget hoznak létre, ami egy A felületen

$$i = \int_A j dA = \int_A nqv dA \quad (2)$$

áramot eredményez. Ha egyidejűleg többféle töltéshozó vesz részt a vezetésben, azok hatása összegződik.

Az elsőrendű vezetőkben – vagyis a fémekben – az áram hordozói elektronok, a másodrendűekben (elektrolitok, ionizált gázok) főleg ionok és részben elektronok. Szigetelőanyagokban a környezetükhöz kötött töltéshordozók korlátozott elmozdulása (polarizáció) jelenti az áramot, váltakozó feszültség esetében e töltéshordozók rezgése hozza létre az eltolási áramot. Az eltolási áram és a feszültség között 90° -os fáziseltolódás érvényesül, mert a feszültség (és a térerősség) csúcsértékénél vannak a töltéshordozók a szélső helyzetben, és ilyenkor a v sebesség zérus, a feszültség polaritásváltásakor (vagyis a nullaátmenetnél) viszont maximális. A töltéshordozók mozgása megvalósítható anyagtranszporttal is, például az elektrolízisen alapuló eljárásokban (színesfémkohászat, vegyületek bontása, galvántechnikák stb.) és az elektrosztatikus technológiáknál (festés, fémcsórás, porleválasztás stb.) töltött gyökök, kolloid vagy makroszkopikus méretű anyagi részecskék áramlanak, egyes elektrosztatikus generátorok működése pedig feltöltött szigetelőszalagok elmozdulásán alapul. A félvezetők átmenetet képviselnek a vezetők és a szigetelők között, ezekben a töltéshordozók nem mindig anyagi részecskék. A környezet létrehozhat olyan erőter-konfigurációt, amelyben egyes pontok hatása kifelé megegyezik töltéshordozók hatásával, és ezek a pontok egy külső térerő hatására elmozdulnak (lyukvezetés).

A töltéshordozók vándorlását erők okozzák, leggyakrabban villamos erőterben mozognak, ilyenkor az erő a q töltés és az E villamos térerősség szorzata. Az erőter két pontja között a töltéshordozó s út menti mozgása

$$w = \int_1^2 qEds = q(\varphi_2 - \varphi_1) = qu \quad (3)$$

munkát képvisel, ahol az u feszültség az erőter két pontján érvényesülő φ potenciálok különbsége. Mozdó töltéshordozókra a mágneses erőter is hatással van, amit kihasználnak a töltéshordozók pályájának befolyásolására (részecskegyorsítókban vagy az elektronoptikában). A villamos áram által létrehozott mágneses térre alapul az indukciót hasznosító gépek és berendezések működése. A villamos és mágneses erőter szoros kölcsönhatásban van, aminek különösen a nagyfrekvenciás sugárzásoknál van nagy jelentősége. Minél nagyobb a töltéshordozók tömege, annál inkább érvényesülnek a nem elektromágneses erőhatások (gravitáció, centrifugális erő, diffúzió, ozmózis stb.), amit szintén különféle technológiákban hasznosítanak.

Az áramokat működtető villamos erőteret többnyire töltéshordozók szétválasztásával kialakított feszültség ébreszti, ami sokféle módon hozható létre. Különböző anyagok érintkezésénél $\Delta\varphi$ potenciálgát alakul ki, aminek két oldalán a potenciál φ_1 illetve φ_2 . Ezen alapul például a kémiai áramforrások, az elektrosztatikus generátorok és az elektronika félvezetőinek a működése.

Potenciálkülönbség előidézéséhez energiaközléssel (hevítéssel, részecskék vagy fotonok ütközésével) is kiléptethetők elektronok atomokból, illetve fémek felületekből, ha a közölt energia meghaladja az ionizációs, illetve a potenciálját leküzdéséhez szükséges munkát. Így működnek a fény-, nap-, hőelemek, katódsugárcsőek, piezoelektromos eszközök stb. A mágneses térben mozgó töltések indukálta potenciál a működési alapja a forgógépes áramforrásoknak (dinamó, generátor).

A feszültség időbeli lefolyását sokféleképp lehet kialakítani. Az elektrotechnika kezdetét az egyenáram dominálta, mivel csak egyenfeszültséget szolgáltató kémiai áramforrások álltak rendelkezésre. Az első forgógépes áramforrások, a dinamók is egyenfeszültséget szolgáltatottak. Nagyobb egyenáramú teljesítményt a váltakozó áram egyenirányításával is biztosítani lehet. Egyenárammal működtek az első villamosenergia-szolgáltató rendszerek, szerepüket csak lassan szorította háttérbe a váltakozó áram. Néhány területen azonban az egyenáram megőrizte a szerepét, így az elektrokémiai technológiákban (színesfémkohászat, galvanotechnika, anyagok leválasztása a vegyiparban) és a vontatásban. Egyenárammal működnek a vezetékhez kötött városi járművek (metró, villamos, trolibusz), és a legtöbb nagyvasúti mozdony. Az elektronikus eszközök és készülékek is egyenfeszültségű táplálást igényelnek. Az erősáramú félvezetők tovább bővítették a kört, bekövetkezett a finoman szabályozható egyenáramú hajtások reneszánsza. Alkalmazznak egyenáramot villamos energia nagy távolságú szállítására, valamint az eltérő frekvenciájú hálózatok aszinkron kapcsolatához. A frekvenciákban mutatkozó eltérések okozta üzemzavarok elkerülésére néhány éven keresztül az osztrák és a magyar villamosenergia-rendszer egyenáramú betétén keresztül kapcsolódott össze.

A villamosenergia-átvitelben azonban a váltakozó feszültség vált uralkodóvá, amelynél az U_m csúcserőértékű, f frekvenciájú és $\omega = 2\pi f$ körfrekvenciájú feszültség, u pillanatértéke a t időben szinuszosan váltakozik:

$$u = U_m \sin \omega t \quad (4)$$

A feszültséget többnyire az U effektív értékével jellemzik, ami váltakozó feszültségnél a pillanatértékek teljes szinuszhullámára számított négyzetes átlaga, egyenfeszültségnél a csúcserőérték. A feszültség és az áram I , illetve I effektív értékei között a

$$I = \frac{U}{Z} \quad (5)$$

egyenlet teremt kapcsolatot, ahol Z az áram útjába eső áramköri elemeket reprezentáló impedancia, ami egyenáramnál az ohmikus ellenállás, váltakozó áramnál a kapacitásokat és induktivitásokat is figyelembe vevő komplex jellemző. Hasonló kifejezés érvényes az áram i és a feszültség u pillanatértékei között.

A villamos folyamatok P teljesítménye

$$P = iu = \int_V jEdV \quad (6)$$

a képlet mind a pillanatértékekre, mind az effektív értékekre érvényes. Változó áram esetében a feszültség és az áram között φ fáziseltolás is kialakulhat, az áramkörben érvényesülő induktivitásoktól (L) és kapacitásoktól (C) függően. Ezek a paraméterek az áramköri elemek (vezetékek, fogyasztó berendezések) tulajdonságaitól függenek. A $\cos\varphi$ teljesítménytényező figyelembevételével a teljesítménynek van munkavégzésre hasznosítható

$$P_h = UI\cos\varphi \quad (7)$$

hatásos, és

$$p_m = UI\cos(2\omega t + \varphi) \quad (8)$$

meddő összetevője, az utóbbi az idő során csak leng a rendszerben, fedezve az induktivitások és kapacitások energiáját. A hasznos energiát a 7. képlet szerinti teljesítmény integrálja, szolgáltatja a figyelembe vett időtartamra. A φ szög növekedése csökkenti a vezetéken továbbítható hasznos teljesítmény mértékét, amit a fáziseltolódást okozó reaktancia kompenzálásával lehet ellensúlyozni, ennek megvalósítására tarifális eszközökkel ösztönzik a fázishelyzetet rontó fogyasztókat. A hálózatok tulajdonságai, valamint a fogyasztóberendezések visszahatása eltéréseket (felharmonikusok, vibrálás, aszimmetria, amplitúdó torzulás stb.) okozhat a váltakozó feszültség hullámalakjában, valamint zavaró jeleket (impulzusok, letörés, szünet, túlfeszültség) idézhet elő. Ezek az anomáliák kedvezőtlenül érintik a berendezések működését, vagyis rontják a villamos energia minőségét, megengedett mértéküket szabványokban és előírásokban határozzák meg.

Az áramköri elemeket egymáshoz és a környezethez képest úgy kell villamosan szigetelni, hogy biztonságosan elviseljék a fellépő feszültséget, aminek legnagyobb értéke az áramköri elemek kapcsai között ébred. Összekapcsolni csak azonos feszültségre szigetelt berendezéseket, illetve elemeket lehet. A hálózatokat és a berendezéseket a névleges feszültségükkel jellemzik, a csereszabotosság érdekében az alkalmazható értékeket nemzetközi szabványok írják elő, a Magyarországon használatos feszültségek a 2. táblázatban láthatók. A kisfeszültségek tartománya 1000 voltig terjed, ezen belül helyezkednek el a robbanás-, vagy érintésveszélyes helyeken, valamint a játékoknál alkalmazott törpefeszültségek (6, 12, 24, 48 V). A hordozható elektronikus fogyasztóberendezések tápfeszültsége néhány volt, de a fél-

2. táblázat

Szabványos villamos feszültségek Magyarországon

a) Kisfeszültségek		b) Közép- és nagyfeszültségek	
Egyenfeszültség, V	Váltakozó feszültség, V	Legnagyobb feszültség, kV	Névleges feszültség, kV
6	6	3,6	3
12	12	7,2	6
24	24	12	11
36		24	20
48	48	36	30
60		40,5	35
72		145	120
96		245	220
110	110	420	400
220	230	800	750
440	400/230*		
	690/400*		
	1000*		

c) Vontatási rendszerek	
Egyenáramú, V (névleges)	Egyfázisú váltakozó áramú, V (névleges)
600	
750	
1500	
3000	
	15 000**
	25 000***

* háromfázisú rendszerek

** 16 2/3 Hz

*** 50 Hz

vezető elemek vezérlésére még kisebb feszültségek is használatosak. A nagyfeszültségek között megkülönböztetnek középvezültséget (1–60 kV), valamint ultra nagyfeszültséget (>400 kV). Mivel a fogyasztóberendezések rendeltetésszerűen csak a feszültség meghatározott intervallumban működnek, a szabványok rögzítik a hálózati feszültség megengedhető eltéréseit is.

A váltakozó áram legfőbb előnye, hogy feszültsége nagy értékre transzformálható, ami biztosítja a szállíthatóságát nagy távolságra, mivel változatlan teljesítmény esetében nagyobb feszültséghez kisebb áram tartozik, és ezzel egyrészt csökken a szállítás ohmikus vesztesége, másrészt kisebb a vezeték menti feszültségesés. A jellemzők szinuszosan változó lefolyása további technikai előnyökkel jár, például az áramnak van nulla értéke, amikor könnyen megszakítható. Nagyobb teljesítmény átvitelére általában háromfázisú váltakozó áramot használnak. Ilyenkor a három fázisvezetőben a villamos jellemzők fázishelyzete egymáshoz képest 120° -kal eltér, a három áram, illetve feszültség eredője zérus. Így a közös visszavezető áramkör elhagyható, ami a vezetéképítésben tetemes beruházási költség megtakarítását teszi lehetővé. Az ultra nagyfeszültségű hálózatok transzformátorainak csillagpontját (a három fázis tekercseinek közös pontját) földelik, hogy egyrészt rögzítsék a fázisok potenciálját a földhöz, másrészt mérsékeljék a zárlatok áramát. A 110–400 kV tartományban a csillagpontkezelés nemzetközi gyakorlata nem egységes, a magyar villamosenergia-rendszert a közvetlen földelés jellemzi.

Szigorú előírások vonatkoznak a villamosenergia-rendszerek frekvenciájára. A hatalmas kiterjedésű villamosenergia-hálózatok minden pontjában azonos frekvenciaértéknek kell érvényesülnie, ez Európában 50 Hz, Észak-Amerikában és néhány más tengeren túli területen 60 Hz. A hálózati frekvencia állandósága az együttműködő rendszer stabilitásának alapvető követelménye, ennek érdekében valamennyi erőmű generátoránál a fordulatszámot szinkronizálni kell. Ha a rendszer terhelése meghaladja az erőművek összesített teljesítményét, a rendszer törekvése egy új egyensúlyra csökkenti a generátorok fordulatszámát és ezzel a rendszer frekvenciáját. A frekvenciacsökkenés nemcsak a szolgáltatott teljesítmény csökkenését jelenti, hanem érinti egyes – a frekvenciára kényes – fogyasztóberendezések működőképességét, sőt forgógépek mechanikai túligénybevételét is előidézheti. A KGST-rendszer szinte krónikus teljesítményhiánya gyakran okozott megengedhetetlenül alacsony frekvenciát, ami akadálya volt a kelet- és nyugat-európai villamosenergia-rendszerek közvetlen összekapcsolásának. A nyugat-európai hálózatok UCTE rendszerében a frekvencia ingadozására nagyon szigorú tűréshatárokat ($-0,1$ illetve $+0,05$ Hz) szabnak meg, csatlakozásunk egyik feltétele volt, hogy képesek legyünk ehhez igazodni. Ennek érdekében nagyobb erőművi turbináinkat olyan teljesítményszabályozó automatikákkal kellett ellátni, amelyek biztosítják a frekvencia kívánt stabilitását.

Más frekvenciájú rendszerek is használatosak, egyes országok vasúti hálózatainak frekvenciája $50/3 = 16\frac{2}{3}$ Hz, középfrekvenciás kemencék néhány 100 Hz-ig terjedő sávban működnek, fogyasztóberendezésekben sok másféle frekvenciát is alkalmaznak, az információtechnikában 0 és THz között szinte minden frekvenciaérték használatos. Egyes technológiákban időben más lefutású feszültségek (impulzus, fűrészfog stb.) is előfordulnak.

Korábban a híradástechnika területének tekintett gyengeáramtól megkülönböztetve csak az erősáramú elektrotechnikát tekintették az energetika részének, ahova csak egyenáramú és a lassan váltakozó áramú folyamatok tartoznak. Ez a szemlélet ma már túlhaladott, hiszen az erősáramú berendezések között megjelentek rádiófrekvenciával, mikrohullámmal, lézerrel és más sugárzásokkal működő készülékek, félvezető egyenirányítók, nem beszélve a hálózatokon alkalmazott mérés- és irányítástechnika elektronikus eszközeiről. És ma már az információtechnikában sem kivételesek MW teljesítményű berendezések, sok kV-os feszültségek és nagy áramok.

Az elektromágneses jelenségek frekvenciaspektrumát a 2. ábra mutatja. A kis- és nagyfrekvenciás jelenségek határát 9 kHz-nél vonják meg. A kisfrekvenciás tartományban a legalsó (<30 Hz) a statikus és nagyon lassan változó (extrém kis) frekvenciás folyamatok területe, 30 és 300 Hz közé esnek az ipari frekvenciák, 300 Hz és 9 kHz közé a hangfrekvenciák. A kisfrekvenciás váltakozó áramú jelenségeknél a térjellemzők időben lassan változnak, feltételezhető, hogy a berendezések minden pontjában azonosak. E kvázistacionárius folyamatok koncentrált áramköri elemekkel tárgyalhatók. Ez a megközelítés addig szabatos, amíg a berendezések mérete nem mérhető össze a hullámhosszal (az 50 Hz félhullámhossza 3000 km), ezért nagyon hosszú távvezetéseknél már figyelembe kell venni a terjedés időbeli lefolyását is.

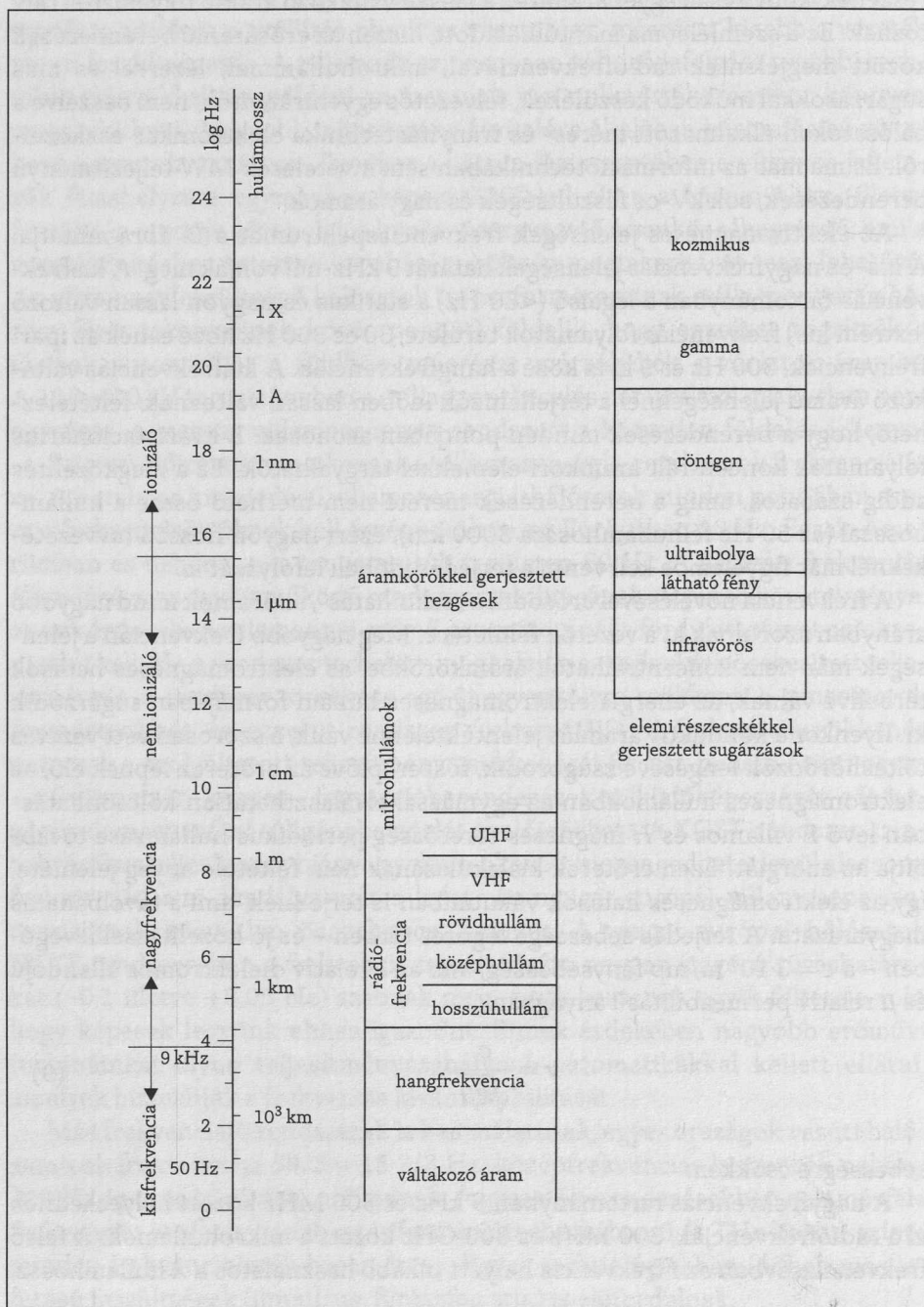
A frekvencia növelésével erősödik a „szkinhatás”, az áramok mind nagyobb arányban szorulnak ki a vezetők felületére. Még nagyobb frekvencián a jelenségek már nem koncentrálhatók áramkörökbe, az elektromágneses hatások térbelivé válnak, az energia elektromágneses hullám formájában sugárzódik ki. Ilyenkor a konduktív áramlás jelentéktelenné válik, a szorosan vett vezetés töltéshordozók lengésévé zsugorodik, főszereplővé az erőterek lépnek elő, az elektromágneses hullámokban az egymással elválaszthatatlan kölcsönhatásban levő E villamos és H mágneses térerősség periodikus hullámozása továbbítja az energiát. Ezen erőterek kialakulásának nem feltétele anyag jelenléte, így az elektromágneses hatások vákuumban is terjednek, ami a távolbahatás magyarázata. A terjedés sebessége légüres térben – és jó közelítéssel levegőben – a $c = 3 \cdot 10^8$ m/mp fénysebesség, ami az ϵ relatív dielektromos állandójú és μ relatív permeabilitású anyagban

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (9)$$

sebességre csökken.

A nagyfrekvenciás tartományban 9 kHz és 300 MHz között helyezkednek el a rádiófrekvenciák, 300 MHz és 300 GHz között a mikrohullámok. A felső frekvenciasávban az f frekvencia helyett inkább használatos a λ hullámhossz,

Elektromágneses jelenségek spektruma



a kettő közötti kapcsolatot a

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10)$$

képlet írja le.

Az infravörös sugárzás területe 1 mm (~300 GHz) és 780 nm (~0,38 PHz) között van, 780 nm és 380 nm közé esik a látható fény, 380 nm és 10 nm között helyezkedik el az ibolyántúli (uv) sugárzás tartománya. A röntgensugarak (γ -sugarak) hullámhossza 10 nm és 1 pm közé esik, a kozmikus sugárzásnak vannak ezen túl eső összetevői is. Az anyag kettős természetének megfelelően hullámokként tárgyalhatók a részecskesugárzások is. A 100 nm-nél (~3 PHz) rövidebb hullámhosszú sugárzások ionizáló hatásúak, mivel

$$w = hf \quad (11)$$

energiájuk ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js a Planck állandó) gyakran meghaladja az atomok ionizálási energiáját. A magreakciókat általában ionizáló sugárzások kísérik.

A kisfrekvenciás áramforrások többnyire a mágneses térben mozgó töltések indukálta potenciált hasznosítják, ez a működési alapja a generátoroknak. A nagyfrekvenciákat rendszerint a kívánt frekvenciára hangolt L induktivitásból és C kapacitásból álló rezgőkörökkel állítják elő, melyek feszültsége

$$u = U_{\max} e^{-\delta t} \cos(\omega t - \varphi) \quad (12)$$

függvény szerint alakul, ebben a rezgőkör körfrekvenciája az R ellenállás figyelembevételével

$$\omega = \sqrt{\left[\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

és csillapítása:

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (14)$$

A veszteségek ellensúlyozására a rendszert gerjesztetni kell, amire félvezetős, illetve elektroncsöves áramkörök, piezoelektromos kristályok, lengésbe hozott tértöltések (klisztron, magnetron) szolgálnak.

Az 1 mm és 10 nm közötti tartományban az elektromágneses sugárzásokat az anyagokat alkotó elemi részecskék hőmozgása is létre tudja hozni. Egy T hőmérsékletű test széles frekvenciatartományban bocsát ki elektromágneses hullámokat, melyeknek ρ_f sűrűsége az f és $f + df$ közötti frekvenciatartomány-

ban a $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/fok Boltzmann állandó figyelembevételével

$$\rho_f = K_1 f^3 \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (15)$$

Az infravörös tartományban $hf \ll kT$, a (15.) képlet

$$\rho_f = K_2 f^2 kT \quad (16)$$

alakra egyszerűsíthető. Az ultraibolya tartományban viszont $hf \gg kT$, így az egyszerűsítés eredménye

$$\rho_f = K_3 f^3 e^{-\frac{hf}{kT}} \quad (17)$$

A sugárzó test egységnyi felületéről kilépő teljesítmény

$$P_1 = K_4 T^4 \quad (18)$$

és a kisugárzott spektrumnak

$$\lambda_{\max} = \frac{K_5}{T} \quad (19)$$

hullámhossznál maximuma van, a spektrális eloszlás a hőmérséklet függvénye (a hőhordozókkal foglalkozó fejezet 3. ábrája). A 15–19. képletekben a K_1 – K_5 együtthatók kizárólag fizikai állandóktól függenek (Planck-állandó, Boltzmann-állandó, fénysebesség), ami csak abszolút fekete test esetében ad helyes eredményt, valóságos sugárzó testeknél az együtthatókat módosítják a test színét, felületének minőségét leíró anyagjellemzők.

Kereken 0,3 PHz ($\sim 1 \mu\text{m}$) felett a sugárzások forrásai többnyire az atomok állapotváltozása révén kiszabadított fotonok. A foton jellegét az állapotváltozás

$$W_1 - W_2 = hf = hc/\lambda \quad (20)$$

energia különbsége szabja meg, ahol h a Planck-állandó, f a foton frekvenciája, és λ a sugárzás hullámhossza. Mivel az atomokban és molekulákban az elemi részecskék csak diszkrét energiaállapotokat tölthetnek be, a változások kvantáltak, ennek megfelelő energiamennyiség közlése szükséges a foton kiléptetéséhez. A látható fénytől a röntgensugarakig terjedő sugárzás fotonjait az elektronok állapotváltozásai (gerjesztés, ionozás) okozzák az atomok elektronhéjában, a γ -sugárzáshoz már az atommagokban van szükség változásokra (radioaktív bomlás, magreakciók) és ugyanez a helyzet a részecskesugárzásoknál (α , β , p , n sugarak) is. Ezek energiaviszonyainak tárgyalásához már

$$W = mc^2 \quad (21)$$

egyenletére van szükség.

Villamosenergia-ellátás

Mire jó ez, kérdezte Anglia miniszterelnöke, amikor megtekintette Faradaynek az indukciót bemutató kísérletét. Nem tudom – hangzott a szarkasztikus válasz –, de egyszer még adózás tárgya lesz. A jóslat beteljesülése felülmúlt minden képzeletet, a villamosság alapvetően megváltoztatta az emberiség életkörülményeit. Villamos árammal működtetett eszközök és gépek tömege vesz körül bennünket otthonunkban, munkahelyünkön, a közlekedésben, szabad időnk eltöltésénél, és az elektrotechnika lehetőségeire alapulnak az informatika eszközei is. Szinte évente jelennek meg új lehetőségek a villamosság hasznosítására, és ennek bővülése még távolról sem ért véget. Hatalmas iparágak jöttek létre az elektrotechnika eszközeinek és berendezéseinek előállítására, és hatalmas iparágak létesültek a működtetésükhöz szükséges energia biztosítására.

A villamosság gyakorlati alkalmazása az információtechnika területén indult el a távíró és a telefon bevezetésével. E vezetékes rendszerek tapasztalatai egyben megalapozták az energiaátvitel későbbi lehetőségét, ami a villanyvilágítás megteremtésével kezdődött. Ívlámpákat már a 19. század közepe óta használtak egyes létesítmények (színházak, üzemcsarnokok, sportpályák stb.) kivilágítására, majd színre lépett a közvilágítás az utcákon (elsőként Párizsban és Philadelphiában). Magyarország is az úttörők közé tartozott, 1878-ban már kivilágították a Ganz-gyár öntödéjét, majd a Császárfürdőben, az óbudai tornacsarnokban és a városligeti jégpályán is megjelent a villanyvilágítás. Senki sem sejtette, hogy ezekből a műszaki kuriózumoknak tekintett szerény létesítményekből kontinenseket behálózó villamosenergia-rendszerek fognak kinőni, amelyek hajszálerein keresztül szakadatlanul áramlik majd az energia minden otthonba és munkahelyre. Az ívlámpák azonban nem terjedtek el széleskörűen, vakító fényük, a szénelektrodák rövid élettartama, tűzveszélyességük, nehézkes kezelésük és bonyolult szabályozásuk miatt. A megoldást a szénszálas izzólámpa feltalálása jelentette, amit Edison Menlo-parkbeli laboratóriumának kertjében 1879 szilveszter éjszakáján mutatott be. Ezzel teljessé vált a villamosenergia-rendszerek létrehozásának eszköztára, hiszen a dinamó feltalálása (1867) már megteremtette a megfelelő áramforrást, a vezetékes elosztórendszer alkalmazása szinte kézenfekvő volt a távírótechnikában szerzett tapasztalatok alapján, és kifejlesztették a szükséges kapcsolókat és mérőeszközöket is. A teljes rendszert Edison 1881-ben a párizsi világkiállításon demonstrálta az operaház kivilágításával. Az első közcélú erőművet is

Edison hozta létre 1882-ben (Pearl Street, New York), amelyben dugattyús gőzgépekkel hajtott dinamókkal egyenáramú teljesítményt szolgáltatott egy körzet világításához. Már a következő évben másutt is megjelentek az első kis villanytelepekre támaszkodó, 1-2 km²-nyi területet ellátó rendszerek, amelyek példáját sok város követte. Magyarországon az első villamos közvilágítás 1884-ben Temesvároton létesült, illetve a mai országterületen 1888-ban Mátészalkán.

A kialakított rendszerek hatósugarát az alkalmazott kis feszültség miatt a vezetékek mentén a feszültségesés korlátozta. A francia mérnökszövetség színvonalához méltatlan utópiának minősítette Deprez-nek azt a kijelentését, hogy a villamos vezetékeken átvihető energia nagyságát és az átvitel távolságát tetszőlegesen növelni lehet a paraméterek megfelelő megválasztásával. A korlátokat a transzformátor feltalálása oldotta fel (1885), ami lehetővé tette az átvitel feszültségének, és ennek révén a szállítás távolságának ugrásszerű növelését. Ehhez azonban egyenfeszültség alkalmazása helyett váltakozó feszültségre kellett áttérni, ami nem kevés vélemény- és érdekütközéssel járt (még Edison és Siemens is ellenezte). A váltakozó áramú energiaátvitel elterjesztésében a Ganz-gyár mérnökei (Zipernowsky, Déry, Bláthy) a transzformátor feltalálásán túlmenően is úttörő szerepet játszottak, nemcsak itthon, hanem Európa más országaiban is.

A következő évtizedekben az elektrotechnika a műszaki fejlődésnek egyik leglátványosabb és legdinamikusabb korszakát teremtette meg. A világítás mellett az elektromosság sok más alkalmazási lehetőségét is kialakították, a villamos motorok kibővítették a villamos energia alkalmazását gépek hajtására, járművek vontatására, kifejlődött a villamos hőfejlesztés, az elektrokémia, az elektrokohászat és számos más alkalmazási terület. A villamosság a gazdaság és a mindennapi élet nélkülözhetetlen energiaforrásává vált, alkalmazása rohamosan bővült, a villamos energia felhasználása azóta is mintegy kétszer olyan gyorsan nő, mint az összes energiafelhasználás eredője. A kis villanytelepekből nagyságrendekkel nagyobb teljesítményű hatalmas erőművek nőttek ki.

A villamos energiát szolgáltató vállalatok világszerte gombamód szaporodtak, a századforduló táján az erőműveket a fogyasztók közelébe telepítették, mert egyszerűbb és olcsóbb volt a tüzelőanyagot odaszállítani. Az erőművekhez egymástól elszigetelt különálló hálózatok kapcsolódtak. Ahogy az erőművek teljesítménye nőtt, mind gyakrabban mutatkozott gazdaságosabbnak telepítésük a bányák mellé, és egyre kiterjedtebb térség fogyasztóit kiszolgáló ellátási rendszerek alakultak ki. Magyarországon az erőművek mind a városokban, mind a szénbányák közelében megjelentek. A villamosenergia-ellátásban szerepet játszó vállalatok – a villamos energiát fejlesztő erőművek, az áramot onnan elszállító átviteli hálózatok üzemeltetői, az elosztóhálózatokat működtető és a fogyasztókat kiszolgáló szolgáltatók – gyakran technikai vertikumokban integrálódtak.

A nagyobb feszültségek lehetőséget teremtettek az ellátás sugarának növelésére, az összeérő hálózatok idővel regionális rendszerekké kapcsolódtak össze, kiaknázták a együttműködésben rejlő előnyöket. A kooperáció üzemzavaroknál módot ad egymás kiegészítésére, lehetővé teszi erőművekben a tartalékok mértékének csökkentését, és alapot ad előnyös villamosenergia-szállítási megállapodásokra. A fejlett országokban a regionális rendszerekből a két világháború között országos villamosenergia-rendszerek fejlődtek ki. Néhány országban – például Franciaországban, az Egyesült Királyságban, Olaszországban, Spanyolországban – egyetlen állami tulajdonú nagy monopol-szervezetben koncentrálódott a villamosenergia-ellátás. Másutt – így Németországban, az USA-ban, Kanadában – néhány nagy és tőkeerős regionális vállalat között oszlott meg a feladat, amelyek tulajdonlásában gyakran a szövetségi államok/tartományok is jelentős szerepet vállaltak. A lokális szolgáltatók többnyire függetlenek, nemritkán az önkormányzatok tulajdonában maradtak, tekintettel a tevékenység közüzemi jellegére.

Magyarország villamosításában a 2. világháborút követően mintegy két évtizednyi lemaradást kellett bepótolni, mert addig településeinknek alig több mint negyede volt bekapcsolva a villamos hálózatokba. Az államosítás (1949) nyomán elindult az együttműködő villamosenergia-rendszer és az országos hálózat kiépítése, a nagyobb erőművek 120 kV-os vezetékekkel történő összekapcsolásával. Egy erőteljes villamosítási programmal sikerült az ország településeit bekapcsolni a hálózatba. Az utolsó községbe, Aporligetre 1963-ban jutott el az áram. Az 1960-as évek végére gyakorlatilag minden lakásba sikerült eljuttatni a villanyt. A villamosenergia-ipar vállalatait az 1950-es években fokozatosan egy nagy centralizált szervezetben egyesítették, aminek megnevezése és cégformája időnként változott, tevékenységének csúcát az 1980-as évek végén érte el, amikor 6,5 GW-os csúcsterheléssel 40,6 TWh/év energiát szolgáltatott, és több mint 5 millió fogyasztót szolgált ki. Ezt követően az országos rendszert decentralizálták, jogutódja az MVM (Magyar Villamos Művek Rt.) tulajdonában maradt az alaphálózat, az atom- és néhány kisebb hőerőmű.

A 20. század második felében a technikai integrálódás átlépte az országhatárokat, a nemzeti rendszerek számos gazdasági és műszaki haszonnal járó együttműködő nemzetközi rendszerekké kapcsolódtak össze. Az együttműködéssel kiaknázzhatók azok a különbségek, amelyek az energiafelhasználás időbeli lefolyásában országonként jelentkeznek, mert eltérő a gazdasági szerkezet, a fogyasztói szokások, a munkaidő-beosztás, az időjárás és számos más körülmény, még a kelet-nyugati irányú időzóna-eltérésnek is van szerepe. Mindez a kapacitáskihasználás optimalizálására ad módot, hiszen eltérő időpontokban jelentkeznek a csúcsterhelések és a kis terhelésű időszakok, az együttműködő rendszer csúcsterhelése kisebb mint a résztvevők csúcsterhelésének összege. A kooperáció elősegíti a költségek minimalizálását, értékesí-

teni lehet a felesleges kapacitásokat, kompenzálható a vízerőműveknél a vízjárás egyenetlensége, még az erőműépítés koordinálása sem lehetetlen elképzelés, és üzemzavaroknál nagy jelentősége van a kiségités lehetőségének.

Európában több nagy együttműködő rendszer alakult ki. A Nyugat-Európai villamosenergia-rendszerek a második világháború után alakították meg az UCPTE-t (Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity, Villamos Energiatermelést és Szállítást Koordináló Társulás), 2000-ben tevékenységéből a villamosenergia-piac liberalizálása miatt törölték a termelés koordinációját, ezért nevét UCTE-re (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) módosították, összesített teljesítménye 300 GW. Az észak-európai államok együttműködését a NORDEL, a dél-európaiakét a SUDEL koordinálja, energetikai kapcsolatban az UCTE-vel. Kelet-Európában a KGST (Kölcsönös Gazdasági Segítség Tanácsa) rendszer jött létre a Prágában működő CDU (Centralnoje Diszpecserszkoje Upravlenyje) központi teherelosztóval. Magyarország a volt szocialista országokkal együtt a KGST-rendszerben vett részt, ennek felbomlása után négy ország (Csehország, Lengyelország, Magyarország, Szlovákia) létrehozta a CENTREL-t. Az ezredforduló táján a CENTREL tagjai az UCTE-rendszerhez csatlakoztak. Míg a KGST-együttműködés alapvető célja nagymértékű energiaszállítások bonyolítása volt, az UCTE-rendszer főfeladata a kölcsönös kiségités.

Az 1990-es években új fejleményként megindult a fejlett országokban a villamosenergia-ellátás liberalizálása, a versenytől az ellátás költségeinek csökkenését és a fejlődés felgyorsulását várják. A piaci módszerek kialakítása egyrészt a monopóliumok megszüntetését jelenti, másrészt az állami befolyásolás visszaszorítását (dereguláció). A liberalizálással a villamosenergia-ellátás közüzemi szolgáltatásból kereskedelmi tevékenységgé válik, és a villamos energia piaci áru lesz. Korábban a vállalatok célfüggvénye a fogyasztói szükségletek kielégítése volt, természetesen gazdasági hasznuk sem volt mellékes. Számos országban – Magyarországon is – törvény írta elő az ellátási kötelezettséget, ami a piaci viszonyok teljes körű megteremtésével megszűnik.

Az Európai Unió élharcosa a liberalizálásnak, a versenytől az energiaárak csökkenését reméli, ami feltétele annak, hogy az európai ipar versenyképessé váljon az amerikai és japán iparral. Sokéves vita eredményeképp kötelező erejű direktívában írták elő a tagállamok villamosenergia-piacának fokozatos megnyitását, aminek során a fogyasztók évenként növekvő köre szabadon választhatja meg, hogy kitől vásárolja a villamos energiát. A nem háztartási fogyasztók számára 2004 közepében szabták meg a teljes piacnyitás határidejét, amit 2007 közepéig a háztartási fogyasztókra is ki kell terjeszteni. Néhány tagállam már a piac teljes liberalizálását is befejezte.

A villamosenergia-piac kialakítása nem egyszerű feladat, egyrészt a hálózatok természetes monopóliumot jelentenek, mert párhuzamos rendszerek létesítése nemcsak értelmetlen, hanem gazdaságtalan is lenne. Ezért a piaci

mechanizmus kulcskérdése a villamosenergia-termelők és a fogyasztók – törvényben biztosított – megkülönböztetés nélküli szabad hozzáféréseinek lehetősége a villamos energiát szállító hálózatokhoz, természetesen megfelelő költségtérítés ellenében. Másrészt gyakran abból származik monopólium, hogy a technológiai vertikum fázisai hierarchikusan felépített, centralizált nagyvállalatok kezében összpontosulnak. E problémák feloldásának módja országoként változó, és általában több évre megosztva fokozatosan történik. A legjobb megoldás a vertikum felbontása független vállalatokra, egyes államok megelégednek a számviteli elkülönítéssel, és átmeneti megoldások (például szervezeten belül funkcionális vagy üzemviteli elválasztás) is előfordulnak. Természetesen verseny csak kellő számú – és nem nagyon eltérő alkuerejű – szereplővel hozható létre. Számos országban a szerkezetátalakítás együtt jár a nehézkes és költségérzéketlen állami tulajdonban levő vállalatok magánosításával is.

Magyarországon a monolit rendszer hierarchikus struktúrájának felbontása nagyrészt megtörtént, az állami tulajdon legnagyobb részét az 1990-es évek közepén magánosították, ennek során a legtöbb magyar erőmű és elosztó vállalat külföldi vállalatok tulajdonába került. Kérdés, hogy a korábbi monopóliumot nem fogja-e oligopólium felváltani, mivel az új tulajdonosok legnagyobb része nagy multinacionális vállalat, hatalmas gazdasági és szellemi erővel, kiterjedt nemzetközi háttérrel, gazdag piaci ismeretekkel és sok évtizedes érdekérvényesítő tapasztalatokkal. Vajon e vállalatok részvételével mennyire lehet valódi piaci versenyt megvalósítani, és velük szemben mennyire lehet a magyar társadalom érdekeit érvényesíteni? A Magyarországon jelenlevő multik (EdF, EON, RWE) a világ legnagyobb vállalatai közé tartoznak, részesei a nagy vállalatfúziós folyamatoknak, manőverezési lehetőségeik messze túlnyúlnak az országhatárokon. Egyidejűleg tevékenységük diverzifikálása is zajlik, más hálózati és energetikai tevékenységeket (vízellátás, csatornázás, távközlés, kábeltelevízió, gázszolgáltatás, szénhidrogénipar, bankrendszer stb.) is üzletkörükbe vonva. Az ebből származó komplex szolgáltatási lehetőségek a fogyasztókat hozhatják kiszolgáltatott helyzetbe, a gázellátás befolyásolásán keresztül pedig az erőművek versenye sérülhet. Az átviteli hálózat és nem jelentéktelen erőművi kapacitás birtokában az MVM-nél sem kizárt a törekvés a monopóliumra.

Csatlakozásunk az Európai Unióhoz azt jelenti, hogy a magyar energiapiac a közös uniós piac részévé válik, és az arra érvényes szabályokat kell alkalmaznunk. Ez megkívánja a korábban alkalmazott dotációk és keresztfinanszírozások felszámolását, és olyan tarifák kialakítását, hogy az árak fedezzék a költségeket. A villamos energia ára sok éven keresztül a magyar gazdaságpolitika neuralgikus kérdése volt. A tervgazdaságban az erősen nyomott árat eszköznek tekintették az életszínvonal és az ipari költségzínvonal befolyásolására. A rendszerváltás utáni kormányok pedig a társadalmi nyugalom érdekében

szorították le az árakat, aminek következtében az árak már nem fedezték a költségeket. A hiányt a költségvetésből fedezett dotációval kellett áthidalni, ami piaci viszonyok között viszont nem tartható gyakorlat. A reális árszínvonal kialakítása elkerülhetetlen, az ebből származó társadalmi feszültség enyhítésére differenciált – a háztartások fogyasztásának mértékétől függő árrendszer szolgál. További probléma, hogyan lehet felszámolni a hazai villamos energia árszínvonalának elmaradását a nyugat-európai színvonalhoz képest anélkül, hogy torzító hatása legyen az energiagazdálkodásra. Az ipari fogyasztóknál a különbség csupán 10-15%, de a háztartásoknál 40-50%-ot is elér.

Sok vita után hazánkban is elindult a fokozatos piacnyitás. Első lépésben, 2003-tól azok a nagyfogyasztók kaptak lehetőséget a szállítók szabad megválasztására, amelyeknek az éves villamosenergia-fogyasztása 6,5 GWh-t meghaladja, ezek összessége a hazai felhasználás 33-35%-át teszi ki. A versenypiac mellett néhány évig (legfeljebb 2007-ig) fennmarad a közüzemi ellátás is, hatósági áron, ellátási kötelezettséggel. Ez elsősorban a kisfogyasztók védelmét szolgálja, de a kétféle ellátási mód egyidejű működtetésére sok nehézség árnyéka vetül, amit a legegyszerűbben a minél gyorsabb teljes piacnyitással lehetne elkerülni. Az Európai Unió több tagállamában a teljes liberalizáció sem okozott gondot.

A villamosenergia-ellátás stratégiai jelentősége miatt, valamint a bonyolult piaci viszonyok működési feltételeinek meghatározása érdekében az állam teljesen nem vonulhat ki az árampiacról. Egyrészt a villamosenergia-ellátás jellegzetességei (nem tárolható, minden pillanatban biztosítani kell a termelés és fogyasztás egyensúlyát, a hirtelen változások labilitást okozhatnak, az áramszállítási útvonalak terhelhetősége korlátozott stb.) miatt a piac működésének jogi, gazdasági és műszaki körülményeit körültekintően szabályozni kell. Ennek során érvényesíteni kell a kereslet-kínálat alakulásától független társadalmi érdekeket is (ellátásbiztonság, fogyasztóvédelem, minőségbiztosítás, élet- és egészségbiztonság, vagyonvédelem, környezetvédelem, szociálpolitika, geopolitikai tényezők figyelembevétele stb.). Állami feladat azon hatóságok működtetése is, amelyek ellenőrzik a követelmények teljesülését, és szankcionálják a piaci szereplők nem megfelelő működését. A biztonságos működés szempontjából fontos tevékenységek engedélykötelesek. A villamosenergia-rendszer műszaki irányítására többnyire létrehoznak egy független rendszerirányító szervezetet, ami néha nagykereskedelmi feladatokat is ellát, és gyakran az átviteli hálózatnak is tulajdonosa. A rendszerirányító függetlensége és hatásköre kritikus kérdés, mivel megőrizve a rendszer műszaki stabilitását egyidejűleg kell a műszaki és gazdasági optimumot biztosítani. Feladata a forrásoldalon erőművi kapacitásokból vagy importból megfelelő tartalékok biztosítása, időben gondoskodnia kell a hálózat szükséges bővítéséről, és meg kell akadályoznia az ellátás biztonságát veszélyeztető ügyleteket.

Mindezt a piac szereplőinek részre nem hajló kezelésével kell megvalósítania. A feladat műszakilag sem egyszerű, hiszen az energiaáramlás útját egyidejűleg jelölik ki egyrészt a kereskedelmi megállapodások, másrészt az elektrotechnika Ohm- és Kirchhoff-törvényei.

A piaci verseny feltétele szabad villamosenergia-források elegendő kínálata. A hazai kínálat mind az energiahordozók, mind az erőművi kapacitások helyzete miatt nagyon korlátozott. Versenyt csak villamosenergia-importtól lehet remélni, aminek lehetőségét azonban nemzetközi távvezetékeink szabad kapacitása határolja be. Az import növelésének vannak negatív vetületei is. Egyrészt csökkenti az ország energetikai ellátásbiztonságát, mivel teljes energiaellátásunk eleve nyugtalanítóan nagy hányada származik importból. Másrészt növeli az ország fizetési mérlegének hiányát. A kínálati oldalon is érvényesül korlát. Jelenleg néhány európai ország rendelkezik ugyan kapacitásfelesleggel, de ez gyorsan eltűnik, ahogy a gazdasági, műszaki, környezetvédelmi és egyéb okokból bezárásra kerülő erőműveket pótolni kell.

A kereskedés módja többféle lehet, a termelő és fogyasztó közvetlen megállapodásának lehetőségétől közvetítő szervezet (pool vagy brókerek) kötelező igénybevételéig, az üzletkötés megengedett időhorizontja is heterogén, éves előretartástól néhány percesig. Van, ahol az áralku kötetlen, de megkötések is előfordulnak a kapacitáslekötés az ellátásbiztonság érdekében, maximális ár meghatározása, a rendszerirányító feljogosítása soron kívüli vásárlásokra a rendszerbiztonság érdekében stb. Bonyolítja a helyzetet, hogy az árutőzsdékhez hasonló spekulációs ügyletek (határidős kötések, opciók, arbitrázs stb.) a villamosenergia-piacon is lehetségesek, ami megzavarhatja a rendszer működését.

Valós verseny esetén a vállalatok a költségek leszorítására törekednek, kritikus kérdés, hogy ez ne menjen a fejlesztés és az üzemvitel színvonalának rovására. A nem eléggé előrelátó szabályozás Kaliforniában nem ösztönözte a beruházásokat, ennek következtében 2000–2001-ben súlyos helyzet következett be. A villamosenergia-rendszer sorozatosan összeomlott, mert az erőművi kapacitáshiány és az energiaimportot szolgáló vezetékek elégtelensége miatt a fogyasztói igényeket nem sikerült fedezni. Egyes vélemények a 2003-as nagy észak-amerikai villamosenergia-összeomlás gyökerét is a liberalizálás hibájában látják.

Az átmenet a piaci versenyre költségekkel jár. Ezen átállási költségek között a legjelentősebbek a „befagyott” költségek, azaz a leszorított értékesítési ár mellett a korábbi beruházások egy része nem térül meg. Eltérő e költségek meghatározásának a gyakorlata, valamint az érintett vállalatok, a fogyasztók vagy az adófizetők közül a költségviselők kijelölése (a nyereség terhére, az áramszámlán keresztül vagy a költségvetés dotációjából). Fajlagosan jelentős többletköltséggel jár a verseny lehetőségének kiterjesztése a kisfogyasztókra is (tájékoztatás, kapcsolás, mérés, elszámolás).

A villamosenergia-rendszerek működése

A fogyasztók jó minőségű, folyamatosan rendelkezésre álló villamosenergia-ellátást igényelnek. A jó minőséget a szabványokban a feszültség és áram jellemzőire előírt értékek teljesülése jellemzi, ami a villamosenergia-rendszer berendezéseinek és készülékeinek műszaki színvonalán, valamint az üzemvitel fegyelmen és műszaki kultúráján múlik. A jól működő villamosenergia-rendszerek megbízhatóan szolgáltatják az energiát, a fogyasztók ellátása csak kivételesen szakad meg, és a szolgáltatás viszonylag hamar helyreáll. Az ellátás folyamatosságának egyik feltétele, hogy rendelkezésre álljon a villamos energia fejlesztésére, illetve továbbítására, valamint elegendő tüzelőanyag, az erőművek működéséhez elegendő erőművi és hálózati kapacitás. Megfelelő tartalékokra is szükség van, hogy egyes elemek meghibásodásakor azokat helyettesíteni lehessen. A nagyfeszültségű hálózaton különféle hálózatvédelmek és automatikák másodperceken belül ki tudják iktatni a hibás elemeket, és az energiaszármazékok más útvonalra téríthetők át. Ezzel a lehetséges minimumra korlátozzák az üzemzavarok hatását és időtartamát. Az elosztóhálózaton – különösen annak kisfeszültségű szakaszán – nem mindig áll rendelkezésre tartalékút, ilyenkor elkerülhetetlen az üzemzavar elhárítására a manuális beavatkozás. Az ellátatlan fogyasztók („sötét címek”) visszakapcsolása a bejelentéstől számított néhány órán belül megvalósítható, ennek átlagos időigénye a karbantartás és hibaelhárítás színvonalát jellemző minőségi mutató. Mindezek eredménye, hogy az üzemzavari kiesések miatt nem szolgáltatott villamos energia mennyisége Magyarországon az értékesített energiamennyiség néhány tized ezreléke. A piaci verseny költségleszorító hatása ronthat a karbantartásnak és üzemzavar-elhárításnak ezen a színvonalán. A közgazdászok körében vitatott a nem szolgáltatott energia miatt keletkezett kár, a kiesett szolgáltatás értékét (VOL, Value of Lost Load) az amerikai energiapiacokon ~1600 Ft/kWh-val, az angoloknál ~700 Ft/kWh-val számolják.

A világ villamosenergia-termelésének 2002. évi helyzetét a 3. táblázat mutatja. A termelés 61%-a esik a fejlett világra, az Európai Unióra pedig 17%.

Eltekintve a vízen energiában nagyon gazdag országoktól (így az alpesi és a skandináv országoktól), a villamosenergia-rendszerek fejlődése hőerőművek telepítésével indult el. Ezekben a dugattyús gőzgépeket a 20. század elején hamar kiszorították az egyre nagyobb teljesítményű gőzturbinák. Napjainkra a legnagyobb gőzturbinák egységtelepítménye 4,5-5 GW_t-t is elérte, e hatalmas erőgépek csúcstechnikát képviselnek. A hőerőművek tüzelőanyaga kezdetben szinte kizárólag szén volt, később más tüzelőanyagok alkalmazása is teret nyert. Villamos energia fejlesztésére jóformán minden energiaszármazékba jöhet, a villamosenergia-rendszerek energiabázisának jelenlegi megoszlását a 4. táblázat jellemzi.

3. táblázat

Villamosenergia-termelés 2002-ben

Ország	TWh	Ország	TWh
Ausztria	66	Észak-Amerika	4 811
Belgium és Luxemburg	81	Argentína	85
Bulgária	43	Brazília	342
Csehország	76	Chile	42
Dánia	39	Kolumbia	46
Egyesült Királyság	386	Venezuela	96
Finnország	75	egyéb	218
Franciaország	559	Dél- és Közép-Amerika	829
Görögország	55	Egyesült Arab Emírátsok	42
Hollandia	96	Irán	131
Írország	26	Katar	11
Izland	8	Kuvait	36
Lengyelország	144	Szaúd-Arábia	140
Litvánia	18	egyéb	153
Magyarország	35	Közel-Kelet	512
Németország	561	Algéria	27
Norvégia	131	Dél-Afrikai Köztársaság	218
Olaszország	284	Egyiptom	85
Portugália	45	egyéb	153
Románia	55	Afrika	460
Spanyolország	245	Ausztrália	223
Svédország	148	Banglades	18
Svájc	67	Dél-Korea	335
Szlovákia	32	Fülöp-szigetek	48
Törökország	132	India	575
Európa	3 407	Indonézia	118
Azerbajdzsán	19	Japán	1 071
Belarusz	26	Kína	1 602
Kazahsztán	69	Malajzia	75
Oroszország	892	Pakisztán	82
Türkmenisztán	12	Szingapúr	35
Ukrajna	173	Thaiföld	108
Üzbegisztán	48	Tajvan	199
egyéb	150	Új-Zéland	38
FÁK	1 389	egyéb	96
Egyesült Államok	4 027	Ázsia	4 658
Kanada	590	világ	16 076
Mexikó	194		

A villamosenergia-termelés megoszlása

Energiabázis	Világ		Európai Unió		Magyarország	
	kapacitás	termelés	kapacitás	termelés	kapacitás	termelés
megoszlás, %						
szén	31	39	25	27	23	25,8
fűtőolaj	15	8	14	6	53,5	16,4
földgáz	20	17	16	18		21,8
atom	10	17	22	34	23	41,2
víz	22	17	21	12	0,5	0,5
egyéb megújuló	2	2	3	3	0,01	0
eredő érték	3,4 TW	15,4 PWh	573 GW	2,6 PW	8,3 GW	36,1 TWh

A szénerőműveket nagyvárosokban és nagyobb iparművekben létesítették, a tüzelőanyagot vasúton szállították. A villamos energia nagyobb távolságú szállíthatóságának kialakulásával a szénbányák mellé telepített erőművek is létjogosultságot nyertek, majd a tengeri szénszállítás fellendülése maga után vonta szénerőművek építését a kikötők közelében. A 4. táblázatból kitűnik a szénerőművek fontos szerepe, de az olcsó földgáz és a környezetvédelmi követelmények szigorodása erősen rontja a szénerőművek versenyképességét. A mélyműveléses termelés a legtöbb európai országban versenyképtelensége miatt leépülőben van, az új szénerőművek többsége a tengerentúlról importált olcsó szénre épül. Miután a szén domináns felhasználói az erőművek, sokat tesznek e szerep megőrzésére, egyrészt a szénárak leszorításával, másrészt a kibocsátások visszaszorításával. A szénár viszonylag stabilnak ígérkezik a világ hatalmas szénvagyonra és a jelentős túlkínálat következtében. A kibocsátások csökkentésére porleválasztókat, füstgáz kénmentesítőket, nitrogén-oxid-bontókat építenek be, kutatják a szén-dioxid kibocsátás korlátozásának módját. A környezetvédelem azonban nincs ingyen, a szénerőművek erre fordított beruházása elérheti az alapberuházás 40%-át, az 5. táblázat szerinti megoszlásban. A hazai viszonyokat is a mélyműveléses szénbányászat leépülése jellemzi, csak a Bükk alján fekvő, külfejtésre alkalmas lignit számíthat hasznosulásra, 1-2 GW erőmű-kapacitás ellátására. Valószínűtlen, hogy a másutt található lignit-előfordulások bányászatához megszerezhető a lakosság támogatása.

Az országok nagy részében és az Európai Unióban is ösztönzik a megújuló energiák hasznosítását. A megújuló energiák erőművi hasznosításában a víz-erőművek egy évszázada meghatározó szerepet játszanak. A vízenergiában gazdag országokban a vízerőművek kiépítésének a feltétele a villamos energia

5. táblázat

Környezetvédelmi beruházások megoszlása

Funkció	Megoszlás, %
füstgáz kénmentesítése	40
nitrogén-oxid-bontás	30
porleválasztás	7
zajcsökkentés	6
hulladékelhelyezés	5
vízisztítás	3
egyéb	9

szállíthatósága volt nagy távolságra. A vízerőművek között található a legnagyobb összteljesítményű erőművek és a legkisebbek (törpe vízerőművek). A környezetvédelmi mozgalmak azonban erősen megtépázták e megújuló és tiszta villamosenergia-fejlesztési lehetőség kilátásait. Állami támogatással (adókedvezmény, előnyös hitel- és kamatfeltételek, a fejlesztett villamos energia kötelező és kedvező átvételi ára stb.) a szélerőművek is megközelítik a versenyképesség határát, amit a nagy számban épülő létesítmények tanúsítanak. Magyarországon a megújuló energiák szerepe a villamosenergia-fejlesztésben nem jelentős.

A második világháború után kerültek előtérbe a nehéz frakciók és a lepárlási maradékok eltüzelésére a kőolaj-finomítók közelébe telepített erőművek. Az 1970-es évek kőolajválsága nyomán ezek csak a földgáz alternatív hasznosításával tudták megőrizni a helyzetüket. A folyékony szénhidrogének erőművi felhasználása erősen visszaszorult, főleg csúcserőművek ellátására és szénerőművek támasztó tüzelésére, valamint a földgáz helyettesítésére a földgázellátás téli csúcsidőszakában. A gázhálózatok kiterjedése lehetővé tette a földgáz erőművi eltüzelésének gyakorlatát, aminek az 1990-es években nagy lökést adott az áttörés a gázturbinák fejlesztésében. Az új technika eredményeinek felhasználásával kifejlesztett magas hőmérsékletet álló lapátanyagok és különleges szerkezetek nagyon jó hatásfokú, tartós üzemre alkalmas gázturbinák gyártására teremtettek lehetőséget, már 500 MW-os egységteljesítményt is sikerült elérni. A gázturbinákkal gyorsan és olcsón megépíthető gáz-gőz kombinált ciklusú földgáz-erőművek vezető szerephez jutottak az erőműépítésben. Míg a hagyományos gőzerőművek hatásfoka legfeljebb 35-38%-ot ér el, a kombinált ciklusnál ezt 55-58%-ra sikerült növelni. Ez a lehetőség gázturbinás fejlesz utólagos kiépítésével hagyományos erőműveknél is kiaknázható.

Az atomerőművek létesítése az 1970-es évektől öltött nagyobb arányokat. Nagy egységteljesítményük miatt telephelyük megválasztásánál a hűtővíz ren-

delkezésre állása perdöntő volt. A nagy fellendülést nagy visszaesés követte, gyors térhódításuk az antinukleáris közhangulat nyomására megtorpant, az ellenérzés napjainkban kezd oldódni.

A világtrendekhez hasonlóan a magyar fejlődés is szénbázison indult el, szén-erőműveink legnagyobb része (Borsod, Oroszlány, Mátra, Pécs, Tata-bánya) a szénbányák mellé települt. Az 1990-es években a veszteséggel küszködő bányákat beolvasztották az erőművekbe, de ettől sem a bányák, sem az erőművek kilátásai nem váltak kedvezőbbé. A kis egységteljesítményű gépekkel több évtizeddel ezelőtt épült erőművek a gazdasági versenyt sem állják, és a szigorodó környezetvédelmi követelményeknek sem tudnak eleget tenni. A környezetszennyezést a Mátrai Erőműben kénleválasztó beépítésével sikerült radikálisan csökkenteni, a többi szén-erőműnél ennek gazdaságossága valószínűtlennek tűnik. Az erőművek rekonstrukciójába vetett remények fluid tüzelésű kazánokkal sem váltak valóra, egy-két helyen a telephelyet szénhidrogén-tüzelésre áttérve sikerült megőrizni. Az iparművek mellé telepített nagy szén-erőművek (pl. Ajka) jövője sem ígéretes.

A nagy energiafogyasztó üzemek – többnyire hő és villamos energiát kapcsoltan szolgáltató – saját erőművei (Almásfüzitő, Csepel, Diósgyőr, Dunaújváros, Fűzfő, Kőbánya, Ózd, Szolnok, Tiszaújváros, Tiszavasvár) kezdetben szintén szén-erőművek voltak, azonban az idők során jó részük a gazdaságosabb szénhidrogén-tüzelésre tért át. A nagy szénhidrogén-erőművek (Duna menti, Tisza) nálunk is a kőolaj-finomítók mellé épültek, hogy egyrészt fedezzék a kőolajipar hőszükségletét, másrészt, hogy a feldolgozás fenéktermékéből fejleszzenek villamos energiát. Ezen erőművekben a tüzelőanyagok szerepét azonban egyre inkább a földgáz veszi át, egyrészt a kőolajtermékek drágulása, másrészt az üzemanyag-kínálat szűkülése miatt, mert a nagyobb fehérarúkihozatal érdekében a kőolaj-finomítók növelik a fenéktermékek feldolgozásának mélységét. A városokban működő fűtőerőművek (többek között Békéscsaba, Budapest, Debrecen, Győr, Kecskemét, Nyíregyháza, Sopron, Szeged, Székesfehérvár) elsődleges szerepe a távhőszolgáltatás, de ezt gyakran villamosenergia-fejlesztéssel kapcsolatosan ötvözik. E városi erőművek a környezet védelme érdekében ma már kizárólag szénhidrogéneket tüzelnek. Ezen a területen is teret hódítanak a gázturbinák, ugyancsak gázturbinákkal bővítik a nagyobb szénhidrogén-erőműveinket, és ~400 MW-nyi összesített kapacitással gázturbinás csúcserőművek létesültek tüzelőolajra (120 MW: Litér, Sajószöged, 170 MW: Lőrinci) a rendszer teljesítménytartalékának biztosítására.

A villamosenergia-ellátás biztonsága és minősége nagyrészt az erőművek működésén múlik. A magyar villamosenergia-ellátást 2002-ben 47 együttműködő erőmű biztosította, 8,3 GW összesített beépített teljesítőképességgel. Ezek közül azonban csak 17 erőmű teljesítőképessége haladja meg a 100 MW-ot (ezek teszik ki a teljes erőműpark teljesítményének 94,8%-át). Az üzemi erőművek részarányáról eltérőek a statisztikai adatok (215 vagy

530 MW), attól függően, hogy a két legnagyobb (Csepel, Dunaújváros) teljesítményét a közcélú vagy az üzemi erőművek között veszik figyelembe. A csak saját célra termelő, nem kooperáló erőművek teljesítménye 127 MW. Az erőműpark teljesítményének tüzelőanyag-bázis szerinti szerkezetét, a termelt villamos energia megoszlását és a felhasznált energiahordozók arányát a 6. táblázat mutatja. A legtöbb szénhidrogén-erőmű egyaránt használ folyékony tüzelőanyagot és földgázt, ezért kapacitásuk nem bontható kétfelé.

A vízerőművek sajnálatos hiánya földrajzi helyzetünkől következik, az egyéb megújuló energiák szerepének jelentéktelenségét a gazdasági érdektelenség okozza. A szénhidrogén-erőművek kiugróan nagy hazai arányát egyrészt egy korábbi iparpolitika, másrészt energiaimportunk szerkezete magyarázza. Energiaforrásokban szegények vagyunk, erre vezethető vissza a nukleáris energia nagy súlya.

A villamosenergia-rendszer egyensúlyának feltétele, hogy az erőművekből nyert teljesítmény mindig fedezze a fogyasztói igényeket. Ennek teljesítése a rendszerirányító meglehetősen bonyolult feladata, hiszen a fogyasztói terhelések eredőjét leíró terhelési görbe pillanatról pillanatra változik, és mivel a váltakozó áramú villamos energiát nagyléptékben nem lehet tárolni, a rendszer rendelkezésre álló teljesítményét folyamatosan illeszteni kell az igényekhez. A terhelések véletlenszerű ingadozása függ az emberek életvitelétől, az üzemek termelési programjától, a közlekedés alakulásától, az időjárástól és más körülményektől, még egy közérdeklődést kiváltó tv-műsornak vagy sporteseménynek is érzékelhető hatása lehet. A rendszerirányítónak előre gondoskodnia kell a szükséges erőmű-teljesítmények rendelkezésre állásáról. A várható terhelés becslésében támaszkodhat visszatérően érvényesülő változásokra a napszaknak, a napok héten belüli változásának és az évszaknak megfelelően (3. ábra), valamint különféle előrejelzésekre, például az időjárásról vagy társadalmi eseményekről.

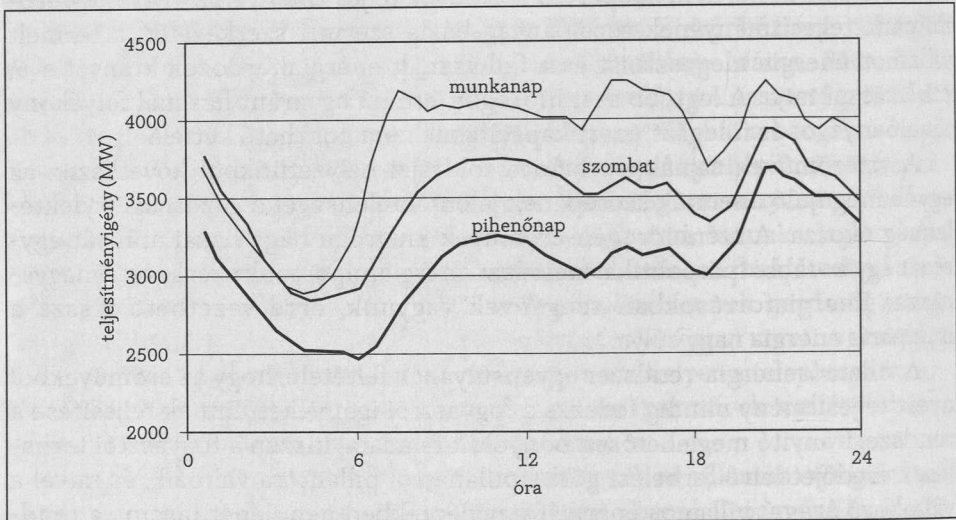
6. táblázat

A magyar erőműpark összetétele 2002-ben

Energiabázis	Kapacitásarány, %	Villamosenergia- termelés, %	Energiahordozó szerkezet, %
szén	23	28,2	24,8
barna- és feketeszén	13	13,4	10,6
lignit	10	14,8	14,2
szénhidrogén	53,5	38,2	34,7
fűtőolaj		16,4	5,9
földgáz		21,8	28,8
nukleáris	23	43,6	39,9
víz	0,5	0,5	0,6

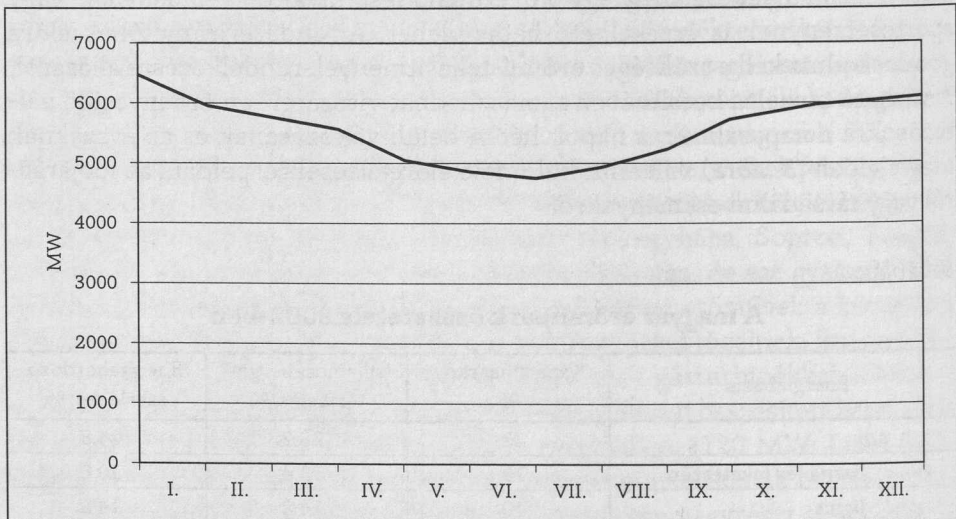
3a. ábra

Napi terhelési görbék



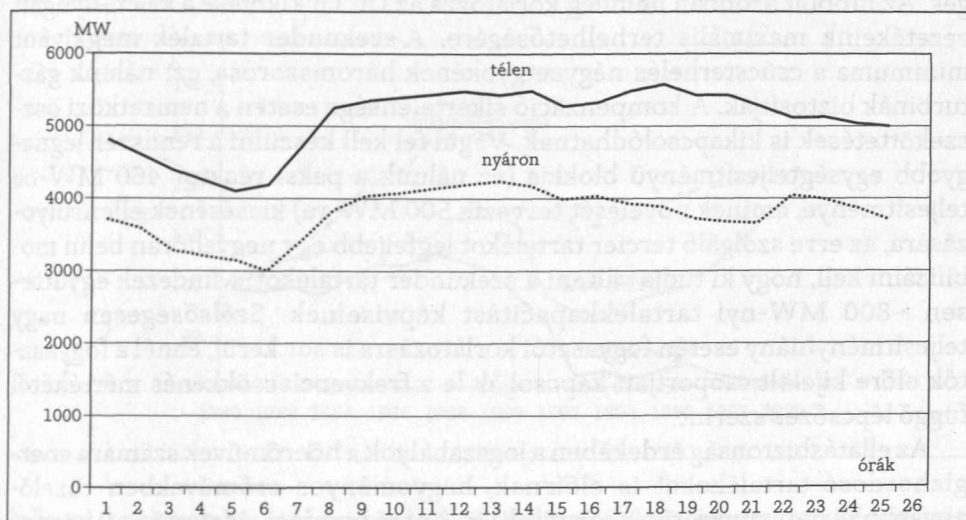
3b. ábra

Napi csúcsterhelések burkológörbéje



Az egyensúly biztosításában fontos körülmény az erőművek szabályozhatósága. Az atom- és szén-erőművek teljesítményét technológiai okokból csak lassan lehet változtatni, ezért ezeket lehetőleg egyenletes terheléssel járatják. Bár ezen alaperőművek fajlagos beruházási költsége magas, a termelt villamos

Munkanapi terhelési görbék



energia önköltsége alacsony, mivel a jó hatásfoknak köszönhetően az üzemanyagköltség kicsi. A rövid ideig tartó csúcsterhelések fedezése csúcserőművekkel gazdaságos, nálunk ezt a szerepet gázturbinák töltik be, erre alkalmas vízerőművekkel (szivattyús-tározósakkal) mi nem rendelkezünk, bár alkalmas telephelyek akadnának, de hasznosításukat a környezetvédők ellenállása lehetetleníti. A gázturbinák drága üzemanyagának hatását az olcsó létesítési költség ellensúlyozza. Az alap- és csúcserőművek között közbenső helyet betöltő erőművek szerepe a menetrendtartás. A hazai rendszerben ez a teljesítményük viszonylag gyors változtatására képes szénhidrogén-erőművekre hárul. Természetesen sükség helyzetben a funkciók éles elhatárolásától el kell tekinteni. Fel kell készülni a rendszer egyensúlyát megzavaró, előre nem látható üzemzavarok (erőművi blokkok vagy távvezetékek meghibásodása, nemzetközi összeköttetések bomlása, tüzelőanyag-ellátási zavarok, rendkívüli időjárási események stb.) elhárítására is.

Mind a teljesítmény szabályozásához, mind a váratlan események ellensúlyozásához erőművi kapacitástartalékokra van szükség, aminek mértékére általában elegendőnek tartják a csúcsterhelés 20-25%-át. Ezen belül a tartalékok mobilizálásának többféle rendeltetése van. Az erőművi blokkok teljesítménye bizonyos határokon belül változtatható, ezt használja ki a primer szabályozás, ami a frekvenciaváltozást érzékelve automatikusan igyekszik a nagy erőművi blokkok teljesítményének módosításával az egyensúlyt 30 másodpercen belül helyreállítani. Az UCTE a primer tartalékok legalább a rendszer csúcsterhelésének 2,5%-t kívánja meg. Az együttműködésnek az is feltétele,

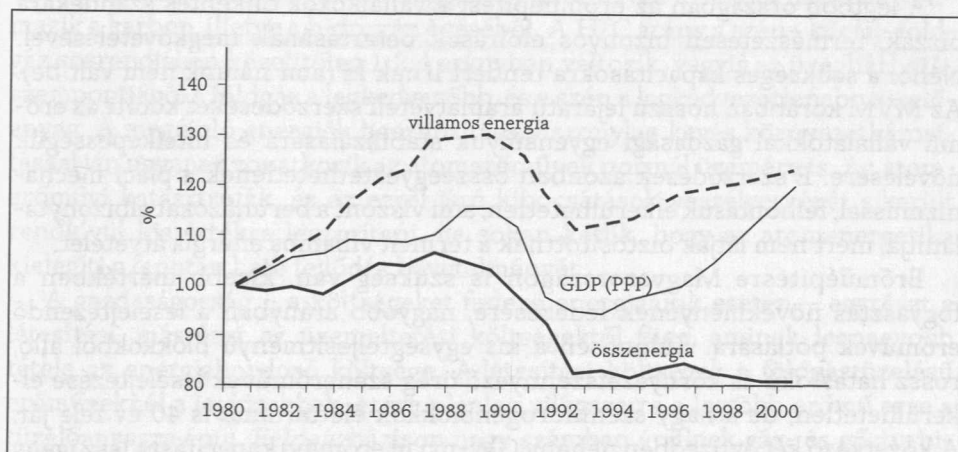
hogy a teljesítményhiányt 15 percen belül helyreállítsák (szekunder szabályozás), amihez vagy üzembe vehető tartalék, vagy nemzetközi kisegítés szükséges. Az utóbbit azonban némileg korlátozza az UCTE kikötése a kelet–nyugati vezetékeink maximális terhelhetőségére. A szekunder tartalék megkívánt minimuma a csúcsterhelés négyzetgyökének háromszorososa, ezt nálunk gázturbinák biztosítják. A kompenzáció sikertelensége esetén a nemzetközi összszeköttetések is kikapcsolódhatnak. Végül fel kell készülni a rendszer legnagyobb egységteljesítményű blokkja (ez nálunk a paksi reaktor 460 MW-os teljesítménye, aminek növelését tervezik 500 MW-ra) kiesésének ellensúlyozására, az erre szolgáló tercier tartalékot legfeljebb egy negyedórán belül mobilizálni kell, hogy ki tudja váltani a szekunder tartalékot. Mindezek együttesen ~800 MW-nyi tartalékkapacitást képviselnek. Szélsőségesen nagy teljesítményhiány esetén fogyasztói korlátozásra is sor kerül, ennél a fogyasztók előre kijelölt csoportjait kapcsolják le a frekvenciacsökkenés mértékétől függő lépcsőzés szerint.

Az ellátásbiztonság érdekében a jogszabályok a hőerőművek számára energiahordozó-tartalékokat is előírnak, hagyományos erőművekben tüzelőanyagból 8 napi normatív (üzemviteli) és 8 napi biztonsági (stratégiai) készletet, atomerőművekben 1 évre elegendő normatív és további 1 évre elegendő biztonsági fűtőelemkészletet. A földgázellátás csúcsidőszakában egyes erőművek ellátása szerződés alapján megszakítható, ezekben a földgázt helyettesítő folyékony tüzelőanyag készletezéséről is gondoskodni kell.

Időben meg kell alapozni az ellátás jövőjét, figyelembe véve, hogy az energetikai beruházások átfutási ideje hosszú, a tervezés, engedélyezés, létesítés együttes időigénye néha egy évtizedet is kitesz. Ilyen nagy előretartással a piacnak nincs eligazító hatása, nagymértékben a tapasztalatokra alapuló előrelátásra és ítélőképessegre kell támaszkodni. Nem egyszerű feladat az energiaszükséglet várható alakulásának előrebecslése. Általános tapasztalat, hogy a villamosenergia-felhasználás szinte folyamatosan nő, telítődésre utaló jelek még azokban az országokban sem mutatkoznak, ahol a legnagyobb a fajlagos felhasználás. A szükséglet növekedését egyrészt az életszínvonal emelkedésével együtt járó nagyobb komfortigény indokolja, másrészt a gazdasági tevékenység bővülése és a műszaki fejlődése. A növekedés gyorsabb, mint a GDP növekedési üteme, azt még gazdasági visszaesés is alig érinti, amit a magyar viszonyok is példáznak (4. ábra). Az előrejelzések világszerte a villamosenergia-szükséglet további növekedését valószínűsítik, a világ átlagára ~2,4%/évvel, a növekmény nagyobb fele a fejlődő országokban fog jelentkezni. Magyarországon 1%/év körüli növekedési ütemet tételeznek fel.

A jövő megalapozásának legfontosabb feladata a villamosenergia-források megteremtése. Tekintettel az erőművek több évtizedes élettartamára, létesítésük olyan döntést igényel, ami a változó körülmények között is időtálló marad. A szükséges új erőművek kapacitásával nemcsak az igények növekedését kell

A gazdaság és az energiafelhasználás növekedése



fedezni, hanem az elavulás miatt leállításra kerülő öreg létesítmények pótlását is. A tervezés, engedélyezés és létesítés időszükségletét figyelembe véve, az erőművek építését mintegy évtizedes előretartással kell elhatározni. Ezzel együtt biztosítani kell az erőmű több évtizedes működéséhez a szükséges primer energiahordozó rendelkezésre állását is. A szükségletek fedezéséhez a következő három évtizedben a világ erőműparkjának jelenlegi 3,4 TW-nyi kapacitását több mint kétszeresére kell növelni, amihez – figyelembe véve a kiöregedő létesítmények pótlását is – mintegy 4,8-5 TW-nyi új erőművet kell építeni (tőkeigénye ~4,5 Mrd USD). A szükséges új kapacitás az OECD-országokban ~2 TW, a többi 60%-ot a fejlődő világban kell megépíteni. Az Európai Unióban a következő két évtizedben 500-600 GW erőmű-teljesítmény beruházására lesz szükség.

A tervgazdaságban az erőműépítés állami feladat volt, a liberalizált piacon az erőműépítés feladata áttérhelődött az államról a magántársaságokra, de a nyomott villamosenergia-árak miatt alaperőművek létesítésére ezek érdeklősége elenyészett. A magántőke egyébként is a gyorsan megtérülő, kisebb befektetést igénylő megoldásokhoz vonzódik, ezért az árak rendeződése után is főleg kisebb, helyi igényeket szolgáló erőművi blokkok létrehozását vagy kiegészítését lehet remélni. A probléma áthidalását sokan az import növelésében látják, mivel Európában jelenleg kapacitásfelesleg van. A hálózati lehetőségek figyelembevételével importunk lehetséges növekménye a csúcsterhelés 8-10%-a körül mozog. Ez az import azonban csak átmenetileg vehető igénybe, a nyugat-európai kapacitásfelesleg szükségszerűen eltűnik, ahogy az exportálók a kapacitásokat saját belső szükségletükre igénybe fogják venni. Ezt követően a hazai termelésnél olcsóbb importra nem lehet számítani, az

exportáló joggal elvárja az új erőmű és átviteli hálózat önköltségének nyereséges megtérülését.

A legtöbb országban az erőműépítést a vállalkozók önkéntes szándékára bízzák, természetesen bizonyos előírások betartásának megkövetelésével. Néhol a szükséges kapacitásokra tendert írnak ki (ami nálunk nem vált be). Az MVM korábban hosszú lejáratú áramátvételi szerződéseket kötött az erőmű vállalatokkal gazdasági egyensúlyuk stabilizálására és hitelképességük növelésére. E szerződések azonban összeegyeztethetetlenek a piaci mechanizmussal, felbontásuk elkerülhetetlen, ami viszont a beruházókat elbizonytalanítja, mert nem látják biztosítottak a termelt villamos energia átvételét.

Erőműépítésre Magyarországon is szükség van, kisebb mértékben a fogyasztás növekményének fedezésére, nagyobb arányban a leselejtezendő erőművek pótlására. Különösen a kis egységteljesítményű blokkokból álló, rossz hatásfokú és környezetszennyező öreg szénerőművek leselejtezése elkerülhetetlen, de a nagy szénhidrogénblokkok élettartama is 40 év felé jár. A következő két évtizedben néhány GW-nyi új erőművi kapacításra lesz igény Magyarországon, aminek számszerű mértéke a villamosenergia-import részarányától függ. A magyarországi erőműépítés kilátásai megfelelő ösztönzők hiánya miatt egyelőre bizonytalanok. A hazai villamos energetika fejlődése a következő évtizedekben alapvetően a fosszilis tüzelőanyagokra – elsősorban a földgázra –, valamint az atomenergiára fog alapulni. A megújuló energiáknak csak lassú és főleg lokális térhódítása valószínű.

Az erőműépítésnek egyrészt környezetvédelmi, másrészt gazdasági követelményeknek kell eleget tenni. A környezetvédelem az energiaellátás megkezdésénél feltételévé vált, és ebben alapvető szerepet játszanak az erőművek. Az erőművek a legnagyobb környezetszennyezők, viszont a kibocsátások koncentráltak, és így a legtöbb esetben viszonylag könnyen uralhatók, illetve mérsékelhetők. Ez egyben fontos lehetőség a környezetvédelem területén az államok által vállalt nemzetközi kötelezettségek teljesülésének befolyásolására is. A legtöbb környezetszennyezést a szénerőművek okozzák, egyrészt a különféle légszennyezők (por, pernye, SO_x , NO_x stb.) kibocsátásával, másrészt a szilárd hulladékokkal (a bányászat meddőhányói, a szénfeldolgozás hulladékai és az erőművi zagyterek). A CO_2 kivételével a legtöbb légszennyező emissziójának mérséklésére léteznek bevált eljárások, természetesen nem jelentéktelen többletköltség árán. A fejlett országok elviselik ezeket a költségeket, de nagy kérdés a fejlődő országok teherviselő képessége. Pedig a szénnek jelentős szerepet szánnak, például Kína és India energiaszükséglete jövőbeli növekményének nagy részét erre kívánja alapozni. Ugyanakkor Dél-Ázsiában a savas esők már a természetlagokat veszélyeztetik, az élelmiszer- és az energiaellátás érdekei ütköznek. A szilárd hulladékoknál és a külfejtések tájrombolásánál a térségek rehabilitációja gyakran probléma. A kőolajtüzelés hasonló, de jóval kevesebb légszennyező kibocsátásával jár, viszont vannak

további emissziók (V, Ni, korom, szénhidrogének) is. A tüzelőanyagok között a földgáz légszennyezése a legkisebb.

A CO_2 -kibocsátás súlya attól függ, hogy a fűtőérték mekkora hányada származik a karbon, illetve a hidrogén égéséből. A H/C arány a szén- kőolaj-földgáz sorrendjében közelítőleg 1:2:4 arányban változik, vagyis az üvegházhatás szempontjából a földgáz a legkedvezőbb, és a szén a legkedvezőtlenebb tüzelőanyag. A megújuló energiák hasznosítása viszonylag kevés környezetkárosítással jár, ugyanez vonatkozik az atomerőművek normál üzemére is. Az atomerőművi katasztrófák, és az ezzel járó kibocsátások veszélyességét sikerült rendkívül kis értékre leszorítani, de sokan kétlik, hogy az atomenergetika kielégíti a fenntartható fejlődés követelményét.

A gazdaságosság – a költségeket fedező energiaárak esetén – egyrészt a létesítési, másrészt az üzemeltetési költségektől függ, aminek legnagyobb tétele az energiahordozó költsége. A létesítési költségek a földgáztüzelésű erőműveknél a legkisebbek, ezért jelenleg világszerte a legtöbb erőmű erre a tüzelőanyagra épül. Földgázbázison nagy számban épülnek gáz- és gőzturbinával kialakított kombinált ciklusú alaperőművek, valamint csúcserőművek. A gyorsan és olcsón megépíthető kombinált ciklusú erőművek hatásfoka is kitűnő, ami energiagazdálkodási szempontból is előnyös. Az épülő földgáztüzelésű erőművek nagy száma erősen megnöveli a világ földgázszükségletét. Ez kockázatot is jelent, egyrészt regionális földgázellátási feszültségek alakulhatnak ki, másrészt a gáznak a kőolajárhoz igazodó – és valószínűsíthető – drágulása bizonyos szinten felül csökkenteni fogja a beruházási költség nyújtotta előnyöket.

A nukleáris és vízerőművek sorsát nehezen előrelátható társadalmi ellenérzések nehezítik. Az atomerőművek létesítése drága, de az üzemanyagköltség alacsony, az élettartamuk meghosszabbítása nagyban növeli versenyképességüket. Jelenleg hazánkban a legalacsonyabb önköltsége a paksi atomerőműnek van, élettartamának tervezett meghosszabbítása ezt az előnyt a jövőre is stabilizálná. A megújuló energiák hasznosítását a magas fajlagos beruházási költségek és a rendelkezésre állás korlátai nehezítik, amit állami szubvenciókkal igyekeznek ellensúlyozni.

A villamosenergia-termelés helyzete nem vizsgálható a vezetékes hőszolgáltatástól függetlenül, mert a távhő legnagyobb része erőművekből származik. A villamosenergia-rendszer tüzelőanyag-felhasználásának 15%-át vezetékes hőszolgáltatásra fordítja, ez egyrészt iparművek technológiai hőszükségletét fedezi (45%), másrészt lakossági távfűtést és a használati melegvíz-ellátást szolgálja. A távhő egy kisebb hányadát friss gőzzel, illetve azzal hőcserélőn keresztül felhevített forró vízzel szolgáltatják erőművekből és fűtőművekből, a legnagyobb részét azonban villamosenergia-termeléssel kapcsolatosan fedezik, ami nagy tüzelőanyag-megtakarításra (jelenleg Magyarországon 15-20 PJ/év) ad módot. Magasabb hőmérséklethez és nagy hőmennyiség

szolgáltatásához ellennyomású rendszert alkalmaznak. Ennél a hőkörfolyamatot 1 bar-nál nagyobb nyomáson megszakítva vezetik ki a gőzt, vagy annak egy részét a turbinából. Alacsonyabb hőmérséklethez a hőkörfolyamatot a gőz kondenzálásáig folytatják, és a munkát végzett közeg hőjét hőcserélőn keresztül hasznosítják. Kapcsolt energiatermeléssel fedezik az ország villamosenergia-szükségletének 11%-át, a távhő 75%-át. Az erőművek hőszolgáltatásának 80%-a négy nagy hőerőműből (mindenekelőtt a Duna Menti Hőerőműből) származik. Jelentős a budapesti és néhány nagyvárosi erőmű szerepe, a legtöbb régi szén erőmű is távhő szolgáltatására tért át, és az üzemi erőművek szerepe is hasonló.

A villamos hálózatok feszültség szintjét a szállítandó energia mennyisége és az áthidalandó távolság nagysága szabja meg. Az erőműveket egymással és a fogyasztói súlypontokkal összekapcsoló magyar alaphálózat (átviteli hálózat, 3500 km vezeték hosszal) általában 400 kV-os, de van néhány régebben épült 220 kV-os ága is. Az alaphálózathoz kapcsolódnak szintén ezen a két feszültség szinten a nemzetközi távvezetékek is, ezeken kívül van Ukrajnával egy 750 kV-os távvezetési kapcsolatunk.

A magyar alaphálózatnak erős távvezetési összeköttetései vannak a szomszédos országokkal, amik az 1970–1980-as években nagy mennyiségű villamosenergia-importra létesültek. A hazai erőműépítést helyettesítő import részaránya meghaladta a teljes felhasználás negyedét. Ez kedvező gazdasági és műszaki feltételek mellett energia- és beruházásmegtakarításra adott módot. A rendszerváltás és a KGST széthullása, valamint a dollár bázisú elszámolásra való áttérés után a nagyarányú import elvesztette az előnyét, leépítésére módot adott a gazdasági recesszió miatti villamosenergia-szükséglet visszaesése, jelenleg a behozatal 10% körül mozog ~600 MW teljesítménnyel.

A nemzetközi távvezetési kapcsolatok növelik az ellátás biztonságát, szükség esetén módot adva egyrészt villamosenergia-importra, másrészt kiegészítő üzemzavarok során. A piac liberalizálása fokozza e kapcsolatok jelentőségét, mivel megnöveli a feljogosított fogyasztók lehetőségét az energiaforrások megválasztásában. A hálózati kapcsolatok lehetővé teszik az országunkon keresztül bonyolított villamosenergia-tranzitot, ami egyrészt gazdasági haszonnal jár (peázsdíj), másrészt többlet villamos energia vételezéséhez juthatunk. Az erős nemzetközi kapcsolatoknak hátrányai is vannak. Az egymástól távol fekvő külföldi szerződő felek között a magyar hálózaton keresztül előre nem látható áramok folyhatnak, mivel az áramlás útját a közbelső hálózatok impedancia-viszonyai szabják meg. Ez egyes vezetékek túlterhelődését is előidézhetheti, megzavarva a hazai energiaszállítások körülményeit.

A hazai elosztóhálózatok vezetékei a szállítandó teljesítménytől függően 120, 35, 20 és 10 kV-osak, összesített nyomvonalhosszuk 76 000 km. A fogyasztói súlypontokat és a legnagyobb üzemeket 120 kV-on táplálják, a többi nagyfogyasztó ellátása középfeszültségen (35, 20, 10 kV) történik. A kisfo-

gyasztókat néhány kW terhelésig egyfázison 230 V-on látják el, azon felül háromfázisú 400/230 V-on szolgálják ki, ezen kisfeszültségű elosztóhálózataink 80 000 km-t tesznek ki. Nagyobb ipari fogyasztóknál és a járműveknél 400 V és néhány kV közötti más feszültségek is előfordulnak.

A hálózatok tervezésénél alapelv (n-1 elv), hogy egy elem kiesésének nem szabad veszélyeztetni az ellátást. Az ellátás rövid idejű megszakadása is súlyos következményekkel járhat, ennek megakadályozására sokféle gyorsműködésű védelmi eszköz és automatika gondoskodik a sérült berendezések vagy vezetékszakaszok kiiktatásáról és a fogyasztók más ellátási útra történő átkapcsolásáról.

A villamos hálózatokat hosszú időre létesítik, a döntéseket alapvetően topológiai és területfejlesztési szempontok befolyásolják. A növekvő terheléshez a hálózatot bővíteni kell, aminek a legnagyobb gondja a sűrűn lakott területeken az engedélyek megszerzése szabadvezetékek új nyomvonalához. Ebben szerepet játszik az elfoglalt terület elvesztése, a környezetben a föld értékének csökkenése, a táj képének romlása és ezért vonzerejének csökkenése, a vezetékek nagyfrekvenciás zavaró hatása, félelem a feltételezett élet-tani hatástól stb. A szabadvezetékeknél nagyságrenddel drágább földbe fektetett kábelek csak sűrűn lakott településeken és nagyon kényes fogyasztóknál jöhetnek számításba, nem túl hosszú nyomvonallal. A problémát a meglévő nyomvonalak jobb kihasználásával igyekeznek áthidalni, a vezeték-keresztmetszet növelésével, nagyobb feszültségű, illetve többrendszerű vezetékek létesítésével. A kutatók háromnál többfázisú rendszerek alkalmazhatóságával is foglalkoznak, nagy távlatban kiutat jelenthet a decentralizált ellátási mód.

A hálózatokon a feszültséget néhány százaléknyi mértékig az erőművi generátorok kapocsfeszültségével, valamint a transzformátorok változtatható áttételével lehet szabályozni. A fogyasztóknál érvényesülő feszültség értéke a vezeték menti feszültségesés alakulásától függ, amit befolyásol a fogyasztói terhelés mértéke. A nagyon túlterhelt hálózatokon a tápponttól távoli fogyasztóknál a feszültség erősen csökken, és egyes fogyasztókészülékek működésképtelenné válnak. Ilyenkor a hálózat terhelhetőségét a transzformátorkapacitás és a vezeték-keresztmetszet bővítésével kell növelni, ennek megtörténteig le kell tiltani új fogyasztók bekapcsolását (zárolt körzet).

Műszaki és gazdasági körülmények indokolhatják a villamosenergia-ellátásnak a nagy villamos hálózatoktól független módját. Ennek magától értetődő példája a hálózattól távol fekvő fogyasztó, amihez a távvezeték kiépítése túlságosan költséges lenne. Ilyenkor a feladatot vagy belső égésű motorral hajtott áramforrással, vagy pufferolással ellátott megújuló energiaforrással lehet megoldani. A megújuló energiaforrások (nap, szél, víz) növekvő kiaknázása is előmozdítja az autonóm áramforrások terjedését, főleg a kis létesítményeknél, valamint a hálózatoktól távol fekvő területeken. Egyre több helyen találkozni napelemekkel működtetett jelző- és mérőeszközökkel is.

Sok technológiai hőt fogyasztó nagyüzem számára gazdaságos lehet saját erőmű létesítése, hő- és villamos energia kapcsolt fejlesztésével, gyakran hulladékenergia-hasznosítással is összekötve. Ezek az erőművek többnyire kapcsolódnak az együttműködő villamosenergia-rendszerhez is, hogy egyrészt onnan fedezzék a saját termelésen felüli szükségletet, illetve üzemzavar esetén a saját ellátásukat, másrészt értékesíteni tudják felesleges villamosenergia-termelésüket. Jelenleg Magyarországon a független áramtermelők (ipari erőművek) szolgáltatják a felhasznált villamos energia ~1,5%-át, a fejlett országokban ez az arány jóval nagyobb. A villamosenergia-piac liberalizálása kedvez az ilyen ipari erőművek létesítésének. Vonzóvá váltak a gázhálózatra támaszkodó kisebb kapcsolt energiaszolgáltató létesítmények is gázmotorokkal (0,5-5 MW) vagy mikrogázturbinákkal (30-300 kW), kisebb üzemek, intézmények, esetleg lakótömbök hő- és villamosenergia-szükségletének ellátására. Magyarországon ezek összesített villamos teljesítménye már 100 MW körül mozog.

Ugyancsak autonóm tartalék áramforrásokat létesítenek a hálózati táplálás kiegészítésére a folyamatos ellátást megkövetelő technológiákhoz (robbanásveszély vagy létfontosságú számítógépek miatt) és a nagy ellátásbiztonságot (katonai létesítmények, repülőterek, kórházak) megkívánó fogyasztóknál. A hálózati villamosenergia-szolgáltatás kimaradásakor a fogyasztók ellátását automatikusan az ilyen önálló helyi áramforrásokra terhelik át. Rövid áramszünetet elviselő fogyasztóknál belső égésű motorok képezik a tartalékot, például atomerőművek segédüzemét dízelmotoros generátorok támasztják alá, ezek felfutásáig a blokkgenerátorok tehetetlensége biztosítja a villamos energiát. Nagyon kényes berendezéseket akkumulátorra támaszkodó szünetmentes áramforrással látnak el, amelyekben elektronika vezérli a hálózat, az akkumulátor és a fogyasztó kapcsolatát.

Az autonóm energiaellátás elengedhetetlen a helyhez nem kötött villamos berendezések és eszközök működtetéséhez. Erre legnagyobbbrészt kémiai áramforrások szolgálnak, a fejlődés fő hajtóerejét a járműipar – mindenekelőtt a gépkocsigyártás – jelentette. Az akkumulátorok a gépkocsik elengedhetetlen tartozékai, fejlesztésük ma már a villamos autók energiaforrásának a helyettesítésére is irányul. A második világháború után forradalmi változás következett be a galvánelemek alkalmazásában. Mivel a gazdaságilag fejletlen országokban a tőkeigényes villamosenergia-szolgáltatás csak lassan épül ki, a piacbővítés érdekében a Távol-Keleten megjelentek a szárazelemekkel működő hordozható táskarádiók. A koncepció világsikert aratott, napjainkban a legtöbb elektronikus eszközt (órák, mobiltelefonok, kalkulátorok, laptopok stb.) kémiai áramforrások működtetik. Ennek energetikai szerepéről azonban még becslések sincsenek.

Az autonóm áramforrások fejlesztésében úttörő szerepet játszott a haditechnika és az űrkutatás nagyszámú, közvetlen átalakítási eljárás kialakításá-

val. A tüzelőanyag-cellák és a napelemek fejlődése felerősítette azokat a nézeteket, amelyek az autonóm ellátásban látják a villamos energetika jövőjét. Korábban csak egyes zöld mozgalmak hadakoztak a nagy villamosenergia-rendszereket üzemeltető monopóliumok ellen, azok túlsúlyát és az állampolgárok kiszolgáltatottságát hangoztatva, ma már azonban technikailag sem elképzelhetetlen az erőmű monstrumok és a mindent átszövő villamos hálózatok háttérbe szorulása, aminek gazdaságosságát azonban csak a távoli jövő fogja megválaszolni.

Földföldes			
Hely	Áll	Állapota	Függőleges
1. sz. ábr.	1. sz. ábr.	1. sz. ábr.	1. sz. ábr.
2. sz. ábr.	2. sz. ábr.	2. sz. ábr.	2. sz. ábr.
3. sz. ábr.	3. sz. ábr.	3. sz. ábr.	3. sz. ábr.
4. sz. ábr.	4. sz. ábr.	4. sz. ábr.	4. sz. ábr.
5. sz. ábr.	5. sz. ábr.	5. sz. ábr.	5. sz. ábr.
6. sz. ábr.	6. sz. ábr.	6. sz. ábr.	6. sz. ábr.
7. sz. ábr.	7. sz. ábr.	7. sz. ábr.	7. sz. ábr.
8. sz. ábr.	8. sz. ábr.	8. sz. ábr.	8. sz. ábr.
9. sz. ábr.	9. sz. ábr.	9. sz. ábr.	9. sz. ábr.
10. sz. ábr.	10. sz. ábr.	10. sz. ábr.	10. sz. ábr.
11. sz. ábr.	11. sz. ábr.	11. sz. ábr.	11. sz. ábr.
12. sz. ábr.	12. sz. ábr.	12. sz. ábr.	12. sz. ábr.
13. sz. ábr.	13. sz. ábr.	13. sz. ábr.	13. sz. ábr.
14. sz. ábr.	14. sz. ábr.	14. sz. ábr.	14. sz. ábr.
15. sz. ábr.	15. sz. ábr.	15. sz. ábr.	15. sz. ábr.
16. sz. ábr.	16. sz. ábr.	16. sz. ábr.	16. sz. ábr.
17. sz. ábr.	17. sz. ábr.	17. sz. ábr.	17. sz. ábr.
18. sz. ábr.	18. sz. ábr.	18. sz. ábr.	18. sz. ábr.
19. sz. ábr.	19. sz. ábr.	19. sz. ábr.	19. sz. ábr.
20. sz. ábr.	20. sz. ábr.	20. sz. ábr.	20. sz. ábr.

Mégsejtes			
Hely	Áll	Állapota	Függőleges
1. sz. ábr.	1. sz. ábr.	1. sz. ábr.	1. sz. ábr.
2. sz. ábr.	2. sz. ábr.	2. sz. ábr.	2. sz. ábr.
3. sz. ábr.	3. sz. ábr.	3. sz. ábr.	3. sz. ábr.
4. sz. ábr.	4. sz. ábr.	4. sz. ábr.	4. sz. ábr.
5. sz. ábr.	5. sz. ábr.	5. sz. ábr.	5. sz. ábr.
6. sz. ábr.	6. sz. ábr.	6. sz. ábr.	6. sz. ábr.
7. sz. ábr.	7. sz. ábr.	7. sz. ábr.	7. sz. ábr.
8. sz. ábr.	8. sz. ábr.	8. sz. ábr.	8. sz. ábr.
9. sz. ábr.	9. sz. ábr.	9. sz. ábr.	9. sz. ábr.
10. sz. ábr.	10. sz. ábr.	10. sz. ábr.	10. sz. ábr.
11. sz. ábr.	11. sz. ábr.	11. sz. ábr.	11. sz. ábr.
12. sz. ábr.	12. sz. ábr.	12. sz. ábr.	12. sz. ábr.
13. sz. ábr.	13. sz. ábr.	13. sz. ábr.	13. sz. ábr.
14. sz. ábr.	14. sz. ábr.	14. sz. ábr.	14. sz. ábr.
15. sz. ábr.	15. sz. ábr.	15. sz. ábr.	15. sz. ábr.
16. sz. ábr.	16. sz. ábr.	16. sz. ábr.	16. sz. ábr.
17. sz. ábr.	17. sz. ábr.	17. sz. ábr.	17. sz. ábr.
18. sz. ábr.	18. sz. ábr.	18. sz. ábr.	18. sz. ábr.
19. sz. ábr.	19. sz. ábr.	19. sz. ábr.	19. sz. ábr.
20. sz. ábr.	20. sz. ábr.	20. sz. ábr.	20. sz. ábr.

Függelék

Aktinidák bomlási sorai

Tóriumсор			
Elem	Jel	Sugárzás	Felezési idő
tórium	^{232}Th	α	$1,39 \cdot 10^{10}$ év
rádium	^{228}Ra	β	6,7 év
aktínium	^{228}Ac	$\beta(\gamma)$	6,3 óra
tórium	^{228}Th	$\alpha(\gamma)$	1,91 év
rádium	^{224}Ra	α	3,64 nap
radon	^{220}Rn	α	52 mp
polónium	^{216}Po	$\alpha(\beta)$	0,16 mp
ólom	^{212}Pb	$\beta(\gamma)$	10,6 óra
bizmut	^{212}Bi	66,3% β + 33,7% $\alpha(\gamma)$	60,5 perc
polónium	^{212}Po	α	$3 \cdot 10^{-7}$ mp
tárium	^{208}Tl	$\beta\gamma$	3,1 perc
ólom	^{208}Pb	stabil	-

Neptúniumсор			
Elem	Jel	Sugárzás	Felezési idő
plutónium	^{241}Pu	β	13,2 év
amerícium	^{241}Am	α	462 év
neptúnium	^{237}Np	α	$2,2 \cdot 10^6$ év
protaktínium	^{233}Pa	β	27,4 nap
urán	^{233}U	α	$1,62 \cdot 10^5$ év
tórium	^{229}Th	α	$7,34 \cdot 10^3$ év
rádium	^{225}Ra	β	14,8 nap
aktínium	^{225}Ac	α	10 nap
francium	^{221}Fr	α	4,8 perc
asztácium	^{217}At	α	$1,8 \cdot 10^{-2}$ mp
bizmut	^{213}Bi	$\beta + 2\% \alpha$	47 perc
polónium	^{213}Po	α	$4,2 \cdot 10^{-6}$ mp
tárium	^{209}Tl	β	2,2 perc
ólom	^{209}Pb	β	3,32 óra
bizmut	^{209}Bi	stabil	-

Aktinidák bomlási sorai (folytatás)

Uránsor			
Elem	Jel	Sugárzás	Felezési idő
urán	^{238}U	α	$4,51 \cdot 10^9$ év
tórium	^{234}Th	$\beta\gamma$	24,1 nap
protaktínium	^{234}Pa	$\beta\gamma$	1,18 perc
urán	^{234}U	α	$2,48 \cdot 10^5$ év
tórium	^{230}Th	α	$8,0 \cdot 10^4$ év
rádium	^{226}Ra	$\alpha\gamma$	$1,62 \cdot 10^3$ év
radon	^{222}Rn	α	3,82 nap
polónium	^{218}Po	$\alpha + 0,02\% \beta$	3,05 perc
ólom	^{214}Pb	β	26,8 perc
asztácium	^{218}At	α	2 mp
bizmut	^{214}Bi	$\alpha + 0,04\% \beta$	19,7 perc
polónium	^{214}Po	α	$1,6 \cdot 10^{-4}$ mp
tárium	^{210}Tl	β	1,32 perc
ólom	^{210}Pb	$\beta\gamma$	19,4 év
bizmut	^{210}Bi	$\beta + 2 \cdot 10^{-4}\% \alpha$	5,0 nap
polónium	^{210}Po	$\alpha\gamma$	138,4 nap
tallium	^{206}Tl	β	4,2 perc
ólom	^{206}Pb	stabil	–

Aktíniumsor			
Elem	Jel	Sugárzás	Felezési idő
urán	^{235}U	$\alpha\gamma$	$7,13 \cdot 10^8$ év
tórium	^{231}Th	$\beta\gamma$	25,6 óra
protaktínium	^{231}Pa	$\alpha\gamma$	$3,43 \cdot 10^4$ év
aktínium	^{227}Ac	$\beta + 1,2\% \alpha\gamma$	21,8 év
tórium	^{227}Th	α	18,4 nap
francium	^{223}Fr	$\beta\gamma$	21 perc
rádium	^{223}Ra	α	11,7 nap
radon	^{219}Rn	α	3,92 mp
polónium	^{215}Po	$\alpha + 5 \cdot 10^{-4}\% \beta$	$1,83 \cdot 10^{-3}$ mp
ólom	^{211}Pb	$\beta\gamma$	36,1 perc
asztácium	^{215}At	α	10-4 nap
bizmut	^{211}Bi	$\alpha + 0,3\% \beta$	2,16 perc
polónium	^{211}Po	α	0,52 mp
tárium	^{207}Tl	β	4,78 perc
ólom	^{207}Pb	stabil	–

Az Energiahordozók című fejezethez

- European Commission *Energy in Europe*. European Energy to 2020 EC. DG. XVIII. Brussels, 1996.
- Economic Commission for Europe Sustainable Energy Developments in Europe and North America. *The ECE Energy Series*. United Nations, New York, 1997.
- Gouse, S. W.: *The Transition to a Sustainable World Energy Supply*. Rep. 2.4.09, World Energy Council 16th Congress, WEC Tokyo, 1995.
- Häfele, W et al.: *Energy in a finite world*. Ballinger, Cambridge, 1981.
- International Energy Agency, *World Energy Outlook*, OECD, Paris, 2002.
- King Hubbert, M.: The energy resources of the earth. *Sci. Am.* 225, 61 1971.
- United Nations Economic Commission for Europe, United Nations International Framework Classification for Reserves/Resources – Solid Fuels and Mineral Commodities. UN, New York, 1997.
- UNCED, Report of the UN Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, United Nations, New York, 1993.
- US Department of Energy, *International Energy Outlook*, DOE, Washington, 1997.
- Vajda, Gy.: *Energiapolitika*. Magyar Tudományos Akadémia, Bp., 2001.
- Vajda Gy.: *Energia és társadalom*. Akadémiai Kiadó, Bp., 1975.
- World Energy Council, International Institute of Applied System Analysis, *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, WEC, London, 1995.

A Tüzelőanyagok című fejezethez

- Beér, J. M.: *Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges*. Progress in Energy and Combustion Science 26. 301. 2000.
- Berkowitz: *The chemistry of coal*
- BP AMOCO Statistical Review, *World Energy*. Internet, <http://www.bpamoco.com/worldenergy/oil>
- Considine, D. M., et al.: *Energy technology handbook*. Mc Graw Hill, New York, 1977.
- Dijkers, A. J.: *Geology in petroleum production*. Elsevier, Amsterdam, 1987.
- Economic Commission for Europe, United Nations International Framework Classification for Reserves/Resources – Solid Fuels and Mineral Commodities, UN, New York, 1997.
- El-Hinnawi, E., El-Gohary, F.: *Energy from Biomass. Renewable sources of energy and the environment*. Tycooly, Dublin, 1981
- European Commission, *Energy in Europe*, European Energy to 2020, EC. DG. XVIII. Brussels, 1996.
- Hagoort, J.: *Fundamentals of gas reservoir engineering*. Elsevier, Amsterdam
- Hobson, G. D., et al.: *Modern petroleum technology*. Wiley, New York, 1989.
- Hunt, J. M.: *Petroleum Geochemistry and Geology*. Freeman, San Francisco, 1996.
- International Energy Agency, *Oil Information*, OECD, Paris, 1999.
- International Energy Agency, *World Energy Outlook*, OECD, Paris, 2001.
- IEEE, 45. annual petroleum and chemical industry conf. Indianapolis IEEE, Piscataway, N.Y. 1998.

- Jones, D. S. J.: *Elements of Petroleum Processing*. Wiley, Chichester, 1995.
- Kertai Gy.: *A kőolaj és a földgáz vegyi összetétele és keletkezése*. Akadémiai Kiadó, Bp., 1978.
- Kinghorn, R. R. F.: *An introduction to the Physics and chemistry of petroleum*. Wiley, Chichester, 1983.
- Magyar Geológiai Szolgálat. *Magyarország Ásványi Nyersanyagvagyonai*. MGSz. Budapest, 2000.
- MSz. 17989:1980, Széntermékek csoportosítása és általános előírásai
- MSz. 18560: 1993, Háztartási szén
- MSZ EN 228, Gépjármű-hajtóanyagok. Ólmozatlan motorbenzin
- MSZ EN 590, Gépjármű-hajtóanyagok. Dízelgázolaj
- Matyi-Szabó F.: A feketeszen-hasznosítás távlati kilátásai hazai erőművekben. *MVM Közlemények*. 31. (1) 4. 1994.
- Matyi-Szabó F.: Erőművi szénhasznosítás nemzetközi kilátásai *Energiagazdálkodás*, 39. (1). 17. 1998.
- Meyers, R. A., et al.: *Coal Handbook*. Dekker, New York, 1981.
- Meyers, R. A.: *Handbook of petroleum refining processes*. McGraw-Hill N.Y. 1986.
- Olah, G., Molnar, A.: *Hydrocarbon Chemistry*. Wiley, New York, 1995.
- Petroleum science and technology*. Dekker, Moticello, N.Y. 1997.
- Sittig, M.: *Petroleum refining industry*. Noyes, Park Ridge N. J. 1978.
- Speight, J. G.: *The chemistry and technology of petroleum*. Dekker, New York, 1999.
- Szentannai P.: *Cirkulációs fluidizációs tüzelés modellezése és szabályozása*. Doktori disszertáció, BME. Budapest, 2000.
- Szilas A. P.: *Kőolaj és földgáz termelése és szállítása*. Akadémiai Kiadó, Bp., 1985.
- Szurovy, G.: *A kőolaj regénye*. Hírlapkiadó. Budapest, 1993.
- US Department of Energy, International Energy Outlook, DOE, Washington, 1997.
- Vajda Gy.: *Energetika*. Akadémiai Kiadó, Bp. I:1981, II: 1984.
- World Energy Conference, Survey of Energy Resources, WEC London, 1990.
- Yen, T. F.: *Oil shale*. Elsevier, Amsterdam, 1976.

A Megújuló energiaforrások című fejezethez

- Bohoczky F.: A megújuló energiaforrások szerepe a magyar energiapolitikában. *Energiagazdálkodás*. 41. (5) 13. 2000.
- Boyle, G. et al.: *Renewable Energy*. University Press, Oxford, 1996.
- BP AMOCO, Statistical Review of World Energy, BP AMOCO, London, 2001.
- Czelnai, R.: *Bevezetés a meteorológiába*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1996.
- Green, M.: *Solar Cells*. Prentice Hall, 1982.
- Johansson, J. et al.: *Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity*. Island Press, Washington, 1993.
- Justyák, J.: *Magyarország éghajlata*. Debrecen, 1998.
- King Hubbert, M.: The energy resources of the earth. *Sci. Am.* 225, 61, 1971.
- Mészáros, E.: *Levegőkémia*. Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1997.
- Palz, W.: *Solar electricity*. Butterworth, London, 1978.
- Rogner, H. H.: Sustainable Energy Development, Sci. Forum 43rd Gen. Conf. IAEA, IAEA, Vienna, 1999.
- Sorensen, Bent: *Renewable Energy*. Academic Press, 1979, London.
- Treble, F.C. et al.: *Generating Electricity from the Sun*. Pergamon Press, 1991.
- World Energy Council, New Renewable Energy Resources, WEC, London, 1994.
- World Energy Conference, Survey of Energy Resources, WEC, London, 2001.

A Nukleáris energia című fejezethez

1970. évi 12. törvényerejű rendelet a nukleáris fegyverek elterjedésének megakadályozásáról szóló szerződésről, Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (New York, 1970).
1972. évi 9. törvényerejű rendelet a Magyar Köztársaság és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség között a nukleáris fegyverek elterjedésének megakadályozásáról szóló szerződés szerinti biztosítékok alkalmazásáról aláírt egyezmény kihirdetéséről, kibővítve az 1999. évi XC törvénnyel.
1987. évi 8. törvényerejű rendelet a nukleáris anyagok fizikai védelméről szóló egyezmény kihirdetéséről, Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (Vienna, 1987).
- 28/1987. (VIII. 9.) MT-rendelet a nukleáris balesetekről adandó gyorsértesítési egyezményről, Convention on Early Notification of a Nuclear Accident (Vienna, 1986).
- 29/1987. (VIII. 9.) MT-rendelet a nukleáris baleset vagy sugaras veszélyhelyzet esetén való segítségnyújtásról szóló egyezményről.
- 24/1990. (II. 7.) MT-rendelet az atomkárokért való polgári jogi felelősségről szóló nemzetközi egyezményről, Vienna and Paris Conventions and Protocols on Civil Liability for Nuclear Damage (1960), kibővítve a 130/1992. (IX. 3.) kormányrendelettel.
1997. évi I. törvény a nukleáris biztonságról szóló nemzetközi egyezményről, Convention on Nuclear Safety (Vienna, 1996).
1999. évi I. törvény az Átfogó Atomcsend Szerződésről.
2001. évi LXXVI. törvény a kiegészítő fűtőelemek kezelésének biztonságáról és a radioaktív hulladékok kezelésének biztonságáról létrehozott közös egyezményről.
- Bayer, A. et al.: The german risk study. *Nucl. Technology*, 59, 20 (1982).
- Euratom Supply Agency, Annual Report, CEC, Luxembourg, 2001.
- International Atomic Energy Agency, International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy, Vienna, 1997.
- International Atomic Energy Agency, Sustainable development and nuclear power, IAEA, Vienna, 1997.
- International Atomic Energy Agency, One decade after Chernobyl: environmental impact and prospects for the future, IAEA J1-CN-63, Vienna, 1996.
- International Atomic Energy Agency, Safety Series: Safety Standards, Safety Guides, Safety Practices, IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle and Waste Management, Vienna, 1996.
- Joint Convention on The Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (Vienna, 1998).
- Kurihara, H. et al.: Non-Proliferation and Safeguards Aspects. *Key Issue Paper No. 5*. Int. Symp. on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy, IAEA, Vienna, 1997.
- Lewis, E. E.: *Nuclear Power Reactor Safety*. Wiley, New York, 1977.
- Lochard, J. et al.: Safety, Health and Environmental Implications of the Different Fuel Cycles. *Key Issue Paper No. 4*. IAEA, Vienna, 1997.
- Manley, D. et al.: Future Fuel Cycle and Reactor Strategies. *Key Issue Paper No. 3*. Int. Symp. on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy, IAEA, Vienna, 1997.
- Nuclear Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Uranium Production, Resources and Demand, OECD, Paris 1999.
- Nuclear Energy Agency, Chernobyl, Ten Years on Radiological and Health Impact, OECD, Paris, 1995.
- Nuclear Energy Agency, Projected Costs of Generating Electricity, OECD, Paris, 1998.
- Nuclear Energy Agency, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD, Paris, 1994.

- Nuclear Energy Agency, Decommissioning of Nuclear Facilities, OECD, Paris, 1991.
- Nuclear Energy Agency, Geological Disposal of Radioactive Waste, OECD, Paris, 1999.
- Nuclear Energy Agency, Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, OECD, Paris, 1999.
- Rasmussen, N. C. et al.: *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plant*. WASH-1400, NRC, Washington 1975.
- Treaty on the European Atomic Energy Community (Euratom), Bruxelles, 1957.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Effects of Radiation on the Environment, IAEA, A/AC 85 R 549, Vienna, 1995.
- Uranium Institute, The Global Nuclear Fuel Market, Uranium Institute, London, 1998.
- Sztanyik, B. L.: A csernobili reaktorbaleset hatása hazánk lakosságának egészségi állapotára. *Orvosi Hetilap*, 143, 2002.
- Bíró T., Fehér I., Sztanyik B. L.: *A csernobili atomerőmű-baleset sugárzási következményei Magyarországon*. OAB, Budapest, 1986.
- Vajda Gy.: Csernobil tanulsága. *Magyar Tudomány*, 31. (12) 970, 1986.
- Murray, Raymond L.: *Nuclear Energy*. Boston, Butterworth-Heinemann, 2001.

A Hőhordozók című fejezethez

- Balogh J., Völgyesi I.: *Termálvíz-hasznosítás*. Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest, 1986.
- Boldizsár, T.: A kimeríthetetlen geotermikus energia. *Magyar Tudomány* 1. 96. 1978.
- Bosnjakovic, Fr.: *Technische Thermodynamik*. Steinkopf, Dresden, 1972.
- Ellis, A. J.: *Geothermal Energy in renewable sources of energy and the environment*. Tycooly, Dublin, 1981.
- Korin, K.: Hévíz tárolórendszerek és működésmódjuk a Pannon-medencében. *Kőolaj és Földgáz*, 12. 10. 1979.
- Lüttig, G.: Die Erswärme und ihre coraussichtliche Rolle bei der Energiedeckung der Zukunft. *BWK* 30. 275. 1978.
- Szentiványi Gy.: A termálvizek hőenergiájának hasznosítási lehetőségei. *Épületgépészet* (3). 102. 1983.
- Warren, M. et al.: *Handbook of heat transfer*. Mc Graw Hill, New York, 1973.

A Villamos energia című fejezethez

- Büki G.: *Energiaátalakítás, gáz- és gőzerőművek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
- Büki G.: Gázturbinák a gőzerőművek megújításában. *Energetika*, 10. (3). 3. 2002.
- Gerse K.: A villamosenergia-rendszer új működési modellje. *MVM Közlemények*, 36. 1999 (5).
- Homola V.: Korszerű szénerőmű-irányzatok. *MVM Közlemények*, 32. 1995 (3).
- Kerényi A. Ö.: Az 50 éves magyar villamosenergia-rendszer az ezredfordulón. *MVM Közlemények*, 36. 1999 (5).
- Gerse K.: Ellátásbiztonság. *MVM Közlemények*, 39. (7). 6. 2002.
- Stróbl A.: Erőműépítések világszerte. *MVM Közlemények*, 1999 (1-2).

Summary

A lot of energy is needed to maintain our personal living conditions, and enormous amount of it is necessary to provide for the activities of a civilised society. Well organised co-operation of many trades and companies - mines, power stations, oil-refineries, energy transporting and distributing utilities, energy trading etc. - is required to assure a steady supply of energy. There is a growing demand of the public to participate in the decisions on energy problems concerning their individual circumstances based partly on personal interests and partly on common anxieties. Personal needs, economic benefits or damages and proprietary rights motivate the first. One reason for anxiety is that energy utilisation is connected with dangers: fire, explosion, electric shock, emission of substances injurious to health and other damages may occur. The other motive is environmental pollution, which in the long run may influence people's health, and deteriorate our nature. Disagreements concerning these complicated questions often emerge and are readily magnified by the media generating sometimes serious political conflicts. The probability of wrong decisions is growing, as the debate moves away from professional judgement. Assumption of imaginary dangers instead of real problems, predominance of emotion and passion instead of seeking an optimal solution has resulted often in wrong decisions also in Hungary. They were favourable neither for the affected part of population nor for the country as a whole, and generated heavy economic and natural damages. To avoid similar situations the knowledge of the present situation and future possibilities of energy supply is essential.

Provision of energy is based on exploitation of natural resources - fossil fuels, renewable energies, and fissile materials. The proportion of their use permanently changed during human history. This never happened because of the exhaustion of resources but due to emerging new energy-carriers, with more favourable economic and technical characteristics. A change in the energy-structure is taking place now, and will continue in the future as well. The process of change is slow, partly because the lifetime of essential energy establishments is long, and the spread of new consumer products also needs time. Wood, coal, crude oil, natural gas fulfilled the leading role among the fuels, respectively, and the changes were always accompanied by contradictions. The cutback of coal mining e.g. caused heavy social and economic difficulties; due to its strategic importance, possession of oil reserves and transport routes has created grave conflicts, not once originating real wars.

Quite often news are spread announcing the approaching rundown of oil and natural gas reserves. Such unfounded rumours originate from misunderstanding the classification of mineral resources. The probable and possible resources are huge, besides, there are realistic possibilities to substitute these hydrocarbons by unconventional resources and by synthetic products as well.

The utilisation of renewable energies deserves every support, since they represent the best solution to achieve sustainable development, and to diminish the tensions in energy supply. Unfortunately, at present this is an expensive option, since large equipment is necessary due to their small power density, the intermittent availability has to be compensated, and the efficiency of energy transformation is low. Only a fraction of the world's energy demands could be covered by the realistic amount of their exploitable potential.

The analysis of energy resources leads to the result that the energy demand of the world – in the long turn – is impossible to fulfil without nuclear energy. Nuclear power stations increase the safety of energy supply and they do not emit greenhouse gases. The three main motives for public opposition to this option are nuclear safety, radioactive waste disposal, and the link with nuclear weapons. However, these factors could be controlled even by the present practice, furthermore, promising research and development is going on to eliminate such problems.

The changes in energy structure are not always irreversible. Though biomass has been considered as the fuel of the past, it may gain new interest in the form of energy plantations, or as a source of combustibles (biogas, alcohol, biodiesel). Research towards the application of bacteria to develop hydrogen or electricity by the effect of light may also be successful. A promising possibility of using our enormous coal resources to synthesise hydrocarbons exists as well. Perhaps the heat or electricity, generated by coal or nuclear power stations could be the basis of hydrogen-economy.

Electricity is the most flexible type of energy, because it can be generated from as well as transformed into any other energy form. Its main role is energy transmission. The development in space and rocket technology led to several new techniques to generate electricity. Among these photovoltaic cells and fuel elements are the most promising in the civil application. Fuel elements combined with hydrogen-economy may basically change the whole present system of transport.

It is a long way from natural energy resources to the final consumption considering the geographic distances as well as the technological chain of energy conversion. Substances used for transformation and transport of energy, e.g. heat transporting materials, or working fluids of prime movers have to fulfil manifold requirements. Unexpected developments may occur, e.g. the use of freon – an excellent cooling fluid for hundred years – has been prohibited by an international agreement, as the main cause of ozone layer

depletion; or a popular isolating gas has become unwanted, as one of the most active greenhouse gases.

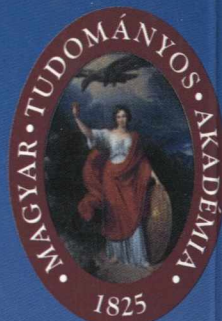
Nature has not treated Hungary too well by providing it with mineral or renewable energy resources. Therefore, most of our demand must be covered by energy import. Among these conditions the proper selection of priorities in energy policy is even more essential: energy conservation, safety of supply and the protection of environment are considered as the most important principles.

A kötet szerzője

VAJDA György

gépészmérnök, a Magyar Tudományos Akadémia
rendes tagja, a Magyar Mérnök Akadémia tagja, a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
címzetes egyetemi tanára, Állami és Széchenyi-díjas

Globalizáció és nemzeti érdek
A demokrácia intézményrendszere
A magyar agrárgazdaság jelene és kilátásai
Sárközy Tamás: Rendszerváltozás és a privatizáció joga
Az agrártermelés tudományos alapozása
Lépegészség, orvos, társadalom
Egészségügy és piacgazdaság
Biotechnológia – lépéstartás Európával
Környezetpolitika és uniós csatlakozás
Termelés, piac, természeti környezet
Losonczy Ágnes: Utak és korlátok az egészségügyben
Budapest – nemzetközi város
A cigányok Magyarországon
Minőség és agrárstratégia
A magyar nyelv az informatika korában
A NATO és a magyar politika
Magyarország településkörnyezete
Az információs társadalom
Területfejlesztés és közigazgatás-szervezés
Közlekedési rendszerek és infrastruktúráik



A cigányok Magyarországon
Utánnyomás. Bp. 2001., 2004. 270 oldal, ára: 1800 Ft
Egészségügy Magyarországon
Bp. 2001. 368 oldal, ára: 920 Ft
Ujda György: Energiapolitika
Bp. 2001. 395 oldal, ára: 950 Ft
Balázs Géza: Nyelvustratégia
Bp. 2001. 268 oldal, ára: 700 Ft
Magyarországi kutatóhelyek I-III. kötet
Bp. 2002. 908 oldal, ára: 2140 Ft
A hazai vízgazdálkodás stratégiai kérdései
Bp. 2002. 402 oldal, ára: 1000 Ft
Borhidi Attila: Gaia zöld ruhája
Bp. 2002. 331 oldal, ára: 1950 Ft
A magyarországi Duna-völgy területfejlesztési kérdései I-II. kötet
Bp. 2001. 558 oldal, ára: 2500 Ft
Információs társadalom és jogrendszer
Bp. 2002. 343 oldal, ára: 1490 Ft
Területfejlesztés, rendszerváltás és az Alföld
Bp. 2002. 235 oldal, ára: 920 Ft
Csikós-Ilagy Béla: Közgazdaság a globalizálódó világban I-II. kötet
Bp. 2002. 680 oldal, ára: 2550 Ft
A Tisza és vízrendszere I-II. kötet
Bp. 2003. 525 oldal, ára: 2600 Ft
A megkérdőjelezett sikerágazat
Bp. 2003. 453 oldal, ára: 2600 Ft
Kertészeti hungarikumok
Bp. 2003. 352 oldal, ára: 1800 Ft
Őshonos állataink és termékeik
Bp. 2003. 239 oldal, ára: 1800 Ft
Civilizáció és egészség
Bp. 2004. 387 oldal, ára: 1850 Ft

ISBN: 963 508 424 2



9 789635 084241

Ára: 2450 Ft