



SZÉKFOGLALÓ ELŐADÁSOK
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIÁN

BÁRSONY ISTVÁN

SZILÍCIUMTECHNOLÓGIA – ÉS AMIT NEKI KÖSZÖNHETÜNK



Bársony István

SZILÍCIUMTECHNOLÓGIA –
ÉS AMIT NEKI KÖSZÖNHETÜNK

Székfoglaló előadások a Magyar Tudományos Akadémián

Bársony István

SZILÍCIUMTECHNOLÓGIA –
ÉS AMIT NEKI KÖSZÖNHETÜNK



Magyar Tudományos Akadémia, 2021

Az akadémiai székfoglaló előadás elhangzott 2017. január 18-án.

© Bársony István, 2021

© Magyar Tudományos Akadémia, 2021

Magyar Tudományos Akadémia
1051 Budapest, Széchenyi István tér 9.
mta.hu

Kiadja: Magyar Tudományos Akadémia
A kiadásért felel: Freund Tamás, az MTA elnöke
Nyelvi lektor: Földes Zsuzsanna
Borító és tördelés: Szabó Éva | avesophia.hu
Nyomdai munkálatok: Prime Rate Kft.

ISSN 1419-8959

ISBN 978-963-508-969-7

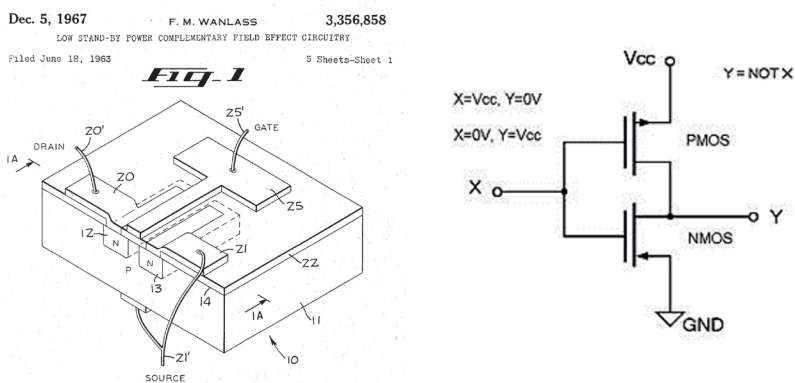
DOI 10.36820/szekfoglalo.2021.barsony

Minden jog fenntartva!

Új világunkban nem a nagy hal eszi meg a kicsit,
hanem a gyors hal végez a lassúval!

(Klaus Schwab, World Economic Forum)

Az elmúlt bő fél évszázad a mikro- és nanoelektronika egyre gyorsuló fejlődésének jegyében telt el. Ötven éve annak, hogy Frank Wanlass, a Fairchild Semiconductor kutatómérnöke megkapta a szabadalmi védeltséget a *Low Stand-by Power Complementary Field Effect Circuitry* címen 1963-ban benyújtott találmányára. A találmány szerint a p- és n-csatornás MOS-tranzisztorok együttes alkalmazásával felépített logikai alapelem, az inverter fogyasztása azáltal minimalizálható, hogy működése során csak tranziens teljesítményfelvétel lép fel. Ez is nő ugyan a működési frekvenciával, viszont alapállapotban csak az egyik lezárt tranzisztor szivárgási árama okozza a disszipációs veszteséget. A töltéstranszporton alapuló tranzisztorműködést hasznosító komplementer MOS-logika – közismert nevén a CMOS-technika – máig egyetemes technológiája a digitális világ alapvető integrált mikroeszközeinek, a processzoroknak és a memória-áramköröknek, de a kárpalkotó és egyéb jelfeldolgozó áramköröknek is (1. ábra).



1. ábra: A kis fogyasztású komplementer térvezérlésű logika felépítésének keresztmetszeti vázlata és az inverter kapcsolási rajza Frank M. Wanlass 1963-as szabadalmi leírásából

Forrás: <https://patents.google.com/patent/US3356858A/en> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

A szilíciumalapú chipgyártó ipar termelési értéke mára meghaladta a 350 milliárd amerikai dollárt. Folytonos csúcstechnológiai igényeivel több mint ötven éve ez a világ legkiforrottabb technológiáját hasznosító iparág hajtja a mikroelektronikai kutatás-fejlesztést, beleértve az anyagtudomány és technológia komplex területét. Még lényegesebb, hogy a csillagászati összegeket felemésztő kutatásokat a megtermelt profitból finanszírozza is. Ezzel tudta biztosítani azt a töretlen méretcsökkentést, aminek következtében az egy-egy tranzisztorra eső költség az időközben már milliárdnyi tranzisztort integráló áramköri chipekben ötven éven át exponenciálisan csökkent. Most azonban forduloponthoz érkezünk: **a szakadatlan méretcsökkentés történetében először tapasztalunk fajlagos tranzisztorköltség-emelkedést a csúcsáramkörökben.**

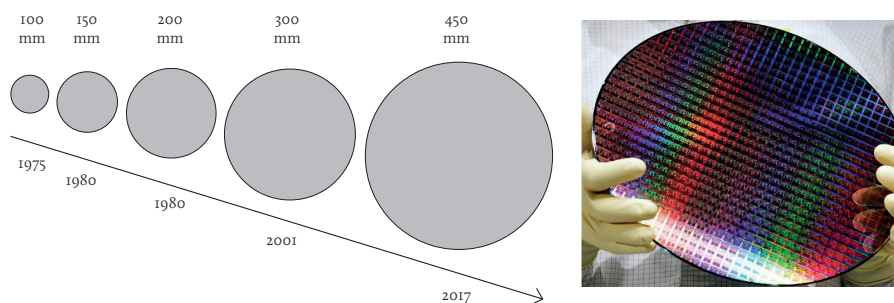
Joggal merül fel a kérdés, hogy **miért éppen a szilícium** vált korunk meghatározó technológiájának alapanyagává.

A szilícium a periódusos rendszer 14. rendszámú félfémes eleme, az oxigén és a hidrogén után a harmadik leggyakoribb elem a Földön. Bolygónkon gyakorlatilag minden hatodik atom, azaz 16,6 atomszázalék szilícium. Ez teszi ki a földkéreg tömegének több mint egynegyedét (27,7 tömegszázalék) kvarc és szilikátok formájában, homokként a legfontosabb talajalkotó elem, viszont a természetben tiszta állapotban nem fordul elő. Alapvető technológiai fontosságát azonban nem ez indokolja.

- A gyémántrács-szerkezetű, egykristályos Si az az elemi félvezető anyag, melynek tilos sávja és sajátvezetési tulajdonságai éppen a Földön végzett emberi tevékenység hőmérséklet-tartományában ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ között) garantálja a belőle készült elektronikus eszközök megbízható működését. A Si szobahőmérsékleten érvényes $E_g = 1,12\text{ eV}$ -nyi tilos sáv-energiája, valamint a termikus zaj szempontjából kritikus alacsony intrinszc koncentrációja ($n = 1,4 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$) **predesztinálja a digitális szilícium áramköröket a külön temperálás nélküli, normál körülmények közötti működésre.**
- Indirekt sáv szerkezete miatt a szilícium ugyan hatékony (IR) fénykibocsátásra nem alkalmas, viszont kristályhiba-mentessége és megfelelően

nagy töltéshordozó mozgékonyága egészen a fizikai korlátok eléréséig csökkentett méretekkel is **kiváló nagyfrekvenciás áramkörműködést** tesz lehetővé.

- Technológiai szempontból kiemelkedő jelentősége van annak, hogy oxigéntartalmú közegben magas hőmérsékletre hevítve a szilíciumon kiváló szigetelő tulajdonságú természetes oxid képződik. Az oxidrétegben a Si-technológiai megmunkálása során használt adalékatomok diffúziós állandója a Si-ban érvényes diffúziós állandóknál nagyságrendekkel kisebb. A termikus oxid megfelelő vastagságban így kiváló „maszkoló réteget” képez a Si-szubsztrát adalékolása során is. **Ennek a tulajdonságnak köszönhetően alakult ki a Si-technológiában mindmáig uralkodó „planáris technológia”.**
- A szilíciumnak újabban egyre fontosabbá váló előnyös tulajdonsága, hogy **toxicitási szempontból bioinert anyag**, ezért az élő szervezetbe is beültethető biokompatibilis eszközök alapanyaga lehet. Ez óriási távlatokat nyit **a chiptechnológia és a biológiai szervezetek integrálása** szempontjából.



2. ábra: Az egykristályos szilícium szelettechnológiában az elemméretek csökkenése mellett a szubsztrátumok átmérőjének folyamatos növelése révén elért termelékenységnövekedés biztosította az integrált elemek szakadatlan fajlagos árcsökkenését

A tiszta szilícium előállítása tekintélyes kémiai-mechanikai háttérpar kifejlődését igényelte. Az integrált áramkörti ipar az egykristályos alapanyagot szeletek formájában hasznosítja. A chipgyártás kiemelkedő termelékenysége az ún. **csoportos szeletmegmunkálással** biztosítható – méghozzá a javuló minőséggel párhuzamosan egyre növekvő szeletátmérő mellett. A termelékenységi követelmények által hajtva a félvezetőiparban a ma általánosan használt 200 és 300 mm-es méretnél túl az alapanyagipar már a 450 mm-es szeletátmérőt is gyártja (2. ábra). A szeletgyártás rendkívül összetett és meglehetősen költséges folyamat; orientált egykristály-húzási, ingotmegmunkálási, szeletelési, polírozási, tisztítási lépéssorozat végterméke. IC-gyártási célra ez a gigantikus háttérpar 1,6 millió tonnányi egykristályos szilíciumot állít elő, csaknem 7,2 milliárd amerikai dollár értékben, ami szeletformában 6,8 km²-nyi területet fedne le. Ennél olcsóbb gyártási technológiával készülnek napelemek céljára az ún. „solar-grade” polikristályos Si-alapanyagok. Mára az egykristályos szilícium gyártása is szinte kínai monopóliummá vált (> 85%).

A tömegpiacot jelentő napelem-felhasználás területén óriási a növekedés, hiszen világszerte napi félmillió fotovoltikus panelt helyeznek üzembe. Az International Energy Association szerint a következő öt év globális bővülését az energiatermelő kapacitás terén már 60%-ban a megújuló források (benn a napelemek) teszik majd ki, melyek összkapacitása 2021-re 7600 TWh lesz. Ez az USA és Európa mai teljes villamosenergia-termelésének felel meg.



3. ábra: A világ legnagyobb napelemerőműve a kínai Lungjanghszia-gátnál

Forrás: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=89668> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

A kínai Lungjanghszia-gátnál épült meg a világ legnagyobb napelemerőműve 2014-ben. 4 millió napelempanelt szereltek fel egy 26 km²-es területen. Az űrfelvételen látható erőmű 850 MW-os kapacitása 140 ezer háztartás áramellátását képes biztosítani.

Előrejelzések szerint 2030-ra nyerünk majd több energiát megújuló energiaforrásokból, mint fosszilis tüzelőanyagokból. A cél elérésében sokat segít majd a napelemeknél várható gyors **energiakonverziós hatásfok-növekedés**. A laboratóriumban pillanatnyilag már igazolt rekord-hatékonyságértékek:

- a **kristályos + amorf kombinált Si-cella** (180 cm²) esetében – 26,3%;
- a Si-alapú, de prizmás fénybontással és **dedikált színelnyeletéssel készülő, négyrétegű** 28 cm²-es cellánál – 34,5%;

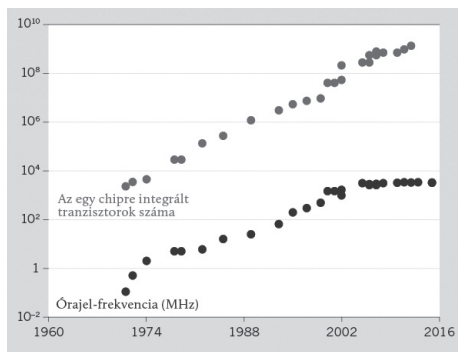
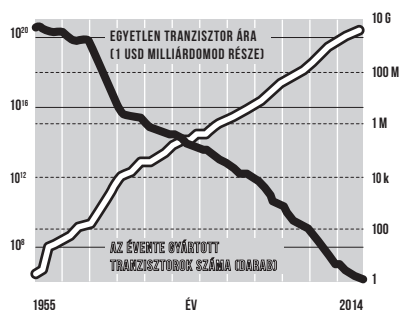
- a flexibilis hordozóra készülő, olcsó, de még instabil **perovszkitalapú napelemeknél**, ami a jövő nagy ígérete, 16 cm²-es méretben – 12,1%.

2015-ben ünnepeltük az ötvenedik évfordulóját annak, hogy megjelent a Gordon E. Moore Intel-alapító által publikált előrejelzés.¹ Az azóta „Moore-törvényként” ismert jóslat a Si-technológia hajnalán végzett középtávú megfigyelésen alapult. Moore azt állította, hogy a tranzisztorok száma az integrált áramkörökben évente megkétszereződik, ezért **az egy eszközre (tranzisztorra) vetített költség szintén exponenciálisan csökken**. A komplexitás növekedése a költség-hatékonyság növekedése mellett ráadásul az órajel-frekvencia, azaz az áramkörü működési sebesség exponenciális növekedését is jelentette.

Ez a **gazdasági előrejelzés** ötven éven át **önbeteljesítő jóslatként** diktálta az IC-ipar fejlődési ütemét és az ezt biztosító célokat előíró „útiterv” megvalósulását.² Joggal emelték ki a legnagyobb gyártók, hogy **Moore legnagyobb érdeme a koordináció segítése volt**, hiszen a fejlődési trendek világos ismeretében a szoftverházak a következő évekre előre jelzett specifikációjú chipekre fejleszthettek, ami aztán meg is teremtette a biztos, kalkulálható piacot a HW-SW-termékekre.

¹ <http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moore-s-law-1.19338/> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

² International Technology Roadmap for Semiconductors; https://www.semiconductors.org/main/2015_international_technology_roadmap_for_semiconductors_itsr/ (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

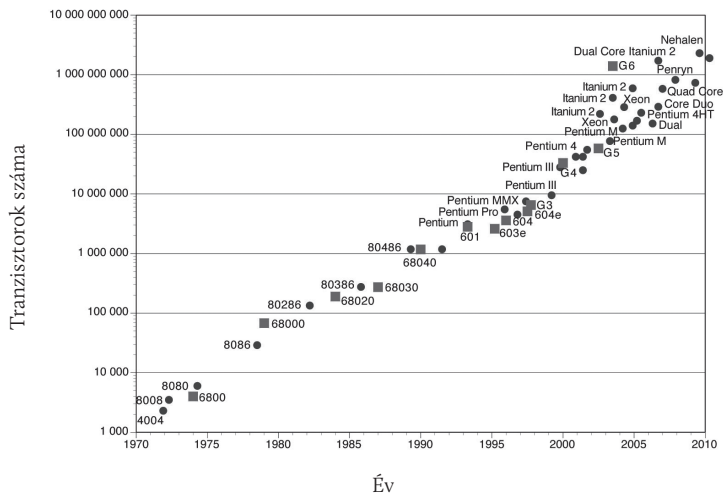


4. ábra: A bal oldali ábrán logaritmikus skálán látható, hogy az éves szinten gyártott integrált tranzisztorok számával (bal oldali y tengely) fordított arányban zuhant az egy tranzisztorra eső fajlagos költség a mai $< 10^{-9}$ dollár értékre (jobb oldali y tengely). A jobb oldali ábrán az egy chipen integrált tranzisztorok számának exponenciális növekedése és az elért maximális órajel-frekvencia alakulása látható az elmúlt évtizedekben. Feltűnő az utóbbi évtizedben mutatkozó szaturáció a korábbi exponenciális sebességnövekedéshez képest

Forrás: http://www.semiconductorscentral.com/moores_law.html (letöltés ideje: 2017. 01. 10.);

<http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moores-law-1.19338> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.) nyomán

Miközben az egy-egy processzorchipen integrált tranzisztorok száma mára 2–4 milliárdra nőtt (lásd 5. ábra az Intel mikroprocesszorchipjei esetében), **a digitális világ máig döntően az 1946-ban megalkotott, zseniális, von Neumann-féle univerzális számítógép-architektúrát használja.** Ezek az integrált eszközök biztosították a számítástechnika generációváltásait a mainframe-komputerektől a minikomputeren, a személyi számítógépeken, a laptopokon át a mai beágyazott processzorokig, digitális világunk mobilinternet-összeköttetésű, zsebben hordható eszközeiig. Az integráció növekedésével az egyes ciklusokban ráadásul a felhasználók száma is nagyságrendekkel nőtt.



5. ábra: Az Intel mikroprocesszorainak komplexitásnövekedése a Moore-törvény predikciója szerint: az exponenciális elemszám-sokszorozódás mára meghaladja a tízmilliárdnyi tranzisztort egy szilíciumlapkán

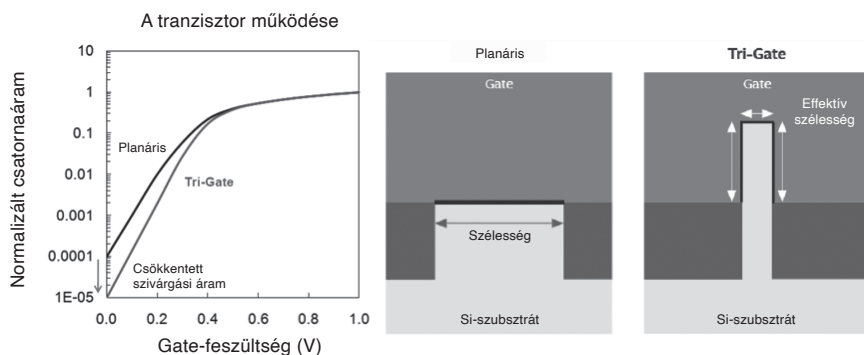
Forrás: <http://pointsandfigures.com/2015/04/18/moores-law> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.) nyomán

Most azonban az áramköri integrációban megtorpanni látszik a Moore-törvény szerinti folyamatos költségcsökkenés. A ma gyártott legkorszerűbb processzorok a vírusoknál kisebb, 10 nm-es kritikus méretekkkel épülnek fel. A fizikai korlátokat előreláthatólag 2020 táján érjük el a 2-3 nm-es méreteknél, ami már csupán 10 atom mérete. Ha gigászi erőfeszítéssel és költségráfordítással sikerülne is technológiailag kiaknázni ezt a mérettartományt, **az elektron kvantumbizonytalansága miatt a töltéstranszporton alapuló tranzisztorműködés, azaz a digitális kapcsolás akkor is reménytelenül megbízhatatlanná válik.**

Ma még kijelenthetjük, hogy a komplexitás növelésében a korlátait feszegető szilíciumtechnológiának nem mutatkozik kézenfekvő „utóda”, egyelőre tehát folytatódik a méretcsökkentés. Csakhogy a nagy integráltságú, kis fogyasztású áramkörök elemszámfüggő szivárgási és termikus problémái miatt (6. ábra) ez **már nem oldható meg a hagyományos kétdimenziós síkbeli építkezéssel, azaz a „planáris technológiával”.** Háromdimenziós építkezésre van szükség,

ahogy azt a *Nature* 2016. februári számában³ bejelentették, és ezzel a **Si-technológia nem követi tovább a Moore-törvény előírásait**.

A 2015-ös ITRS-menetrend ugyan 2030-ig megadja a különféle elnevezésű, „fin-FET”, azaz a szubsztrát síkjából kiemelkedő „uszony” segítségével kialakított tranzisztorgate-ekkel felépülő, egymásra rétegelt tranzisztorokat is tartalmazó 3D-megoldások műszaki igényeit, de a méretcsökkentési előírások⁴ követése, követhetősége egyre bizonytalanabbá válik.



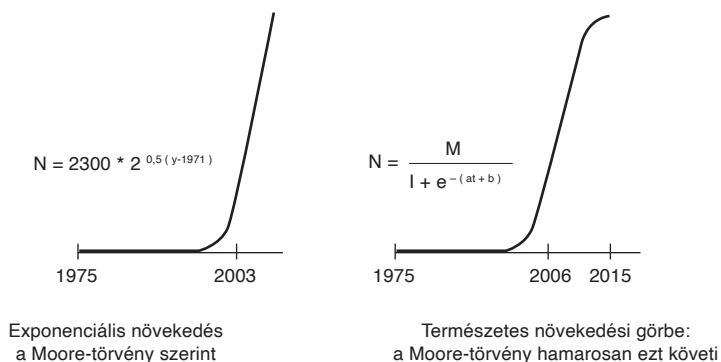
6. ábra: A planáris Si-tranzisztornak a megnövekedett küszöbfeszültség alatti árama miatt (bal oldali ábra) szükség van az egyszerű, síkbeli elrendezésnek a 3 dimenziós, ún. tri-gate vagy fin-FET tranzisztorstruktúrával való leváltására (jobb oldali ábra), amelynek kedvezőbb a küszöbfeszültség alatti szivárgása

Forrás: <http://www.realworldtech.com/intel-22nm-finfet/> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

A Moore-törvény szerinti **exponenciális felfutást** tehát – akárcsak a természetes növekedési folyamatok esetében – hamarosan a telítésbe hajló **logisztikai S-görbével kell helyettesítenünk** (7. ábra).

³ Waldrop, M. The chips are down for Moore's law. *Nature*, 2016, 530, 144–147.

⁴ http://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)



7. ábra: A Moore-törvény szerinti exponenciális növekedést leíró függvény (balra) és a mai komplexitásnövekedési folyamatokat jobban közelítő természetes növekedési görbe (jobbra)
 Forrás: https://thenextwavefutures.files.wordpress.com/2009/08/end_of_moores_law_growth_curves.jpg (letöltés ideje: 2017. 01. 10.) nyomán

A folyamatos beruházási kényszer (technológiafejlesztés és gyárépítés) már az elmúlt évtizedek során alaposan megrostálta a globális szereplők névsorát. A piac növekedése, elsősorban a „felhőtechnológia” és az okostelefonok kifizetésű IC-tömegigénye miatt **a félvezetőipar most kénytelen lesz az eddigi legnagyobb tőkeinvestícióját végrehajtani**. A gazdaságossági okokból szükségesnek látszó 450 nm-es szeletátmérőre való áttérést és a < 10 nm-es csomópontok elérése esetén a gyártóberendezésekhez szükséges 3–8 milliárd dolláros beruházást már csupán néhány egyesült államokbeli és ázsiai gyártó (IBM, Intel, Samsung, TSMC) lesz képes finanszírozni.

Túlzás nélkül kijelenthető, hogy **a szilíciumtechnológia a világ legfejlettebb csúcstechnológiája**. A szilíciumtechnológia teremtette meg a digitalizáció teljes eszközrendszerét – szűkebb és tágabb értelemben is. Eljárásait, az itt kialakult gyártási kultúrát ugyanis más iparágakban is sikerrel hasznosítják.

A digitalizáció árnyoldalaira hívta fel viszont a figyelmet Vinton Cerf, az internet és a TCP/IP-protokollkészlet atyja. Szerinte „az internet őskorának fontos dokumentumait már most szinte lehetetlen megtalálni. Lassan jobban kutatható a 20. század közepe, amikor még minden papíralapú volt, mint a vége, amikororra lezajlott a digitalizáció térhódítása”. Az állítás igazsága kézenfekvő, hiszen

az adathordozók gyors fizikai és erkölcsi elavulása valamennyiünk személyes napi tapasztalata. Az „örökkévalóságnak” szánt kompakt adatkódolást alighanem csak az evolúció során kifejlődött legmegbízhatóbb információkódolással, a biológia segítségével sikerülhet megvalósítani. Egy zürichi csoport 83 kilobájtnyi adatot 499T, egyenként 158 nukleotid hosszúságú DNS-szakaszra kódolt így fel, amelyeket 150 nm-es szilika nanogömbökkel izoláltak a környezettől. A kiolvasás a nanogömbök leoldása után viszont szilícium szekvenáló chippel oldható meg.⁵

A számítási kapacitás bővítése a szilíciumtechnológia fizikai-technológiai korlátainak elérése után is folytatódni fog. Ma ezek az alternatív megoldások körvonalazódnak:

- szupravezető kvantumchipek;
- fotonikai és nanomegoldások a kvantumszámítógépekben;
- esetleg a 2D-anyagok (grafén) elméleti lehetőségeinek a kiaknázása.

Ezek közül akármelyik legyen is majd a befutó, mindegyikük csak a szilíciumtechnológia eredményeire alapozva, annak módszereit, know-how-ját és gyártóbázisát kihasználva tud kifejlődni!

Az ITRS (International Technology Roadmap of Semiconductors) félvezető-útiterv⁶ 2015-ben követi először az ún. „More than Moore” („több, mint Moore”) stratégiát. Most először tehát **már nem a technológiai lehetőségek kínálata hajtja az alkalmazást, hanem a különböző alkalmazások követelményei diktálják a chiptechnológia-fejlesztés irányát** (lásd szuperkomputerek, felhőtechnológia az adattárolásban, okostelefon stb.). A meghatározó felhasználói igények korunk aktuális társadalmi kihívásaiból vezethetők le:

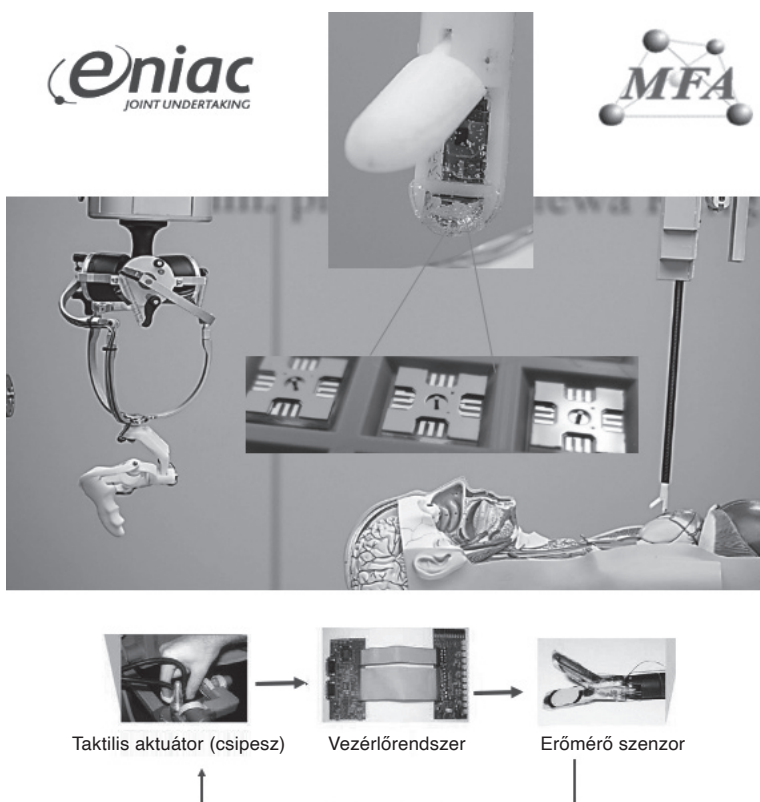
- biztonság: személyi (terrorfenyegetettség), adatkezelési, élelmezési, környezeti, háztartási stb.;
- egészség: diagnózis, terápia, rehabilitáció, gerontológia, epidemiológia, fertilitás;

⁵ Grass, R. N. et al.: Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes. *Angewandte Chemie*, 2015, Vol. 54, Issue 8, 2552–2555.

⁶ http://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

- mobilitás: közlekedés, autonóm hajtás, drónok;
- gyártástechnológia: robotizáció, mesterséges intelligencia;
- energiatakarékosság, környezettudatosság.

A fenti területek eszközeivel szemben általános követelmény **a kis fogyasztás, ezért a hordozható, viselhető, olcsó, flexibilis, beültethető, vezeték nélkül kommunikáló, autonóm tápellátású érzékelők fejlesztése** kerül előtérbe.



8. ábra: Az MFA-ban kifejlesztett, Si-tömbi mikrogépészeti eljárással készült erőmérő chip taktilis érzékelő alkalmazásban egy EU-projektben fejlesztett sebészeti robot minimálisan invazív sebészeti beavatkozáshoz kifejlesztett laparoszkópjának a végén

Forrás: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/201986/factsheet/en> (letöltés ideje: 2017. január 10.) nyomán

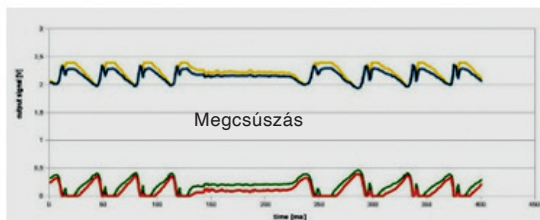
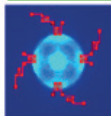
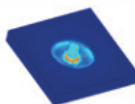
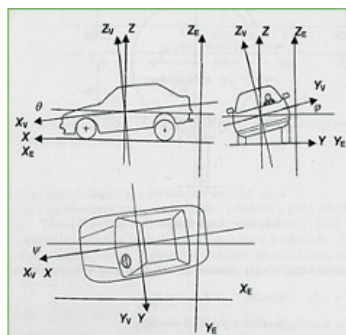
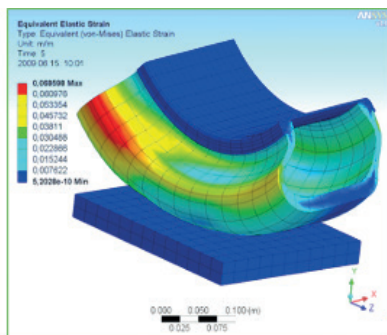
Kutatóhelyem, a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet (MFA) a szilíciumtechnológiai területen több mint négy évtizede folytat K+F tevékenységet. Az utóbbi két és fél évtizedben a mikroelektromechanikai-rendszerek (MEMS) kutatása állt a középpontban. A 3D megmunkálás, az ún. tömbi mikrogépszet, a korszerű anyagok és nanoszerkezetek alkalmazásával született hazai teljesítmények tették lehetővé, hogy a fentebbi, kiemelt szilíciumtechnológiai alkalmazási területeken is bekapcsolódva a nemzetközi együttműködésekbe, értékes hozzájárulást tudtunk nyújtani.

Az Intelligent Catheters in Advanced Systems for Interventions (ICITE) Philips vezette európai ENIAC-projekt⁷ keretében a korábban kifejlesztett piezorezisztív vektoriális erőmérő chipünket használjuk egy robotkarral vezérelt katéter hegyén, illetve a megfogó csipeszben az aktuátor bemeneti tapintásérzékelőjeként, amivel az operátor „taktilis visszajelzést” kap a beavatkozásról. Az erőmérőben a piezorezisztív ellenállásokat tartalmazó membrán és joystick a már említett tömbi mikrogépszettel, **mély reaktív ionmarás segítségével** készül.

A robotsebészeti területen piacvezető daVinci Surgery készülékeinek képességeivel ugyan nehéz versenyre kelni, de egyszerűbb beavatkozásoknál az MFA-chip segítségével felépített visszajelző rendszerrel igen flexibilis műtéti lehetőséget tudtak kialakítani a lengyel partnerek robotjára alapozott katéterfejlesztéssel (8. ábra).

A robosztusabb kialakítást igénylő, **autóabroncsba integrált erőmérő alkalmazás** ugyancsak a vektoriális detektálás lehetőségeinek kiaknázására épül. Ebben a **közlekedésbiztonsági alkalmazásban** a kerék és az útfelület közötti tapadás monitorozása és az esetleges megcsúszások, kipörgések azonnali visszajelzése a cél, hogy a vezetést támogató (*augmented driving*) vagy automata hajtás (*autonomous driving*) vezérlés számára használható bemenőjelet szolgáltatson az alkalmazás (9. ábra).

⁷ <https://cordis.europa.eu/project/rcn/201986/factsheet/en> (letöltés ideje: 2017. január 10.)

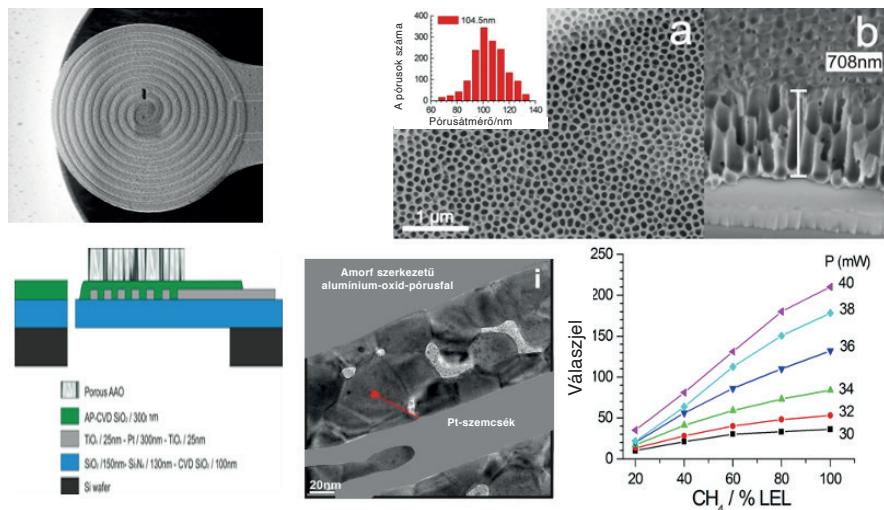


9. ábra: Az MFA erőmérő chipje gumiabroncsba szerelve alkalmas a köpenykeresztmetszet terhelés közbeni torzulásának folyamatos monitorozására. A legnagyobb torzulást szenvedő pozícióban rögzített erőmérő és meghajtókiolvasó elektronika a gépkocsi kritikus helyzeteiben (kanyarban bedőlve, megcsúszva stb.) értékes jeleket szolgáltat az azonnali beavatkozáshoz. A piezoellenállásokon mért periodikus jel kimaradása pl. az útfelület és a futófelület közötti tapadás hiányát mutatja, ami megcsúszást jelent

Az autóabroncs keresztmetszeti szimmetriája a kerékre ható tangenciális (menetirányra merőleges irányú) erők következtében torzul (9. ábra). Ennek a deformációnak mérésére az erőmérő szerelvényt a stratégiaiilag kritikus pozícióban rögzítjük a gumiköpeny belsejében. Az egység tartalmazza a fellépő vektoriális erőkomponensek jeleinek kiolvasó egységét, a vezetékmentes jeltovábbítás rádióadóját, illetve antennáját, amelyen keresztül a forgó abroncson kívülről az egység táplálása is megoldott. A normál körülmények között, egyenletes menetsebesség mellett detektált periodikus jelsorozat az abroncs és az útfelület közötti tapadás megszűntekor (bármi legyen is ennek az oka) azonnal megszakad, ami pontosan jelzi a beavatkozás (fékezés vagy gyorsítás) szükségességét a vezetésnek.⁸

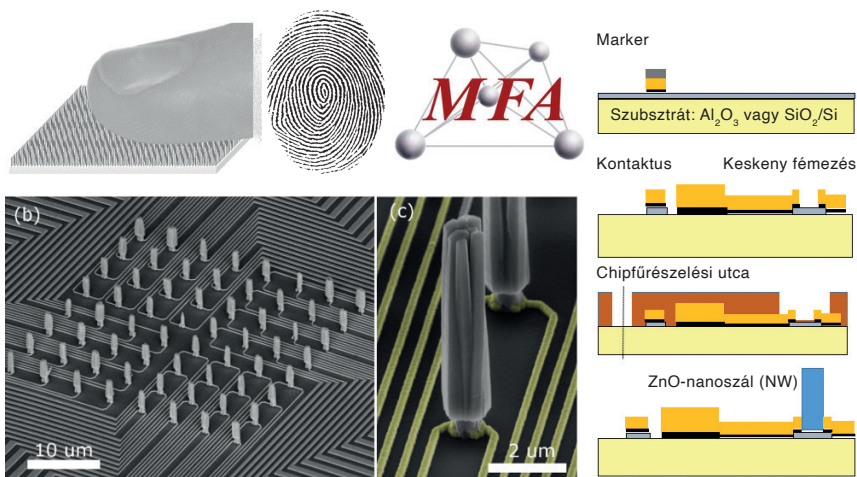
Fontos biztonságtechnikai követelmény a **robbanógázok, -gőzök és oxidálható komponensek (pl. CO) kis koncentrációjának detektálása riasztás céljából**. Legkritikusabb a metán jelenlétének robbanásbiztos kimutatása, ami oxigén jelenlétében magas hőmérsékletű heterogén katalitikus égetéssel történik. A rendszerbe táplált energiamennyiségnek ugyanakkor olyan kicsinek kell lennie (esetünkben < 40 mW), hogy még zárlati szikra esetén se legyen képes a gázelegyet felrobbantani (10. ábra).

⁸ Radó, J. – Battistig, G. – Kulinyi, S. – Végvári, R. – Bársony, I.: *Monitoring the tyre deformation on a vehicle on the run*. EUROSENSORS 2016, Budapest, September 4–7, 2016.



10. ábra: A komplex membrántechnológiával létrehozott mikrofűtőtestre nagy fajlagos felületű pórusos alumínium-oxid-mátrixot integrálva az ALD (atomi rétegleválasztás) módszerével most sikerült először kellő borítottságban Pt-nanokatalizátor szemcséket leválasztanunk, hogy az egzoterm égetés során keletkező hő érzékelésével az alsó robbanási határ alatt, ppm-tartományban érzékeny metánszenzort készítsünk

Forrás: Biró, F. – Radnóczy, Gy. Z. – Takács, M. – Baji, Zs. – Dücső, Cs. – Bársony, I.: *Pt deposition techniques for catalytic activation of nano-structured materials*. EUROSENSORS 2016, Budapest, September 4–7, 2016; Biró, F. – Dücső, Cs. – Radnóczy, Gy. Z. – Baji, Zs. – Takács, M. – Bársony, I.: *ALD nano-catalyst for micro-calorimetric detection of hydrocarbons*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 247, 617–625.



11. ábra: A szilícium kiolvasó áramkörre megfelelő magréteg alkalmazásával nedves kémiai növesztésű, egykristályos ZnO-nanohuzalok kialakítására nyílik lehetőség. A 22 lépéses technológiai folyamat 6 elektronsugaras litográfiai műveletet tartalmaz 50 nm illesztési pontossággal

Az EU FP7 PiezoMat „High-Resolution Fingerprint Sensing with Vertical Piezo-electric Nanowire MATrices” projektben⁹, amit a grenoble-i CEA LETI koordinál, célunk felületi mintázatok nagy térbeli felbontású, akár 3D módú érzékelése piezoelektromos ZnO-nanoszálak integrálásával (11. ábra). Időközben az MFA már ezzel a technológiai képességgel is rendelkezik.¹⁰

A fenti példák igazolják azt a tudományos-technológiai színvonalat és eredményességet, amit az MFA az utóbbi két évtizedben a szenzorkutatás és MEMS területén elért. Ennek a nemzetközi sikerességnek és reputációnak volt köszönhető, hogy 2012-ben az EUROSENSORS konferenciasorozat nemzetközi irányítótestületétől megbízást kaptam a 30., jubileumi konferencia megszervezésére Budapesten.

⁹ <https://cordis.europa.eu/project/rcn/109782/factsheet/en> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

¹⁰ Volk, J. et al.: *Integrated piezoelectric nanowire arrays for high resolution tactile mapping*. EURO-SENSORS XXX, Budapest, September 4–7, 2016.



12. ábra: A konferencia elnöke megnyitja az EUROSENSORS XXX. rendezvényt Budapesten

Az MTA Műszaki Tudományok Osztálya támogatásával 2016. szeptember 4. és 7. között a Kongresszusi Központban rendeztük meg a konferenciát 521 fizető résztvevővel (12. ábra). A programban 4 plenáris, 8 meghívott és 127 szakmai előadásra, valamint 329 poszterelőadásra került sor 12 szekcióban. A konferencia két kiemelt területe – a hazai gazdasági prioritásokhoz igazodva – az orvosi szenzorika és az automotív szenzoralkalmazások voltak. Az elfogadott előadások open access formában az Elsevier Procedia Engineering sorozatában (ISSN 1877-7058) jelentek meg.

A szilíciumtechnológia gyors fejlődése a most 42 éves mobiltelefonióból is kiszorította a vegyület-félvezető GaAs-áramköröket. Martin Cooper, a celluláris telefon atyja joggal jegyezte meg a találmányáról, hogy bár csupán tíz éve jelentek meg az okostelefonok, **„a vezeték nélküli összekötöttség potenciálisan forradalmasíthatja az egészségügyet és az oktatást, legnagyobb hozadéka azonban magának az együttműködés koncepciójának az átalakulása lesz.”**

A mai okostelefonok zömében a mikroérzékelők egész arzenálja működik:

- 2 kamerachip;
- 3 mikrofon (ultrahang-érzékelés);
- fényérzékelő (UV);
- közelítésérzékelő;
- tapintásérzékelő (ujjlenyomat);
- pozícióérzékelés: GPS, WIFI, celluláris, bluetooth;
- gyorsulásérzékelő;
- magnetométer (Föld-mágnesség);
- giroszkóp;
- nyomásmérés;
- hőmérsékletmérés;
- nedvesség, kémiai érzékelő.

Egy karperec segítségével ezeket további, az életfunkciók monitorozására, biometria mérésekre alkalmas működési módokkal lehet kiegészíteni.

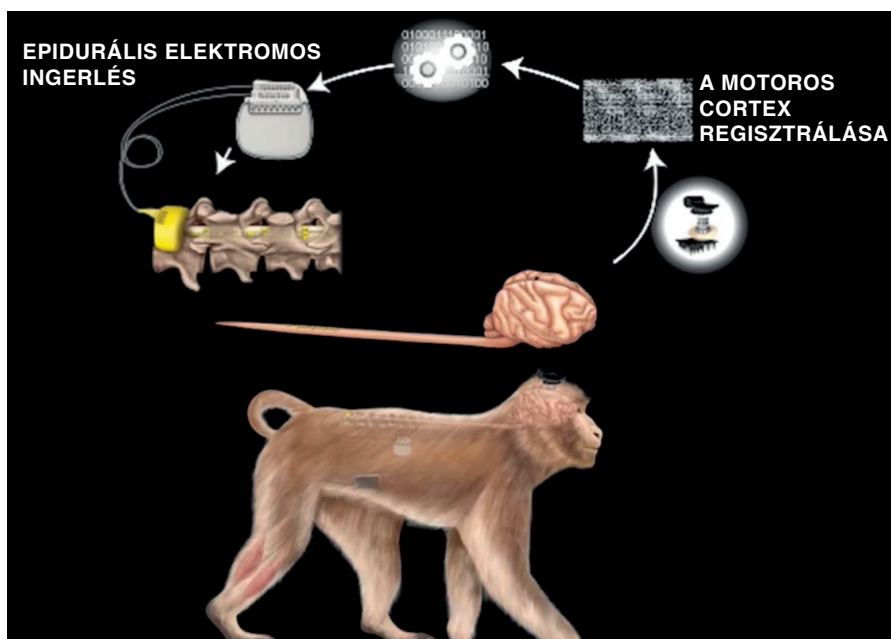
2020-ig a vezeték nélküli összeköttetésű eszközök száma a 2014-es 6,2 milliárdról óvatos becslés szerint is 21–40 milliárdra nő. Ez már az *Internet of Things*, mi több, az *Internet of Everything* korszaka, ami az intelligens eszközök milliárdjait képes a zsebünkben hordott mobileszközről irányítani a világítóeszköztől az ajtózárákig. Ennek természetesen előfeltétele a kis méret, az alacsony fogyasztás és a megfelelő ár.

Ez a kihívás elegendően nagy külső hajtóerő ahhoz, hogy az elektronikai ipar jelentős részét, különösen a vezeték nélküli összeköttetést és a szenzorikat teljesen új alapokra helyezzük.

A biológiai és elektronikus rendszerek együttműködése pár évtizede már az érdeklődés homlokterébe került. Intenzíven kutatott terület a mozgásokban, érzékelésükben akadályozott páciensek életfunkcióinak javítása, pótlása. Az IC- és MEMS-technológia lehetőségei ezen a területen is gyors ütemben fejlődnek. A képernyők előtt ülők is meggyőződhetnek a Duke University „Walk Again” projektjének eredményességéről, amikor a braziliai futball-vb-n 70 000 néző előtt a kezdőrúgást egy járásképtelen mozgássérült végezte el. Agyhullámaival vezérelte a végtagjait pótló elektromechanikus „exoskeletont”,

és a mozgássorozatot a beépített érzékelők visszajelzései alapján gondolataival irányította.

A kiesett mozgásszervi funkciókat rekonstruálja a gerincsérülés során megszakadt **vegetatív ingerátvitel helyettesítése** elektronikus implantátummal. Itt tehát nem az autonóm működésre programozott, **szívritmus-szabályozó jellegű** beültetett elektronikáról van szó, hanem a páciens „akaratával” irányított eszközökről.



13. ábra: Az agyhullámmal vezérelt, mesterségesen gerjesztett epidurális stimulussal a saját végtagok mozgatása valósítható meg, amit sikeres állatkísérletek már igazoltak, és a technika humán kipróbálása is folyamatban van. Ez a kézzelfogható lehetőség reménysugár lehet a kerekesszékekbe kényszerült baleseti sérültek tízezreinek.

Forrás: <http://newatlas.com/wireless-neurosensory-paralyzed-monkeys-move/46361/> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)



14. ábra: A Biohax Sweden cég használja azt az apró, szilíciumalapú mikrochip-implantátumot, amit injekcióval ültetnek a kézbe – hasonlóan a kutyák regisztrációra szolgáló mikrochipjeihez. Pl. a svéd Epicenter digitális innovációs központ munkatársai közül is sokan beoltatták magukat vele, hiszen személyi azonosításra és bizonyos jogosultságok automatikus kezelésére kényelmi szempontból igen előnyösnek találták

Forrás: www.biohaxsweden.com/ (letöltés ideje: 2017. 01. 10.); <https://www.cyborgnest.net/north-sense> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

Aligha tévedünk nagyot, ha azt jósoljuk, hogy a hasonló megoldások rohamosan elterjednek majd, annak ellenére is, hogy velük kapcsolatban számos „személyi-ségi jogi” aggály merül fel.

A gondolatokkal, illetve az agyáramokkal vezérelt eszközök integrációja az emberi szervezettel már több évtizede izgatja a kutatókat. Számos lehetőség nyert mára kísérleti bizonyítást is, és több cég kifejezetten erre a fejlesztési irányra specializálódott. Ezzel a módszerrel **érzékszerveink képességeit megtöbbszöröszhetjük, illetve újakkal bővíthetjük.** A Cyborgnest cég elektronikus iránytűje például a nyak alá piercinggel rögzítve olyan érzékelési funkciót biztosít az ember számára, amit az evolúció során valószínűleg elvesztettünk. A mesterséges égtájismeret állítólag új „szervként” funkcionál, és a többletinformáció idővel megváltoztatja, hatékonyabbá teszi érzékszervi tájékozódásunkat.

Ennél sokkal messzebb ment Kevin Warwick, a Reading University kiberetikaprofesszora, akit gyakran csak „Cyborg Scientist”-ként szoktak emlegetni.



15. ábra: Kevin Warwick, a Reading University „Cyborg Scientist”-nak nevezett kibernetikaprofesszora a bal alkarjába ültetett mikrochippel vezérli a kézrobotot

Forrás: <http://physicscentral.com/explore/action/project-cyborg.cfm> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

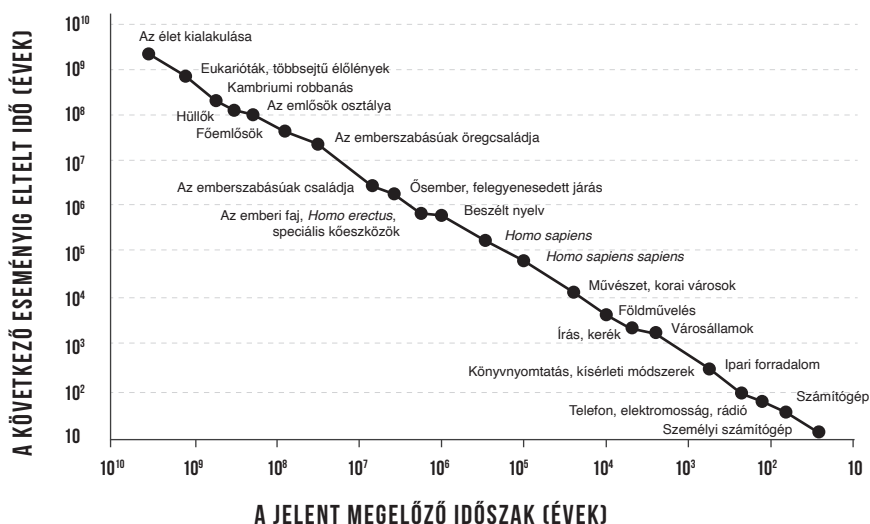
Bal alkarjába a megfelelő mozgatóideg-végződés csatlakoztatásával sebészetileg egy 100 elektródás mikrochipet implantáltatott már 1998-ban. Kezdetben egy mesterséges robotkéz mozgatait tudta így saját keze mozgásával vezélni, miközben „érezte” a megfogás erősségét is (15. ábra). Később feleségét is ellátta egy, az idegrendszerét a külvilággal összekapcsoló implantált chippel, amin keresztül a házaspár kommunikáció nélküli, „telepátiás érzésvitelt” tudott megvalósítani – egyikük érzekelte a másik mozgatait, mi több, szándékait is.

Ha viszont ez lehetséges, miért ne lehetne az emberi agy képességeit többszörözni úgy, hogy agyunkat óriási adatbázisok, számítási kapacitások lehetőségeivel kibővítve működtessük? A Neuralink cég tervezett termékével ez már napjaink mikroelektronikai lehetőségeinek birtokában is valósággá válhat, ahogy a napokban az alapító, Elon Musk bejelentette. A „neural lace” az agy-

ba, az agyra integrálható agy-komputer interfész, **ami a biológiai intelligenciát a digitális intelligenciával köti össze.**

A technológia fejlődéstörténete és az abból levonható tanulságok első-sorban a jövőkutatók fantáziáját mozgatták meg. A technológiai fejlődésnek a Moore-törvény által a szilíciumtechnológia példáján ismertté tett exponenciális sebessége sokakat elgondolkodtatott... Következtetéseiket, jóslataikat a tudományos világ vitatja, részben cáfolja, mi több, esetenként a bulvártudomány birodalmába sorolja.

Ray Kurzweil, a Google vezető technológusa állította fel azt a tézist, hogy az élet megjelenése után a Földön a biológiai evolúció az információátadás folyamatos tökéletesedése révén hozott létre egyre fejlettebb lényeket egészen a gondolkodó, művészeti-tudományos, társadalmi teljesítményekre képes emberig.

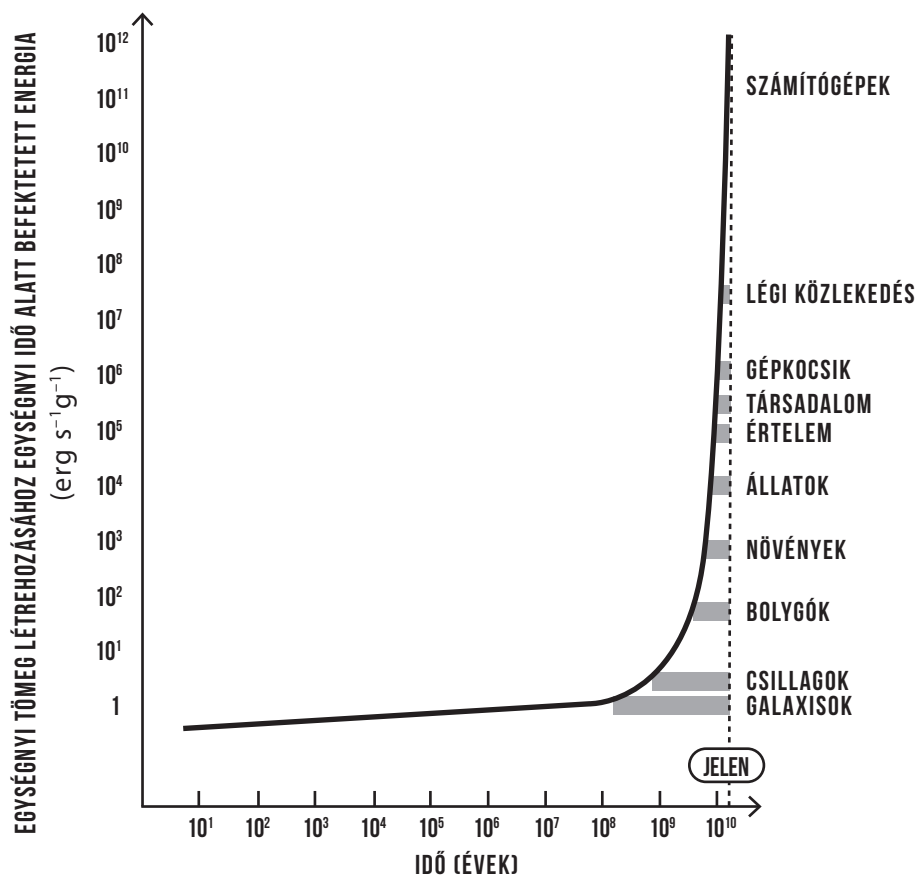


16. ábra: A biológiai evolúció megelőző 3 milliárd évében az információátadás tökéletesedésének állomásai jól ábrázolhatók egy exponenciális időskálán, amely töretlenül folytatható immár az emberi intellektuális tevékenység eredményeként kitalált, illetve tökéletesített információátadási lehetőségek (az írástól a személyi számítógépig) időbeni megjelenésével

Forrás: Kurzweil, Ray: *The Singularity is Near*. www.singularity.com (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

A biológiai evolúció tehát mintegy folytatódik tovább az emberi intelligenciának betudható „technológiai evolúcióval”.

Ha a fenti felfogást követve, a kozmológiai evolúciótól kezdve egy exponenciális időskálán ábrázoljuk az egyes lépcsőfokok kialakulásához szükséges befektetett fajlagos energiaráfordítást, ugyancsak megdöbbentő eredményt kapunk.



17. ábra: A világegyetem kialakulásától napjaink technológiai vívmányaiig az egyes elemek létrejöttéhez szükséges, időegységre és tömegre vetített fajlagos befektetett energiamennyiség logaritmikus időskálán ábrázolva az ember megjelenése után egyre gyorsuló tendenciát mutat
Forrás: Kurzweil, Ray: *The Singularity is Near*. www.singularity.com (letöltés ideje: 2017. 01. 10.) nyomán

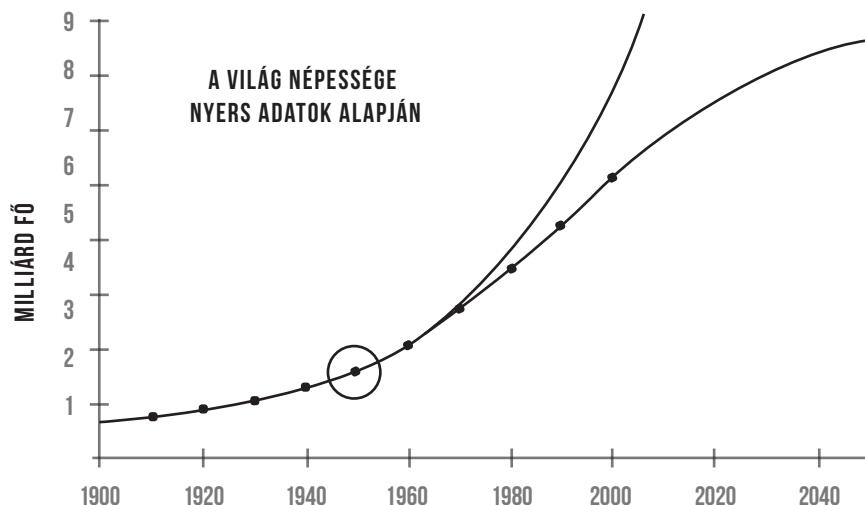
A galaxisok, a csillagok, az égitestek létrehozásához szükséges kozmológiai és a biológiai evolúciót jelentő gigantikus energiabefektetés a Földön évmilliárdok során hasznosult. Ugyanakkor az exponenciálisan felgyorsult technológiai fejlődés nagyságrendekkel nagyobb fajlagos energiát igényelt (17. ábra), amit viszont csupán néhány száz év alatt szabadítottuk fel. Egyébként az ember által alkotott ún. „technoszféra” tömegét ma 30 billió tonnára, azaz 30 teratonnára teszik, aminek létrehozásához az emberiség **megdőbbséget rablógazdálkodást folytatótt és folytat az erőforrásokkal, az anyaggal, az energiával.**

Az exponenciális fejlődési sebesség feltételezése implikálja, hogy az egyes új, korszakalkotó műszaki eredmények megjelenése között csökken az időintervallum. A robotika forradalma az emberi intelligenciát meghaladó, nem biológiai eredetű mesterséges intelligencia (MI) kiteljesítését jelenti. A nanotechnológia forradalma az anyag molekuláris, atomi szintű manipulációjának eredménye. A genetikai forradalom lehetővé teszi saját biológiánk átprogramozását, a betegségek kiiktatását és az öregedés lassítását. Az **akceleráció kétségtelen tény**, az utóbbi évtizedek új technológiai vívmányainak kifejlődése és tömeges elterjedése, a 100 százalékos penetráció elérése is egyre rövidülő idő alatt érhető el.

A szilíciumtechnológiából ismert Moore-törvény szerint a számítógépek teljesítménye lebegőpontos műveletvégzés/s (flops) egységekben mérve 18 havonta kétszereződik meg. Az emberi agy ekvivalens számítási teljesítményét ma 10×10^{15} , azaz 10 petaflopsra taksálják, bár a legutóbbi hírek szerint akár ennél két nagyságrenddel nagyobb is lehet. Kérdés, mikorra érik el a komputer az emberi agy számítási teljesítményét.

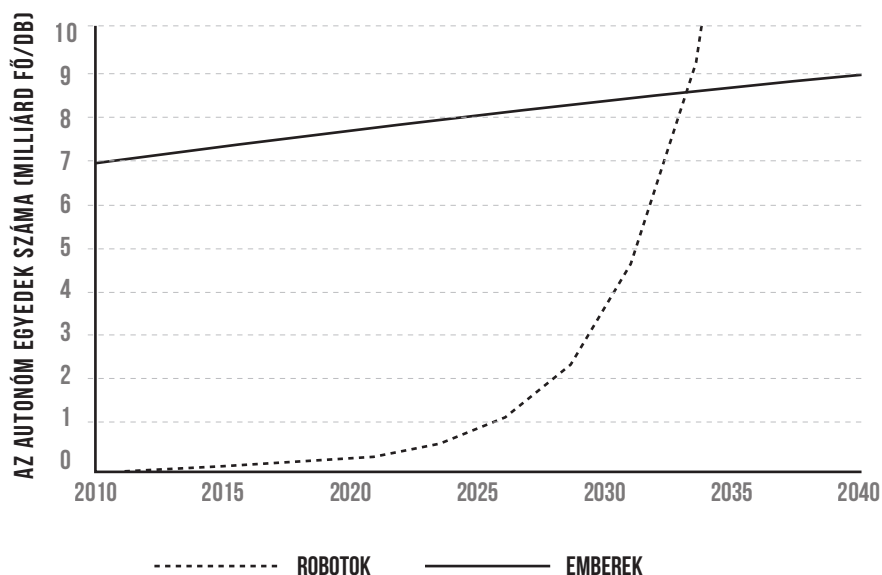
Kurzweil vitatott elmélete szerint a biológiai és technológiai fejlődés közötti zökkenőmentes exponenciális **előrehaladás csak egy szingularitásig folytatható**, amin túl az emberiség elveszti az ellenőrzést az általa létrehozott „mesterséges intelligencia” felett. Jelenleg a kisemlősök agyának ekvivalens számítási kapacitását állítottuk már elő mesterségesen, 2023-ra várható az emberi agy kapacitásának meghaladása. 2015-ben a Lawrence Livermore Laboratóriumban működő IBM Blue Gene/Q szuperkomputer már elérte a 16,3 petaflops számítási teljesítményt.

A Kurzweil által prognosztizált szingularitás, vagyis a teljes akkori emberiség kumulált agyi számítási képességének mesterséges meghaladása 2045-ben „fenyeget” majd. Szerinte mostanában értünk el az „exponenciális fejlődési görbe könyökpontjára”, ahonnan a robbanásszerű fejlődés megállíthatatlanná válik...



18. ábra: A világ népességének alakulása a 7. ábrán bemutatott természetes növekedési görbét követi a hatványfüggvény szerinti növekedéssel szemben

Forrás: <http://www.growth-dynamics.com/articles/Kurzweil.htm> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)



19. ábra: A világ népességének és a robotok számának várható alakulása a következő két évtizedben az előrejelzések szerint

Forrás: <http://earlywarn.blogspot.hu/2012/04/global-robot-population.html> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

Csakhogya a természetes növekedési folyamatokban tapasztalható exponenciális időfüggések csupán kezdeti szakaszai egy logisztikus görbének. Így a prognosztizált adatok szerint 2040 körül kb. kilencmilliárdos szinten telítődik majd a világ népessége (18. ábra).

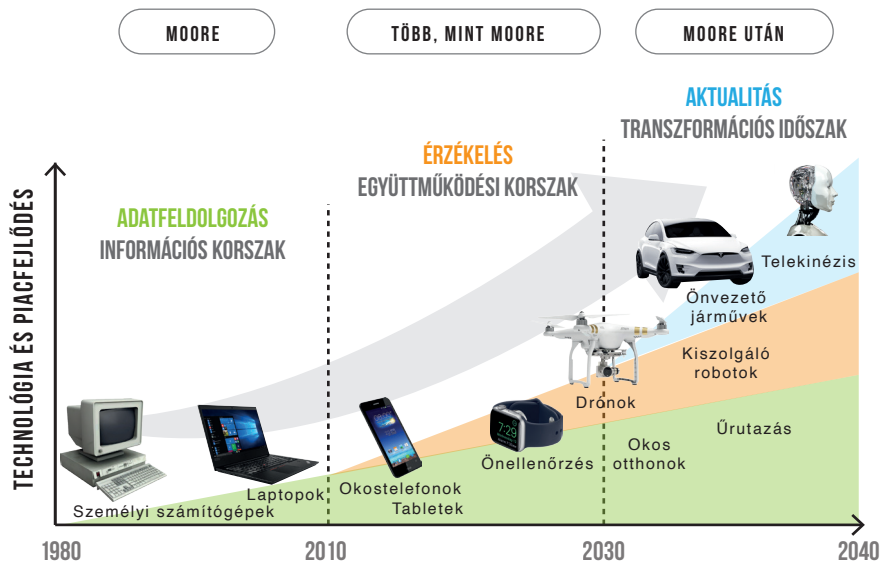
Theodor Modis, Kurzweil legnagyobb kritikusa szerint ma a technológiai szigmoid görbének a kezdeti szakaszán járunk csupán, ezért a „könyökponthoz” képest a fejlődés maximum két nagyságrenden belül szaturációba hajlik majd. **A ma tapasztalathoz képest egyre ritkábbak lesznek a technológiai áttörések, azaz „a Kurzweil-féle szingularitásjóslat” mellett nem szólnak tudományos érvek.**

A robotizációt nemcsak a gyártástechnológiában, hanem a személyes használatú eszközeinkben is forradalmasítja majd a mesterséges intelligencia gyors fejlődése. Egyes japán előrejelzések szerint kb. 2030-35-ben haladja majd meg az MI-robotok száma a Föld akkori populációját (19. ábra).

A mesterséges intelligencia alkalmazását Charles Rosen, a Stanford Research Institute (ma SRI International) Gépi Tanulási Csoportjának vezetője már 1964-ben javasolta. Az első önállóan gondolkozó, működő mobil robot, „Shakey” mégis csak 1972-re épült meg. A tanulási képességekkel felruházott MI már bizonyított: a kognitív képességgel ellátott gépek sorra döntötték meg a rekordokat, egyebek közt a stratégiai játékokban is:

- 1997-ben az IBM Deep Blue számítógépe legyőzte a sakkvilágbajnok Garri Kaszparovot.
- 2016-ra már a legkifinomultabb stratégiai játékokban, a góban is a Google MI nyert Lee Sedol gózszenivel szemben.
- A nyelvi fordítási feladatokat lassan átveszik a fordítóprogramok (lásd Google Translate).
- A Google sofőr nélküli gépkocsija MI-vezetéssel már félmillió balesetmentes kilométert abszolvált a forgalomban.
- A Rubik-kocka kitekerési világrekordját (4,9 másodperc) nyolcszorosan múlta felül az Infineon MI-robotja.

A mesterséges intelligencia kreatív gondolkodásával szembeni ellenérv, hogy csak racionális feladatmegoldásra képes, „művészeti téren” nem versenyképes az emberrel. Ezt igyekszik cáfolni a Google Deep Gene MI egy „festménye”, amely nyilvános aukción kelt el, vagy például az IntelligentX, egy oxfordi start-up cég kereskedelmi forgalomba került sőre, amelyet a fogyasztói visszajelzések figyelembevételével MI szintetizált.

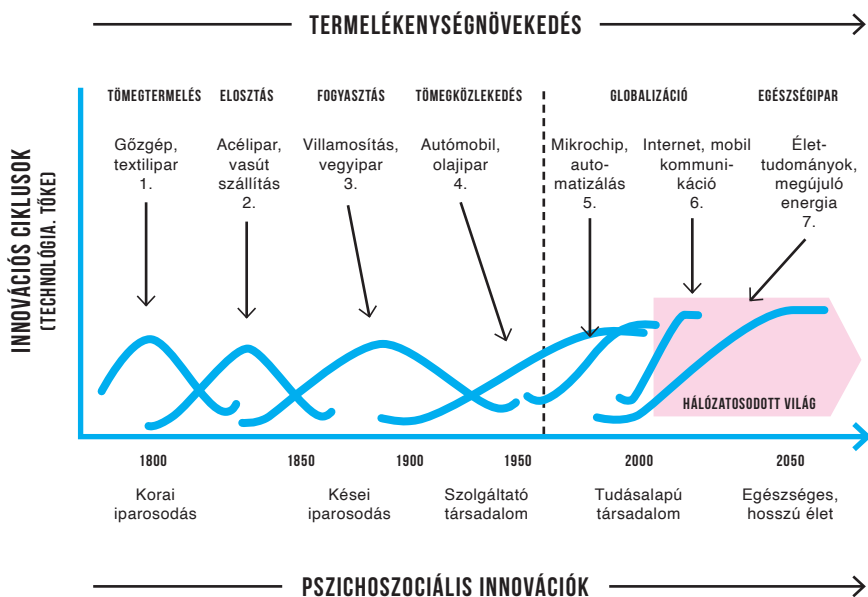


20. ábra: Az újabb piaci igényekre gyorsuló ütemű funkcionalitásbővüléssel és növekvő komplexitással reagáló „technológiai evolúciós folyamat” – a szilíciumtechnológiának köszönhetően

Lezárult a Moore-törvény (5. ábra) diktálta méretcsökkentési szakasz, amely létrehozta a digitális adatfeldolgozás eszközeit az **információs korszak** számára. Az integrált érzékelők általánossá válásával jellemezhetjük a méretcsökkentést meghaladó „több, mint Moore” érárt („More than Moore”), ami a kooperáció korszakába vezetett át bennünket. Lassan átlépünk a Moore utáni fejlődéssel („Beyond Moore”) jellemzett **transzformációs korszakba**, ahol az MI-robotok térhódításával a beavatkozás (aktuálás) válik meghatározóvá (20. ábra).

A modern **tudomány** 400 éves fejlődésével szemben a felismert törvényszerűségeket az emberiség javára hasznosító **mérnökségnek** csupán 200 éve volt a bizonyításra. Már a **technológiai fejlődés** korai szakaszában megnyilvánultak a gyakorlatban a kísértő **társadalmi-gazdasági összefüggések**. Nyikolaj D. Kondratyjev (1892–1938) ismerte fel a korszakalkotó technológiai vívmányok megjelenése által indukált gazdasági ciklusok jelenségét. A konjunkturális szakaszokat a ciklusokon belül rendre recesszió, sőt depresszió követte, mígnem egy forradalmian új technológia megjelenése a kilábalással el nem indította a követke-

ző ciklust. A technológia fejlődése ugyan folyamatos GDP-növekedéssel járt, de a gazdasági-társadalmi problémák egyre magasabb szinten ismétlődve jelentkeztek. Ma az ipari hősor és a gépesítés korszaka után a hatodik Kondratyjev-ciklusban, az információs-automatizációs korszakban járunk. Némi zavar jelentkezik ugyan a ciklikusságban: a ciklusok összetorlódnak a már említett korszakalkotó vívmányok megjelenési gyakorisága miatt.



21. ábra: A Kondratyjev-ciklusok olyan meghatározó innovációk, amelyek az ipari és társadalmi fejlődés új szakaszait indítják el

Forrás: <http://time-price-research-astrofin.blogspot.hu/2012/04/6th-kondratieff-cycle.html> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.) nyomán

A technológiai eszközök hasznosítása a pszichoszociális innovációkhoz és a társadalmi fejlődés új szintjeihez vezetnek, melyek újabb követelményekkel lépnek fel a technológiai fejlődéssel szemben.

Megállapíthatjuk, hogy **a digitalizációnak és a mára uralkodóvá vált hálózatosodott világnak, azaz a globalizációnak valamennyi eszközét elsősorban a szilíciumtechnológia fejlettsége tette lehetővé.** A folytonos termelékenységnövekedés óriási versenyt indított el a társadalmak között, és ebben a mókuserékben nem szabad lemaradni. Történelmi tapasztalatunk, hogy az ipari forradalom idején, a gépi munka általánossá válásával tömeges munkanélküliség és nyomor alakult ki. Ma a számítógépek már képesek a megismerésre, tanulásra. A napjainkban kibontakozó **digitális forradalomban a kognitív intelligenciájú (MI) robotok emberi beavatkozás nélküli, autonóm működésre készülnek.**

A digitalizáció alapvető és folyamatosan megújuló társadalmi dilemmákat vet tehát fel:

- Mit kezdünk majd a munkájukat veszített milliókkal, akik folyamatosan és gyorsuló mértékben szorulnak majd ki a munkaerőpiacról?
- A gyorsuló fejlődés milyen új adaptációs és innovációs képességek megletét teszi szükségessé a fiatalok számára, és a nevelés során hogyan fejlesszük ki ezeket bennük?
- Hogyan vértézzük fel a mai diákokat a 15-20 évvel későbbi helyzetben érvényes és értékes tudással (alapismeretekkel)?
- Miért képezünk olyan „szakembereket”, akikre vélhetően semmi szükség nem lesz, mire alkalmazásba kerülnek?

A robotizáció rohamos fejlődése már az Európai Parlamentet is akcióra sarkallta. *„A robotok és az MI máris befolyásolják az oktatást és a foglalkoztatást. Ennek tudatában elengedhetetlen a munkaerőpiac szoros monitorozása, hogy elkerüljük a foglalkoztatásban fellépő nemkívánatos visszaesést.”*¹¹

¹¹ Draft Report with Recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics [2015/2103 (INL)]. Committee on Legal Affairs (Initiative – Rule 46 of the Rules of Procedure).

A robotika három törvényét 1950-ben fogalmazta meg a 25 éve elhunyt Isaac Asimov az *Én, a Robot* című művében, és ezek a törvények lényegében változatlanul érvényesek:

1. A robotnak nem szabad emberi lényben kárt okoznia, vagy tétlenül tűrnie, hogy az ember bármilyen kárt szenvedjen.
2. A robot engedelmeskedni tartozik az emberi lények utasításainak, kivéve, ha ezek az utasítások az első törvény előírásaiba ütköznének.
3. A robot tartozik saját védelméről gondoskodni, amennyiben ez nem ütközik az első vagy második törvény bármelyikének előírásaiba.

A kognitív képességű, autonóm robotokra vonatkozó felelősség etikus szabályozása kapcsán viszont az is éles vitát váltott ki az EU parlamentjében, hogy: *„hogyan lehet a robotok »elektronikus személyiségéből« eredő törvényes jogait összhangba hozni a »vészkikapcsoló« tervezett kötelező alkalmazásával”*.

2015 januárjában nyílt levél jelent meg több tucat mesterségesintelligencia-szakértő aláírásával, szorgalmazva az MI elterjedésével várható veszélyek, társadalmi problémák kutatását.¹² Rámutatnak, hogy „a mesterséges intelligencia potenciálisan katasztrofálisabb hatással lehet az emberiségre, mint a nukleáris fegyverek, ha az ember lassú (biológiai) evolúciója nem tart lépést a technológiával, és alulmarad”.

Álljon itt még néhány mértékadó szaktekintély véleménye:

Stephen Hawking: *„A mesterséges intelligencia megszületése az emberiség legnagyobb eseménye lehet. Sajnos, talán az egyik utolsó eseménye is, ha nem tanuljuk meg, hogyan kerüljük el a kockázatokat.”*

Elon Musk: *„A célnak olyan mesterséges intelligencia létrehozásának kell lennie, amelyből az emberiség csak profitálhat, hogy ne váljunk a legnagyobb egzisztenciális fenyegetés, a mesterséges intelligencia »ostoba háziállataivá«.”*

Bill Gates: *„Aggaszt a szuperintelligencia perspektívája. Ha jól menedzseljük őket, az okos gépek feladataink jó részét átveszik. De pár évtized múltán intelligenciájuk fenyegetéssé válhat!”*

¹² <https://futureoflife.org/ai-open-letter/> (letöltés ideje: 2017. 01. 10.)

Csányi Vilmos véleménye ugyanakkor: *„Már ma is szabályokat, kötelmeket határoz meg számunkra a technológia. Így nem feltétlenül lesz megrendítő, ha a jövőben ugyanezt az egész világ fölött uralkodó szuperintelligencia teszi.”*

Összegzésként leszögezhetjük:

- Az innováció technológiai-gazdasági motorja belátható időn belül továbbra is a döntően szilíciumalapú nanoelektronika marad.
- A jövő gazdasági-társadalmi fejlődésének lehetőségét csak a nanoelektronika, a korszerű nanoméretű anyagok, a biotudomány és az energiahatékony technológiák interdiszciplináris házassága teremti meg a jövő gazdasági-társadalmi fejlődésének lehetőségét.
- Az emberiség előtt álló ökológiai és társadalmi kihívásoknak csak a teljes értékláncot felölelő, világméretű K+F együttműködésben van esélyünk megfelelni.

Legyen igaz gr. Széchenyi István, Akadémiánk alapítójának próféciája:

„A múlt elesett hatalmunkból, a jövőnk urai vagyunk.”









