



## FÉMIONOK A TÁPLÁLÉKLÁNCBAN ÉS A CIRKADIÁN RITMUS

**DR. SZENTMIHÁLYI KLÁRA PHD**  
Természettudományi Kutatóközpont,  
Anyag-és Környezetkémiai Intézet  
E-mail: szentmihalyi.klara@ttk.mta.hu

**DOI 10.23716/TT0.23.2020.26**

---

### *Absztrakt:*

A tápláléklánc egyes elemei, a talaj, a növény, az állat és az ember szoros kölcsönhatásban vannak egymással. Az ember számára létfontosságú fémek makro- és mikroelemeket általában táplálkozással biztosítjuk, aminek elsődleges forrása a talaj. A tápláléklánc egyik szintjén bekerülő szennyező elem végigfut az egész táplálékláncon. A káros hatás mértéke a résztvevő organizmusok akkumuláló vagy szűrő tulajdonságaitól függően adódnak tovább. Régóta ismert, hogy az élőlények alkalmazkodnak környezetükhöz, ebbe beletartozik a növények, állatok és emberek biológiai órájának, vagyis a cirkadián ritmusának igazodása is. A legrégebben dokumentált, növényre vonatkozó leírás az ókorból származik, azonban a legszélesebb körű kutatások a XX. században kezdődtek. A folyamat működésének tisztázása olyan nagy jelentőségű, hogy Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash és Michael W. Young kutatásaiért 2017-ben orvosi Nobel-díjat kaptak. A belső óra számos fiziológiai folyamatot befolyásol, többek között az anyagcserét is. Egyre több az irodalmi adat a fémion-metabolizmus cirkadián változására növényekben, és kutatások alapján már igazolták bizonyos ioncsatornák belső óra szerinti génexpresszióját emberben.

**Kulcsszavak:** fémionok, tápláléklánc

---

## A tápláléklánc

A tápláléklánc az élőlények egymáshoz való kapcsolatát, kapcsolódását fejezi ki, hogy fenntartsák az élet természetes egyensúlyát, ami különböző ritmusok által fenntartott körfolyamat. A táplálékláncban különböző szintek vannak, ezek termelői (növények), fogyasztói (pl. növényevők, húsevők, elsődleges, másodlagos, harmadlagos fogyasztók és csúcsragadozók) és lebontói (pl. gombák, baktériumok, rovarok) szintek. Többféle táplálékláncot is megkülönböztethetünk, szárazföldi, tengeri vagy éppen erdei láncot, de van növényevői-, parazita- és lebontói lánc is.

A tápláléklánc egyes elemei, a talaj, a növény, az állat és az ember szoros kölcsönhatásban vannak egymással, ami kiterjed a fém és nemfém elemekre is. Az ember számára létfontosságú fém és mikroelemeket általában táplálkozással biztosítjuk, aminek elsődleges forrása a talaj. A tápláléklánc egyik szintjén bekerülő szennyező elem végigfut az egész táplálékláncon, körforgás alakul ki. A káros hatás mértéke a résztvevő élőlények akkumuláló vagy szűrő tulajdonságaitól függően adódnak tovább. Levegőszennyeződés következtében savas eső alakul ki, ami károsítja a növények leveleit és a légzési funkcióját. A savas eső csökkenti a talaj pH-ját, megváltozik a fémionok oldhatósága, a fémion-egyensúly, és az egyes fémek felvehetősége. A növény tápanyag-ellátottsága megváltozik, a növény károsodik, a növényi kártevők elszaporodnak és a végén elpusztul a növény.<sup>1</sup>

Az egyes elemek körforgását, vándorlását követni lehet a táplálékláncban és az élelmiszerláncban egyaránt. A nagy arzéntartalmú talajokon keresztül folyó patakok és folyók, valamint az ilyen területeken fűrt kutak nagyobb koncentrációban tartalmazzák az arzént. A folyókban élő halak több arzént akkumulálnak, a vizet öntözésre használva a növények több arzént képesek felvenni. Az egyes növényi fajok arzénfelvétele különböző lehet, az arzén-hiperakkumuláló és nem-hiperakkumuláló növények gyökereiben lejátszódó arzéntranszport és -megkötés biokémiai folyamatai különbözőek. A hiperakkumuláció következtében az arzénkoncentráció elérheti a 22g/kg-ot is a kínai páfrány (*Pteris vittata*) esetében.<sup>2</sup> Az emberi szervezetet így három helyről is arzénterhelés érheti, a víz-, a növény- és a halfogyasztás által.<sup>3</sup>

### ***A talaj és növény kapcsolata***

A növények növekedéséhez, fejlődéséhez, hogy megfelelő mennyiségű tápanyagot tudjanak felvenni, felvehető formában lévő, optimális mennyiségű tápanyagnak kell lennie a talajban. Bizonyos elemek hiánya a talajban tápanyaghiányt okoz a növényben, túlzott mennyiség pedig akkumulációt, illetve mérgezést vált ki. Nehézfémterhelés, -stressz hatására a növény több fémot vesz fel, nő a fémionkoncentráció a citoszolban, megnő a szabadgyökképződés is és ezzel párhuzamosan a plazmamembrán károsodik. Megváltozik a fémiontranszlokáció, zavart szenved a fotoszintézis, a vízháztartás, a tápanyag-felvétel, gátlódik a növekedés, csökken a virág- és magképződés.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> SOMOGYI 2012. 9–12

<sup>2</sup> ZHAO 2009. 777–794

<sup>3</sup> ADRIANO 2001. 219–261

<sup>4</sup> CSATHÓ 1994. 371–398

A növényekbe bekerülő szennyező, toxikusnak nevezett elemek koncentrációja több ok miatt is megnőhet. Geológiai eredetű az arzén, ami miatt a marosvásárhelyi zsálya több arzént tartalmaz, mint a budapesti Botanikus Kertből gyűjtött növény. Ipari szennyezés következtében nőhet meg pl. a kadmium- és nikkeltartalom. Környezeti szennyezés okozhatja pl. a növény nagyobb ólomfelvételét.<sup>5</sup>

Egyetlen elem, pl. az arzén hatására, azonban nem csak az arzénfelvétel és – transzport változik meg. Az elemek bonyolult szinergista és antagonistista kölcsönhatásban állnak egymással, képesek egymás felvételét, transzportját módosítani.<sup>6</sup>

A talaj optimális tápanyagellátottsága mellett fejlődött növények ásványianyag-tartalma széles változatosságot mutat, bár minden elemre van egy koncentrációtartomány, ahol az elem növényi koncentrációja megtalálható. Azonban az egyes növények makro- és mikroelem-tartalmát sok faktor befolyásolja. Nem csak fajonként változik, de fajtánként és a környezeti tényezőktől is függ. A növények elem-tartalma növényi részenként is és a vegetációs periódus alatt is folyamatosan változik.<sup>7</sup>

Nem mindig található egyértelmű összefüggés a talaj ásványianyag-ellátottsága és a növény elem-tartalma között. Erre példa a kalcium, mert a talajban lévő kalcium jelentős része oldhatatlan ásványok formájában fordul elő. A kalcium felvehetőségét befolyásolja pl. a talaj víz- és szervesanyag-tartalma, pH-ja is. Így, kalciumban viszonylag jól ellátott talajon is nőhet klorózisos, kalciumhiányos növény, amikor a növény fiatal leveleinek kanalas felkunkorodását és a levelek barnulását láthatjuk. Ezzel szemben a magnéziumhiány egyértelmű jeleit az öreg leveleken láthatjuk az érkező részek sárgulásával, illetve barnulásával, miközben az erek még zöldek, egészes addig, amíg onnan is át nem vándorol a magnézium a fiatalabb levelekbe.<sup>8</sup>

### ***A talaj és növény ásványianyag-tartalmának hatása az állatra***

Korán, már az 1950-es évektől kezdve felismerték, hogy az állatok bizonyos betegségei összefüggenek a talaj, illetve a takarmány ásványianyag-tartalmával.<sup>9</sup> Hazai viszonylatban Szentmihályi Sándor állatorvos a szarvasmarhák és juhok esetében tapasztalt mangán-, illetve rézhiány okait kutatva feltérképezte a magyarországi talajok és az azokon termelt takarmányok mikroelem-tartalmát. Így jött rá arra, hogy a szarvasmarhák csontfejlődési zavarait és szaporodásbiológiai problémáit a mangánhiány okozza, valamint a juhok idegrendszeri zavarai,

<sup>5</sup> SZENTMIHÁLYI 2006. 130–134

<sup>6</sup> KABATA-PENDIAS 1984. 1–315

<sup>7</sup> SZENTMIHÁLYI 1999. 4–6

<sup>8</sup> MENGEL 1976.

<sup>9</sup> VOISIN 1964.

csonttörési gyakorisága rézhiány következménye, amit a takarmány nem megfelelő mangán- és réztartalma, illetve alapvetően a talaj mangán- és rézhiánya határoz meg.<sup>10</sup>

Nem csak a háziállataink, hanem házi kedvenceink is szenvedhetnek valamilyen ásványi elem hiányában vagy esetleg fémakkumulációban, toxikózisban. Kutyáknál gyakori az ólomtoxikózis, amit gyomor-bélrendszeri panaszok, izomgörcsök kísérnek. Súlyos esetben vakság alakul ki.

### ***Az ember a táplálékláncban***

A növények és állatok elfogyasztásával, azok ásványi elemtartalma belekerül szervezetünkbe.<sup>11</sup> Gyógynövényteát iszogatva is az esszenciális mikroelem-szükségletünk egy részét, néha jelentős hányadát bevihetjük a szervezetünkbe. Azonban néha a toxikusnak nevezett elemek egy része is átoldódik a teába, növelve a nehézfémstresszet szervezetünkben.<sup>12</sup> Egyre többet hallani, hogy a nem megfelelő táplálkozás, a nem megfelelő ásványianyag-tartalmú élelmiszer fogyasztása hiánybetegségekhez vezethet vagy mérgezéseket okozhat, bár vannak genetikai alapon kialakuló betegségek, amik pl. fémakkumulációt okoznak. Nem elegendő kalciumbevitel csontritkuláshoz, a kis mennyiségű vasbevitel pedig anémiához vezethet, bár egyéb endogén tényezők is befolyásolják kialakulásukat.<sup>13</sup> Ipari munkások körében, illetve környezetszennyezés következtében többféle mérgezést tart számon az irodalom. Legismertebb az ólommérgezés.<sup>14</sup>

Nem közvetlen a tápláléklánc ásványi elem-tartama befolyásolja a Wilson kórban kialakuló rézfelhalmozódást és a porfiria cutanea tarda (PCT) kialakuló vasakkumulációt, bár a PCT-ben szenvedő betegek egy része nagyobb mennyiségű alkoholt fogyaszt, illetve egy részük diabetesben is szenved társult betegségként.<sup>15</sup>

## **A cirkadián ritmus**

Az élőlények alkalmazkodnak környezetükhöz, ebbe beletartozik a növények, állatok és emberek biológiai órájának, vagyis a cirkadián ritmusának igazodása is.

A cirkadián szó jelentése, hogy körülbelül egy nap, vagyis nagyjából 24 óra. Franz Halberg alkotta a latin *circulus* (kör) és a *dies* (nap) szavakból. Tehát a

<sup>10</sup> SZENTMIHÁLYI 1982

<sup>11</sup> SZILÁGYI 2006

<sup>12</sup> SZENTMIHÁLYI 2012. 2–8

<sup>13</sup> LAKATOS 2006. 925–930

<sup>14</sup> SÍPOS 2003. 139–142

<sup>15</sup> SZÉKELY 2003. 43-49; BEKÓ 2009. 31–35

cirkadián ritmus az, ami a napi biológiai óra, vagyis 24 óra alatt a növények, állatok, emberek biokémiai, fiziológiai folyamataiban, viselkedésében lép fel.

A cirkadián ritmusokat belső időmérő rendszer vezérli, de olyan, zeitgebernek (idő-adó) nevezett stimulusok, külső hatások is befolyásolják, amik minden nap újraindítják a ritmust, mint pl. a napfény. Ezen ismétlődő ritmusok által képesek az élőlények felkészülni a körülmények szabályos változására.

### ***A növények és a cirkadián ritmus***

A legrégebben dokumentált, növények cirkadián ritmusának leírása az ókorra tehető. Nagy Sándor hadjáratainak krónikása, Androsztenész az i.e. 4. században jegyezte le először a cirkadián ritmust vagy turgormozgást egy tamarinduszfa leveleinek napi mozgását megfigyelve. A 18. századtól a cirkadián ritmust tudományos vizsgálat tárgyává is tették, azonban a legszélesebb körű kutatások csak a 20. században kezdődtek.

Jean-Jacques d'Ortus de Mairan francia tudós az 1700-as években a szemérmes mimóza (*Mimosa pudica* L.) leveleinek mozgását tanulmányozva azt vette észre, hogy a 24 órás mozgás mintázata nem változik akkor sem, ha fényhatásmentesen teljes sötétségben tartja a növényt. E kísérletet többen is megismételték néhány évvel később, és ugyan ezt tapasztalták.<sup>16</sup> de Candolle 1832-ben megállapította, hogy a mimóza napi ritmusa nem 24 óra, hanem valamivel kevesebb, 22 és 23 óra között van, és ez a ritmus módosítható a világosság és sötétség váltakozását megfordítva. A 20. századi kutatások eredménye már, hogy a növény turgormozgása csak egy a sok cirkadián ritmus közül, mint pl. a csírázási, a növekedési, az enzimaktivitási, a virágnyílási ritmus, vagy a fotoszintézis ritmusa.<sup>17</sup>

Egyre több az irodalmi adat a fémion-metabolizmus cirkadián változására növényekben, illetve arra, hogy a fémionok fontos szerepet játszanak egyes cirkadián ritmus működésében. A növényi sejtek kalciumforgalmát olyan külső ingerek befolyásolják és szabályozzák, mint pl. a fény- és hőmérsékletváltozás, a vízhiány és bizonyos hormonok. A különböző ingerek hatására különböző csatornák aktiválódnak, tranziens Ca-beáramlás történik az apoplaztból a citoplazmába, valamint a vakuólumból és az endoplazmatikus retikulumból is.<sup>18</sup>

A fotoperiódusban a sztómanyitás két fény hatására generálódik  $H^+$ -ATP-ázok serkentésével, membránhiperpolarizáció után bizonyos  $K^+$ -csatornák nyitásával és aktiválódásával, valamint K-fevételrel. A sztómazáródás folyamatában már a kalciumnak is szerepe van, a membránpotenciál változására  $Ca^{2+}$ -beáramlás történik, ami aktiválja a cADP-ribóz és az  $IP_3$  képződését, valamint a vakuoláris

<sup>16</sup> HILL 1757; DUMONCEAU 1759; ZINN 1759. 40–50

<sup>17</sup> CUMMING 1968. 381–416

<sup>18</sup> JOHNSON 1995. 1863–1865

Ca<sup>2+</sup>-csatornát. A citoplazma Ca-koncentrációjának növekedése gátolja a H<sup>+</sup>-ATP-ázokat, nyitja a K<sup>+</sup>- és Cl<sup>-</sup>-csatornákat. A K- és Cl-kiáramlás vízleadást okoz és a végén sztómazáródást eredményez.<sup>19</sup>

### ***Az állatok és a cirkadián ritmus***

A cirkadián ritmus összefüggésben van a világosság és a sötétség váltakozásával. Azonban az állatok a 24 órás alvás és ébrenlét ritmusát képesek fenntartani a fény és a hőmérséklet változásától függetlenül, valamint külső tényezőktől elszigetelve is.<sup>20</sup> A föld alatt élő emlősök például minden külső tényezőtől függetlenül képesek fenntartani endogén óráikat, mint a vak földikutya (*Spalax* sp.). A szabadon futó ritmussal rendelkező állatok periodikus ritmusai a külső hatásoktól mentesen is megmaradnak, azonban ezek a ciklusok nem párhuzamosan változnak a normál napi 24 órás nappal és éjszaka változásával. A hosszabb időre teljes sötétségben tartott állatok „szabadon futó” ritmusra váltanak, ami által minden eltelt nappal az alvási ciklus időben eltolódik egy kicsit előre vagy hátra, az endogén periódusidejüktől függően.

Az 1970-es években Seymour Benzer és Ronald Konopka gyümölcslegyekkel folytatott kísérleteikben a cirkadián ritmust szabályozó gének kutatása során ismeretlen génmutációt találtak, mely megzavarja a legyek cirkadián óráját.<sup>21</sup> Szintén gyümölcslegyek cirkadián ritmusát tanulmányozva Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash és Michael W. Young 2017-ben a ritmust szabályozó molekuláris mechanizmusok felfedezéséért orvosi Nobel díjat kapott. Első fontos lépés volt az időszaki gén (per vagy periódus gén) felismerése. Az időszak alatt kódolt fehérje, a PER felhalmozódik az éjszaka folyamán, és a nap folyamán lebomlik, így a fehérje szintje 24 óra alatt cirkadián ritmus szerint változik.<sup>22</sup> A PER fehérje visszacsatolási mechanizmussal szintetizálódik, azonban csak a TIM fehérjéhez (timeless, időtlen fehérje) kötődve képes a sejtmagba bejutni, hogy ez a visszacsatolási mechanizmus, a génaktivitás blokkolás működjön.<sup>23</sup> Később további fehérjéket azonosítottak a periódusgén aktivitásához és feltárták a fény és cirkadián ritmus közötti molekuláris összefüggést.

Ezek a folyamatok a cirkadián ritmus működésében és fenntartásában, így a fehérjeszintézis, az idegi szabályozás és működés, a szekunder messengerek transzportja, az immunvédekezés, az energiatermelés, stb, az élő szervezetben

<sup>19</sup> MCAINSH 1995. 1207–1219

<sup>20</sup> SZYMANSKI, 1918. 324–347

<sup>21</sup> KONOPKA 1971. 2112–2116

<sup>22</sup> HARDIN 1990. 536–540

<sup>23</sup> VOSSHALL 1994. 1606–1609

ásványi elemekhez kötött. Legfontosabb elemek a magnézium, kalcium, kálium, foszfor, cink, szelén.<sup>24</sup>

### ***Az ember és a cirkadián ritmus***

A Hall, Rosbash és Young Nobel díjas munkásságának az a különleges jelentősége, hogy az általuk azonosított fehérjék és molekuláris mechanizmus nem csak a gyümölcslegyek, hanem a többi élőlény cirkadián ritmusának szabályozásában is hasonlóan működik. A belső vagy biológiai óra számos fiziológiás folyamatot befolyásol, hiszen génjeink nagy részét ez szabályozza. Többek között az immunrendszer működése, a táplálkozás, az anyagcsere-folyamatok, bizonyos ioncsatornák génextpressziója mind cirkadián kontroll alatt van.<sup>25</sup>

Amennyiben a külső körülmények vagy genetikai okok miatt a biológiai óra nem működik normálisan, cirkadián diszfunkció lép fel, mely különböző betegségek kialakulásához vezethet, mint pl. alvászavar, immunbetegségek, depresszió, infarktus, sztrók, diabetes, metabolikus szindróma, karcinogenezis. Ezen betegségek többségében a fémionmetabolizmus is zavart szenved.

A cirkadián ritmusnak a gyógyulásban, a gyógyításban is nagy szerepe van. Olyan rákterápiában, ahol a rákos sejt DNS-ének károsításával érjük el a gyógyulást, mint pl. ciszplatin esetében, feltételezik, hogy a DNS-javítás cirkadián változása befolyásolja a terápia hatosságát és a mellékhatások mértékét. Egy sérült DNS javítása a reggeli órákban hétszer gyorsabb mint éjszaka.<sup>26</sup> Ez részben összefügg a DNS károsodást javító fehérje, a xeroderma pigmentosa A (XPA) szintjének cirkadián változásával, mely a nappali órákban magasabb mint éjszaka. Bár még nem tisztázott, hogy a normál és rákos sejt cirkadián ritmusa megegyezik-e, de feltételezik, hogy éjszaka, amikor a rákos sejt DNS-javítóképessége minimális, akkor a leghatásosabb a terápia és akkor jár a legkevesebb mellékhatással.<sup>27</sup>

## **Irodalom**

FROY, O.: The relationship between nutrition and circadian rhythms in mammals. *Frontiers in Neuroendocrinology*. 28, (2007): 2–3, 61–71.

HARDIN, P.E. – HALL, J.C. – ROSBASH, M.: Feedback of the *Drosophila* period gene product on circadian cycling of its messenger RNA levels. *Nature*. 343, (1990) 536–540.

<sup>24</sup> AIKAWA 1980; FLOWERS 1992; GRÖBER 2015

<sup>25</sup> SCEIERMANN 2013. 190–198; FROY 2007. 61–71

<sup>26</sup> KANG 2009. 2864–2867

<sup>27</sup> SANCAR 2010. 2618–2625

JOHNSON, C.H. – KNIGHT, M.R. – KONDO, T. – MASSON, P. – SEDBROOK, J. – HALEY, A. – TREWAVAS, A.: Circadian oscillations of cytosolic and chloroplastic free calcium in plants. *Science*. 269, (1995) 5232, 1863–1865.

KABATA-PENDIAS, A. – PENDIAS, H.: *Trace Elements in the Soils and Plants*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1984, 1–315.

SANCAR, A. – LINDSEY-BOLTZ, L.A. – KANG, T.H. – REARDON, J.T. – LEE, J.H. – OZTURK, N.: Circadian clock control of the cellular response to DNA damage. *FEBS Lett.* 584, (2010): 12, 2618–25.

SZILÁGYI, M. – SZENTMIHÁLYI, K.: *Trace Elements in the Food Chain*. Budapest, SZTE ÁOK Nyomda, 2006.

VOISIN, A.: A talaj és a növényzet az állat és az ember sorsa. *Mezőgazdasági Kiadó*, Budapest, 1964.

VOSSHALL, L.B. – PRICE, J.L. – SEHGAL, A. – SAEZ, L. – YOUNG, M.W.: Block in nuclear localization of period protein by a second clock mutation, timeless. *Science*. 263, (1994): 1606–1609.

## **Metal ions in the food chain and the circadian rhythm**

Some elements of the food chain, soil, plant, animal and humans are closely interrelated. Essential macro and micro metal elements for man are usually fed by nutrition, the primary source of which is the soil. Pollutant entering into one of the food chain level run through the whole food chain. The harmful effect will depend on the accumulating or filtering properties of the participating organisms. It has long been known that organisms adapt to their environment, including the adaptation of the biological clock of plants, animals and humans, or circadian rhythms. The oldest documented plant description dates back to antiquity, but the most extensive research began in the 20th century. Clearing the functioning of the process is so important that in 2017 Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash and Michael W. Young received a medical Nobel Prize. The internal clock influences a number of physiological processes, including metabolism. There is growing evidence of the circadian change in the metal ion metabolism in plants, and according to human experiments there was confirmed the gene expression of certain ion channels is regulated by the internal clock.

**Keywords:** metal ions, food chain