

Tematikus összeállítás

A FÉNY VILÁGNAPJA

INTERNATIONAL DAY OF LIGHT

VENDÉGSZERKESZTŐ: KROÓ NORBERT

BEVEZETŐ

INTRODUCTION

Króó Norbert

az MTA rendes tagja

A lézerek csatasorba állásával az optikai kutatások és az ezek eredményein alapuló technológiák jelentősége még soha nem tapasztalt magasságokba emelkedett. A csillagászati távolságoktól a nanoméreték világáig, az információs technológiáktól az orvosi gyakorlatig az optikai módszerek meghatározó jelentőségűvé váltak. Ez indokolta az Egyesült Nemzetek Szervezete azon döntését is, hogy a 2015-ös év a fény nemzetközi éve legyen. Az optikai alapokra támaszkodó tudomány, az ezeken alapuló technológiák, a természet fényjelenségei és a vizuális kultúra területeit felölelő eseménysorozat világszerte és természetesen hazánkban is a figyelem középpontjába állította a fényt. Elsősorban a fiatal generációk érdeklődésének felkeltése, esetleg pályaválasztásuk ezen irányokba terelése volt a legfontosabb cél.

A fény nemzetközi éve sikeres programjain felbuzdulva és a társadalom figyelmének további fenntartása érdekében ünnepeltük 2017. május 16-án a fény világnapját, és az UNESCO döntésének eredményeként ezentúl is minden évben ezen a napon ugyanúgy ünnepelhetünk. A fény ugyanis életünk fizikai alapja és a körülöttünk lévő világról szerzett információink talán legfontosabb forrása.

A fényjelenségeken alapuló kutatásoknak hazánkban hangsúlyos hagyományai vannak. Hosszan lehetne sorolni azokat a csillagászati, fizikai, kémiai és biológiai kutatási eredményeket, amelyek nemzetközi fórumokon is rangot szereztek a magyar kutatóknak, és ha nem is a kívánt mértékben, de hozzájárultak a hazai technológiai fejlődéshez is.

Eredményeink átadása a fiatal generációknak pedig nemcsak erkölcsi kötelességünk, hanem gazdasági érdekünk is. Ezért szerveztünk 2017. május 16-án a Magyar Tudományos Akadémia székházának dísztermében egy olyan előadást középiskolás diákoknak, amelyen egy-egy csillagászati, fizikai, kémiai és

biológiai előadáson keresztül, kiragadott példákkal szemléltettük a fényalapú kutatásaink legújabb eredményeit. A több mint négyszáz diákhallgató (és kísérőtanár) nagy figyelemmel hallgatta az izgalmas ismeretterjesztő előadásokat, a visszajelzésekben pedig a kezdeményezés folytatására biztatták a szervezőket.

Ebben a cikkgyűjteményben az elhangzott négy előadás közül három írásos változata olvasható. (Dombi Péter fizikai témájú előadása egy – Csete Máriával közösen írt – tanulmányán is alapult, amely már korábban megjelent a *Magyar Tudomány* 2015. októberi tematikus számában, a fény nemzetközi éve alkalmából közölt összeállításban, a lap 1191–1197. oldalain.) A cikkek közreadásával arra törekszünk, hogy a széles tudományos közösség is megismerkedhessen a magyar kutatók néhány eredményével, és ezen keresztül a tág értelemben vett optikai kutatások jelentőségével.

ÉLET A FÉNYBŐL • FOTOSZINTÉZIS: MOLEKULÁRIS FOLYAMATOK – GLOBÁLIS HATÁSOK

LIFE FROM LIGHT • PHOTOSYNTHESIS: MOLECULAR PROCESSES – GLOBAL EFFECTS

Garab Győző

a biológiai tudomány doktora, professor emeritus,
MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Növénybiológiai Intézet
garab.gyozo@brc.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben, amely a fény világnapja (2017) alkalmából elhangzott tudomány-népszerűsítő előadásomhoz kapcsolódik, röviden összefoglalom, hogy miként tette lakhatóvá bolygónkat a fotoszintézis, teremtette meg és biztosítja lényegében a bioszféra egészségének energiaellátását és az oxigénben dús atmoszférát (és ezzel az ózonpajzsot is). A fosszilis energiahordozók nagymértékű felhasználásának következtében, az évmilliók alatt szekvesztrált szén-dioxid nagyon gyors ütemben visszakerül a légkörbe, amit a fotoszintézis már nem képes maradéktalanul megkötni – ez globális környezeti katasztrófához vezethet. A fotoszintézis-kutatások, amelyek természetükénél fogva multidiszciplináris jellegűek, a fényenergia-hasznosítás mechanizmusainak és globális hatásainak megismerésén túl azt célozzák, hogy a biotechnológia segítségével áttevezett folyamatokat a hatékonyabb mezőgazdasági termelés és a környezetvédelem szolgálatába állíthassuk, valamint az alapkutatás révén részletesen megismert/feltárandó fotofizikai és fotokémiai mechanizmusokra építve, hatékony mesterséges vagy hibrid fényenergia-konvertáló rendszereket hozzunk létre, kiaknázandó a szinte korlátlanul rendelkezésünkre álló, tiszta szoláris energiát.

ABSTRACT

In this paper, which is linked to my popular-science talk on the occasion of the International Day of Light (2017), I briefly overview the processes how photosynthesis has converted our globe to a habitable planet, continually providing the energy to virtually all life on Earth, and how it has built up and maintains the O₂-rich atmosphere (and, indirectly, the ozone shield). The extensive use of fossil energy carriers leads to the rapid liberation of CO₂, which had already been sequestered during millions of years – the excess amounts of this greenhouse gas cannot be fixed by photosynthesis. This may lead to a global environmental catastrophe. Photosynthesis research, which is multidisciplinary in its nature, aims to discover the mechanisms and global effects of the complex processes of biological light-energy conversion and elaborate their possible engineering, redesigning photosynthesis – demanded by the need of increased crop production as well as global sustainability and environmental protection. The detailed understanding of the

basic mechanisms of photophysical and photochemical processes will help the construction of efficient artificial photosynthesis and/or hybrid light-energy converting systems – technologies to exploit the practically inexhaustible, clean solar energy.

Kulcsszavak: evolúció, biogeokémiai folyamatok, a fényenergia-átalakítás mechanizmusai és időskálái, a fotoszintézis áttervezése

Keywords: evolution, biogeochemical processes, light-energy conversion – mechanisms and timescales, redesigning photosynthesis

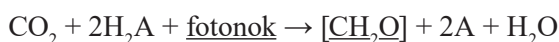
BEVEZETÉS. MIÉRT FOTOSZINTÉZIS?

A fény világnapján erre a kérdésre a választ a legautentikusabb forrásra hivatkozva adhatjuk meg. A fény nemzetközi éve (2015) honlapján *Miért Fontos a Fény?* (Why Light Matters?) első sora egyértelműen fogalmaz: „On the most fundamental level through photosynthesis, light is necessary to the existence of life itself” (URL1) – azaz „A legalapvetőbb szinten, a fotoszintézis révén, fényre magához az élet létezéséhez van szükség”.

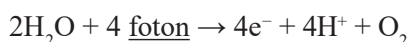
A fotoszintézis a földi élet energetikai alapja; közvetve vagy közvetlenül a fotoszintézis szolgáltatja az életfolyamatok fenntartásához szükséges táplálékot – szinte kivétel nélkül – az egész bioszférának. A fotoszintézisnek köszönhetjük az oxigénben dús légkört és így – a magasabb rendű életformákat a káros ultraibolya sugárzás ellen védő – ózonpajzs létét is. Fosszilis energiahordozóink is fotoszintézis eredetűek – ezek adják a ma felhasznált energia mintegy négyötöd részét. A fosszilis energia ilyen nagymértékű felhasználása azonban környezeti katasztrófához vezethet. Ezért a fosszilis energiahordozókat nagy mennyiségben rendelkezésre álló, reális időtávon belül technológiailag elérhető, környezetkímélő energiahordozókkal kell kiváltani. Erre, más megújuló formák mellett, megfelelően átalakított fotoszintetikus szervezetek vagy azok „bioinspirált” műszaki „utáinzatai” egyaránt alkalmasak lehetnek. A fotoszintézis kutatások ezért a természetben lejátszódó folyamatok minél teljesebb megismerését és a mesterséges megvalósítás módjainak feltárását célozzák – miközben az eredmények számos rokon területen is hasznosulnak. A következőkben – a fotoszintézis molekuláris folyamatainak és globális hatásainak vázlatos áttekintését követően – röviden bemutatom a kutatások aktuális kérdéseit, főbb trendjeit és legújabb eredményeit.

HOGYAN TETTE LAKHATÓVÁ BOLYGÓNKAT A FOTOSZINTÉZIS? MILYEN KOMOLY A KÖRNYEZETI KATASZTRÓFA VESZÉLYE?

Földünk ősi atmoszférája az oxigéntermelésre képes első fotoszintetikus organizmusok – a cianobaktériumok vagy kékmoszatok – mintegy három és fél milliárd évvel ezelőtti megjelenése előtt lényegében nem tartalmazott szabad, molekuláris oxigént. Az oxigénben dús atmoszféra megteremtése és fenntartása a biológiai vízbontás „felfedezésének” köszönhető. A fotoszintézis reakcióegyenletében:



az általános elektrondonor H_2A helyébe ez esetben H_2O írandó. A víz sokkal nehezebben oxidálható ugyan, mint például a H_2S , ami (kéndepozitokat maga után hagyó) kén-típusú bíborbaktériumok végső elektrondonora, viszont gyakorlatilag korlátlanul hozzáférhető. Ily módon tehát a cianobaktériumok, majd pedig valamennyi eukarióta fotoszintetikus organizmus (algák és növények), a szervesanyag szintézisükhöz szükséges redukáló ekvivalenseket egy lényegében korlátlanul rendelkezésre álló elektronforrás, a víz, segítségével tudják biztosítani.



Könnyű belátni, hogy ez a reakció teremtette meg annak a feltételét, hogy a fotoszintetikus szervezetek meghódítsák a bolygónkat. Egyúttal – bár a fotoszintézis szempontjából melléktermékként, de a magasabb rendű élet szempontjából korántsem mellékesen – molekuláris oxigént szabadítottak és szabadítanak föl. Ennek köszönhetően bolygónk légköre fokozatosan, változatos és ma sem pontosan tisztázott természetű és hatású biogeokémiai reakciók lejátszódását követően, mintegy fél milliárd évvel ezelőtt érte el, és több időszakban meg is haladta az atmoszféra oxigénkoncentrációjának jelenlegi, mintegy 21%-os szintjét (Lyons et al., 2014). Ennek a viszonylag magas oxigénkoncentrációnak a fenntartása természetesen napjainkban is a fotoszintézisnek köszönhető. A rendszer nagyfokú stabilitással rendelkezik: a légköri oxigén kicserélődési idejét (residence time) az irodalomban 3000–10 000 év közötti értékre becsülik. Mindazonáltal a fosszilis energiahordozók elégetése és az erdőterületek szűkülése kismértékű, de – az utóbbi húsz évet vizsgálva – már jól kimutatható, és a fotoszintetikus aktivitás éves periodicitásával is korreláló csökkenést okozott (Martin et al., 2017).

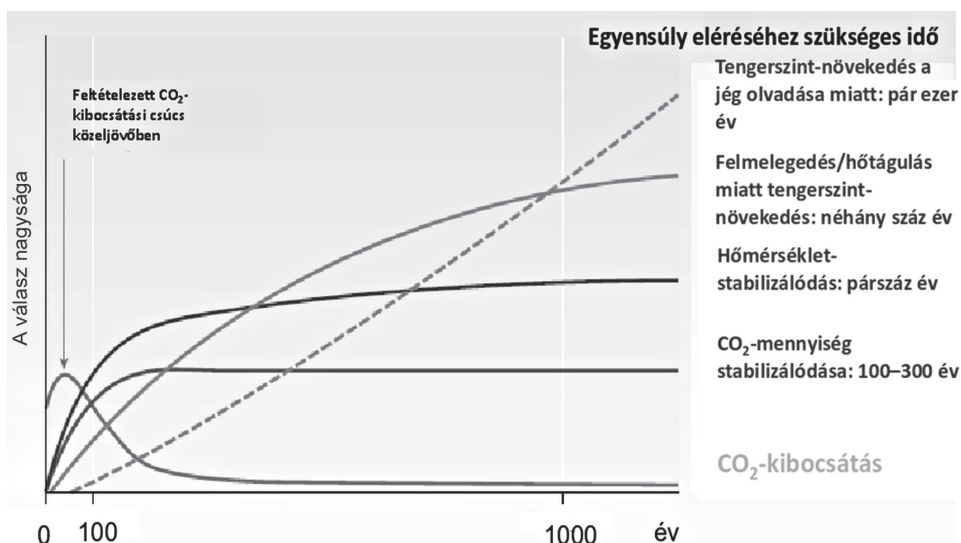
Tekintettel a szén-dioxid nagyságrendekkel alacsonyabb koncentrációjára (~0,04%) a kicserélődési idő is nagyságrendekkel kisebb; az irodalomban tipikusan öt és harminc év közötti értékeket találhatunk. A bizonytalanságot – az „egyenletben” szereplő ismeretlen tényezők mellett – a rendkívüli méretek okozzák: a légkör CO_2 formájában mintegy 750 Gt szén tartalmaz, a fotoszin-

tézis évente, kerekítve mintegy 200 Gt szenet köt meg. A bioszféra számlájára írhatóan (légzés és bomlási folyamatok) révén hasonló mértékű CO_2 -kibocsátás szerepel a másik oldalon. Ugyanakkor az emberiség tevékenységének következtében mintegy 7-8 Gt szén kerül a légkörbe. Jóllehet, a magasabb CO_2 -szint a legújabb kutatási eredmények szerint hosszú távon is serkenti a fotoszintézist, de ebben a nagyságrendben nem képes kompenzálni az emelkedést (Campbell et al., 2017). A CO_2 -kibocsátás ma már alig vitatható következménye a globális felmelegedés. Bár a szén-dioxid közel egymillió éves rekordot meghaladó szintje egzaktul nem kiszámítható módon hat bolygónk átlaghőmérsékletére és éghajlatára, tudós testületek és ma már a politikai döntéshozók nagy többsége is egyetért abban, hogy ezt a folyamatot meg kell állítani (Csete–Szarka, 2017; Vida, 2017; Goldthau, 2017).

A szénelapú gazdaság felváltása C-semleges vagy negatív C-egyenlegű gazdaságra annál is inkább sürgetőbb feladat, mert a rendszerben egyéb, ma még talán kisebb figyelmet kapó tényezőkkel is számolni kell. Ezek közül első helyen az óceánok szerepét kell említeni. A (látszólag) jó hír az, hogy tengereink jelentős mennyiségű szén-dioxidot képesek elnyelni, becslések szerint naponta 22 milliós tonnányi mennyiséget; ez fékezi a légköri CO_2 -szint emelkedését. A rossz hír viszont az, hogy az ipari forradalom kezdete óta elnyelt jelentős mennyiségű szén-dioxid miatt tengereink pH-ja már most mintegy 0,1 pH értékkel csökkent. A légköri CO_2 -szint emelkedését jó esetben 550 ppm körüli értéknél megállítható érték mellett a pH további egy vagy két tizeddel csökkenhet, ami beláthatatlan következményekkel járhat a tengeri ökoszisztémákra (elsősorban a kalcium metabolizmus révén). Joggal nevezik ezért az óceánok savasodását a globális felmelegedés ördögi ikertestvérének (URL2).

A veszélyt fokozza, a megoldás bizonytalanságát mutatja, és a cselekvést sürgeti az a tény, hogy a nagymértékű CO_2 -kibocsátás főbb következményei – a hosszú időállandók és egyes irreverzibilis folyamatok fellépte miatt – évtizedekig, de akár évezredekig is velünk maradhatnak (Zeebe, 2013), amint arra az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) anyagában található modellszámítások eredményei is rámutatnak (1. ábra).

Azt is meg kell jegyezni, hogy a mai (közel 410 ppm-es) értéknél is alacsonyabb szint lenne kívánatos. Az 550 ppm-es értéknél alacsonyabb cél kitűzése azonban – tekintettel a világgazdaság jelenlegi berendezkedésére – rövid távon irreális lenne. Ha a széles szakértői bázisra támaszkodó Stern-jelentésben szereplő előrejelzések (akár csak részben is) beteljesülnek, az 550 ppm-es CO_2 -szint, illetve a hozzá rendelhető 2 °C-os globális hőmérsékletemelkedés is (amelynek a felét már „teljesítettük”) csak a sokkal súlyosabb környezeti katasztrófa elkerüléséhez tűnik elegendőnek (Stern, 2007). Ez az 550 ppm az utolsó 800 ezer év átlagértékének mintegy kétszerese, ami, figyelembe véve a rendkívül erős üvegházgáz, a metán, légköri koncentrációjának ugyanezen időszakhoz viszo-



1. ábra. Az emberi tevékenységből származó CO₂-kibocsátás feltételezett visszavágását követő hosszú időállandójú folyamatok hatása a légköri CO₂-koncentráció, a globális hőmérséklet és a tengerszint stabilizációjára

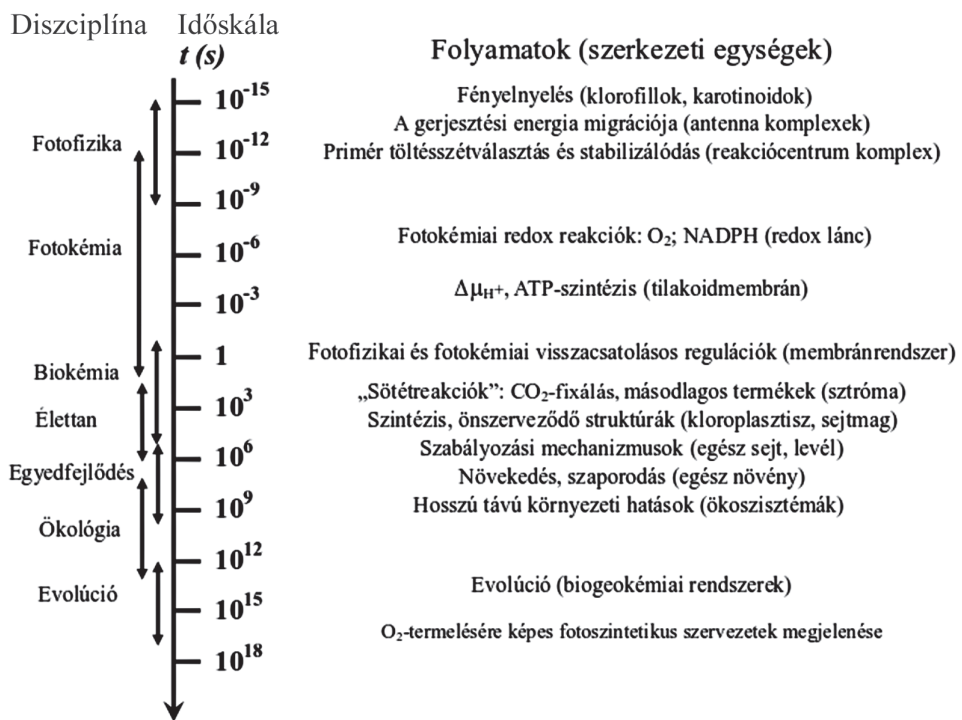
(Figure SPM-5 from Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA)

nyitott ~300%-os növekedését, várhatólag már így is súlyos, de még jó eséllyel kezelhető következményekkel jár. Ezen feltételek mellett még „csupán” néhány tízmillió ember életfeltételei válnak szinte lehetetlenné (vízellátás, malária, tengerparti zónák víz alá kerülése) elsősorban az alacsonyabb fejlettségű régiókban; számolni kell továbbá a fajok 15–40%-ának veszélyeztetettségével (lehetséges extinkciójával) is. 3 °C-os hőmérséklet-emelkedés mellett a problémák már kezelhetetlenné válhatnak: több mint egymilliárd ember vízellátása kerülhet veszélybe, és az évente víz alá kerülő tengerpartok lakosság száma a százmillió nagyságrendet is elérheti; az extinkció mértéke is 20–50%-ra nőhet. Ugyanakkor – és sokan úgy tartják, hogy ez az érv esett leg súlyosabban a latba a politikai döntéshozóknál – a szénelapú gazdaság leváltása új fejlődési pályára állíthatja a világgazdaságot. Így, személyes meggyőződésem is, ma a K+F+I-szféra legfontosabb feladata, mindent megtenni ennek a problémának a megoldása érdekében. Ugyanakkor a siker csak a legszélesebb körű társadalmi és nemzetközi összefogással érhető el. Az oktatásnak, egészségügynek, társadalomtudományoknak és a politikának is megvan a felelőssége, meg kell találnia a maga feladatát, és ki kell dolgoznia a megoldásokat.

Az alábbiakban – szakterületemre visszatérve – a fotoszintézis-kutatás helyzetére, főbb feladataira és alkalmazási lehetőségeire fókuszálok. A következőkben vázoltak alapján igazolható az az állítás, hogy rendkívül összetett folyamatokról van szó. Ezek több, a hagyományos besorolás szerint egymástól távol eső diszciplínához sorolhatók, és mind térben, mind pedig a folyamatok időbeli lefutását tekintve csak logaritmikus skálán tekinthetők át.

A FOTOSZINTÉZIS RÉSZFOLYAMATAI ÉS IDŐSKÁLÁI. FŐBB NYITOTT KÉRDÉSEK

A fotoszintézis főbb mechanizmusait a *Magyar Tudomány* hasábjain Vass Imre (2010) ismertette. Az alábbiakban – bemutatandó a különböző diszciplínák találkozásait és megkönnyítendő a nyitott kérdések és legújabb nemzetközi trendek és alkalmazási területek ismertetését – a biológiai fényenergia-hasznosítás folyamatait térben és időben kissé önkényesen csoportosítva mutatom be.



2. ábra. A fotoszintézis folyamatainak sematikus áttekintése időbeli lefolyásuk és a folyamatokhoz tartozó szerkezeti egységek megjelölésével, feltüntetve továbbá a tudományterületek között, valamelyest önkényesen meghúzott határvonalakat is.

(Saját szerkesztés az URL3 adatai alapján)

A fotoszintézis a fény elnyelésével kezdődik, amit az ún. *fénybegyűjtő antenna* komplexek pigmentmolekulái végeznek. Ezek mind számosságukban, mind pedig – többnyire jól megmagyarázható, egzaktul még nem levezethető, de jól azonosítható fizikai okokra visszavezethető módon – spektrálisan is kiszélesítik a napsugárzás fotoszintetikusán hasznosítható tartományát. Az antenna alapvető funkciója pontosan ebben rejlik; ti. a napsugárzás foton fluxussűrűsége viszonylag alacsony (teljes napfény esetén mintegy $2000\text{--}2500 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$), és így a fotokémiai reakciócentrumok hatékony energiaellátása csak az antennarendszer révén biztosítható. (Ráadásul a legtöbb fotoszintetikus szervezet a maximális sugárzási intenzitás töredékére van optimalizálva, és így kiterjedt antennarendszer nélkül életképtelen lenne.) Az antennarendszerben a gerjesztési energia megjelenését a femto- és pikoszekundumos időskálán lejátszódó relaxációs és energiaátadási folyamatok követik. Ennek során a teljes spektrális tartományban elnyelt fotonok (zöldalgák és növények esetén 400 és 500 nm és 600 és 700 nm közötti abszorpciós sávokkal) a vörös fotonok gerjesztési energiájával eljutnak a fotokémiai reakciócentrumokba. A folyamat kvantumhatásfoka közel 100% , ami azért is figyelemre méltó, mert reakciócentrumként átlagosan több száz – szélsőséges esetben akár több mint százezer – pigmentmolekula rendszeréről van szó. A fotofizikai törvények ezt kizárólag rendkívüli szervezethez emellett engedik meg – ennek szerkezeti és funkcionális sajátosságait korszerű krisztallográfiai és femtoszekundumos spektroszkópiai módszerekkel tárhatjuk föl (Zhang et al., 2015). Ezekben a fizikai folyamatokban a kvantumbiológia elemei is egyre határozottabban felfedezhetők (Romero et al., 2017). Itt kell megjegyezni azt is, hogy az antennarendszer a természetben, a szó szoros értelmében is, sokszínű és rendkívül változatos formákat ölt – alkalmazkodva az élőhely adottságaihoz; ugyanakkor a működés fizikai alapelvei hasonlóak, és az is közös sajátosságuk, hogy valamennyi rendszer képes arra, hogy az esetlegesen gyorsan változó fényviszonyokhoz igazítsa az elnyelt fényenergia hasznosításának kvantumhatásfokát. A fotoszintetikus szervezetek ilyen módon is, szabályozott disszipáció révén, képesek védekezni a túlságosan erős sugárzás károsító hatása ellen. A fotofizikai folyamatokba történő beavatkozás molekuláris hátterének tisztázása és a „felesleges” gerjesztési energia biztonságos disszipációját garantáló mechanizmusok feltárása a fotoszintézis-kutatás egyik legintenzívebben kutatott területe (Demmig-Adams et al., 2014).

A fotokémiai reakciócentrumokba érkező gerjesztési energia a reakciócentrum protein komplexekben – köszönhetően az ott elhelyezkedő klorofill és feofitin (vagy fotoszintetikus baktériumokban, bakterioklorofill és bakteriofeofitin) molekulák alkotta rendszer „geometrijának” – töltésszétválasztást hoz létre. Ezzel belépünk a fotoszintézis fotokémiai folyamatainak birodalmába. A fotokémiai reakciócentrumok szerkezetét, a töltésmozgásokat irányító alapvető fizikai mechanizmusokat ma már viszonylag jól ismerjük. Az elsődleges töltésszétválasztás is ultragyors fo-

lyamat, ami a néhány pikoszekundumos tartományban lézertechnikai eszközökkel követhető. Tekintettel azonban arra, hogy ez a folyamat szorosan kapcsolódik a gerjesztési energia beérkezéséhez, a töltésmozgás maga ennél akár nagyságrendekkel is gyorsabb lehet. Az elsődleges töltésszétválasztást követően a reakciócentrum komplexekben – nanoszekundumos és mikroszekundumos időskálán – töltés-stabilizálódási folyamatok zajlanak le, amit a milliszekundumos időskálán lejátszódó vektoriális elektron- és protontranszport mozgások követnek a tilakoidmembránba ágyazott elektrontranszport-lánc közreműködésével. Mind a terminális donor, mind pedig a terminális akceptor oldalon, a második, illetve az első fotokémiai rendszerben (PSII, illetve PSI), megkapjuk a primer termékeket, a légkörbe kibocsátott O_2 -t, illetve a CO_2 redukálásához szükséges NADPH-t. A töltésszétválasztás következtében generált transzmembrán elektromos tér, valamint a töltésvándorlás során a zárt membránvezikulum (a tilakoidmembrán) két oldala között kialakuló protongrádiens, és az így kialakuló $\Delta\mu_{H^+}$ elektrokémiai potenciál grádiens hajtóerejét felhasználva szintetizálódik a kémiai energiahordozó ATP-molekula. A fotoszintézis fotokémiai problémái közül ma a legnagyobb kihívást a vízbontás fizikai mechanizmusa jelenti, amelyben – a sokoldalú biofizikai és molekuláris biológiai módszerek alkalmazásával kombinálva – az áttörést a femtoszekundumos röntgen-krisztallográfiai módszerektől várhatjuk (Suga et al., 2017).

A primer fotofizikai és fotokémiai reakciók működését többszintű, visszacsatolási mechanizmusokon alapuló, általában enzimatisz szabályozó rendszerek regulálják, amelyek általában a perces időskálán zajlanak le. A már említett fotoprotektív, szabályozott disszipáció mellett fontos szerepet kap a kromatikus adaptációt szabályozó ún. state-tranzíció mechanizmusa, amely függ a NADPH és az ATP egymáshoz viszonyított arányától, illetve felhasználásától is; ennek során a membrán szerkezet is reverzibilisen módosul, amint az neutronszórás segítségével kimutatható volt (Nagy et al., 2014). Ezek a szabályozó mechanizmusok is mutatják az egymást követő folyamatok szoros összehangoltságát, aminek a részletes feltárása fontos kutatási terület. Ugyanez érvényes a fényreakciók és a sötétreakciók közötti kapcsolatra (illetve kapcsolatrendszerre). A sötétreakciók során a membránrendszert körbevevő ún. sztrómafolyadékban kerül sor a CO_2 fixálására, cukrokká alakítására, az ún. C3-as Calvin–Benson-ciklus vagy más, hasonló ciklus mentén, például a négy szénatomot tartalmazó primer termékről elnevezett C4-ciklus mentén. Ezek hatékonysága – a környezeti feltételektől függően – jelentősen különbözhet egymástól, felkínálva a biotechnológiai/növénynevelési beavatkozás lehetőségét.

A rendszer egyik fontos sajátja, élettanának lényegi eleme, hogy folyamatosan monitorozza saját működését, kijavítja az esetlegesen „elhasználódott” komponenseit (Vass, 2012), szabályozza – az aktuális környezeti feltételekhez igazítja – a gének működését. Ez utóbbihoz különböző, a fotoszintetikus apparátustól elkülönült érzékelőket is, például fotoreceptorokat használ, amelyek azután jelentősen

beavatkoznak a génexpressziós és élettani folyamatokba (Bernula et al., 2017). A fotoszintetikus működés szabályozását más magas szintű szabályozó mechanizmusok is irányítani tudják. A magasabb rendű növények többsége a kloroplasztiszok sejten belüli vagy a levelek szárhoz viszonyított szabályozható mozgásával is viszonylag széles határok közt tudja szabályozni az elnyelt fényenergia mennyiségét, ily módon módosítva a közel húsz nagyságrenddel gyorsabb folyamatok működési feltételeit. A fotoszintetikus működést és produktivitást befolyásoló tényezőkhöz tartoznak a belső és külső légzési folyamatok is (kloro- és fotorespiráció, kölcsönhatás a mitokondriális légzéssel), továbbá a zöld részek közötti „munkamegosztás” is a *source* és *sink* vagy termelő és elnyelő részek között. Ezek a szempontok különösen haszonnövényeink esetében fontosak, követésükre számos biofizikai módszer áll a szakemberek rendelkezésére. A fotoszintetikus aktivitás monitorozása és az „élő klorofill” mennyiségének meghatározása fontos nagyobb ökoszisztémák, adott esetben akár erdőségek vagy kiterjedt tengerek, óceánok élővilágának felmérésében is – például a primer folyamatok követésére is használatos klorofill fluoreszcencia újtechnológiára adaptált változatával (URL4).

Végül, de korántsem utolsósorban, a fotoszintézis-kutatások jelentős figyelmet szentelnek a fotoszintetikus szervezetek három és fél milliárd éves evolúciójának (amelynek kezdete ezen a logaritmikus skálán közel esik az ősrobbanáshoz). A reakciócentrumok megjelenése és diverzifikációja önmagában is érdekes probléma (Cardona, 2015). Valójában – figyelembe véve azt a tényt, hogy a sarkkörtől az Egyenlítőig és a tengerek fotikus zónájától (100–200 m) a 3000 m feletti magasságokig találunk fotoszintetikus organizmusokat – a diverzifikáció egyáltalán nem meglepő. Sokkal inkább figyelemre méltó ezen szervezetek és építőegységeik nagyfokú szerkezeti és funkcionális hasonlósága. Mindazonáltal, az evolúció tanulmányozásával szerzett ismeretek minden bizonnyal nagy hasznunkra lesznek biotechnológiai alkalmazásokban, például cianobaktériumok, algák és növények „áttervezésében”, illetve különböző (akár extraterresztriális) környezeti feltételekhez illesztésében vagy speciális metabolitok termeltetésében. Érdeemes megjegyezni azt is, hogy – mivel a fotoszintetikus szervezetek ma már maguk is szenvedő alanyai a légköri oxigén jelenlétének – az oxidatív stressz megértéséhez és a védekező mechanizmusok megtervezésében is fontosak lehetnek az evolúciós szempontok.

ALAPKUTATÁS VS. A FOTOSZINTÉZIS ÚJRATERVEZÉSE

A fotoszintézis-kutatások legfontosabb hajtóereje a kíváncsiság volt, és – meggyőződésem, még sokáig – az is marad. Ezekben az alapkutatásokban különösen erős a multidiszciplináris jelleg. Így a fotoszintetikus kutatások kölcsönhatása más tudományterületekkel is sokkal erősebb. Elegendő itt az ultragyors fotofi-

zikai és fotokémiai folyamatokra utalunk – ahol a lézertechnikát használva korábban nem ismert alapvető fotobiológiai összefüggésekre derült eddig is fény, és további fontos felfedezések várhatók a szege-di lézereközpontban, amint azt az ELI-ALPS *Scientific Case* anyaga alapján joggal várhatjuk (URL5). Több hasonló példa hozható föl. Ezek közé tartozik a membránbiológia és a bioenergetika: gazdag spektroszkópiai jellemzőik és fényindukálható működésük révén a fotoszintetikus protein komplexek segítségével nyertünk eddig is alapvető ismereteket a membránproteinek funkcionális flexibilitásáról és szerkezeti dinamikájáról.

A multidiszciplináris megközelítés érvényes a technológiaorientált kutatásokra is, amelyek alkalmasint már az alapkutatásokkal összemérhető intenzitással és sikerességgel folynak világszerte. Számos kollégámmal egyetértésben úgy vélem, hogy egy-két évtized távlatában több – a fotoszintézis eredményeire alapozott – ipari technológiai és agrárterületi áttörést várhatunk. Analógiát keresve azt gondolom, hogy a fotoszintézis-kutatás eredményei és technológiai fejlesztései ma semmivel sincsenek kevésbé fejlett szinten, mint (egyetemi éveim alatt) a múlt század hatvanas–hetvenes éveiben volt a szilárdtestfizika és az integrált áramkörök technológiája vagy az optika és a lézertechnika. Az alábbiakban igyekszem ezeket az állításokat néhány kiragadott példával alátámasztani.

A primer fotofizika területén a technológiai fejlesztések, többek között, a mesterséges fénybegyűjtő komplexek konstruálását célozzák meg – így készült a leghatékonyabbnak tartott, mélytengeri bakteriális antenna egyetlen szintetikus profirinből készített „utánzata”, a mesterséges kloroszóma (Chappaz-Gillot et al., 2012). Ilyen mesterséges fénybegyűjtő rendszerek alkalmazhatók lehetnek fotokatalitikus rendszerekben. A primer fotokémia eredményeire támaszkodó biohibrid, PSI-alapú fotovoltaiikus cellák konstruálása is sikeresnek ígérkezik – ezek teljesítménye rendkívüli rátával nő: 2003 és 2013 között tízezerszeresére nőtt (Nguyen–Bruce, 2014). Előnyük, hogy lényegében korlátlan mennyiségben rendelkezésre álló környezetbarát alapanyagokból készülnek; mindez nem mondható el a kadmiumot, telluriumot, indiumot vagy ruténiumot felhasználó – egyébként ma még nagyságrendekkel nagyobb hatékonyságú – félvezető alapú cellákról. A szoláris energia további fotoszintézisre alapozott fejlesztési irányait és a mesterséges fotoszintézist illetően lásd a *Magyar Tudomány* más kötetiben megjelent tanulmányokat (Reményi, 2013; Vass, 2017).

Az elmúlt két évben több jelentős munka és kezdeményezés jelent meg, amelyek mindegyike felveti a fotoszintézis eredményeinek hasznosíthatóságát a mezőgazdasági termelésben. (Erre korábban – vélhetőleg a fotoszintézis túlságos bonyolultsága, illetve a sokszoros áttételek miatt – nem nagyon volt példa.) Johannes Kromdijk és szerzőtársai (2016) kimutatták, hogy a növények természetes hozama mintegy 15%-kal növelhető egy, az antennában lejátszódó (ultragyors) disszipációs védekező mechanizmus módosítása révén. Fűfélék klímaváltozás-

hoz való alkalmazkodását segítheti Michael T. Raissig és szerzőtársai (2017) felfedezése, amelyben a CO₂-felvétel szabályozásának új lehetőségét mutatják meg. Ma már egyre szélesebb körben elfogadott az a nézet, hogy a közeljövő növénynevelése és biotechnológiája sokat hasznosíthat a fotoszintézis-kutatások eredményeiből. Amerikai kezdeményezés a fotoszintézis újratervezése (Redesigning Photosynthesis) (Ort et al., 2015). Széles körű nemzetközi összefogással és a Gates Foundation bőkezű támogatásával működik a RIPE (Realizing Increased Photosynthetic Efficiency) Program (URL6). A nevében hordozza a célokat a C4 Rice Program (URL7). Európai kezdeményezés a tíz év időtartamra tervezett Photosynthesis 2.0 Program, amely a tervek szerint 2020-ban indul mintegy száz laboratórium munkáját összefogva. Ebben eddig tizenöt EU-ország, valamint Izrael és Svájc tudományirányító szervei és összesen hatvanöt intézmény jelezte részvételi szándékát. Előzetes egyeztetések és nemzetközi munkaértekezleteken kialakított stratégia értelmében Magyarországon a részprojektek megvalósítását az MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont, az MTA Agrártudományi Kutatóközpont és a szegedi ELI-ALPS (Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source) kutatói végzik majd, bekapcsolva más hazai műhelyek kutatóit is.

IRODALOM

- Bernula, P. – Crocco, C. D. – Arongaus, A. B. et al. (2017): Expression of the UVR8 Photoreceptor in Different Tissues Reveals Tissue Autonomous Features of UV-B Signalling: UVR8 Signalling in Different Tissues. *Plant, Cell and Environment*, 40, 1104–1114. DOI: 10.1111/pce.12904, <http://real.mtak.hu/73321/>
- Campbell, J. E. – Berry, J. A. – Seibt, U. et al. (2017): Large Historical Growth in Global Terrestrial Gross Primary Production. *Nature*, 544, 7648, 84–87. <https://www.nature.com/articles/nature22030>
- Cardona, T. (2015): A Fresh Look at the Evolution and Diversification of Photochemical Reaction Centers. *Photosynthesis Research*, 126, 111–134. DOI: 10.1007/s11120-014-0065-x, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4582080/pdf/11120_2014_Article_65.pdf
- Chappaz-Gillot, C. – Marek, P. L. – Blaive, B. J. et al. (2012): Anisotropic Organization and Microscopic Manipulation of Self-Assembling Synthetic Porphyrin Microrods That Mimic Chlorosomes: Bacterial Light-harvesting Systems. *Journal of the American Chemical Society*, 134, 944–954. DOI: 10.1021/ja203838p,
- Csete M. – Szarka L. (2017): Bevezető. *Magyar Tudomány*, 178, 6, 642–644. <http://www.matud.iif.hu/2017/06/01.htm>
- Demmig-Adams, B. – Garab Gy. – Adams, W. III – Govindjee (2014): *Non-Photochemical Quenching and Energy Dissipation in Plants, Algae and Cyanobacteria*. Springer, DOI: 10.1007/978-94-017-9032-1, <https://bit.ly/2l3fd48>
- Goldthau, A. (2017): The G20 Must Govern the Shift to Low-carbon Energy. *Nature*, 546, 7657, 203–205. DOI: 10.1038/546203a, <https://www.nature.com/news/the-g20-must-govern-the-shift-to-low-carbon-energy-1.22099>

- Kromdijk, J. – Gowacka, K. et al. (2016): Improving Photosynthesis and Crop Productivity by Accelerating Recovery from Photoprotection. *Science*, 354, 857–861. DOI: 10.1126/science.aai8878, <https://escholarship.org/uc/item/1xt5762k>
- Lyons, T. W. – Reinhard, C. T. – Planavsky, N. J. (2014): The Rise of Oxygen in Earth's Early Ocean and Atmosphere. *Nature*, 506, 307–315. DOI: 10.1038/nature13068, https://www.researchgate.net/publication/260270485_The_rise_of_oxygen_in_Earth's_early_ocean_and_atmosphere
- Martin, D. – McKenna, H. – Livina, V. (2017): The Human Physiological Impact of Global Deoxygenation. *The Journal of Physiological Sciences*, 67, 97–106. DOI: 10.1007/s12576-016-0501-0, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5138252/>
- Nagy G. – Ünneper R. – Zsiros O. et al. (2014): Chloroplast Remodeling during State Transitions in *Chlamydomonas reinhardtii* as Revealed by Noninvasive Techniques in Vivo. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 111, 5042–5047. DOI: 10.1073/pnas.1322494111, <http://www.pnas.org/content/111/13/5042.long>
- Nguyen, K. – Bruce, B. D. (2014): Growing Green Electricity: Progress and Strategies for Use of Photosystem I for Sustainable Photovoltaic Energy Conversion. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1837, 1553–1566. DOI: 10.1016/j.bbabi.2013.12.013, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000527281300234X>
- Ort, D. R. – Merchant, S. S. – Alric, J. et al. (2015): Redesigning Photosynthesis to Sustainably Meet Global Food and Bioenergy Demand. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 112, 8529–8536. DOI: 10.1073/pnas.1424031112, <http://www.pnas.org/content/pnas/early/2015/07/06/1424031112.full.pdf>
- Raissig, M. T. – Abrash, E. – Bettadapur, A. et al. (2017): Grasses Use an Alternatively Wired bHLH Transcription Factor Network to Establish Stomatal Identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 113, 8326–8331. DOI: 10.1073/pnas.1606728113, <http://www.pnas.org/content/113/29/8326.long>
- Reményi, K. (2013): A mesterséges fotoszintézis (artificial leaf) a napenergia-tárolás eszköze. *Magyar Tudomány*, 174, 9, 1111–1117. <http://www.matud.iif.hu/2013/09/10.htm>
- Romero, E. – Novoderezhkin, V. I. – van Grondelle, R. (2017): Quantum Design of Photosynthesis for Bio-inspired Solar-energy Conversion. *Nature*, 543, 355–365. DOI: 10.1038/nature22012, https://www.researchgate.net/publication/315074110_Quantum_design_of_photosynthesis_for_bio-inspired_solar-energy_conversion
- Stern, N. (2007): *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press
- Suga, M. – Akita, F. – Sugahara, M. et al. (2017): Light-induced Structural Changes and the Site of O=O Bond Formation in PSII Caught by XFEL. *Nature*, 543, 131–135. DOI: 10.1038/nature21400, <https://bit.ly/2y30Gpm>
- Vass I. (2010): Megújuló fotoszintetikus energiatermelés napfényből és vízből – Elvi lehetőség vagy gyakorlati realitás? *Magyar Tudomány*, 171, 11, 1344–1353. <http://www.matud.iif.hu/2010/11/08.htm>
- Vass I. (2012): Molecular Mechanisms of Photodamage in the Photosystem II Complex. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1817, 209–217. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005272811000995>
- Vass I. (2017): Napenergia-hasznosítás fotoszintetikus rendszerek segítségével. *Magyar Tudomány*, 178, 5, 552–557. <http://www.matud.iif.hu/2017/05/07.htm>
- Vida G. (2017): Klímahelyzet 2016. *Magyar Tudomány*, 178, 6, 645–651. <http://www.matud.iif.hu/2017/06/02.htm>
- Zeebe, R. E. (2013): Time-dependent Climate Sensitivity and the Legacy of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 110, 13739–13744. DOI: 10.1073/pnas.1222843110, <http://www.pnas.org/content/110/34/13739>

Zhang, Z. – Lambrev, P. H. – Wells, K. L. et al. (2015): Direct Observation of Multistep Energy Transfer in LHCII with Fifth-order 3D Electronic Spectroscopy. *Nature Communications*, 6, 7914. DOI: 10.1038/ncomms8914, <https://www.nature.com/articles/ncomms8914>

URL1: <http://www.light2015.org/Home.html>

URL2: <http://ocean.si.edu/ocean-acidification>

URL3: <http://www.am.ub.edu/~jmiralda/fsgw/lect8.html>

URL4: <https://svs.gsfc.nasa.gov/11317>

URL5: <http://www.eli-hu.hu/?q=en>

URL6: <http://ripe.illinois.edu/>

URL7: <http://c4rice.irri.org/>

FÉNYKIBOCSÁTÁS KÉMIAI REAKCIÓKBAN¹

LIGHT EMISSION IN CHEMICAL REACTIONS

Lente Gábor

az MTA doktora, egyetemi tanár, Pécsi Tudományegyetem, Kémiai Intézet, Általános és Fizikai Kémiai Tanszék
lente@gamma.ttk.pte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy 2017-ben, a fény nemzetközi napján középiskolások számára tartott előadás alapján összefoglalja a kémiai reakciókban történő fénykibocsátási jelenségek megismerésének történetét az ókortól napjainkig, illetve fizikai és kémiai alapjait, s pontosan megfogalmazza a különbséget a hőmérsékleti sugárzás és a lumineszcencia típusú fénykibocsátási jelenségek között. A kemilumineszcencia ritka jelenség, amikor kémiai reakciók során, általában egyes vegyületekben lévő kötések energiáját felhasználva fotonok, vagyis fény kibocsátása történik. Erre a bűnügyi helyszínelő gyakorlatban alkalmazott luminol, illetve a manapság egyre elterjedtebb világító rudakban használt difenil-oxalát és a hidrogén-peroxid közötti, katalizátor jelenlétét is igénylő reakciók a legismertebb példák. Biolumineszcencia során ilyen jelenségek élő szervezetekben történnek: a közismert szentjánosbogarakban ebben a kulcsszerepet a luciferin nevű kis szerves molekula, illetve a luciferáz enzim játsszák.

ABSTRACT

Based on a lecture held for high school students on the International Day of Light in 2017, this article summarizes the history of scientific discoveries from ancient times about the light emission processes observable during some chemical reactions, the physical and chemical principles of such processes, and makes a careful distinction between thermal radiation and luminescent-type light emission processes. Chemiluminescence is a rare phenomenon during which photons (light) are produced in a chemical reaction, typically at the expense of the energy of a chemical bond. The most well-known examples of such processes include the reaction of luminol, used in crime scene investigations, and diphenyl oxalate, the active ingredient in glow sticks with hydrogen peroxide in the presence of a suitable catalyst. During bioluminescence, similar processes occur in living organisms: the commonly known fireflies use a small organic molecule called luciferin and an enzyme called luciferase as key components for this purpose.

¹ A cikk a szerző korábban megjelent írásainak felhasználásával készült (Lente, 2015, 2017).

Kulcsszavak: kemilumineszcencia, hőmérsékleti sugárzás, luminol, világító rúd, biolumineszcencia, szentjánosbogár, luciferáz

Keywords: chemiluminescence, thermal radiation, luminol, glow stick, bioluminescence, firefly, luciferase

Fénykibocsátást általában két alapvetően különböző mechanizmus eredményezhet: hőmérsékleti sugárzás és lumineszcencia. A hőmérsékleti sugárzás egyetemes jelenség: minden, az abszolút nulla foknál melegebb test a benne lévő részecskék hőmozgása miatt elektromágneses sugárzást bocsát ki, amelynek hullámhossz szerinti intenzitáseloszlását kizárólag a test hőmérséklete szabja meg, függetlenül attól, hogy a környezetében milyen körülmények uralkodnak. A kibocsátott sugárzás akkor a legerősebb, ha a test színe fekete, ezért *feketetest-sugárz*ásként is szokták emlegetni. Lényegében hőmérsékleti sugárzás jut a Nap felszínéről a Földre, de ilyen okból bocsát ki fényt egy hagyományos izzó is, amelyben a vékony volfrámszálat a rajta átfolyó elektromos áram hőhatása 2000–3000 °C közötti hőmérsékletre fűti fel.

A másik típusú gyakori fénykibocsátás háttérében a *lumineszcencia* áll. Ez igen sokféle jelenség összefoglaló neve, amelyek közös sajátja az, hogy egyes molekulák gerjesztett állapotba kerülnek, vagyis a bennük lévő elektronok közül néhány többletenergiára tesz szert, s ennek hatására a kötések ugyan még nem hasadnak fel, de megváltoznak, gyengébbekké válnak. A gerjesztett állapotokból a legstabilabb állapotba jutás közben az energiafelesleg egy foton, vagyis fény formájában távozik. Ezt a jelenségcsoportot régóta igen intenzíven vizsgálják a fizikusok és kémikusok. *Akin Károly*, az MTA tagja, már a 19. században több, nemzetközi visszhangot is kiváltó tanulmányt közölt a lumineszcencia előfordulásairól (Akin, 1865a, 1865b, 1867, 1870).

A lumineszcencia különböző fajtái között az elvi különbséget az adja, hogy a molekulák hogyan jutnak gerjesztett állapotba. Talán a leggyakoribb a megvilágítás hatására történő fénykibocsátás (vagyis beérkező fény biztosítja a gerjesztéshez szükséges energiát), amelyet lehetne szabatosan fotolumineszcenciának is nevezni, de ez a kifejezés nem igazán terjedt el a magyar szaknyelvben. Hangsúlyozni kell, hogy itt nem egy testre ráeső fény visszaveréséről van szó, hanem maga az anyag bocsátja ki az új fotonokat: ez olyan irányban is megtörténik, amerre a visszaverődés eleve lehetetlen. A fotolumineszcencián belül *fluoreszcenciának* nevezik azt az egyébként meglepően gyakori jelenséget, amikor egy anyag addig bocsát ki maga is fényt, amíg a megvilágítás tart. Ha az anyag a beeső fény megszűnése után is világít még egy ideig (általában csak a másodperc egy törtredéséig, de kivételes esetben akár percekig is), akkor a jelenséget *foszforeszcenciának* hívják. Létezik még az úgynevezett *tribolumineszcencia*, ahol

a fénykibocsátáshoz szükséges gerjesztett állapot mechanikai behatásra jön létre (például teljes sötétben kockacukrok összetörésekor kék felvillanásokat lehet látni). Az elektrolumineszcencia során a fénykibocsátást elektromos áram vagy erős elektromos tér hozza létre, ez van a manapság már igen elterjedt LED-ek működésének hátterében.

A *kemilumineszcencia* esetében kémiai reakció, vagyis kötések átrendeződése zajlik le, s a folyamatban felszabaduló energia hozza gerjesztett állapotba a molekulát. Ez meglehetősen ritka: a kémiai reakciókban az energiafeleslegtől való megszabadulásnak sokkal valószínűbb módja a molekulák mozgási sebességének növelése, azaz a hőmérséklet emelkedése. Ezért a kemilumineszcenciás reakciók ritkák, és akár kivételesnek sem túlzás nevezni azokat. Ez a megállapítás első pillantásra talán ellentmondásosnak tűnhet, hiszen az égési reakciók például elég gyakoriak, és gyertya- vagy fáklyalángként évezredek óta világításra is használják ezeket. Az égésnél azonban a fény keletkezése inkább a magas hőmérséklettel és az ezzel kapcsolatos másodlagos folyamatokkal van kapcsolatban. Egy megfelelő mennyiségű levegővel szabályozott gázláng majdnem színtelen, de közben forró. A lángokban a fényt okozó jelenségeket a legtöbb esetben pusztán a hőmérséklet növelésével, a lángokban zajló kémiai reakcióktól függetlenül is létre lehet hozni.

A látható fény egy fotonjának energiája a kémiai kötési energiák és általában a kémiai reakciókkal járó energiaváltozásokéval azonos tartományba esik. Emiatt a fény gyakran hatással van a kémiai reakciókra, az ilyen kölcsönhatások tanulmányozásával a *fotokémia* foglalkozik. Ez viszont legtöbbször egyirányú: a fény gyakran okoz ugyan kémiai reakciókat (például a zöld növényekben lejátszódó fotoszintézist), de a folyamat fordítottját, tehát a kemilumineszcenciát bizony igen nagy utánajárással és persze sötétben kell keresni, mert ha elő is fordul, a kibocsátott fény intenzitása általában csekély.

Ritkaságuk ellenére a kemilumineszcenciás folyamatok megfigyeléséről már igen régről is vannak írásos bizonyítékok. A szakirodalom szerint (Palilis–Calokerinos, 2000; Ram–Siar, 2005) szentjánosbogarakról már az i. e. 16. században is megemlékeztek kínai források. *Arisztotelész A lélekről* című művében írja a következő sorokat:

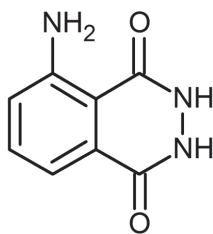
„De nem minden dolog fényben látható, hanem ez az egyes dolgok sajátos színe csupán. Némelyik dolog ugyanis a fényben nem látható, de a sötétben érzetet kelt, mint például a tüzesnek tetsző és ragyogó testek; ezekre azonban nincs közös elnevezésünk. Ilyen a gomba, a szaru, a halak feje, pikkelye, szeme. Saját színet egyiknek sem láthatjuk. Hogy ezeket milyen oknál fogva látjuk, más kérdés” (Arisztotelész: *A lélekről*, II. könyv 7. fejezet, Steiger Kornél fordítása). Ma már egyértelmű, hogy a gomba, a halak feje, pikkelye és szeme kemilumineszcencia miatt bocsát ki fényt.

Az alkímia kései korszakában, 1663-ban *Robert Boyle*, 1669-ben pedig *Henning Brand* figyelt meg igen halovány kékes derengést a foszfor és a levegő

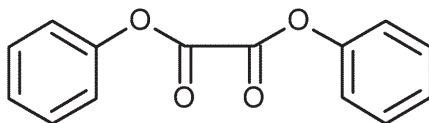
között lezajló reakciók során. Érdekes módon a foszforeszcencia jelensége erről az elemről kapta a nevét, noha mai ismereteink szerint a foszfor fénykibocsátó reakcióinak háttérében nem ez áll, hanem a kemilumineszcencia. A 19. század végén már szerves vegyületek részvételével végbemenő fénykibocsátó reakciókat is felfedeztek (Radziszewski, 1877), s magát a *kemilumineszcencia* szakkifejezést is ebben a korban alkotta meg *Eilhardt Wiedemann* (1888). A 20. század első évében fedezték fel a szentjánosbogarak fénykibocsátásának kémiai háttérét (Dubois, 1901), s négy évvel később már száz oldalnál hosszabb összefoglalót is publikáltak az ismert kemilumineszcenciás folyamatokról (Trautz, 1905).

A fénykibocsátással járó legnépszerűbb kémiai folyamatban a luminol nevű vegyület játssza a főszerepet. Ennek a szerkezeti képletét mutatja be az *1. ábra*. A luminol híg és gyengén lúgos kémhatású vizes oldatát hidrogén-peroxiddal reagáltatva csekély mennyiségű katalizátor hozzáadására beindul a fénykibocsátás. A katalizátor többféle anyag is lehet, az egyik legegyszerűbb lehetőség a hipóként ismert háztartási tisztítószer (nátrium-hipoklorit lúgos oldata) hígított oldata. 1928-ban *Herbert Albrecht* német kémikus fedezte fel, hogy a vér jelentős erősítő hatással van a luminol fénykibocsátására (Albrecht, 1928). Egy szűk évtizeddel később az is világossá vált, hogy ezért a hatásért a vérben lévő számtalan különböző anyag közül a vasat is tartalmazó hematin a felelős (Huntress et al., 1934; Proescher–Moody, 1939). A felismerés alapján olyan, vért nagyon kis mennyiségben is kimutatni képes módszert dolgoztak ki, amely több okból is különösen alkalmas a bűnügyi vizsgálatokra. Igen gyorsan, a helyszínen végrehajtható, nem szükségesek hozzá laboratóriumi eszközök. A beszáradt vagy alvadt vérben több a hematin, mint a frissben, ezért ezek kimutatása igen kicsi mennyiségben is lehetséges, így igen gyakran akár egy alaposabb tisztítást követően is kimutathatók a vérfoltok maradványai. Ráadásul a hematin nem bomlik el a reakció közben, hanem klasszikus katalizátorszerepet játszik, így a teszt akár többször is megismételhető; azaz bármiféle kétség eloszlatható a vizsgálatok újbóli elvégzésével, esetleg gondosabban szabályozott vagy megváltoztatott körülmények között is. A teszt elvégzésekor a gyanús foltra a vizsgálatot végző a luminol és az oxidálószer oldatának keverékét permetezi. A fénykibocsátás mintegy fél percig tart, megfelelő technika alkalmazásával akár le is lehet fényképezni, így dokumentálható a teszt eredménye. A módszer hátránya, hogy nemcsak a hematin van katalitikus hatással a folyamatra, hanem egyes réztartalmú anyagok is. Mi több, ahogy már volt szó róla, a hipó is mutat ilyen jelenséget.

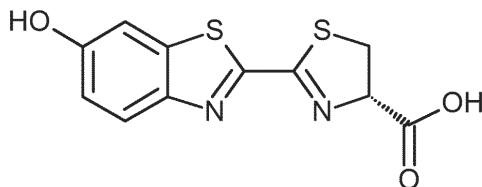
A fényt kibocsátó kémiai reakciók adják az alapját a világító rudak működésének. Ez általában egy fényt átengedő műanyag tartály: a reakció belül, minden zavaró hatástól elszigetelve játszódik le. Az aktiválás leggyakrabban egy rúdon belüli, vékony falú üvegampulla összetörésével, s így a két reagáló anyag keve-



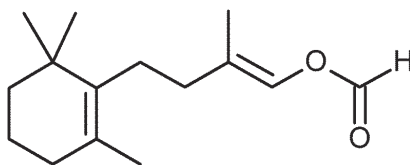
luminol



difenil-oxalát



a szentjánosbogárban megtalálható luciferin

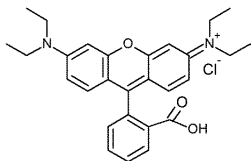
a *Latia* fajokban megtalálható luciferin**1. ábra.** Kemilumineszcenciára alkalmas szerves vegyületek szerkezeti képlete

résével történik. A rudak utána órákig fényt bocsátanak ki, bár sem kikapcsolni, sem újraindítani nem lehet őket. Nagyjából két tucat olyan anyagot fejlesztettek ki eddig, amelyet világító rudakban használ(hat)nak. A luminol nem ideális ilyen felhasználásra, mert a reakció viszonylag gyorsan, percek alatt véget ér, vagyis a rúd csak rövid ideig világítana. Ezért manapság szinte kizárólag a difenil-oxalátot alkalmazzák (kémiai képlete szerepel az 1. ábrán). Ezt az anyagot és a kemilumineszcenciát okozó reakcióját Edwin Chandross, az amerikai Bell Labs fiatal kutatója fedezte fel az 1960-as években (Chandross, 1963). A cég azonban nem ismerte fel a folyamat kereskedelmi jelentőségét, így a szabadalmaztatás ötletét elvetette. Nem sokkal később az American Cyanamid cég kapott az USA Védelmi Minisztériumtól megbízást arra, hogy fejlesszen ki fényforrást, amely elektromos áram nélkül is lehetővé teszi a tengeren katonák megtalálását sötétben. Ők az irodalom áttanulmányozása után gyakorlatilag készen kapták a megoldást, s a találmány nem csekély üzleti hasznából sem a felfedező, sem az őt alkalmazó cég nem részesült (Borman, 2017).

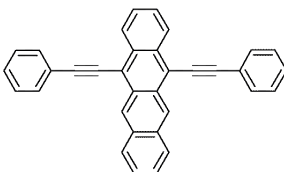
A világító rudakban a fénykibocsátás a difenil-oxalát és a hidrogén-peroxid közötti reakcióban történik. Habár a kibocsátott fény színe valamelyest befolyásolható a használt szerves vegyület megválasztásával, ezzel a módszerrel önmagában nem lehetne látványosan sok színben világító rudakat készíteni, s az élettartamuk is igen változó lenne. A modern termékekben ezért a szín szabályozására egy újabb (vagyis negyedik) komponens is megtalálható, ez általában egy fluoreszcenciát mutató festék. Rengeteg különböző anyag fluoreszkál, s a kibocsátott fény színe is könnyen szabályozható a molekulák szerkezetének megválasztásával. Így egy ilyen világító rúdban lényegében az történik, hogy a kémiai reakcióban kibocsátott kékes színű fényt a festék még a rúdban lévő oldatban elnyeli, majd a saját fluoreszcenciájának megfelelő színű fényt bocsát ki, amely már elhagyja a rudat. A különböző rudak készítéséhez jellegzetesen használt fluoreszcens adalékanyagok kémiai képletét a 2. ábra mutatja be.

A világító rudaknak esztétikai vonzerejükön túlmenő gyakorlati alkalmazásuk is van. Hordozhatók, vízhatlanok, nagy külső nyomás alatt is működnek, hőt gyakorlatilag nem termelnek, és nem szükséges elektromos áram a működésükhöz, ezért vészhelyzeti fényforrásként alkalmazzák őket természeti katasztrófák, például nagy földrengések után. Katonai támaszpontok vészvilágító rendszere is gyakran kemilumineszcencián alapuló módszert használ fel. Búvárok is előszeretettel használnak világító rudakat, különösen nagyobb mélységekben. A Guinness Rekordok könyve nyilvántartja a világ legnagyobb világító rúdját, ezt az angliai Camber Sandsben egy fesztivál megnyitásakor használták 2009. április 24-én: 254 cm magas volt, és a *Csillagok háborúja* filmsorozatban szereplő fegyverhez, a fénykardhoz hasonlított.

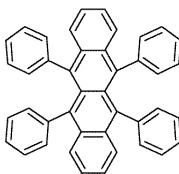
Ugyan a kémiában nem könnyű kemilumineszcenciás reakciót találni, a természetben több milliárd évnyi evolúció alatt azért kifejlődött néhány olyan ál-



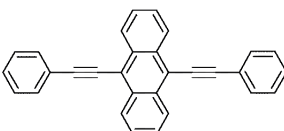
vörös: rodamin-B



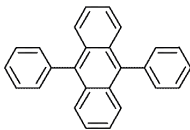
narancssárga: 5,12-bisz[feniletinil]-naftacén



citromsárga: rubrén



zöld: 9,10-bisz[feniletinil]-antracén



kék: 9,10-difenil-antracén

2. ábra. Világító rudakban használatos színmódosító anyagok szerkezeti képlete

latfaj, amelyek szervezete ilyen elven bocsát ki fényt. Az élővilágban előforduló, fénykibocsátással járó jelenséget *biolumineszcenciának* is nevezik. Igazából a hagyományos kemilumineszcenciától való megkülönböztetésnek nincsen semmilyen elvi alapja, mert a jelenség a megfelelő molekulák segítségével élő szervezeteken kívül, laboratóriumban is előidézhető.

A biolumineszcencia legszélesebb körben ismert példája a szentjánosbogár esti fénykibocsátása. A szentjánosbogár-félék (*Lampyridae*) mintegy kétezer képviselőt számláló családjá a rovarok (*Insecta*) osztályában a bogarak (*Coeloptera*) rendjének része, ezen belül pedig a mindenevő bogarak (*Polyphaga*) alrendjébe tartozik. Magyarországon három fajt találtak eddig: ezek a nagy szentjánosbogár (*Lampyris noctiluca*), a kis szentjánosbogár (*Lamprohiza splendidula*) és a törpe szentjánosbogár (*Phospaenus hemipterus*). Ezek mérete öt milliméter és két centiméter között változik. Testük általában viszonylag lapos, külső kitinvázuk nem különösebben kemény, csápjuk rövid. Fejük a tor alá mélyen behúzott, így nem is látható felülről. A világító szerv potrohuk utolsó szelvényeiben van. Lárvaik ragadozó életmódot folytatnak: csigákat, apró rovarlárvékat fogyasztanak.

A bogarak fénykibocsátásnak színe, időtartama és gyakorisága fajonként változik. A fénykibocsátás célja elsősorban a hímek és a nőstények egymásra találása. E célból főleg az ivarérett nőstények világítanak, de a jelenség már korábbi életszakaszokban is megfigyelhető: a lárvák, bábok és tojások is bocsátanak ki némi fényt. Sajnos az elmúlt évtizedekben hazánkban igen megritkultak ezek a bogarak. Magyar nevük eredete az, hogy a szentjánosbogarak rajzása általában a nyári napforduló, vagyis június 21. környékén a leglátványosabb. Keresztelő Szent János születésnapja június 24-re esett, a katolikus egyház ezt ünnepli Szent János napjaként, így a látványos fényjelenséget is erről nevezték el eleink.

A szentjánosbogarakban is a már bemutatott, mesterségesen megtervezett módszerekhez hasonló kémiai reakciók eredményezik a fénykibocsátást. A benne központi szerepet játszó szerves vegyületeket összefoglaló néven luciferinnek hívják: ennek pontos kémiai szerkezete akár fajonként más és más lehet, két molekula szerkezeti képletét mutatja be példaként az *1. ábra*. Az élőlényekben is szükséges valamilyen oxidálószer a jelenség kiváltásához, itt ezt a szerepet a levegőből származó, a hidrogén-peroxiddal szemben nem mérgező, de jóval kevésbé reakcióképes elemi oxigén játssza. Így a fénykibocsátáshoz kivételesen hatékony katalizátorokra van szükség, ezeket az enzimeket luciferázoknak nevezik. A luciferin és luciferáz név Raphael M. Dubois-tól származik (1901), s a latin „fényhozó” jelzőre utal.

IRODALOM

- Akin C. K. (1865a): On Calcescence. *Philosophical Magazine*, Series 4. 29, 193, 28–43. <http://scans.library.utoronto.ca/pdf/3/42/s4philosophicalm29lond/s4philosophicalm29lond.pdf>
- Akin K. (1865b): Further Statements Concerning the History of Calcescence. *Philosophical Magazine*, Series 4. 29, 194, 136–151. <http://scans.library.utoronto.ca/pdf/3/42/s4philosophicalm29lond/s4philosophicalm29lond.pdf>
- Akin K. (1867): Ueber Calcescenz und Fluorescenz. *Annalen der Physik*, 207, 8, 554–561. DOI: 10.1002/andp.18672070804
- Akin K. (1870): “Kinetic” and “Transmutation”. *Nature*, 2, 37, 211–211. DOI: 10.1038/002211a0
- Albrecht, H. O. (1928): Über die Chemiluminescenz des Aminophthalsäurehydrazids. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 136, 1, 321–330. DOI: 10.1515/zpch-1928-13625
- Borman, S. (2017): A Glowing Discovery Lost on Management. *Chemical & Engineering News*, 95, 22, 48. <https://cen.acs.org/articles/95/i22/Illuminating-correspondence-readers.html>
- Chandross, Edwin A. (1963): A New Chemiluminescent System. *Tetrahedron Letters*, 4, 12, 761–765. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)90712-9
- Dubois, M. R. (1901): Luminescence obtenue avec certains composés organiques. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 132, 2, 431–432.
- Huntress, E. H. – Stanley, L. N. – Parker, A. S. (1934): The oxidation of 3-aminophthalhydrazide (“luminol”) as a lecture demonstration of chemiluminescence. *Journal of Chemical Education*, 11, 3, 142–145. DOI: 10.1021/ed011p142
- Lente G. (2015): „... és lön világosság”. Fényt kibocsátó kémiai reakciók a világító rudaktól a szentjánosbogarakig. *Természet Világa*, 146 (II. különszám), 60–63. http://real-j.mtak.hu/6263/1/TermVil_A.Feny.Eve_1-96.oldal_netre.pdf
- Lente G. (2017): *Vízilónaptej és más történetek kémiából*. Budapest: Typotex Kiadó
- Palilis, L. P. – Calokerinos, A. C. (2000): Analytical Applications of Chemiluminogenic Reactions. *Analytica Chimica Acta*, 413, 1, 175–186. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)00798-4, https://www.researchgate.net/publication/232359769_Analytical_Application_of_Chemiluminogenic_Reactions
- Proescher, F. – Moody, A. M. (1939): Detection of Blood by Means of Chemiluminescence. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 24, 1183–1189.
- Radziszewski, B. (1877): Untersuchungen über Hydrobenzamid, Amarin und Lophin. *Chemische Berichte*, 10, 1, 70–75. DOI: 10.1002/cber.18770100122
- Ram, S. – Siar, C. H. (2005): Chemiluminescence as a Diagnostic Aid in the Detection of Oral Cancer and Potentially Malignant Epithelial Lesions. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 34, 5, 521–527. DOI: 10.1016/j.ijom.2004.10.008
- Trautz, M. (1905): Studien über Chemiluminescenz. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 53, 1, 1–111. DOI: 10.1515/zpch-1905-5302
- Wiedemann, E. (1888): Ueber Fluorescenz und Phosphorescenz I. Abhandlung. *Annalen der Physik*, 270, 7, 446–463. DOI: 10.1002/andp.18882700703

CSILLAGÁSZAT ÉS KOZMIKUS FÉNY

ASTRONOMY AND COSMIC LIGHT

Szabó Róbert

az MTA doktora, tudományos főmunkatárs, igazgatóhelyettes,
MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet
szabo.robert@csfk.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Röviden és közérthetőségre törekedve áttekintem, hogy milyen információhordozók által szerezzük ismereteinket az Univerzumból, különös tekintettel a fényre, hiszen ez az írás a *Fény napja* című rendezvényen elhangzott előadás összefoglalója, ahol elsősorban középiskolás diákok vettek részt.

A szubjektív áttekintés kitér a napfogyatkozások jelentőségére, az elektromágneses spektrum különböző tartományainak hozzájárulására csillagászati ismereteinkhez, a fényességmérés pontosságának jó egy évtizede kezdődött forradalmára, és ennek köszönhetően olyan tudományos eredményekre, mint például az exobolygók gyakoriságának megállapítása. Végül a fény hullámhossz szerinti felbontásáról, azaz a csillagászati spektroszkópiáról is szót ejtek.

ABSTRACT

I briefly review the range of cosmic messengers carrying information about the Universe. I mainly focus on light, since this paper is the summary of a talk I gave at the 'Day of Light' event attended by high-school students. My subjective overview covers the significance of solar eclipses, the contribution of different parts of the electromagnetic spectrum to our astronomical knowledge, the revolution of the precision of measuring brightness that started about a decade ago, as well as related scientific results, like the occurrence rate of exoplanets. I finish with discussing breaking the light into its constituents, i.e. astronomical spectroscopy.

Kulcsszavak: spektroszkópia, csillagászat, fotometria, exobolygók, elektromágneses sugárzás, Európai Déli Observatórium

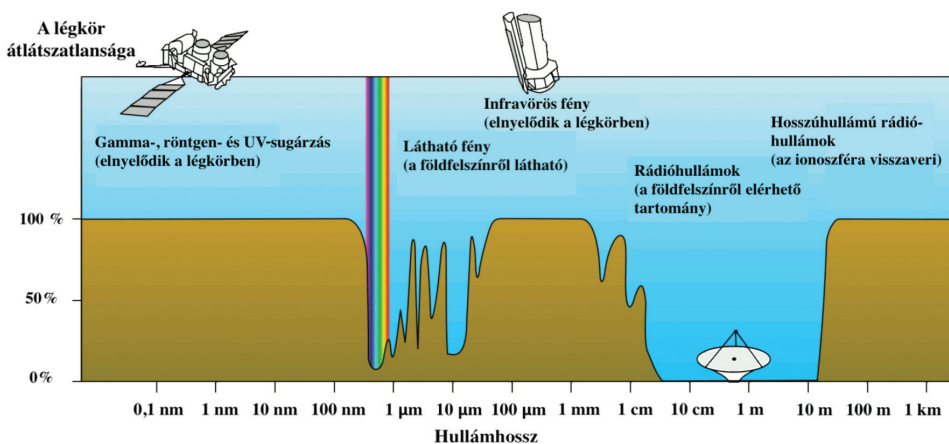
Keywords: spectroscopy, astronomy, photometry, exoplanets, electromagnetic radiation, European Southern Observatory

INFORMÁCIÓHORDOZÓK A KOZMOSZBÓL

Milyen módon szerzünk információt a körülöttünk található világról, ezen belül is az Univerzumból? Ha közvetlen kozmikus környezetünktől eltekintünk – hiszen a Naprendszer közvetlenül is vizsgálhatjuk, akár geológiai módszerekkel, például meteoritok vagy a helyszínre küldött bolygószondák segítségével –, kiderül, hogy megszerzett tudásunk túlnyomó része az elektromágneses sugárzás tanulmányozása által született. Elég, ha csak Galilei történelmi mozdulatára gondolunk, amellyel először emelte az égbolt felé kezdetleges távcsövet, vagy a Földön található 8-10 m átmérőjű csillagászati teleszkópokra, vagy akár a mindenki által ismert Hubble-űrtávcső gyönyörű felvételeire.

Az előbb említett eszközök azonban csak egy szűk szeletét használják az elektromágneses sugárzásnak – a közeli-ultraibolyától kezdve a látható fényen keresztül a közeli-infravörös tartományig. A csillagászat azonban az utóbbi évtizedekben fokozatosan meghódította a teljes elektromágneses spektrumot, bár a földi légkör csak két „ablakban” enged többé-kevésbé zavartalan kitekintést: ezek a látható fény hullámhossztartománya és az ún. rádióablak (1. ábra). Nem véletlen, hogy a csillagászati obszervatóriumokat magas hegytetőkre, száraz fennsíkokra, sivatagokba telepítik. A kevesebb lég- és fényszennyezés és gyakori tiszta égbolt mellett így igyekszünk kitágítani az Univerzumra nyíló ablakot: az alacsony vízgőztartalom kedvez az infravörös és mm-es hullámhosszú megfigyeléseknek is. De mire használhatók a nem látható hullámhossztartományt lefedő megfigyelések? Részletes felsorolás helyett itt csak tömören vázoljuk a perspektívákat.

A röntgen- és gammafotonok a nagy energiájú folyamatok (szupernóva-robbanás, gammakitörés, fekete lyuk körüli anyagbefogás) nyomjelzői. Az ultraibolya-



1. ábra. A légkör áteresztőképessége az elektromágneses sugárzásra nézve (NASA)

lya tartományban a forró csillagok, valamint a Nap- és csillagkitörések látszanak legjobban. Infravörös és mm-es hullámhossztartományban a csillagközi por és a gázfelhők is átlátszóvá válnak, tanulmányozható a csillag- és bolygókeletkezés folyamata, maga a csillagközi anyag, a hideg csillagok, a Naprendszeren kívüli bolygók, és a sor hosszan folytatható lenne. A rádiótávcsövek a legtávolabbi objektumokat (galaxisokat, galaxishalmazokat) fürkészik, nagy térbeli felbontással, illetve a szinkrotronsugárzást is detektálják, amelyeket egyes szupernóva-maradványok bocsátanak ki. Ezenkívül a csillagközi anyag eloszlását, tulajdonságait, összetevőit (például a szerves molekulákat) is analizálják. A naprendszerbeli, Földet megközelítő kisbolygókat pedig akár aktív radarmérésekkel is követik pályájuk és alakjuk pontosítása érdekében.

Nem lenne teljes a felsorolás, ha kihagynánk az információhordozók sorából a kozmikus sugárzást, amely nagy energiájú részecskéket, például protonokat, elektronokat, neutrínókat, atommagokat is magába foglal, és amely az Univerzum legnagyobb energiájú boszorkánykonyhájáról hoz hírt, így a szupernóva-robbanásokról és -maradványokról, összeroppanó csillagokról, a galaxisok középpontjában található gigantikus tömegű fekete lyukak közvetlen környezetéről.

Az utóbbi években azonban egy újabb lehetőség jelent meg az asztrofizikusok eszköztárában, ez pedig a gravitációs hullámok használata. Ezek a proton méretével összemérhető mértékű zavarok a téridő szövetének parányi fodrozódásai, és a téridőben akkor keletkeznek, amikor nagy tömegű testek mozognak erős gravitációs térben. Ilyen például a kettős fekete lyukak mozgása és összeolvadása. A hatást Albert Einstein és az általános relativitáselmélet jósolta meg, és 2015-ben sikerült először kimutatni (Abbott et al., 2016). Az eszköz új horizontot nyit az asztrofizikában: most már nemcsak „látjuk”, de „halljuk” is az Univerzum kataklizmáit.

A következőkben a „fényel” – azaz az elektromágneses spektrum 400–700 nanométer hullámhossztartományába eső sugárzással – és a csillagászat számára abból nyerhető hasznos információkkal foglalkozunk.

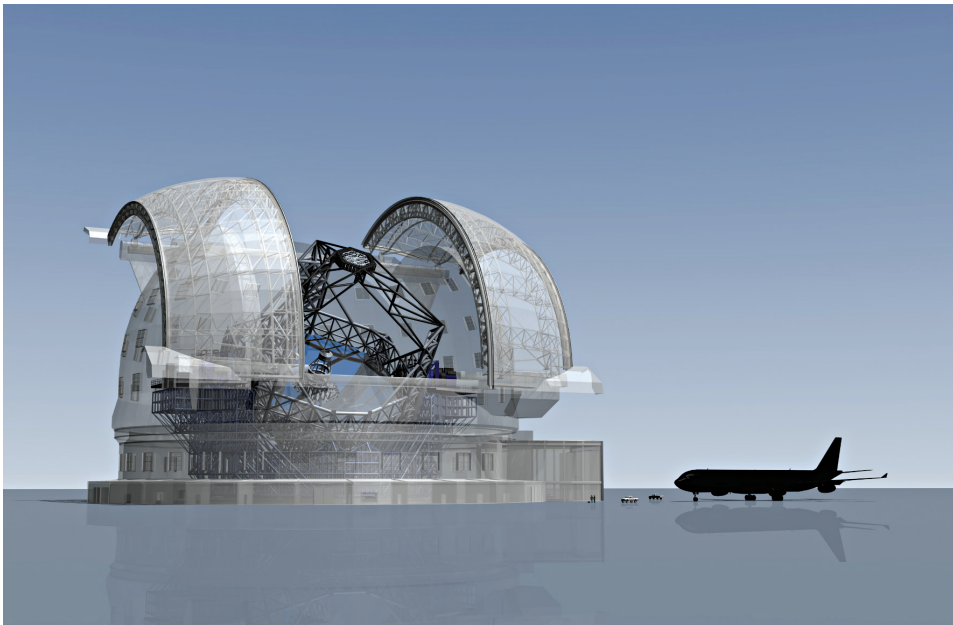
AMIKOR KEVÉS A FÉNY

A csillagászok az esetek túlnyomó részében halvány objektumokat örökítenek meg, vagy spektroszkópiai megfigyelések céljából szétbontják az égitestekről jövő fényt hullámhossz szerint, ami tovább csökkenti a rendelkezésre álló fotonok számát az adott hullámsávban. Ennek meggondolása alapján érthetjük meg, hogy a távcsövek tulajdonképpen hatalmas „fénygyűjtő vödörként” foghatók fel. Az emberi szemben található pupilla átmérője 5 mm, a legnagyobb távcsövek pedig 8–10 méter átmérőjűek (a hazai teleszkópok átmérője legfeljebb egy méter). Ezek a monstrok már pusztán a fénygyűjtő terület különbsége folytán több

milliószor halványabb égitesteket engednek láttatni, mint az egyik legfontosabb érzékszervünk, a szemünk. Ennek fényében még megdöbbentőbb az épülő óriástávcsövek mérete: 30–40 méter átmérőjű távcsőmonstrumok tervezése zajlik, az európai összefogással épülő 39 méteres E-ELT (European Extremely Large Telescope) építése pedig már el is kezdődött (2. ábra) (URL1).

Ez a teleszkóp Chilében épül, és az Európai Déli Observatórium (European Southern Observatory, ESO) elnevezésű kormányközi szervezet vállalkozása. Az ESO korábban épült optikai és rádiótávcsöveit magyar kutatók is rendszeresen használják, holott a szervezetnek Magyarország még nem tagja. A hatalmas fénygyűjtő felület és a hozzá tartozó legkorszerűbb műszerek a kozmológia és az exobolygók vizsgálatának egyik legfontosabb műszerévé fogják avatni az E-ELT-t, amelynek átadását 2024-re tervezik. Az Atacama-sivatag Cerro Armazones nevű hegycsúcsán létesítendő egyedülálló építmény az Univerzum kezdetén létrejött galaxiskezdemények és struktúrák kialakulását fogja kutatni, valamint alkalmas lesz az exobolygók, vagyis a Naprendszeren kívül (más csillagok körül) található planéták alapos vizsgálatára is. Ebben a minőségében valószínűleg új érat fog nyitni a csillagászatban.

Ha már a nagy távcsöveket említettük, a fénygyűjtő képesség mellett a felbontóképesség is fontos tényező, ami szintén a fény hullámtermészetéből adódó



2. ábra. Az épülő 39 méter átmérőjű European Extremely Large Telescope terve egy Airbus A340-es repülőgéphez viszonyítva (ESO)

természetes korlát. Az elméleti szögfelbontás elérését földi távcsövek esetén a légköri hullámzás, turbulencia meggátolja. Ezen segít az ún. adaptív optika elvének alkalmazása. Ebben az esetben hullámfront-korrekción végzünk, másodpercenként akár több százszor, ami lehetővé teszi az elméleti felbontóképesség megközelítését. Az eljáráshoz célpontunkhoz közeli, fényes csillag szükséges, és a módszer így is csak annak viszonylag kis környezetében működik. A fényes csillagot sokszor nagy teljesítményű lézerrel helyettesítik, ez a 90 km magasban levő nátriumréteget gerjeszti a légkörben, ami fényleni kezd. Ennek a mesterséges csillagnak a torzulásai alapján deformálják az optikai elemeket úgy, hogy a látómezőbeli objektum fénye éles maradjon. (Tehát a szemmel is látható lézerefény egy irányba mutat a teleszkóppal, de mégsem a célzást segíti elő, mint ahogy a cikk szerzője hallotta olykor laikusoktól.)

Még egy szempontot kell szem előtt tartanunk, ha a begyűjthető fotonok számát tekintjük: nem elég annak ismerete, hogy mekkora területet metsz ki teleszkópunk a távoli égitestről jövő hullámfrontból, az is fontos, hogy ennek mekkora részét tudja hasznosítani, és mennyi ideig tudja integrálni. A szem ugyanis nem képes összegyűjteni, majd utána kiolvasni a bejövő jelet, hanem rövid ideig gyűjti a fényt, és a látott képet az agy azonnal feldolgozza. Ezzel szemben a csillagászatban hagyományosan hosszú expozíciós időkkel dolgoznak: ez lehet több óra, de akár néhány nap is. Ennek oka a már említett hatékonyságban keresendő: míg a múlt században a hosszú ideig általánosan használt csillagászati detektorok, a fotólemezek a fénynek mintegy ezrelékét tudták hasznosítani, addig a ma egyeduralmú CCD-kamerák (digitális fényképezőgépekben és mobiltelefonokban univerzálisan megtalálható töltéscsatolt eszközök) akár 90% feletti hatékonysággal rögzítik a beeső fotonokat (bizonyos hullámhossztartományban).

AMIKOR SOK A FÉNY

Ritkán ugyan, de még a csillagászatban is előfordul, hogy túl sok fénnel dolgozunk. Ez jellemzően központi csillagunk, a Nap megfigyelésénél történik. Ebben az esetben a távcsőtükrök és egyéb optikai elemek fényvisszaverő (vagy éppen -áteresztő) képessége korántsem olyan fundamentális jelentőségű, mint az éjszakai üzemmódban használt társaiknál. Sőt a naptávcsöveknél sok esetben nem is kap visszaverő réteget a távcsőtükör, hogy csökkenjen a beeső fény mennyisége. A felbontás és a kép mozdulatlansága (szaknyelven *seeing*) azonban itt is kiemelt fontosságú.

Az égbolt leglátványosabb jelenségei közé tartozik a teljes napfogyatkozás, ami egy adott helyszínről sajnos nagyon ritkán látszik, de szerencsére Magyarországon 1999-ben volt benne részünk. Itt a sok fény-kevés fény kettősség órák-percek alatt varázsol égi színjátékot egy adott földrajzi helyen. A felemelő és magasztos

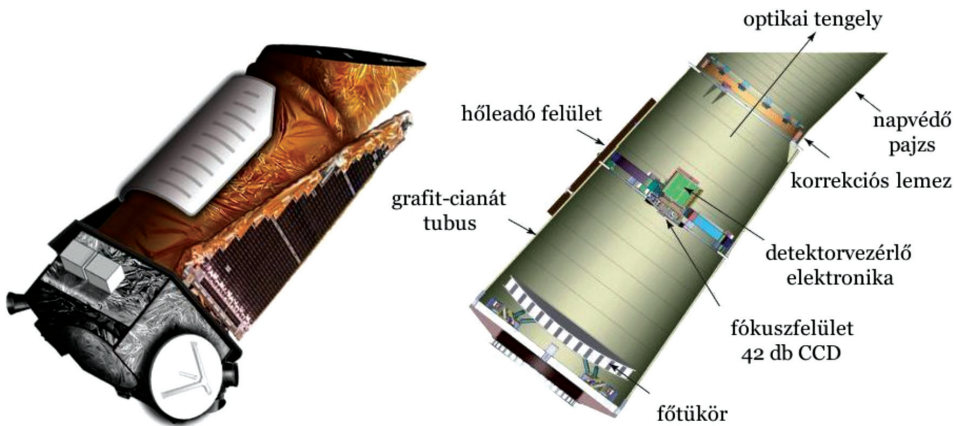
jelenség nem véletlenül játszott kulcsfontosságú szerepet szinte minden történelmi kultúrkör hiedelemvilágában. Aki egyszer látta, soha sem felejt el a totalitás körüli néhány káprázatos perc látványát! Ha valaki elszalasztotta volna a 2017 augusztusában és elmulasztaná 2024 áprilisában az Amerikai Egyesült Államok szárazföldi területeit átszelő árnyéksávot, az már most készülhet a 2026 augusztusában Izlandtól Spanyolországig látható vagy 2027. augusztus elején a Gibraltárt és Észak-Afrika vidékeit érintő jelenség megfigyelésére. Az utóbbi esemény ráadásul 6 perc 23 másodperc hosszúságú lesz, ami nem sokkal marad el a totalitás elméletileg lehetséges leghosszabb időtartamától (7 perc 32 másodperc).

PRECÍZIÓS FÉNYESSÉGMÉRÉS – A MIKROMAGNITÚDÓS FORRADALOM

Minél pontosabban mérjük egy csillag fényességét, annál részletesebb képet kapunk a csillag és a körülötte található térrész viselkedéséről, összetételéről. Ahogy növeljük a pontosságot, láthatóvá válnak a csillag körül keringő bolygók fedései, a csillagon megjelenő, mágneses aktivitást jelző csillagfoltok, és kimutathatók lesznek a csillagokat átjáró, belsejükről információt hordozó nagyon kis amplitúdójú csillagrezgések. Éppen ezt használják ki az ún. úrfotometriai miszsiók, vagyis az űrbe helyezett, kizárólag fényességmérésre használt távcsövek, amelyek a csillagok fényességét monitorozzák lehetőleg megszakítás nélkül.

Az egyik ilyen a NASA Kepler-missziója (3. ábra), amely 2009 és 2013 között működött, és mintegy 200 000 csillag fényességét mérte 1, illetve 30 perces időfelbontással. (A Keplernek az iránytartást lehetetlenné tévő technikai probléma miatt fel kellett függesztenie a megfigyeléseket, a küldetés azonban folytatódik, egy-egy, a Föld keringési síkjában fekvő égterület kb. 80 napig tartó monitorozásával.) A Kepler pontossága lenyűgöző: 10^{-5} – 10^{-6} relatív pontosságra képes (mikromagnitúdó), ami mintegy három nagyságrenddel pontosabb, mint az addig megszokott, földi teleszkópokkal elérhető fotometriai pontosság. Feladata Föld-méretű bolygók keresése Nap-típusú csillagok körül fedési módszerrel, vagyis olyan parányi elhalványodásokra vadászik, amelyeket egy távoli csillag körül keringő bolygó elhaladása okoz a csillag fénylő korongja előtt. A Kepler ebben rendkívül sikeres volt: több mint 4000 bolygójelöltet fedezett fel, ezek közül további mérésekkel e sorok írásáig 2335 planéta létét sikerült megerősíteni. Ez az összes felfedezett exobolygó majdnem pontosan kétharmadát teszi ki!

A fedési módszer a bolygó méretét szolgáltatja a gazdacsillag méretéhez viszonyítva. A távoli csillagok méretének, tömegének és korának meghatározása azonban nem mindig egyszerű feladat. Itt jön képbe a Kepler pontos fényességmérésének másik felhasználása, a csillagok rezgéseinek vizsgálata. A rezgések érzékenyek a csillag belsejében érvényes fizikai kondíciókra – csakúgy, mint a földrengéshullámok a Föld szerkezetére. Ezáltal a Napra kidolgozott szeizmoló-



3. ábra. A Kepler-űrtávcső felépítése (NASA)

giai módszerek távoli csillagokra történő alkalmazásával a Kepler egy új tudományág, a csillagszeizmológia születéséhez járult hozzá.

A Kepler-űrtávcsővön mindent a pontos fényességmérésnek rendeltek alá. Már az ún. Föld-követő, Nap körüli pálya is a minél zavartalanabb megfigyeléseket szolgálja, hiszen a Föld sugárzási övezetei, a Föld megvilágított része feletti elhaladás, az abból adódó hőingadozás mind-mind befolyásolják a méréseket. Leegyszerűsítve: minél több fotont gyűjtünk, annál jobb, hiszen a jel/zaj viszony a begyűjtött fotonok számának négyzetgyökével javul. Ehhez nagyméretű pixeleket alkalmaztak, így a távcső térbeli felbontása rossz, össze sem hasonlítható mondjuk a Hubble-űrtávcsőével. Gyönyörű képek helyett itt gyakorlatilag csak számoszlopokat kapunk. De milyen fontos számoszlopokat! Ezek vizsgálatával derült fény arra, hogy az exobolygók rendkívül gyakoriak: szinte minden csillaghoz tartozik bolygó vagy bolygórendszer! Ez forradalmi áttörés kozmikus környezetünk és az Univerzumban elfoglalt helyünk megértésében.

KÜLÖNLEGES BOLYGÓK ÉS BOLYGÓRENDSZEREK

Érdekes megemlíteni néhányat a legkülönösebb bolygórendszerek közül, amelyeket a Kepler a fedési módszer segítségével fedezett fel. Ne feledjük, hogy a műszer nem tudja felbontani a csillag korongját, pláne nem látja a körülötte keringő bolygókat, „mindössze” egy fénypontról jövő látható fény fluxusát méri.

Az egyik ilyen érdekes planéta a Kepler-1843b jelet kapta (Rappaport et al., 2013). Ez egy forró Jupiter (azaz olyan óriásbolygó, amely nagyon közel kering gazdacsillagához). Még hozzá olyan közel, hogy keringési ideje mindössze 4,24

óra! Vagyis egy év azon a bolygón alig több mint 4 földi óráig tart! A Kepler-444 pedig egy ősi bolygórendszer: kora $11,2 \pm 1,0$ milliárd év, vagyis a Tejútrendszer kialakulása után nem sokkal keletkezett (Campante et al., 2015). Életkora tehát mintegy kétszerese a Naprendszerének, ami kerekítve kb. 4,57 milliárd év. A csillag (és ezzel a bolygórendszer) korát csillagszeizmológiai mérésekből sikerült ilyen pontosan megmérni. A központi égitest kisméretű, vörös törpecsillag, körülötte öt közetbolygó található tíznapos és rövidebb keringési időekkel. A rendszer két fontos dologra világít rá:

- Bolygók már az elsőgenerációs csillagokkal együtt is születtek, holott Napunk az elsőgenerációs csillagok által termelt nehéz elemek által beszenyvezett gázból jött létre, és főként ilyenek körül várnánk bolygórendszereket.
- Létezhetnek olyan helyek az Univerzumban, ahol nagyon hosszú idő áll rendelkezésre a bolygórendszerek háborítatlan fejlődéséhez.

Végül egy kultúrtörténeti jóslat valóra válásának lehetünk tanúi, hiszen az űrtávcső a Kepler-16b esetében megtalálta a *Csillagok háborújában* elhíresült Taotoine bolygó szakasztott mását (Doyle et al., 2011). Ez egy kettőscsillag körül keringő bolygó. A Napunknál valamivel kisebb méretű két csillag 41,08 nap alatt kerüli meg egymást, és közel ugyanebben a síkban mindkét csillagot megkerülve kering egy Szaturnusz méretű planéta 228 napos keringési idővel. Az 1977-es sci-fi jóslat harmincnégy évvel később szinte vernei pontossággal vált valóra, még a filmvászonra vitt csillagszínek is tökéletesen egyeznek a valódiakkal. Korábban nem volt tudomásunk kettőscsillagok körül keringő bolygóról, azóta viszont kiderült, hogy az ilyen rendszerek viszonylag gyakoriak a Tejútrendszerben.

BONTSUK FEL A FÉNYT! – CSILLAGÁSZATI SPEKTROSKÓPIA

Nemcsak a pontos fényességmérés, de a csillagokról jövő fény „kivesézése” is fontos stratégia a csillagászok fegyvertárában. A csillagspektrum ugyanis elárulja a csillag felszínén uralkodó hőmérsékletet, a kémiai összetételt, a mágneses tér nagyságát, de információt hordoz a csillag forgásáról, a felszínén megjelenő foltokról és még egy sor más folyamatról. Így a felszíni gravitációs gyorsulás révén fejlődési állapotukról, a csillag környezetéről, sőt a csillag és köztünk a csillagközi térben található atomok jelenlétéről, és nem utolsósorban bolygókísérő(k) jelenlétéről is tudomást szerezhetünk.

A teljes látható spektrumot lefedő, „kontinuum”-fotonok mellett a legfontosabb szerepet az egyes atomokra jellemző elnyelési (abszorpciós) vagy kibocsátási (emissziós) vonalak játsszák. Ezek megfigyelhető hullámhossza, alakja, felhasadása, mind-mind fontos információt hordoz. A Doppler-effektus például nemcsak a galaxisok általános távolodásának megállapításában játszott szerepet

(vöröseltolódás), de egyfajta „ kozmikus traffipaxként” a csillagok körül keringő bolygók felfedezéséhez is vezetett. A bolygó gravitációs hatása miatt ugyanis a közös tömegközéppont körül keringő csillag periodikus sebességváltozása szabályosan ismétlődő kék- és vöröseltolódást okoz a központi csillag színképében. Ez a sebességváltozás hozzáadódik a csillagok Naprendszerünkhöz képest mérhető tipikusan 10–100 km/s relatív látóirányú (radiális) sebességéhez. A fedési módszer mellett a radiális sebesség módszere szolgáltatta szám szerint a második legtöbb exobolygót.

A radiálissebesség-módszerrel a bolygó tömegére tudunk következtetni (legalábbis egy $\sin i$ faktor erejéig, ahol i a látóirány és a bolygó keringési síkjának normálisa közötti szög. Ha a bolygó fed is, akkor a méret- és tömegadatokból kiszámolható a bolygó átlagsűrűsége, ami sokat elárul az égitest összetételéről (közet-, gáz-, netán óceánbolygó?), anélkül, hogy magát az égitestet „láttuk” volna. A sűrűségadatok nagy változatosságot mutatnak az 1 g/cm³-nél kisebb értékektől (ami gázbolygót jelez) a 10 g/cm³-ig (ez pedig jelentős fémmagot tartalmazó kőzetbolygó lehet). A radiálissebesség-mérések pontossága jelenleg a 10 cm/s értéket ostromolja (ekkor ingadozást okoz keringése során a Föld a Nap radiális sebességére). A nagy pontosságú lézerefésűk alkalmazásától várható, hogy ezt az álomhatárt sikerüljön áttörni.

A spektroszkópia azzal is kecsegtet, hogy a felfedezett exobolygók légköréről sikerül többet megtudnunk. Ehhez a *transzmissziós spektroszkópia* módszerét hívhatjuk segítségül, ami azon az elven alapul, hogy ha a bolygó éppen a csillag korongja előtt tartózkodik, akkor a csillagról jövő fény egy része áthalad a bolygó légkörén, az pedig lenyomatot hagy a spektrumon. A gyakorlatban spektrum készül akkor is, amikor a bolygó nincs fedésben, valamint fedéskor is, és a két spektrum különbségében tapasztalható apró változások lesznek a vizsgálat tárgyai. A parányi eltérésekből például a bolygólégkörben található atomok, molekulák jelenlétére lehet következtetni. Ily módon már több mint egy tucat kémiai összetevőt (például CO₂, CO, H, C, O, Na, H₂O, TiO, VO, CH₄) sikerült kimutatni, jórészt óriásbolygók légkörében a Hubble-űrtávcsővel. A Hubble utódjának szánt, 2020-ban indítandó James Webb-űrteleszkóp a kozmológiai kutatások mellett az exobolygók légkörének vizsgálatában is jeleskedni fog, és remélhetőleg a transzmissziós spektroszkópia a Föld-szerű bolygók légkörének titkaira is rávilágít majd.

NEM LÁTJUK A LÁTHATATLANT

Mielőtt a csillagászati spektroszkópia és fényérés diadalmenetétől megszárdulnánk, érdemes az érem másik oldalára is vetnünk egy pillantást: az Univerzumban létező dolgok nem mindegyike látható. A galaxisokban a csillagok mozgása és a Világegyetem nagy struktúráinak létrejötte ugyanis nem érthető meg jelentős

mennyiségű sötét anyag jelenléte nélkül. Ennek az ismeretlen anyagformának a gravitációs hatását érezzük, de más kölcsönhatását még nem sikerült kimutatni. Azt sem tudjuk, hogy pontosan milyen formában kellene keresnünk. A csillagászati mérések nyomán a nagy tömegű, csillagászati méretű sötét objektumokat (fekete lyukak, neutroncsillagok, barna törpék) kizárhatjuk a jelöltek közül. Minden arra mutat, hogy most már a részecskefizikusokon a sor, hogy megtalálják a gravitációs erőt kifejtő, de minden más kölcsönhatásra rendkívül gyengén reagáló részecskéket. Az Univerzum tömegének mindössze 5%-a látható, barionos anyag (csillagok, galaxisok, csillagközi atomok stb.), 22%-a pedig sötét anyag. A rejtély tovább fokozza, hogy úgy tűnik, az Univerzum tömegének 73%-a sötét energia. Ez még rejtélyesebb szubsztancia, hatását az Univerzum tágulásának gyorsulásában érhetjük tetten (már ha egyáltalán létezik, és nem csak látszólagos hatásról van szó, lásd például Rácz et al., 2017). Habár a sötét anyag és sötét energia közvetlenül nem látható, közvetett hatásaik kutatásában és megértésében a csillagászati teleszkópok mégis domináns szerepet játszanak.

ÖSSZEFOGLALÁS

A csillagászat tudományát nagyon sokáig az emberi szem mint detektor segítségével művelte az emberiség. Ez a tanulmány rámutatott, hogy összességében is az elektromágneses sugárzás szolgáltatta információ által tudunk meg legtöbbet az Univerzumból. Figyelembe kell azonban venni, hogy az emberi szem a spektrumnak csak egy szűk tartományában érzékel. A többi hullámhosszon való „látáshoz” speciális távcsöveket, érzékelőket kell fejleszteni, és ezeket gyakran a légkörön túlra érdemes elhelyezni. Ha valamit nem látunk, az attól még ott lehet, és megbizonyosodhatunk a jelenlétéről, sőt sokszor fizikai tulajdonságaira is következtethetünk. Ennek eklatáns példája az exobolygók kimutatása és az ismereteink robbanásszerű fejlődése ezen a területen, nem kis mértékben a csillagászati fényességmérés forradalmának köszönhetően. Ez az elképesztő haladás nemcsak a bolygók, hanem a csillagok fizikájának jobb megértésében is ugrásszerű előrelépést hozott. A fejlődés nem lankad, a már működő TESS (NASA, start: 2018. április, URL2), CHEOPS (Európai Űrügynökség, 2018, URL3) és az építés alatt levő PLATO (Európai Űrügynökség, 2026, URL4) űrfotometriai missziók ezen a téren is minden bizonnyal további érdekes felfedezésekkel fogják gazdagítani tudásunkat.

Köszönetet mondok a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-115709 számú, valamint a GINOP-2.3.2-15-2016-00003 számú pályázatainak támogatásáért és a Magyar Tudományos Akadémia Lendület programjának (LP2014-17) a témakörben végzett kutatásaimhoz nyújtott segítségével.

IRODALOM

- Abbott, B. P. et al. (2016): Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116, 061102, DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102, <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- Campante, T. et al. (2015): An Ancient Extrasolar System with Five Sub-earth-size Planets. *The Astrophysical Journal*, 799, 2, DOI: 10.1088/0004-637X/799/2/170, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/799/2/170/meta>
- Doyle, L. et al. (2011): Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333, 6049, 1602–1606. DOI: 10.1126/science.1210923, <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/88742>
- Rác G. et al. (2017): *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 469, 1, L1–L5. DOI: 10.1093/mnrasl/slx026, <https://academic.oup.com/mnrasl/article/469/1/L1/2982870>
- Rappaport, S. et al. (2013): The Roche Limit for Close-Orbiting Planets: Minimum Density, Composition Constraints, and Application to the 4.2 hr Planet Koi 1843.03. *The Astrophysical Journal Letters*, 773, 15 DOI: 10.1088/2041-8205/773/1/L15, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/773/1/L15/meta>

URL1: <https://www.eso.org/sci/facilities/elt/>; az ábra: https://www.eso.org/public/images/elt_plane/

URL2: TESS honlap: <https://tess.gsfc.nasa.gov/>

URL3: CHEOPS honlap: <http://cheops.unibe.ch/>

URL4: PLATO honlap: <http://www.oact.inaf.it/plato/PPLC/Home.html>

Tanulmányok

SZANTORINI A KÉSŐ BRONZKORBAN – A „MINÓSZI” KITÖRÉS AZ ÚJABB VULKANOLÓGIAI ÉS ŐSFÖLDRAJZI KUTATÁS TÜKRÉBEN

SANTORINI IN THE LATE BRONZE AGE – THE MINOAN ERUPTION IN THE LIGHT OF RECENT VOLCANOLOGICAL AND PALAEOGEOGRAPHICAL RESEARCH

Karátson Dávid

az MTA doktora, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Természetföldrajzi Tanszék
dkarat@ludens.elte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az égei-tengeri Szantorini (Théra) vulkán-szigete – belsejében látványos kalderaöböllel – évszázadok óta a nemzetközi kutatások homlokterében áll, hiszen a vulkanológia itt összeér a régészettel, a történelemmel. A késő bronzkorban a sziget belsejét a maihoz hasonló, de kisebb kalderaöböl foglalta el, amely egy 22 ezer évvel ezelőtti nagy kitörés (Cape Riva) nyomán képződött. Az öbölben egy, a mai kalderabelseji Kameni-szigetekhez hasonló belső sziget is helyet foglalt („Pre-Kameni”). Ez a sziget – és Szantorini jelentős része – a 3600 éve történt hatalmas, robbanásos, ún. minószai kitörés során megsemmisült. A belső sziget szó szerint felrobbant, de darabjai, törmelékanyaga a minószai tufarétegekben szétszórva megtalálhatók. Tanulmányomban – áttekintve a régészeti, történelmi vonatkozásokat is – a késő bronzkori belső sziget méretének és korának rekonstrukcióját mutatom be, amelyet nemzetközi kutatógárdával végeztünk. Munkánk során fotóstatistikai módszerrel, szemcseelemzéssel, geokémiai analízissel és nagy pontosságú Cassagnol–Gillot–K–Ar-kormeghatározással kimutattuk, hogy a Pre-Kameni-sziget térfogata 2,2–2,5 km³ lehetett, a sziget jellegzetes anyagát adó fekete, üveges andezit kora pedig húszezer év, tehát Pre-Kameni közvetlenül a Cape Riva kitörés után indult növekedésnek. A kor egyúttal átlagos, hosszú távú „szigetépítő” kitörési ráta számítását is lehetővé teszi (0,13–0,14 km³/ezer év); a belső sziget vulkáni aktivitása azonban már lecsendesedhetett a késő bronzkori minószai kultúra felvirágzásának idejére.

ABSTRACT

The volcanic island of Santorini (Thera), which is located in the Aegean Sea and hosts a spectacular caldera bay, has been the focus of international research efforts for centuries, because the area represents one of Earth's unique places where volcanology meets archeology and history. In the Late

Bronze Age, the internal part of the island was already occupied by a caldera bay formed during the Cape Riva eruption 22,000 years ago; it was similar to but smaller than the present-day harbour. Within the caldera bay, there was a central island to be called 'Pre-Kameni' after the current Kameni Islands. 3600 years ago Pre-Kameni – along with other parts of Santorini – was destroyed during the gigantic, explosive 'Minoan' eruption. The central island exploded and was lost but its scattered fragments can be recovered from the Minoan tuffs. In the present study, which briefly considers the main archeological and historical implications as well, the dimensions and age of the Late Bronze Age central island are constrained as a result of an international joint research. Applying a photo-statistical, granulometrical and geochemical analysis and high-precision radiometric dating it was found that Pre-Kameni had a 2.2-2.5 km³ volume, and its characteristic, black glassy andesite, using Cassinot-Gillot K-Ar dating, yielded an age of 20,000 years. Such an age implies that the island had started to grow subsequent to the Cape Riva eruption, which makes it possible to calculate a long-term eruptive rate of 0.13-0.14 km³/kiloyears for Pre-Kameni. However, the island probably was already dormant when the Minoan civilisation spread over Santorini in the Late Bronze Age.

Kulcsszavak: Santorini, vulkanológia, geomorfológia, ösföldrajz, fotostatisztika, digitális domborzatmodell (DEM), késő bronzkor, minószi kultúra, kaldera, cunami

Keywords: Santorini, volcanology, geomorphology, palaeogeography, photostatistics, digital elevation model (DEM), Late Bronze Age, Minoan civilization, caldera, tsunami

Az égei-tengeri Szantorini – a Kükládok legdélebbi tagja – a világ talán leghíresebb vulkán-szigete (*1.a, b ábra*). Már a neve is megkapó, hiszen Szent Irént jelent, amit velencei kalmárok adtak neki a XIII. században. Korábban Strongylének vagy Stroggilinek (Hérodotosz leírásában; jelentése „a kerek”), később a főszigetről – egy föníciai hős nyomán – Therának vagy Thírának hívták. Görögül ma Szantorini és Thíra egyaránt használatos.

A lenyűgöző tájképi szépségű sziget valójában szigetcsoport. A kerekded, belül „lyukas” – tengeröblöt körülölelő –, kifli alakú fősziget (Thíra), két másik kisebb sziget (Thiraszia és a piciny Aszproniszi), valamint ezek gyűrűjén belül a friss lávaáráktól feketéllő, utoljára 1950-ben működött piciny Kameni-szigetek alkotják. Az ívelt fősziget hossza mintegy 23 kilométer, az öböl átmérője tíz; központjában Palea és Nea Kameni pedig mindössze egy-két kilométerre van a parttól.

Szantorini körív mentén elhelyezkedő szigetei úgynevezett *kalderát* formálnak; ez a kifejezés vulkánkitörés során beszakadással keletkező, üst alakú mélyedést jelent. Mint a befelé néző, meredeken leszakadó sziklafalak rétegtani felépítéséből kiolvasható (lásd később), a tűzhányótevékenység ciklusos volt, és kaldera – hatalmas robbanásokkal kísérve – többször is képződött. Utóbbi felfogás az 1980-as években nyert bizonyosságot (Heiken–McCoy, 1984), megcáfolva azt a közkeletű, egyes régészek által ma is hangoztatott nézetet, miszerint a fősziget kifli alakja a bronzkorban, egyetlen nagy vulkán-sziget beszakadásával jött volna létre, ami pusztító cunamit, szökőárat kiváltva a krétai civilizáció pusztulását okozta.



1a ábra. Szantorini légifelvételen északkelet felől

Fotó: Tom Pfeiffer,
www.volcanodiscovery.com/santorini_i49059.



1b ábra. Szantorini űrfelvétele (észak jobb kéz felé)

Fotó: NASA Earth Observatory,
<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=88926> (ISS048-E-72284 w)

ATLANTISZ – SZANTORINI?

E nézet elterjedéséhez részben Platón leírása szolgáltatta az alapot, aki *Timaiosz* című művében és más helyeken is említi a régi időkben elsüllyedt „Atlantiszt” (a név Atlasz istentől ered). Ez úgymond két királyságból, a nagyobbik Mizonból és a kis Elaszonból állt, melyeknek kegyetlen uralmát az istenek megelégtették, és a szigetet óriási földrengésekkel egyetlen nap és éjszaka alatt a tengerbe süllyesztették.

A történészeknek, régészeknek a 20. század közepén ötlött fel a párhuzam a két legendás királyság, illetve Kréta és a tőle 70 kilométerre fekvő Szantorini között, akkor, amikor napvilágra kerültek Szantorini bronzkori nyomai. Ennek előzményeként, még a 19. század vége felé – amikor a szigeten a Szezi-csatorna Társaság (Port Szaíd építéséhez) megkezdte a horzsakő intenzív fejtését – Akrotiri falu közelében a munkások különös tárgyakra bukkantak. Hamar kiderült, hogy itt – a szigeten másutt előforduló ókori leletektől eltérően – késő bronzkori maradványokról van szó. Szpiridon Marinatosz görög régészprofesszor, aki széles látókörű tudósként sokat olvasott az indonéziai Krakatau 1883-as katasztrófájáról és az azt követő, tízezrek életét követelő cunamiról, már az 1930-as években megfogalmazta elméletét (Marinatos, 1939), miszerint a késő bronzkori minózi civilizáció pusztulását a szantorini vulkánkitörés és egy hozzá társuló szökőár okozta. 1967-ben a szigeten komolyabb ásatásokat kezdett, és fokról fokra feltárult a mintegy előre megsejtett, fantasztikus bronzkori település, mely maga is az Akrotiri nevet kapta. Hogy ez valóban egyértelműen a Kréta szigetén virágzott minózi kultúrkörbe tartozott, azt a (máig megfejtetlen) „lineáris A” írás jelenléte,

illetve az előkerült tárgyak és a gyönyörű, színes, életszerű freskók egyező stílusa igazolta. A vulkánkitörést ettől fogva a tudomány csak „minószi” kitörésként tartja számon (Bond–Sparks, 1976; Druitt et al., 1999).

A néhány évtized alatt méltán világhíressé lett bronzkori várost mint látogatóhelyet 2005-ben bezárták, s többéves felújítás, további feltáró munka, bővítés után 2012 óta tekinthető meg ismét (igaz, fele még mindig a föld alatt lehet). A bensőséges hangulatú város romjai viszonylag épek. Gyakran többemeletes, jól megépített házaik szervezett, tagolt, híresebb „testvérehez”, Pompeihez képest szűkebb települést tárnak fel. A pompeivel ugyanakkor vetekedő falfestményei tehetős, művelt lakosságról és színes mindennapokról árulkodnak, nem ritkán luxuscikkek ábrázolásával (fajansz, féldrágakövek, szárított osztriga). A világ számos múzeumában megjelenített, fantasztikus minószi kultúra akrotiri emlékei közül az imahelyiségekben talált, páratlan művészi értékű, egyben igen információgazdag freskókat, a nagy számban megőrződött színes kerámiát, tárolóedényt emelem ki, valamint a város hideg- és melegvíz-vezetékét, ezen belül a szennyvízelvezetést (a történelmi idők legrégebbi vízöblítései illemhelyeivel).

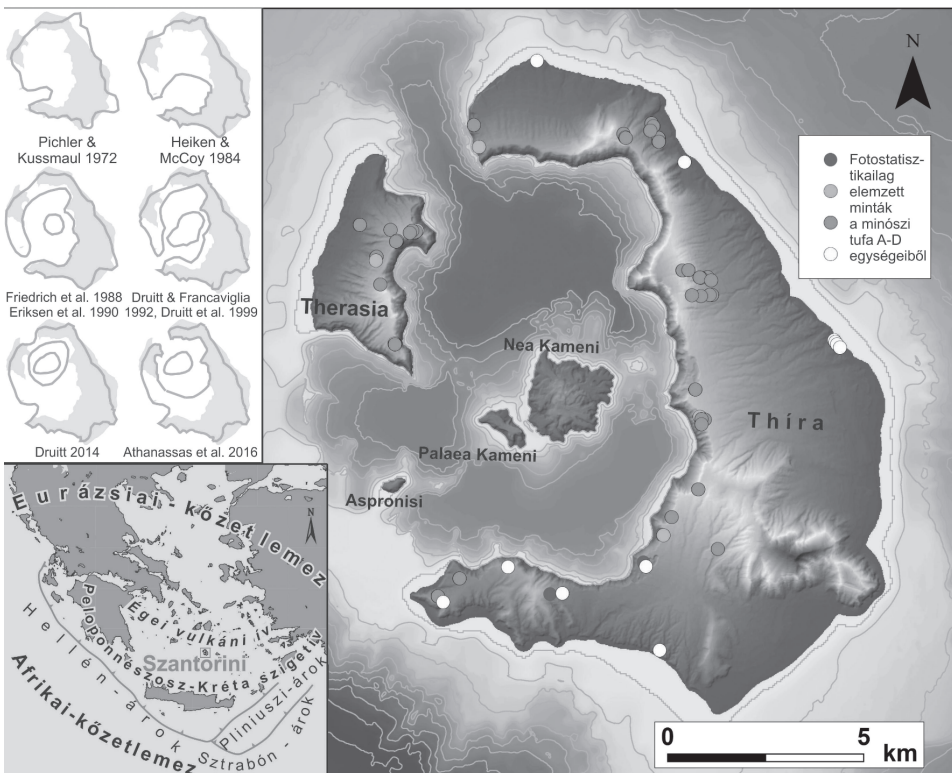
Nem kétséges, hogy Akrotiri valóban a kitörés során pusztult el, hiszen az épületeket több méter vastag „minószi” tufaanyag alól kellett napvilágra hozni. Igaz, hozzáteendő, hogy sem a város környékén, sem Szantorinin máshol egyetlen tetemet, holttestet sem találtak, ami vagy azzal magyarázható, hogy egytől-egyig minden lakos el tudott menekülni – fejlett hajósnépről lévén szó, és mert a kitörésnek voltak előjelei, ez elképzelhető –, vagy vannak tetemek, csak még nem kerültek elő. (Talán a szigetet akár 40–60 méter vastagon befedő tufatörmelék alatt nyugszanak?)

Másfelől az egyre gyűlő radiokarbon kormeghatározások alapján a települést maga alá temető kitörés Kr. e. 1630-1600 körül történt (a dátumot legegységesebben egy, a minószi tufában szerencsésen megtalált olajfatorzsön nyert koradatot bizonyította (Friedrich et al., 2006); azaz legalább másfél évszázaddal korábban, mint Kréta hanyatlása! Kréta nagy részén ráadásul nem sikerült kimutatni a cunami jellegzetes üledékrétegeit (vulkáni hamu, kagylódarabok, cseréptöredékek elegye), egyedül északkeleten, Palaikasztón találtak olyan maradványokat, amelyek alapján ott 9 méter magas áradat lehetett. Így a vulkanológia mai álláspontja az, hogy bár Marinatosznak a kitörés tényét, nagyságát, sőt a cunamit illetően is igaza volt, a minószi kitörés közvetlenül nem tehető felelőssé a magasan, biztonságos helyen települt krétai civilizáció elpusztulásáért. Noha a cunami, valamint Szantorini mint fontos hajózási, kereskedelmi központ megsemmisülése hozzájárulhatott a minószi civilizáció gazdasági meggyengítéséhez, hanyatlását elsősorban történelmi okok: belvillongások, a műkénéi görögök térhódítása (Rehak–Younger, 2001), sőt talán az éghajlat romlása is okozhatta (Tsonis et al., 2010). A minósziak Kr. e. 1200 körül végleg beolvadtak a Krétát elfoglaló görögökbe.

FÉLMILLIÓ ÉVES TŰZHÁNYÓ-TEVÉKENYSÉG

Ha az ember behajózik a vulkán-sziget „kiflijének” belsejébe, a nagy utasszállítókat is fogadó kikötőbe, Athinioszba, a part meredek szikláit zöldesen csillogó, a földtörténeti óidőben keletkezett palás kőzeteket tárnak fel, melyek a sziget alapzatát, magját alkotják. Ezek csak a minószi kalderabeszakadéskor kerültek napvilágra, amikor e helyen csonkig vagy inkább „lábíg” beszakadtak a rájuk települt vulkáni rétegek. A sziget idős kőzetei (palák és mészkövek) alkotják a legnagyobb kiemelkedést, az 567 méter magas, ma katonai objektummal védett, Illés prófétáról elnevezett Profitisz Iliasz hegyet is.

E jóval a tűzhányótevékenység előtt keletkezett kőzetek az Égei-tenger kontinentális földkérgéhez tartoznak, ezek építik fel Szantorini idős részein kívül a Kükládok más mészkőszigetét is (2. ábra). Szantorini vonalától délre viszont már nehezebb óceáni kéreg (illetve kőzetlemez) foglal helyet, amely a kisebb sűrűségű



2. ábra. Szantorini lemeztektonikai helyzete (balra lent), mai domborzata a mintavételi helyekkel (lásd a szövegben, jobbra) és a késő bronzkori ösföldrajz korábbi rekonstrukciókon (halvány színnel a sziget mai kiterjedése, balra fent) (Karátson et al., 2018 alapján)

égei lemez alá, északi irányba tolódik. Ez a folyamat – a szubdukció – a mélyben magmaképződéshez és mészkáli jellegű vulkánossághoz vezet. A lemezütközés és a tűzhányótevékenység évtízmilliók óta tart, ma nagyjából nyugat–keleti irányban húzódik Milosztól Szantorinin át Kosz és Niszirosz szigetéig.

Szantorini vulkántörténete mintegy 600 ezer évre nyúlik vissza. Először a sziget déli, majd északi részén jöttek létre kisebb, főleg lávaöntő vulkáni kúpok. A déli részen ezután kisebb salakkúpok működtek, közülük a legszebb – éppen Akrotiri közelében – a turistalátványosságként is ismert Mavrorachidi, amelyet a tengerpart felőli erózió mára látványosan félbevágott.

360 ezer évvel ezelőtt nagyszabású robbanásos működés vette kezdetét. Napjainkig akár ezerszer is működhetett a szigetvulkán, de ebből csak mintegy száz réteg maradt meg. Mi több, a jelentékenyebb kitörések száma csak tucatnyi, ezeknek az egész szigeten akár több méter vastagságban megőrződött a tufarétege. Közülük is kiemelkedik két hatalmas robbanássorozat, amely a vulkanológiai kutatások szerint egy-egy vulkáni ciklus záróakkordjaként fogható fel (Druitt et al., 1999). Ezek irdatlan erejű, ún. pliniuszi robbanásos kitörések voltak, riolitos-riodácitos összetételű magmából, és mindkettő fehér, távolról is szembeötlő, vastag horzsaköves tufasorozattal képviselteti magát a fősziget említett, befelé néző sziklafalában (3. ábra). E rétegek nagyban segítették a vulkánosság menetének tagolását: a sziget első pontos rétegtanát felállító német Hans Reck az 1930-as években a két szintet „alsó” és „felső” horzsakőegységként („Untere” és „Obere Bimmstein”) különítette el. (Ezeket napjainkra az angol „Lower” és „Upper Pumice” váltotta.) Az újabb kormeghatározások alapján az idősebbik robbanássorozat 170-180 ezer éves, a fiatalabbik pedig a bevezetőben említett minószi kitörés volt Kr. e. 1600 körül.

Az alsó horzsakő kitörése is hatalmas volt, de a minószi kitörés méretei szinte elképzelhetetlenek. Az eredeti magma térfogatát akár hatvan köbkilométerre teszik – ez a Vezúv pompeii kitörésének tíz-tizenötszöröse –, s ennek duplája lehet a magma felhabzása után kirobbant, tufaként lerakódott, a szigeten és a környező tengerben megőrződött (nem pontosan ismert vastagságú) törmelék-tömeg (Johnston et al., 2014). Ilyen hatalmas mennyiségű magma távozásakor természetes, és mind az alsó, mind a felső horzsakő kitörése kapcsán – mint a bevezetőben említettem – bizonyosságot is nyert, hogy a robbanást kalderabeszakadás: az éppen meglévő sziget belső részének eltűnése követte. Ráadásul a két fő kitörés között eltelt időben is legalább még két kalderaképző kitörés rekonstruálható. Utóbbiak közül a második, a minószi megelőző ún. Cape Riva-kitörés 22 ezer éve történt.

Az újabb és újabb kalderaképződések ugyanakkor nem egyformán roncsolták a meglévő sziget morfológiáját. A Cape Riva-kitörés során kialakult, a bronzkorban változatlan formában meglévő kalderaöböl például a mai északi részén lehetett. Erre a szomszédos partokon, Thírán és Thiraszián a minószi tufában



3. ábra. Szantorini belső, meredek sziklafalai jól megőrizték az elmúlt bő 300 ezer év vulkánkitöréseit. A láva- vagy robbanásos kitörések anyaga néha helyileg, máshol az egész szigeten jól követhető rétegeket alkot. A két legnagyobb robbanás a 170-180 ezer éves alsó horzsakövet és a késő bronzkori, 3600 éves felső horzsakövet – ismertebb nevén minószi tufát – hozta létre. Kilátás Athiniosz kikötőjéből; balra fent Fira város házai fehérlelenek.

(A szerző felvétele)

előforduló sztromatolitok (cianobaktériumok által létrehozott, rétegzett üledékes szerkezetek) utalnak, bennük puhatestű, osztrakoda-, foraminifera- stb. vázmaradványokkal (Friedrich et al., 1988), melyek meleg, sekély egykori tengerből jelenlétét bizonyítják.

A két hatalmas pliniuszi aktivitás közötti időszakban bár kevésbé nagyszabású, de igen változatos, a vulkanológiai „iskolapéldákat” szinte hiánytalanul megjelenítő kitörések zajlottak (sztromboli, vulcanói, víz-magma kölcsönhatást mutató freatomagmás kitörések stb.). Mivel a nagyobb kitörések anyaga rendre befedte a korábbiakat, a legutolsó, minószi kitörés termékei a szigeten ma is mindenütt megtalálhatók, és remek kőzetfeltárásokat kínálnak tanulmányozásra. Az idősebb tufarétegek viszont inkább csak a kalderaperem rétegsorában figyelhetők meg. Ezek teszik oly látványossá, színes „csíkossá” a tengerbe szakadó sziklafalakat.

A MINÓSZI KITÖRÉS

Ha a minószi tufa rétegeit pontosabban megismerjük, egyszersmind a késő bronzkori ősföldrajzi viszonyok rekonstruálásához is eljuthatunk. 2010 óta görög, német, angol, francia és magyar kollégákkal – gyakorlatilag mind más-más szakterületről – ebben az irányban kezdtem tevékenykedni, és a nemzetközi kutatómunka mára új eredményeket hozott (Karátson et al., 2018). A következőkben ennek néhány részletére is kitérek.

A partközeli tufabányákban vizsgálódva szembeötlő, hogy a minószi kitörés szoros egymásutánban többféle anyagot rakott le (Bond–Sparks, 1976; Druitt et al., 1999). A vulkán feléledését először kisebb hamuszórás jelezte akár egy-két héten át, majd a fő kitörési szakaszt, amely néhány napon át tarthatott, kisebb robbanások indították. (Egyesek szerint ezek sarkallták a lakosságot az elmenekülésre.) Ezután hatalmas, a sztratoszférába emelkedő kitörési oszlop tört a magasba, melyből viszonylag monoton horzsakőszórás nyomán 3–5 méternyi, konstans vastagságú réteg (A egység) rakódott le. Ez látványos, jól követhető szintet képvisel a kalderaperem falában. A mainál kisebb és sekélyebb késő bronzkori öblöt a rengeteg hamu, horzsakő csakhamar fel is töltötte (Nomikou et al., 2016). Nem sokkal később hirtelen megváltozott a kitörés jellege, mert tengervíz keveredhetett a magmához, aminek következtében heves, örvényő gázáramlások, ún. piroklaszt-torlóárak zúdultak le, és ezekből rétegzett vagy keresztarétegzett, finomabb szemű tufa (B egység) rakódott le. (A finom szemcseméret a magma-víz kölcsönhatás eredménye, ami szétszakítja, „szétporlasztja” a magmát.) Ezt követően a még mindig fennálló kitörési oszlop részben vagy egészben már nem bírta fenntartani saját súlyát, és összeomlott. Ennek következtében horzsakőben, hamuban gazdag, tömeges (még mindig vízhatást tükröző, legfeljebb 300 °C hőmérsékletű) piroklaszt-árak zúdultak le, amelyek üledékét ignimbritnek nevezzük. Eme C egység vastagsága Szantorini egyes helyein akár az 50-60 m-t is eléri; a környező tengerbe is jutott belőle, de már vékonyabb rétegek formájában.

A C egység világos anyaga a fő tömeget adó, friss magmából származó hamu és horzsakő mellett sötét színű törmeléket: mm-estől deciméteresen át akár több méter átmérőjű fekete kőzetblokkokat is tartalmaz (4. ábra). A fekete szemcsék jelenléte a fehér tufabányák anyagának képi hasonlaltal élve „mákostészta” kinézetet kölcsönöz, annál is inkább, mert akár a mákszemek a tésztaiban, a szemcsék is egyenletesen oszlanak el a tufában. E törmelékanyagot a kürtő(k)ből feláramló magma ragadta magával akkor, amikor Szantorini belső része folyamatosan rombolódott, mígnem az utolsó szakaszban – hatalmas robbanások kíséretében – az egész szigetbelső beszakadt, és kialakult a mai kaldera (Druitt, 2014). Paraskevi Nomikou és szerzőtársai (2016) újabb vizsgálatai szerint a létrejövő mélyedés északnyugat felől vízözönszerű tengerbeáramlással töltődött fel, ami a fenéken kanyonszerű csatornát váj ki.



4. ábra. Szantorini belső részének, ezen belül az egykori kalderaöbölben található „Pre-Kameni” szigetnek az anyaga főként a minőszi vulkánkitörés harmadik szakaszában került a tufába. A világos tufaanyagban található sötét szemcsék aránya alapos fotostatisztikai és kőzettani elemzés után következtetni enged az eredeti belső sziget méretére. A fotó bal alsó sarkában geológuskalapács jelzi a méretarányt (bekarikázva). (A szerző felvétele)

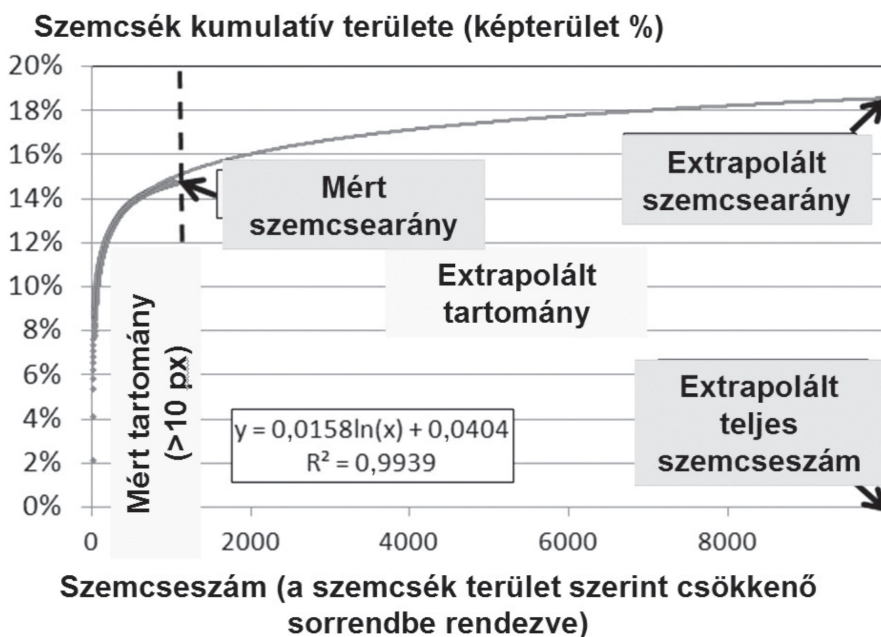
Az ignimbitben lévő felragadott törmelék mennyiségének közvetve öskörnyezeti jelentősége is van. Egyrészt az egykori nagy vulkán-sziget belső részét, másrészt a késő bronzkori kalderaöböl belsejében helyet foglaló – a mai Kameni-szigetekhez morfológiailag igen hasonló – kis szigetet képviseli, térfogatából tehát vissza lehet következtetni az egykori belső sziget méretére. Mielőtt erre az érdekes kérdésre rátérnék, megemlítem, hogy a minőszi kitörés utolsó szakaszában vízhatást már nem mutató, forróbb piroklaszt-árak zúdultak le, melyekből a kürtőtől távolabb, főleg a környező tengerben további ignimbittömegek rakódtak le (D egység) (Sigurdsson et al., 2006).

A KÉSŐ BRONZKORI ŐSFÖLDRAJZI KÉP

Rekonstrukciónk azt célozta, hogy a rendelkezésre álló információk mellett – a maihoz hasonlóan alacsony, viszonylag lapos késő bronzkori sziget(csoport), szélesebb belső tengeröböl – megállapítsuk, mekkora volt a belső sziget, és vajon mióta

létezett (a 22 ezer évvel ezelőtti Cape Riva-kitöréshez képest). A méretet illetően a minósz C és részben D egységben meglévő felragadott törmelék fotostatisztikai, illetve granulometriai (szemcseméret) elemzéséből indultunk ki, amelyhez Thíra és Thiraszia szigetén csaknem nyolcvan kőzetfeltárást vizsgáltunk meg. Mivel a törmelékanyag nemcsak az egykori szigetet, de a felrobbant, illetve beszakadt partvidék anyagát is képviseli, az egyes komponensek elkülönítésére alapos kőzettani-geokémiai elemzésekre is szükség volt. Vizsgálataink szerint a szemcseméret eloszlása a nagyobbaktól a kisebbek felé – logaritmusos összefüggés szerint – az ún. Weibull-eloszlást követi, ami robbanásos vulkánkitörések kapcsán is jól ismert jelenség (Wohletz–Brown, 1995). Ez az összefüggés lehetővé teszi a kisebb, mm-es szemcsék irányába történő extrapolálást is (5. ábra), azonban a legkisebb szemcsék gyakoriságát – a szubmilliméteres tartományban – a törmelékanyag szitálásával, mikroszkópos elemzésével kellett meghatározni.

Mindezek alapján a késő bronzkori, „Pre-Kameninek” nevezett sziget mérete – a mintavételi, statisztikai hibák, a minósz tufa egységeinek tenger alatt kevésbé ismert megoszlása és más bizonytalansági tényezők ellenére – jól behatárolható:



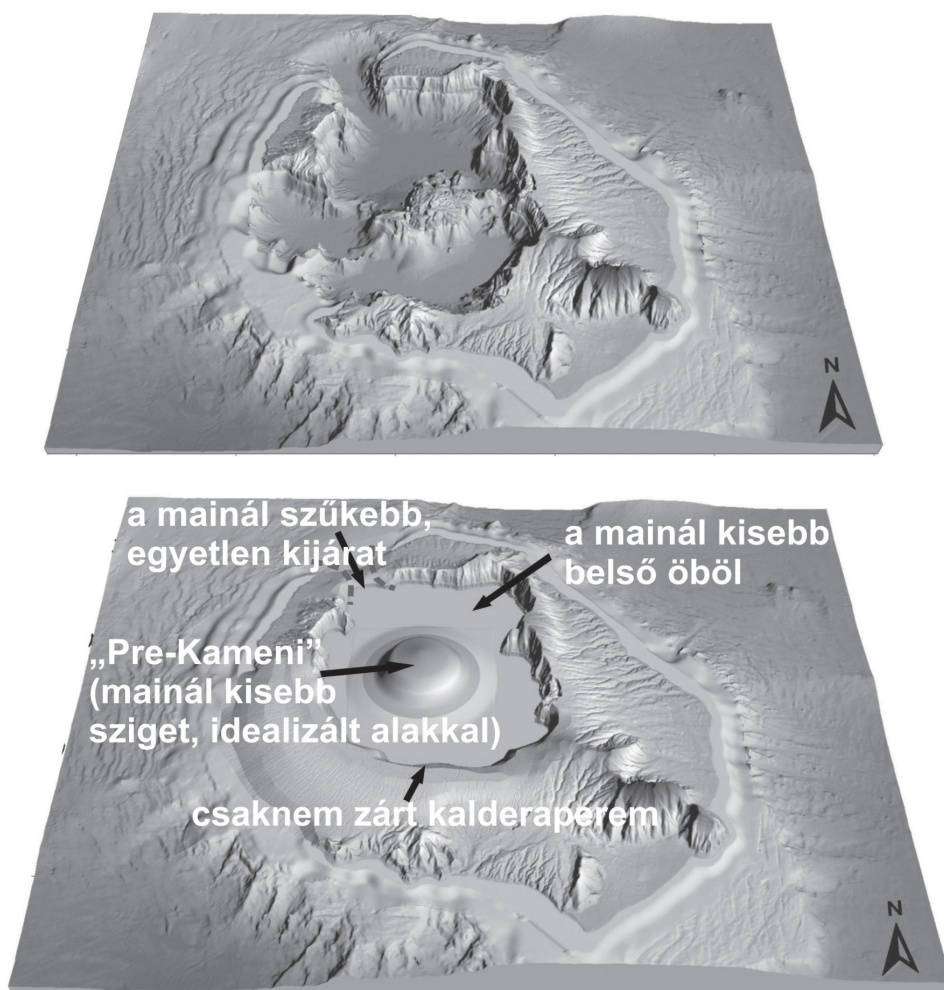
5. ábra. Fotostatisztikai elemzésünk során (melyre az elemzett mintegy nyolcvan kőzetfeltárást közül látható egy példa) a minósz tufában található régebbi törmelék mennyiségét számoltuk ki. Mint látható, a törmelék szemcsék kumulatív területe és a szemcseszám között logaritmusos korreláció figyelhető meg, lehetővé téve a 10 pixelnél kisebb szemcsékre való extrapolációt.

A legkisebb szemcsék arányát szitálással és mikroszkópos elemzéssel határoztuk meg.

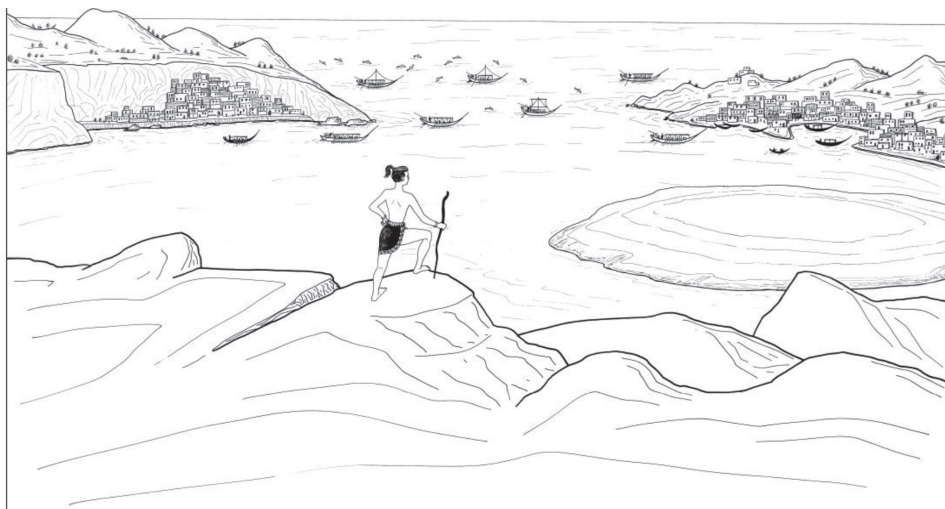
(Karátson et al., 2018 alapján)

2,2–2,5 km³-nek adódik (6. ábra), tehát kisebb volt, mint a mai Kameni-szigetek (3,2 km³). Ennek alapján elmondható, hogy Szantorini késő bronzkori domborzati viszonyait a mainál kisebb tengeröböl és benne kisebb belső sziget jellemezte. A menedéket adó, védett öböl ideális kikötőhely lehetett a minószi civilizáció számára (7. ábra).

Vajon mikortól fogva létezett ez az ősföldrajzi kép? Erre a kérdésre a „mák-szemek” között legnagyobb tömegben jelen lévő, a belső szigetet felépítő fekete,



6. ábra. Szantorini domborzata napjainkban és a késő bronzkorban, digitális domborzati modellen (DEM). A minószi kitöréskor felrobbant „Pre-Kameni” mérete számításunk alapján a mai belső Kameni-szigetek négyötöde volt. (Karátson et al., 2018 alapján)



7. ábra. Szantorini késő bronzkori képe a régész szemével (Strasser, 2010)

üveges andezitblokkok kormeghatározásával kerestünk választ. A néhány ezer vagy néhány tízezer éves – földtani értelemben igen fiatal – kőzetkorok pontos meghatározására kevés módszer ismert. Munkánkban a jól ismert K/Ar radiometrikus módszer nagyobb pontosságú változatát, a Cassagnol–Gillot-kormeghatározást alkalmaztuk az azt kifejlesztő laborban, a Dél-párizsi Egyetemen (Université Paris-Sud, Orsay, GEOPS). (Ez az eljárás az MTA Atommagkutató Intézetében korábban nem került bevezetésre; a közelmúltban viszont egy nagy pontosságú tömegspektrométer beszerzését követően megindultak az első mérések.)

A hagyományos K/Ar-módszerrel szemben a Cassagnol–Gillot-eljárás igen kis mennyiségű (0,1%) radiogén argon (^{40}Ar) detektálására is alkalmas, és megfelelő minta esetén akár néhány ezer, sőt néhány száz éves kőzetre is használható (Gillot et al., 2006). Fontos szempont, hogy a vulkáni kőzetnek a kitöréssel egyidejű alkotóelemén, frakcióján mérjük. A hagyományos K/Ar-módszer alkalmazása során gyakorta vagy a kőzetalkotó ásványokon, vagy a teljes kőzeten (whole rock) mérnek, ami csak közelítő eljárás, mivel az ásványok egy része a kitörést megelőzően is kikristályosodhat, a teljes kőzet kora pedig egyfajta átlagkor. Az ebből adódó hiba idősebb, több millió éves kőzetnél akár el is hanyagolható, fiatalabbnál azonban nyilvánvalóan nem. Épp ezért a GEOPS laborjában a vulkánkitöréskor legutoljára megdermedő alapanyag (groundmass) korának meghatározására törekednek (lásd Quidelleur et al., 2001). Esetünkben az üveges andezit alapanyagán történt, megismételt mérések $20,2 \pm 1,0$ ezer évet adtak, ami egyúttal azt jelenti, hogy Szantorini belső „Pre-Kameni” szigetének kialakulása szinte közvetlenül a korábban említett Cape Riva-kitörés után megkezdődött. Valószínű ugyanakkor,

hogy a sziget, akárcsak a későbbi Kameni-szigetek, amelyek 3600 év óta már jelentős méretűre nőttek, viszonylag korán elérte maximális méretét; más szóval a vulkánosság elcsendesedett, elszunnyadt a késő bronzkorra – hiszen aktív vulkán-szigeten aligha virágzott volna fel a minószi kultúra.

IRODALOM

- Athanasas, C. D. – Bourlés, D. L. – Braucher, R. et al. (2016): Evidence from Cosmic Ray Exposure (CRE) Dating for the Existence of a Pre-Minoan Caldera on Santorini, Greece. *Bulletin of Volcanology*, 78, 35. DOI: 10.1007/s00445-016-1026-3, http://www.academia.edu/27829095/Evidence_from_cosmic_ray_exposure_CRE_dating_for_the_existence_of_a_pre-Minoan_caldera_on_Santorini_Greece
- Bond, A. – Sparks, R. S. J. (1976): The Minoan Eruption of Santorini, Greece. *Journal of the Geological Society, London*, 132, 1–16. DOI: 10.1144/gsjgs.132.1.0001, https://www.researchgate.net/publication/249545625_The_Minoan_eruption_of_Santorini_Greece
- Druitt, T. H. (2014): New Insights into the Initiation and Venting of the Bronze-Age Eruption of Santorini (Greece), from Component Analysis. *Bulletin of Volcanology*, 76, 794. DOI: 10.1007/s00445-014-0794-x
- Druitt, T. H. – Edwards, L. – Mellors, R. et al. (1999): *Santorini Volcano. (Memoir 19)* London: Geological Society
- Friedrich, W. L. – Eriksen, U. – Tauber, H. et al. (1988): Existence of a Water-filled Caldera Prior to the Minoan Eruption of Santorini, Greece. *Naturwissenschaften*, 75, 567–569. DOI: 10.1007/BF00377720, https://www.researchgate.net/publication/226164534_Existence_of_a_water-filled_caldera_prior_to_the_Minoan_eruption_of_Santorini_Greece
- Friedrich, W. L. – Kromer, B. – Friedrich, M. et al. (2006): Santorini Eruption Radiocarbon Dated to 1627–1600 B.C. *Science*, 312, 548. DOI: 10.1126/science.1125087, http://www.academia.edu/4245687/Santorini_Eruption_Radiocarbon_Dated_to_1627-1600_B.C
- Gillot, P.-Y. – Hildenbrand, A. – Lefèvre, J.-C. et al. (2006): The K/Ar Dating Method: Principle, Analytical Techniques, and Application to Holocene Volcanic Eruptions in Southern Italy. *Acta Vulcanologica*, 18, 55–66. DOI: 10.1400/93820, http://www.academia.edu/2036679/THE_K_AR_DATING_METHOD_PRINCIPLE_ANALYTICAL_TECHNIQUES_AND_APPLICATION_TO_HOLOCENE_VOLCANIC_ERUPTIONS_IN_SOUTHERN_ITALY
- Heiken, G. – McCoy, F. (1984): Caldera Development during the Minoan Eruption, Thira, Cyclades, Greece. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8441–8462. DOI: 10.1029/JB089iB10p0844, https://www.researchgate.net/publication/258940120_Caldera_Development_During_the_Minoan_Eruption_Thira_Cyclades_Greece
- Johnston, E. N. – Sparks, R. S. J. – Phillips, J. C. et al. (2014): Revised Estimates for the Volume of the Late Bronze Age Minoan Eruption, Santorini, Greece. *Journal of Geological Society London*, 171, 583–590. DOI: 10.1144/jgs2013-113, https://www.researchgate.net/publication/269709403_Revised_Estimates_for_the_Volume_of_the_Late_Bronze_Age_Minoan_Eruption_Santorini_Greece
- Karátson, D. – Gertisser, R. – Telbisz, T. et al. (2018): Toward the Reconstruction of the Disappeared Late Bronze Age Intra-caldera Island of Santorini, Greece. *Scientific Reports*, 8, 7026. DOI: 10.1038/s41598-018-25301-2 1, <https://www.nature.com/articles/s41598-018-25301-2>
- Marinatos, S. (1939): The Volcanic Destruction of Minoan Crete. *Antiquity*, 13, 339–425. DOI: 10.1017/S0003598X00028088

- Nomikou, P. – Druitt, T. H. – Hübscher, C. et al. (2016): Post-eruptive Flooding of Santorini Caldera and Implications for Tsunami Generation. *Nature Communications*, 7, 13332. DOI: 10.1038/ncomms13332, <https://www.nature.com/articles/ncomms13332>
- Quidelleur, X. – Gillot, P.-Y. – Soler, V. et al. (2001): K/Ar Dating Extended into the Last Millennium: Application to the Youngest Effusive Episode of the Teide Volcano (Spain). *Geophysical Research Letters*, 28, 16, 3067–3070. DOI: 10.1029/2000GL012821, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000GL012821>
- Rehak, P. – Younger, J. (2001): Review of Aegean prehistory VII: Neopalatial, Final Palatial and Post-palatial Crete. In: Cullen, T. (ed.): *Aegean Prehistory: A Review*, 383–473. Archaeological Institute of America, Boston, https://www.jstor.org/stable/pdf/506138.pdf?seq=1#page_scan_tab_contents
- Sigurdsson, H. – Carey, S. – Alexandri, G. et al. (2006): Marine Investigations of Greece’s Santorini Volcanic Field. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 87, 34, 337–348. DOI: 10.1029/2006EO340001, <http://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1011&context=gsofacpubs>
- Strasser, T. F. (2010): Location and Perspective in the Thera Flotilla Fresco. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 23,1, 3–26. DOI: 10.1558/jmea.v23i1.3, <https://art.providence.edu/files/2018/03/strasser-flotilla-fresco.pdf>
- Tsonis, A. A. – Swanson K. L. – Sugihara, G. et al. (2010): Climate Change and the Demise of Minoan Civilization. *Climate of the Past*, 6, 525–530. DOI: 10.5194/cp-6-525-2010, https://www.researchgate.net/publication/46056268_Climate_change_and_the_demise_of_Minoan_civilization
- Wohletz, H. K. – Brown, W. K. (1995): Particulate Size Distributions and Sequential Fragmentation/Transport Theory. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-UR 95-0371.

HOGYAN VEZET EL A TUDÁS LEBECSÜLÉSE AZ OKTATÁS LEBECSÜLÉSÉHEZ

HOW THE DERISION OF KNOWLEDGE LEADS TO THE DERISION OF EDUCATION

Czeglédi Csaba

kandidátus, Eszterházy Károly Egyetem
czegledi.csaba@uni-eszterhazy.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat a tudást veszi védelmébe. Miért szorul a tudás védelemre, amikor sokunk számára triviális igazságnak tűnik, hogy a tudás jó dolog, a tudatlanság pedig rossz dolog? Az ok egyszerű és meglepő: e triviális igazságot egyre többen tagadják. Ennél is meglepőbb, hogy a tudás elleni támadások újabban a tanárképzés világából érkeznek. A dolgozat rámutat az ún. kompetenciaalapú oktatás és tanárképzés néhány alapvető félreértésére, és lerántja a leplet a reflektív gyakorlat nevet viselő elméletellenes tanárképzési doktrínáról. Rámutat arra, hogy e tudásellenes doktrína inkoherens, áltudományos és összeegyeztethetetlen azzal az egyébként koherens eszmerendszerrel, amelyből elméleti indokoltságát sikertelenül kísérli meg levezetni.

ABSTRACT

The paper is written in defense of knowledge. Why does knowledge need to be defended when many of us consider it a truism that knowledge is good and ignorance is bad? The reason is simple and surprising: an increasing number of people deny this truism. Even more surprisingly, knowledge has recently come under attack from within the world of teacher education. The paper identifies some of the fundamental misunderstandings underlying what is called competence-based teaching and teacher education, and exposes the incoherence of an anti-theoretical teacher educational doctrine called reflective practice, demonstrating how it fails in its pseudoscientific attempt to derive theoretical justification from what is otherwise a coherent system of ideas, with which, however, it is inconsistent.

Kulcsszavak: tudás, kompetencia, tanítás, tanárképzés, reflektív gyakorlat

Keywords: knowledge, competence, education, teacher education, reflective practice

NÉPI ISMERETELMÉLET ÉS NÉPI METAPEDAGÓGIA

Alább a tudás védelmére kelek. Közvetve pedig az oktatás, a tanárképzés, a tanárok, végső soron pedig az iskolában tanuló diákok védelmére. Nehéz eldönteni, hogy ha valaki védelmébe veszi a tudást, az azért kínos-e inkább, mert már önmagában értelmetlenség, vagy csupán fölöslegessége okán bírálható, mert a tézis, amelyet védelmébe vesz, triviális igazság. Mindkettőt készséggel vállalom.

A tudás védelmére kelni azért értelmetlenség, mert ez olyan, mintha egy csillagász a Napot, egy biológus pedig a DNS-t magasztalná. Nem teszik, egyrészt mert fel sem merül a kérdés, hogy „jó-e vagy nem”, hogy ez is, az is létezik, és hogy olyan, amilyen, másrészt mert egyiket sem érte támadás vagy bírálat (hiszen az értelmetlenség lett volna). Meglepő módon, más a helyzet a tudással. Azt bírálatok és egyre erőteljesebb támadások érik. Ezek olykor a legváratlannabb irányból érkeznek. Hasonló a helyzet a jövő tanárainak oktatásával. Vannak, akik úgy vélik, hogy a hagyományos egyetemi tanárképzésre egyáltalán nincs is szükség. Fő érvük az, hogy az ott elsajátítható „elméleti tudások” nemigen használhatók a tanítás gyakorlatában, mert a tanításhoz „gyakorlati tudásra” van szüksége a tanárnak (bármit jelentsen is ez).

Azt a triviális igazságot, hogy a tudás önmagában érték, nem kevesen és nem akárcik komolyan kétségbe vonják manapság. Mivel sok forog kockán, hiszen a tanulók tudása és az iskolában eltöltött – években mérhető – idejének a minősége a tét, a triviális tézis védelemre szorul. Valójában ennél is nagyobb a tét, de ezt most tegyük félre.

Azoknak, akik ismerik Pléh Csaba *Hogy vezet el a bölcsészet lenézése a tudás lenezéséhez?* című előadását (Pléh, 2014, 668–672.) – és most már azoknak is, akik nem –, azonnal szembetűnhet a két dolgozat címe közötti hasonlóság. Ez nem a véletlen műve. A tudás mellett kardoskodva azért is hasznos nyilvánvalóvá tennem a kettőnk mondanivalója közötti gondolati rokonságot, mert támaszkodom is rá. Pléh Csabának az alábbi érvelésre nézve leginkább releváns mondanivalója röviden így foglalható össze: a tudás nemcsak önmagában érték, hanem emberi mivoltunk lényegéhez tartozik, mert „az ember természeténél fogva elméletalkotó és elmélettesztelő lény” (Pléh, 2014, 672.). Ezt egyebütt azzal egészíti ki, hogy a tudás öröm (Pléh, 2017).

Mondhatnám, ott folytatom, ahol ő befejezte: az ő konklúziója az én egyik premisszám. Helyes, ha már most megjegyzem, hogy egyik triviális mondanivalóm egyszerűen az, hogy *mindenféle* iskola jól teszi, ha az imént idézett konklúziókat észben és tiszteletben tartja. Magától értődőnek tekintem, hogy az iskolai oktatás – minden szinten, beleértve az egyetemi oktatást – jól teszi, ha számol azzal is, hogy a diákok akkor sem tudnák leállítani folytonos magyarázóelmélet-alkotó és -tesztelő kognitív munkájukat (vagy játékukat), ha akarnák, és azzal is, hogy ebben örömeiket lelik.

Az az iskola, amelyik számol az imént említett körülményekkel, nem tiltja, hanem megengedi a diákjainak, hogy folytassák elméletalkotó játékokat, és nem bünteti, hanem támogatja őket ebben is és abban is, hogy értőn és kritikusan fogadják *mások* magyarázó elméleteit. Az ilyen iskola nemcsak nem veszi zokon, hanem kifejezetten támogatja a diákokat abban is, hogy ne higgyenek el semmit anélkül, hogy jó okuk lenne rá, abból, amit a tankönyvekben (vagy máshol) olvasnak, és a tanáraiktól (vagy másoktól) hallanak. Az ilyen iskola annak megértésében is erősíti és segíti a diákjait, hogy a pusztán tény, hogy egy állítás benne van a tankönyvben vagy elhangzott az órán, nem elég jó ok arra, hogy igaznak tekintsék, és magukévá is tegyék. Az ilyen iskola nemcsak az érvelés, az igazolás, a bizonyítás, a világos és egyértelmű beszéd jelentőségének megértésében, hanem mindezek gyakorlásában is támogatja a diákjait. Az ilyen iskola segíti a diákjait abban, hogy megértsék, és abban is, hogy gyakorolják, hogy miből mi következik és mi nem, illetve hogy mi miből következik és miből nem.

Bár mindez magától értődik, mégis egyre gyakrabban és egyre szembetűnőbben mutatkoznak meg az iskolában és az azt körülvevő világban – amelybe beletartozik az iskolai tanárokat képző intézmények és szakemberek világa is – annak a jelei, hogy az említett trivialisításokat sem észben, sem tiszteletben tartani nem mindenkinek sikerül. Ami az utóbbit illeti, épp ellenkezőleg: respektus helyett egyre hevesebb támadások érik a tudást.

Az nem meglepő, hogy némely diák és sok, a megismerés, a tanulás és a tanítás kérdéseiben tájékozatlan laikus felnőtt gyanakvással és elégedetlenséggel tekint némely hagyományos iskolai tantárgyra – például a fizikára vagy a kémiára –, mert úgy gondolja, hogy annak, amit például a kolloid rendszerek viselkedésével vagy az endoterm oxidációval kapcsolatban elsajátíthat(ott), aligha veszi hasznát a gyakorlatban. Nem meglepő, hogy ilyen haszonelvű megfontolások miatt sokan kétségbe vonják az effélek tanításának indokoltságát is. Az viszont már figyelemre méltó, ha nemcsak a laikusok, hanem a hozzáértők szakmai világából is éri – nemcsak célpontjában, hanem érvelésében is – hasonló támadás a tudást.

Egy laikusnak nem hányjuk a szemére, ha nem tesz lényeges különbséget egy általános vagy középiskola és például egy autósiskola között. Egy autósiskolától indokoltan várjuk el, hogy oktatói ne csupán előadásokat tartsanak a KRESZ szabályairól és a belső égésű motorok működéséről stb., hanem tanítsanak meg bennünket *autót vezetni*. Nem érjük be azzal, hogy mindent megértettünk az autónkat hajtó hőerőgép működéséről, sőt, talán nem is tartunk erre igényt. Elsősorban azt várjuk el, hogy a tanfolyam végeztével *képesek* legyünk *autót vezetni*, és szokásos körülmények között *közlekedni* vele. Azaz azt várjuk el egy autósiskolától, hogy *hasznos, a gyakorlatban alkalmazható tudást* segítsen elsajátítani.

Egy laikust nem hibáztatunk azért az induktív általánosításért, amely ugyanezt várja el bármely egyetemtől is. Az viszont már meglepő, és több figyelmet érdemel, ha a tudományos és oktatási kérdésekben járatos szakemberek és oktatáspo-

litikai döntéshozók szűkebb világában is akad, aki úgy tekint egy kutatóhelyre vagy egyetemre, mint a gyakorlatban hasznosítható tudások létrehozására és tanítására rendeltetett intézményekre. Minél többen csatlakoznak a „Légy nyilvánvalóan hasznos, vagy pusztulj!” jelszó alatt kibontakozó tudomány- és tudásellenes mozgalomhoz, annál nagyobb veszély fenyegeti a tudást, a tudományt és *minden* iskolát is.

Könnyen bezárulhat a tudatlanság ördögi köre. Ha veszélyben a „haszontalan tudományos tudás”, akkor veszélyben az iskola. Ha veszélyben az iskola, akkor veszélyben van mindenféle tudás, a „hasznos gyakorlati tudások” elsajátításának lehetősége is. Ki fogja tanítani a „hasznos tudásokat”, ha nem lesznek olyanok, akik fel vannak vértézve a tudás mibenlétére, a tanulás és megismerés természetére, a racionális gondolkodás szabályaira, korlátaira és buktatóira, a nyelvre, a nyelvi kommunikációra és más efféle hiábavalóságokra vonatkozó haszontalan tudásokkal, amelyek nélkül a tanítás megreked az ösztönös próba-szerencse jellegű társas időtöltés szintjén?

A tudás természetéről való gondolkodást már az is kikényszeríti, ha valaki különbséget kíván tenni az iskolában tanítandó „hasznos tudások” – mára bevett és népszerűbb terminussal „kompetenciák” – és a „mihaszna elméleti” tudások között. Valakinek ezt a haszontalan metapedagógiai tisztázást el kell(ene) végeznie ahhoz, hogy az említett tudásdisztinkció egyrészt egyáltalán értelmes, másrészt védhető is legyen, és végül – egyszersmind legfőképp – ahhoz, hogy egy egész metapedagógiát erre a szembeállításra lehessen alapozni. Később még visszatérünk a szóban forgó fogalmak tisztázatlanságából adódó néhány zavarba ejtő és kockázatos fejleményre.

Ha nincs ismeretelmélet és megismeréstudomány, hogy olyan „haszontalan” kérdésekkel foglalkozzon, hogy „Mi a tudás?”, „Hogyan teszünk szert a tudásainkra?”, „Mikor tekintünk egy vélekedést igaznak?”, „Mi különbözteti meg az áltudományt a valódi tudománytól?”, „Mi egy tudományos elmélet rendeltetése?”, „Hogyan lehet azt megítélni, hogy melyik elmélet jobb, mint a versenytársai?”, „Hogyan jönnek létre és egyáltalán miért a tudományok elméletei?” stb., akkor tisztázatlanok maradnak az oktatás legalapvetőbb kérdései: az emberi megismeréssel, a *tudással* és a *tanulással* kapcsolatos kérdések. Amilyen mértékben tisztázatlanok a tudás és a tanulás alapkérdései, annak megfelelő mértékben tisztázatlanok maradnak a tanítás alapkérdései is, kezdve mindjárt azzal, hogy mi a célja.

Az eddigiek rövid összefoglalásául a következőket mondhatjuk. A tudás köznapifelfogása különbséget tesz hasznos és haszontalan tudások között – bármit jelentsen is a tudás „gyakorlati hasznossága”. Nevezzük a tudás e felfogását népi ismeretelméletnek. A népi ismeretelméletben a *haszontalan tudás az elmélet* szinonimája. Ebből adódóan a népi ismeretelmélet szerint a tudomány maga haszontalan úri huncutság – ha pedig az adófizetők költségén műveli vagy tanítja valaki,

akkor mások pénzének pocskékolása, amit a legjobb volna megakadályozni, esetleg megtiltani, hacsak nincs valamilyen mentségük a tudományok művelőinek és oktatóinak. A nyilvánvaló és egyedüli mentségük az lehet, ha vállalják – vagy legalább azt hazudják –, hogy ők is arra törekszenek, hogy a gyakorlatban hasznosítható tudásokat hozzanak létre s tanítsanak másoknak, és ezt megpróbálják igazolni is. Nevezzük ezt a tudomány népi metaelméletének, más szóval népi tudományelméletnek.

A népi ismeretelmélet pusztán intuitív alapon tesz különbséget hasznos és haszontalan tudás között, hiszen nincs kidolgozott elképzelése sem arról, hogy mi az ún. gyakorlat, sem arról, hogy mi a tudás, sem arról, hogy milyen viszonyban áll a kettő egymással akkor, amikor a tudás „alkalmazható a gyakorlatban”, sem arról, hogy *egyáltalán* mit keres az olyan elméleti megértést megtestesítő tudás minden ember fejében, amelyik csak úgy ott van, minden nyilvánvaló gyakorlati haszon nélkül, sem arról, hogy ez az utóbbi milyen viszonyban van a kompetenciákkal. A kompetencia fogalmával kapcsolatos tisztázatlanságokra még visszatérünk.

Az elméletellenes népi tudásfelfogásból egyenesen adódik az a népi metapedagógiai felfogás, amely szerint mindenféle iskolának, az általános iskolától az egyetemig, ugyanaz az alapvető rendeltetése, mint például egy autósiskoláé: a gyakorlatban alkalmazható hasznos tudásokat kell tanítania.

Ha a népi metapedagógia a népi tudományfelfogást is magáévá teszi, akkor ez egyenesen vezet nemcsak a „hasznos tudások” tanítását előíró doktrínához, hanem a mihaszna elméletek tanításának *tiltásához*, illetve ezek hasznos tudással történő *helyettesítéséhez*. E népi felfogás szerint, az utóbbi alól csak azzal mentheti ki magát egy iskola, egy tantárgy vagy egyetemi szak, ha igazolni tudja, hogy a tanítani kívánt elméletek „a gyakorlatban hasznosíthatók”.

Ezért, ha a népi metapedagógia leszivárog az ún. tantárgy-pedagógiák szintjére, és következetesen érvényt szerez magának, akkor az olyan – a diákok által legkevésbé kedvelt – tantárgyak esetében, mint a fizika és a kémia (Chrappán, 2017) vagy önmaga cáfolatába torkollik, vagy hazugságra kényszerül. Az előbbi azzal a következménnyel járna, hogy az önellentmondás felszámolása érdekében meg kellene szüntetni az említett – és minden hozzájuk hasonló haszontalan elméleti – tantárgy oktatását. Az utóbbi pedig elkerülhetetlenül a diákok lenézésével, egyszersmind az oktatás és az iskola önlejárásával jár együtt. Tapintatosan fogalmazva, alábecsüli a diákok intellektuális képességeit – egyszersmind önmagát és az oktatást járhatja le – az, aki például a newtoni mechanika hasznosságát a háztartásban és a ház körül adódó teendőkre hivatkozva kísérli meg elhíttetni a tanulókkal.

Ehelyett érdemes volna megkockáztatni az őszinteséget. A tudományról mindenki megtudhatná, hogy egyetlen tudósnak sincs – és nem is kell, hogy legyen – sokkal jobb válasza arra a kérdésre, hogy miért törekszik éppen annak a mélyebb

megértésére, amit kutat, annál, amit az anekdota szerint a legendás brit hegy-mászó, George Mallory válaszolt, amikor megkérdezték tőle, hogy miért akar felmászni az Everest csúcsára: „Azért, mert ott van.” Hasonló módon, bátran elárulhatnánk a diákoknak is és az ő szüleiknek is, hogy szerintünk nem azért jó fizikát, kémiát vagy anyanyelvünk nyelvtanát tanulni, mert gyakorlati hasznunk származik belőle, hanem azért, hogy minél jobban *megértsük*, hogy mi folyik a körülöttünk lévő világban meg a saját fejünkben.

A nyelvtudományt mintegy hatvan évvel ezelőtt forradalmasító, idén kilencven-éves Noam Chomsky nem azért tanult nyelvészetet az egyetemen, és nem azért írt több tucatnyi könyvet a nyelv természetéről és szerkezetéről, hogy jobban tudjon és beszéljen az anyanyelvén. Ha azért tanult és írt volna, most roppant csalódott-nak kellene lennie, mert ma sem tud jobban angolul, mint bármelyik unokája.

Az önmagáért való megértést kárhoztató népi tudományfelfogás emberi mivoltunk lényegéhez tartozó kognitív képességeinket kárhozhatja. Ez a szó szerint embertelen felfogás csupán azért nem sodor komoly veszélybe minden mihaszna tudóst és kutatóintézetet, mert szerencsére nem akad épelméjű ember, aki ennek következetesen érvényt kívánna és tudna szerezni. Meglepő, egyszersmind sajnálatos módon ugyanez nem mondható el az oktatás világáról. A tanárképzést, az oktatást és végső soron a *diákokat* veszélyeztető, súlyos félreértéseken alapuló népi metapedagógiai forogatókönyv megvalósulása már elkezdődött (Lawes, 2004).

TUDÁS- ÉS ELMÉLETLENESÉG A TANÁRKÉPZÉS NÉPI METAPEDAGÓGIÁJÁBAN

A tanárképzők körében egyre népszerűbb és egyre hangosabb a népi ismeretel-méletlen és népi tudományfelfogáson alapuló elméletellenes népi metapedagógia, amely szerint mihaszna elméletek tanítására semmi szükség nincs a tanárképzésben, hiszen azok a gyakorlatban nemigen használhatók (Lawes, 2011). A tanárképzés egyik új elméletellenes „reformpedagógiája” azt a népi bölcsességet teszi hozzá ahhoz a naiv tudáskonceptióhoz és tudományfelfogáshoz, amelyen alapul, hogy a – bevett terminussal – tanári kompetenciák elsajátításának leghatékonyabb módja maga a gyakorlat, azaz a tanítás. Erre később még visszatérünk.

Sok múlik azon, hogy ki mit ért ebben a kontextusban (és egyáltalán) „kompetenciákon”. Részben a kompetenciafogalom lehetséges értelmezéseitől függ például, hogy hogyan torkollik a tanárképzés elméletellenes doktrínája menthetetlenül inkoherenciába, vagy pedig – ami ezzel egyenértékű – kiderül róla, hogy védhetetlen dogma.

Bár nem ez a megfelelő hely és alkalom a kompetencia fogalmának kimerítő tisztázására, néhány megjegyzést érdemes tenni ezzel kapcsolatban. Legelőször is azt célszerű konstatálni, hogy a pedagógia kompetenciafogalma tisztázatlan.

Neveléstudományi szakértők között alig van egyetértés abban, hogy mi a fogalom tartalma. Ezért esetleges, hogy a különböző kompetenciaértelmezések közül melyikre épít az a jogszabályként is érvényesített felfogás, amelyik meghatározza, hogy a tanári kompetenciák készletének milyen összetevőkből kell állnia, amely a maga részéről pedig azt szabja meg, hogy a tanárképzésnek milyen oktatási összetevőket kell (vagy nem szükséges, s talán nem is szabad) tartalmaznia.

A félszegen sugalmazott, de nyíltan a magát mégoly gyakorlatorientáltnak nevező tanárképzési metapedagógia által sem vállalt szűken értelmezett kompetenciafogalom – amely szerint a *kompetencia* a (tisztázatlan értelmű) „gyakorlati tudás” szinonimája – nyilvánvalóan az elméleti tudás értékének tagadásába torkollik. Mivel az elméleti tudások relevanciáját a kompetenciaalapú tanárképzési metapedagógia nyíltan nem, csak burkoltan kívánja tagadni, e kellemetlen következmény elleni védekezésül, a „kompetenciaalapú tanárképzési modell” inkább az inkoherens és semmitmondóan tág kompetenciaértelmezést mutatja fel, ami viszont azért nem nyújt védelmet, mert még több kellemetlen következménnyel jár.

Amint arra Nahalka István (2009, 55.) rámutat, a pedagógiában legelterjedtebb, tőle kölcsönözött kifejezéssel „eklektikus” felfogás, amely szerint a kompetencia „képességeknek, ismereteknek és attitűdöknek a rendszere... az égvilágon semmit nem mond” a kompetencia valódi mibenlétéről. Pusztán attól, hogy a tág kompetenciaértelmezést választó tanárképzési koncepció azzal a követeléssel lép fel, hogy az ismeretek, képességek és attitűdök egyetlen „kompetenciának” nevezett rendszert alkotnak, ezek az „összetevők” nem szerveződnek olyan koherens és autonóm rendszerré, amely megkövetelné, hogy saját jogán „kompetencia” néven elismerjük. Az ilyen törekvések nem segítik a kompetencia és a vele rokon fogalmak tisztázását, hanem épp ellenkezőleg: még zavarosabbá teszik azt. Kellő indoklás híján, a tágan értelmezett „kompetencia” megmarad elméleti jelentőség nélküli esetleges deskriptív terminusnak, az általa jelölt koncepció pedig véleménynek, amelyben néhányan akár osztozhatnak is. De nem számít, hányan vallják ugyanazt, mert pusztán az egyetértés nem teszi e felfogást sem koherensebbé, sem indokoltabbá.

Az önkényesen kitágított kompetenciafogalom egyik kellemetlen következményként azt a vállalhatatlan nézetet kényszeríti a magát továbbra is gyakorlatorientáltnak tekintő hiedelemrendszerre, hogy a „gyakorlatban,” a tanítási tevékenység gyakorlása révén nemcsak szűken vett „gyakorlati tudások”, hanem megértésszerű tudások is elsajátíthatók (amelyeket kissé árulkodó és önleplező módon szívesebben nevez ismereteknek, mint akár tudásnak, akár megértésnek). Ez olyan, mintha nehéz bőröndök rendszeres cipelésétől azt várnánk, hogy pusztán az elegendően gyakori kitarató cipekedés révén egyre jobban megértjük a gravitáció természetét; sőt mélyebben, mint ha a gravitáció *létező és hozzáférhető* magyarázó elméletei közül valamelyiket tanulmányoznánk. E felfogás szélsőséges változatára alább még visszatérünk.

Érdemes azt is felidézni, hogy legalább az ismeretelméletben és a megismeréstudományban közhelyszámba megy, hogy a tudás nem a kompetenciának alárendelt fogalom, hanem épp fordítva: a kompetencia a tudás egyik fajtája, amelyet olykor képességnek vagy képesség-tudásnak is neveznek (Forrai, 2014; Pléh, 2017). Az utóbbit legalább Gilbert Ryle (1949) óta szembeállítjuk a deklaratív (tudni AZT, hogy..., angolul *knowing that*) tudással. Az emezzel szembeállított képesség-tudást (tudni, HOGYAN, angolul *knowing how*) másként procedurális tudásnak szoktuk hívni. Mást és másként tudunk, amikor *tudjuk (AZT), hogy* Magyarország fővárosa Budapest, mint amit és ahogy tudunk, amikor *tudjuk, HOGYAN* lehet/kell biciklizni, vagy más szavakkal: amikor *tudunk biciklizni*.

Hasznos lehet még hozzátenni, hogy – legalábbis az erős megismeréstudományi, sőt biológiai elkötelezettségű modern generatív nyelvtudományban létezik a kompetenciának az imént említetteknel szűkebb felfogása is. E felfogás szerint a kompetencia ugyan procedurális természetű tudás, s ezért nyilvánvalóan különbözik a deklaratív tudástól, de nem azonos az olyan *knowing how* típusú képesség-tudással sem, mint a biciklizni tudás, hanem a tudásnak egy harmadik fajtáját képviseli, amelyiket Noam Chomsky (2015) a *knowledge of* kifejezéssel különbözteti meg a másik kettőtől, és ebbe a kategóriába sorolja az ember nyelvtudását, azaz nyelvi kompetenciáját.

A kompetenciafogalom különféle pedagógiai értelmezései között sem igen találunk olyat, amelyik nyilvánvalóan a kompetencia fogalma alá sorolná a magyarázó elméletekben megtestesülő *megértés* típusú tudást (Allwright, 1999). Mivel a tanítás kompetenciaalapú felfogása kizárólag kompetenciák terminusaiban fejezi ki a tanulni és tanítani való tartalmakat, a megértés – nem meglepő módon – szóba sem kerül. Ugyanez érvényes az ebben a szellemben fogant tanárképzésre is, hiszen e felfogás szerint – csupán a következetesség okán is – a tanárképzésnek ugyanennyire kompetenciaalapúnak kell lennie. Lehet, hogy a tanárképzés kompetenciaalapú metapedagógiája szerint a tanároknak nem szükséges megérteniük semmit?

Nem tudni, hogy a *tudás* és a *megértés* csupán figyelmetlenségből nincsenek megemlítve a kompetencia egyébként nyilvánvalóan falánk megfogalmazásában, vagy azért, mert e mögött mégiscsak az a pedagógiai sejtés húzódik meg, hogy nem a tudás a kompetencia egyik válfaja, hanem fordítva, és hogy a megértés nem a kompetencia egyik fajtája, hanem a tudásé. A fejünkben létrehozott magyarázó elméletek sem maguk nem tekintendők kompetenciának, sem nem részei semmilyen kompetenciának, de minden magyarázó elmélet része birtokosa tág értelemben vett *tudásának*.

A deklaratív típusú megértés és a procedurális természetű kompetencia megkülönböztetéséből természetesen nem következik, hogy magyarázó elméleteink és kompetenciáink ne léphetnének egymással interakcióra. Épp ellenkezőleg. Az volna meglepő, ha kompetenciáink teljesen el volnának szigetelve a közelükben könnyen hozzáférhető magyarázó elméletektől az elménkben. Nyelvi kompeten-

ciánk például lépten-nyomon interakcióra lép többé-kevésbé kidolgozott világmodellünkkel. Enélkül értelmezhetetlenek volnának az olyan egyszerű mondataink is, mint például az, hogy „A Föld a Nap körül kering”.

A deklaratív, a világot leképező és magyarázó tudás jelentőségével és látszólag a gyakorlati boldogulásunkra specializálódott procedurális tudásainkhoz fűződő viszonyával kapcsolatban azt fontos még leszögezni, hogy a szóban forgó tudáskonstrukciók kettősség egyrészt emberi mivoltunk lényegéhez tartozik (Pléh, 2017), másrészt a viselkedéseinket közvetlenül lehetővé tevő kompetenciáink működésük közben nem csupán hivatkoznak világmodellünkre, hanem függnek is tőle. Nyelvhasználati viselkedésben például tudnom kell, hol vagyok és kivel beszélek ahhoz, hogy megértsem, s ennek alapján eldöntsem, hogy mit célszerű és helyénvaló mondanom, és mit nem. Fontos ismét hozzátenni, hogy ettől a függőségtől a világmodellem nem válik a nyelvhasználati kompetenciám részévé.

A haszonelvű, az emberi tudás és megismerés alapvető félreértésén alapuló (Pléh, 2017) tanárképzési doktrína egyik fölöttébb zavarba ejtő aspektusa az a tudás- és elméletellenesség, amely laikusoktól nem, de a tanulás és tanítás kérdéseivel hivatásszerűen foglalkozók részéről legalábbis meglepő. Ha maguknak a jövő tanároknak az oktatása az említett súlyos félreértésekből eredő tudásellenességen alapul, az komoly veszélyt jelent az iskolai tanításra, s végső soron a diákok tanulására és tudására.

Ezért nemcsak váratlan, hanem kínos, ha a tudás elleni legveszélyesebb támadások az iskolát közvetlenül övező világból, a tanárképzést megreformálni kívánó törekvések harcosaitól érkeznek (Jay–Johnson, 2002; Jones, J. L.–Jones, K. A., 2013). A veszélyt fokozza, hogy mivel a saját jogán értékes tudás nyílt kétségbe vonásának kínosságával maguk az ostromlók is tisztában vannak – ha máshonnan nem, hát annak belátásából vagy legalább sejtéséből, hogy saját tudásuk jelentős része sem állja ki a maguk szabta hasznosság próbáját –, tudásellenes attitűdjüket igyekeznek leplezni, nyíltan pedig tagadni.

A neveléstudományban nagyon kevesen teszik annyira nyilvánvalóvá, mint például Ollé János (2013, 23.), hogy szerintük az oktatásban „a legfontosabb érték ma már nem az információ vagy a tudás”. Azok, akik ehhez hasonlóan vélekednek a tudásról és az oktatásról, inkább különféle megtévesztő csomagolásba burkolva kísérlik meg elfogadtatni tudásellenes nézeteiket, egyrészt magukkal a tanárokkal, másrészt közvetlenül a tanárképzőkkel s végül, az oktatást körülvevő világban mindazokkal, akiknek több-kevesebb befolyásuk van arra, hogy mi történik egyfelől az iskolában „oktatás-nevelés” címén, másrészt az egyetemeken tanárképzés címén. Az ún. „kompetenciaalapú oktatás” ennek az elméletellenes és „gyakorlatorientált” oktatási doktrínának az egyik változata (vagy fedőneve), amely mára lényegében teljesen a hatalmába kerítette nem csupán az iskolai oktatást, hanem a tanárképzést is, és nemcsak Magyarországon, hanem másutt is (Lawes, 2004).

TUDÁSELLENESSÉG ÁLTUDOMÁNYOS KÖNTÖSBEN

Mégsem a tanítás homályos kompetenciaalapú ideológiája jelenti a legnagyobb veszélyt az iskolai oktatásra és a tanárképzésre. Amikor az oktatás kompetenciaalapú doktrínája a tanítást kompetenciafejlesztésként határozza meg, és ezt szabja egyszersmind az iskolai oktatás feladatául, ha ebben – a bevett, bár meglehetősen önkényes módon – elegendően tágan értelmezi alapvető fogalmát, a kompetenciát, amely nemcsak „gyakorlati készségeket”, hanem „ismereteket” is magába foglal, akkor e felfogás legalább *megengedi* a félszegen ismereteknek nevezett, nem nyilvánvalóan gyakorlati használhatóságot ígérő tudások elsajátításának támogatását az oktatásban.

Arra azért érdemes figyelni, hogy ebben a megengedő tanításfelfogásban nyilvánvaló kiegyensúlyozatlanság rejlik a gyakorlat mércéje szerint „hasznos” kompetenciák és az ugyanezen kritérium szerint nem nyilvánvalóan hasznos ismeretek egymáshoz való viszonyában. Egyszerűen szólva, a kompetenciaalapú tanításfelfogás az előbbieket oktatását *feladatul szabja*, míg az utóbbiak tanítását *megengedi*.

Nem nehéz azt sem észrevenni, hogy ez a megengedés nem feltétel nélküli: az a *feltétele*, hogy az ismeretek legalább többé-kevésbé kimutathatóan *támogassák* a gyakorlati kompetenciák elsajátítását és fejlődését. Ebből nyilvánvalóan az következik, hogy ez a megengedés *nem terjed ki* az öncélú, semmilyen kimutatható gyakorlati haszonnal nem járó elméleti tudás, azaz pusztán az önmagáért való *megértés* elsajátításának támogatására (amely nélkül pedig – emlékeztetőül – a gyakorlati kompetenciák is működésképtelenek).

Nem meglepő, hogy szakmai körökben az elméletellenesség olykor ennél rafináltabb – s ezért veszélyesebb – áltudományos köntösben jelenik meg. Ebben a tudományosság látszatát keltő érveléssel kell megpróbálni rávenni a közönséget arra, hogy utasítsa el a tudást – legfőképp a mihaszna elméleti tudást – mint az iskola és az oktatás számára legfőbb értéket, és ilyen értéként kizárólag a gyakorlati hasznosságot felmutatni képes kompetenciákat ismerje el.

Ennek a haszonelvű tanítási ideológiának a tanárképzésre érvényesített szélsőséges változata az ún. *reflektív gyakorlat* doktrínája, amely nemcsak azt hirdeti, hogy a tanárképzés feladata kizárólag a tanítási gyakorlatban közvetlenül hasznosítható tanári kompetenciák elsajátításának elősegítése, hanem azt is vallja, hogy ezeket a gyakorlati tudásokat nem a mihaszna elméletekről szóló egyetemi előadásokon, hanem a gyakorlatban, valóságos iskolákban végzett tanítási tevékenység során lehet a leghatékonyabban elsajátítani (Jones, J. L.– Jones, K. A., 2013).

A tanárképzés e végletesen gyakorlatorientált és elméletellenes modellje e két feltevésből vezeti le azt a konklúzióját, hogy a gyakorlati tanítási kompetenciák elsajátításának legjobb módja az, ha a tanárjelölt mihamarabb elkezd (megpróbál-

ni) tanítani – lehetőleg az első pillanattól kezdve, bármiféle mihaszna elméletek tanulása *helyett*. E modell legszélsőségesebb – olykor iskolaalapúnak nevezett – változata szerint az egyetemi tanárképzés egyenesen fölösleges, vagy legföljebb az lehet a szerepe, hogy előkészítsen a *gyakorlati reflexióra*, mert a tanárképzés színtere maga az az iskola, amelyben a tanítani tanuló tanár azért tanít, hogy megtanuljon tanítani, s ezért legjobb, ha az egész folyamat *irányítása* is ugyanennek az iskolának a kezében van (Brown et al., 2014).

E reflektív gyakorlatorientált tanárképzési modell zavarba ejtő következményeket jósol magára a tanításra nézve. A gyakorlaton alapuló kompetenciaelsajátítás elkerülhetetlenül azt implicálja, hogy addig, amíg a *teljesen képzetlen* kezdő gyakorló-tanuló tanár gyakorlott tanárrá nem válik, dilettáns módon fog tanítani. Ha ezt a mindenféle szakértelem híján végzett „tanítást” valóságos iskolában, valóságos diákokkal, valóságos tanórákon teszi, annak nyilvánvalóan kínos, sőt káros következményei lehetnek, amelyeket itt most nem szükséges részletezni. Legyen elég annyi, hogy ha a dilettantizmusa nem is okoz minden esetben súlyos károkat, a tanulók iskolában töltött értékes és soha vissza nem térő idejének legalább egy részét akkor is el fogja vesztegetni. Ennél a diákok többet érdemelnek.

Nem minden fogalmi és logikai bukfenc nélkül, a reflektív gyakorlat tanárképzési doktrínája azzal az igénnyel lép fel, hogy felváltsa a hagyományosan elméleti komponenseket is tartalmazó egyetemi tanárképzést, és magát a gyakorlatot tegye meg a tanárképzés elméletévé (Lawes, 2003).

E doktrína egyre növekvő népszerűségét Donald A. Schönnek (1983) a saját munkájára reflektáló gyakorló szakemberről (a mérnökről, az építészről, a menedzserrel, a pszichoterapeutáról és a várostervezőről) írt könyve alapozta meg, elméleti megalapozását pedig a pragmatista John Deweynek (1933) a reflektív gondolkodásról írott könyvében vélik felfedezni.

A reflektív tanár és a reflektív gyakorlat jellemzésének alapjául a *reflektív gondolkodás* fogalma szolgál, amely Dewey meghatározása szerint az „az aktív és kitartó törekvésünk, amely során gondosan ellenőrizzük, hogy hiedelmeink és vélelmezett tudásaink mennyiben igazolhatók, és hogy milyen további következtetések adódnak belőlük” (Dewey, 1933, 9.). Ez nem más, mint a bennünket is magában foglaló világ minél jobb megértésére irányuló azon törekvésünk, amely során ellenőrizhető, azaz igazolható vagy cáfolható hipotéziseket konstruálunk, amelyekből belső konzisztenciájuk révén további ellenőrizhető jóslatok adódnak, amelyek ellenőrzése a maga részéről hozzájárulhat a világ megértését megtestesítő magyarázó elméleteink tökéletesítéséhez.

Ezért, ha valaki Dewey reflektív gondolkodás fogalmából kiindulva próbálja deduktív érvelésben levezetni a reflektív gyakorlat elméletellenes tanárképzési doktrínáját, annak vagy a logikát kell kicseleznie, vagy Dewey gondolatait kell meghamisítania, vagy részben elhallgatnia. Ha valamit *nem lehet* Dewey gyakran

idézett gondolatából levezetni, az éppen az elméletellenesség. Azért nem, mert – tömören összefoglalva – Dewey felfogásában a reflektív gondolkodás nem más, mint hipotézisalkotás, a megkonstruált elméletek tesztelése, igazolása és szükség szerinti módosítása, majd a módosított elméletek újbóli ellenőrzése, és így tovább. Az igazolhatóságtól eltekintve, akár a tudományfilozófus Karl Popper is mondhatta volna.

Dewey (1933, 276.) a tanári szaktudás népszerű félreértéseivel kapcsolatban is világosan fogalmaz: „Sajnos... a [tanári] szaktudást olykor... úgy tekintik, mint a cselekvésben alkalmazandó merev eljárási szabályok készletét”, holott a tanár elméleti, például pszichológiai tudása nem azonos valamiféle „eljárási szabályok” ismeretével, mai szóval, az ún. gyakorlati tanári kompetenciákkal vagy szakmódszertani ismeretekkel. Ugyanígy óva int a látszólag minden gyakorlati haszon nélküli, tőle kölcsönzött kifejezéssel „puszta elmélet” lebecsülésétől is, amikor hangsúlyozza, hogy a tanár „intellektuális felkészültségének... a túlcsoordulásig bőségesnek kell lennie” (uo. 274.), egyebek között azért, mert ahogyan „egy diák különböző tantárgyak tanulója”, ahhoz hasonlóan „egy tanár a diák elméjének a tanulója” (uo. 275.).

Dewey pár fentebb idézett gondolatából is nyilvánvaló, hogy ő megbecsülte a tudást is, a tanítást is, a tanárt is és a tanulót is. Azt is világossá tette, hogy szerinte „a tanulás [nem más, mint] gondolkodni tanulás” (uo. 78.). Ezzel szemben, a metapedagógiai retorika szintjén az ő nézeteire alapozott, de azokkal pontról pontra összeegyeztethetetlen reflektív gyakorlat tudás- és elméletellenes tanárképzési doktrínája lenézi a tudást is, a tanítást is, a tanárt is és a tanulót is. Ami a tanár szakos egyetemistákat illeti, őket meg is kívánja fosztani attól, hogy az egyetemen tanulhassanak gondolkodni.

Összefoglalásul, ha hívei s hatalmi pozícióban lévő érvényesítői szerint a reflektív gyakorlat elméletellenes tanárképzési doktrínájának legszilárdabb elméleti alapját Deweynek a tudásra, a tanulásra, a tanításra és a reflektív gondolkodásra vonatkozó nézetei alkotják, akkor e doktrína megalapozatlan, hiszen minden elemében ellentmond annak az eszmerendszernek, amelytől megalapozottságát várja. Dewey (1933) műve a főcíme szerint is arról szól, hogy „Hogyan gondolkodunk?”; alcíme szerint pedig ezenkívül arról, hogy ez a hipotézisalkotó „reflektív gondolkodásunk hogyan kapcsolódik az oktatás folyamatához”. Dewey gondolkodásra és tanításra vonatkozó mondanivalója nemhogy alkalmazatlan arra, hogy a reflektív gyakorlat elméletellenes tanárképzési doktrínáját megalapozza, hanem akár azt is mondhatnánk, hogy a kívánt célra ennél alkalmazatlanabb forrást nehezen találhatna e magát gyakorlatorientáltnak tekintő doktrína. Igaz, a tanárképzés elméletellenes doktrínáját ellentmondásmentesen semmilyen elmélettel nem lehet megalapozni. Zavarba ejtő, ha a több évezredek hagyomány és józan megfontolás szerint a tudás elmélyítésének és gyarapításának elősegítésére létrehozott iskolát az ott tanító tanárok felkészítését vállaló

tanárképzés kívánja eredeti és ma is érvényes céljától eltántorítani. Az pedig egyenesen kétségbeejtő, ha bárki az elméleti tájékozottságot és megalapozást nyújtó hagyományos egyetemi tanárképzést akár burkoltan, akár nyíltan a dilettantizmust preferálva meg kívánja szüntetni. A reflektív gyakorlat tudásellenes ostroma a legvégén az iskolásokon csattan.

IRODALOM

- Allwright, D. (1999): Am I Now, Have I Ever Been, and Could I Ever Be – A ‘Developer’? *Novelty*, 6, 1, 4–19. <http://ludens.elte.hu/~deal/pages/novelty/htm2/vol61/allwri.htm>
- Brown, T. – Rowley, H. – Smith, K. (2014): Rethinking Research in Teacher Education. *British Journal of Educational Studies*, 62, 3, 281–296. DOI: 10.1080/00071005.2014.955080, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00071005.2014.955080>
- Chomsky, N. (2015): *What Kind of Creatures Are We?* New York: Columbia University Press (magyarul: Miféle teremtmények vagyunk? [ford. Kisantal Tamás] Budapest: Kossuth Kiadó, 2018)
- Chrappán M. (2017): A természettudományi tárgyak helyzete és elfogadottsága a közoktatásban. *Magyar Tudomány*, 11, 1352–1368. DOI: 10.1556/2065.178.2017.11.3, https://mersz.hu/hivatkozas/matud_40#matud_40
- Dewey, J. (1933): *How We Think: A Restatement of the Relation of Reflective Thinking to the Educative Process*. Boston: DC Heath and Company, <https://archive.org/details/howwethink-restat00dewerich>
- Forrai G. (2014): *Kortárs nézetek a tudásról*. Budapest: L’Harmattan Kiadó
- Jay, J. K. – Johnson, K. L. (2002): Capturing Complexity: A Typology of Reflective Practice for Teacher Education. *Teaching and Teacher Education*, 18, 73–85. DOI: 10.1016/S0742-051X(01)00051-8, <https://bit.ly/2tlYMEb>
- Jones, J. L. – Jones, K. A. (2013): Teaching Reflective Practice: Implementation in the Teacher-Education Setting. *The Teacher Educator*, 48, 73–85. DOI: 10.1080/08878730.2012.740153, <https://bit.ly/2JXqZbu>
- Lawes, S. (2003): What, When, How and Why? Theory and Foreign Language Teaching. *Language Learning Journal*, 28, 22–28. DOI: 10.1080/09571730385200171
- Lawes, S. (2004): The End of Theory? A Comparative Study of the Decline of Educational Theory and Professional Knowledge in Modern Foreign Languages Teacher Education in England and France. PhD diss. London: Institute of Education, University of London, <http://discovery.ucl.ac.uk/10007418/>
- Lawes, S. (2011): Who Will Defend Teacher Education? In: *In Defence of Teacher Education*, SCETT, 24–25. http://www.scett.org.uk/media/3583/in_defence_of__teacher_education__scett_march_2011.pdf
- Nahalka I. (2009): A tanulás tudománya. *Pedagógusképzés*, 2–3, 37–59. https://issuu.com/heju/docs/_2009_2-3_
- Ollé J. (2013): Pedagógiai kultúra az információs társadalomban. In: Ollé J. – Papp-Danka A. – Lévai D. et al. (szerk.): *Oktatásinformatikai módszerek. Tanítás és tanulás az információs társadalomban*. Budapest: ELTE Eötvös Kiadó, 9–29. http://www.eltereader.hu/media/2013/11/Olle2_akt-inform_READER.pdf

- Pléh Cs. (2014): Hogy vezet el a bölcsészet lenézése a tudás lenezéséhez? *Magyar Tudomány*, 6, 668–672. <http://www.matud.iif.hu/2014/06/06.htm>
- Pléh Cs. (2017): Tudásfajták a kognitív kutatásban, az iskolában és a köznapokban. *Magyar Tudomány*, 178, 11, 1387–1398. DOI: 10.1556/2065.178.2017.11.6, https://mersz.hu/hivatkozas/matud_43#matud_43
- Ryle, G. (1949): *The Concept of Mind*. London: Hutchinson (magyarul: A szellem fogalma [ford. Altrichter F.]. Budapest: Osiris Kiadó, 1999)
- Schön, D. A. (1983): *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. New York: Basic Books

Tematikus összeállítás

BIOENERGETIKA – HELYZETKÉP ÉS KIHÍVÁSOK

BIOENERGETICS – STATE OF AFFAIRS AND CHALLENGES

VENDEGSZERKESZTŐK: ÁDÁM JÓZSEF, DINYA LÁSZLÓ

BEVEZETŐ

INTRODUCTION

Ádám József¹, Dinya László²

¹ az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottság (KÖTEB) „Energetika és Környezet” Albizottságának elnöke
jadam@epito.bme.hu

² a mezőgazdasági tudomány kandidátusa, egyetemi tanár
Eszterházy Károly Egyetem Gyöngyösi Károly Róbert Campus, Gyöngyös
ldinya@freemail.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottság (KÖTEB) „Energetika és Környezet” Albizottsága időről időre áttekinti a megújuló energiaforrások hasznosításának hazai helyzetét. A trendek ismeretében javaslatokat fogalmaz meg a tudományos és szakmai közösség, valamint a döntéshozók számára, hogy milyen szempontokra és prioritásokra célszerű hangsúlyt helyezni a következő időszakban ezen a területen. Ezúttal a bioenergetika kapcsán foglalmazták meg a felkért szakértők az álláspontjukat, amelyek a kérdéskör fontosabb aspektusait érintették. Többek között felhívták a figyelmet a flexibilis beruházási és fejlesztési projektek fontosságára, amely lehetővé teszi a gyorsuló technológiai fejlődéshez történő alkalmazkodást. Egyidejűleg meghatározták a bioenergetikán belül azokat a nyitott kérdéseket, amelyekre célszerű fókuszálni a közeljövőben a kutatások során.

ABSTRACT

The “Energy and Environment” Subcommittee of the Presidential Committee on Environmental Science at Hungarian Academy of Sciences looks at the domestic situation of utilizing renewable energy sources from time to time. In the light of trends it sets out proposals for the scientific and professional community and decision-makers on what aspects and priorities should

be emphasized in the next period in this area. This time the experts were asked to present their positions on bioenergetics, which concerned the most important aspects of the issue. Among other things, attention was drawn to the importance of flexible investment and development projects that allow adaptation to accelerated technological development. At the same time, open issues within bioenergy were identified, which should be focused in the near future during the research activities.

Kulcsszavak: MTA „Energetika és Környezet” Albizottság, megújuló energiaforrások, bioenergetika, rugalmas projektek, biomassza

Keywords: “Energy and Environment” Subcommittee of the Hungarian Academy of Sciences, renewable energy sources, bioenergetics, flexible projects, biomass

Az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottság (KÖTEB) „Energetika és Környezet” Albizottsága feladatul tűzte ki, hogy áttekinti a különböző megújuló energiafajták hasznosításának hazai és nemzetközi helyzetét, környezeti vonatkozásait és jövőbeli kilátásait. Így a vízenergia és a napenergia után (*Magyar Tudomány* 2014/7. és 2017/5. száma) a bioenergetika került sorra. A témakör átfogó bemutatása és alapos megvitatása céljából albizottságunk az MTA Műszaki Tudományok Osztályának Energetikai Tudományos Bizottságával közösen, az MTA Agrártudományok Osztályával és a Gazdaság- és Jogtudományok Osztályával együttműködésben tudományos előadóülést szervezett az MTA Székházában. A 2017. április 6-án tartott rendezvény célja a bioenergetika hazai és nemzetközi helyzetének, továbbá távlati kilátásainak áttekintése, a teljes témakör mélyebb megismerése és megvitatása, valamint a lehetséges fejlesztési irányzatok bemutatása volt. Ehhez a témakör hozzáférő és művelő szakembereit, szakértőit kértük fel, akik készséggel és örömmel vállalták a szükséges munkát. Az előadóülés programját gondos előkészítő munkával alakítottuk ki, amelyben a felkért előadóink is segítségünkre voltak. Az egyeztető megbeszélés keretében azt is elhatároztuk, hogy a témakör iránt mutatkozó növekvő érdeklődés és fontossága miatt az elhangzott előadások írásos változatát a *Magyar Tudomány* folyóiratban cikkgyűjtemény keretében jelentetjük meg, amelyeket (az elhangzásuk sorrendjében) az alábbiakban adjuk közre: 1. *Biomassza-alapú energiahasznosítás: a múlt és a jövő* (Dinya László, Eszterházy Károly Egyetem Gyöngyösi Károly Róbert Campus); 2. *Megújuló energiaforrások, különös tekintettel a bioüzemanyag-gyártásra: nemzetközi kitekintés* (Popp József és Bai Attila, Debreceni Egyetem Gazdálkodástudományi Intézet); 3. *Bioenergetikai technológiai trendek* (Marosvölgyi Béla, Soproni Egyetem Kooperációs Kutatási Központ Nonprofit Kft.); 4. *A biomassza energetikai hasznosításának ökológiai lábnyoma* (Szlávik János, Eszterházy Károly Egyetem Gazdaságtudományi Intézet és *Sebestyénné Szép Tekla*, Miskolci Egyetem Világ- és Re-

gionális Gazdaságtan Intézet); 5. *Bioenergetika társadalmi, gazdasági és környezeti kontextusban* (Némethy Sándor, Eszterházy Károly Egyetem Gyöngyösi Károly Róbert Campus).

A vonatkozó szakirodalom szerint (például Büki–Lovas, 2010; Dinya, 2010; Gööz, 2007; Juhász et al., 2010; Láng, 2008; Lovas, 2012) Magyarországon a legnagyobb arányban hasznosított megújuló energiaforrás a biomassza, ezen belül is főleg a tűzifa. Az előző évtizedben hazánkban is nagy lendülettel megindult és ígéretesnek tűnt bioenergetikai fejlesztések üteme lassult, ezért tartottuk indokoltnak tudományos ankét keretében az ágazat helyzetének áttekintését és fejlődési, fejlesztési lehetőségeinek felmérését.

A helyzetképet jelenleg már inkább biztatónak tekinthetjük, amelyet néhány példával erősítünk meg. A biomassza felhasználását a Mátrai Erőmű 2004-ben kezdte el, és az erőmű biomassza-feldolgozási és beszállítási kapacitása 2014/2015 folyamán megközelítette az évi egymillió tonnát. Ennek eredményeként tüzelőanyag-szükségletének akár 25%-át is képes fedezni az erőmű (Orosz, 2015). A biomassza hasznosítása területén említésre méltó a 2013 novemberében átadott pécsi szalmatüzelésű biomassza-erőmű teljesítménye is. Pécs ezzel teljes egészében megújuló forrásból képes biztosítani a távhőellátáshoz szükséges energiát (Dubniczky, 2015). Balatonszabadi határán 1600 kW teljesítményű biogázerőmű épül, amely 2017 őszétől istállótrágyából és növényi eredetű melléktermékekből 2500 háztartás éves villamosenergia-szükségletét állítja elő. Tájékozódásunk szerint a Soproni Egyetemen jelentős támogatással végeznek kutatásokat a fás biomassza-alapanyag termesztési feltételeinek kutatására, és ez javíthatja a biomassza-alapanyag termesztésének hatékonyságát, elősegítheti a nyersanyag gazdaságos és környezetbarát felhasználását.

Magyarország számára a jövőben is nagy lehetőséget rejtő, tiszta és megújuló energiaforrás a biomassza, alapanyagának termesztéséhez a hazai természeti adottságaink is kedvezőek. Úgy véljük, hogy a bioenergetika hatékonyabb hasznosítását segítené elő az ankéton megfogalmazott és a jelenlévők által elfogadott állásfoglalásban foglaltak figyelembevétel. Az ajánlás a különböző szintű döntéshozók figyelmét az alábbi prioritásokra hívja fel:

- Tekintettel a gyorsuló technikai fejlődésre és társadalmi-gazdasági változásokra, csak olyan fejlesztési döntések támogathatók a bioenergetika és általában az energetika terén, amelyek lehetővé teszik a változásokhoz történő rugalmas alkalmazkodást, kiemelkedő innovációs és hozzáadott értékük van, valamint hozzájárulnak a hazai/térségi decentralizált önellátáshoz.
- Létre kell hozni az MTA KÖTEB égisze alatt egy bioenergetikai stratégiai elemző munkacsoportot, amely korszerű, komplex megközelítésben folyamatosan feltérképezi, szintetizálja a bioenergetika területén a globális és hazai tapasztalatokat, trendeket, és szakpolitikai prioritásokat fogalmaz meg az ágazat jövőbeni kezelésére.

- A munkacsoport keretében ki kell dolgozni a bioenergetikai projektek értékelésére egy soktényezős projektminősítési rendszert, amely a hazai körülményekhez és a globális trendekhez illeszkedve az energetikai fejlesztésekre fordított erőforrások optimális hasznosítását szolgálja a lokális „jó gyakorlatok” preferálása révén.
- Reális megközelítésben a biomassza energiacélú hasznosítása jól beilleszthető a korszerű energiagazdálkodás rendszerébe, és a jövőben is fontos kiegészítő szerepe lesz a fenntartható gazdaság megvalósításában.

IRODALOM

- Büki G. – Lovas R. (szerk.) (2010): *Megújuló energiák hasznosítása. Köztisztviselői Stratégiai Programok*. Budapest: MTA, <http://old.mta.hu/data/HIREK/energia/energia.pdf>
- Dinya L. (2010): Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás. *Magyar Tudomány*, 171, 8, 912–925. <http://www.matud.iif.hu/2010/08/05.htm>
- Dubniczky M. (2015): A zöld energiamix – Vállalások, adottságok és lehetőségek. *Mérnök Újság*, XXII, 6, 13–14.
- Gööz L. (2007): *Energetika jövőidőben. Magyarország megújuló energiaforrásai. Lehetőség és valóság*. Nyíregyháza: Bessenyei György Könyvkiadó
- Juhász Á. – Láng I. – Blaskovics Gy. et al. (2010): *Megújuló energiák*. Budapest: Sprinter Kiadó
- Láng I. (2008): Megújuló energiaforrások: pro és kontra. Nap-, szél-, geotermikus, bioenergia – környezet és gazdaságosság. In: Szentgyörgyi Zsuzsa (szerk.): *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. Budapest: MTA, 191–198.
- Lovas R. (szerk.) (2012): *Áttekintés Magyarország energiastratégiájáról. (MTA Köztisztviselői Stratégiai Programok)* Budapest: MTA, http://old.mta.hu/data/cikk/13/1/23/cikk_130123/Energia_javitott.pdf
- Orosz Z. (2015): Biomassza és naperőmű – A Mátrai Erőmű Zrt. megújulóenergiaforrás-felhasználása a villamosenergia-termelésben. *Mérnök Újság*, XXII, 6, 18–19.

BIOMASSZA-ALAPÚ ENERGIAHASZNOSÍTÁS: A MÚLT ÉS A JÖVŐ

BIOMASS-BASED ENERGY UTILIZATION: PAST AND FUTURE

Dinya László

a mezőgazdasági tudomány kandidátusa, egyetemi tanár, Eszterházy Károly Egyetem Gyöngyösi Károly Róbert Campus
ldinya@freemail.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A gyorsuló technikai fejlődés, a negyedik ipari forradalom és a digitalizáció („Internet of Things”), valamint a növekvő globális fenntarthatósági kihívások korában az energiagazdálkodás is radikális átalakulás előtt áll. A bioenergetikai ágazatot mindez és emellett még számos további gazdasági-környezeti kihívás is hangsúlyosan érinti. Az egymással is összefonódó trendeket rendszerbe foglaltuk, és ennek alapján megfogalmaztunk számos javaslatot, amelyeket célszerűnek látunk érvényesíteni az eddiginél jóval megalapozottabb beruházási, fejlesztési és támogatási döntések érdekében a bioenergetika területén. Felhívtuk a figyelmet a szakmai szempontokat előtérbe helyező, tágabb rendszerbe illeszkedő, hosszú távú és termékpályákban gondolkodó döntéshozatal fontosságára a helyi és országos szintű döntések során egyaránt. Rámutatunk arra, hogy a biomassza energetikai hasznosítása a jövőben is fontos része lesz az energiamixnek, de a vezető szerep más megújuló forrásokra vár.

ABSTRACT

In the era of accelerating technical developments, the Fourth Industrial Revolution and digitalization (Internet of Things), and in the face of growing global sustainability challenges the energy management is also undergoing radical transformation. The bioenergy sector is all the more affected by these and many other economic and environmental challenges. We included the systemized interlinked trends, and on this basis we have formulated a number of proposals that we consider to be valid for the well-founded investment, development, what support decisions in the field of bioenergy. We have drawn the attention to the importance of more professional, long-term and product-oriented decision-making fitted into a broader system both at local and national level. We have pointed out that the energy utilization of biomass will continue to be an important part of the energy mix in the future, but the leadership role is going to other renewable sources.

Kulcsszavak: bioenergetika, fenntarthatóság, energiagazdálkodás, komplex megközelítés, prioritások

Keywords: bioenergetics, sustainability, energy management, complex approach, priorities

ÁTRENDEZŐDŐ PRIORITÁSOK

Az előző évtizedben Magyarországon (is) nagy lendülettel megindult, ígéretesnek tűnt bioenergetikai fejlesztések megtorpantak, ezért a formálódó új ágazat helyzetét és főként a jövőjét számos, korábban figyelmen kívül hagyott tényező miatt célszerű újra áttekinteni. Miközben az energiakérdés továbbra is a globális prioritások élén áll, alapvetően új körülményeket jelent viszont számos változás, amelyek közül a legfontosabbak a következők:

- a legtöbb ágazatot (így a bioenergetikát is) új pályára terelő GPT (General Purpose Technology, általános célú, azaz több ágazatot érintő technológiai) jellegű innovációk gyorsuló ütemben történő megjelenése és bevezetése (például az új technológiák radikálisan csökkentik a megújuló beruházási költségeit);
- a technológiák korábbi hatékonyságát nagyságrenddel megnövelő intelligens (smart) alkalmazások és a helyi energiaforrásokat preferáló decentralizált hálózatok terjedése;
- ezekkel is összefüggésben a megújuló energia kapcsán történő beruházások között a nap- és szélenergia dominánssá válása és a bioenergetikai beruházások stagnálása, relatív visszaesése;
- mindezzel válaszként az EU újabb törekvése a 2020-ig szóló, korábban rögzített bioenergetikai célkitűzések (ún. „3 × 20%”) revidálására, azaz csökkentésére;
- az agrobiznisz szektor fokozatos átalakulása bioökonómiává (a biomassza maximális hozzáadott értékű termékekké transzformálása);
- a különféle (készülő) globális szabadkereskedelmi megállapodások, illetve az EU-s támogatási rendszer várható átalakulása 2020 után, amelyek radikálisan megváltoztatják az európai és a hazai agrárium (és valamennyi ágazat) működési feltételeit;
- a nyitott innovációs rendszerek és a vállalati ökoszisztémák (háromas, négyes, ötös spirál elven alapuló innovációs hálózatok) feltűnése, amelyekben elválaszthatatlanul összefonódnak az üzleti, a civil és a K+F+I-szférák szereplői a bioenergetikai szektorban is;
- az externális (társadalmi és ökológiai) tényezők fokozatos beépülése az üzleti modellekbe, a különböző szintű (globális, nemzeti, térségi, lokális) fejlesztéspolitikai koncepciókba, döntésekbe, és ennek nyomán a fenntarthatósági paradigmaváltás gyorsulása.

Miután hazánk biomassza-potenciálja a jövőben is az egyik legjelentősebb természeti erőforrásunk marad, ennek fenntartható és optimális hasznosítása a megváltozott feltételek és lehetőségek figyelembevételével alapvetően újszerű, a korábbinál jóval komplexebb megközelítést igényel. A hazai bioenergetikai

ágazat fejlesztésének összhangban kell lennie a globális és makroszintű trendekkel, és eközben illeszkednie kell a differenciált lokális (térségi és települési) feltételekhez is. Stratégiai kitekintéssel újra fel kell értékelni a hazai biomassza-potenciált (megkülönböztetve az elméleti, konverziós, technikai, gazdasági és fenntartható potenciált, lásd Dinya, 2010), annak jövőbeni alakulását, a gazdasági, társadalmi és környezeti szempontból perspektivikus bioenergetikai technológiákat és termékpályákat (újonnan kidolgozandó, a hazai viszonyokhoz is illeszkedő, komplex kritériumrendszer alapján auditálható módon). Ennek alapján újra kell gondolni a támogatási és szaktanácsadási rendszer át- (illetve ki)alakítását is. Egyidejűleg fel kell készülnünk a helyi energiaforrásokat integráló európai energiahálózat várható megvalósulására (ESSG – European Super Smart Grid, azaz Európai Intelligens Szuperhálózat), amelyben hazánk esetében egyik fontos helyi energiaforrásként éppen a biomasszával kalkulálnak. A biomassza energetikai hasznosításának helyzetét mindenesetre találóan jellemzi egy nagy és viszonylag friss nemzetközi jelentés mottója: „A biomassza valószínűleg a legellentmondásosabb és a legkevésbé megértett megújuló energiaforrás” (Paulos, 2017).

Az biztos, hogy a kérdéshez az eddigitől jelentősen eltérő, integrált és komplex szemléletben kell közelíteni, és minden kapcsolódó (technológiai, szervezési, üzleti, társadalmi, szabályozási) terület innovatív megoldásokat igényel. Ehhez szükség van a részben már meglévő globális és makroszintű bioenergetikai tudásbázisunk folyamatos továbbfejlesztésén túl a bioenergetikai vertikum (termékpályák) fenntartható energiagazdálkodásba illesztését célzó, átfogó kutatási feladatok folyamatos végzésére is.

HAZAI HELYZETKÉP

Célul tűztük ki a lehetséges jövőbeni scenáriók felmérését, valamint ezek alapján az észszerű hazai fejlesztési irányelvek megfogalmazását. Nem volt célunk ugyanakkor vitázni „alternatív tényekkel”, jól ismert közhelyekre pazarolni korlátozott időnket, a rációt emócióval pótolni, „hitvitákba” bonyolódni, illetőleg szakpolitikai helyett politikai szempontokat követni...

Kiindulópontnak vettük (József Attilát idézve), hogy „a törvény a tiszta beszéd”, ezért összefoglaljuk, mintegy dióhéjban, hogyan tekintünk (kellene tekintenünk) a biomassza energetikai hasznosítására:

1. Bár hazánk biomassza-potenciálja relatíve (az ország méretéhez képest) jelentős, az sokféle módon és erősen „korlátozott”, többek korábbi nézetével szemben nem vagyunk biomassza-nagyhatalom.
2. A biomasszából nyert energiát sokan „zöldenergiának” becézik, de látnunk kell, hogy nem minden „zöld”, ami „bio” – az igen változatos bioenergetikai

- technológiák jelentős része életciklus-elemzés alapján korántsem környezetbarát.
3. A biomassza kifejezetten energiacélú előállítását nem gondoljuk preferálni, ellenben a biomassza előállításakor (és általában az emberi tevékenység során) keletkező melléktermékek energetikai hasznosítását feltétlenül. Mindig van melléktermék, ami környezetvédelmi, gazdasági és energetikai szempontból egyáltalán nem mellékes.
 4. A biomassza (mint nyersanyag) energetikai célú felhasználása komoly ráfordítások nélkül nem lehetséges, ezért a nap- és szélenergiától eltérően inkább tekintendő megújítható, mint megújuló energiaforrásnak.
 5. Józan számítások és az egyre világosabban kirajzolódó energetikai trendek alapján egyértelmű, hogy akár hazai, akár globális szinten a biomasszából nyert energia sosem elégítheti ki teljes mértékben az energiaigényt. De belátható távon fontos kiegészítő szerepe lesz, amit nem kiaknázni „több mint bűn – ez hiba” lenne.
 6. Egyik ilyen előnye a többi megújuló energiaforrással szemben a „puffer”-szerep: tárolható és adagolható, így szabályozhatóbb az energiakinyerés.
 7. Szemben a többi megújuló energiaforrással a biomassza mint nyersanyag számtalan formában rendelkezésre áll, de ez esetben a változatosság nem gyönyörködtet, mert bonyolultabbá teszi a technológiákat. Ez nem válik előnyére.
 8. Ugyanakkor a biomassza széles körű „pozitív externáliák” lehetőségével is párosul: munkahelyteremtés, helyi gazdaságfejlesztés, környezetvédelem stb. Ezeket be kell építeni a projektek üzleti modelljeibe, illetve figyelembe kell venni a támogatási rendszer kialakításánál is.
 9. A biomasszát, szemben a többi megújulóval, igen bonyolult érdekviszonyok övezik: alternatív hasznosítási módok, verseny a termőföldért, komplex termékpálya – mindez sok szereplőt integrál, azok összehangolása pedig állandó kontrollt és igen rugalmas rendszert igényel.
 10. A biomasszát övező kudarcstórik nagy száma arra utal, hogy a sikeres projektekhez szükséges döntéshozói hozzáértést semelyik szinten sem helyettesítheti a bulvárszintű és hézagos tájékozottság. Különösen nem a parciális érdekek mentén hozott döntések.

A fentieket összefoglalva nyugodtan kijelenthető, hogy a biomassza másként megújuló, mint a megújulónak nevezett többi energiaforrás.

GLOBÁLIS HELYZETKÉP

Amennyiben hazánk nem óhajt szembenemenni a globális energetikai trendekkel (minden észszerűség emellett szól), akkor számolni kell a következő tendenciákkal, amelyek a legfrissebb és nagyszámú nemzetközi forrás összevetéséből rajzolódnak ki hosszabb (de belátható) időtávon (Schiffer et al., 2016; International Energy Agency, 2016).

- A következő hús évben (kb. 2035-ig) a globális reál GDP megduplázódik, a globális népesség 8,8 milliárd főre nő (a jelenleginél 1,5 milliárddal több), és kb. kétmilliárd ember kiemelkedik a szegénységből. Bár az energiahatékonyság is jelentősen növekszik, de az energiaigény összességében 30%-kal nagyobb lesz.
- A teljes energiaigényt ebben a távlatban előreláthatólag kb. 30%-ban lesznek képesek fedezni a megújulók (nap-, szél-, geotermális, víz- és bioenergia, egyéb), illetve 70%-ban a fosszilis energiaforrások (kőolaj, földgáz, szén, nukleáris, egyéb). Ebből következően az energetikai beruházások legnagyobb hányada várhatóan a nem fosszilis új kapacitásokat célozza meg (kb. 7%/év növekedési ütem).
- Az energiaigény növekedése jelentős mértékben az elektromos energiát érinti (automatizálás, digitalizáció) – ennek részaránya a fogyasztásban a jelenlegi 42%-ról kb. 55%-ra nő.

A legfrissebb EU-felmérés (Pelkmans, 2016) ezekből is levezethető megállapításokat tartalmaz a bioenergetikai ágazat fejlődését akadályozó tényezők kapcsán:

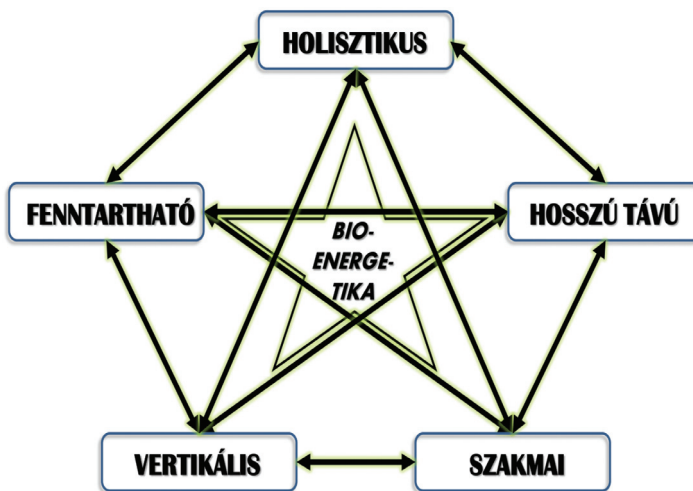
- a közvélemény/média/politikai döntéshozók elégtelen ismerete, tudása;
- a biomassza rossz imázsa a bioüzemanyagok számos kudarcstoriája miatt;
- tagállamonként eltérő fenntarthatósági követelmények a bioenergetikai technológiákkal szemben;
- tagállamonként eltérő fenntarthatósági politikák az agrárium és az erdőgazdálkodás terén;
- a fosszilis energiahordozók kapcsán hiányzó fenntarthatósági követelmények egyenlőtlen esélyű versenypályát jelentenek a megújuló energiák számára;
- a gyakran módosuló fenntarthatósági kritériumok kiszámíthatatlanná teszik a bioenergetikai ágazatot a szereplők számára;
- a biomassza alternatív (nem energia célú) hasznosítására nem vonatkoznak fenntarthatósági követelmények;
- kiépítetlen a szállítási (logisztikai) infrastruktúra.

Ennek megfelelően a következő energiapolitikai prioritásokat fogalmazzák meg a biomassza vonatkozásában (fontossági sorrendben):

- (1) Szigorú monitoringgal párosuló erdőgazdálkodás megvalósítása az erdészeti biomassza felhasználásában.
- (2) Szoros együttműködés és a jól fenntartható gyakorlatok cseréje a biomasszát kibocsátó főbb régiók között.
- (3) EU-szinten összehangolt fenntarthatósági követelményrendszer bevezetése a biomassza szilárd és gázalapú energetikai hasznosításában.
- (4) Nemzetközi szinten összehangolt műszaki normák bevezetése a bioenergetikai technológiák engedélyezésénél és alkalmazásánál.
- (5) Minden biomassza-alapú energiahordozó ellátása egyedi azonosítóval, amely igazolja, hogy legális eredetű és a fenntarthatóságnak megfelelő.
- (6) Fenntarthatósági vagy egyéb externális kockázatot jelentő alapanyagok kizárása a támogatott körből.
- (7) Jelentős ösztönzők bevezetése a preferált jó gyakorlatokat képviselő technológiák alkalmazásánál, és ezek körének egyértelmű, EU-szintű meghatározása.
- (8) Hatékony és az értéklánc minden elemére kiterjedő monitoringrendszerrel biztosítani a rögzített elvek érvényesítését legkésőbb 2020-ig.

A MEGALAPOZOTT DÖNTÉSEKHEZ FONTOS RENDSZERKAPCSOLATOK FIGYELEMBEVÉTELE

A bioenergetikai ágazat jövőjével kapcsolatos makroszintű, illetőleg a bioenergetikai projektek megalapozását célzó mikroszintű döntéseknél számos összefüggés, illetve megközelítési szempont mérlegelése célszerű (1. ábra).



1. ábra. A bioenergetika tágabb kontextusba illesztve (saját szerkesztés)

Tömören megfogalmazva úgy véljük, hogy a racionális bioenergetikai döntésekhez ennek az öt kritériumcsomagnak az egyidejű teljesülése szükséges. A kapcsolódó mottók sarkítva (és plasztikusan) kívánják illusztrálni a lényegüket, vagy indokolni a fontosságukat. Részletesebben az alábbiakban fejtjük ki a kritériumokat.

Holisztikus szemlélet

„Világunkat olyan döntéshozók uralják, akiknek az agya még az atomkor előtt megszilárdult.” (Szent-Györgyi Albert, 1986)

Ennek keretében a főbb szempontok:

- Meg kell valósítani a *multifaktoros értékelést*, anélkül racionális támogatási rendszer vagy projekt a jövőben elképzelhetetlen. Több nemzetközi elemzés szintéziséből az tűnik ki, hogy a hét faktor (szempont) szerint értékelt különféle energetikai fejlesztési projektek rangsorának élén a szél- és a napenergia, harmadik helyen a bioenergetikai beruházás áll, míg a nukleáris projekt az utolsó (*1. táblázat*).
- A fejlesztési projektek klasszikus üzleti modelljeinek át kell adniuk a helyüket az ún. *intelligens modelleknek*, amelyek alapja az IT (információs technológiák) és az intelligens eszközök mindent átfogó, hálózatba kapcsolt alkalmazása.

1. táblázat. Multifaktoros összehasonlító értékelés fontossága

Értékelési szempont (1–5)	Nukleáris	Földgáz	Szén	Szél	Nap	Víz	Árapály	Hullám	Biomassza	Geotermia
Gazdaságilag életképes	1	5	4	5	4	4	2	1	4	2
Alacsony negatív externáliák	4	2	1	5	5	3	4	4	3	5
Sok helyen telepíthető	2	4	4	5	5	3	3	3	4	3
Rugalmas üzemmód	1	5	2	5	5	4	4	4	5	4
Gyors építés	1	4	2	5	5	2	4	4	4	2
Megbízható és kiszámítható	5	5	5	4	4	5	4	3	4	5
Alacsony kockázat	1	3	1	5	5	3	4	4	4	5
Összesített	15	28	19	34	33	24	25	23	28	26

- Mindezzel összefüggésben csak olyan innovációk lesznek versenyképesek, amelyek nemcsak a tradicionális műszaki megoldásokra (tech-innovációk), de az *egész termékpályát átölelő innovációkra* – tehát szervezési, szervezeti, üzleti, piaci, szabályozási stb. innovációkra – is fókuszálnak (non-tech innovációk). Alapvetően ez utóbbiakon múlik a versenyképesség, mert a technikai megoldások önmagukban még kevesek.
- Sőt a projektek kapcsán figyelmet kell fordítani a hightech (világszínvonalú) innovációk mellett a *low-tech* (helyi feltételekhez illeszkedő) innovációkra is. Gyakori eset, hogy a hightech innováció az egyik helyen működik, a másikon csődöt mond – például kvalifikált munkaerő hiánya vagy infrastrukturális, intézményrendszerbeli problémák miatt.

Fenntarthatósági prioritás

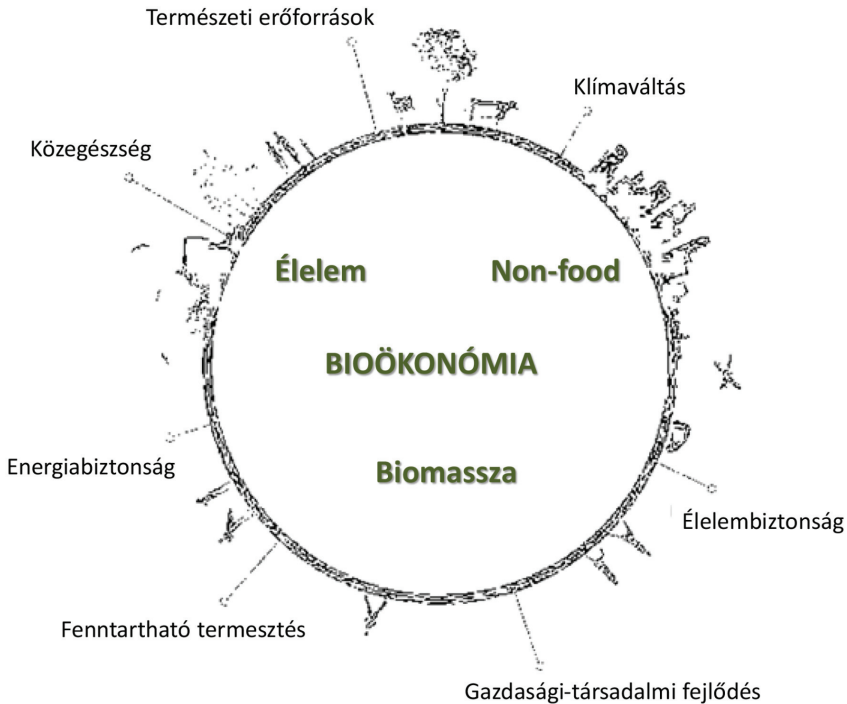
„Környezeti, gazdasági és társadalmi indikátoraink egyértelműen azt üzenik, hogy jelenlegi működési modellünk fenntarthatatlan.” (Ban Ki Mun, 2016)

Ennek előtérbe kerülését az alábbi főbb szempontok indokolják:

- Harmonizálniuk kell a *gazdasági, társadalmi és ökológiai követelményeknek*, ami felelős és tájékozott szereplőket (döntéshozókat és megvalósítókat) feltételez.
- Internalizálni kell az *externáliákat az üzleti modellekbe*, ami röviden annyit jelent, hogy a projekteket LCA alapon (Life Cycle Analysis, azaz teljes életciklusukra vetítve) kell minősíteni. Ennek összegzése a projekt egyfajta ökológiai lábnyoma, amely magában foglalja a környezeti terhelés minden formáját, beleértve az energiamérleget is. Például ezen az alapon az elektromos gépkocsi csak akkor kedvezőbb a fosszilis energiahordozóval működőnél, ha az áramot megújuló (és nem fosszilis) energiaforrással állítjuk elő.
- A bioenergetikai döntéseket az egyre határozottabban körvonalazódó *új, komplex ágazat, a bioökonómia* (a biomassza előállításához, feldolgozásához és hasznosításához kapcsolódó valamennyi termelő és szolgáltató tevékenység) keretébe kell illeszteni. Ezen túlmenően pedig a rendelkezésre álló biomassza maximális hozzáadott értékű hasznosítása, valamint a „zéró hulladék” elv megvalósítása mellett a 2. ábrán látható nemzetstratégiai prioritások teljesülése is minősítési szempontként szolgál.

Hosszú távú kitekintés

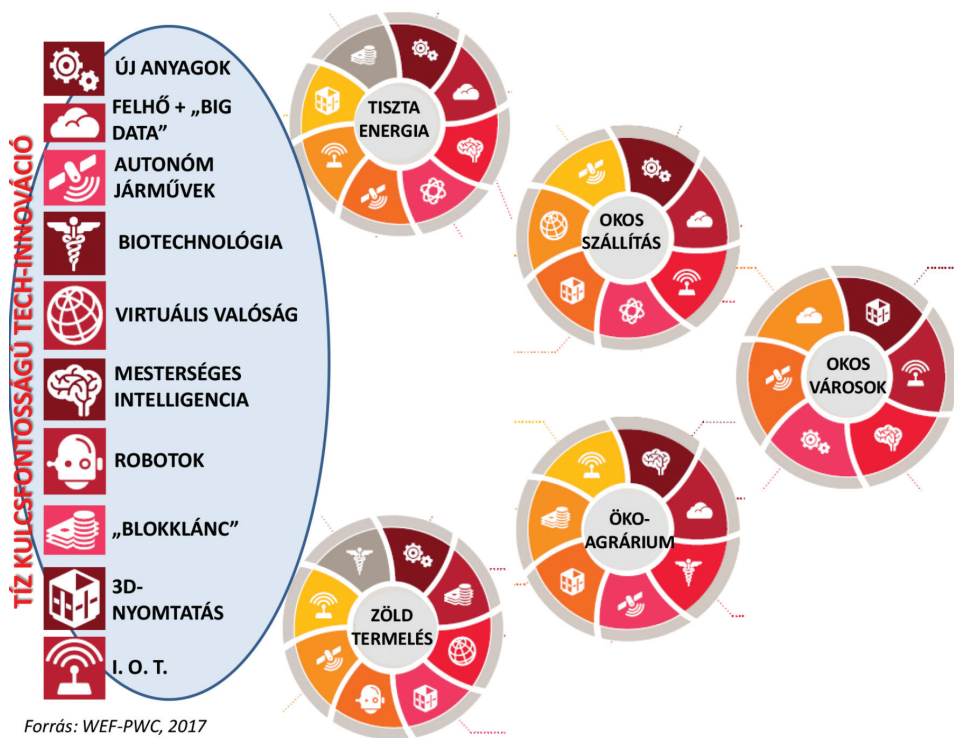
„Sokan vagyunk rá képesek, hogy felfogjuk az innováció rendkívüli fontosságát. Ez az egyetlen épeszű stratégia, hogy túléljük gyalázatosan működő gazdaságunkat.” (Gary Hamel, 2013)



2. ábra. A bioenergetika a bioökonómia alágazata (saját szerkesztés)

Bármennyire kockázatosnak látszik, a bioenergetikai (és értelemszerűen általában az energetikai fejlesztési, beruházási) döntéseknél nem mellőzhetők a flexibilis alkalmazkodás szempontjai (az ún. kontingenciatervezés). Kritériumok:

- Exponenciálisan gyorsuló a technológiai fejlődés a megújuló energiaforrások területén, mert a magas profit reményében hatalmas tökemennyiség áramlik az ágazatba (főként a nap- és a szélenergiával kapcsolatos fejlesztésekbe). Ez belátható távon a korábban vártnál jóval jelentősebb mértékben csökkenti a fosszilis energiaforrások arányát az energiamixben. A bioenergiának ebben a versenyben kell megtalálnia a helyét.
- Nemcsak a technológiai fejlődés, de a társadalmi, gazdasági és a szabályozási változások is gyorsulnak, irányuk eredője pedig az általános és globális „zöldülés”, amely alkalmazkodásra kényszeríti a bioenergetikai ágazat szereplőit is.
- Különösen jelentős változás a gazdaság és a társadalom digitalizációja (4.0 ipari forradalom), amelynek kapcsán újra napirendre kerülnek azok a törekvések, amelyek európai szinten integrálni kívánják az osztott (decentralizált) energiahálózatot, lásd a Super Smart Grid (SSG, szuper intelligens hálózat) megvalósítását. Ebben az integrálás (összehangolás) csak egyik elem a sok



3. ábra. A 4.0 ipari forradalom átformálja a bioenergetikát is (saját szerkesztés)

közül. Amint a 3. ábra mutatja, tíz olyan kulcsfontosságú innováció összefonódása várható, amely alapjaiban formálná át az energetikai (egyben a gazdasági-társadalmi) paradigmát. (Az I. O. T. jelentése: Internet of Things, azaz [hálózatba kapcsolt, okos] eszközök internete.)

- Ebben a „szép új világban” minden olyan jelentős volumenű *energetikai projekt*, amely hosszú távon kényszerpályát képezhet (lehetetlenné teszi a rugalmas alkalmazkodási, váltási lehetőségeket) *komoly stratégiai fenyegetés* mind makro-, mind mikroszinten. Ez érvényes a bioenergetikai beruházásokra éppúgy, mint az atomenergiára.

Vertikális szinkron

„A globalizáció korában mindenki a globális társadalom tagja, csak fogalmunk nincs, hogy ezt hogyan kellene működtetni.” (Ruchir Shama, 2015)

A bioenergetikai termékpályák (alapanyag előállítása, begyűjtése, logisztika, feldolgozás, energetikai hasznosítás, melléktermék kezelése, hasznosítása, ener-

giarendszer, szállítás, fogyasztás) kialakítása, a sokféle szereplő ún. vertikális összehangolása a termékpálya mentén sokkal bonyolultabb, mint az egyszerű megújulóknál (nap- és szélenergia). A kudarcstorik többnyire ebből fakadnak. Fő kérdések:

- A vertikális összhangot *mikro- (lokális), makro- és EU- (globális) szinten is* meg kell teremteni, mert „aki kimarad, az lemarad”.
- Éppen a lokális feltételek sokszínűsége miatt a sokáig üdvöztetőnek tekintett „best practice” (legjobb gyakorlat) megoldással sokra nem megyünk – innovatív módon ki kell alakítani a helyi szinten legjobb, azaz a *helyi „jó gyakorlatokat”* (good practices). Ami nem azt jelenti, hogy a legjobb gyakorlatot nem kell ismerni, csak az adaptáció nem mellőzhető.
- A realitások talaján állva kell tisztázni az adott helyen *ténylegesen rendelkezésre álló biomassza-potenciált*.

2. táblázat. A hazai biomassza-potenciál eltérő megközelítései

Bioenergetikai potenciál fajtája	Nagysága (PJ / év; %)
Elméleti bioenergetikai potenciál	1100 PJ/év = 100%
Strukturális potenciál	420 PJ/év = 38%
Konverziós potenciál	386 PJ/év = 35%
Gazdasági potenciál	260 PJ/év = 24%
Fenntartható potenciál	186 PJ/év = 17%

Szakterületek közötti szinkron

„Semmi sem fenyeget jobban egy rugalmatlan rendszert, mint a szakmai alapú gondolkodás.” (Derek Kassem, 2011)

Miután az energiapolitikában jó ideje a politikai szempontok dominálnak, sokak számára meglepő eredményekre jutnánk, ha a szakmai megfontolások kerülnének túlsúlyba. Azaz:

- Egyensúlyt (kompromisszumot) kell teremteni a *tudományos, szakmai és politikai prioritások* között, a különféle (ellen)érdekű lobbik „hitvitákká” fajult küzdelmét csak ezen az alapon lehet eldönteni. Az energiaszektor átpolitizáltságát jól mutatják a legújabb nemzetközi elemzések, amelyek alapján a fosszilis energiahordozók (beleértve az atomenergiát is) évente globálisan 775–1000 milliárd USD (!) nagyságú kormányzati támogatást élveznek, amelynek csak töredéke a megújulók, ezen belül a biomasszából előállított energiahordozók támogatása. És ebben még nem szerepelnek azok az ex-

ternális társadalmi költségek, amelyeket így vagy úgy, de „megfizetünk”: a környezeti károk, egészségügyi problémák, fegyveres konfliktusok kiadásai. Ez utóbbiak kalkulált globális többletköltsége évente kb. 5300 milliárd USD (Coady et al., 2015).

- Az ún. *energia-trilemma* feloldását kell megcélozni, mert ennek bármelyik eleme (energiabiztonság, megújuló energiaforrások bevonása, lehető legszélesebb körű energia-hozzáférés biztosítása) kerül kiemelésre, azaz háttérbe vagy előtérbe, az nemzetstratégiai tévedéshez vezet.
- A bioenergetikában érintett szereplők szoros együttműködése elkerülhetetlen, ehhez viszont *tudásközpontok, tudáshálózatok, tudásszolgáltatók* kiépítése és működtetése szükséges. „Egyedül nem megy...”
- Minden szintű döntéshozatalnál *száműzendő a bulvárszintű megközelítés*, mert ez a szűkös társadalmi, gazdasági és természeti erőforrások eszement pazarlásához vezet. Korrekt, szakmailag megalapozott, komplex információkra van szükség.

ÖSSZEFOGLALÁS

Hazai használatra az elmondottak alapján érdemes megfogalmazni bizonyos bioenergetikai „ökölszabályokat”, amelyeket, ha érvényesítünk a makro-, illetve projektszintű döntéseknél, akkor nem követhetünk el nagy hibát.

Rögzítsük a támogatási prioritások sorrendjét:

1. Csak auditált projekteket (komplex audit) támogassunk, illetve engedélyezzünk.
2. Fő szempont legyen a melléktermékek, biohulladék hasznosítása.
3. Csak ezt követően legyen lehetőség fás/lágy szárú energianövények nem használt földeken főtermékként történő termesztésére.
4. Legvégső esetben jöhet szóba energianövények termesztése más hasznosítási céllal versengő földeken.

Gazdaságosság megítélése:

- Más a jelen, más a jövő – csak hosszú távú gazdasági-technológiai előrejelzésekhez és globális trendekhez illeszkedő technológiákra alapozunk.
- Érvényesüljön a „termelj és fogyassz helyben!” elv a bioenergetikai fejlesztési projekteknél.
- Kiemelt prioritás legyen az energia- és emissziós mérleg, hatékonyság, üzemi méretek és a fenntarthatóság körültekintő értékelése.
- Tiszta képet kell alkotni a teljes energiaszektoron belül valamennyi energia-hordozó valós költségeiről (különbféle támogatások nélkül és beszámítva a tényleges externáliákat).

Gyorsuló technológiai fejlődés:

- Rugalmas (moduláris) megoldásokra fókuszálni.
- Komplex rendszerekre törekedni (a körkörös gazdaság szempontjaival szinkronban).
- Fontos követelmény a hálózatos szerveződés, mégpedig alulról – a hazai szereplők integrációi, hálózatai.
- Mindig szükség van helyi adaptációkra, ehhez pedig elérhető tudásközpontokra és tudásszolgáltatókra.

Ezekből is kiindulva született meg a 2017. április 6-i ankét állásfoglalása a biomassza energia célú hasznosításának javasolt hazai prioritásairól.

IRODALOM

- Bocca, R. et al. (2017): *Game Changers in the Energy System Emerging Themes Reshaping the Energy Landscape*. World Economic Forum – McKinsey Company, “White Paper”, REF 050117, 1–20. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Game_Changers_in_the_Energy_System.pdf
- Coady, D. et al. (2015): *How Large Are Global Energy Subsidies?* IMF Working Paper – WP 15/105, 1–42. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2015/wp15105.pdf>
- Dinya L. (2010): Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás. *Magyar Tudomány*, 171, 8, 912–925. <http://www.matud.iif.hu/2010/08/03.htm>
- Hawksworth, J. et al. (2017): *The Long View—How Will the Global Economic Order Change by 2050?* London, UK: WEF – PWC, 1–72. <https://www.pwc.com/gx/en/world-2050/assets/pwc-world-in-2050-summary-report-feb-2017.pdf>
- International Energy Agency (2016): *Key World Energy Statistics – 2015*. Paris: OECD / IEA, 1–81. <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2017>
- Paulos, B. (2017): *On Biofuels, Part 3. The Future of Bioenergy*. <https://energytransition.org/2017/01/part-three-the-future-of-bioenergy/>, letöltés: 2017. 03. 18.
- Pelkmans, L. (2016): *Results of a Global Survey on International Biomass Trade for Energy – Opportunities, Risks and Policy Options*. European Biomass Conference & Exhibition, Amsterdam, 8 June 2016, 1–9. <https://uhdSPACE.uhasselt.be/dSPACE/handle/1942/21760>
- Schiffer, H.-W. et al. (2016): *World Energy Resources – 2016*. World Energy Council, London, 1–1028. <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>

MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A BIOÜZEMANYAG-GYÁRTÁSRA: NEMZETKÖZI KITEKINTÉS

RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH PARTICULAR REGARD TO BIOFUEL PRODUCTION: INTERNATIONAL OUTLOOK

Popp József¹, Bai Attila²

¹DSc, egyetemi tanár, dékánhelyettes, intézetigazgató, Debreceni Egyetem Gazdaságtudományi Kar
popp.jozsef@econ.unideb.hu

²PhD, egyetemi tanár, Debreceni Egyetem Gazdaságtudományi Kar
bai.attila@econ.unideb.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az EU és a hazai energiapolitika célja az olcsó és környezetbarát módon előállított energia felhasználása, ugyanakkor a növekvő energiaárak és az energiainport magas részaránya a bioenergia-termelés további növeléséhez vezethet. Az élelmiszernövényekből előállított bioüzemanyagok a földhasználat alakulását, ezen keresztül az élelmiszerellátást is befolyásolják. Az alternatív hajtóanyagok között meghatározó szerepük van a bioüzemanyagoknak, a megújuló energiaforrások beruházásainak finanszírozásában a nap- és szélenergia vezet, az újabb generációs bioüzemanyag-technológia piaci bevezetése pedig még várat magára. A bioüzemanyagok hazai felhasználása gyakorlatilag a kötelező bekeverésnek köszönhető, ezért célszerű a K+F előmozdítása, a jelenleg hatályos kötelező bekeverés arányának növelése és a biometán felhasználásának ösztönzése.

ABSTRACT

The aim of the energy policy in the EU and in Hungary is to use cheap and environmentally friendly energy, but rising energy prices and the high share of the energy imports can lead to further increase in bioenergy production. Biofuels based on agricultural commodities have an impact on land use and hence global food supply. Biofuels play a major role in the use of alternative motor fuels, however, solar and wind energy are preferred in the competition for financial sources in the renewable energy sector, and the market introduction of next-generation biofuels is still unknown. The use of biofuels in Hungary is due to the mandatory blending so it is proposed to increase the share of mandatory blending, to introduce incentives for the use of biometan and support R+D.

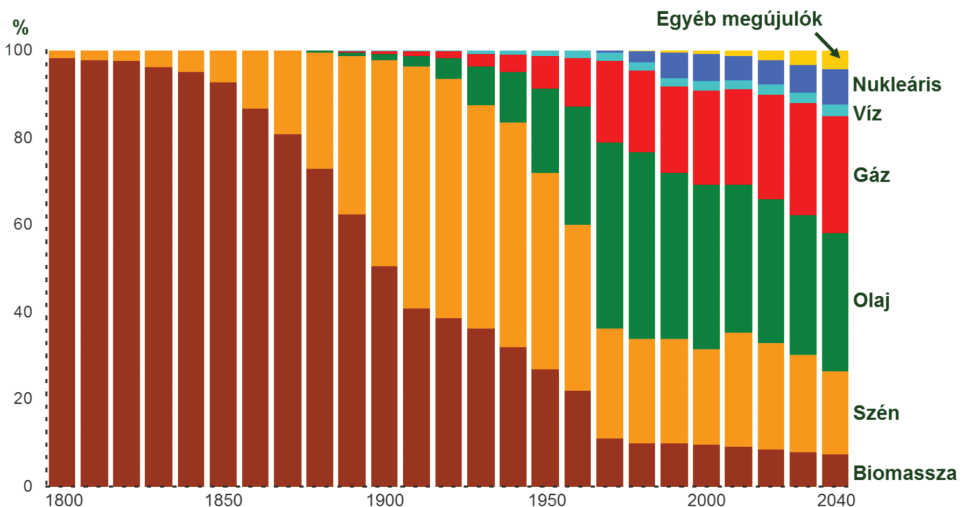
Kulcsszavak: energiaellátás, megújuló energia, bioenergia, bioüzemanyag

Keywords: energy supply, renewable energy, bioenergy, biofuel

BEVEZETÉS

A népességnövekedés gyorsulása ráirányítja a figyelmet a fosszilis energia-hordozó-kapacitások kimerülésére. A kimerülő erőforrások okozta geopolitikai konfliktusok és a környezeti károk radikális technológiaváltás nélkül globális válságot okozhatnak. Az elmúlt évtizedek óriási gazdasági növekedését egyszerűen annak köszönhetjük, hogy rendkívül olcsón tudtuk a természeti erőforrásokat felhasználni a termeléshez, szállításhoz vagy a kényelmesebb életmódhoz. A Földön a lélekszám emelkedésével közel párhuzamosan nőtt az energiafogyasztás is. A kőolajfüggőség és magas kőolajár, a mezőgazdasági termelés költségeinek és a termékek szállítási költségeinek emelkedése, valamint a környezetvédelmi szempontok az alternatív, megújuló energiaforrások kínálta lehetőségekre irányították a politikai döntéshozók figyelmét. Nagyon kevés régió állít elő fosszilis energiát a világon, ráadásul többségében politikailag megbízhatatlan országokról és régiókról van szó, amelyek gyakran a politikai zsarolás eszközeként, stratégiai fegyverként használják az energia-exportot.

Míg a 19. század elejéig a globális energiafelhasználás közel 100%-át a biomassza adta, addig a gőzgép térhódításával a 20. század elején az összes energiagigény felét már a szén szolgáltatta. Ugyanakkor a belső égésű robbanómotor feltalálásával (személygépkocsi, repülőgép) fokozatosan emelkedett a kőolaj iránti kereslet, s ezzel párhuzamosan a földgáz-felhasználás is (1. ábra).



1. ábra. Az energiafelhasználás alakulása a tüzelőanyagok %-ában

(Smil, 2000 adatai alapján saját szerkesztés)

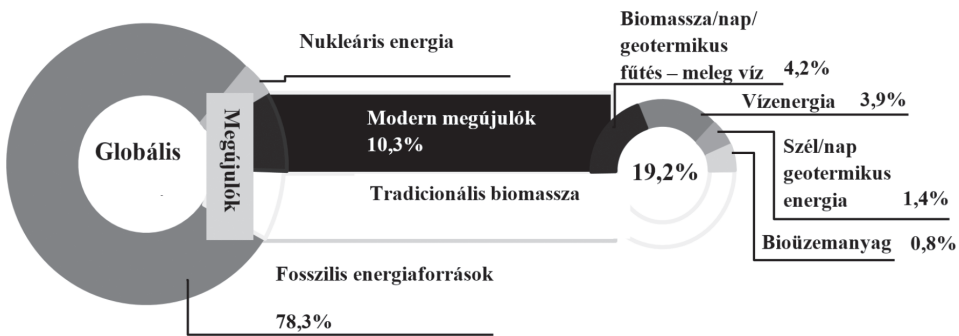
A globális népességnövekedés mellett az életmódváltozás miatt (urbanizáció és motorizáció) is emelkedik az emberek átlagos energiafogyasztása. A fejlett országokban az energiahatékonyság javulása mérsékelheti ezt a folyamatot. A növekvő világnépesség tehát hatványozódó (exponenciális) erőforrás-felhasználást eredményez, a fosszilis készletek viszont végesek. Egy növekedésorientált, de fenntarthatatlan világgazdasági rendszerben már az energiatermelés stagnálása is válságot jelent, a csökkenés pedig akár katasztrófát is okozhat. A kőolaj világpiaci árának emelkedése az elmúlt időszakban mindenekelőtt Kína és India ipari termelésének gyors bővülésével magyarázható. A kőolaj kereslete többek között a földgáz és nitrogénműtrágya árának alakulását is befolyásolja. Igaz, hogy a földgáz és a kőolaj piaca közötti kapcsolat manapság lényegesen gyengébb, ami a földgáz keresletének számottevő növekedésével és a földgáz-kereskedelem liberalizációjával magyarázható. A földgáz nehezebben szállítható, ezért kínálata kevésbé rugalmas. Hosszabb távon azonban a földgáz ára igazodik a kőolajéhoz, ugyanis a nagy földgázimportőrök jelentős kapacitásokat építenek ki a cseppfolyósított földgáz (Liquid Natural Gas, LNG) fogadására és tárolására (Popp et al., 2011).

MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK

A megújuló erőforrások állandóan újratermelődő anyag- és energiaforrások, amelyek hozzájárulnak az energiaellátás biztonságának javításához, a környezetterhelés, különösen a szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséhez, a vidékfejlesztéshez és a nemzetközi kereskedelem bővítéséhez. A megújuló energiaforrások növekvő felhasználása mellett az energiahatékonyság és -takarékoság növelése is fontos a fosszilis energia felhasználásának mérsékléséhez, ezzel párhuzamosan az energiainport-függőségből származó politikai és gazdasági kockázatok csökkentésében. Utóbbiaknak köszönhetően – és az előző évtizedektől eltérően – 2014-ben az energiafogyasztás növekedése (0,5%) már alulmúlta a globális GDP növekedését (2,9%) (Bai, 2016).

Az energiafogyasztás tehát folyamatosan nő, a globális primer energiaellátás – különböző források szerint – 535–576 EJ (exajoule) között alakult 2014-ben (REN21, 2015; IEA, 2015; Enerdata, 2016). A globális végső energiafogyasztásban a fosszilis energia aránya 78%-ot, a nukleáris energia aránya 3%-ot, a megújuló energiáé 19%-ot, ebből 9%-pontot a bioenergia (biomassza) és 10%-ot a modern megújuló energia (víz-, szél- és napenergia stb.) tett ki (*l. ábra*). A megújuló energia termelése 2013-ban már elérte a 76 EJ-t, ami a világ negyedik legnagyobb energiaforrását jelenti a kőolaj, szén és földgáz után. A 76 EJ energiatermelésből a modern megújuló energia (modern fűtés, alternatív üzemanyag, villamos energia) 41 EJ volt, a tradicionális biomassza pedig 35 EJ. A tradicionális biomassza kétharmadát (tűzifa) még mindig főzésre és fűtésre használják fel pazarló módon, elsősorban Afrikában.

Az elmúlt harmincöt évben a globális energiatermelés megduplázódott, miközben a megújuló energiaforrások hozzájárulása 13%-ról 19%-ra nőtt (2. ábra). A felhasznált biomassa a múltban főleg a fára korlátozódott, de ma már egyre inkább hasznosítjuk az energianövényeket, a mezőgazdasági és élelmiszeripari melléktermékeket, az emberi működés szerves hulladékát és az akvakultúras biomasszát is. Összességében a biomassa aránya az elmúlt két évtizedben stabil maradt globális szinten, ugyanakkor a modern megújuló energia felhasználása alacsony szintről indulva gyorsan emelkedett az 1990-es évek második felétől kezdve. Ez azt jelenti, hogy a modern megújuló energia termelése gyorsabb ütemben bővül, mint a biomasszára alapozott bioenergia előállítása (REN21, 2015; IEA, 2015).



2. ábra. A megújuló energia aránya a globális végső energiafogyasztásban (2014)
(IEA, 2015 adatai alapján saját szerkesztés)

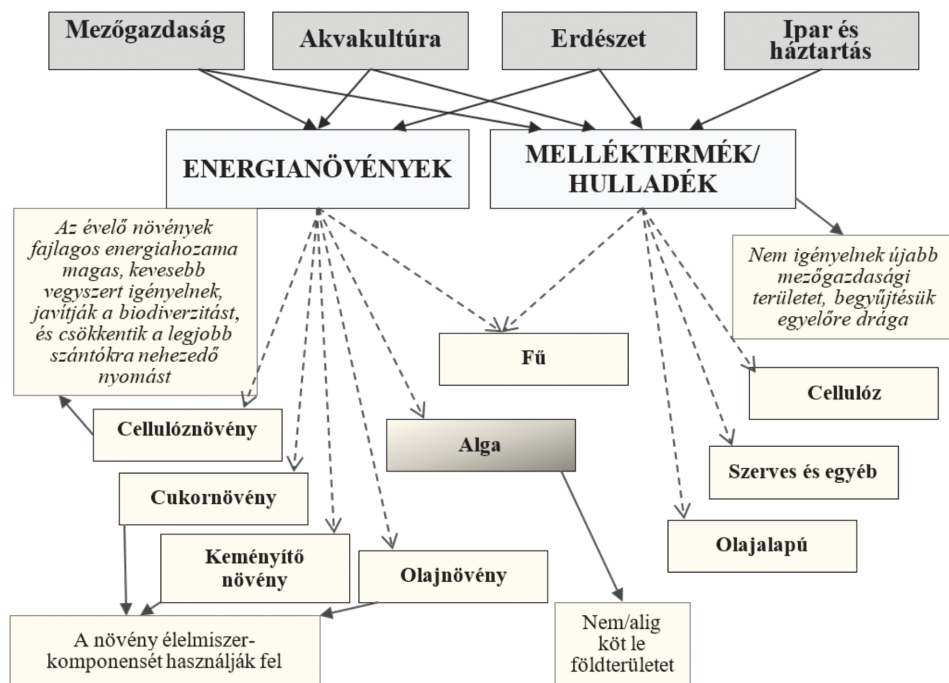
A kőolajkészlet kimerülése nemcsak a közlekedésben okozhat gondot, hanem az ipari termelésben is. Mindezzel csak akkor kell számolnunk, ha belátható időn belül nem következik be technológiai újítás, az energiafelhasználás hatékonyságának javulása, vagy nem állunk át időben és térben megújuló erőforrásokra. A megújulók jelenleg még drágábbak, mint a fosszilis alapú energiatermelés, de a környezetterhelés és a stratégiai kockázatok csökkentése érdekében a kőolajárak alakulásától függetlenül is célszerű lehet váltani megújuló energiaforrásokra.

BIOÜZEMANYAGOK

A bioüzemanyag ma a globális üzemanyag-fogyasztás 3-4%-át és a megújulóenergia-előállítás mintegy 5%-át (3,5 EJ/év) teszi ki (IEA, 2015). A modern bioenergia-termelésben a bioüzemanyag-gyártás azért játszik fontos szerepet, mert a kőolaj több mint 50%-át a közlekedés használja fel, ahol a kőolajon alapuló

üzemanyag-felhasználás aránya 96%. A bioüzemanyag nem tekinthető környezetvédelmi csodaszernek, de a létező technikák körültekintő alkalmazásával elért és elérhető eredményeket nem szabad lebecsülni. A bioüzemanyag-előállítás szempontjából a biomassza-alapanyagok három generációját különböztetjük meg. A bioetanol előállításánál az első generációs technológia alapanyaga a nagy keményítő- és cukortartalmú növények (elsősorban kukorica és cukornád), a biodízel-gyártásban pedig az olajnövények (elsősorban repce és szója). A második generációs technológiák magas cellulóztartalmú mezőgazdasági és erdészeti mellékterméket, valamint hulladékokat hasznosítanak. A harmadik generációs technológiák speciális energianövények (lágú és fás szárú energianövények, algák) felhasználásával javítják a bioüzemanyag-ipar versenyképességét és gazdaságosságát (3. ábra).

A világon a ma közlekedő 1,1 milliárd személygépkocsi száma 2040-re várhatóan 2,0 milliárdra emelkedik (Smith, 2016). A közlekedés várható energiaigényének meghatározása igen sok bizonytalansági tényezőt rejt magában, ami befolyásolja a bioüzemanyagok felhasználását is. Ilyen az olajár alakulása, az autógyártási technológiák fejlődése, az energiahatékonyság javulása, illetve az



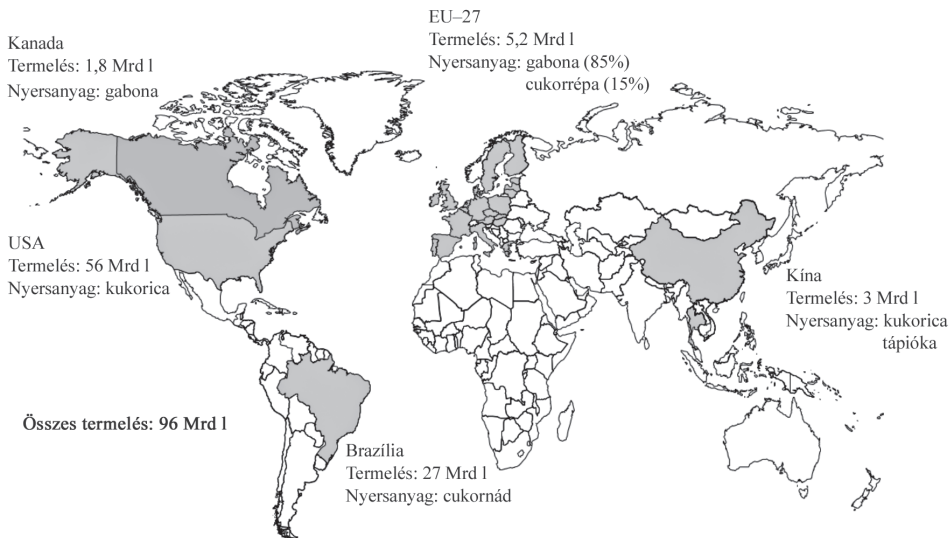
3. ábra. A bioenergia-termelés nyersanyagai

(Saját szerkesztés)

előregedett autópark és a közlekedés modernizációja. A bioüzemanyagok használata mellett tehát szükség van az energiahatékonyság javítására is. Nem meglepő, hogy a bioüzemanyag használata, bekeverése a fosszilis üzemanyagba számos országban ajánlott, illetve előírányzott vagy kötelező.

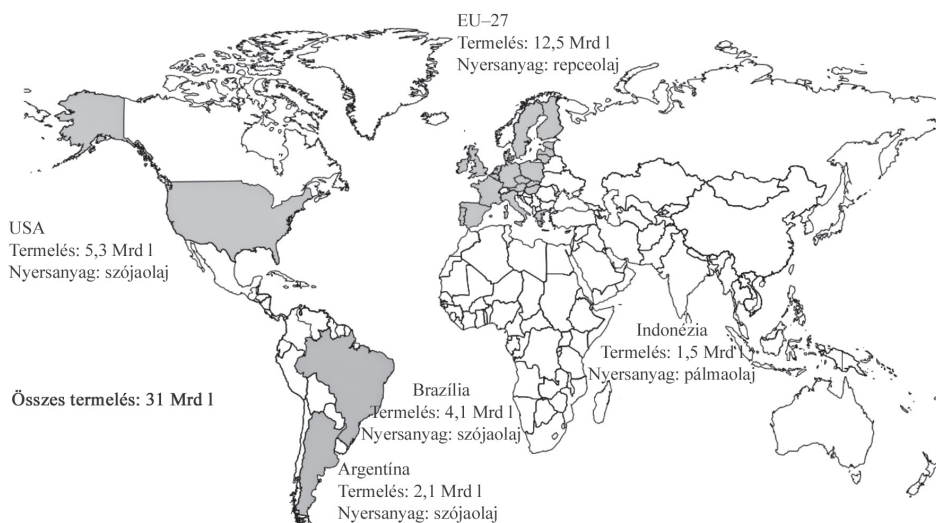
Ma a folyékony bioüzemanyag 80%-át a bioetanol teszi ki. A 2015-ben előállított 96 milliárd liter üzemanyagcélú etanol és 31 milliárd liter biodízel a világ üzemanyag-fogyasztásának 3-4%-át tette ki energia-egyenértékben kifejezve (4. és 5. ábra). Az üzemanyagcélú bioetanol legnagyobb előállítója az USA, a világpiacot viszont Brazília uralja. Jelentős lemaradással 5,2 milliárd literrel a harmadik legnagyobb termelő az Európai Unió volt. 2025-re az etanol termelése az előrejelzések szerint 128 milliárd literre nő világszerte (OECD/FAO, 2016; RFA, 2016).

2015-ben a globális gabonatermelés mintegy 8-9%-át használták fel bioüzemanyag-célú etanolgyártásra. A melléktermékek takarmánycélú hasznosítását (DDGS, CGF stb.) is figyelembe véve, az etanolipar nettó gabonafelhasználása a globális termelés csaknem 6%-ára rúgott. Kukoricából a felhasználás már eléri a világtermelés 15%-át és az Egyesült Államok termelésének majdnem 40%-át. Az etanolgyártás másik nyersanyaga, a cukor világpiaca jellemzően keresleti piac, és befolyásolja a brazil etanol nemzetközi kereskedelmét. 2025-ben az etanolgyártás a világ gabonatermelésének 10-11%-át (nettó 7-8%-át) fogja igényelni, az USA-ban a megtermelt kukorica 35%-a szolgálja majd az etanol-előállítást. A globális



4. ábra. Globális üzemanyagcélú bioetanol-előállítás (2015)

(OECD/FAO, 2016; RFA, 2016 adatai alapján saját szerkesztés)



5. ábra. A globális biodízel-termelés alakulása (2015)

(OECD/FAO, 2016; RFA, 2016 adatai alapján saját szerkesztés)

cukornádtermelés etanolcélú felhasználásnak aránya a mai 20%-ról 22%-a nő (OECD/FAO, 2016).

A biodízel-előállítás és -felhasználás ma főleg Európára és kisebb mértékben az USA-ra koncentrálódik, bár az utóbbi években több ország is bekapcsolódott a biodízel-gyártásba. 2015-ben a 31 milliárd liter globális biodízel-termelésből az EU 12,5, az USA 5,3 milliárd litert állított elő (5. ábra). 2025-re a globális biodízelgyártás várhatóan 41 milliárd literre nő (OECD/FAO, 2016; RFA, 2016).

A biodízelgyártás hatása a növényolajok globális piacára már jelentősebb: 2015-ben a globális növényolaj-termelés 11%-át használták fel e célra, 2025-re ez az arány 12%-ra emelkedik. A legfontosabb nyersanyag a szójaolaj és repceolaj, valamint a pálmaolaj. Az állati zsirokból és a használt sütőolajból is egyre több biodízelt állítanak elő (OECD/FAO, 2016; RFA, 2016).

Az iparág jövője nagymértékben függ a technikai fejlődés sebességétől és a bioüzemanyagok környezeti és társadalmi hatását vizsgáló kutatások eredményétől. Egyes előrejelzések szerint a jövőben a közúti közlekedés energiaigényének jelentős részét nem az ásványolaj- vagy biomassza-alapú hajtóanyagok fogják kielégíteni, hanem a leginkább környezetbarátnak tekintett hidrogéncellák, illetve elektromos akkumulátorok, amelyek töltéséhez az áramot részben víz-, nap-, szél- és árapály erőművekkel állítják elő. E fejlett rendszerek azonban technológiailag még nem kiforrottak, így egyelőre a bioüzemanyagoknak van a gyakorlatban létjogosultságuk.

Technológiai és jövedelmezőségi problémák miatt az USA kormányzatának a bioüzemanyag-program hosszú célértékeit vissza kellett vágnia, ráadásul korlátozza a kukorica felhasználását az etanoltermelésben (legfeljebb 15 milliárd gallon etanol állítható elő, ehhez mintegy 130 millió tonna kukorica szükséges), hogy ne veszélyeztesse az élelmiszer- és takarmányipar nyersanyagellátását (EPA, 2013). Az EU tagállamai vállalták, hogy 2020-ig uniós szinten 20%-kal csökkentik az 1990-es szinthez képest az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását, továbbá 20%-ra növelik a megújuló energiaforrások részarányát. Az Európai Bizottság nem változtatta meg a közlekedésben a megújuló forrásból származó üzemanyagok 2020-ig elérendő (10%-os) részarányát, a teljesítésben azonban az elsőgenerációs bioüzemanyagok elismerését 7%-pontban korlátozza. Ennek segítségével tehát az EU-ban is korlátozzák az élelmiszernövényekből (főleg gabonából, cukorrépból és olajnövényekből) előállított bioüzemanyag mennyiségét. A megújuló forrásból származó energia részaránya az EU teljes energiafelhasználásában 2013-ban 15% körül alakult, a közlekedésben pedig 5,4%-ra emelkedett (EEA, 2016). 2020-ra a megújuló energiaforrások arányát 20%-ra kell növelni, ezen belül a bioüzemanyagok arányát 10%-ra (energia-egyenértékben kifejezve) tagállami szinten.

Az USA-ban és az EU-ban a jövőben elsősorban a mezőgazdasági melléktermékek – szalma, kukoricaszár, erdészeti, faipari hulladék – felhasználása jöhet szóba a lágy és fás szárú növények mellett. A cellulóztartalmú nyersanyag jelenleg még sokkal olcsóbb, de etanollá történő átalakítása drágább a kukoricánál a cellulóz lebontásához szükséges enzimek magas ára miatt. Továbbá gondot okoz a cellulózalapú nyersanyag betakarítása, tárolása és szállítása, a nagy volumen (2–4-szer nagyobb, mint a gabonafélék és olajnövények szemtermése esetében) és a rövid tárolási lehetőség (kártevők és kórokozók jelenléte) miatt. Ennek költséghatékony logisztikája még hiányzik. Az USA sokkal több pénzt költ a második generációs üzemanyagok kutatására és fejlesztésére, mint az EU. Cellulózalapú folyékony hajtóanyagokból a kísérleti üzemek világszerte elenyésző mennyiséget állítanak elő (Popp et al., 2014), 2016-ban ez mintegy 4 Mrd literre becsülhető (OECD/FAO, 2016).

A globális szántó- és ültetvényterület mintegy 2%-át (32 millió hektárt) használja fel a bioüzemanyag-ipar (Langeveld et al., 2014). A felhasznált nyersanyag egy része viszont takarmányként visszakerül az állattenyésztéshez, ezért az energianövények nettó globális földhasználata 1,5%-ra csökken. Ugyanakkor egyes országok néhány mezőgazdasági ágazatában komoly arányt képvisel a bioüzemanyag-gyártás számára termelt nyersanyag. Brazíliában a cukornádtermelés mintegy 50%-át használja fel az etanolipar, az USA-ban a kukorica- és szójaterület 20%–40%-a szolgálja a bioüzemanyag-gyártást, az EU-ban a repceterület 50–60%-a biztosít nyersanyagot a biodízeliparnak. A bioüzemanyag-gyártás legfontosabb melléktermékei, a szárított gabonatörköly (DDGS: Distillers Dried Grains with Solubles), a kukorica glutén liszt (CGM: Corn Gluten Meal) és a kukorica glutén takarmány (CGF: Corn Gluten Feed), valamint a szója- és repcedara fontos

fehérjehordozó takarmányt jelent az állattenyésztés számára. A globális bioüzemanyag-gyártásban az etanolipar évente 45 millió tonna DDG-t, DDGS-t, CGM-t és CGF-t, a biodízelipar pedig a növényolaj felhasználásával közvetve évi 13 millió tonna repcedarát és 28 millió tonna szójadarát állít elő, vagyis szójafehérje-egyenértékben ez megfelel mintegy 65-70 millió tonna szójadarának, azaz az évente világszerte előállított szójadara 30%-ának (Popp et al., 2016; Popp et al., 2014).

A jövőben továbbra is éleződő verseny várható a megújuló energiaforrások beruházásainak finanszírozásáért. Az ilyen célú beruházások összege 2004 és 2010 között ötszörösére nőtt, 2010–2016 között évi 234 és 312 milliárd USD között alakult. 2016-ban csökkent a beruházás összege az előző évi 312 milliárd dollárról 242 milliárd dollárra, miközben a megújuló energiaforrások új kapacitásai a 2015. évi 127 GW-ról 2016-ban 138 GW-ra nőttek, főleg a csökkenő fajlagos beruházási költségeknek köszönhetően. A beruházásokban Európa részaránya folyamatosan csökkent, ezzel szemben Kína és az USA részaránya nőtt. A bioüzemanyag-gyártásra beruházott összeg gyorsan nőtt 2004 és 2007 között, de ezután csökkent a beruházás aktivitása az elsőgenerációs bioüzemanyag-előállítás szabályozásának bizonytalansága és a második generációs technológia bevezetésének folyamatos késlekedése miatt. Nem véletlen, hogy 2016-ban a nap- és szélenergia beruházásai a megújuló energiaforrások összes beruházásainak 93%-át tették ki (Frankfurt School–UNEP Centre/BNEF, 2017).

MAGYARORSZÁG MEGÚJULÓENERGIA-TERMELÉSÉNEK KILÁTÁSAI

A kormány a 2010-ben elfogadott Nemzeti Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Tervben vállalta, hogy a megújuló energiaforrások felhasználására vonatkozó 2020-ra érvényes 13%-os célértéket 14,65%-ra növeli a teljes energiafelhasználásban a 2010. évi 7,4%-ról. A kötelezettségvállalás mértékének növelése ellenére Magyarország a tagállamok rangsorában a mezőny alján helyezkedik el.

A megújuló energiaforrások aránya a teljes energiafelhasználásban a Magyar Energetikai és Közmű Hivatal (MEKH) (2017) szerint 9,6%-ot tett ki 2014-ben, azonban nem hivatalos becslések szerint – figyelembe véve a hivatalos statisztikában nem szereplő, nehezen becsülhető, ám valószínűleg igen jelentős háztartási biomassza-felhasználást – ez elérheti akár a 16%-ot is. A MEKH hivatalos statisztikája (2017) szerint a megújulók részaránya a fűtésben/hűtésben 12,3%-ra, a villamosenergia-előállításban 7,3%-ra, a hajtóanyagok tekintetében pedig 6,9%-ra tehető. A 86 TJ megújuló energia túlnyomó része (81 TJ) hazai felhasználásra kerül, 5 TJ bioüzemanyagot (az előállított mennyiség 39%-át) exportálunk. A hazai megújulóenergia-termelés megoszlása a következő értékekkel jellemezhető (MEKH, 2017):

- biomassza: 87%/75 TJ (ezen belül 68%/59 TJ szilárd biomassza, 4%/3 TJ biogáz, 15%/13 TJ bioüzemanyag);

- geotermia: 6,3%/5,4 TJ;
- szél: 2,8%/2,4 TJ;
- kommunális hulladékok megújuló része: 2,1%/1,8 TJ;
- víz: 1,3%/1,1 TJ;
- nap: 0,5%/0,5 TJ.

Amennyiben a rejtett biomassza-felhasználást is számításba vesszük, akkor a biomassza részaránya valószínűleg jóval meghaladja a 90%-ot. Az utóbbi években bekövetkezett növekedés a megújulók részarányában jelentős mértékben az energiatakarékosságnak köszönhető, amelynek eredményeként a hazai energiafogyasztás 2014-re 956 PJ-ra csökkent.

A magyar megújuló energetikai szabályozás az utóbbi években teljesen megváltozott, az új támogatási rendszerben a fő szerepet a biomassza és a geotermikus energia kapja. A vízenergia mennyisége évtizedek óta stagnál, új szél-erőművek telepítésére nincs kilátás, a napelemek lakossági felhasználása pedig a nemzetközi viszonylatban igen negatívnak értékelhető szabályozás ellenére is nő. A napelemes technológia azonban az utolsó pillanatban is telepíthető, ha ennek segítségével akarunk megfelelni az uniós elvárásoknak.

Magyarországon a biomassza rendelkezik a legnagyobb potenciállal az egyes megújuló energiaforrások között, de az erdészeti biomassza eltüzelése helyett a jövőben az energianövények termesztésére és a mezőgazdasági melléktermékekre lenne indokolt hangsúlyt fektetni. Előbbiek hatékonyságuknak köszönhetően (egy hektár energetikai faültetvény 10 hektár erdőt mentesít a kivágástól), utóbbiak pedig elsősorban alacsony költségeik, zero területigényük és helyi felhasználhatóságuk miatt javasolhatók.

A hazai energiapolitikában a rezsicsökkentés gazdaságtalanná teheti a lakossági megújuló energetikai beruházások bővítését, a paksi atomerőmű tervezett kapacitásbővítése pedig a jövőben várhatóan korlátozza a megújuló energia támogatási forrásait. 2015-ben Magyarországon a nukleáris energia a villamosenergia-termelés 53%-át, a fogyasztás 36%-át tette ki (15,8 TWh), mely az összes zöld áram 6,5-szerese. Európában ennél magasabb arányt Franciaország (76%), Ukrajna (62%), Szlovákia (55%) és Belgium (54%) tud felmutatni. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy az atomenergia környezetvédelmi szempontból kedvező, és az itt termelt villamos áram akár a hazai közlekedési koncepcióban is szerepet kaphat (elektromos járművek). Csökkenti az áramimportot, ám fokozza a technológiát és az alapanyagot beszállító, az ártalmatlanítandó fűtőelemeket pedig visszavevő országgal szembeni függésünket. Ugyanakkor ez nemcsak hazai irányvonal. Noha tagállami szinten több ország fogalmazott meg nukleáris energiacsökkentéssel kapcsolatos szándékot, *Az európai energiaunió felé* című EU-állásfoglalás (2015/2113 (INI)) egy olyan „európai energetikai víziót” mutat be, amelyben határozott szándék figyelhető meg az atomenergia irányába.

IRODALOM

- Az európai energiaunió felé. EU-állásfoglalás (2015/2113 (INI), <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+REPORT+A8-2015-0341+0+DOC+XML+V0//HU>
- Bai A. (2016): Visions about a Renewable Future. *Trends in Renewable Energy*, 2, 2, 51–53.
- EEA (2016): *Renewable Energy in Europe 2016*. European Environment Agency, EEA report No4/2016, Luxembourg 2016, DOI:10.2800/6803, <https://www.eea.europa.eu/publications/renewable-energy-in-europe-2016>
- Enerdata (2016): *Global Energy Statistical Yearbook*. Paris, <https://yearbook.enerdata.net>
- EPA (2013): *Renewable Fuel Standard (RFS), Regulations & Standards*. United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>, <http://www.epa.gov/otaq/fuels/renewablefuels/documents/420f13005.pdf>
- Frankfurt School–UNEP Centre/BNEF (2017): *Global Trends in Renewable Energy Investment 2017*. Frankfurt am Main, <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsrenewableenergyinvestment2017.pdf>
- IEA (2015): *Renewable Energy. Medium-Term Market Report 2015. Market Analysis and Forecasts to 2020*. Paris, France: International Energy Agency, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MTRMR2015.pdf>
- Langeveld, J. W. A. – Dixon, J. – van Keulen, H. – Quist-Wessel, P. M. F. (2014): Analyzing the Effect of Biofuel Expansion on Land Use in Major Producing Countries: Evidence of Increased Multiple Cropping. *Biofpr – Biofuels Bioproducts Biorefining*, 8, 49–58. DOI: 10.1002/bbb.1432
- MEKH (2017): *Megújuló energiaforrások felhasználásának részaránya 2004–2015*. <http://www.mekh.hu/eves-adatok>
- OECD/FAO (2016): *OECD–FAO Agricultural Outlook 2016–2025*. Paris: OECD Publishing, DOI: 10.1787/agr_outlook-2016-en, https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2016_agr_outlook-2016-en
- Popp J. – Harangi-Rákos M. – Gabnai Z. et al. (2016): Biofuels and Their Co-Products as Livestock Feed: Global Economic and Environmental Implications. *Molecules*, 21, 3, 285 DOI: 10.3390/molecules21030285, <http://www.mdpi.com/1420-3049/21/3/285/htm>
- Popp J. – Lakner Z. – Harangi-Rakos M. – Fari M. (2014): The Effect of Bioenergy Expansion: Food, Energy, and Environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 559–578. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.056, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000677>
- Popp J. – Potori N. (szerk.) (2011): *A biomassza energetikai célú termelése Magyarországon. (Agrárgazdasági Könyvek)* Budapest: Agrárgazdasági Kutató Intézet, <http://repo.aki.gov.hu/294/>
- REN21 (2015): *Renewables 2015, Global Status Report*. Paris, France: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
- RFA (2016): *World Fuel Ethanol Production*. Renewable Fuels Association. <http://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>
- Smil, V. (2000): *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. USA: Praeger, (e-book) www.abc-clio.com
- Smith, M. N. (2016): The Number of Cars Worldwide Is Set to Double by 2040. *World Economic Forum and Business Insider*, 22 April 2016. <https://www.weforum.org/agenda/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040>

BIOENERGETIKAI TECHNOLÓGIAI TRENDK

TRENDS IN BIOENERGY TECHNOLOGY

Marosvölgyi Béla

DSc, professor emeritus, Soproni Egyetem, Kooperációs Kutatási Központ Nonprofit Kft.
marosvolgyi.b@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS

A biológiai energiahordozók felhasználásának minőségi és mennyiségi jellemzői és azok változásai trendekkel írhatók le. A fejlődési és fejlettségi szinteket természeti és társadalmi jellemzők befolyásolják.

A közelmúltban az energiatermelés ökonomiai jellemzői voltak a meghatározók, és az energiaárakban megjelenő gazdasági versenyztetés volt a jellemző. A fosszilis energiahordozók újabb változatainak (palagáz, olajhomok, széntelepek stb.) feltárása és új technológiáik kifejlesztése hatására a fosszilis eredetű energiák árának csökkenését vagy stagnálását várták. Ugyanakkor a nemzetközi politikai folyamatok és a politikát alapvetően befolyásoló gazdasági erők hatására a fosszilis energiahordozók felhasználásának korábban tervezett csökkenése elmaradt.

Napjainkra az egyre növekvő energiaigény kielégítése már nemcsak az újabb energiahordozók feltárásával és használatbavételével jár együtt, hanem a fosszilis energiahordozók használata során felszabaduló szén-dioxid hatására a légkör CO₂-tartalmának jelentős növekedése is mérhető. Ezzel a klímaváltozás megindulása, illetve a fotoszintézissel már nem kompenzálódó gyorsulása jár együtt. Korábban ezt a negatív tendenciát politikai okok és energetikai lobbik hatására igyekeztek tagadni, de az utóbbi időben megismert tudományos alapú bizonyítékok hatására bekövetkezhetett, hogy a klímaváltozást már nemzetközi politikai erők is elismerik.

A biomassza energetikai hasznosításával kapcsolatban korábban hangoztatott fő indok (a fosszilis energiahordozók készleteinek kimerülése) nem nyert bizonyítást, a fosszilis energiahordozók ára a lehetséges mértékben nem csökken, forrásai középtávon bővülnek, ugyanakkor a klímaváltozás várható hatásainak felismerése a nemzetközi szervezetek eddig példátlan összefogását eredményezte. Jelentős, a szén-dioxid-emisszió és a fosszilis energiahordozók felhasználásának mérséklésére irányuló megállapodások születtek, amelyek érvényesítésének határidői minden korábbinál közelebbiek, és a vállalt kötelezettségek nem teljesítőinél szankciók alkalmazása is számításba jöhet. Ezzel a bioenergetika új megvilágításba került, és kiemelt fejlesztésének tudományos és politikai alapjai is létrejöttek. A felismerhető tendencia tehát:

- hosszabb távon számolni kell a Föld népességének (és ezzel energiaigényének) növekedésével is;
- a növekvő energiaigény kielégítésében fontos szerepe lesz a lokális energiatermelésnek.
- megnő a szén-dioxid megkötésében fontos fotoszintézis-alapú energiahordozók előállításának és az emberiség élelmiszer-ellátását szolgáló biomassza-termelésnek a szerepe;

- el kell érni, hogy az élelmiszer-termelés és az emberi lét kommunális folyamatai (élelmiszer-termelés, életfolyamatok stb.) primer, szekunder és terciér biomasszáinak minél nagyobb része hasznosuljon a fosszilis energiahordozókat kiváltó energiatermelésben;
- létfontosságú, hogy a biomasszák energetikai hasznosításával a hulladékok környezetkárosító hatását csökkentő vagy megszüntető hatása is érvényesüljön;
- növekedjen az erre alkalmas vagy másra nem hasznosított területeken vagy technológiákban az energetikai célra hasznosítandó primer biomasszák termesztése (energiaültetvények stb.), ami a légkör CO₂-tartalmának csökkenését is eredményezi.

ABSTRACT

The qualitative and quantitative characteristics of the usage of biological energy sources and their changes can be described through trends. State and level of development are influenced by natural and social conditions.

Recently, the economic characteristics of energy production were decisive, and economic competition in energy prices was rampant. New fossil fuels (shale gas, oil sands, coal mines, etc.) and the development of their new technologies were expected to reduce or stagnate fossil energy prices. At the same time, as a result of the international political processes and the economic forces that are essentially influencing politics the previously planned decline in the usage of fossil fuels has been missed.

Today, meeting the growing demand for energy not only involves exploring and using new energy sources but also results in significant increase in the carbon-dioxide content of the atmosphere, due to the release of CO₂ by the consumption fossil fuels. As a result, climate change and its acceleration is no longer compensated by photosynthesis. Earlier this negative tendency was challenged by political reasons and energetic lobbies, but recent evidence-based scientific results ensued climate change to be recognized by international political forces.

The main reason for the energy utilization of biomass (the depletion of fossil fuel reserves) has not been proven, the price of fossil fuels does not decrease to the extent possible, its resources are expanding in the medium term, but at the same time, the recognition of the expected impacts of climate change has resulted in unprecedented collaboration of international organizations. Substantive agreements have been reached to reduce CO₂ emissions and the use of fossil fuels, the deadlines for enforcement are closer than ever, and the imposition of sanctions of non-compliance can also be considered. This shed a new light on bioenergetics, and the scientific and political foundations of its outstanding development have also been established. The recognizable trends are therefore:

- the long-term growth of Earth's population (and thus its energy demand);
- local energy production plays an important role in satisfying the growing energy demand;
- increase the importance of producing photosynthesis-based natural carbon sinks energy sources and the role of biomass production for human food supply;
- the majority of primary, secondary and tertiary biomasses of food production and communal processes of human existence (food production, biological processes, etc.) should be utilized in the replacement of fossil energy sources;
- it is a prime necessity that the energy utilization of biomasses also affect reduction or elimination the environmental impact of wastes;
- increase the production of primary biomass for energy use (energy crops, etc.) in suitable or unutilised areas or technologies which also results in a decrease in the CO₂ content of the atmosphere.

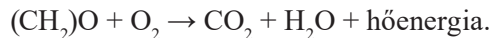
Kulcsszavak: bioenergetika, biogáztermelés, biológiai energiahordozók, fotoszintézis, elsődleges biomassza, másodlagos biomassza, harmadlagos biomassza

Keywords: bioenergetics, biogas production, biological energy sources, photosynthesis, primary biomass, secondary biomass, tertiary biomass

A bioenergetika a földtörténet újabb korszakában az energetika fontos része lett, és a szénbázisú életforma megjelenésével, majd kiterjedésével vált a földi lét meghatározójává. A bioenergetikában az energiaforrás a Nap, a természeti folyamat a fotoszintézis, amelynek során a napenergia az asszimiláló növényi sejtek kémiai folyamataiban a légkörben levő oxidált állapotú szénatomok (CO_2) redukálásához szükséges, és a folyamatban felhasznált energia a létrejövő szénhidrát-molekulában rögzül.



A létrejött szénhidrát oxidációjával a megkötött energia visszanyerhető:



A földi ökoszisztémák fotoszintézissel évente mintegy 1800 milliárd tonna elsődleges energiahordozót hoznak létre (Whittaker, 1975). A Föld felszínére érkező napsugárzás $2,6 \times 10^{24}$ J/év energiainputot jelent. Ebből a fotoszintézist folytató élőlények mintegy 2‰ hatásfokkal $5,7 \times 10^{21}$ J/év energiatarthatalmú biomasszát állítanak elő. Ez tekinthető a Földön a fotoszintézisből származó elméleti biomassza-produkciónak. (Magyarország esetében az évi 437×10^{18} J/év napsugárzással – a földi arányokat elfogadva – évente 958×10^{15} J/év = 958 PJ energiatarthatalmú biomassza jön létre.)

A természetes biomassza-produkció célja a földi élet fenntartása. Ez a folyamat az ember jelenléte nélkül is végbemegy, és már az ember megjelenése előtt is zajlott. Ekkor jött létre a sokszínű, a zárt táplálékláncokra épült élet, amelyben az élő szervezetek létrejötte, létfenntartása és az elhalás után a lebomlás (a széndioxid légkörbe visszajutása) teljes harmóniában ment végbe. Ekkor alakult ki a földi légkör, amelyben a fotoszintézis állította be a légkör CO_2 - és O_2 -tartalmát.

Az ember megjelenésével és az egyre növekvő népesség igényeinek kielégítésével, következett be egy sor olyan változás, amelyek egyre nagyobb mértékben hatnak vissza a földi folyamatokra, és vált szükségessé a biológiai energiahordozók (továbbá a napenergia, a vízenergia és a szél) mellett egyre újabb energiahordozók és energiafajták felkutatása és igénybevétele, ezért az energetika szerepe rohamosan növekedett. A folyamatban a fosszilis energiahordozók feltárása, fel-

használása vált meghatározóvá, aminek következménye a légkör CO_2 -tartalmának gyors növekedése. A biológiai energiahordozók felhasználásának minőségi és mennyiségi jellemzői és azok változásai trendekkel írhatók le. A fejlődési és fejlettségi szinteket természeti és társadalmi jellemzők befolyásolják.

Korábban az energiatermelés ökonómiai jellemzői voltak a meghatározók, és az energiaárakban megjelenő gazdasági versenyeztetés volt a jellemző. Az utóbbi időszakban a fosszilis energiahordozók újabb változatainak (palagáz, olajhokok, széntelepek stb.) feltárása és új technológiák kifejlesztése következtében a fosszilis eredetű energiák árának csökkenését vagy stagnálását tapasztaljuk. Sok esetben azonban a nemzetközi politikai folyamatok és a politikát alapvetően befolyásoló gazdasági erők hatására a fosszilis energiahordozók felhasználásának tervezett csökkenése elmaradt.

Napjainkra az egyre növekvő energiaigény kielégítése már nemcsak az újabb energiahordozók feltárásával és használatbavételével jár együtt, hanem a fosszilis energiahordozók használata során felszabaduló szén-dioxid hatására a légkör CO_2 -tartalmának jelentős növekedése is mérhető. Ezzel a klímaváltozás megindulása, illetve a fotoszintézissel már nem kompenzálódó gyorsulása jár együtt. Korábban ezt a negatív tendenciát politikai okok és energetikai lobbik hatására igyekeztek tagadni, de az utóbbi időben megismert tudományos alapú bizonyítékok alapján bekövetkezhetett az, hogy a klímaváltozást már nemzetközi politikai erők is elismerik. Erre bizonyíték, hogy a párizsi (klímaváltozással kapcsolatos) megállapodást 2017. július végéig már 175 ország írta alá, és a tervezett hatályba lépését (2020) is korábbra helyezik.

A bioenergetika jellemzőinek és szerepének megítéléséhez célszerű az energiák és energiahordozók légköri karbonforgalom alapján történő összehasonlítása (*1. táblázat*). Ez alapján megállapítható, hogy a bioenergetikát kivételes tulajdonságok jellemzik. Az energiahordozó keletkezésekor részt vesz a légköri CO_2 megkötésében, és az elsődleges biomasszát létrehozó fotoszintézis O_2 -emisszióval jár együtt. Ez a földi élet alapfeltételeit teremti meg.

A szén-dioxid megkötésével létrejött biomasszabázisú (és nem fosszilis) energianyerési módok esetében CO_2 -emisszió is bekövetkezik, de CO_2 -neutrális folyamatban, ugyanakkor velük a fosszilis energiahordozókat váltjuk ki, azaz felhasználásuk a fosszilis energiahordozók felhasználásának csökkentését eredményezi.

A bioenergetikával kapcsolatban további (nemritkán figyelmen kívül hagyott) szempontot is meg kell említeni. Nevezetesen azt, hogy a Földön a természetes biomassza az ember által folytatott energiagazdálkodástól függetlenül is létrejön. A földi népesség egyre növekvő lélekszáma miatt egyre több élelmiszerre van szükség, ennek előállításához pedig egyre több biomassza szükséges, és melléktermékként is egyre több biomassza keletkezik. Ezek az anyagok természetes folyamatban lebomlanak, és CO_2 -tartalmuk visszajut a légkörbe. Ebből az következik, hogy a melléktermék és hulladék biomasszák és a szabad elsődleges

1. táblázat. Az energiák és az energiahordozók szerepe a földi szén- és oxigénforgalomban

	Energiák, energiahordozók	CO ₂ - megkötés	CO ₂ - emisszió	O ₂ - emisszió	CO ₂ -emisszió kiváltása
fosszilis energia- hordozók	szén				
	kőolaj				
	földgáz				
elsődleges és egyéb biomasszák	elsődleges				
	másodlagos				
	harmadlagos				
megújuló energiák	szél				
	nap				
	víz				
alternatív energiák	geotermia				
	nukleáris				
	árapály				
	egyéb				

biomassza minél nagyobb hányadának energetikai hasznosítása célszerű és szükséges, mert így további CO₂-emissziót eredményező energiahordozó váltható ki.

A környezeti változások egyre részletesebb megismerését követően az energetika folyamatainak komplex megítélését meghatározó szempontok kerültek előtérbe. Ezek fontossági sorrendben:

- a Föld népességének igen jelentős és hosszú távon is várható növekedése;
- a népességnövekedéshez kapcsolódó fajlagos energiaigény és így az összes energiaigény növekedése;
- a már veszélyes mértékű klímaváltozás okozta károk és a jövőt érintő elönytelen környezeti változások felismerése;
- a tudományos élet, a politikai élet vezetőinek és az egyre több információhoz jutó társadalmi csoportok döntésbefolyásoló szerepének növekedése.

E sokrétű ismeretbővülés hatására a nemzetközi megállapodásokban egyre konkrétabb előírások jelennek meg, és a trendek hosszú távú célokra alapozott alakítása válik meghatározóvá. Ennek következménye az, hogy a nemzetközi megállapodásokban (párizsi klímamegállapodás) prioritásokként kerültek rögzítésre:

- a CO₂ (és más klímagázok) emissziójának jelentős csökkentése;

- a fosszilis energiahordozók felhasználásának csökkentése, azok megújuló és alternatív energiákkal és energiahordozókkal történő, növekvő mértékű kiváltása;
- az elsődleges biológiai energiahordozók forrásainak növelése, de az élelmezést szolgáló bázisok csökkentése nélkül;
- a nem elsődleges biológiai energiahordozók minél nagyobb mértékű felhasználása, és ezzel a környezet védelme, hulladékmentesítése;
- a megújuló és az alternatív energiák egymást támogató felhasználása;
- a lokális energiatermelés terjesztése, a helyi energiahordozók minél nagyobb mértékű, azaz a nemzeti forrásokat hasznosító eljárások előtérbe helyezése új munkahelyek létrehozásával és az energiafüggség csökkentésével egy időben.

Ha a bioenergetikai trendek alakulását alapvetően a Föld népességének változása (növekedése) határozza meg (lásd 2. táblázat), természetesnek kell tekintenünk azt, hogy ezzel együtt a szükségletek mennyiségi növekedése következik be, és emellett a komfortigények is növekednek. Ezek együttesen az energiaigény jelentős növekedését eredményezik. Ezt egyelőre kiszámíthatatlan mértékben növeli meg a klímaváltozással kapcsolatos energiaigény növekedése (hűtés) és az eddig még nem lakott területek igénybevételével összefüggő fűtés/hűtés. A népesség növekedésével együtt jár a helyváltoztatás igényeinek növekedése és a létfenntartással összefüggő logisztikai tevékenység növekedése is.

2. táblázat. A Föld népességének változása

Időszak	Időtartam (év)	Népesség az időszak elején (millió fő)	Népesség az időszak végén (millió fő)	Népesség-növekedés (millió fő)	Növekedési ütem (ezer fő/év)
Kr. e. 10 000–7000	3 000	5	10	5	1
Kr. e. 4500–2500	2 000	20	40	20	10
Kr. e. 2500–1000	1 500	40	80	40	26
Krisztus születése –900	900	160	320	160	177
900–1700	800	320	600	280	350
1850–1950	100	1 200	2 500	1 300	13 000
1985–2015	30	5 000	7 400	2 400	80 000
2015–2100	85	7 400	10 500	3 100	36 470

A *bioenergetika alapanyagául* szolgáló anyagokat (energiahordozók) három nagy csoportba soroljuk, azaz megkülönböztetünk elsődleges, másodlagos és harmadlagos biomasszákat.

Az *elsődleges (primer)* biomasszák a növényi biomasszák, azok amelyek a Nap energiáit hasznosítva a légköri szén-dioxid és a talajból származó víz felhasználásával jönnek létre, és tárolják a megkötött napenergiát mindaddig, amíg valamilyen biológiai, kémiai, termikus vagy egyéb folyamat nem eredményezi annak felszabadulását. Energiahordozóként nagymértékben hasonlítanak a szilárd fosszilis energiahordozókra, de a belőlük folyó energiatermelés a fosszilis bázisú energiatermeléshez viszonyítva a földi szénforgalomban alapvetően eltérő:

- A fosszilis energiahordozó hasznosítása (a kötött karbon oxidálása) közben az évmilliókkal korábban megkötött szénből jön létre szén-dioxid, amely a légkörbe jut, míg a friss biomassza esetében a jelenkori biológiai ciklusban a szén megkötése O_2 felszabadulásával jár együtt, majd az energiatermelés az újonnan megkötött karbont alakítja át szén-dioxiddá, ami folyamatosan újra lekötődik (CO_2 -neutrális energiatermelés). A megújuló biomasszából keletkező CO_2 tehát nem növeli a légkör CO_2 -tartalmát.
- Még kellően nem vizsgált az a tény, hogy a lignocellulózok termesztése vagy hasznosítása közben rövidebb-hosszabb idejű karbontárolás is történik (humusz, termék stb.). Például a természetes faanyag szokásos felhasználása (épületek, belsőépítészet stb.) esetében a tömör faanyagokban (és faalapú termékekben) igen hosszú időre marad a szén kötött állapotban. A növénytermesztés esetében a föld alatti gyökérzetben a betakarítást követően a talajban marad a teljes növénytömeg 12–20%-a, és ebből, valamint a talajra hulló levélzet és hajtásrészek lebomlásával (a föld alatt oxigéntől részben elzárva) bonyolult szénvegyületek (humusz) jönnek létre, amelyek a talajkolloidokkal tartós, a víz megkötését segítő vegyületeket képeznek, és a szén hosszú időre megkötve tárolják. Ezek a folyamatok a lignocellulózok termesztése esetében tehát nemcsak a CO_2 -neutrális energiatermelést, hanem bizonyos mértékben a szén megkötését és a légkör O_2 -tartalmának növekedését is eredményezik.

Az energetikai célra figyelembe vehető elsődleges biomasszák eredetük szerint lehetnek

- növénytermesztési technológiák melléktermékei:
 - lágú szárú kultúrnövényeink esetében a szár, szalma, maghéj stb.,
 - gyümölcs-/szőlőtermesztés esetében a metszési és selejtezésből származó fás anyagok,
 - erdőgazdálkodásban folyó végvágások, nevelővágások és egészségügyi kitermelések más célra nem használható dendromaszái,
 - a primer fafeldolgozás kezeletlen melléktermékei;

- növénytermesztési technológiákból származó főtermékek:
 - az eredeti célra gazdaságosan nem hasznosítható dendromasszák (kereslet hiánya),
 - túltermelés miatt gazdaságtalanná vált növényi főtermékek (túltermelés),
 - energetikai célra termesztett lágy szárú (például energianád) és fás (sarlaztatásos, újratelepítéses) ültetvények anyaga.

A szilárd biomasszák mindenekelőtt közvetlen elégetéssel, hőtermelésben hasznosíthatók mint

- egységes tűzifa,
- energiafa (fűtőművek és erőművek) energiahordozójaként,
- vékonyfa-apríték (nyesedékek, fás energiaültetvények is),
- szalma bálázva,
- energianád bálázva,
- mezőgazdasági melléktermékek és faporok faforgácsok brikettálva vagy pelletálva.

Magyarországon korábban több szenes erőművet állítottak át fatüzelésre, illetve szén és biomassza együttégetésére. Ezeket az erőműveket nagyrészt leállították. Hasonló folyamatok játszódtak le a kisebb hőtermelők (hőközpontok) esetében is, amelyek vagy a korábbi hőigény megszűnése (fűtőművek, borászati üzemek, élelmiszergyártók hőigénye stb.) vagy az országos energetikai átrendeződések (gázkogeneráció gyors elterjedése a távhőszolgáltatásban) miatt váltak gazdaságtalanná. Új energiapolitikai döntések is születtek. A jelenleg érvényes fejlesztési koncepciók szerint a biomassza-bázisú hőtermelők maximális teljesítménye kogenerációban 40 MW, csak hőtermelésben 20 MW lehet.

A biomasszabázis jelenleg még több újabb hőtermelő egység üzemeltetéséhez is rendelkezésre áll, így városainkban a gázbázisú fűtőművek kiváltása is indokolt lenne. Kisebb települések esetében 0,5–2,5 MW teljesítményű hőközpontok telepítése lenne célszerű, ahol a kisebb közösségi hőszolgáltató létesítmények mellett olyan hőközpontok létesítése indokolt, amelyeknél a biomassza-tüzeléses alaplétesítményt napkollektorral és napelemmel is felszerelik, és ezzel a nyári időszakban környezetkímélő módon lehet a közösségi épületek vagy a rendszerbe kapcsolt lakások hőellátását is megoldani, kihasználva az alapfűtőmű fontos alapképességeit (például hőtároló).

A technológiai fejlesztések Magyarországon nagyon vegyes hatások között folytak. Bár lassan, de érzékelhetően tudatosult a tény, hogy a klímaváltozás megjelent, illetve egyre intenzívebb, de a biomassza-bázisú energiatermelés fejlődését-elterjedését meghatározó mértékben befolyásolja a téma nem kiterjedt ismertsége (az oktatás hiányosságai), a biomassza-bázisú energiatermelés vita-

tott társadalmi támogatottsága és a tartós alapanyagbázis bizonytalan ismerete (agrárpolitika), valamint az átgondolt, rendszerszemléletű környezetvédelmi szabályozó rendszer hiánya. A külföldi K+F-eredmények gyors honosítása még nem ment végbe, és a hazai kutatási eredmények gyakorlatban történő hasznosításához nem alakult ki megfelelő adaptációs rendszer.

A közvéleményben a téma megítélése megrekedt azon az ismereti szinten, hogy a klímaváltozás globális hatások eredménye, és azt a hazai cselekedeteinkkel érdemben nem tudjuk befolyásolni, ezért a biomasszák energetikai hasznosítását egyszerűen ökonómiai kérdésként értékelték (közvetlen gazdasági összevetés más energiákkal), és az alapanyagbázist sem fejlesztették megfelelően. Ugyanakkor az igen sokféle technológiai fejlesztés és az ezekkel kapcsolatos kutatások számos tapasztalat megszerzését is lehetővé tették.

Igen fontos a biomasszák égetéses hasznosításán belül a tüzeléstechnikák fejlesztése. Az ilyen irányú fejlesztések a legkisebb háztartási tüzelőberendezésektől a nagy fűtőművi vagy erőművi berendezésekig szükségesek. Ma már közismert (sajnos a lakosság és a kisüzemek esetében még alig ismert) az a tüzeléstechnikai alapszabály, amely szerint minden biomassza-tüzelőanyagot mint energiahordozót csak az eltüzeléséhez kifejlesztett berendezésben és megfelelően homogenizálva, optimális nedvességtartalom mellett lehet jó hatásfokkal hőtermeléshez felhasználni. A megfelelő darabolással/aprítással érhető el az alapanyag leghatékonyabb kigázosodása, és a megfelelő nedvességtartalom mellett a legjobb az energetikai határfok. (1 kg élőnedves faanyag fűtőértéke 8-9 MJ/kg, légszáraz állapotban 17-18 MJ/kg.) A nedves biomassza égetésekor a füstgázokban sok káros anyag is jelen van, és jut a levegőbe.

Az elsődleges biomasszák a jövőben várhatóan a decentralizált hőtermelésben kerülnek hasznosításra.

- Direkt égetés (oxidáció) hőtermeléshez.
A fejlesztések az energiamérleg és a határfokjavítás, illetve a környezeti károsítás csökkentésének céljával folynak. A terjedésének üteme a közelmúltban lassult, mert a környezetvédelmi előírások szigorodása (füstgázokban a finompor-emisszió korlátozása) a tüzelőberendezések fejlesztését teszik szükségessé.
- A biomassza nem közvetlen hőtermelési célú felhasználásához több hagyományos és sok új technológia kapcsolódik. A megoldás lehet a
 - mechanikai kezeléssel átalakítás (például sajtolás olajok kinyeréséhez, energetikai tömörítvények [brikett, pellet] előállításához),
 - vegyi átalakítás (biohajtóanyagok vagy adalékok előállítása stb.),
 - termikus átalakítás (frakcionálás, kigázosítás, elgázosítás, lepárlás stb.) gázbázisú hőtermeléshez, motor hajtóanyagául felhasználva, gázturbinákhoz, bioszén előállításához stb. Az utóbbi időben intenzív fejlesztések folynak pirogázok, piroolajok előállításával kapcsolatban,

- biokémiai átalakítás (fermentáció, biogáztermelés) gázbázisú hőtermeléshez, motorok hajtóanyagául felhasználva, gázturbinákhoz stb., illetve bioalkoholok előállítására motorok üzemanyagául illetve hajtóanyag-adalékként),
- egyéb technológiák.

A felsorolt technológiák fejlesztése folyik, és a várható általános energetikai trendváltozások a folyamatokat gyorsítani fogják.

Az alapanyagbázis változásának tendenciái:

A szilárd elsődleges biomasszák klímavédelmi és gazdasági szempontból is rendkívül fontosak, ezért a várható alapanyagbázis becslése és fejlesztése is fontos. A biomasszabázis a jelenleginél jelentősen több felhasználó kapacitás üzemeltetéséhez rendelkezésre áll, de pontos felmérése és ezzel megismerése még nem történt meg. A jövőre vonatkozó, megalapozó kutatási eredményként kell figyelembe venni a csapadéokra és a hőmérsékletre vonatkozó prognózisokat. Ezeket figyelembe véve a klímaváltozás várható hatásaként számolni kell a hagyományos növénytermesztés produktumának csökkenésével, az erdők hozamának csökkenésével és egészségi állapotuk romlásával.

A növénytermesztés összes hozamának bővítéséhez elkerülhetetlen lesz újabb, melegnek és légköri aszálynak jobban ellenálló fajták nemesítésével, illetve honosításával próbálkozni, valamint az öntözést egyre nagyobb mértékben alkalmazni.

A melléktermék biomasszák kiterjedt hasznosítása mellett feltétlenül szükséges lesz az energetikai ültetvények jelenleginél nagyobb mértékű terjesztése is (főtermékbázis növelése).

A lágú szárú növényekkel létrehozott ültetvényekhez a gyorsan növekvő és nagy hozamú növényeket kell alkalmazni. A klímaváltozást is figyelembe véve mindegyiknél a C4 típusú (magasabb hőmérsékleten is asszimiláló) növények vehetők figyelembe, és célszerű az öntözésüket is megoldani, elsősorban tisztított szennyvizek és fermentlevek felhasználásával.

A fás energetikai ültetvények a fa-biomassza (dendromassza) előnyös tulajdonságai (kis hamutartalom, alacsony kén-tartalom, egyszerű tárolhatóság stb.) miatt változatlanul fontos energiahordozó bázisok maradnak, és a dendromassza a decentralizált energiatermelés alapanyagául szolgál (lakossági fűtés, mini fűtőművek kistelepüléseken stb.). Az energetikai faültetvényekkel kapcsolatos hazai tapasztalatokat és az EU „zöldítési” programjait figyelembe véve a célültetvények mellett vagy helyett az erdőtelepítést, a nem erdőművelési ágba tartozó fásításokat (fasorok, utak menti fásítások, mezővédő erdősávok stb.) célszerű előnyben részesíteni. Ez azt jelenti, hogy mindegyiknél az agroerdészeti technológiákat kell terjeszteni, mert az utóbbi és az EU-ban korszerűnek ismert és támogatott módszerekkel a mezőgazdasági területeken a mikroklíma

és a vízháztartás javulása, a hagyományos növénytermesztés, illetve a legeltetés hozamainak növelése érhető el. Fásítások és faültetvények létesítése esetében az öt–tizenöt éves vágásfordulóval folyó ültetvényüzemeltetést kell előnyben részesíteni, mert ez a módszer a nem szántóföldi területekre is kiterjeszhető, illetve az ilyen ültetvények mikroklimára gyakorolt hatása is kedvezőbb a minirobtációnál. Tapasztalataink alapján megállapítható, hogy a lignocellulózok energetikai célú termesztésekor a technológiákat minden esetben a növénytermesztő és az energetikai felhasználó nagyon szoros és hosszú távú együttműködésére alapozva kell megvalósítani.

A *másodlagos (szekunder)* biomassa létrejöttének alapanyagbázisa az elsődleges biomassa, energiaforrása a nem növényi élővilág (állatvilág, rovarok, mikroorganizmusok stb.) egyedeiben végbemenő konverziós folyamatokból (táplálkozás) származik, döntően oxidációs folyamatok révén. Vagyis a másodlagos biomassa az elsődleges biomassa átalakítása (táplálkozás) közben fejlődő (állati) szervezetek felépítése során jön létre. A másodlagos biomasszák mint energiahordozók a táplálkozásban töltik be szerepüket, fő zsír- és fehérjeforrások. Szerepük a közvetlen energiatermelésben elhanyagolható, és növekedés a jövőben sem várható.

A *harmadlagos (tercier)* biomassa az elsődleges és másodlagos biomasszák természetes konverziója során létrejövő, illetve a feldolgozásuk technológiáiból származó anyagok összessége. A legváltozatosabb alapanyagbázis. Az alapanyagok megjelenési formáik szerint lehetnek szilárdak, folyékonyak és gázneműek. A harmadlagos biomasszák hasznosítását korábban a mezőgazdaság (növénytermesztés) anyagforgalmi rendszerében oldották meg (trágyakiszórás, kiöntözés szántóterületeken). Az új technológiák terjedését hulladékok és melléktermékek mennyiségének rohamos növekedése (iparszerű állattartás, szennyvíztisztítás, települési kommunális hulladékok) és azok környezetvédelmi okok miatt szükséges ártalmatlanítása kényszerítette ki, később a tevékenység elterjedését a megfelelő technológiák által előállított energiahordozók iránt megjelenő kereslet gyorsította.

A legfontosabb alapanyagok:

- a növénytermesztés más célra nem használható melléktermékei (zöldségtermelés, takarmánytermelés, iparinövény-termesztés melléktermékei/hulladékai),
- az élelmiszergyártás, -feldolgozás, -forgalmazás stb. hulladékai,
- a kommunális technológiák (például szennyvíztisztítás) melléktermékei,
- az állattartás melléktermékei, hulladékai (trágyák stb.).

Ezek az anyagok korlátozott körülmények között vagy speciális technológiák esetében (például: erőművekben szennyvíziszap égetése szénnel keverve, hulladékégetőben hőtermelés) égetéses hőtermeléshez is felhasználhatók. Újabb és meghatározó mértékben a harmadlagos biomasszák energiatermelési célú hasznosítása a biogáztermelés.

Ezzel a technológiával biogáz ($\text{CH}_4 = 30\text{--}60\%$, $\text{CO}_2 = 65\text{--}35\%$, egyéb = $0\text{--}5\%$) állítható elő. Biogáz előállítására már korábban is folyt, és kezdetben a kommunális hulladék-lerakók megfűtésével kitermelt depóniagázt használták fel hőtermeléshez, később gázmotorok üzemeltetésére. A közelmúltban a környezetvédelmi nemzetközi megállapodásokban rögzített célok miatt (csökkenteni kell a fosszilis gáz felhasználását) korszerű fermentációs technológiákban a földgázfelhasználás kiváltására növekszik a biogáztermelés. Korábban nagy biogáztelepeket létesítettek, napjainkban kis teljesítményűek ($100\text{--}500\text{ kW}$) létesülnek kistelepüléseken és vállalkozások (kisebb húsüzemek, zöldségfeldolgozók, élelmiszerhűtők, éttermek, panziók) mellett, mert így az alapanyagok könnyen és gyorsan begyűjthetők, az energia pedig lokálisan hasznosítható. A fermentációs technológia nagy előnye, hogy az alapanyagok sok értékes anyaga a fermentiszap és a fermentlé mezőgazdasági területekre kijuttatásával növényi tápanyagként hasznosul.

A legújabb fejlesztési eredményként lehetőség van a biometán előállítására is. Az új technológiával a biogázból a megfelelő membrános szűrővel leválasztják a CO_2 -ot, és az így nyert, 99% -ot meghaladó tisztaságú CH_4 motorok hajtásához használható, újabban közüzemi hálózatba táplálva gázfogyasztók ellátására használják. Kedvező lehetőségek vannak sűrített gázként tartályokban lokális felhasználóknál történő telepítésre vagy járművekre építve a motor (például városi autóbusz) környezetbarát üzemeltetésére is.

A téma összefoglaló értékeléseként megállapítható, hogy a biomassza energetikai hasznosításával kapcsolatban korábban hangoztatott fő indok (a fosszilis energiahordozók készleteinek kimerülése) nem nyert bizonyítást, a fosszilis energiahordozók ára nem csökken, forrásai középtávon bővülnek, ugyanakkor a klímaváltozás várható hatásainak felismerése a nemzetközi szervezetek eddig példátlan összefogását eredményezte. Jelentős, a szén-dioxid-kibocsátás és a fosszilis energiahordozók felhasználásának mérséklésére irányuló megállapodások születtek, amelyek érvényesítésének határidői minden korábbinál közelebbiek, és a vállalt kötelezettségek nem teljesítőinél szankciók alkalmazása is számításba jöhet. Ezzel a bioenergetika új megvilágításba került, és kiemelt fejlesztésének tudományos és politikai alapjai is létrejöttek.

IRODALOM

- Gergely K. – Varró L. (2004): Megújuló energiaforrások Magyarországon – gazdaságossági vizsgálat. *Öko. Ökológia, környezetgazdálkodás, társadalom*, XII, 1–2.
- Marosvölgyi B. (2014): A biomassza energetikai hasznosítása. In: Bai A. (szerk.): *A biomassza felhasználása*. Budapest: Mezőgazdasági Kiadó
- Whittaker, R. H. (1975): *Communities and Ecosystems*. Macmillan
- Whittaker, R. H. (ed.) (1978): *Classification of Plant Communities. (Handbook of Vegetation Science)* Kluwer Academic Publishers

A BIOMASSZA ENERGETIKAI HASZNOSÍTÁSÁNAK ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMA

ECOLOGICAL FOOTPRINT OF BIOMASS ENERGY USE

Szlávik János¹, Sebestyénné Szép Tekla²

¹ az MTA doktora, egyetemi tanár, Eszterházy Károly Egyetem, Gazdaságtudományi Intézet, Eger
szlavik.janos@uni-eszterhazy.hu

² egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Világ- és Regionális Gazdaságtan Intézet, Miskolc
regtekla@uni-miskolc.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A világ energiaellátása átalakulóban van, egyre gyakrabban találkozhatunk a globális energiadilemma kérdéskörével, amely a növekvő energiaigények és az energiaforrások felhasználásával kapcsolatos egyre intenzívebb környezeti hatások közötti feszültséget vizsgálja, és lehetséges megoldási javaslatok után kutat. A központi kérdés az, hogyan tudjuk úgy növelni az energiafelhasználást, hogy közben nem növeljük az üvegházhatású-gázok kibocsátását (sőt a klímavédelmi célokkal összhangban csökkentjük azokat), tehát áttérünk egy alacsony szénfogyasztású gazdasági modellre, megszakítjuk a gazdaság hajtóerői és a környezeti terhelés közötti kapcsolatot. Nem csupán energiaátmenetről szükséges beszélni, hanem fel kell hívni a figyelmet a fenntartható energiaátmenet fontosságára. Tanulmányunk fő célja, hogy bemutassuk az ökológiai lábnyomot, rávilágítsunk az ökoszisztéma-szolgáltatások értékelésével kapcsolatos problémákra. Számszerűsítjük az egyes energiafajták karbonlábnyomát a villamosenergia-termelésben, kitérünk a biomassza ellentmondásaira, különös tekintettel a karbonsemlegességre. Eredményeink szerint az erőforrás-szétválásnak a hatás szétválásában is tükröződnie kell, melyet a Visegrádi Négyek ökológiai lábnyomának elemzésével vizsgálunk.

ABSTRACT

The world energy supply is in transition, the topic of global energy dilemma can be seen more and more often in the scientific literature. It focuses on the tensions related to the future availability of fossil fuel sources and the environmental impact of their exploitation, and it searches for potential solutions. The central issue is how we can meet the rapidly growing energy demand without increasing the greenhouse gas emission (moreover we decrease this emission with regard to the climate protection goals), so we manage the transition to a low-carbon energy system and breaking the link between the environmental pressure and economic driving forces. We should focus not only on energy transition, but we should draw attention to sustainable energy transition. The main objective of this study is to show the ecological footprint and to highlight the problems related to the estimation of the economic value of ecosystem services. We quantify the carbon footprint of energy sources in the electricity production, and the contradictions of biomass regarding the carbon neutrality hypothesis of biomass are also discussed. In our view the consequences of resource decoupling should be reflected in the impact of decoupling as well, and our analysis utilized the concept of the ecological footprint.

Kulcsszavak: ökológiai lábnyom, karbonlábnyom, zöld energia, biomassa

Keywords: ecological footprint, carbon footprint, green energy, biomass

A MEGÚJULÓ ENERGIÁK SZEREPE A FENNTARTHATÓ GAZDÁLKODÁSBAN

A fenntartható gazdálkodás felé tett lépések között meghatározó az energiagazdálkodás, amelyben egyre jelentősebb a megújuló energiaforrások szerepe. Az energiagazdálkodás ökoszisztémára gyakorolt hatásának követése nagy kihívást jelent, és viszonylag jó mutatóként használható erre az ökológiai lábnyom.

Mi az ökológiai lábnyom, és mire jó?

Az ökológiai lábnyom viszonylag új fenntarthatósági mutató. Fogalmát a szerzők a következőképpen fogalmazzák meg: „Ökológiai lábnyom az a föld- (és víz-) terület, amelyre egy meghatározott emberi népesség és életszínvonal végtelen ideig való eltartásához lenne szükség. Annak mértéke, hogy mennyi termékeny földre és vízre van szüksége egy személynek, városnak, országnak vagy az emberiségnek az összes elfogyasztott erőforrás megtermeléséhez és az összes megtermelt hulladék elnyeléséhez, az uralkodó technológia használatával. Ez a föld bárhol lehetne a világon. Az ökológiai lábnyomot területegységekben mérik” (Wackernagel et al., 2002).

Az ökológiai lábnyom fogalma azon a felfogáson alapszik, hogy az anyag- vagy energiafogyasztás minden tételénél szükség van egy vagy több ökológiai rendszerben bizonyos mennyiségű földre a fogyasztás erőforrásáramaihoz és a hulladék elnyeléséhez. Ily módon egy bizonyos fogyasztási osztály földhasználatát fel kell becsülni. Mivel nincs mód a világon fellelhető fogyasztási cikkek mindegyikének az életciklus-elemzésére, ezáltal a szükséges föld felmérésére, így a számítások a főbb osztályok meghatározására és néhány egyedi cikk kiválasztására korlátozódnak.

Az ökológiai lábnyom összetevői

Az ökológiai lábnyom számítása során hat fő összetevővel számolnak. Ezek a legeltetés, az erdőszet, a beépített területek, a szántóföldek, a halászati területek és a szén-dioxid. Ezek közül az energiával összefüggésben kiemelkedően fontos összetevő a karbonlábnyom (CO₂). A karbonlábnyom adatok a statisztikában súlymértékben vannak megadva, az ökológiai lábnyom mértékegysége azonban a globális hektár. Az átszámításra az egyik jellemzően alkalmazott módszer,

amikor a szén-dioxid-kibocsátás „elnyelésére” elegendő erdőterület nagyságával számolunk.

A Global Footprint Network (2016) adatait alapul véve, a Föld ökoszisztéma-szolgáltatásai alapján számolva a globális biokapacitás nagysága 2012-ben 1,7 globális hektár volt, egy főre vetítve. Az emberiség ezt a szintet, vagyis a Föld „fenntartható” ökoszisztéma-szolgáltató kapacitásának határát 1970 körül érte el. Jelenleg ott tartunk, hogy közel 50%-kal használjuk túl az ökoszisztéma-szolgáltatások önmegújuló kapacitását. Mivel, mint látjuk, az ökológiai lábnyom összetevői között közel 50%-kal szerepel a karbonlábnyom, és a lábnyom nagyságát jelentősen befolyásolja az energiagazdálkodás nagysága és milyensége, indokolt az energiafajták ökológiai lábnyomának vizsgálata. Ismeretes, hogy míg a fosszilis energia felhasználása jelentős, addig a megújuló energia felhasználása sokkal kisebb CO₂-kibocsátást eredményez. A kérdés az, hogy pontosan mekkora a potenciális környezeti terhelés megújulókkal elérhető csökkenése.

Mielőtt a fenti mutatóval történő részletes nyomon követést elkezdenénk, megemlítünk néhány kritikai észrevételt az ökológiai lábnyom mint mutató számításával kapcsolatosan. Itt van rögtön az ökoszisztéma-szolgáltatásokkal kapcsolatos eltérő megközelítés az ökológusok és az ökonómusok között. A megértéshez Richard B. Norgaard (2011) alábbi gondolatait idézzük, aki egy nagy hatást kiváltó tanulmányában kételyeit írja le az „ökoszisztéma-szolgáltatások” eredeti megfogalmazásának elferdítésével kapcsolatban. Kifejező a tanulmány alcíme is: „Hogyan vált egy szemléletes metafora a lényeg elhomályosítójává”. A metafora a következő: „A természetre úgy is tekinthetünk, mint egy meghatározott méretű tőkeállományra, amely az ökoszisztéma-szolgáltatások korlátozott áramát tudja csak eltartani” (Norgaard, 2011, 61.). Ez a metafora az ökológiai közgazdászok részéről azért került megfogalmazásra, hogy feltárja a gazdaság „mindenhatóságát” hirdető uralkodó közgazdasági nézetekkel szemben az emberiség valódi viszonyát a természettel, kifejezve vele a környezeti fenntarthatóság lényegét. A fenti metafora azonban a millenniumi ökoszisztéma-felmérés (Millennium Ecosystem Assessment 2003–2005) központi keretrendszerévé vált. Az ökológusokkal szemben pedig elvárás lett, hogy a korábbiaknál pontosabb elméleti és gyakorlati eljárást adjanak arról, hogy a természeti tőke miként biztosítja az ökoszisztéma szolgáltatások áramát. A fő gond azonban az, hogy az ökoszisztéma nagyon összetett rendszer, amely nem illeszthető be egy vagy akár néhány tényezőként a világgazdasági modellekbe. Ugyanakkor, amint azt Norgaard megállapítja, „Az ökológia tudománya jelen pillanatban nem rendelkezik olyan előrejelző képességgel, amellyel meg lehetne határozni, hogy mikor tekinthető fenntarthatónak egy-egy ökológiai szolgáltatás használata” (Norgaard, 2011, 64.). Ennek gyakorlati illusztrálására leírja, hogy a millenniumi ökoszisztéma-felmérés készítői gyakran olyan eseteket sem

tudnak dokumentálni, amikor az ökológusok között egyetértés lett volna abban, hogy egy populáció mikor fog összeomlani, vagy hogy egy ökológiai rendszer mikor lép át egy meghatározott állapotából egy másikba (lásd részletesen Szlavik, 2013, 53–58.).

Nem Norgaard az egyetlen, aki bizalmatlan a közgazdászok számos esetben leegyszerűsítő számításaival szemben. Számos ökológus foglal állást a természet gazdasági értékelése ellen. Ernst F. Schumacher is nagyon bizalmatlan ezzel kapcsolatban, amikor kijelenti, hogy ha árat adunk a természeti javaknak, eláruljuk a természetet. Ennek a vállalkozásnak (mármint a természet piaci értékelésének) mégsem a logikai képtelensége a legnagyobb hibája: ennél is rosszabb, és a civilizációra nézve pusztítóbb hatású, hogy mindennek ára van, vagy más szóval, hogy a pénz minden érték között a legnagyobb (Schumacher, 1991, 45.).

A fenti kijelentés elgondolkodtató. Azonban azoknak is igazuk van, akik azt mondják, hogy a fejlődés érdekében ki kell használni a piac lehetőségeit, „intelligenciáját”. Például Kenneth E. Boulding vélekedése szerint sok probléma abból adódik, hogy számos természeti erőforrásnak nincs reális ára, és az emberek nem fizetik meg a szennyezésük által okozott károkat. Ha az embereknek meg kellene fizetniük azokat a károkat, amelyek az általuk okozott kellemetlenségek miatt következtek be, sokkal több erőforrást lehetne ezeknek a kellemetlenségeknek a megelőzésére fordítani (Boulding, 1993, 18.).

Noha az ökológiai lábnyom nem jut el a pénzben történő értékeléshez, hiszen a mértékegység ebben az esetben a globális hektár, de a súlyok megadásával alkalmas lehet gazdasági kalkulációk alapjául szolgálni, bár ez esetben már fennáll a torzítás veszélye. Igen ám, de a megőrzésről vagy a fejlesztésről történő döntések gazdasági kalkulációk alapján születnek. A tapasztalat pedig az, hogy a gazdasági és politikai döntéshozók nem tudják kezelni a végtelen fogalmát (végtelen nagy érték, végtelen nagy kár). Hajlamosak a végtelent nullával helyettesíteni. Többnyire kihagyják a kalkulációból. Természetesen vannak olyan kérdések, amelyek monetárisan valóban nem meghatározhatók. Ezek a szigorú fenntarthatóság sarokkövei, amelyek fejlesztési korlátként, mintegy a hosszú távú jövő áthatolhatatlan sziklafalaként kell hogy álljanak a rövid távú gazdasági döntések (érdekek) előtt. Esetünkben ilyen sziklafal az, hogy a fenntarthatóság megvalósítási folyamatában a nem megújuló (fosszilis) erőforrások nem jelentenek hosszú távú alternatívát.

A megújuló energiaforrások elemzésekor (az idézett viták figyelembevételével is) azonban használhatunk olyan mutatókat, mint például az ökológiai lábnyom. A továbbiakban az egyes energiafajtákat és a Visegrádi Négyek ökológiai lábnyom-adatait elemezzük.

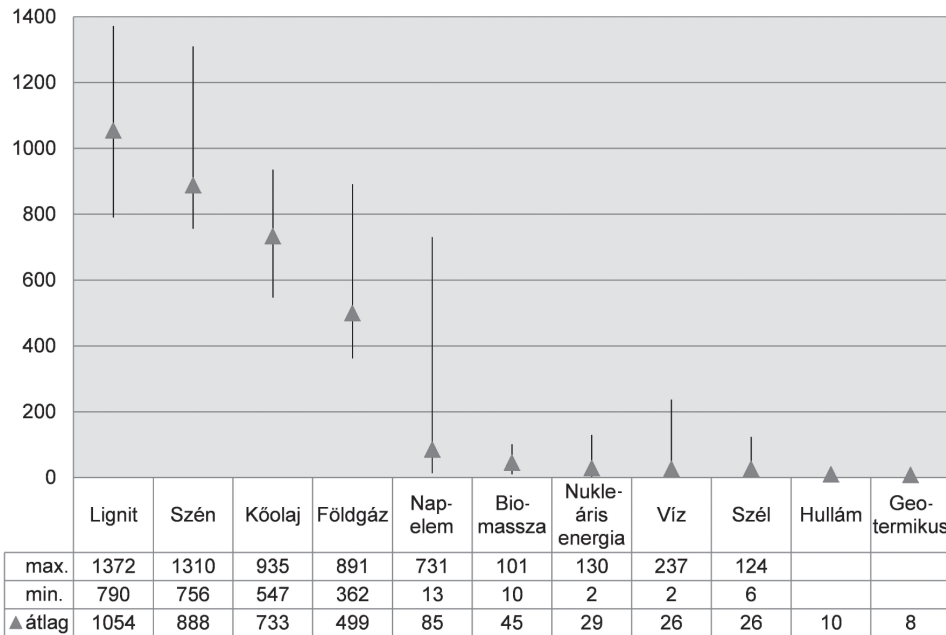
AZ ENERGIAFAJTÁK ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMA

A nem megújuló és megújuló energiaforrások ökológiai terhelése

Az egyes energiaforrások karbonlábnyomát vizsgálva a nem megújuló (fosszilis) energiaforrások és a megújuló energiaforrások között számottevő különbségek vannak. A World Nuclear Association több mint húsz tanulmány eredményeit vizsgálta meg, arra keresve a választ, hogy a meglévő (az ISO 14040:2006 és 14044:2006 alapján végzett) életciklus-elemzések szerint mekkora az egyes energiaforrások karbonlábnyoma a villamosenergia-termelésben (az eredményeket összegzi az 1. ábra). Eszerint a megújuló energiaforrások nagyságrendekkel hatékonyabbak az emisszióintenzitás szempontjából, mint a fosszilis energiaforrások. Míg a legszennyezőbbnek számító lignit és kőszén esetében a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan 1054, illetve 888 tonna CO₂e/GWh, addig a biomassza esetében ugyanez az érték mindössze 45. A legkisebb környezeti terhelést a szél- és vízenergia felhasználása jelenti (legalábbis a klímaváltozás szempontjából). Ez nem meglepő, például a napelemek esetében csak az előállítás folyamatánál számolhatunk emisszióval, míg a húsz-harminc évnyi működési időtartam alatt nem. Az IPCC (2012) adatai szerint a geotermikus, illetve a hullámenergia még ennél is kedvezőbb, esetükben mindössze 8, illetve 10 tonna CO₂e/GWh a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan. Így joggal nevezhetjük az alacsony karbonlábnyommal bíró megújuló energiaforrásokat zöld energiának, míg a magas karbonlábnyomú fosszilizéseket barna energiának (Van Heddeghem et al., 2012). Az atomerőművek ebben az összehasonlításban igen zöldnek számítanak, esetükben a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan 29 tonna CO₂e/GWh, bár a nukleáris energia megítélése igen széles skálán mozog.

Mint az az 1. ábrán is jól látszik, a minimális és maximális értékek között nagyságrendi különbségek fedezhetők fel. Ez elsősorban az alkalmazott technológiától, a felhasznált energiaforrás minőségétől (például jelentősen eltér a nemzetközi árutőzsdéken jegyzett WTI-, Dubai vagy Brent-típusú kőolaj összetétele, így nyilván az elégetése során keletkező károsanyag-összetétele is), továbbá helyi vagy regionális jellemzőktől függ.

Úgy tűnhet, hogy a megújuló energiaforrások alkalmazása tökéletes megoldást jelent a környezeti problémákra. Vitathatatlan előnyeik mellett azonban néhány hátránnyal is számolnunk kell. Mint arra Ward Van Heddeghem és szerzőtársai (2012) is felhívják a figyelmet, jelentős terhelést jelentenek a meglévő energetikai rendszerekre, sok esetben a megújuló felhasználására alkalmas területek periferiákon helyezkednek el (például *off-shore* szélenerőművek), így meg kell oldani az energia szállítását, ami igen magas beruházási költségeket eredményezhet, továbbá megnöveli az energiaátalakítás veszteségét. Problémát jelent továbbá, hogy a megújuló energiaforrások környezeti terhelésénél a legtöbb esetben nem veszik



1. ábra. Energiafajták karbonlábnyoma a villamosenergia-termelésben (tonna CO₂e/GWh) World Nuclear Association (2011) és az IPCC (2012) adatai alapján saját szerkesztés

figyelembe, hogy tartalék fosszilis energiaforráson alapuló erőművi kapacitásra is szükség van. Szarka László (2010) szerint a szélenergia esetében 1 kW szél-erőművi kapacitás fosszilis tartalékigénye 0,7 kW.

A megújuló energiaforrások között talán a legellentmondásosabb a biomassza. Az IPCC (2014) becslése szerint a megújuló energia 2030-ig elérhető termelésében rejlő szén-dioxid mitigációs potenciál nagysága nagyjából 4070–6390 Mt CO₂e, amelyből a biomassza részesedése 1220 Mt CO₂e. Ennek költsége átlagosan kevesebb, mint 100 USD/tCO₂e, a biomassza esetében pedig 19,5 USD/tCO₂e. Ez alapján a biomassza olcsónak és nagy mennyiségben felhasználhatónak tűnik, ráadásul – a meglévő módszertanok szerint – erőn felül járul hozzá a CO₂-ki-bocsátás csökkentéséhez, amelyet a későbbiekben részletesen megmagyarázunk. Ugyanakkor a szén-dioxid mitigációs potenciál nagyságát nagymértékben befolyásolja az az alapfeltevés, hogy minek adunk nagyobb prioritást a termelésben: a bioenergetikai célú növényeknek vagy az egyéb, ugyanazon terület műveléséből származó mező-, illetve erdőgazdasági termékeknek (például élelmiszer, takarmány, fűrészáru). Ezt számos tényező befolyásolja: természetföldrajzi adottságok (például talajminőség, meglévő gyakorlatok, klímaváltozás, vízzel való ellátottság), meglévő termelési rendszerek, a helyi lakosság hozzáállása, beállítottsága, a biodiverzitás védelme, technológiai fejlődés.

A biomassza intenzívebb felhasználása számos negatív következménnyel járhat, fokozódhat a termőföldekért, a vízért, illetve egyéb termelési tényezőkért folyó verseny, amely az egyes erőforrások túlhasználatát és degradációját okozza (IPCC, 2014). A biomassza környezeti hatásának értékelésére számos módszertan alkalmazható, így az SPI (Sustainable Process Index), a környezeti LCA-elemzés, illetve a karbonlábnyom-számítás (Lam et al., 2010). Ez utóbbi számításánál a legtöbb esetben karbonsemlegességet tételeznek fel a biomassza esetében, ami azt jelenti, hogy a biomassza elégetése során keletkező szén-dioxidot nem veszik figyelembe a lábnyom számításakor, ez pedig a lábnyom alulbecsléséhez vezet (Johnson, 2009). A különbséget a karbonsemleges feltételezés függvényében az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A biomassza karbonlábnyoma a karbonsemlegesség függvényében (g CO₂eq/MJ)

Tétel	Biomassza		Földgáz
	karbonsemleges	nem karbonsemleges	
termesztéstől a betakarításig	2,5	2,5	3,6
feldolgozás	0	0	3,5
szállítás	0,25	0,25	7,8
elégetés	2,15	2,15	0,1
szénraktárak csökkenése		164,25	55
összesen	4,9	169,15	70

Johnson, 2009, 166. alapján saját szerkesztés

Ez a módszertani megközelítés az elmúlt években viták tárgyát képezi, tekintettel arra, hogy a karbonsemlegességnek nincs általános, mindenki által elfogadott definíciója. A WBCSD (2015) a következők szerint határozza meg azt: „a fotoszintézis során a napfény energiája és a légkörben található CO₂ tulajdonképpen növényi szövetekben tárolt kémiai energiává válik, amelyet biomasszának nevezünk. [...] Amikor a biomassza elég, elpusztul vagy egyéb módon oxidálódik, a kémiai energiája és a benne tárolt CO₂ felszabadul, és visszajut a légkörbe, bezárva ezzel a természetes szén ciklus folyamatát.” Amennyiben a felszabaduló CO₂-ot teljes mértékben megköti az újonnan növekvő biomassza, akkor a szén ciklus egyensúlyban van. Hosszú távon tehát a megkötött szén-

dioxid visszatér a légkörbe, függetlenül attól, hogy felhasználják-e a gazdasági folyamatok során vagy sem. A probléma akkor kezdődik, amikor megbomlik ez az egyensúly. Mind az IPCC (2017), mind az Európai Bizottság (European Commission, 2014) elismeri, hogy a karbonsemlegesség csak akkor teljesül, ha a szóban forgó biomassa fenntartható gazdálkodásból származik, és a feldolgozás során keletkező pótlólagos CO₂-kibocsátást abban a gazdasági szektorban számolják el, ahol keletkezik. Ugyanakkor a kritikusok (például Johnson, 2009) szerint – kicsit leegyszerűsítve – ez alapján nincs különbség egy élő erdő vagy ugyanolyan mennyiségű tűzifa között.

Elsődleges fontosságú tehát a szénraktárak (carbon pool) bevonása az elemzésekbe (ezek változásának mérése), amely magában foglalja a föld alatti és feletti biomasszát, az elpusztult növényzetet (például korhadó fatörzsek), a talajt, a növényi hulladékot és a betakarított faanyagot (European Commission, 2014).

A fenntarthatósági hatás becslése

Az ökológiai lábnyom számításánál több lehetőséget biztosít a környezeti hatások átfogó elemzése, illetve a komplex fenntarthatósági vizsgálat. A környezeti hatások komplex értékelésének elfogadott metodikája van, és Magyarországon is alkalmazzák mint stratégiai környezeti vizsgálatot. Ez utóbbi a jövőbeni fejlesztések alapjául szolgáló tervek és programok összessége, a területi tervek környezeti hatásának értékelése (lásd Szlávik et al., 2007). A fenntarthatósági vizsgálat ennél komplexebb, de elméleti kidolgozottsága kezdetlegesebb. A fenntarthatósági elemzés során a fenntartható fejlődés mindhárom dimenziója (természet, társadalom, gazdaság) tárgya az elemzésnek. Ugyanakkor vizsgálati szempont a fenntarthatóság hármas értelmezése (erős fenntarthatóság, gyenge fenntarthatóság, környezeti fenntarthatóság) is. Különösen a hosszú távú hatásokkal járó energiafejlesztéseknél elengedhetetlen az idődimenzió helyes kezelése. Ehhez kapcsolódóan komoly feladatot jelent a diszkontálás valós rátájának a kiválasztása. Ez utóbbi kérdés különösen a nagyon hosszú távon ható nukleárisenergia-termelés esetében kritikus. Ez esetben ugyanis a szokásos gazdasági beruházások esetében használt diszkontárta az atomerőművekhez kötődő hosszú távú negatív externáliák és kockázatok jelen értékét irreálisan alacsonynak mutatja (lásd Szlávik, 2013).

A megújuló energiaforrások komplex környezeti hatásának rangsorát Dombi Mihály (2014), valamint Robert Costanza és szerzőtársai (1997) alapján a 2. táblázat tartalmazza (1-es sorszám jelöli azt a megújuló energiaforrást, melynek a legkisebb a komplex környezeti hatása, 5-ös sorszám a legnagyobbat). Megjegyezzük, hogy a sorrendet a helyi feltételek és hatások, továbbá a hihetetlen mértékű technológiai fejlődés (különösen a napenergia vonatkozásában) módosíthatja.

2. táblázat. A megújuló energiaforrások komplex környezeti hatásának rangsora, emelkedő sorrendben

Világ	Magyarország
○ vízenergia	• szélenergia
○ geotermikus energia	• napenergia
○ napenergia	• geotermikus energia
○ szélenergia	• vízenergia
○ biomassa	• biomassa

Dombi (2014) és Costanza et al. (1997) alapján saját szerkesztés

A SZÉTVÁLÁS KÖZELÍTÉSE ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMMAL – A VISEGRÁDI NÉGYEK PÉLDÁJA

A fenntartható fejlődés egyik központi kérdése és elérésének célja, hogy a gazdasági fejlődés csökkenő mértékű erőforrás-felhasználás és környezeti terhelés mellett valósuljon meg. Századunk egyik legnagyobb kihívása az alacsony karbonintenzitású, az erőforrásokat hatékonyan használó zöld gazdaság felé történő elmozdulás megvalósítása. Az ENSZ környezetvédelmi programjának (UNEP, 2011) adatai szerint, ha a fogyasztás jelenlegi – fenntarthatatlan – szintje nem változik, akkor 2050-ig háromszorosára nőhet az erőforrás-felhasználás a világon. Ezt figyelembe véve, a gazdaság hajtóerői (gazdasági növekedés, GDP) és a környezeti terhelés közötti kapcsolat megszakítása, vagyis a szétválásra törekvés még sürgetőbb, kulcsfontosságú lehet a fenntartható gazdálkodás megvalósításában.

Korábbi tanulmányunkban (Szlávik–Sebestyén Szép, 2018) megvizsgáltuk a végső energiafelhasználás és a gazdasági növekedés 1990 és 2015 közötti szétválását a Visegrádi Négyek országai esetében. Eredményeink szerint döntően többségben voltak azok az évek, amikor megvalósult a szétválás abszolút vagy relatív formája. Elméletünk szerint az erőforrás-szétválás eredményeinek a hatás szétválásában is tükröződnie kell, ezt a továbbiakban az ökológiai lábnyom elemzésével közelítjük.

Az ökológiai terhelésről írtakból következően egy adott ország ökológiai lábnyomának alakulását nagymértékben befolyásolja az, hogy milyen az energiaszerkezet, és milyen dinamikával változik a növekedési és a szerkezeti hatást tekintve. Ebből a szempontból kiemelendő, hogy Európa karbonlábnyoma (Global Footprint Network, 2016) az 1990 utáni két évtizedben 22%-kal csökkent. Ezen belül közel 20%-kal csökkent az energiával kapcsolatos szén-dioxid-kibocsátás is, amit azonban közömbösített a közlekedés növekvő CO₂-kibocsátása (ez a vizsgált időszakban több mint 20%-kal nőtt). Megjegyzendő, hogy a közlekedést kivéve minden szektorban a szén-dioxid-kibocsátás csökkenése következett be.

A továbbiakban áttekintjük, hogyan alakult a Visegrádi Négyek országaiban az ökológiai lábnyom, illetve a biokapacitás. Az Európai Unió huszonegy országára számított ökológiai lábnyom 2010-ben közel 5 globális hektár volt. A vizsgált négy országból Csehország ökotérhelése volt a legnagyobb, 6 globális hektár (gha) egy lakosra vetítve, a legalacsonyabb Magyarországé (~ 3,5 gha). Lengyelország és Szlovákia ökológiai lábnyoma közel azonos (~ 5 gha).

Vizsgáljuk meg ezeket az adatokat az energiatermeléssel és a szétválással összefüggésben! (Megjegyzendő, hogy mivel ezek az adatok a teljes gazdasági és társadalmi hatást tükrözik, csupán közelítéseink lehetnek az energiatermelésre vonatkozóan. A pontos kép felvázolásához további kutatások szükségesek.)

Mivel *Lengyelországban* még mindig 80% a szilárd tüzelőanyagok aránya, a karbonterhelése is igen nagy, valószínűsíthetően ez a hatás az egyik okozója a fejlettségénél nagyobb ökológiai lábnyomnak.

Csehország Európai Unió átlagot meghaladó ökológiai lábnyoma a viszonylag magas fejlettségi szintje (GDP/fő) mellett magyarázható a szilárd tüzelőanyag még mindig magas felhasználási arányával is. Ugyanakkor pozitív tendencia is megfigyelhető, hiszen ezen tüzelőanyag dinamikus fajtakiváltása megújuló energiákkal, illetve atomenergiával folyamatosnak tekinthető a vizsgált időszakban.

Magyarország ökológiai lábnyoma a rendszerváltás után a nehézipar összeomlásával és a szénfelhasználás csökkenésével összefüggésben érzékelhetően javult (Szigeti, 2016). Pozitívan hat a megújuló energiaforrások részarányának növekedése és a viszonylag jelentős nukleáris kapacitás is. Amennyiben azonban a tervezett Paks II beruházás úgy lép be, hogy még működnek a jelenlegi blokkok is, az a nukleáris energia akkora túlkínálatát jelenti majd, hogy az korlátozza a megújuló energia termelésének növelését (annak ellenére, hogy a nukleáris energia növelése csökkenti a karbonlábnyomot). Megjegyzendő, hogy a karbonlábnyom által determinált ökológiai karbonlábnyom elemzése mellett egyre inkább szükség van a fenntarthatósági versenyképesség komplex elemzésére, ezen belül fenntarthatórégió-elemzésre. A megújult regionális versenyképesség piramismodellje is azt mutatja, hogy az energiaszektor fenntarthatósági elemzése feltételezi a gazdasági szerkezet, regionális elérhetőség és infrastruktúra, foglalkoztatottság stb. elemeket (Lengyel, 2016, 75.). Addig ugyanis, amíg egy gigaerőmű (például atomerőmű) a centrumot erősíti, a megújuló erőforrások fejlesztése a helyi erőforrások felhasználását segítheti, csökkentve a regionális egyenlőtlenségeket is.

Szlovákia viszonylag magas ökológiai lábnyoma az energiaszerkezetéből önmagában nem magyarázható, a szilárd tüzelőanyagok alacsony felhasználási aránya és a nukleáris, illetve megújuló energia magas felhasználási aránya alacsonyabb ökológiai lábnyomot indokolnának. Az eltérés okainak feltárása további kutatást igényel.

Az ökológiai lábnyomra (illetve karbonlábnyomra) vonatkozó elemzésünk azt mutatja, hogy az erőforrás-elemzésre alapozva célszerű megkíséríteni hatáselem-

zést is, hiszen a fenntarthatósággal kapcsolatos kérdésekre csak így remélhető válasz. A szétválás folyamatának vizsgálata fontos visszajelzés az adott ország döntéshozói számára a környezetpolitika hatásosságára vonatkozóan. Az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés szétválasztásának lehetséges eszközei közé tartozik egyrészt az ipari termelés újrastrukturálása, másrészt az energiahatékonyság, illetve a megtakarítás ösztönzése (például energiahatékonysági szabványok előírásával).

ÖSSZEĞZÉS

Az emberi eredetű szén-dioxid-kibocsátás az IPCC (2014) adatai szerint 2010-ben elérte a $49\pm 4,5$ GtCO₂-eq/év értéket. Ennek nagyjából a 25%-áért a hő- és villamosenergia-termelés a felelős. 2040-re a világ energiafelhasználása a jelenlegi szinthez képest körülbelül 30%-kal nő az előrejelzések szerint (IEA, 2016). Ugyanakkor biztató, hogy 2040-ig az újonnan létrejövő villamosenergia-termelő kapacitásnak már a 60%-a megújuló energiaforrásokra fog épülni, és az a legnagyobb környezeti terheléssel működő olaj- és széntüzelésű erőművek részarányának jelentős csökkenését eredményezi. Egyes tevékenységeknél – például a háztartási szektorban, a lakossági fűtés, illetve a hűtés esetében – a jelenleg is rendelkezésre álló technológiák (decentralizált energiatermelés) segítségével már teljesen kiválthatóak lennének a fosszilis energiaforrások.

A megújuló és ezen belül a bioenergiák részarányának növelése általában, így Magyarországon is, csökkentheti az energiaellátás centralizált jellegét, és segítheti a helyi előnyök kihasználását. A megújuló energiák mint helyi termékek hozzájárulhatnak a regionális egyenlőtlenségek csökkenéséhez is.

IRODALOM

- Boulding, K. E. (1993): *The Economics of the Coming Spaceship Earth, Valuing the Earth* (ed. H. E. Daly), Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press
- Costanza, R. – d'Arge, R. – de Groot, R. et al. (1997): The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*. 387, 5, 253–260. <https://bit.ly/2JaesVv>
- Dombi M. (2014): *Villamos és hőenergia előállítását szolgáló megújuló energetikai technológiák fenntarthatósági értékelése*. Debrecen, https://dea.lib.unideb.hu/dea/bitstream/handle/2437/177015/DombiM_nyilvanos_final-t.pdf?sequence=8&isAllowed=y
- European Commission (2014): *Carbon Accounting of Forest Bioenergy. Conclusions and Recommendations from a Critical Literature Review*. 88. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70663/eur25354en_online.pdf
- Global Footprint Network (2016): *National Footprint Accounts*. <http://www.footprintnetwork.org/resources/data/>
- Van Heddeghem, W. – Vereecken, C. D. – Pickavet, M. – Demeester, P. (2012): Distributed Computing for Carbon Footprint Reduction by Exploiting Low-footprint Energy Availability.

- Future Generation Computer Systems*. 28, 405–414. <https://pdfs.semanticscholar.org/cf4b/2312904c8394a250e54a1c1284d29635029d.pdf>
- IEA (2016): *World Energy Outlook 2016, Fact sheet*. <https://www.iea.org/media/publications/weo/WEO2016Factsheet.pdf>
- IPCC (2012): *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, <http://www.ipcc.ch/report/srren/>
- IPCC (2014): *Climate Change 2014, Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC (2017): *FAQs. Frequently Asked Questions*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html>
- Johnson, E. (2009): Goodbye to Carbon Neutral: Getting Biomass Footprints Right. *Environmental Impact Assessment Review*. 29, 165–168. DOI: 10.1016/j.eiar.2008.11.002, https://www.researchgate.net/publication/222840338_Goodbye_to_carbon_neutral_Getting_biomass_footprints_right
- Lam, H. L. – Varbanov, P. – Klemes, J. (2010): Minimising Carbon Footprint of Regional Biomass Supply Chains. *Resources, Conservation and Recycling*. 54, 303–309. DOI : 10.1016/j.resconrec.2009.03.009
- Lengyel I. (2016): A kutatás-fejlesztés és versenyképesség térbeli összefüggései a visegrádi országokban. *Tér és Társadalom*, 30, 4, 71–88. <https://tet.rkk.hu/index.php/TeT/article/download/2808/4903/>
- Norgaard, R. B. (2011): Ökoszisztéma szolgáltatások – Hogyan vált egy szemléletes metafora a lényeg elhomályosítójává? *Kövász*, XV, 1–4, 61–93. <http://kovasz.uni-corvinus.hu/2011/norgaard.php>
- Schumacher, E. F. (1991): *A kicsi szép* (Small is Beautiful). Budapest: KJK
- Szarka L. (2010): Szempontok az energetika és környezet kapcsolatához. *Magyar Tudomány*. 8, 979–989.
- Szigeti C. (2016): *Az ökológiai lábnyom határai*. Budapest: Typotex Kiadó
- Szlávik J. (2013): *Fenntartható gazdálkodás*. Budapest: CompLex Kiadó
- Szlávik J. – Csete M. – Zöldy M. (2007): Regional Development Perspectives of Production and Utilization Renewable Fuels in Hungary. In: Kiss P. – Székely Á. – Németh B. (eds.): *IYCE 2007*. Budapest: BME, 161–176.
- Szlávik J. – Sebestyén Szép T. (2018): Energiafelhasználás és gazdasági növekedés a Visegrádi Négyekben: abszolút vagy relatív szétválás? *Tér és Társadalom*, 32, 1, 113–130. DOI: 10.17649/TET.32.1.2862, <https://tet.rkk.hu/index.php/TeT/article/view/2862>
- UNEP (2011): *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*. <https://www.unenvironment.org/resources/report/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>
- Wackernagel, M. – Schulz, N. B. – Deumling, D. et al. (2002): Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 99, 9266–9271. DOI: 10.1073/pnas.142033699, <http://www.pnas.org/content/99/14/9266>
- WBCSD (2015): *Recommendations on Biomass Carbon Neutrality*. <http://www.wbcd.org/Projects/Forest-Solutions-Group/Resources/Recommendations-on-Biomass-Carbon-Neutrality>
- World Nuclear Association (2011): *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*. http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf

BIOENERGETIKA TÁRSADALMI, GAZDASÁGI ÉS KÖRNYEZETI KONTEXTUSBAN

BIOENERGETICS IN THE CONTEXT OF SOCIETY, ECONOMY, AND ENVIRONMENT

Némethy Sándor

PhD, egyetemi docens, Eszterházy Károly Egyetem Gyöngyösi Károly Róbert Campus, Göteborgi Egyetem Konzervációs Intézet
nemethy.sandor@uni-eszterhazy.hu

ÖSSZEFOGLALÓ

A megújuló energiarendszerek nélkülözhetetlen alkotóeleme, a bioenergetika már önmagában is sokrétű, és szorosan kapcsolódik a mezőgazdasághoz, az erdőgazdasághoz, a szennyvíztisztításhoz, a szilárd hulladékok energetikai felhasználásához és a szerves, komposztálható hulladékokat termelő iparágakhoz és szolgáltatásokhoz, melyek együttesen az antropogén eredetű ökociklusok egy jelentős részét alkotják. A biomassza-termelés, különösen az energiaültetvények elterjedése azonban óhatatlanul felveti az élelmiszertermelés és a biomassza előállítása közötti konfliktus kérdését, melyre a választ csak a komplex megújuló energiarendszerek létrehozásával adhatjuk meg, ahol a bioenergia lehet akár a legfőbb alkotóelem is, de nem kizárólagos energiafajta, hanem együtt jelenik meg a geotermikus energiával, a napelemekkel, a szélturbinákkal, vízierőművekkel és a környezetet nem szennyező, magas technológiai színvonalú hulladékégető berendezésekkel. Az ökológiai ciklusokra (ökociklusokra) épülő vidéki gazdaság megújulóenergia-termelő rendszereinek egymással és a különböző gazdasági tevékenységekkel egy rendszerben való összekapcsolása akár az „energia-trilemma” megoldásának kulcsa is lehet.

ABSTRACT

Bioenergetics is a multifaceted category of energy production, an indispensable component of renewable energy systems and is closely linked to agriculture, forestry, sewage treatment, energy utilization of solid wastes and organic, compostable waste producing industries and services, which together form a significant part of anthropogenic ecocycles. However, the proliferation of biomass production, especially energy crops, inevitably raises the issue of conflict between food production and biomass production, which can be solved only by the creation of complex renewable energy systems, where bioenergy can be the main constituent, but not the exclusive source of energy, which appears in one system together with geothermal energy, solar panels, wind turbines, hydroelectric power plants and high-tech, environment-friendly waste incineration plants. Combining renewable energy production systems of a rural economy based on ecological cycles with one another and with different economic activities in one system can be the key to solving the “energy trilemma”.

Kulcsszavak: bioenergia, biogeokémiai ciklusok, hulladék-energia programok, Hammarby-modell, mezőgazdasági energiarendszerek, körkörös gazdaság

Keywords: bioenergy, biogeochemical cycles, waste to energy programmes, Hammarby-model, agricultural energy systems, circular economy

BEVEZETÉS

A megújuló energiák forrásainak felfedezése, megtermelése, fenntartható hasznosítása sokkal komplexebb probléma, mint egyszerűen az emberiség energiaszükségletének kielégítése. Az energiatermelés és -felhasználás egyszerre több szinten valósul meg: beszélhetünk helyi, regionális, országos és globális energiarendszerekről és ezek helyéről a természetes földi rendszerekben, a természetes és mesterséges (antropogén) biogeokémiai ciklusokban.¹ Ezeknek a különböző skálán működő energiarendszereknek a gazdaságosságát, környezeti hatásait és az energiagazdálkodás szempontjából nélkülözhetetlen, az ökociklusokra épülő rendszerszemlélet gyakorlati aspektusainak társadalmi elfogadottságát mind figyelembe kell venni a regionális fejlesztési projektek megtervezésekor (Némethy–Dinya, 2012; Dinya, 2012).

A bioenergetika fontos szerepet játszik a fenntartható társadalom alapját képező körkörös gazdaságban (Némethy–Kömíves, 2016), amelynek környezettudományi alapkoncepciója a megújuló energia – késztermék – zéróhulladék-rendszer és az ökoszisztéma-szolgáltatások² fenntartható hasznosítása. Ennek a rendszernek a működését az életciklus-elemzésen³ alapuló árutermelet, az újrahasznosításra összpontosító hulladékgazdálkodás és a hulladékenergia-programok egyidejű alkalmazása biztosítja. Fontos figyelembe venni a megújuló energiatípusok hasznosításánál a pluralitás elvét, amely ezen energiatípusok egymást kiegészítő alkalmazását írja elő nem csupán gazdasági, de környezetvédelmi és energiabiztonsági szempontok miatt is. A bioenergetika már önmagában is sokrétű, és szorosan kapcsolódik a mezőgazdasághoz, az erdőgazdasághoz, a szennyvíztisztításhoz, a szilárd hulladékok energetikai felhasználásához és a komposztálható szerves hulladékokat termelő iparágakhoz és szolgáltatásokhoz. Ezekkel már létre is hoztuk

¹ Biogeokémiai ciklusok: Az élethez nélkülözhetetlen elemek és alkotórészek körforgását a biogeokémiai körfolyamatok biztosítják, amelyek energiaigényét közvetlenül vagy közvetve a napsugárzás fedezi.

² Ökoszisztéma alatt az élőlények és élettelen környezetük teljes kapcsolatrendszerét értjük. Ökoszisztéma-szolgáltatásnak nevezzük a természet azon javait és szolgáltatásait, amelyeket az emberek saját jólétük biztosításának érdekében felhasználnak.

³ Az életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) egy folyamat, termék, illetve szolgáltatás teljes életútja során vizsgálja a környezetre gyakorolt potenciális hatásokat.

az antropogén eredetű ökokiklusok⁴ egy részét. A biomassza-termelés, különösen az energiaültetvények elterjedése azonban óhatatlanul felveti az élelmiszer-termelés és a biomassza előállítása közötti konfliktus kérdését, amelyre a választ csak a komplex megújuló energiarendszerek létrehozásával adhatjuk meg, ahol a bioenergia lehet akár a legfőbb alkotóelem is, de nem kizárólagos energiatípus, hanem együtt jelenik meg a geotermikus energiával, a napelemekkel, a szél-turbinákkal, vízi erőművekkel és nem környezetszennyező, magas technológiai színvonalú hulladékégető berendezésekkel. Ez egyben az „energia-trilemma”⁵ megoldásának kulcsa is lehet.

Biomassza természetesen nemcsak termesztett energianövényekből származhat, hanem a mezőgazdasági és erdészeti melléktermékek, élelmiszeripari hulladékok és tágabb értelemben a szennyvíztisztító művek magas szervesanyag-tartalmú üledéke is biomasszának tekinthető, mivel ennek és a komposztálható szerves hulladékoknak együttes erjesztésekor biogáz állítható elő. Több hazai és nemzetközi „jó gyakorlatot” is ismerünk, amelyek ezeket a rendszereket hasznosítják. Említésre méltó a svédországi Hammarby Sjöstad, az ökokiklusokra épülő ökováros, amelyet Stockholm egyik legbarnább területéből „zöldítettek” ki, vagy a skót Findhorn ökofalu, amely nem csupán környezet-technológiai megoldásairól, hanem szociális rendszeréről és világhírű oktatási tevékenységéről is ismert.

Hazánk energiagazdálkodásának javítása, az energiafüggőség megszüntetése csak a megfelelő léptékű, mikroregionális fejlesztésekben megvalósuló komplex termelési és szolgáltatási struktúrák és az egymást kiegészítő megújuló energiarendszerek létrehozásával lehetséges (Dinya, 2012). Nálunk sokkal kedvezőtlenebb földrajzi adottságú országok sokkal kevésbé függenek az energiahordozók importjától, mint mi – ezen a függőségen lehet és kell is változtatni.

A MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK FAJTÁI ÉS SZEREPÜK A VILÁG ENERGIAELLÁTÁSÁBAN

A megújuló energia termelése (különös tekintettel a bio-, nap-, víz-, szél- és geotermikus energiára) a fenntarthatóság minden fajtájának kulcsa, beleértve ebbe az ökológiai, gazdasági, szociális életképességet és a kulturális örökség fenntartható megőrzését és hasznosítását is. A globális megújuló energiatermelés és -felhasználás folyamatosan növekszik, de 2016-ban az eddigi legnagyobb, 161 gigawatt (GW) kapacitásnövekedést mutatta. Ez azt jelenti, hogy a megújuló ener-

⁴ A természetes öfenntartó ökológiai rendszerben működő körfolyamatok (például: biogeokémiai ciklusok, vízciklus stb.).

⁵ Energia-trilemma: az energiabiztonság, a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése és az energiaárak.

giák 2016-ban a teljes globális nettó energiatermelési kapacitásnövekedésnek (tehát a fosszilis és megújuló energiafajtákból együttesen származó növekedésnek) hozzávetőlegesen 62%-át adták.

A megújuló energiafajták globális kihasználtságának mértéke különbözik (1. táblázat), ezt nem csupán technológiai, de rövid és hosszú távú gazdasági és politikai megfontolások és szociális feltételek is szabályozzák (REN21, 2017). Legnagyobb mértékben a fotovoltaikus (PV) napenergia-hasznosítás⁶ növekedett, a teljes újonnan beállított megújuló energiatermelési kapacitásnak mintegy 47%-át adta, míg a szélenergia 34%-ot, a vízi energia pedig 15,5%-ot adott. Figyelembe kell venni azt a tény is, hogy a különböző országok természeti erőforrásai, gazdasági és szociális feltételei eltérőek, ami azt is jelenti, hogy ha egy fejlesztés gazdaságilag, szociálisan és infrastrukturálisan lehetséges egy országban, az nem feltétlenül valósítható meg egy másikban. A megújuló energiafajták hasznosításának és az ellátás kapacitásának és földrajzi elterjedésének folyamatos növekedése elsősorban négy tényezőre vezethető vissza: (1) a megújulóenergia-technológiák árának jelentős csökkenése, (2) több országban növekvő kereslet, (3) a megújuló energiákat célzottan támogató politikai és gazdasági mechanizmusok és (4) nagy nemzetközi vállalatok és intézmények kötelezték el magukat, hogy megújuló forrásokból származó elektromos energiát vásároljanak. Ezen pozitív tendenciák ellenére a megújuló energiákra való átállás mértéke messze nem éri el azt a mértéket, amely biztosítaná a 2015-ös Párizsi Egyezményben⁷ rögzített célt, hogy a globális hőmérséklet-emelkedést a legrosszabb esetben is 2 °C alatt (lehetőleg 1,5 °C alatt) tartsák. Bár a rendelkezésre álló és egyre gyorsabban fejlődő technológiák ezt lehetővé tennék, vannak rövid távú gazdasági és politikai megfontolások és nem megfelelően kiegyensúlyozott támogatási rendszerek, amelyek ezt az átállást jelentősen megnehezítik. A politikai és gazdasági határozathozó képességet nagymértékben növelné a komplex rendszerben való gondolkodás, amely módosítja a megújuló energiákon alapuló energiaellátó rendszerek definícióját úgy, hogy az nem csupán a szigorúan vett (többnyire elektromos) energiatermelésre koncentrál, hanem magában foglalja az újrahasznosításra épülő hulladékgazdálkodást, a fűtő- és hűtőrendszereket, továbbá a transzportszektor üzemanyag-szükségletét is, kiterjed a különféle gazdasági szektorok közötti kapcsolatokra és a regionális fejlesztés, infrastruktúra-bővítés és nyersanyag-felhasználás kérdéseire is (Dinya, 2012).

⁶ A kizárólag elektromos energiát termelő fotovoltaikus (PV) napelemek kezdték kiszorítani a direkt meleg vizet szolgáltató napkollektoros rendszert. A hibrid kollektorok (napelem+napkollektor) azonban egyesítik a két rendszer előnyös tulajdonságait.

⁷ A 2015-ös ENSZ klímaváltozási konferenciát (2015 United Nations Climate Change Conference) a Párizs melletti Le Bourget településen tartották november 30. és december 12. között az ENSZ tagállamainak 95%-os részvételével.

1. táblázat. A megújuló energia indikátorainak globális összehasonlítása 2015–2016⁸

		2015	2016
Befektetés			
Új évi befektetés megújuló elektromos energiába és üzemanyagokba	milliárd USD	312,2	241,6
Elektromosenergia-termelés (URL1)			
Megújuló elektromosenergia-termelési kapacitás (teljes, a vízenergia kivételével) ⁹	GW	785,0	921,0
Megújuló elektromosenergia-termelési kapacitás (teljes, a vízenergiával együtt)	GW	1856,0	2017,0
Vízenergia-kapacitás	GW	1071,0	1096,0
Bioenergia-kapacitás	GW	106,0	112,0
Éves bioenergia-termelés ¹⁰	TWh	464,0	504,0
Geotermikus energiatermelő kapacitás	GW	13,0	13,5
Fotovoltaikus (PV) napenergia-termelő kapacitás	GW	228,0	303,0
Koncentrált naphőenergia (CSP) kapacitás ¹¹	GW	4,7	4,8
Szélenergia-kapacitás	GW	433,0	487,0
Fűtés / melegvíz-előállítás			
Napkollektorok	GWh	435,0	456,0
Bioenergia	GWh	315,0	325,0
Direkt geotermikus energia	GWh	22,0	23,2
Transzport			
Etanol, éves termelés	milliárd liter	98,3	98,6
Biodízel, éves termelés	milliárd liter	30,1	30,8
Hidrogénezett növényi olajok (HVO) éves termelés	milliárd liter	4,9	5,8

⁸Módosítva a REN21 Global Status Report 2017 alapján.

⁹Elektromos energiatermelési kapacitás: a maximális elektromos energiamennyiség, amelyet egy generátor ideális feltételek mellett produkálni képes.

¹⁰Éves bioenergia-termelés: a bioenergiával működő generátorok együttes évi energiatermelése.

¹¹Naphőerőművek, a Nap hőjével fejlesztenek forró gőzt, és azt turbinák segítségével alakítják elektromos árammá. Sivatagi környezetben különösen előnyösek (például Izraelben, a Negev-sivatagban).

A rendszerszemléletnek át kell hatnia az infrastrukturális fejlesztéseket, az energiaellátás finanszírozását és a releváns politikai határozathozatali mechanizmusokat is. Ugyancsak kulcsfontosságú szempont, hogy az energiaszegénységben (következésképpen általános szegénységben vagy mélyszegénységben) élő több milliárd ember modern, megújulóenergia-forrásokra épülő energiaellátását biztosítsuk. Ez természetesen a lehető legrugalmasabb és energiahatékonyabb rendszerek kialakítását követeli meg úgy, hogy nem szükségszerűen a gyors, fosszilis energiahordozókra épülő gigantikus központi ellátórendszereket fejlesztjük ki, hanem a megfelelő skálájú, gyorsan mobilizálható, sok esetben helyi vagy regionális fenntartható energiarendszerek fejlesztésére helyezjük a hangsúlyt, ahol a megújuló energiaforrások leghatékonyabb kombinációjával lehetővé tesszük a mindenki számára hozzáférhető energiaellátást, beleértve ebbe az elektromos energiát, a fűtést és a hűtést is. Ezekben a rendszerekben a bioenergia hasznosítása jelentős szerepet játszhat, különös tekintettel a fent említett holisztikus rendszerszemléletre.

A BIOMASSZA DEFINÍCIÓJA ÉS FORRÁSAI, A BIOMASSZÁBÓL VALÓ ENERGIANYERÉS LEHETŐSÉGEI ÉS KORLÁTAI

Az Európai Unió 2009/28/CE direktívája alapján a biomassa „a mezőgazdaságból (a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve), erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból – többek között a halászatból és az akvakultúrából – származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradékanyagok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része”.¹² Eredetét tekintve a biomassa fogalma lényegében a napenergia kémiai energiává való átalakítására, a fotoszintézis útján szervesetlen alkotóelemekből előállított szerves anyagra vezethető vissza, amely természeténél fogva megújuló. Földünket évente $2,6 \times 10^{24}$ J napenergia éri, amelynek csupán 2%-e alakul át fotoszintézis révén $5,7 \times 10^{22}$ J/év energiaértékű biomasszává, amely a fotoszintézisből származó elméleti biomasszakészletet adja. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azonban, hogy a biomassa-termelés elsődleges célja az élet fenntartása, és csupán meghatározott része fordítható energetikai célokra. Bár a biomasszából származó megújuló energia végső soron napenergia, a biomassa fogalma mégsem teljesen egységes, ha figyelembe vesszük a már megtermelt, energetikai felhasználásra alkalmas szerves anyagok sokféleségét. A biomasszát eredete szerint a következő kategóriákba sorolhatjuk:

1. Elsődleges biomassa: a természetes elődleges produkció (fotoszintézis) során, autotróf szervezetek tevékenységéből származik: természetes vegetá-

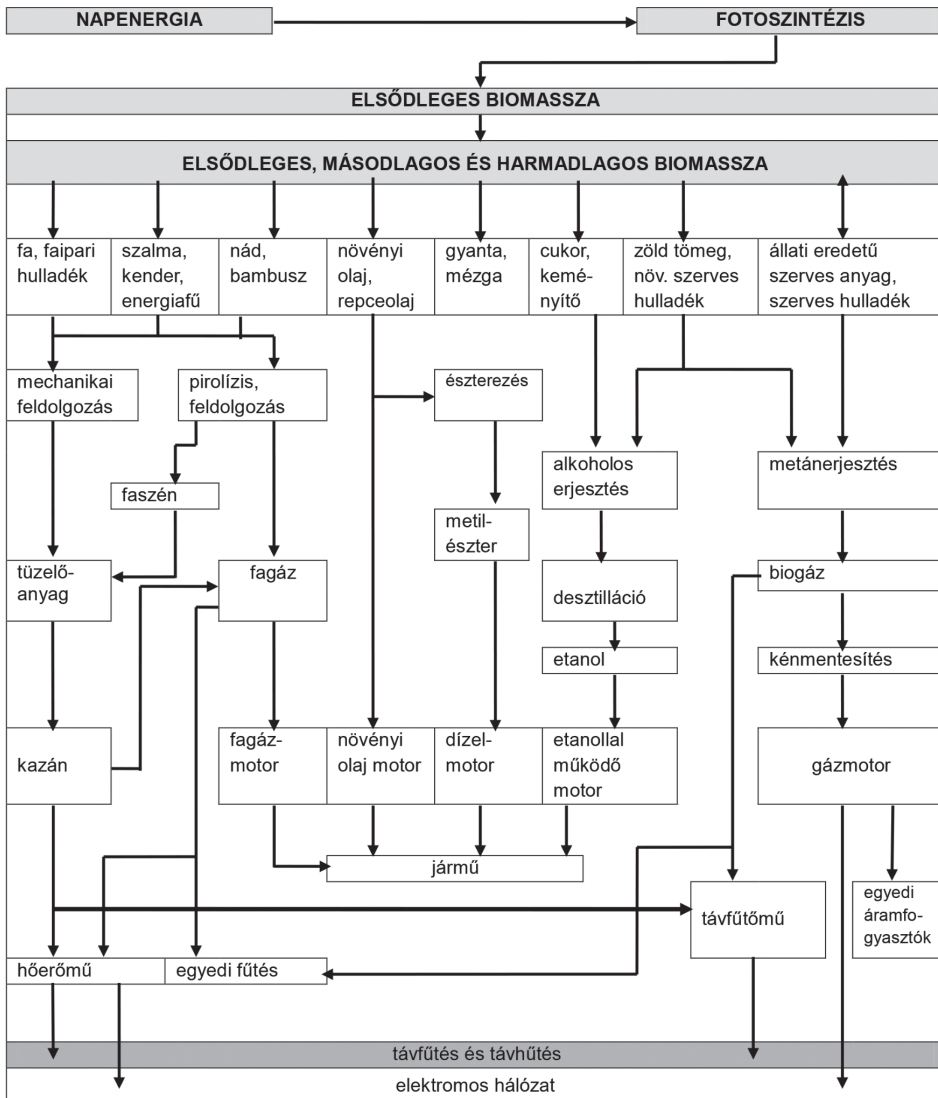
¹² Az Európai Unió 2009/28/EC direktívájának 2. cikke.

ció, szántóföldi növények, erdő, rét, legelő, kertészeti növények, vízben élő növények.

2. Másodlagos biomassa: a heterotróf szervezetek által előállított szerves anyagok, az állatvilág, gazdasági haszonállatok, az állattenyésztés főtermékei, melléktermékei, hulladékai.
3. Harmadlagos biomassa: az elsődleges és másodlagos biomasszára épülő ipari tevékenység termékei, melléktermékei, hulladékai, emberi települések szerves eredetű hulladékai.

Kétségtelen, hogy a biomassa termelése és energetikai hasznosítása elsősorban a mezőgazdasághoz, a mezőgazdasági termények feldolgozásához és felhasználásához, továbbá az ezzel összekapcsolható hulladékgazdálkodáshoz köthető. A mezőgazdasági művelés alatt álló területek a Föld felszínének 37%-át foglalják el. A mezőgazdaság az antropogén metánkibocsátás 52%-áért és a metánkibocsátás 84%-áért felelős. Ezen üvegházi gázok redukciójának legelőnyösebb módja a fosszilis energiahordozók kiváltása mezőgazdasági bioenergia-forrásokkal (például: terménymaradványok, állati trágya, bioenergia-növények). A mezőgazdaságban lehetőség van kombinált termelési rendszerek kifejlesztésére, amelyek magukban foglalják a biotermelést, a bioenergia-erdők és más bioenergia-növények bioszűrőként való használatát, a biológiailag tisztított, nehézfémektől mentes szennyvíz tápoldatként való alkalmazását és biogáz előállítását a szennyvíziszapnak a fermentálható szerves hulladékkal való együtt erjesztése révén. A bioenergia-növények növelik a talaj szén-dioxid-visszatartó képességét, ezzel is hozzájárulva a globális felmelegedés csökkentéséhez. Ilyen módon lehetővé válik teljes ökológiai körfolyamatok létrehozása, amelyek minden energiaforrást optimálisan hasznosítanak, és minimumra csökkentik a hulladékok keletkezését, hosszú távon feleslegessé válhatnak a hulladéklerakó telepek, de legalább számuk jelentős csökkentése reális cél lehet. Biomassa tehát több forrásból nyerhető, de a bioenergia-potenciál növelésének lehetőségeit – a mezőgazdasági és környezetvédelmi szempontok elsődlegességének figyelembevételével – jelentősen befolyásolja, hogy a különféle biomasszaforrásokat milyen műszaki megoldásokkal, energetikai és gazdasági hatékonysággal lehet a megújulóenergia-ellátás megfelelően méretezett rendszereiben hasznosítani. Ez egyben azt is jelenti, hogy már a hasznosítható biomassa forrásainak azonosításánál is rendszerben kell gondolkodni, figyelembe véve az egymást kiegészítő források hasznosításának gazdasági potenciálját, mint például a szennyvíztisztítás és a biogáztermelés összekapcsolása, ami a szennyvíziszap veszélyes hulladékként való költséges kezelését nyereséges gazdasági tevékenységgé változtathatja.

A biomasszában elraktározott energia kinyerésének módját elsősorban az adott nyersanyag összetétele határozza meg, ami viszont annak eredetére vezethető vissza. A biomassa hasznosításának technológiai azonban sok esetben kiegészíthetik egymást, garantálva ezzel az energiatermelés gazdaságosságát is (1. ábra).



1. ábra. A biomassza típusai és a biomasszában elraktározott energia kinyerésének módjai. Az elsődleges biomasszának egy része direkt felhasználható energiatermelésre, de nagyon lényeges a másodlagos és harmadlagos biomassza is, mivel esetenként önmagukban nem gazdaságos energiatermelési rendszereket gazdaságossá tehetnek (például a hulladékot energiává alakító rendszerek). Saját szerkesztés Tóth et al., 2011 felhasználásával

A biomassza különböző formái megfelelő ipari feldolgozás révén a fosszilis energiahordozókkal egyenértékű energiahordozókká alakíthatók, amelyekből hő, villanyáram, valamint a közlekedés számára bioüzemanyag nyerhető.

A részleges vagy esetenként teljes energiafüggetlenség mikroregionális szintű, megújuló energiákra épülő megvalósításában a bioenergia fontos szerepet játszik úgy, hogy a megújuló energiafajták koordinált, egy rendszerben történő hasznosításának részét képezi, figyelembe véve a bioenergia-hordozók megtermelésének és felhasználásának korlátait. A fenntarthatóság egyik legfontosabb alapelve, hogy az energia lehető legnagyobb részét a termelési és fogyasztási rendszerekből nyerjük ki, szem előtt tartva az élelmezésre és takarmányozásra fordítható elemek újrahasznosítását. A bioenergia megtermelésének és hasznosításának egyik legalapvetőbb korlátozó tényezője az értékes mezőgazdasági területek élelmiszer-termelésre való hasznosítása, tehát a bioenergia-ültetvényeket olyan területekre kell korlátozni, amelyek nem alkalmasak élelmiszer-termelésre vagy kimondottan talajjavítást (fitoremediáció)¹³ igényelnek, amelyre bizonyos energianövények különösen alkalmasak. Bioenergia tehát csak akkor alkalmazható, ha az adott források nem tesznek magasabb értékű felhasználást lehetővé (Marquis–Trans, 2008). Az elsődleges biomassza termelésére épülő bioenergia hasznosíthatósága tehát korlátozott, de a másodlagos és harmadlagos bioenergia-hordozók hasznosítása és az egyéb megújuló energiafajtákkal való együttes alkalmazása alkalmas lehet arra, hogy teljes mértékben kiváltsa a fosszilis energiahordozókat. Egy másik lényeges szempont az, hogy az elsődleges biomassza eredetű energiaforrások területegységre vetített szárazanyaghozama (t/ha), illetve az ennek megfelelő bruttó, nettó energiahozam (tOE/ha) a hagyományos kultúrák esetében meglehetősen mérsékelt (1,5–3,5 t/ha, 0,3–1,3 tOE/ha)¹⁴. A célirányos biomassza-termelésnek vannak ugyan korlátai, de az előbb említett értékek a genetikai szelekció és az agrotechnikai eljárások fejlődésének köszönhetően jelentősen növelhetők, energiaerdők és az energetikai növények termesztése esetében akár 8–9 t/ha, illetve 1,7–2,6 tOE/ha értékig emelhetők (Tóth et al., 2011).

A BIOENERGIA-TERMELÉS INTEGRÁCIÓJA ÉS A FENNTARTHATÓ HULLADÉKGAZDÁLKODÁS

A bioenergia-termelés integrációja természetesen a termelési tevékenységek és szolgáltatások egy rendszerben való kezelését is feltételezi. Lényeges, hogy mind a mezőgazdasági, mind az ipari termelés a természetes ökológiai ciklusok fenntartására és az ökoszisztéma-szolgáltatások fenntartható használatára épüljön, figyelembe véve a kultúrtájak védelmének szempontjait is (Némethy–Walaš, 2016). Ide tartozik a hulladékok energetikai hasznosítása, ahol a legnyilvánvalóbb energianyerési mód a hulladékégetés, a hulladékok hő és villamos energia előállításá-

¹³ A fitoremediáció alapja a növények szennyező anyagokat felvevő, akumuláló, átalakító vagy lebontó képessége.

¹⁴ tOE/ha: tonna olajekvivalens hektáronként.

ra történő felhasználása. Ennek egyik legjelentősebb alkalmazása Magyarországon a cementgyárak (Vác, Beremend) üzemeltetése, ahol a költséges fűtőanyagok hulladékokkal történő kiváltása jelentősen csökkenti az előállított cement piaci árát. A másik fontos felhasználási terület a hulladékégető erőművekben történő égetés, amely közvetlenül hőenergiát és elektromos energiát szolgáltat.

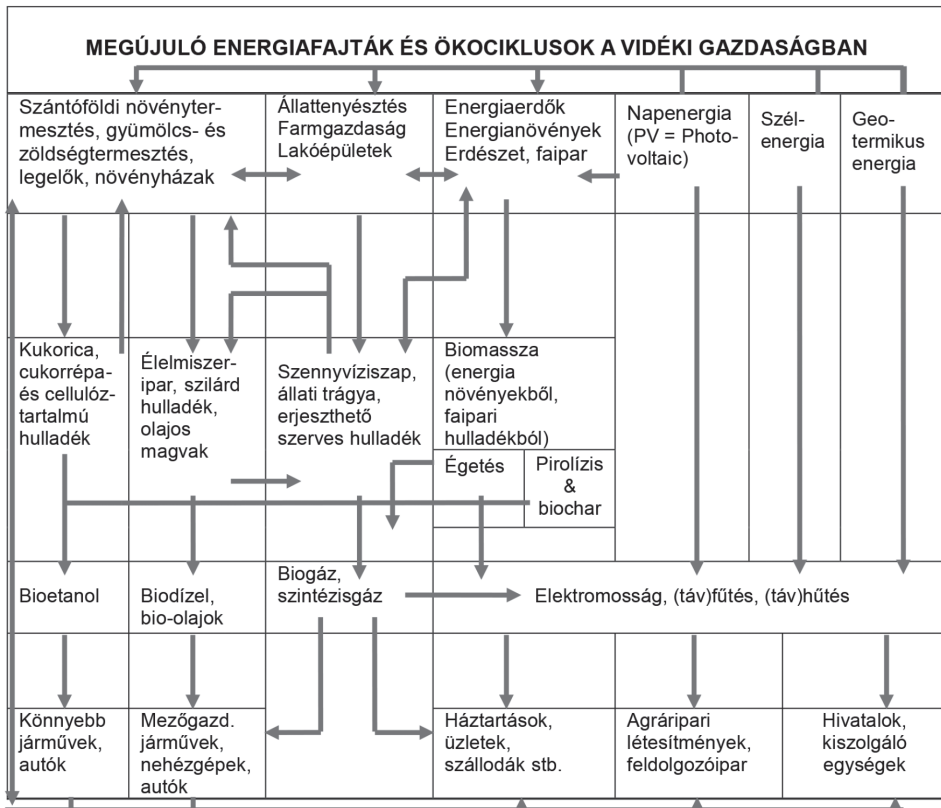
A pirolízis, a szerves hulladékok hőbontása megfelelően kialakított reaktorban, hő hatására, oxigénzegény vagy oxigénmentes közegben szabályozott körülmények között történik. A folyamat során keletkező végtermékek elsősorban energiahordozóként (fűtőgáz, tüzelőolaj, koks), vegyipari másodnyersanyagként (például a gázterméket szintézisgázzá konvertálva metanol előállításához) és esetenként egyéb célokra (talajjavításra is használható bioszén¹⁵, fakonzerválás vizes maradékkal; granulált salakolvadék építőipari adalékanyagként stb.) hasznosíthatók.

A hulladékégetéssel történő energiatermelésnek lehetnek környezetkárosító hatásai. Ezek csak egy komplex rendszer kialakításával küszöbölhetők ki, amely magában foglalja a környezettudatos árutermelést, a termékválasztást és a hulladékok differenciált kezelését, szortírozását és újrahasznosítását. A helyesen és rendszeresen alkalmazott életciklus-analízis, a megfelelő termékszerkezet kialakítása, a helyes termékválasztás (környezettudatos vásárlás) és a fejlett hulladékszortírozási rendszerek következtében keletkező hulladék legnagyobb része újra felhasználható, míg az égethető hulladékfrakció megfelelő égetési és füstgáztisztítási technológiával akár a megtermelt biomasszával (például faaprítékkal és brikketel) együtt is, egy rendszerben hő- és elektromos energiává alakítható (Tóth et al., 2011).

A bioenergia-termelés és a hulladékgazdálkodás összekapcsolásának másik nagyszerű példája a biogáz előállítása a szennyvíztisztítás során keletkező szennyvíziszap, az élelmiszeripari szerves hulladék, a településekről származó komposztálható szerves háztartási hulladék, a magas nedvességtartalmú mezőgazdasági növényi hulladék, továbbá az állati trágya metánerjesztése révén. A keletkező metángáz (biogáz) bevezethető a gázhálózatba (Baldwin, 2008), de jelentős mennyiségű kénhidrogént is tartalmaz, amit üzemanyagként való felhasználása előtt el kell távolítani (kénmentesítés). A többi megújuló energiaforrás (geotermikus, víz-, szél-, napenergia) egy rendszerben történő együttes hasznosítása végső soron a vidéki települések energia-önellátását eredményezheti (2. ábra).

A több skálán működő, fenntartható vagy direkt ökológiai (bio-), késztermék-orientált és teljes termékszerkezetre épülő mezőgazdasági termelés létreho-

¹⁵ A bioszén (biochar) nagy szénttartalmú, finomszemcsés, porózus anyag, amely a biomassza termokémiai bontása (pirolízis) során keletkezik oxigénhiányos környezetben és aránylag alacsony hőmérsékleten (<700 °C).



2. ábra. Az ökológiai ciklusokra épülő vidéki gazdaság energiatermelő rendszereinek egymással és a különböző gazdasági tevékenységekkel való kapcsolatai. Saját szerkesztés

zása, beleértve ebbe a családi kisgazdaságokat, a szövetkezetek különféle formáit, a permakultúrás gazdálkodást, az akvapóniát és a precíziós biogazdálkodást is, biztosíthatja a teljes mértékben megújuló energiaellátásra való áttérés ökológiai, gazdasági és szociális feltételeit. A magas munkaerőigényű ökológiai termelésre való áttérés és annak bioenergia-produkcióval való összekapcsolása lehetséges, ennek ideális feltételei adóttak Magyarországon. Az ökológiai mezőgazdaság (biogazdálkodás) esetében is vannak fokozatok a munkaerőigény, a tevékenység energiahatékonysága, a vizekre és a környezetre gyakorolt hatása szempontjából. Az alacsony bevételű fenntartható mezőgazdaság elveinek alkalmazása révén a kisléptékű élelmiszer-termelés során a környezet terhelése a lehető legkisebb mértékűre csökken. A modell, megvalósulásának végső formájában, semmilyen tevékenységének fenntartása érdekében nem használ semmilyen külső, nem megújuló energiát, hanem csupán az adott mezőgazdasági területen megtermelt bio-

masszát, energiaerdőt, napenergiát és egyéb alternatív megoldásokat, bár ezek kézi munkaerőigénye lényegesen nagyobb, mint a hagyományos termelési formákban. A megnövekedett kézi munkaerő költsége kompenzálható a fent említett megújuló energiaellátás révén nyert költségmegtakarítással.

IRODALOM

- Baldwin, J. (2008): *The Benefits of Biomethane to Grid*. Proceedings of Claverton Energy Conference, UK
- Dinya L. (2012): The Green Local Economy. *International Journal of Business Insights and Transformation*, 5, 84–91.
- ENER-SUPPLY Project (2012): *A megújuló energiaforrások kézikönyve*. Környezettudományi központ, http://www.ktk-ces.hu/ENER-SUPPLY/megujulo_kezikonyv_kicsi.pdf
- Marquis, M. – Trans, P. (2008): Carbon Crucible. *Science*, 320, 5875, 460–461. DOI: 10.1126/science.1156451
- Némethy S. – Dinya L. (2012): *Sustainable Energy Management as a Prerequisite for Sustainable Tourism and Rural Development. Environmental, Economical and Social Implications*. Sucha Beskidzka, Poland: Zeszyty Naukowe WSTiE, 68–91.
- Némethy S. – Kórmíves T. (2016): On Ecocycles and Circular Economy. *Ecocycles*, 2, 2, 1–2. DOI: 10.19040/ecocycles.v2i2.57, http://real.mtak.hu/39427/1/55_467_6_PB_u.pdf
- Némethy S. – Wałas, B. (2016): Bioenergy Crops as New Components of Rural and Agricultural Landscapes: Environmental and Social Impact, Conservation, Cultural Heritage and Economy. *Journal of Central European Green Innovation*, (JCEGI 3(TI)) HU, <http://ageconsearch.umn.edu/record/229424>
- REN21 (2017): *Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf
- Tóth P. – Bulla M. – Nagy G. (2011): *Energetika*. Digitális tankönyvtár. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Energetika/ch04s02.html

URL1: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=101&t=3>

A jövő tudósai

BEVEZETŐ

TISZTELT OLVASÓ!

Ebben a lapszámban visszatérünk a tehetségtámogatás témaköréhez. Több korábbi cikkünkben foglalkoztunk a különböző tehetségtámogató programokkal. Egyre többször találkozhatunk első generációs értelmiségi neveléshez kapcsolódó programokkal. A Budapesti Református Cigány Szakkollégium, a RefoRom programban a kollégiumba történő tehetséggondozás mellett fontos szerep jut az egyetemi mentoroknak, akiknek feladatuk a hallgatóknak a tudományos kutatásba történő bekapcsolása is.

Kérjük, ha a nők tudományban betöltött helyzetével vagy az ifjú kutatókkal kapcsolatos témában bármilyen vitázó megjegyzése, javaslata lenne, keresse meg a melléklet szerkesztőjét, Kiss Ritát az alábbi e-mail-címen.

Kiss Rita

az MTA doktora

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika, Gépészeti Informatika Tanszék

rikiss@mail.bme.hu

MŰEGYETEMI HALLGATÓ RÉSZVÉTELE A REFOROM MENTORPROGRAMJÁBAN

PARTICIPATION OF ENGINEER STUDENTS IN THE REFOROM'S MENTORSHIP PROGRAM

Antal Ákos

PhD, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

antal.akos@mogi.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A tehetséggondozás és felzárkóztatás ígéretes szervezeti formái lehetnek a mentorprogramokat kínáló szakkollégiumok. A RefoRom program most bontogatja szárnyait, a legkülönbözőbb területeken felsőfokú tanulmányokat folytató kollégistákat támogatja: 2017-től egy mechatro-

nikai mérnök alapszakos műegyetemi hallgató is megtalálható is ösztöndíjasok között. A vele elkezdett mentorprogram tapasztalatai és a jövőre vonatkozó tervek ígéretesek, jól szolgálják a hallgató személyi és szakmai fejlődését. Remélhetőleg az elért eredmények és a felkínált lehetőségek mások számára is ösztönzőleg hatnak, erősítve a program célját és sikerét.

ABSTRACT

Mentoring programs organized by different colleges of higher education provide an opportunity of talent management and catching up. RefoRom mentoring program is now just breaking its wings, supporting undergraduates and graduates from a wide variety of specialties of higher education. From 2017, a mechatronical engineering BSc student has also been participant of the program. The experience of the mentoring program and the future plans are promising and well serve the students' personal and professional development. Hopefully, the achievements and the opportunities offered will have an incentive for others, emphasizing the purpose and the success of the program.

Kulcsszavak: mentorprogram, tehetséggondozás, felzárkóztatás, optomechatronika,

Keywords: mentorship program, talent management, catching up, optomechatronics

A még csak rövid múltra visszatekintő Budapesti Református Cigány Szakkollégium, a RefoRom, bekapcsolódva a magyarországi cigány felzárkózást kiemelt feladatának tekintő, a jövőt építő saját értelmiség kinevelésének folyamatába, a felsőoktatásban tanuló érintett hallgatók tehetséggondozásához és felzárkóztatásához kíván hatékony segítséget nyújtani. A szakkollégium – saját megfogalmazása szerint – oktatási, tudományos és művészeti műhely, mely a magyar társadalom számára a művészetben és a kultúrában rejlő lehetőségeket is felhasználva az érintettek integrációjának keresztyén és humanista szellemiségű alternatíváját kínálja. A belső programok elsősorban azt a célt szolgálják, hogy a kollégisták felkészüljenek az értelmiségi szerepvállalásra, képesek legyenek a reflektált gondolkodás, a kétely, a kritikai szemlélet elsajátítására (Molnár, 2017). A hallgatók jelentős része elsőgenerációs értelmiségi lesz, vertikális mobilitásuk által társadalmi szerepük felértékelődik. Megszerzett szakmai ismereteik mellett fogékonyságot kell tanúsítaniuk a kisebbségüket érintő társadalmi és szociális kérdések iránt, elkötelezettséget kell mutatniuk a társadalmi feladatvállalás irányába, elsősorban egyéni szerepvállalással vagy aktív közvetítőként.

A szakkollégium a megfelelő elhelyezés mellett hallgatói részére a tanulmányi előmenetelt támogató lehetőségek rendszerét kínálja. A szakkollégiumi közösség gazdagítását jelentő belső, szakmai programok szervezése mellett kollégistái részére a felsőoktatási intézményekben folyó tehetséggondozásba való bekapcsolódásukat mentorprogram működtetésével támogatja.

A szakkollégium VEKOP-7.4.1-16-2016-00002 jelű projektjének keretén belül nyílt lehetőségem bekapcsolódni a programba, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara mechatronikai mérnök alapszakjának optomechatronika specializációján tanulmányokat folytató hallgatóm – Grózinger Leila – mentoraként. A mentor-mentorált kapcsolat 2017 januárjában kezdődött, és máig tart.

A programban a mentor szabályozottan, együttműködés keretében segíti a hallgatót szakmai céljai meghatározásában és azok megvalósításában, magabiztos szakterületi jártasság megszerzésében és az egyéni kutatási terület megtalálásában, tanulmányaiban és szakmai fórumokon való megjelenésekben. Ennek érdekében a mentor havonta minimum két konzultációt biztosít a mentoráltnak, erről mentori konzultációs lapot vezet, melyen rövid feljegyzést készít a közösen elvégzett tevékenységekről. Tartja a rendszeres kapcsolatot a szakkollégium szakmai vezetőjével, közreműködik a szakmai és a karrierépítéshez szükséges kapcsolatrendszer kialakításában, a mentori rendszerrel kapcsolatos visszacsatolásban. A mentorált részéről kötelesség, hogy részt vesz a mentor által biztosított konzultációkon, mentori találkozókban, felhasználja a munkaerőpiacon való megjelenéshez a szakmai kapcsolatrendszer adta lehetőségeket, közreműködik a mentorálással kapcsolatos visszacsatolásban, a mentori rendszer értékelésében és fejlesztésében.

A mentori programnak alapot biztosító intézmény és szak a mentoráltnak – tőle sok befektetett munkát és szorgalmat elvárva – igen komoly lehetőséget kínál ahhoz, hogy később egy perspektivikus és szakmai progressziót jelentő szaktudás birtokában kezdje el pályafutását.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem az ország egyik meghatározó felsőoktatási intézménye a műszaki, a természet- és a gazdaságtudományok kiemelt területein. Ezt támasztja alá a különböző hazai és nemzetközi rangsorokban elfoglalt előkelő helye. Az alap, a mester és a doktori képzésben folyó színvonalas képzés mellett az egyetem szervezett formában fordít kiemelt figyelmet a felzárkóztatásra és az elitképzésre (Szilágyi, 2017). Ennek motivációja mint feladat a jövő és a gazdasági fejlődés egyik legfontosabb letéteményese, a tudományos-műszaki értelmiség – a legkülönbözőbb kihívásoknak is megfelelni képes – tudással és készségekkel való felruházása. Szerencsére ez az elitképzés szervesen kapcsolódik a Műegyetem kutatóegyetemi jellegéhez, a kutatás-fejlesztéshez és az innovációhoz való elkötelezettségéhez, illetve az egyetem vezetésének egy nemzetközi beágyazottságú elitegyetemmé válást előirányzó céljához.

A mentorprogramban részt vevő hallgató számára a Műegyetem a lehetőségek viszonylag széles palettáját nyújtja. Elsődlegesen kiemelendő, hogy a szervezeti formáktól függetlenül támogatja, sőt ösztönözi a mester-tanítvány viszonylatban megvalósítható, személyre szabott keretek között zajló tehetséggondozó munkát. Ezek szinterei közé tartozik a tudományos diákköri munka, a tanszéki kutatás-fejlesztési projektekbe való bekapcsolódás, illetve részvétel az oktató-nevelő

munkában, elsősorban demonstrátori tevékenységen keresztül. A tudományos diákköri munka a hazai felsőoktatáson belül jól szervezett és intézményesült keretek között, széles bázison nyugszik – ez a tehetséggondozás legnagyobb tömeget mozgató formája és szintere. A Műegyetem maga és a Gépészmérnöki Kar is jelentős erőforrásokat rendel az intézményi szintű konferenciák szervezéséhez, illetve az arra érdemes hallgatók országos szintű megmértetésének támogatásához; e mozgalomba való bekapcsolódás lehetőséget teremt egy önálló és saját kezdeményezésű tudományos munka elkészítésére és az eredmények meggyőző formában történő prezentálására, mindezt tapasztalt kollégák irányítása mellett. Az ilyen keretek között végzett eredményes munka belépő lehet például a doktori tanulmányokhoz. A tanszéki kutatási témákba vagy ipari megbízásokba való bekapcsolódás eredménye gyakran szül tudományos diákköri munkát, itt a hallgatónak módja nyílik egy konkrét céllal és használható eredmény születésének elvárásával megfogalmazott feladat megoldásának menetébe is betekinteni, annak lépéseit megismerni. Ezekhez képest a demonstrátori tevékenység valami mást jelent. Az erre vállalkozó hallgató, szintén egy tapasztalt oktató irányítása mellett megismerheti a felsőfokú oktatás műhelyitkait, fogásait, annak pedagógiai, didaktikai és módszertani aspektusait.

Grózinger Leilával a mentorprogram kezdetén – a támogató által megfogalmazott elvárások és kötelezettségek teljesítésén túl – közösen alakítottunk ki egy olyan tevékenységmodellt, amely számára olyan tapasztalatokat és ismereteket nyújthat, melyeket későbbi szakmai és közösségi tevékenysége során széleskörűen és eredményesen tud hasznosítani. A konkrét tervet a felelősség, a lehetőség és a kötelezettség gondolathármasa köré építettük fel úgy, hogy a munka egy lehetőséggel indul, és fokozatosan átalakulva egy kötelezettséggel zárul oly módon, hogy a teljes folyamat minden eleméhez a kölcsönös felelősség társul. A lehetőség alapja a szakkollégiumi támogatás a mentorprogramon keresztül, a mentorált és a mentor személyes, az ügy iránti elköteleződése, és végül – de nem utolsósorban – a Műegyetem Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszéke által biztosított személyi, tárgyi és infrastrukturális feltételrendszer. A munka során fokozatosan alakul ki a mentoráltban kötelezettség a jövőbeni szerepére és tevékenységére vonatkozóan. Ez jelenti elsősorban azt, hogy élve a lehetőségekkel, tudását bővítve elkötelezi magát egy téma mellett, melynek részleteiben elmélyülve annak alapos ismerőjévé válik úgy, hogy emellett – főként demonstrátori tevékenység keretén belül – olyan szervezői és szociális készségekre tesz szert, amelyek birtokában később maga is saját közösségét erősítő mentorrá válhat. A kötelezettség kiterjedhet arra is, hogy ő maga is a tudományos munka művelőjévé váljék, eredményei által szakmai tekintélyt vívjon ki, példát mutatva sorstársainak. Az egész folyamat ívét meghatározza a kölcsönös felelősség. A mentor részéről a felelősséget a program szakmai sikere, illetve a mentorált későbbi karrierjének és helyzetállásának megalapozására irányuló erőfeszítések eredményessége jelentheti. A mentorált részéről a

lehetőségek lehető leghatékonyabb felhasználása – majd később –, saját közössége erősítésében megnyilvánuló eredményessége és annak felemeléséhez való hozzájárulásának mértéke és súlya tartozik. Mentoráltamban ez utóbbit és számára a program által biztosított lehetőséghez tartozó és a tőle elvárható – ilyen irányú – kötelezettséget igyekeztem folyamatosan tudatosítani.

Tartalmi oldalról a programban két területre koncentráltunk: egyrészt kerestünk egy olyan kutatási témát, melyben elmélyülhet és önállóan is releváns eredményeket érhet el. Tanszékünk komoly hagyományokkal és tapasztalatokkal rendelkezik a moiré-módszeres, optikai elvre épülő, érintésmentes mérés technika orvostechnikai alkalmazása terén. A moiré-módszert a felület alakjától függő mértékben deformált periodikus struktúrák mintavételezésével elsősorban felületazonosításra használjuk. Leila az alapok tanulmányozása során megismerkedett a hatékony irodalomkutatás módszereivel, a rendelkezésre álló adatbázisokban való gyors és célirányos keresés lehetőségeivel, a kapott eredmények tömör formában történő, lényegkiemelő összegzésének fogásaival. Rövid időn belül magabiztosan használta az egyetemi könyvtárban fellelhető forrásokat, jól értelmezte a téma más területeihez való kapcsolódásait. Az irodalomkutatás eredményei alapján képet kapott a kutatási terület jelenlegi állásáról és azokról a nyitott kérdésekről, melyek jelenleg az e területtel foglalkozó kutatók érdeklődésének középpontjában állnak. Ezekre alapozva tudtunk megfogalmazni célkitűzéseket és felállítani hipotéziseket, amelyek vizsgálatára elméleti és gyakorlati kutatási feladatokat fogalmaztunk meg. A munka során mindig igyekeztem – a motiváció fenntartása mellett – számára a szellemi önállóságot biztosítani úgy, hogy probléma esetén is a megoldást – rávezetéssel ugyan, de – ő találja meg. Az egyes fázisokhoz sikerkritériumokat fogalmaztunk meg, ezek teljesülését folyamatosan értékeltük, ha szükséges volt korrigáltunk. Ezek elsősorban a mentorált fejlődésében fontos mérföldkövekhez kapcsolható, azok lezárását jelentő összefoglalók meglétét és reflektív értékelését jelentik. Ezekhez kapcsolódóan közösen beszéltük át a feldolgozott részt, annak helyét a teljes folyamatban. A témára történő koncentráció mellett kutatómódszertani és metodikai ismeretei folyamatosan bővültek. Kiemelten foglalkoztunk a mérések módszeres megtervezésével és a nyert mérési adatok értelmezésével, kritikai vizsgálatával és statisztikai értékelésével. Az eredmények feldolgozása és az azokból levont következtetések képezik a készülő publikáció alapját.

A másik terület, ahol Leilát demonstrátorként vontam be, a hallgatói laboratóriumi gyakorlatok előkészítése és segítése. Az alapképzésben oktatott Optika és látórendszerek című tantárgy laboratóriumi gyakorlatainak oktatása – elsősorban a tantárgy jellegéből kifolyólag – egész speciális megfontolásokat igényel. A tárgy célja a szak hallgatói alkalmazott optikai ismereteinek elmélyítése, a leggyakrabban előforduló gyakorlati mérési feladatok módszereinek és eszközeinek – laboratóriumi körülmények közötti – megismerése. A félév elején ismertett beosztás szerint vesznek részt a hallgatók az egyes méréseken, melyek elsősorban

az optikai megjelenítőkhöz és érzékelőkhöz és a geometria optikai jelenségeihez kapcsolódnak. A mérésre való felkészülés részeként a hallgatók áttanulmányozzák a mérési útmutatókat, ismerik az egységes mérési jegyzőkönyv tartalmát, tehát azt, hogy a mérés során milyen feladatokat kell elvégezniük és milyen eredményeket kell megadniuk. A jegyzőkönyvet a mérési gyakorlat alatt kell elkészíteniük és leadniuk. Leila bekapcsolódott a korábbi mérési útmutatók és jegyzőkönyvminták felülvizsgálatának és átdolgozásának folyamatába. Célként fogalmaztuk meg, hogy a mérési útmutatóban szerepeljen minden lényeges információ ahhoz, hogy a hallgató a mérést a lehető legnagyobb önállóságot tanúsítva tudja elvégezni. Az oktató és a demonstrátor feladata: ha a hallgató mégis elakadna, vagy kérdés merülne fel, segítsen a mérés folytatásában. Leila a mérési jegyzőkönyvminták és útmutatók átdolgozása során szerzett tapasztalatok mellett sokat tanult, és fontos tapasztalatokat szerzett a mérésvezetés során is; meg kellett tanulnia, hogy az információátadás során megmaradjon a mérést végző önállósága, segítő kérdésekkel legyen ösztönözve az önálló gondolkodásra a sikerélmény megélése és a motiváció fenntartása mellett. Ez a munka kiváló kommunikációs tréninget jelentett számára. A sikerkritériumot mint visszajelzési eszközt itt is alkalmaztuk. Közös határoztuk el, hogy az elkészített mérési jegyzőkönyvmintákat és útmutatókat előzetesen teszteljük, elsősorban a szintén demonstrátorként vagy tudományos diákköri munkát végző – már tapasztalatokkal rendelkező – hallgatók segítségével, visszajelzéseiket beépítve a korrekció folyamatába. A sikerkritérium teljesülését itt elsősorban a teljes folyamat gondos végigvitele és a pozitív visszajelzések jelentik.

A program mindkettőnk közös munkája, a sikerek és a kudarcok is közösek, így a problémákat és az eredményeket is közösen beszéljük meg, tervezzük a folytatást. Remélem, hogy Leila számára a tapasztalatok, a tanultak már középtávon is, de hosszú távon mindenképpen hasznosulnak. Majdan, végzett mérnök-ként, értelmiségiként sikeres lesz saját szakmájában, közössége számára követendő példa lesz. Saját kötelezettségei teljesítése mellett minden körülmények között feladatának fogja tekinteni, hogy követői számára is bemutassa azt az utat, melyen majd ők is járhatnak. A mentorprogram keretei között megszerzett tapasztalataival, tudásával ösztönözte társait, jövőbeni tanítványait; személyes példával, figyelemmel, problémák iránti érzékenységgel, a nehézségek felvállalásával, empatikus kommunikációval segítse sikeres integrációjukat.

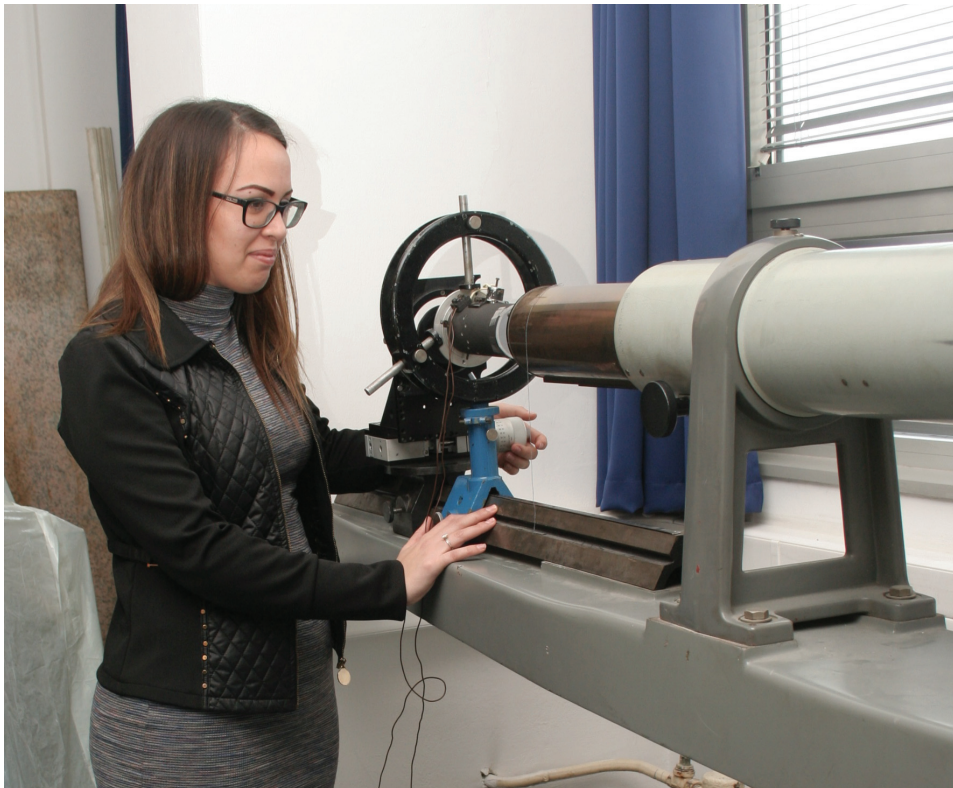
A mentorprogram a kölcsönös viszonyra alapozva, kereteit túllépve egy közös munkában alakult át úgy, hogy sikerült az alapcél megtartani és teljesíteni. A mentorált egyetemi tanulmányai befejeztével a program formai része és a demonstrátori munka bizonyára lezárul, de mindketten bízunk benne, hogy a közösen elkezdett tudományos munkának lesz közös folytatása. A moiré-képek-ből az információ kinyerésére vonatkozó kutatások publikálásra való előkészítése folyamatban van. A cikkírás folyamata még sok tanulnivalót és megszerzendő tapasztalatot tartogat mindkettőnk számára.

Fontos eredménynek tartom, hogy Leilában sikerült az adott problémakörben még nyitottnak, meg nem oldottnak tekinthető kérdések felismerésére és megoldandó feladatként történő megfogalmazására irányuló készséget kialakítani. Ez viszonylag nagy odafigyelést, türelmet, gondos analízist és szintézist igénylő feladat. A személyes beszélgetések alapján úgy gondolom, hogy a saját közösségét erősítő mentorra válásának folyamatát is sikerült aktív szinten tartani, ilyen irányú kezdeményezései elsősorban a szakkollégium szintjén zajlanak. Ahhoz, hogy szakmai tekintélyével közösségében is példát mutathasson, még sok időre és munkára van szüksége, de úgy gondolom, hogy az első lépéseket megtette, elindult az önállósodás útján: van ok a bizakodásra.

A mentorprogram számomra eddig a kihíváson túl számtalan tanulsággal is szolgált. Ezek között kiemelendők a termékeny szakmai kapcsolat megteremtésére vonatkozó körülmények felmerése és alakítása során szerzett tapasztalatok. Szintén rendkívül sokat tanultam a motivációs módszerek alkalmazása terén, ugyanis az érdeklődés fenntartása és a belső késztetés kialakítása a siker tekintetében kulcsfontosságú. Az önállóságra nevelés vonatkozásában helyesnek tartom, hogy a szakkollégium a saját szempontrendszere szerint felvett hallgatóit arra ösztönzi, hogy



Hallgatói mérés előkészítése az optikai laboratóriumban



Tesztmérés beállítása optikai padon

maguk keressenek saját felsőoktatási intézményükön belül olyan mentort, akiben – szakmailag és emberileg is – megbíznak, akit empatikusnak és elkötelezettnek tartanak. Lehetne viszont erősíteni a szakkollégiumon belül a mentoráltak által végzett munka, az elért eredmények mind szélesebb körű terjesztését, elsősorban a jövőbeni, potenciális mentoráltak felkutatása és ösztönzése érdekében, ugyanis e csoportok kiválasztásához és eléréséhez a szakkollégium rendelkezik a legmegfelelőbb csatornákkal és a meggyőző kommunikáció eszközeivel.

IRODALOM

- Molnár Illés (2017): Ne elégedjünk meg a középszerrel! *Reforom Magazin*, I, 1, 8–9. <http://www.reforom.hu/2016/06/ne-elegedjunk-meg-a-kozepszerrel/>
- Szilágyi Brigitta (2017): Törődés talentumainkkal – a BME Tehetségsegítő Tanácsának munkájáról. *Magyar Tudomány*, 178, 1, 103–107. <http://www.matud.iif.hu/2017/01/16.htm>

Könyvszemle

SIPOS JÚLIA GONDOZÁSÁBAN

220 FELETT

Byron (a magyar fordításban Byron helyett Wilhelm a villanykörte neve), a halhatatlan villanykörte semmit sem tudott arról, hogy miatta talán emberek millióinak élete változhat meg. Csak akkor kezdett gyanakodni, amikor a Phoebus csoport egyik tagja vizsgálatnak vetette alá törékeny testét: a szervezet feladata az volt, hogy kontrollálják a nagy villanykörtegyártó cégek fejlesztéseit egy közös, nemes cél érdekében, ami a fogyasztás serkentése. Ezt úgy érték el, hogy a korábbi 2000 óráról 1000 órára csökkentették a villanykörték élettartamát azáltal, hogy az elavulást segítő silányabb minőségű anyagokkal dolgoztak, vagy egyszerűen kevésbé hatékony technológiákat használtak. Bár a történet Thomas Pynchon 1973-as *Súlyszivárvány* című kultikus könyvének rövid része, és ez gyanakvásra adhat okot, ez esetben azonban, legalábbis a Phoebusra vonatkozó részek valóban megtörténtek. Az úgynevezett tervezett elavulás legkorábbi példája a villanykörte-konteo, ami a világgazdaságot serkentő-gyorsító hadművelet volt a tartós, minőségi fogyasztási cikkek ellen. A helyzet azonban azóta sem javult: elég az Apple bejelentésére gondolni, amiben elismerték, hogy direkt lassítják régebbi termékeiket, ezáltal kényszerítve rá a fogyasztókat az újabb, drágább műszaki cikkek megvásárlására. A társadalmi gyorsulásról és ezzel együtt a technológia fejlődéséről való elmélkedés napjainkban a tudományos és a hétköznapi diskurzusnak egyaránt meghatározó része. Hogy ez a két fogalom általában összekapcsolódik, annak azonban már egyáltalán nem triviális a magyarázata. Gyorsulnak-e a mindennapok, van-e a társadalomnak tempója, és ha igen, akkor változott-e radikálisan a 20. és a 21. században? Milyen szerepet játszik mindebben a technológia, és morálisan terhelhet-e felelősség technológiai vívmányokat?

Horváth Márk és Lovász Ádám *Felbomlás és dromokrácia* című könyvükben az említett kérdések mélyebb megértéséhez nyújtanak segítséget. A kötet módszertana az elsöre rémisztőnek tűnő fejezetcímek ellenére racionális és könnyen követhető: kronológikus áttekintését adják azoknak az elméleteknek, amelyek a gyorsulást a társadalom egészére kiható, totális metajelenségként értelmezik. „Ahhoz, hogy egy gondolkodót a gyorsuládiskurzus vagy gyorsulásparadigma részének tekintsünk, nem elégséges, hogy az adott szerző

foglalkozzon gyorsulással, vagy regisztrálja annak jelenlétét a társadalom életében. Kizárólag azon társadalomelméleti gondolkodókat és szociológusokat soroljuk ide, akik a társadalom valamennyi aspektusára kiható, ökológiai tényezőként veszik számításba a gyorsulást” (13–14.). A különböző, egymásnak nemritkán ellentmondó elméletek közös vonása az az implicit premissza, hogy a társadalomnak mikro- és makroszinten is van megragadható tempója, ami adott időben érzékelhető és értékelhető is. Ez jelenti a korszellem adott társadalmi klímáját, vagyis a mindennapi élet tempóját egyfelől, és kevésbé absztrakt, mérhető jelenségek ritmusát másfelől. Míg az előbbi néha már metafizikai kérdésként kezeli a témát, utóbbi konkrétabb, például az anyagi kultúra kutatásához hasonló esettanulmányokon keresztül vizsgálja a gyorsulást.

Ilyen a könyv első fejezetében tárgyalt témák többsége is. A kronologikus szervezőelvű kötet a 18. század végétől kezdődő luddita mozgalmakkal vezeti be a témát. Az iparosodott Angliában megkezdődő gépiesítés miatt tömegek maradtak munka nélkül, ezért a munkásmozgalom zavargásokat szervezett, és a gyárak megsemmisítését tűzte ki célul. A sebesség növelése ekkoriban a termelés kapacitásának és hatékonyságának növelését jelentette tehát, ami azonban együtt járt bizonyos emberi munkafeladatok gépekkel való helyettesítésével is. Ez a gyorsítás ráadásul egy időben történt egy konkrétabb, mérhető jelenséggel, a vasúti közlekedés elterjedésével, ami lényegesen átformálta a térről és időről alkotott elképzeléseket. A közlekedés sebességének gyorsulása azonban a kortárs gondolkodók körében inkább félelmet keltett, nem pedig a lehetőségek bővülésének ígéretét. Ennek ikonikus példája az 1842. május 8-i első komolyabb vonatkatasztrófa, amelynek során körülbelül százötven ember vesztette életét. Ez a technológia fejlődésének, és az akkoriban féktelennek tűnő sebesség veszélyeinek tragikus esete volt tehát, amit a többség akkoriban a testet szétroncsoló, és a lelket kiüresítő jelenségnek tartott, és ezáltal a vonatbaleset a gyorsulás metaforája lett. A vasút megjelenése, illetve a gyárak gépiesítése így már az ipari forradalom korában indikálták azokat a morális dilemmákat, amiknek nagy részét ma is tapasztaljuk: vagyis a munkaerőpiac és a hétköznapi élet radikális átstrukturálódását a technológiai vívmányok térhódítása miatt.

A 20. század elején megjelenő művészeti irányzat, a futurizmus azonban inkább a technológia lehetőségeit, a modern élet dinamikáját hangsúlyozta teoretikus kiáltványaiban és a gépeket, illetve a mozgást esztétizáló műalkotásaiban. A kötet egyik rövid alfejezetében említi az avantgárd egyik legkorábbi irányzatát, ami főként Olaszországban, és később Oroszországban volt jelentős olyan alkotók munkái miatt, mint Majakovszkij vagy Filippo Marinetti, akik szerint a technológia társadalomalakító potenciálját kell hangsúlyozni. Ez leginkább persze az urbánus környezetben volt karakteres, aminek egyik legjelentősebb teoretikusa a manapság újra felfedezett Georg Simmel volt, aki úgy gondol-

ta, hogy a technológia fejlődése meghaladja azt a mértéket, amit a szubjektum még követni tudna. Simmel egyébként *A pénz filozófiája* című művében a piaczgazdaságot vizsgálja a pénzen mint szociológiai jelenségen keresztül. Vizsgálódása napjainkra azonban aktuálisabb, mint valaha, ugyanis a kriptovaluták, mint például a *bitcoin*, a központi bankokkal szembehelyezkedő, decentralizált világgépet hirdetnek, ami egybevág Simmel azon megállapításával, hogy a pénzmozgás intenzitásának és sebességének növekedése a társadalom totális gyorsulását idézi elő.

A gyorsulás fokozásában látja az egyetlen lehetőséget az úgynevezett accelerationista kortárs filozófiai irányzat is. A könyv utolsó fejezetében tárgyalt gondolkodók és az irányzat leghíresebb, ma már kultikus státusznak örvendő enigmatikus alakja, Nick Land nagyban támaszkodik Deleuze és Guattari *Anti-Ödipusz* és Lyotard *Libidinal Economy* című munkáira: szerintük a társadalom problémáira a technológia, és főként a mesterséges intelligenciák minél erőteljesebb használata a válasz. Sötét víziójuk végállomása az összeomlás, és bár a 2015-ben megjelent *Inventing the Future* című könyvében Nick Srnicek már egy vállaltan baloldali perspektívából vizsgálja a gyorsulás kérdését, az accelerationisták eredendően a szabad piac mellett köteleződtek el. A *Felbomlás és dromokrácia* ezen a ponton határozottan teljesíti ígéretét, amely szerint a könyv nyelvezete illeszkedik a téma „szétfeszítő mechanizmusaihoz” (11.), ugyanis a tárgyalt témák sokkal kuszábbak és széttartóbbak, mint például az első fejezet feszes, jól követhető struktúrája. Land szövegeinek fordítása persze aprólékos és megterhelő feladat, munkái ugyanis a kontinentális hagyományokhoz illően és sokszor már-már azt is kifigurázva néhol közelebb állnak a költészethez, mint egy filozófiai értekezéshez.

A kötet összességében alapos áttekintését adja a már létező kortárs gyorsulás-diskurzusnak és főbb gondolkodóinak, és gazdag irodalomjegyzéke is biztos kiindulópont lehet a téma iránt érdeklődőknek. Bár kronologikus struktúrája logikusnak tűnik, egy kritikai kötet esetében azonban hasznos lett volna legalább egy fejezet a manapság különösen megerősödő gyorsításellenes tendenciákról is, így legalábbis polarizálhatták volna a vitatert a szerzők. Ilyen például a *slow movement*, ami éppen a lassításban látja a megoldást ugyanazokra a kérdésekre, amelyekre a tárgyalt szerzők a gyorsítást javasolják. Módszer-tanilag érdekes lehetett volna egy érveléselemzés is, vagy akár néhány esettanulmányon keresztül rávilágítani több nézőpontból is egy-egy kiválasztott kérdésre. A kortárs slow mozgalom mellett a történeti és politikai törekvések között is akad jó néhány, amelyek interdiszciplinárisan vizsgálják a gyorsulás és növekedés kérdését. Ilyen például többek között a Római Klub, tagjainak az 1972-es *A növekedés határai* című munkájában a rendelkezésre álló nyersanyagforrások, az élelmiszergyártás, a népesség, a környezetszennyezés és a termelés közti viszonyokat vizsgálták, és a növekedés természetét és veszélyeit

tárgyalták. A gyorsulás diskurzus tehát bár önmagában is érdekes, de az ellentétpár ismertetésével még inkább plasztikusabb képet kaphatott volna az olvasó a növekedés-lassítás párbeszédéről.

(Horváth Márk – Lovász Ádám: Felbomlás és dromokrácia. Budapest: Dialóg Campus Kiadó, 2016)

Karakas Alexandra

doktorandusz hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar,
Tudományfilozófia és Tudománytörténet Doktori Iskola

MODERNIZMUS SÁTORTETŐVEL

Ligeti Pált (1885–1941) az építész szakmának nem kell bemutatni, ugyanakkor a nagyközönség talán kevésbé ismeri a nevét. Érdemtelenül, ugyanis mind művészetfilozófiája, mind az általa tervezett épületek és budapesti városrészek hűen őrzik emlékét. A két világháború közötti időszak meghatározó műépítésze, festőművésze, filozófusa, művészeti írója volt, aki nemcsak hivatásként, de miszsióként élte meg, hogy az építészet ne csak az egyén, de a társadalom érdekeit is szolgálja. Szemléletében az épületek, a városkép mindannyiunk közös kincse, közös művészete.

Az ő életének, munkásságának szenteli monográfiáját Jász Borbála, aki a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Tudományfilozófia és Tudománytörténet Doktori Iskolájában a filozófia és az építészet kapcsolatát kutatja, kiemelt fókuszban tartva a két világháború közötti időszak építészelméleti kérdéseit. Nem véletlenül: ez a periódus elég közel van még ahhoz, hogy épített emlékei a mindennapjaink részét képezzék, mégis elég messze, hogy retrospektív és objektív módon tudjunk rátekinteni.

Ligeti Pál 1885-ben, Budapesten született. Az érettségi vizsga letétele után a nagybányai szabadiskolában tanult, ahol megérett benne a döntés: bár tehetséges festőként is, mégis inkább az építészetet választja. Ugyanakkor egész életét végigkísérte az építészet és a festészet ellentétének problematikája, az építészet művészetek közé sorolásának igénye. Éppen ezért saját művészetelméletében, az *Új Pantheon felé* című könyvében, Oswald Spengler nyomán kidolgozza hullámelméletét. E szerint a történelmi korszakokat azok domináns művészete határozza meg. Három korszakot emel ki, az egyiptomi, a görög és a keresztény időszakot, és három fő művészeti ágat, az építészetet, a szobrászatot és a festészetet. Ezek a művészeti ágak szerinte törvényszerűleg nem egyszerre teljesednek ki, hanem egymás után: a felívelő időszakban az építészet, a csúcsidőszakban a szobrászat, míg a hanyatló szakaszban a festészet. Ligeti saját korát új középkorként határozza meg, művészeti megújulást vár az építészettől, egy új korszak kezdetét.

A világháború pusztításai után elképesztő lakáshiány jelentkezett: a lebombázott épületek helyére újakat kellett emelni. Ugyanakkor a régi gangos, körfolyosós, nagypolgári lakások ideje már lejárt: feleslegessé váltak az óriási, sokszor ablaktalan hallok, az egymásból nyíló szobák, a higiénikusan nem tartható tisztálkodó- és főzőhelyiségek, a cselédszobák, cselédlépcsők. A modernizmus szele inkább jól átgondolt, tiszta, funkcionális otthonok után kiállított: nagy erkélyekkel, sok ablakkal, különnyíló szobákkal, jó szellőzéssel,

praktikus elrendezéssel. A német Bauhas-mozgalom és a francia La Corbusier modernista eszméi terjedőben voltak, melyek alapelveként hirdették, hogy az építésznek és az építészetnek társadalmi feladata, felelőssége van. Az otthonaink, a városaink ugyanis nemcsak leképezik az emberek igényeit, de alakítják is azokat. Ebben a korban vállalta magára Ligeti Pál, hogy a lakáshelyzet megoldásának szenteli életét, meghonosítva hazánkban a modernista építészeti szemléletet.

Ligeti bérházépítészete, a modernista, funkcióalapon szervezett épületek hazai meghonosítása mellett komolyan foglalkozott a városépítészet kérdéseivel. Teljes városrészek, utcaképek megújítására dolgozott ki átfogó terveket. Úgy vélte, a modernista szemléletben épült házak, lakások alapfeltétele, hogy a városszövet észszerűen legyen kialakítva. Elgondolásai máig sem veszítettek érvényükből: például a pesti belváros főutcájának nyomvonalát az ő nyolcvanéves javaslatai alapján alakították ki 2010 körül.

Az építészesseni azonban a városon kívül a vidékre is tekintett. Átfogó, szociális alapú terve a hagyományos népi építészet megújítására is kiterjedt. Úgy vélte, a vidék nem csak egy megkésett utánpótlás a városnak: sokat lehet tanulni a falusi praktikusságból. Parasztháztervét 1938-ban közölte is a *Tér és Formában*, ezzel is hirdetve: nem kell szétválasztani a népi és urbanista építészeket és építészetet, a kettő szépen, szinergiában fér meg egymás mellett.

Művészetelméleti, építészeti és városrendezési tevékenysége mellett nem elhanyagolható Ligeti közéleti munkássága. Megszervezője és meghatározó tagja volt a CIAM (Congres Internationaux d'Architecture Moderne, Modern Építészet Nemzetközi Kongresszusa) magyar tagozatának, a KÚT-nak (Képzőművészek Új Társasága), a nagybányai művészkolóniának és a Mentor Könyvkereskedés köré szerveződött szellemi csoportosulásnak. Felszólalásaival gazdagította a Magyar Mérnök és Építész Egylet közgyűléseit, nemzetközi és hazai konferenciák kedvelt és sikeres előadója volt. Sokat tett azért, hogy a többi művészeti ághoz hasonlóan az építészetkritika is elterjedjen, meghonosodjon. Bátran állíthatjuk, hogy kora művészeti közéletének egyik legmeghatározóbb alakjaként tekintettek rá. Zsidó származása miatt azonban halála előtt három évvel a CIAM magyar tagozata feloszlott, elméleteit pedig több ízben magyartalansággal, „zsidó faji sajátossággal” vádolták. 1941-ben hunyt el, a Kozma utcai Izraelita temetőben található sírja pedig méltatlan módon, romokban hever.

Jász Borbála monográfiája teljes körűen bemutatja Ligeti Pál sokszínű tevékenységét. Olvasmányos nyelvezete és strukturált felépítése segít abban, hogy az építészetben kevésbé jártas olvasó is teljes képet kapjon az adott korról és az abban tevékenykedő építészről. A gondosan megválasztott szemelvények a különböző folyóiratokból, archív dokumentumokból, elméleti munkákból nem megakasztják, sokkal inkább színesítik, gazdagítják a szöveget, miközben igazolják a komoly és átfogó kutatómunkát a háttérben.

A könyv a *Magyar Művészeti Akadémia Ösztöndíjas Tanulmányai* között jelent meg, a sorozat 12. köteteként, a L'Harmattan Kiadó gondozásában. A fiatal kutatók számára indított ösztöndíjprogram célja a tanulmányok elkészültén túl az is volt, hogy a kutatók egymás munkáját megismerhessék, új eredményeiket megvitathassák. Végül huszonnégy ösztöndíjas teljesítette az előírt követelményeket. A program sokszínűségét jól mutatja, hogy filozófiai, építészeti, komolyzenei, esztétikai és mozgóképes témákat feldolgozó monográfiák egyaránt helyet és támogatást kaptak a sorozatban, melynek önállóan is teljes értékű darabja a *Modernizmus sátortetővel*.

(*Jász Borbála: Modernizmus sátortetővel – Ligeti Pál művészetfilozófiája és építészmélete. Budapest: MMA MMKI–L'Harmattan, 2017*)

Kocsis-M. Brigitta

PhD-hallgató,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Tudományfilozófia és Tudománytörténet Doktori Iskola

A HALLGATÓLAGOS TUDÁS TOVÁBBGONDOLÁSA

„A filozófia története arról tanúskodik, hogy egy-egy elmélet keletkezéstörténetének vizsgálata során fontos módszertani lépés az, hogy feltárják azokat a keletkezési kontextusokat és szerzői célkitűzéseket, amelyek egyrészt a létrehozását elősegítették, másrészt bizonyos mértékig a tartalmát is meghatározták. [...] ezért ama szerzői tudományfilozófiai, világnézeti, filozófiatörténeti és eszmetörténeti pozicionálásokkal foglalkozom, amelyek a hallgatólagos tudás elméletének kialakulását és tudományos nyilvánosság elé kerülésének módját alapvetően befolyásolták” (210.) – írja Szívós Mihály filozófus, szemiotikus. Könyve filológiai módszerrel tárja fel a téma keletkezéstörténetét (az első könyvben az elsőtől a nyolcadik részig), ezt követi a téma utólagos reflexiója (kilencedik rész: *A hallgatólagos tudás és a kognitív tudattalan kutatása 1976 és 2014 között*), majd egy teljesen önálló téma, úgy is jelöli a szerző, hogy: *Második könyv: A hallgatólagos tudás általános elmélete* (255–316.).

A hallgatólagos tudás (először mint személyes tudás) elméletét a 20. század ötvenes–hatvanas éveiben Polányi Mihály (1891–1976) dolgozta ki. A hallgatólagos tudás tömören így fogalmazható meg: „többet tudhatunk annál, mint amennyit el tudunk mondani” (29.). A hallgatólagos tudás az explicit (vagy artikulált) tudással áll szemben. Működésének alapját az észlelési módok különbözősége jelenti. A gondolatnak (észlelésnek) vannak a figyelem szempontjából távoli és közeli (disztális és fokális) elemei. A hallgatólagos tudást a „küszöb alatti észlelés”, a nem tudatos mozzanat is jellemzi. A hallgatólagos tudást Polányi fenomenológiai, funkcionális, ontológiai, szemantikai aspektusból ragadja meg. A szemantikai aspektus lényegét a szerszámhasználattal érzékelteti: az értelmezésre törekvés jelentés nélküli érzéseket alakít át jelentést hordozó érzésekké: ezzel az eredeti érzéstől távolabbra kerül a jelentést hordozó érzés. Ennek az integratív folyamatnak a leírásában használja Polányi a „benne lakozás” vagy később embodiment (megtestesülés) fogalmat, amely azóta a kognitív nyelvészetben nagy utat futott be. A periférikus vagy disztális érzékelésből származó tudáselem egy fokálisan érzékelthez integrálódik; ezáltal a „test kiterjesztődik” (ez utóbbira korábban Samuel Butler is felfigyelt: a szerszám „testünk érzőképes kiterjesztése”). A hallgatólagos tudás nem verbalizálható. Polányi példája: a kerékpározást „szóban” lehetetlen tanítani.

Megkülönböztetendő a hallgatólagos tudás és a hallgatólagos tanulás. Polányi példái (mint a kerékpározás megtanulása is) jórészt a hallgatólagos tanulásra vonatkoznak. A hallgatólagos tudásra a legjellemzőbb példákat a tudatküszöb alatti észlelés, másként a periférikus figyelemmel való észlelés köréből lehet venni, hívja fel a figyelmet Szívós Mihály. A hallgatólagos tudásra jó példa lehet az emberi arc

felismerése; még érdekesebb, hogy az állattartó felismeri háziállata „arcát” (pofáját), míg a nem állattartó számára minden állat csaknem ugyanolyan. A hallgatóság tanulásra a már említett kerékpározás megtanulása mellett a nyakkendő vagy cipőfűző bekötése lehet a legjobb példa. (Próbáljuk meg valakinek szavakkal elmagyarázni, megtanítani, hogyan kell egy nyakkendőt vagy cipőfűzőt bekötni.)

Már az ókorban, Arisztotelésznél felbukkan a habitus (alkat) kérdése, amely akaratlagosan nem befolyásolható. Ilyen kérdés az ízlés: az egyén tudatától függetlenül változhat és változik is az ízlés tartalma. Ugyancsak az ókorból származik a *sensus communis* (közös érzék, érzéklet), az érzékszervekben keletkező benyomások összehangolódásának vizsgálata. Mindebből az is következik, hogy a hallgatóság tudás többnyire interszjektív természetű, csoportosan végezhető tevékenységekben nyilvánul meg. Quintilianus a hagyomány alapján kiemeli a személyes tanítás és utánzás fontosságát (másoknál: tapasztalati tudásszerzés), s azt, hogy az élőszo az írotthoz képest jobban hat. (Érdemes lenne ezen elgondolkodni a távoktatás híveinek.) Hogy a modern társadalomban ezen a téren mekkora hiány van, jól mutatják azok a jelenségek, amelyek a tapasztalati tudásátadás hiányosságát jelzik: szexuális tanácsadás, szoptatási tanácsadás, párkapcsolati tanácsadás, tréning, gyásztanácsadás. A morális hallgatóság tudás rejlik Szókratész daimónjában, a „lelkiismeret hangjában”, a Platón, majd Epikurosz által leírt intuícióban, az észjárásban (habit of mind), az antik szkepticizmusra jellemező valószínűségi gondolkodásban (Gorgiasz), a hermeneutika korai megközelítéseiben (prebiblikus kutatások).

A hallgatóság tudás összekapcsolódik a tudattalan fogalmával. Az európai filozófiában ehhez a kérdéskörhöz sorolható a figyelemmel kapcsolatos érdeklődés. Valószínűleg Leibniztől származik a „kis észlelések” (*les petites perceptions*) elnevezés, mellyel a figyelem fókuszán kívül eső számtalan apró, nem tudatos észlelésre utal. Freud az elvétések mellett „véletlen és tüneti cselekvéseket” elemez, Wittgenstein az öröklött háttért hozza szóba (201.). Ferdinand de Saussure fellépése, a nyelvi jel önkényes voltának túlhangsúlyozása akadályozta egy ideig a hallgatóság tudás egyik fajtájának, a nyelvi hallgatóság tudásnak a felfedezését. A szemiotikai ikonicitás elismerése azonban megnyitotta az utat ebbe az irányba. Charles Sanders Peirce a kortársi hatások alapján hangsúlyozza a tudatküszöb alatti eszmék által befolyásolt tudat predetermináltságát. A hallgatóság tudás felismerésének komoly retorikai (modern retorikai, politikai és marketingkommunikációs) hozadéka lehet. Szívós Mihály még a vezetés- és közgazdaság-tudományt is megemlíti, és a személyes mellett – az újdonság erejével – még intézményközpontú hallgatóság tudásra is utal. Az ókori retorikusok által kidolgozott kétfelé való érvelés jelentősége abban áll, hogy segít előhozni (verbalizálni, explikálni) a rejtett előfeltevéseket, ám egyik racionálisan kifejtett álláspont sem lehet önmagában eléggé meggyőző, mert a tapasztalatnak és a benne rejlő hallgatóság tudásnak is óriási befolyásoló („eltérítő?”) szerepe lehet az értelmezésben. Nagyon egyszerűen bizonyítható ez az emberek mindennapi

politikai véleménynyilvánítása kapcsán: ha egy politikai irány vagy politikus személye számukra korábbi tapasztalatok alapján nem rokonszenves, akkor történhet bármi, véleményüket nem, vagy csak nagyon nehezen változtatják meg. El lehet gondolkodni a politikai, a média- vagy a marketingkommunikáció kapcsán...

Polányi elméletének hiányosságai között említi Szívós Mihály a hallgatólagos tudásra vonatkozó példaanyag háttérbe szorulását, illetve a nyelvi hallgatólagos tudás kifejtetlenségét. Szívós Mihály a hallgatólagos tudás – általa felállított – új, általános elméletének középpontjába az emberi érzékszervek sajátosságait állítja. Polányi látáscentrikus szemléletmódja helyére a halláscentrikusságot helyezi: hallószervünkre a „külvilág hatásainak való folyamatos kitétség” (284.) jellemző. Ennek egyik bizonyítéka: „az anyanyelvet, a gondolkodásunk nyelvét és a tudás egyik fő hordozóját elsősorban hallás útján és nem utolsósorban hallgatólagos tanulással sajátítjuk el” (263.). Sőt, ennek további következményei vannak: „az akusztikus úton szerzett tapasztalatainkat, beleértve a nyelveket is, az elménkben másképpen és talán máshol is tároljuk, mint a vizuálisakat” (264.). A hallószerv esetében több (négy) figyelemszintet lehet megkülönböztetni: fokális figyelem (egy személy), disztális figyelem (mások reakciói), akusztikus háttér zajai, amelyek közül a hallószerv előnyben részesíti az emberi hangokat, tehát ez a figyelmi szint kettéosztódik: emberi és egyéb hangok megkülönböztetésére (285.).

A szemiotikai kiterjesztésből adódó másik észrevétel: „az adott jelekre épülő hallgatólagos tudás dominánsan indexikus jellegére lehet következtetni” (269.). A „hallgatólagos” (tacit) tudás megnevezés is újragondolásra érdemes, hiszen leginkább az akusztikus érzéki benyomásokra gondolhatunk, s ez elfed bizonyos alapvető különbségeket. Talán jobb lenne – a több nyelvben erre a jelenségre alkalmazott – implicit és explicit tudás megjelölés. És ehhez illeszkedik a Szívós Mihály által bevezetett fogalom: akusztikus hallgatólagos tudás.

Az anyanyelvi hallgatólagos tudás kapcsán hangsúlyozandó: „*a nyelvi hibáinkat jobban észre tudjuk venni és így a kiigazításokat és javításainkat könnyebben tudjuk eszközölni, ha a szöveget halljuk, mint ha csak némán olvasni tudjuk*” (288.). Általános gyakorlati tapasztalat, tanítjuk is, hogy a megírt szöveget érdemes hangosan felolvasni, rögtön jobban kiütöknöznek a hibák.

(Szívós Mihály: Fordulópontok a hallgatólagos tudás és a tudattalan felfedezés-történetében. A hallgatólagos tudás általános elmélete. Magyar szemiotikai tanulmányok 40. kötet. Budapest: Magyar Szemiotikai Társaság–Loisir Könyvkiadó, 2017, 334 o.)

Balázs Géza

egyetemi tanár,
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Partiumi Keresztény Egyetem

KIEGYEZÉS ÉS TUDOMÁNPOLITIKA

Bódy Pál történeti-analitikus áttekintése viszonylag szűk terjedelmének korlátai között komolyan veendő célokat valósít meg. A monográfia a magyar tudománypolitika szűk fél évszázadát (1867–1910) foglalja össze, egy olyan korszakét, amely a magyar történelem egyik kiemelkedő korszakával esik egybe.

Ezeknek az évtizedeknek a privilegizált emlékezete több forrásból tevődik össze. Ilyen a kiegyezés utáni fellendülés emléke, az európai civilizáció nagy individualista-pozitívista korszakával való közvetlen érintkezés, az ugrásszerűen megnövekedett belső piac új gazdasági és pénzügyi lehetőségei, a magyar társadalom attitűdjeinek egymáshoz való közeledése, vagy éppen a sikeres zsidó emancipáció.

Ennek a fejlődésnek mindig megvoltak a maga szigorú belső kritikussai, és ezeknek a kritikusoknak mindig megvoltak a maguk argumentumai. E kép alapvetően pozitív összképét semmiképpen sem lehet apológiaként letudni. Része ennek a problematikának, hogy a nagy, rendszerváltás méretű politikai változások ugyan nem hagyják érintetlenül az egyes nagyobb korszakok értékelését, mégis úgy gondoljuk, hogy éppen ennek a négy évtizednek nem kell tartania nagyobb leértékelődéstől (jóllehet ilyenre azért az eddigi történelemben már volt példa).

Az 1850-es évek (a politika fogalmi világában „önkényuralom”) után és a kiegyezést követő modernizációs teljesítmények következtében alakulhatott ki az a kép, hogy Magyarország az akkori európai civilizáció egyik értékes és kreatív színhelyévé vált. Bódy Pál monográfiája e korszak tudománypolitikájáról ad áttekintést. E tudománypolitika nemcsak elevenen él az emlékezetben, de már szinte legenda is. Ennek ellenére sikerül Bódynek ezt az összképet új, konkrét felismerésekkel és összefüggésekkel gazdagítani.

A kiegyezés korszaka magyar politika kultúrájának (ami a harmincas és negyvenes évek reformkori politikai kultúrájának folytatása) egyik fontos sajátossága az volt, hogy a tudománypolitikát mindenkor a „kultuszminiszter” vezényelte, akinek *Eötvös József* nyomait követve, széles kitekintésű értelmiséginek, elasztikus adaptáló-képességgel rendelkező szellemnek, az egyház és a Nyugat irányában briliáns diplomatának és önálló, lehetőleg sokszoros önálló (élet-) művel kellett rendelkeznie. Az, hogy ezeken az alapokon ez a tudománypolitika mítosszá is vált, ezek után szinte magától értetődik.

A mitológiai hősnek is megvannak azonban a maga napi gondjai. Mindenekelőtt az volt a kultuszminiszter feladata, hogy előcsalogassa a Parlamenttől a tudománypolitikához szükséges forrásokat. Eötvös maga ezen a területen

viszonylag eredményesnek bizonyult, jóllehet, mint Bódy sokszorosan kimutatja, utódaihoz hasonlóan ő is számos olyan halasztásba volt kénytelen beleenyugodni, amely a nagy projektumok finanszírozásának lelassulásából következett.

A *Science Policies in Hungary (1867–1910) and the First Generation of Distinguished Scientists* című monográfiában a szerző Eötvös József, Csengeri Antal, Trefort Ágoston és Wlassits Gyula tudománypolitikájával foglalkozik, gyakorlati egyenjogúsággal csatlakozik hozzájuk Eötvös Loránd, akinek egyetemi és akadémiai tudománypolitikája nagyságrendjében is felér a kultuszminiszterek munkájának dimenzióival. Kissé zavaró, hogy Apponyi Albert kultuszminisztersége, ami időben még beleesik a megadott időkeretbe, gyakorlatilag teljesen hiányzik, annál is inkább, mert Apponyinak az eredeti Eötvös-vonallal való közösségei és attól való eltérései releváns további eredményekhez vezettek volna.

Mind a négyen (ötten) ugyanazt a specifikus *miniszteriális kultúrát* testesítették meg, ennek strukturális és szimbolikus jelentőségét még csak növelte, hogy ez a politikai kultúra mélyen visszanyúlt a harmincas és negyvenes évek világába, ahonnan például az egyes szereplők irányában megfogalmazott, szinte rendkívüli elvárások is áthagyományozódtak. Ebből a tényből azonban magának a politikai vonalnak önmagában is szerves és organikus jellege támadt, amely korántsem játszott jelentéktelen szerepet annak eredményességében.

Bódy monográfiája e miniszteriális politika egymásra következő szakaszait elemzi. Érdeklődésének előterében a valóban szervező jellegű, gyakorlati lépések állnak, mindenekelőtt az egyetemalapítások. Konceptusát azonban még egy *aktualizáló* keretbe is beállítja. Ennek a fókusza az egyetemek és a kutatók körül kialakult *kiválósági* gondolat. Ez az eszme viharos sebességgel terjedt a rendre pénzügyi nehézségekkel harcoló egyetemek világában. Ez az eszme állandó összehasonlításokat termel (amelyek az anyagihiányban szenvedő hetilapok hálás cikkei, hiszen úgyis annyi rosszat lehet hallani a felsőoktatásról, ráadásul így egyes egyetemek és országok el is vehetik más egyetemek és országok hallgatóit). Mindenesetre egy ilyen összehasonlítás konkrétumai egy professzor vagy egy diák összefüggésében számunkra még mindig elég rejtelmeselek.

A *Science Policies in Hungary (1867–1910) and the First Generation of Distinguished Scientists* című műben Bódy mindenesetre mélyen elmerül a kiválóság-gondolat kultuszában, ez teszi ki az egész első fejezetet, visszatér erre az utolsó fejezetben is, miközben mindkét összefüggésben olyan tudósok is megjelennek, akiknek tevékenysége túlnyúlik az ábrázolt négy évtized korszakán.

Az első fejezet 38 kiváló magyar tudóst nevez meg, ami azt szuggerálja, hogy azok pályafutása az ábrázolt tudománypolitikával szerves összefüggésben van.

Ez az összefüggés egy *absztrakt* szinten bizonyosan fennáll (úgy is mint legenda képes tovább legendáknak életet adni). A monográfia nem merül el azonban részletesebben ebben az összefüggésben (ezt terjedelmi okokból sem igen tehetné), amivel újból megerősíti azt az érzésünket, hogy dicséretesebb dolog a kiválóság jelzőjének odaítélését másokra (akár későbbi korokra) bízni, mintsem azt aktuálisan mesterséges helyzetekben és a hozzá nem értő nyilvánosság ellendrukker világában kikényszeríteni.

Az Egyesült Államokban dolgozó Bódy 1945 után egyike Eötvös és kora legtermékenyebb kutatóinak. Ezzel foglalkozó fontos műve a The American Philosophical Society által 1972-ben kiadott *Joseph Eötvös and the Modernization of Hungary, 1840–1870: A Study of Ideas of Individuality and Social Pluralism in Modern Politics*.

1945 után, *Sőtér* Istvánt követően mindenekelőtt *Németh G.* Béla és sokféle ágazó pedagógiai munkássága volt ezen a területen meghatározó. Főképpen nekik köszönhető, hogy a kiegészést megelőző korszak és a dualizmus eszmetörténete napjainkban alaposan kutatott területeknek számítanak.

Bódy mindenekelőtt a nevelés- és iskolatörténet eredményeire, a parlamenti folyamatok elemzésére és a kultúrpolitikai aktivitások teljességének rekonstrukciójára támaszkodik. Ezek az aktivitások érdekes módon, magyar sajátosságként, nemcsak egy kultuszminiszter életművében alkottak „szinkron” koherens egységet, de mint „diakron” egymásutánosság is. Ez annyit jelent, hogy például Eötvös Loránd későbbi organizatorikus lépései is szinte tökéletesen képesek voltak belesimulni a korábbi „kultuszminiszterek” lépéseinek sorába. Mindez az egész reformpolitikának összefüggő és egységes képet ad, ami nemcsak sikerében vagy legendájában, de valóságos eredményeiben is nagy szerepet játszott.

Bódy monográfiájával értékesen járult hozzá Magyarország *intellectual history*-jének további feltárásához.

A rekonstruált tudománypolitikai stratégia egyes elemei közül kiemelkedik az új egyetemek alapításának kérdésköre, amelyeknek a kor szintjén kellett állniuk (aminek kritériumait úgy tudták megfogalmazni, hogy nem volt szükségük a kiválóság gondolatára). Ide tartozik a tehetségek támogatása (mindenekelőtt a célzott ösztöndíj-politikával – akkoriban kevesen maradtak kinn külföldön). Ide tartozik a gimnáziumok és más középiskolák reformja (máig sok elfogulatlan értelmiségi álma), lényegi és addig hiányzó folyóiratok és fórumok megalapítása, tanulmányi versenyek, mindenekelőtt a matematikában és a fizikában, melyek ma is folyamatosan működnek. Ide tartozik a magyar *École normale supérieure*, az Eötvös Kollégium, a sokszoros együttműködés a Magyar Tudományos Akadémiával és a számos tudományos társasággal, a tanárok és tanítók egyesületei, a felügyeleti rendszer, majd a gyakorló iskolák és gimnáziumok rendszere. 1899-től megjelennek a nők is az egyetemeken, és (mindenekelőtt *Wlassits* minisztersége alatt) a figyelem az általános iskolák és a vidék felé is fordul.

Bódy ábrázolásából nemcsak egy nagy rendszer körvonalai rajzolódnak ki, de azt is megérezzük, hogy ez a rendszer talán még önmaga meghaladásának lehetőségét is magában rejtette.

(Pál Bódy: Science Policies in Hungary (1867–1910) and the First Generation of Distinguished Scientists. Wissenschaftsgeschichte. Bd. 4. Münster–Berlin–Wien–Zürich–London: LIT Verlag, 2017.)

Kiss Endre

DSc, filozófiatörténész

Kitekintés

GIMES JÚLIA GONDOZÁSÁBAN

GÉNTERÁPIA GERINCVELŐ SÉRÜLÉSRE

Gerincvelő sérülést elszenvedett patkányoknál brit és holland kutatók (King's College, University of Cambridge, Netherlands Institute for Neuroscience) génterápiával vissza tudták adni a mellső végtag funkcióit.

Traumás gerincsérülések esetén sűrű hegszövet képződik, ami megakadályozza, hogy az idegsejtek között új kapcsolatok alakuljanak ki. A génterápia eredményeként a sejtek egy kondroitináz nevű enzimet kezdtek termelni, amely lebontja a hegszövetet. Ezzel lehetővé vált, hogy új idegsejt hálózatok alakuljanak ki.

Elizabeth Bradbury és munkatársai patkányokon, az embereken autóbaleset vagy esés miatt leggyakrabban előforduló, a gerincoszlop nyaki szakaszát érintő sérülést modellezték. Két hónapon át alkalmazott génterápia eredményeként az állatok képessé váltak arra, hogy elérjék és megragadják a számukra felkínált cukorgolyócskákat. Ugyanakkor a gerincvelő működésében is olyan jelentős változásokat találtak, amelyek új idegsejthálózatok létrejöttét valószínűsítik.

A legnagyobb gondot az jelentette, hogy az immunrendszer idegenként ismerte fel és megtámadta azt a vírusrészecskét, amelynek segítségével a kondroitináz enzim termelődéséért felelős örökítőanyag-szakaszt bevitték a sejtekbe. A kutatók során meg kellett találni annak lehetőségét – ez a holland résztvevők feladata volt –, hogy a génterápiás rendszert mintegy elbújassák az immunrendszer elől.

Az emberi klinikai vizsgálatok azonban még nem kezdődhetnek el, mert amikor a bevitt gén munkáját már elvégezte, működését le kell állítani. Ez a kikapcsolás még nem sikerült tökéletesen, egy kevés kondroitináz enzim még akkor is termelődik, amikor nincs is heg. A kutatók szeretnék megoldani a gén tökéletes kikapcsolását, ezután pedig nagyobb állatokon fogják kipróbálni a génterápiás modellt.

Burnside, E. R. – De Winter, F. – Didangelos, A. et al.: Immune-evasive Gene Switch Enables Regulated Delivery of Chondroitinase after Spinal Cord Injury. *Brain*, awy158, Published:14 June 2018. DOI: 10.1093/brain/awy158

LÁNNYÁ LETT FIÚK

A genetikailag hím egerekben herék helyett petefészkek fejlődnek, ha az állatok örökítő anyagából hiányzik egy parányi szakasz. Meglepő módon egy olyan DNS-darabkáról van szó, amely nem tartalmaz gént, azaz fehérje kódolásához szükséges információt.

Az már korábban ismert volt, hogy kezdetben az Y kromoszómán elhelyezkedő Sry-gén szabályozza annak az SOX9 nevű fehérjének a termelődését, amelynek bizonyos mennyiséget meghaladó jelenléte esetén az embrióban herék fejlődnek ki.

A mostani *Science* cikk brit és amerikai szerzői azt fedezték fel, hogy a DNS fehérjéket nem kódoló szakaszában van egy szekvencia, neve enhancer 13 (Enh13), amely a megfelelő pillanatban serkenti az SOX9 termelődését, és ezzel segíti a herék kialakulását. Ha az egerek DNS-éből genetikai módszerekkel eltávolították az Enh13-at, az XY ivari kromoszómával rendelkező egyedekben is petefészkek és női nemi szervek fejlődtek ki. Az egér örökítő anyagának az Enh13-at tartalmazó régiója egy olyan emberi régiónak feleltethető meg, amelyből ha egy nagyobb szakasz hiányzik, női ivarszervek fejlődnek ki. A mostani eredmények közelebb vihetnek ennek megértéséhez.

A kutatók szerint az Enh13 örökítő anyag szakasz valószínűleg emberben is releváns a nemi fejlődés rendellenességeinek szempontjából, és segíthet ezek okainak felderítésében.

Az emberi DNS alig két százaléka tartalmaz géneket, azaz kódol fehérjéket. A maradék 98 százalékot ezért sokáig „junk”, azaz szemét DNS-nek hívták, mondván, hogy nem produkál az öröklődés szempontjából jelentős dolgokat. Robin Lovell-Badge és munkatársai hangsúlyozzák, hogy eredményeik újabb bizonyítékot szolgáltatnak arra, hogy a junk nem is junk. Sőt...

Gonen, N. – Futtner, C. R. – Wood, S. et al.: Sex Reversal Following Deletion of a Single Distal Enhancer of Sox9. *Science*, 14 June 2018; eaas9408, DOI: 10.1126/science.aas9408

LEGYEN ÉDES IS, ZSÍROS IS

Vajon miért kedveljük oly nagyon az édes-zsíros ételeket, például a fánkot? A Yale University kutatói szerint azért, mert ezek aktivizálják legnagyobb mértékben az agy jutalmazó rendszerét.

Dana Small és munkatársai éhes önkénteseknek vagy szénhidrátokban gazdag ennivalót, például cukorkát mutattak, vagy zsírdúsat, például sajtot, végül a résztvevők mindkettőt nagy mennyiségben tartalmazó ennivalókat, például fánkokat is láthattak. Eközben agyuk aktivitását képalkotó eljárással pásztázták. Ezt követően a kutatók a résztvevők között „aukciót” hirdettek: ki melyik nasiért mennyi pénzt hajlandó felajánlani.

Egyrészt azt találták, hogy az agyi jutalmazó rendszer legnagyobb aktivitását a szénhidrátokban és zsírokban egyaránt gazdag ennivalók váltották ki, másrészt az „verseny tárgyaláson” ezekért ajánlottak a legtöbb pénzt.

Small szerint az agy két különböző rendszeren keresztül értékeli az élelmiszerek zsír-, illetve szénhidrát tartalmát. Ha mindkettő egyszerre aktiválódik, az agy – a nagyobb energiataralomnak megfelelően – több jutalmazó dopamint termel.

Ez azért van így, mert vadászó-gyűjtögető életmódot folytató őseink elsősorban növényekkel és hússal táplálkoztak, így sosem jutottak olyan táplálékhoz, amely szénhidrátban és zsírban egyidejűleg gazdag volt. A mai élelmiszerek átverik ezt a rendszert.

Más kutatók rágcsálókon végzett korábbi kísérleteik során azt tapasztalták, hogy csak zsírban vagy szénhidrátban gazdag étrend esetén az állatok sosem ettek túl magukat, de ha mindkét makro tápanyag egyidejűleg jelen volt, nem voltak képesek a táplálékfelvételt kontrollálni, és meg is híztak. Dana Small szerint eredményeik összecsengenek ezekkel a tapasztalatokkal.

DiFeliceantonio, A. G. – Coppin, G. – Rigoux, L. et al.: Supra-Additive Effects of Combining Fat and Carbohydrate on Food Reward. *Cell Metabolism*, DOI: 10.1016/j.cmet.2018.05.018

MIT TUD EGY JÓ PÓKERJÁTÉKOS?

Amerikai viselkedéskutatók szerint a pókerjátékosok kiváló terepet biztosítanak az emberi döntések mechanizmusát tanulmányozni kívánók számára.

Most megjelent cikkükhöz 1,75 millió, internetes oldalakon „No-Limit Texas Hold'em” szabályok szerint lejátszott leosztást vizsgáltak meg. Tanulmányozták a profik és kevésbé profik információfeldolgozó stratégiáit. Az eredményesen játszókat, pozitív egyenleget produkálókat és a vesztesek között nem a feldolgozott információk mennyiségében van különbség, hanem a feldolgozás módszerében – állapítják meg a szerzők.

A nyertesek nemcsak figyelnek, összegyűjtik, majd értékelik az információt, hanem azok egymásra hatását is figyelik. Számukra az is információ, hogy milyen hatással van saját jó vagy rossz, ilyen-olyan lapjuk az ellenfélre. Az információkat integratív módon használják. És ez nem egyszerűen jobb döntéseket eredményez, hanem az ellenfelek dolgát is nehezíti.

Frey, S. – Albino, D. K. – Williams, P. L.: Synergistic Information Processing Encrypts Strategic Reasoning in Poker. *Cognitive Science*, First published online: 14 June 2018. DOI: 10.1111/cogs.12632

PAPÍRON NAGYON KEMÉNY

Orosz és kínai kutatók együttműködésének eredménye az a tanulmány, amelyben elméleti számolások alapján új szuperkemény anyagok tulajdonságait jósolják meg. Szuperkemény anyagoknak általában azokat tekintik, amelyek Vickers keménysége nagyobb 40 gigapascalnál. Ezeket főleg a gépiparban, szerszámgyártásban alkalmazzák, de – nem meglepő módon – a hadiipar is a felhasználók közé tartozik. Kémiai összetételüket tekintve legtöbbjük szénttartalmú, maga a gyémánt, a legkeményebb anyag is szénatomokból épül fel, de a szén-nitridek és az átmeneti-fém karbidok is közismerten kemény anyagok. A klasszikus „vidia” (neve a német *Wie Diamant* rövidítéséből származik) – amely kilencven éve jelent meg kereskedelmi forgalomban – is volfrám-karbid.

A volfrámnak nemcsak a karbidjai, a boridjai is nagyon kemények. Jelenleg a volfrám-boridnak kísérleti eredményekkel is megerősítve öt stabil módosulata ismert. Ezek közül a legtöbb bórt tartalmazó vegyületben minden egyes volfrámtomra négy bóratom jut. A most publikált számítások eredményei szerint további három stabil volfrám-borid fázis is létezhet, és közülük a bórban leggazdagabb VB_5 Vickers keménysége 45 körül várható, és a gyakorlati felhasználhatóságot tekintve is rendkívül ígéretes. A keménységen kívül ezt még számos egyéb tulajdonság és körülmény befolyásolja, például, hogy az előállítás mennyire energia-, illetve költségigényes, illetve, hogy milyen hőmérséklet-tartományban lesz stabil az anyag.

Kvashnin, A. G. – Zakaryan, H. A. – Zhao, C. et al.: New Tungsten Borides, Their Stability and Outstanding Mechanical Properties. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 3470–3477. Publication Date (Web): 2 June 2018. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.8b01262

FEJLETTEBB RADAR, JOBB ELŐREJELZÉS

Pontosabb időjárás-előjelzést és csapadékmennyiség-beclést készíthetnek a meteorológusok, ha a meglévők mellé egy új módszert is alkalmaznak. Ennek lényege, hogy kettős polarizációs radar segítségével meghatározzák az esőcseppek méreteloszlását, majd egy modellszámítást végeznek, hogy mennyi víz párologhat el, míg a cseppek leérkeznek a talajra. Ezzel a folyamattal általában nem számolnak a csapadékmennyiség meghatározásánál: ha a radarkészülék egy vízcseppet észlel, azt „bekönyveli”, de azzal nem foglalkozik, hogy az észlelés és a talajba csapódás közben mi történik vele.

Márpedig – amint méréseikkel a szerzők demonstrálták – különösen száraz és alacsony relatív nedvességtartalmú levegő esetében, a párolgásnak jelentős hatása lehet. A párolgás figyelembevételével nemcsak a lehulló csapadék mennyiségét

lehet precízebben meghatározni, hanem a jövőre vonatkozó prognózisok is pontosabbak lehetnek, hisz azok készítésekor figyelembe vehetik az elpárolgott, ám légkörben maradó vizet is.

Pallardy, Q. – Fox, N. I.: Accounting for Rainfall Evaporation Using Dual-polarization Radar and Mesoscale Model Data. *Journal of Hydrology*, (2018) 557, 573–588. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.12.058