

fizikai szemle

ENERGETIKA

Energiaforrások

Villamos hálózatok

Rátz Tanár Úr-díjasok

2026/4

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

SZERKESZTŐSÉG

Felelős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő
Olasószerkesztő: Bodrog Zoltán
Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Asbóth János, Biró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,
1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.
Telefon/fax: (1) 201-8682
Felelős kiadó: Újfalussy Balázs főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:
<http://fizikaiszemle.elft.hu>,
e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:
fsz_szerkesztok@elft.hu. A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük. Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.
Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.
Az egyes számok ára: 2000,- Ft (a dupla számoké 4000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)
HU ISSN 1588-0540 (online)

A lapot az MTA Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) archiválja



A címlapon:

Európa éjszakai satelitfelvétele
Forrás: Pixabay fotó

TARTALOM

ENERGETIKA – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Kiss Ádám

Kiss Ádám: Energetika: a jó megoldástól függ az emberiség sorsa – Bevezető 109
Kiss Ádám: Az emberi közösségek folyamatos és megbízható energiaellátásának szükségessége 110

Az emberi közösségek fennmaradásához elengedhetetlenül szükséges a folyamatos, megbízható és elégséges energiaellátás. A cikk áttekinti korunk közösségi energiafelhasználását és tárgyalja az energiaigények szerkezetét. Az energiaellátás jövőbeni biztosítása az emberiség egyik legfontosabb sorskérdése.

Belgya Tamás: A mai ellátás energiaforrásai: fosszilizsek és megújulók 115
A tanulmány az energiaellátó rendszerek forrásaival foglalkozik. Rámutat, hogy a jelenlegi rendszerben dominálnak az ásványi eredetű energiaforrások. A megújuló energiaforrások szerepe egyre nagyobb, de csak ezekkel az igényeket teljesen ellátni nem lehet.

Hartmann Bálint: A villamos energia kiemelt jelentősége a modern világban, jelenlegi érdemi hálózati, irányítási fejlesztések 121
A villamos energia termelése és felhasználása egyre fontosabb a modern világban. Az elektromos energiának a felhasználóhoz való eljuttatása azonban komoly logisztikai és infrastrukturális feladat. A hálózatok fejlesztése és modernizálása a jövőbeni technikai fejlődés egyik kulcskérdése.

Aszódi Attila: Az atomenergia alkalmazásának jelenleg látható trendjei és egyes jövőbeli technológiai lehetőségei 124

A hasadós atomenergia az egyik legmegbízhatóbb villamos energiát előállítani képes módszer, amelynél nem szabadul fel üvegházgáz. A jövőben a nukleáris energia használatának további bővülése az energiaigények növekedésével bizonyosan várható. A tanulmány kitér a jelenlegi trendekre és tárgyalja azokat az előnyöket, amelyeket a kis moduláris reaktorok elterjedése jelenthet az energiaellátásban.

Csernai László: Fizikusszemmel az energetikai jövő lehetséges elemeiről 130
A szerző áttekinti azokat a módszereket, amelyekkel a jövőben az energiaellátás fejleszthető. Kitér norvégiai tapasztalataira, majd rátér arra, hogy a fúziós energia kiaknázásának élvonalbeli kutatása jelenleg hol tart.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Simon Ferenc: Interjú a Rátz Tanár Úr Díjjal kitüntetettekkel 133
A fizika oktatásának területén 2025-ben Rátz Tanár Úr Életműdíjjal jutalmazták Ábrám László (Városmajori Gimnázium) és Horváth Norbert (Baár-Madas Református Gimnázium) tanárokat, velük Simon Ferenc, a fizikaszűri elnöke beszélgetett.

Bartos-Elekes István: Az RLC áramkörök működésének oszcilloszkópszerű szimulációja 137
A cikk a „Fizikai Szemle-mellékletek” weboldalon található, az RLC áramkörök működését illusztráló oszcillogram-gyűjtemény használatához szükséges ismereteket tárgyalja.

Tasnádi Bálint, Rossz Koppány, Szeidemann Ákos: Marangoni-csepprobbanás vizsgálata középiskolában 141
A Marangoni-hatás egy határfelület-menti áramlás, amit egy felületfeszültség-gradiens indukál. Ezen jelenséget középiskolai kísérletezős önképzőköri munka keretében vizsgálták.

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~

ENERGY – THEMATIC BLOCK

Á. Kiss: Energy: the fate of humanity depends on the appropriate solution – Introduction

Á. Kiss: The need for continuous and reliable energy supply for human communities

T. Belgya: Energy sources of today's supply: fossil and renewable sources

B. Hartmann: The importance of electricity in the modern world, current meaningful network development and management

A. Aszódi: Current trends in the application of nuclear energy and some future technological possibilities

L. Csernai: A physicist's perspective on the possible elements of the energy future

TEACHING PHYSICS

F. Simon: Interviews with the recipients of Teacher Rátz Award

I. Bartos-Elekes: Oscilloscope-like simulation of the operation of RLC circuits

B. Tasnádi, K. Rossz, Á. Szeidemann: Marangoni-droplet explosion investigation in high school

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap

group
m v m



ENERGETIKA: A JÓ MEGOLDÁSTÓL FÜGG AZ EMBERISÉG SORSA

Kiss Ádám

ELTE TTK, Fizikai és Csillagászati Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest
E-mail: kiss.adam@ttk.elte.hu

Az energetika a közösségek energiával történő ellátásának nagy és bonyolult rendszere. Az energetika nyilvánvalóan több tudományághoz is tartozik, így az nem csak fizika. A terület a fizikán és a műszaki tudományok messze túlnyúlva az emberi élet, a társadalom és a gazdaság komoly elemeit érinti, azokból tevődik össze. Ugyanakkor, ha megvizsgáljuk az energetika legfontosabb területeit, kiderül, hogy a fő kérdésekben más tudományok mellett a fizikai ismeretek mindenütt komoly szerepet játszanak.

Az emberiség civilizációjának fejlődése során az egy főre eső energiafogyasztás dinamikusan változott – úgy, hogy a felhasznált energia minden következő fejlődési szakaszban folyamatosan nőtt. Így az emberiség energiaigénye nemcsak azért növekedett, mert az emberiség lélekszáma növekedett, hanem azért is, mert az éppen vizsgált társadalom tagjai fejenként is a korábbi időkhöz képest egyre több energiát igényeltek. Korunkban, a XXI. század első negyede végén, a több mint 8 milliárd ember mindegyike átlagosan legalább két nagyságrenddel több energiát fogyaszt, mint amennyit egy erős, egészséges férfi fizikai munkával elő tudna állítani. Ezért a mai energiaellátás, amelyhez óriási mennyiségű energia szükséges, csak külső energiaforrások felhasználásával és rendszerre fejlesztésével valósulhat meg. A feladat óriási!

Az energetika rendkívül összetett és nagy területeit, folytonosan változó megoldandó feladatait lehetetlen néhány tanulmánnyal áttekinteni. Ezért ennek az energetikai tematikus számnak a célja az, hogy néhány fontos részletet bemutasson a *Fizikai Szemle* közönségének.



Kiss Ádám (1942) az ELTE emeritus professzora. Kísérleti magfizikus, nemzetközi figyelmet keltett kísérletek szervezője, résztvevője. Atom- és magfizikát oktatott; emellett igazgatója volt az ELTE TTK Környezettudományi Centrumának és a Környezettudományi Doktori Iskolának. A radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló Nemzeti Célprogram szakértői bizottságát vezette, és 2010 és 2022 között az Országos Atomenergia Hivatal Tudományos Tanácsának elnöke volt. Az utóbbi időszakban fő érdeklődési területe az emberiség energiajövőjének kutatása.

A tematikus szám első cikkében e sorok írója azt mutatja meg, hogy milyen fontossággal bír a folyamatos, megbízható és elégséges energiaellátás az emberi társadalmak fenntartásában. A cikk hangsúlyozza a feladat összetett jellegét és a témakör nagyságát.

A második cikkben *Belgya Tamás*, a HUN-REN Energia Kutatóintézet (EK) Energia- és Környezet Biztonsági Intézetének korábbi igazgatója, vezető energetikai szakember tekinti át a jelenkori energiaellátás forrásait, az ásványiakat és megújulókat egyaránt, tárgyalja ezek felhasználási lehetőségeit az emberi közösségek ellátásában.

Ezután a mai világ talán legfontosabb és gyorsan növekedő arányú energiafajtájának, az elektromos energiának az egyik meghatározó területével, az elektromos hálózatok telepítésének és folyamatos fejlesztésének problémáival foglalkozik a BME és az EK szakembere, *Hartmann Bálint*. Megmutatja, hogy a hálózatok fejlesztése a mai energetika egyik legfontosabb, de sokszor nem elégségesen támogatott feladata.

Az ezt követő tanulmány az egyre fontosabb szerepet játszó atomenergiával foglalkozik. *Aszódi Attila*, az atomenergetika ismert professzora tanulmányában rámutat arra, hogy a nukleáris energia olyan forrás, amely üvegházhatású gázok kibocsátása nélkül tud nagy mennyiségű energiát előállítani. A cikk néhány fontos részletkérdéssel és jelenleg aktuális fejlesztési iránnyal foglalkozik.

Természetesen senki nem tudja, hogy mit hoznak a jövő energiaellátásáért tett erőfeszítések. *Csernai László* professzor, kiváló mag- és részecskefizikus, a Magyar és a Norvég Tudományos Akadémia tagja néhány innovatív gondolatot és lehetőséget csillant fel a jövő lehetséges energiaellátásáról.

A tematikus számban nem foglalkoztunk az energia-termelés és a klímaváltozás esetleges összefüggéseivel. Az energiaellátás a jelenleg alkalmazott módszerekkel komoly mennyiségű üvegházhatású gáz kibocsátásával jár – ez a napjainkban megfigyelhető, földtörténeti léptékben rendkívül gyors klímaváltozás fő oka. Az energiatermelés klímára gyakorolt hatásának részletes elemzése azonban már túlmutat a jelen tematikus szám témakörén.

AZ EMBERI KÖZÖSSÉGEK FOLYAMATOS ÉS MEGBÍZHATÓ ENERGIAELLÁTÁSÁNAK SZÜKSÉGESSÉGE

Kiss Ádám

ELTE TTK, Fizikai és Csillagászati Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: kiss.adam@ttk.elte.hu

Átalakuló világban élünk. Korunkat a drámai változások jellemzik. A Földön élő emberek száma óriási mértékben és történelmi távlatokat tekintve rendkívül gyorsan növekedett: míg a XX. század közepén kevesebb mint 3 milliárd ember élt a Földön, számuk 2022 novemberében már átlépte a 8 milliárdot. Eközben a más területeken bekövetkezett hatalmas átalakulások mellett átéljük az informatikai-távközlési forradalmat is, aminek eredményeképpen nagy embercsoportok megismerték egymás életmódját, életszínvonalát. Kialakult az általános vágy a magas életszínvonalra. Emellett a nagyszámú embert ellátó gazdaságok egyre nagyobbá és bonyolultabbá is váltak. Világossá lett, hogy az emberi társadalmak fenntartása drámai változásokat okoz környezetünkben, a környezetszennyezés pedig elképesztő szintet ért el. Annak a belátása, hogy a gazdasági folyamatok nem lehetnek úgy tovább, ahogyan azok az elmúlt évtizedekben kialakultak, általánossá vált. A gazdasági folyamatok átgondolása vezetett ahhoz, hogy napjainkban erős parancsként jelentkezik a gazdasági és társadalmi jelenségeknek az anyagforgalmak megváltoztatásával, azok ésszerű átszervezésével, környezetkíméléssel és takarékoskodással kialakított irányba, az úgynevezett körkörös gazdaságba történő átalakítása.

Energiaellátás nélkül nem működhet emberi társadalom. Ahhoz pedig, hogy a Föld mára összesen 8 milliárdot meghaladó közösségeit el lehessen tartani folyamatosan és megbízhatóan érkező hatalmas mennyiségű energiára van szükség. Annak áttekintése, hogy mindez az energiaforrások, a szállítás, az elosztás oldaláról milyen óriási kihívást jelent már ma is, és hogyan alakulhat ez a jövőben, világossá teszi, hogy az energiaellátás az emberiség egyik legnagyobb sorskérdése. A körkörös gazdaságra, a fenntartható új társadalmi rendre és folyamatokra való áttérés egyik igen fontos eleme lesz, hogy hogyan leszünk képesek olyan irányban átalakítani az energiaellátást, hogy az ésszerűen megfeleljen a kialakítandó új gazdaság igényeinek.

A jelen áttekintésben az energiára és az energetikára, valamint a használatos fogalmakra, mérőegységekre tett megjegyzések után áttekintjük az energiaellátásra és az energiafelhasználásra vonatkozó legfontosabb jelenlegi tényeket. Ezt követően napjaink és a jövő energiatermelésének három fontos tényére, az ásványi energiahordozók jelenlegi és közeljövőben meglévő dominanciájára, a különböző célú és formájú energiaellátás szükségességére és az elektromos energia folyamatosan növekvő jelentőségére hívjuk fel a figyelmet. Végül a megújuló energiaforrásokat és a hasadásos atomenergiát is figye-

lembe véve megjegyzéseket teszünk a jövő gazdaságának várható energiaellátására és az új rendszer kialakításakor felmerülő dilemmákra.

Az energia és energetika, eligazodás az energetikában használt mennyiségek között

Az energia fogalmát a fizika vezeti be mint munkavégző képességet. A fizikában e fogalom központi jelentőségűnek bizonyult. Kiderült, hogy segítségével fizikai törvényszerűségek sora fogalmazható meg. A modern tudomány rámutatott az energia és a tömeg általános egyenértékűségére és megfogalmazta azt a szigorú törvényt, amely alól kivételt sehol sem ismerünk: általános energia-tömeg megmaradás érvényes minden zárt rendszerben.

Az ebben a tematikus lapszámban tárgyalt energetika a társadalmak energiatermelését, a társadalmi-gazdasági élet önálló területét jelenti. Ez az energetika nyilvánvalóan nem (csak) fizika, de a természettudományok közül ehhez áll a legközelebb.

Az energetikában gyakran használunk két fogalmat, az energiát és a teljesítményt, amelyek azonban soha nem keverendők össze. Az energia egysége közismerten a joule (J). Az egységnyi idő alatt elvégzett munka számértékileg megadja a teljesítményt. Ennek egysége a watt (W), 1 J munka másodpercenként. Az energetikában gyakran használunk sokkal nagyobb egységeket. Ilyen gyakran használatos egységek a petajoule (PJ = 10^{15} J) és az exajoule (1 EJ = 10^{18} J), vagy a terawattóra (TWh = 10^{12} Wh = $3,6 \cdot 10^{15}$ J), amelyekkel egy-egy ország, nagyobb közösségek, iparágak hosszabb idejű (pl. éves) energiafogyasztását, igényelt teljesítményét kényelmesebben, kisebb számokkal adhatjuk meg. Például Magyarország éves energiafelhasználása az utóbbi évtizedben 10%-on belül 1 EJ.

Az ismeretterjesztői-újságírói gyakorlatban az energiamennyiségeket többször valamely energiahordozó tömegével vagy térfogatával adják meg. Itt tudnunk kell, hogy az ismert tömegű ásványi energiahordozóknak, a szénnek, a kőolajnak és a földgáznak energiataralmát általában nem pontos értékkel, hanem csak egy tartománnyal lehet leírni. A tartományok megadása arra a tényre utal, hogy a különböző forrásokból, lelőhelyekről származó energiahordozók mind különbözőnek, és tulajdonságaik sokszor lényegesen is eltérhetnek egymástól. Például a különböző lelőhelyekről származó szén ener-

giatartalma kilogrammonként ~15-től akár ~30 MJ-ig is terjedhet. Az egységes kezelés kedvéért a szénre bevezették az „egyezményes tüzelőanyag” (ETA) fogalmát: 1 ETA kg szén energiatartalma a meghatározás szerint 29,3 MJ. Hasonlóan igaz, hogy a kőolaj és a földgáz fajlagos energiatartalma szintén egy-egy energiatartománnyal adható csak meg. Az olaj energiatartalma átlagosan ~44 MJ/kg, a normál állapotú (1 atmoszféra nyomás, 0 °C hőmérséklet) földgázé ~40 MJ/m³. Az olaj mennyiségét gyakran a hordó (angolul: barrel – jele b) űrmértékkel adják meg: 1 b ~ 159 l. Az olaj sűrűsége is széles határok között (0,62–0,9 kg/dm³) változik, mégis a $\rho = 0,85 \text{ kg/dm}^3$ értéket tekintjük átlagosnak, ami a szaúdi olaj sűrűsége. Így 1 t olaj ~7,9 hordó.

Az energetikában a könnyebb tájékozódás kedvéért célszerű és erősen ajánlott minden energiamennyiséget J-ra, a teljesítményértékeket pedig W-ra átszámítani. Enélkül hamar elveszíthetjük a tájékozódóképességünket az energiát vagy a teljesítményt különböző egységekben, formákban tartalmazó mennyiségek között.

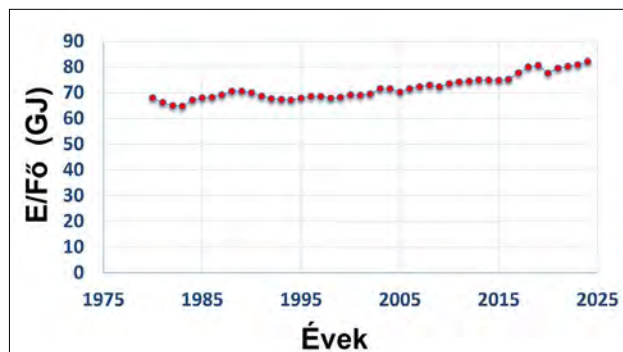
A mai társadalmak energiafogyasztása

Az emberiség civilizációs átalakulását, fejlődését az utolsó néhány ezer év történelme írja le. Ezekben az időkben az emberi társadalmak egyre bonyolultabbak lettek, és a közösségek közötti munkamegosztás is jelentősen átalakult. Az emberek száma fokozatosan növekedett, és ezzel párhuzamosan az összes felhasznált energia egyre nagyobb lett. Ennek oka a közösségek tagjai számának növekedése mellett az, hogy a civilizációs fejlődéssel az egy főre eső energiaigény is megnövekedett.

E történelmet alakító folyamatok során a XX. és XXI. század fordulójára az emberiség energiaigénye óriási mértékben nőtt. A Föld országainak összes energiafogyasztása az 1980 körüli mintegy 300 EJ-ről 2024-re körülbelül ~592 EJ-ra¹ nőtt (Energy Institute, Statistical Review of World Energy, 2025). Bár az 1970-es évek elején lezajlott, az akkori világ egészét megrázó első energiaválság óta minden döntéshozó és politikus tudta és tudja, hogy az energiafelhasználást vissza kellene szorítani, az energiafogyasztás ennek ellenére dinamikusan, mára az 1980. évinek közel kétszeresére növekedett.

De vajon miért növekszik minden szándék ellenére az energiafogyasztás? Az elemzők keresték azokat a paramétereket, amelyek a jelenséggel korrelálnak. A kiterjedt vizsgálatok csupán egy ilyen paramétert találtak, és ez a paraméter a Földön élő emberek száma volt! Az 1. ábra bemutatja, hogy a Föld lakóira átlagosan számított fejenkénti éves energiafogyasztás 1980 és 2024 között – lassú

növekedés mellett – kevésbé változott. Így a fő ok az összes energiafogyasztás megduplázódása mögött az, hogy az emberek száma szintén jelentősen nőtt. Ameddig a Föld népessége gyorsan növekszik, addig az energiafogyasztás is erőteljesen nőni fog!



1. ábra. A Föld lakosainak egy főre számított átlagos energiafogyasztása 1980 és 2024 között. Az ábrát a szerző készítette. (A felhasznált adatok forrása a US Energy Information Agency (EIA) adatbázisa, illetve a világ népességére vonatkozó statisztikai adatok. A megújulókat figyelembevételek módszere mindvégig hasonló volt.)

A jelenlegi energiaellátási rendszer elsődleges forrásainak áttekintése azt mutatja, hogy ebben erős túlsúlyban vannak az ásványi eredetű energiahordozók. A 2024-re vonatkozó adatok szerint az felhasznált energia 76,4%-át ásványi (gyakran használt idegen szóval fosszilis) energiahordozókból (szén 24%, olaj 30% és földgáz 22%) állították elő.²

A fosszilis energiahordozókra épülő mai energiaellátás egy sor nehézséget jelent. Ezek között a legfontosabbak: a) Az energiaellátás gazdasági és politikai függések sorát hozza létre, hiszen a készletek nem egyenletesen oszlanak el a Földön. b) Az energiatermelésnél az ásványi források alkalmazásakor mindenképpen fellépő szén-dioxid-kibocsátás problematikája már csak a klímaváltozásban játszott szerepe miatt is ma az egyik legismertebb vádpont. c) A szennyező anyagok számos más fajtája a légkörbe kijutva környezetkárosító (ilyenek a nitrogén-dioxid vagy a mindig jelen lévő kén és nehézfémek, As, Pb, Cd, Hg, U). d) A legnagyobb készletekkel bíró szenet egyaránt nehéz kibányászni, elszállítani és elégetni. e) Végül világos, hogy a készletek végesek, és az olaj- és földgázellátás már a közeljövőben akadozhat.

Az előbbi tényeket mérlegelve nyilvánvaló, hogy a jelenlegi, a fosszilis energiakészletek felhasználására épülő energetikai rendszer több ok miatt sem tartható fenn sokáig, hosszabb távon alapvető átalakításra szorul. A mai generáció feladata, hogy ki kell alakítanunk a jövő energiapolitikáját! Ez a munka megköveteli annak elemzését, hogy mire használjuk ma az energiát, mennyire lehet takarékoskodni, és melyek azok a jövőbeni tendenciák, amelyek már ma is láthatóak.

¹ Jelenleg több, szakmailag komolyan felkészült szervezet foglalkozik energetikai adatok, paraméterek meghatározásával. Az egyes szervezetek azonban egyéni módon gyűjthetik a végül feldolgozott adatokat, és azok kezelése (például a megújulókat járulékaiknak kezelése) módszertanilag is eltérhetnek egymástól. Így tény, hogy különböző szervezetek ugyanarra az adatra kissé eltérő értékeket publikálhatnak. Az eltérés nagysága akár több százalék is lehet úgy, hogy a valós érték bizonytalan.

² Figyelemre méltó, hogy az a tény, hogy az ásványi energiahordozók részaránya a teljes energiaellátásban a négyötödhez közeli, 120 éve igaz a minden más szempontból drámaian átalakult energiafelhasználásban.

Milyen célokra és hogyan használják az emberi közösségek az energiát?

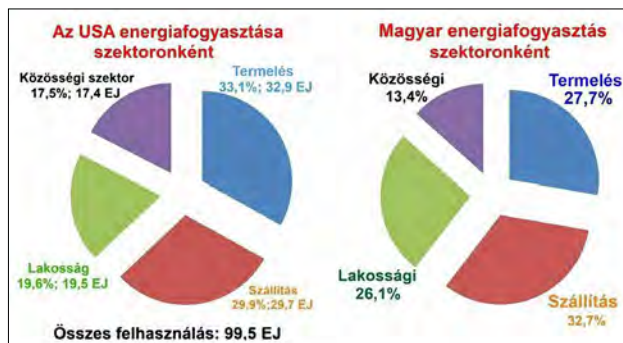
Az emberi közösségek működőképességüket energia nélkül nem tudják fenntartani. Ez abból következik, hogy mindenhez, amit csinálunk, vagy ami a környezetünkben körülvesz minket, amire szükségünk van, és élehetővé teszi a környezetünket – röviden minden tárgy megalkotásához, minden alkotómunkához, minden cselekvéshez energiabefektetésre van szükség. Ennek elemzéséhez át kell gondoljuk, melyek az egyes emberek és közösségek megkövetelt és elvárt fő kívánságai.

A teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány olyan igényt, amelyeket minden embercsoportnál kötelezően ki kell elégíteni: elegendő élelem a közösség minden tagjának, megfelelő lakások, otthonok és közösségi épületek és azok működtetése, energia fűtésre és világításra, energia a gazdasági folyamatok működtetésére, energia oktatásra és szociális célokra, energia és nyersanyag a gazdaság szereplőinek, víz a lakosságnak és a gazdaság szereplőinek, a hulladék megfelelő elhelyezése, közlekedés, az anyagi javak szállítása és híradás, a társadalom védelmének biztosítása és a közösségi rend fenntartása. A felsorolást még hosszan folytathatnánk – számos további más, kötelezően elvárt feladat van az együtt élő emberek körül. Így egyáltalán nem esett szó eddig a társadalom, a közigazgatás, az egészségügy, a közbiztonság, a természet és környezetvédelem megszervezéséről, amelyek szintén energiaigényesek. Ezek közül bármelyiknek az elhagyása a társadalmi élet zavarásával, esetleg a közösség teljes szétesésével fenyeget.

Mindenekelőtt látnunk kell, hogy mire használjuk az energiát, milyen formában van arra szükségünk. Azt is vizsgálunk kell, hogy a folyamatos, megbízható energiaellátást milyen eszközökkel biztosíthatjuk. Az energiaellátás sokrétűsége miatt már az elemzésekhez, tájékozódáshoz is hatékony módszerekre van szükség. Az áttekintéshez számos modellt dolgoztak ki, melyek általában egy-egy szempontból adnak választ az energiafelhasználással kapcsolatos kérdésekre.

Az egyik gyakran alkalmazott megközelítésben a közösségek energiaszükségletét fő felhasználási területekhez sorolva vizsgálják. A négy fő szektor: a) a termelési, b) a szállítási, c) a lakossági és d) a közösségi területek. A termelési terület minden olyan tevékenység, termék energiaigényét tartalmazza, amelyik termeléshez szükséges, vagy annak eredménye. A fejlettebb iparral rendelkező országokban e szektor súlya magasabb, mint a kevésbé fejletteknél. A szállításba minden személy- vagy anyagmozgatás beletartozik, amelyeket bármilyen okból végrehajtanak. A lakossági fogyasztás a közösség tagjainak lakhatásával, ételmezésével, egyéni életével kapcsolatos bármilyen tevékenységet vagy energiaigényt magába foglal. Végül a közösségi terület az emberi kapcsolatokkal összefüggő tevékenységet, szerveződé-

aktivitást, így az oktatást, egészségügyet, vallási jellegű tevékenységet, de a töltőállomásokat és még számos más hasonlót tartalmaz. Ennek a megközelítésnek előnye az, hogy alkalmas arra, hogy a különböző társadalmi feladatok összehasonlító elemzésére.



2. ábra. A négy szektor szerinti energiafelhasználás az Egyesült Államokban (2024-ben) és az arányok Magyarországon (2023-ban). Az ábrákat a szerző készítette. (Az adatok az USA esetében a US Energy Information Agency (EIA) adatbázisából, Magyarország esetében az Odyssee-Mure EU-kiadványából származnak.)

Napjainkban e szektorok szerinti áttekintések az országok közötti statisztikai adatokban általában megtalálhatók. Az elemzések azt mutatják, hogy a legtöbb országra vonatkozólag e négy szektor mindegyike első közelítésben hasonló súlyú az energiafogyasztásban, a részletekben viszont komoly különbségek is lehetnek.

A különböző közösségekben, társadalmakban, országokban az energiaigény más és más szerkezetű. Ennek oka az, hogy az energiaszükséglet függ a társadalom felépítésétől, rétegezettségétől és különleges, hagyományokból vagy egyéb belső értékrendből következő igényeitől. Ez utóbbi tényező hosszú távon változhat jelentősebben, ezt a közösségben folyó politikai és szociokulturális folyamatok befolyásolják. Az energiaigény mértékének kialakulásában döntő szerepe van az országnak, a közösség gazdasági szerkezetének, teljesítőképességének. Ez évtizedes nagyságú időben változhat csak lényegesen. A szükséges energia nyilvánvalóan függ a természeti körülményektől, így a klimatikus viszonyoktól (pl. bizonyos évszakokban a térfűtés vagy térhűtés szükségességétől), a felszíni formáktól, a hagyományoktól és a geopolitikai helyzettől. Ezek a tényezők általában kevésbé, vagy csak lassan változhatnak meg. Az energiafogyasztásra vonatkozó jogszabályok hatása az egyes szektorokra különbözőek lehetnek. Ezt a törvényhozóknak mérlegelniük kell.

A 2. ábra a szektoronkénti fogyasztást mutatja az Egyesült Államok és Magyarország esetében. A termelési szektor mindkét esetben tartalmazza a mezőgazdaság energiafogyasztását. Ez a magyar esetben a szektor 12%-át teszi ki. A termelési szektor nagyobb és a lakossági szektor lényegesen kisebb részaránya az Egyesült Államok esetében a két ország ipari szerkezete és fejlettsége közötti jelentős különbségre utal.

Az elektromos energia kiemelt szerepe a jövő energiafelhasználásában

Az energiafelhasználásra vonatkozó adatok az elektromos energia iránt növekvő igényt mutatják. Az elektromos energia ugyanis olyan energiatípus, hogy belőle más energiatípusok előállítását általában egyszerűen megoldható, a felhasználás helyén pedig nem okoz szennyezést vagy más nehézséget. Az elektromos energia például alkalmas motorok, gépek, járművek hajtására, világításra, számítógépek működtetésére vagy folyamathoz előállítására, és akár fűteni is lehet vele. Ráadásul a fejlett országokban az általában jól kiépített vezetékhálózaton keresztül az elektromos energia egyszerűen szállítható a felhasználóhoz. Az adatok azt mutatják, hogy az elektromos energia felhasználása a fejlett országokban sokkal gyorsabban nőtt, mint általában az energiafelhasználás: míg az elmúlt közel fél évszázad alatt az energiafelhasználás megkétszereződött, az elektromos energia felhasználása több mint három és félszeresére nőtt.

Az elektromos energia felhasználásának ez a térnyerése hosszú fejlődés eredménye volt. Ki kellett ugyanis építeni olyan erőművek csoportjait és egy olyan elektromos hálózati rendszert, amely képes volt a felmerülő egyre bővülő igények kielégítésére. Az elektromos erőművek felhasználhatnak ásványi energiaforrásokat, működhettek hasadási atomenergiával vagy valamely megújuló energiaforrással, legtöbbször napsugárzással, vízzel, széllel is. A 2024-re vonatkozó adatok szerint az ebben az évben világszerte összesen megtermelt 30 938 TWh elektromos energia előállításában 59,6%-kal domináltak az ásványi források (szén: 34%, földgáz: 22,3%), de jelentős részüket a megújuló energiaforrásoknak is: 29,1% (víz: 14,1%, nap: 6,9%, szél: 8,1%).

A következő évtizedek energiajövője egészen biztosan több lényeges változtatást fog hozni az elektromos energiafelhasználásban. A modern körkörös gazdaságra való áttérés tartalmazhat lényeges egyszerűsítéseket és ésszerűsítéseket, de néhány olyan irányzattal és ténnyel is számolnunk kell, amelyek a kialakítandó jövőt érdemben befolyásolhatják.

Már ma is látható, hogy az elektromos energia szerepe a jövőben két új ok miatt is lényegesen bővülni fog. A technológiai fejlődés követelménye, hogy elektromos áram az új, korszerű berendezések működtetéséhez mindenütt rendelkezésre álljon. A fejlett technika általában megköveteli az egyre nagyobb és nagyobb teljesítményű számítógépek alkalmazását. Ehhez jön a mesterséges intelligencia (MI) egyre nagyobb szerepe. Az MI-hez szükséges óriási adatbázisok meglepően nagy elektromos teljesítményt igényelnek. Ma nehéz megbecsülni, hogy az egyre szaporodó, az MI érdekében működtetett adatbázisok összességében pontosan mennyi elektromos energiát fognak 10–15 év múlva igényelni, de bizonyosan nagyon sokat. Hasonlóan, az elektromobilitás fokozott, az elmúlt évek változásaiból következtethető társadalmi

méretű térhódításával kapcsolatban is jelentős új elektromos energiaigény lép fel. Valószínű, hogy az említett időintervallumban legalább jelentősen megnövelt elektromos termelési összteljesítményre-kapacitásokra lesz szükség a maihoz képest.

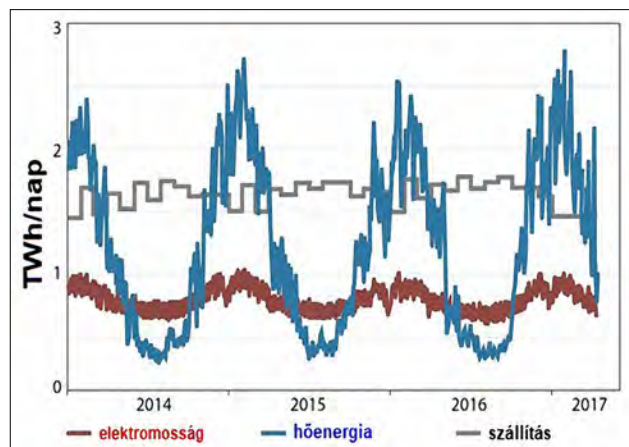
Az elektromos energiának azonban az eddig sorolt sok előnyös tulajdonsága mellett van egy olyan tulajdonsága, ami a felhasználását rendszerszintű alkalmazás mellett nehezzé és összességében bonyolulttá teszi. Az elektromos energiát a jelenlegi technológiai fejlettség mellett ugyanis nem lehet ipari méretekben tárolni. Kis mennyiségek tárolása persze lehetséges pl. zseblámpaelemek vagy akkumulátorok segítségével. A gazdasági folyamatok sokszor óriási teljesítményigénye azonban az ezekben tárolható mennyiségeknél sokkal, nagyságrendekkel több. Az elektromos energiát tehát éppen akkor kell megtermelni, amikor arra ténylegesen igény van. Ez az igény azonban állandóan változik. Azt még az elektromos áram termelésének tervezésekor figyelembe lehet venni, hogy eltérő teljesítményre van szükség évszakok és napszakok szerint. Azonban a pillanatnyi feladatoktól, berendezések bekapcsolásától vagy kikapcsolásától percről percre változhat a megtermelendő elektromos teljesítmény nagysága. Az igények kielégítéséhez szükséges modern elektromos hálózatok kiépítése és optimalizálása ma az energetika egyik legnagyobb kihívása.

Az energiaellátás rendszerének szerkezete

A nagyobb közösségek energiafelhasználását az alkalmazás jellege miatt technikailag több csoportra oszthatjuk. A felosztások egyike az, hogy a hőtípusú, az elektromos igényű és a szállítással kapcsolatos feladatok szerint készítsünk mérleget. A hőtípusú felhasználáshoz tartozik a magasabb szélességi körökön elengedhetetlen térfűtés, amely a víz forrásánál alacsonyabb hőfokon történik, valamint a lényegesen magasabb, több száz fokot megkövetelő ipari hő előállítás. Az elektromos energia széles körben alkalmazható, azonban nem minden energiatípus-igénynél használható fel. Végül a szállításnál olyan rendszereket kell alkalmazni, amelyek képesek hajtómotorjaikat átmenetileg autonóm módon, önmaguk energiával ellátni.

A 3. ábra egy kiragadott, de tipikus példaként az Egyesült Királyság néhány évének energiafelhasználását mutatja az előbbi szempontok szerint. Az ábrán látszik, hogy míg a szállítással kapcsolatos energiaigény folyamatosan évszakokon és néhány éven át napi 1,5–1,8 TWh körül mozgott, az elektromos energiaigény télen magasabb, de éves periodicitással napi 0,7 és 1 TWh között ingadozik (átlagosan 0,8 TWh/nap). A hőtípusú alkalmazás határozott téli évszakai maximumokat és nyári minimumokat mutat. A téli időszakban a hőjellegű felhasználás eléri a másik két típus igényének

összegét. Ennek nagy része a magasabb szélességi fokon elkerülhetetlen térfűtéssel kapcsolatos. A közösségekre vonatkozó arányok más éghajlati viszonyok miatt egészen mások is lehetnek.



3. ábra. Az Egyesült Királyság elektromos, hő- és szállítási energiaigénye 2014 és 2017 között TWh/nap egységekben. (Forrás: John Loughhead, BEIS)

A hőtípusú energiaigénynek jelentős része az ipari hő, amely termelési folyamatokhoz (pl. kohászathoz, vegyipari folyamatokhoz) elkerülhetetlenül szükséges. Az ezzel kapcsolatos hőmérsékletek kb. a 400 °C-nál magasabb tartományba esnek. Az, hogy a hőtípusú energiaigény milyen aránya esik a magas hőmérsékletű tartományba, elsősorban az ipari szerkezettől és fejlettségtől függ. Magyarországon például a térfűtés alacsony hőmérsékleteket igénylő része a domináns, becslésünk szerint a hőigénynek akár háromnegyed része ide tartozik. A más gazdasági szerkezetű, fejlett Egyesült Államokban a hőigény mintegy fele az ipari hő.

Az előbbieket miatt hangsúlyoznunk kell, hogy a társadalmi-gazdasági életnek számos olyan szektora van, ahol olyan feladatok fogalmazódnak meg, amelyek kielégítése a helyzetre választott megoldást követel. Ez igaz például a közlekedés számos vonatkozásában, a légi közlekedésben, a mezőgazdaság, az ipari összetett termelő tevékenység több különleges igénye ellátásában. Ehhez jön még, hogy napjainkban a bizonytalan világgazdasági helyzet miatt ismét fontossá váltak az energetikai mérlegnél egyáltalán nem elhanyagolható részarányú hadi felszerelések, csapást mérő harci eszközök. Ezek hadrendbe állításához különleges, független energiaellátásra van és lesz szükség a jövőben is. Itt az elektromos energia szerepe nem lesz meghatározó.

Az észszerű megoldások a jövő, a körös gazdaság energiaellátásában

Az energiatakarékosság lehetőségének megbecsüléséhez vegyük sorra, hogy melyek a társadalmak energiaigényét

befolyásoló legfontosabb elemek! Három ilyen elemet azonosíthatunk: a fejenkénti átlagos szolgáltatásigényt, a megkövetelt szolgáltatásokhoz tartozó fajlagos energiafelhasználást és a vizsgált közösséghez tartozó emberek számát. Az energiaigény nyilván akkor lesz kisebb, ha a szereplő mennyiségeket csökkentjük.

A vizsgált közösségben lévő emberek száma sok társadalmi-gazdasági tényezőtől és folyamattól, és kevéssé a közösség vezetőinek szándékától függ. Így ezzel nem foglalkozunk. Az első tárgyalandó elem az átlagos fejenkénti energiaigény. Ez lényegében az egyes emberek és a kollektíva vágyait fejezi ki. Ez az ember alapvető (főleg biológiai) igényein túl a társadalom szociális, mentális állapotától függ. Ezt számos tényező befolyásolja. Ilyenek a manapság megkövetelt fogyasztási szokások, az általánosan megnyilvánuló vágy a magasabb életszínvonalra, az anyagi javak fogyasztására, a jobb, szebb, újabb használati tárgyakra. A mértéket növelik a reklámok, társadalmi divatok, baráti körök egymást erősítő mozgalmi, és lényegesen befolyásolja az erkölcsi értékrend. Megítélésünk szerint ez a legfontosabb, még befolyásolható elem a társadalmi energiaigény kialakításában. Tényleges megtakarítás csak akkor érhető el, ha a társadalom képes megérteni az energiatakarékosság közösséget segítő szerepét. Az, hogy ebben mekkora lehetőség van, elsősorban a társadalom morális állapotától függ. A történelmi tapasztalat az, hogy az egyén kevés energia felhasználásával is jól, boldogan meg tud élni. Az egyénnek kell eldöntenie azt, hogy melyek azok a szolgáltatások, amelyeket ő, személy szerint vagy környezetével együtt megkövetel. Ennek társadalmi szintű alakításához politikai, kulturális változásokra van szükség, amelyeket csak nevelés és felvilágosítás útján lehet elérni.

A másik fontos elem a megkövetelt szolgáltatásokhoz szükséges energia. Persze az lenne jó, ha ez is minden esetben alacsony lenne. A technikai innováció szinte minden területen eredményes megtakarításhoz vezet, az olvasó is számos esetet ismerhet. Ugyanakkor a takarékoság szinte mindig beruházási igénnyel jár. Ráadásul a gazdasági haszon időnként időeltolódással jelentkezik, ami profitcsökkenést okozhat, míg a beruházás tökéletes lehet. Mindez pedig arra vezet, és erre több példa is felhozható, hogy a piac gyakran nem támogatja az energiatakarékossági lépéseket. Bizonyos fejlesztések megvalósításához a piaccal szembenelő politikai akaratra is szükség lehet. A jövőben valószínűleg erősödni fog az energiatakarékosságra vonatkozó elvárás, és ezt jogi és egyéb szabályozók is támogatni fogják. A tapasztalatokat és a tényeket mérlegelve ma úgy tűnik, hogy a takarékoság következtében az egy főre eső energiafelhasználás csak kismértékben csökkenhet. Jelentős, több tíz százalékos csökkentést nehéz elképzelni. Az energiatakarékossághoz szükséges érdemi átalakulások időtényezője bizonyosan legalább évtizedes nagyságrendű.

Az energiatermelői oldalon a bőséges forrás és a karbonmentes energiaelőállítás kettős követelménye nagy

lehetőségeként kínálja a hasadási atomenergia alkalmazását. Itt természetesen az atomerőművek fejlesztett változatairól lehet szó, amelyek minden felmerült nukleáris balesettel kapcsolatos aggályt megnyugtatóan kiküszöbölnék. Ezen a ponton annak is világosnak kell lennie, hogy a következő néhány évtizedre az atomerőművek csak akkor biztosítanak elegendő energiát, ha a ma alkalmazott ún. termikus atomerőművek mellett a másik, ún. tenyésztőreaktorok fejlesztése és üzembeállítása terén is érdemi előrelépés történik. Rendkívüli fejlesztés lehet annak a megvalósítása, amit legutóbbi klímacsúcson (Dubai, 2023) 25 ország, köztük hazánk szorgalmazott, hogy a következő három évtizedben a nukleáris kapacitások megháromszorozódjanak.

A megújuló energiaforrások területén a fotovoltaikus (nap-) erőművek és a szélenergia-gyorsuló mértékben növelhetik összteljesítményüket. Ugyanakkor hangsúlyozni kell, hogy ezek az egységek más (pl. atom-) erőművek érdemi együttműködése nélkül soha nem fogják tudni lefedni a modern társadalmak elektromos energiaigényét.

A következő évtizedek fontos fejlesztési irányának az elektromos energia ipari méretekben való tárolása látszik. A szivattyús vízerőművek jó rész megoldást jelenthetnek, de sem kapacitásban, sem a megépíthető erőművek száma terén nem jelenthetnek általános megoldást. E helyett egészséges gondolatnak tűnik, hogy elegendő mennyiségű hidrogént termeljünk energiátárolás céljából. A hidrogénnek óriási, 150 MJ/kg az égéshője, ami nagy tárolási potenciált csillanthat fel, ha az éghajlati viszonyok miatt a nap- és szélenergia-erőművekkel ingadozóan és kiszámíthatatlanul megtermelt elektro-

mos energiával vízbontás útján hidrogént állítunk elő. Ez az út elvileg járható. Sajnos azonban alaposan megvizsgálva a lehetőségeket és a már most meglévő és előreláthatólag telepíthető kapacitásokat, az látszik, hogy az igények nagyságrendjébe eső mennyiségű hidrogénnek legfeljebb 20%-át lehet ezen az úton előállítani a következő 3-4 évtizedben. Itt feltétlenül érdemes megjegyezni, hogy az atomerőművek olyan irányú fejlesztése, amely 800–1000 °C körüli folyamathót képes adni, ebből a szempontból is hasznos lehet. Ez a hőmérséklet már elegendően magas a szilárd oxidos elektrolizáló cella segítségével történő vízbontásra. Más, most még keresett módja is lehet az elektromos energia ipari méretű tárolásának.

Az ásványi energiaforrások mai nagyon magas részarányát biztosan csökkenteni kell. Ugyanakkor feltétlenül igaz, hogy a fosszilis energiaforrások belátható időn belüli teljes kivezetésének megvalósítását kizárólag a mai társadalmak súlyos megzavarásával, sőt szélső esetben a szétesését is kockáztató energiaellátási megvonással lehetne csak elérni.

Az emberiség energiaellátásának jelene és jövője nagy kihívásokkal teli. Biztos vagyok abban, hogy a tudomány, elsősorban a fizika a problémák megoldásának hatékony segítőtje lesz.

Ajánlott irodalom

1. MacKay David J. C. (2011): Fenntartható energia mellébeszélés nélkül. Typotex Elektronikus Kiadó Kft.
2. Meadows D. H., Randers D. L. J., Meadows D. (2005): A növekedés határai – Harminc év múltán. Kossuth Kiadó, Budapest.
3. Vajda György (2009): Energia és társadalom. In: „Magyarország az ezredfordulón” sorozat. MTA Társadalomtudományi Központ, ISBN 9789635085705

A MAI ELLÁTÁS ENERGIAFORRÁSAI: FOSSZILISEK ÉS MEGÚJULÓK

Belgya Tamás

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Budapest
E-mail: belgya.tamas@ek.hun-ren.hu

Bevezetés

Az energiaellátás a mai társadalom működésének egyik alapvető eleme. Energiabiztonságnak nevezzük az energiaforrások folyamatos elérhetőségét megfizethető áron. Nélküle a mindennapi életünk gyakorlatilag leáll, ezért nem csoda, hogy az energiaforrások birtoklásáért vagy az ellátás biztosításáért háborúk, pl. a Perzsa-öböl háború, de szerencsére napjainkban inkább csak politikai harcok folynak. Ahhoz, hogy erre megoldást találjunk, fontos megismerni az energiaforrások fizikai jellemzőit és fajtáit.

Az energia az anyag, a sugárzás, az erőtér és a mozgás egyik legáltalánosabb tulajdonsága. Az energia egy olyan mennyiségi tulajdonság, amelyet átadva egy testnek vagy egy fizikai rendszernek képessé teszi azokat munkát végezni, fényt vagy hőt kisugározni, továbbá belső szerkezetét megváltoztatni. Az anyag, a sugárzás, az erőtér és a mozgás az energia megjelenési formái. Az egyes formák egymásba átalakulhatnak, miközben zárt rendszerben a teljes energia megmarad. Az energia mennyiségének megmaradása egy folyamat esetén az időbeli eltolás invarianciájára vezethető vissza (Noether-tétel, illetve Noether-töltés) [1]. A

| Energiaformák | Jelenség energiamentisége |
|---|--|
| Mozgási vagy kinetikus energia | Egy tárgy helyváltoztatási és forgási pillanatnyi sebességétől függő energia mennyisége |
| Potenciális energia elektromos, mágneses, gravitációs, stb. tér | Az erőterben egy tárgy helyétől függő potenciálisan mozgássá alakítható energia mennyisége |
| Mechanikai energia | A kinetikus és a potenciális energia összege |
| Mechanikai hullám energiája | Tovaterjedő mozgási és potenciális energia oszcilláló rugalmas anyagban vagy gázban (hanghullám) |
| Kémiai és nukleáris energia | A kötési energiában tárolt energia mennyisége |
| Rugalmassági energia | Anyag deformációjában, illetve rezgésében tárolt energia mennyisége |
| Sugárzási energia | Az erőterben tárolt potenciális energia változó erőterben |
| Termikus energia | Az anyagok mikroszkopikus mozgásában tárolt energia |
| Nyugalmi tömeg | A nyugalmi tömegben meglévő energia |

hőenergiát is figyelembe véve e folyamatokat a termodinamikával írhatjuk le. A termodinamikával összhangban a *hasznos energiává átalakítás* során mindig veszteség lép fel, ezt a folyamat határfokának nevezzük:

$$\rho = \frac{E_{\text{hasznos}}}{E_{\text{befektetett}}} < 1.$$

Hétköznapi értelemben egy energiával rendelkező rendszerrel munkát végezhetünk (pl. autót hajthatunk), illetve munkavégzéssel energiát adhatunk át (pl. pumpálással egy palackban lévő levegő nyomását növelhetjük). Az élő szervezetek folyamatosan energiát, pontosabban energiahordozókat fogyasztanak életfunkciójuk fenntartásához, miközben energiát adnak át a környezetüknek. Az energia fogalmának történelmi kialakulása az ókori filozófiában Arisztotelész munkájában jelent meg először. Később a fizika és matematika fejlődését követően a 17. századtól kezdődően finomodott az energia fogalma. Részleteket például a Wikipédián lehet elérni [2]. Az energia számos különféle formában van jelen. Ezeket a 1. táblázatban foglaltam össze.

Szükségünk van még az energiaegység megismerésére. Az energia egysége az SI-ben a Joule (J), amely egyenlő az egy méteren (m) úton 1 Newton erő által végzett munkával. Egyenletekkel kifejezve:

$$J = N \cdot m = \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = V \cdot A \cdot s = W \cdot s \approx 0,24 \text{ cal.} \quad (1)$$



Belgya Tamás (1958) az ELTE TTK-n végzett fizikusként. Az MTA Izotóp Kutató Intézetben (IKI) kezdte magfizikai kutatását a kutatóreaktornál, majd a reaktor felújítása alatt a Kentucky Egyetem magfizikai laboratóriumában végzett kísérleteiből 1994-ben kandidált. 1993 óta neutronbefogásos analitikai és magfizikai kutatással foglalkozik. 2012-től az IKI jogutódja, a HUN-REN EK Energia- és Környezet Biztonsági Intézetének igazgatója. 2024-től nyugdíjasként folytatja a kutatásait a Budapesti Neutron Centrumban. Pályafutása alatt számos EU-s kutatási projektben vett és vesz részt témavezetőként. Jelenleg az MTA Fenntartható Fejlesztés Elnöki Bizottságában az energetikát képviselő tag.

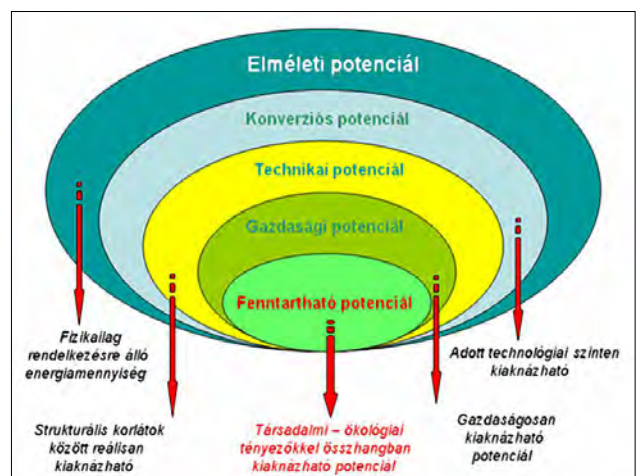
Látható, hogy a mechanikai munkát és az elektronos áram által végzett munkát a jellemző mennyiségekkel, valamint a wattban mért teljesítmény és az eltelt idő szorzatával. Ebből az is következik, hogy a feszültség és az áram szorzata az időegységre eső teljesítmény, azaz $V \cdot A = W$.

Az energiaforrásokat szokás még jellemezni a felhasználási láncban elfoglalt helyük szerint.

Elsődleges (primer) energiaforrás, amelyet átalakítva felhasználásra előkészítünk. Ezek: a szén, szénhidrogének, napenergia, vízenergia, szélenergia, geotermikus energia, atomenergia, bioenergia, ...

Másodlagos (szekunder) energiaforrás a fogyasztóhoz továbbítandó, átalakított primer energia: gáz-hő, szén-hő, benzin-közlekedés/szállítás, nap-villamos, nap-hő, víz-villamos, szél-villamos, szél-mechanikus, geotermikus-hő, atom-villamos stb. energiák.

Harmadlagos (tercier) energiaforrás a felhasználónál átalakított energia: gáz-fűtés, villamos-hűtés, villamosfény, villamos-mechanikus stb. energiák.



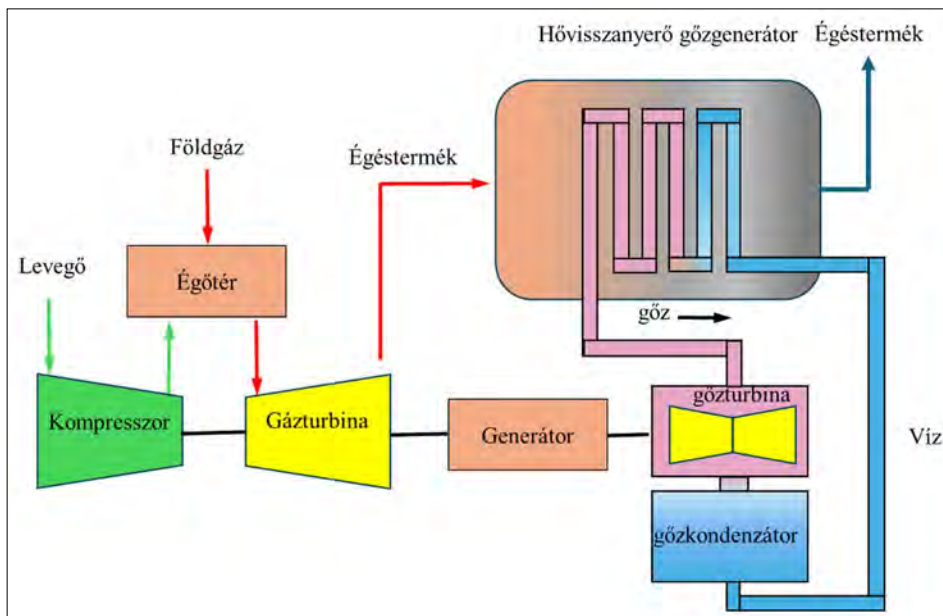
1. ábra. Az energiateljesítmény potenciáljai

Az elsődleges vagy primer energiaforrásokat szokás két osztályba sorolni. Ez a megújuló és a nem megújuló osztályokat jelenti, ami valójában arra vonatkozik, hogy ezekhez gyakorlatilag végtelen vagy véges ideig lehet-e hozzáférni.

E felosztást lehet még folyamatos vagy tárolt jellegű forrásoknak is nevezni [3]. Az első a megújuló energiaforrásokra, míg a második a nem megújulóakra vonatkozik. Az energiatermelésben meghatározó szerepük van az energiapotenciáloknak. Ezt az 1. ábra szemlélteti a legjobban [4]. A továbbiakban áttérek a címben jelzett energiaforrások bemutatására.

Fosszilis és megújuló energiaforrások

A fosszilis primer energiahordozók a tárolt jellegű osztályba tartoznak. Ezek a földgáz, a nyers kőolaj, a kőszén



3. ábra. A Dunamenti Gázturbinás Kombinált ciklusú erőmű elvi működése. A gázturbina 36–40%, a gőzturbina pedig 16–20% hatásfokú. A körfolyamat hatásfoka 52–60%.

és a lignit, melyek a földtörténet korai szakaszában élő növényekben tárolt napenergiából származnak és véges mennyiségben bányászhatók. Hazánk a legnagyobb szén- (lignit-) erőműve a Mátrai Erőmű (Gagarin) Visontán (2. ábra) 950 MW teljesítménnyel, ahol a ligniten kívül 10%-ban biomasszát is elégetnek.

Ezt egészíti ki a főként földgázt használó nyolc gáz-erőmű mintegy 2000 MW összteljesítménnyel [5]. Ezek közül a legnagyobb a dunamenti gázturbinás kombinált ciklusú erőmű (Százhalombatta, 3. ábra). Ez a legtisztább szénhidrogén tüzelésű erőműtípus, amely gyorsan indítható. A gázturbina hatásfoka 40%, a füstgázturbináé 20%, 860 MW villamos és 560 MW hő teljesítménnyel.

A villamos energiatermelés mellett a távhőt szolgáltató erőművek a nagy városokban főként földgázzal üzemelnek. Meg kell még említeni, hogy a villamosenergia termelésben a gázolaj szerepe hazánkban kicsi. A gázolaj fő felhasználása a közlekedésre és a teherszállításra összpontosul.

A primer megújuló energiának két fő forrása érhető el a földön, a napfény sugárzása és a földhő, kis mennyiségben hasznosítják az árapály jelenségét is. A földhő a Föld magjában lévő hosszú élettartamú radioaktív izotópok bomlásából és a Föld kialakulása során felszabadult ütközési energiákból származik. A nap intenzív fénysugárzását a magjában lejátszódó fúziós reakciók táplálják. A Földre érkező napsugárzás táplálja gyakorlatilag az összes megújuló energiaforrásunkat, úgymint szélenergia, napenergia, vízenergia, biomasszaenergia. A primer megújuló energia szokásos átalakítását másodlagosra a 2. táblázatban foglalom össze.

A következő részben azt mutatom be, hogy milyen módon használjuk fel a megújuló primer energiákat.

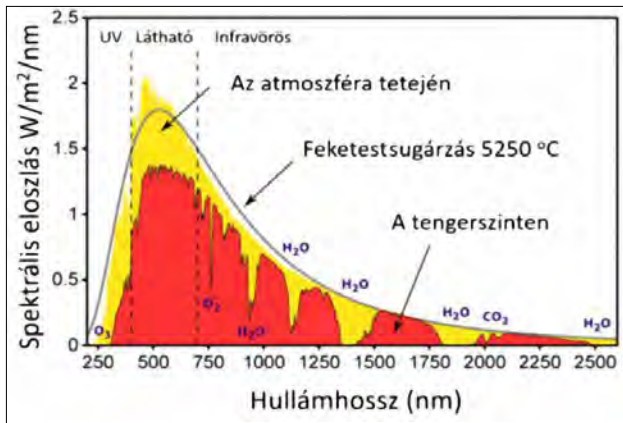
A Földet érő napfény, amely forrása a megújuló energiák többségének, napjainkban állandó fluxussal éri el a



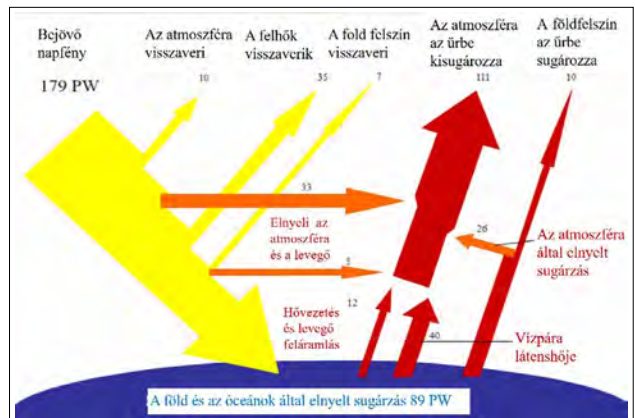
2. ábra. A Mátrai erőmű (fent) és műholdkép a telephely lignitbányáival (lent)

2. táblázat. Primer megújuló energia átalakítása másodlagosra

| Primer/szekunder | Áram | Hő | Bioüzemanyag | Hidrogén | Mechanikus |
|------------------|------|----|--------------|----------|------------|
| Nap | × | × | × | × | |
| Szél | × | | | | × |
| Óceán | × | × | | | |
| Víz | × | | | | × |
| Biomassza | × | × | × | | |
| Geotermikus | × | × | | | |



4. ábra. A napfény spektrális eloszlása a vegyületekkel jelzett részekben a légkör abszorpciója látható



5. ábra. A napfény és a Föld kölcsönhatásának teljesítmény-mérlege

Föld felső légkörét. Ezt szoláris állandónak nevezzük, és az értéke 1361 W/m^2 , ugyanakkor a geotermikus hőfluxus átlagosan $0,87 \text{ W/m}^2$. A napfény spektrális eloszlása a 4. ábrán látható.

A Föld Nap felé fordított felülete: $1,28 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$, ez $1,74 \cdot 10^8 \text{ GW}$ teljesítményt jelent. Az éves besugárzási energia $5,5 \text{ YJ}$, ebből $3,9 \text{ YJ}$ -t nyel el felszín, de ezt vissza is sugározza a világűrbe, különben nem lenne egyensúly. Az emberiség éves primerenergia-felhasználása 18772 GW vagy $0,592 \text{ ZJ/év}$. Tehát a nap sugárzásának kb. $0,011\%$ -át használjuk el összességében [6]. A nap-sugárzás Földdel történő kölcsönhatásának teljesítmény-mérlegét mutatja be az 5. ábra. hŐA primer *napenergiát*

számos módon használjuk másodlagos energia előállítására vagy egyéb hasznos feladat megoldására. A következőkben néhányat megemlítek.

Napjainkban a fejlett gazdaságokban napelemfarmokkal állítanak elő jelentős mennyiségű villamos energiát, de a déli országokban hasznosítják tükrök segítségével hőtermelésre is (6. ábra). Háztartásokban napkollektorokkal melegvíz-előállításra vagy medencemelegítésre. A tengervíz elpárologtatásával tengeri sót állítanak elő vele. A mezőgazdaságban terményszárításra és nem utolsósorban haszonnövények termelésére használják.

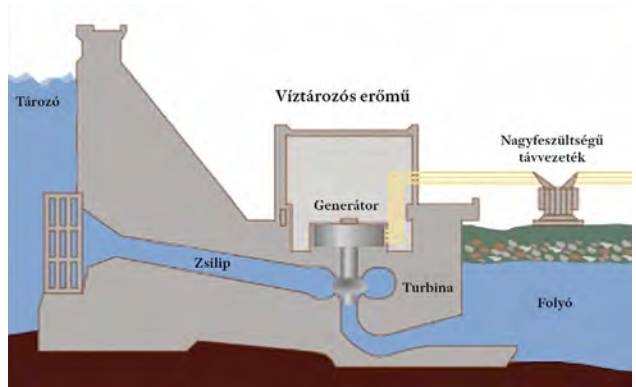
A *szélerégiát* propellerrel rendelkező szélérőművekkel hasznosítjuk. Mérésekkel kimutatták, hogy a fel-



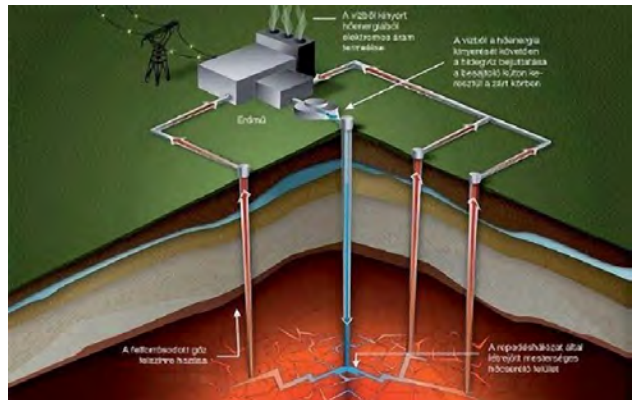
6. ábra. Napelemfarm (balra) és koncentrált naphőerőmű generátoros villamosenergia termeléshez (jobbra)



7. ábra. Szárazföldi (balra) és tengeri (jobbra) szél turbinapark. Az utóbbi a tengeri felhőképzéshez is hozzájárulhat



8. ábra. A Rance árapályerőmű 240 MW (balra). A vízerőmű sémája (jobbra)



9. ábra. A Nesjavellir geotermikus erőmű, Izland (balra). Az épülő battonyai EGS-erőmű (12 MW + hő 62 MW, jobbra) [8]

színtől távolodva nő a szél fúvás folyamatossága és ereje, [7] ezért magas (>50 m) oszlopokra nagy propellert helyezve hasznosítják a szélenergiát. Ezeknek két fajtáját különböztetik meg, ezek a szárazföldön vagy az óceánon elhelyezett ún. szélfarmok lehetnek (7. ábra).

Az óceán vizének mozgása is hasznosítható. Az egyik típus a hullámzás energiáját hasznosítja, a másik lehetőség az árapály hasznosítása a víztározók elvén alapul. A dagály folyamán feltöltik a tározót, apálykor meg leengedik, miközben turbinákat forgatnak vele. Ezt a módszert a Hold vonzása működteti, amely folyamatosan lassítja a Hold keringési sebességét. Folyóvízre is építhetők nagy teljesítményű

vízerőművek, amelyek a gravitációt használják energia-termelésre turbinák felhasználásával. Ezt a módszert is a napenergia működteti ugyanis a Nap által elpárologtatott eső táplálja a folyókat (8. ábra).

A biomassza elégetésével villamos és hőenergia állítható elő hőerőművekben. A biomassza gáz vagy üzemanyag előállítására is használható, amely tercier felhasználást tesz lehetővé.

Végül a geotermikus energiát a rétegrepszett földkéregben 4000–6000 m mélyen átfolytatott és felmelegített víz vagy vízgőz formájában lehet megcsapolni. Ez vulkanikus területen alkalmas gőz előállításra (9. ábra).

3. táblázat. Az elsődleges energiaforrások jellemzői, teljesítménysűrűségük

| | Világ összes elektromos energia felhasználása (TWh/év) (2024) | % | LCA* teljesítménysűrűség (W/m ²) | LCA föld-terület (km ² /TWh) | Teljes LCA föld-terület (km ²) | Fenntartható teljesítménysűrűség (W/m ²) |
|-------------|---|--------|--|---|--|--|
| Biomassza | 1358,27 | 4,08 | 0,50 | 228 | 6,64 · 10 ⁴ | 0,220 |
| Geotermikus | 1713,12 | 5,14 | 2,22 | 51,4 | 3,46 · 10 ³ | 0,738 |
| Víz | 4452,91 | 13,37 | 0,24 | 476 | 1,59 · 10 ⁶ | 0,154 |
| Szél | 2511,03 | 7,54 | 2,00 | 57,1 | 1,58 · 10 ⁴ | 0,492 |
| Nap PV | 2143,81 | 6,44 | 10,00 | 11,4 | 2,40 · 10 ² | 0,396 |
| Szén | 10613,25 | 31,87 | 277,78 | 0,41 | 3,35 · 10 ³ | 0,0245 |
| Földgáz | 7001,22 | 21,02 | 370,37 | 0,31 | 1,32 · 10 ³ | 0,0927 |
| Nukleáris | 2817,45 | 8,46 | 966,18 | 0,118 | 3,18 · 10 ² | 1,36 |
| Olaj | 694,69 | 2,09 | – | – | – | – |
| Összes | 33305,75 | 100,00 | – | – | 1,68 · 10 ⁶ | – |

*LCA életciklus-elemzés (Life Cycle Analysis) [9], 2024-es energiafelhasználási adatokkal felújítva

A primer megújuló energiaforrások egyik fő problémája az alacsony energiafluxusuk. Ennek szemléltetése látható a 3. táblázatban.

Magyarország megújulóenergia-potenciálját több intézmény és szakértő lényeges eltérésekkel becsülte meg. A Magyar Tudományos Akadémia felmérése került be a „Nemzeti Energiastratégia 2030” dokumentumba (4. táblázat). Ezzel szemben a tényleges felhasználást az 5. táblázat mutatja.

A táblázatokból kitűnik, hogy a megújulókból kb. 15%-os a reális felhasználási arány, emiatt csak töredékét lehet kielégíteni a hazai igénynek Ezt csak a felhasználás csökkentésével és a konverziós arány növelésével lehet javítani. A csekély reális arány a szerény konverziós arányból, a csekély rendelkezésre állásból, a társadalmi elfogadottságból és az egyéb veszteségekből ered. Az energiainport-függőségünk az elmúlt két évtizedben kb. 60%-os volt [10].

4. táblázat. Megújulóenergia-potenciál Magyarországon (PJ/év) [9]

| Napenergia | Szél | Biomassza | Víz |
|-------------|-----------|-----------|------|
| 1851,5 | 532,8 | 203,2–328 | 14,5 |
| Geotermális | Összesen | Reális | |
| 63,5 | 2665–2790 | 405–540 | |

5. táblázat. A magyarországi tényleges primer és végső energiafelhasználás és az utóbbin belül az elsődleges megújuló energia-hordozók éves felhasználása (PJ) [9]

| | 2015 | 2020 | 2021 | 2022 |
|----------|------|------|------|------|
| Primer | 1054 | 1098 | 1149 | 1074 |
| Végső | 788 | 831 | 889 | 827 |
| Megújuló | 126 | 123 | 134 | 133 |

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy egyedül megújuló elsődleges forrásokra nem hagyatkozhatunk, még akkor sem, ha sokkal nagyobb konverziós arányt tudunk kutatással és fejlesztéssel elérni; ezzel kitett-ségünket tudjuk csökkenteni. A folyamatos ellátáshoz növelni kell a tárolókapacitást. Továbbá fel kell használni a fosszilis primer energiaforrásokat és az itt nem tárgyalt tárolt jellegű atomenergiát, valamint a még fejlesztés alatt álló fúziós energiát. Továbbá azt is megállapíthatjuk, hogy a legolcsóbb az el nem fogyasztott energia – ezt pl. jó hőszigeteléssel, hatékonyabb világítással, jobb hatásfokú közlekedéssel, okos háztartásokkal stb. érhetjük el.

Irodalom

- Tóth G. Z. (2018): Száz évesek Noether tételei. *Fizikai Szemle*, 10, 331–335.
- WikipediaA (2025): Energy.
- Szarka L. (2017): Energia- és környezetbiztonsági kérdőjelek. In: Biztonsági kihívások a 21. században (Sabjanics F. G., Sabjanics I., eds.) Budapest: Dialóg Campus Kiadó, pp. 247–274.
- Tóth P., Bulla M., Nagy G. (2010): Energetika jegyzet
- Magyarországi erőművek listája. https://hu.wikipedia.org/wiki/Magyarországi_eromuvek_listaja
- Names of large numbers. https://en.wikipedia.org/wiki/Names_of_large_numbers
- Wind profile power law. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_profile_power_law#:~:text=The wind profile power law,height%2C and those at another
- <https://www.greenorigo.hu/2020-03-18/geotermikus-energia-hazankban/>; és R. Szlavkovits (2023): Akkor most elstartol a nagy geotermia bumm. <https://szeged.hu/cikk/akkor-most-elstartol-a-nagy-geotermia-bumm-1> [Letöltve: 2023. febr. 14.]
- Szilágyi Z. (2025): A megújuló energiahordozók használata Magyarországon. <https://epuletegesz.hu/2024/07/03/a-megujulo-energiahordozok-hasznalata-magyarorszagon/> [Letöltve: 2025. okt. 14.]
- KSH 3.22. Energiainport-függőség. <https://ksh.hu/kiadvanyok/fenntarthato-fejlodes-indikatorai/2024/3-22> [Letöltve: 2025. okt. 14.]

A VILLAMOS ENERGIA KIEMELT JELENTŐSÉGE A MODERN VILÁGBAN, JELENLEGI ÉRDEMI HÁLÓZATI, IRÁNYÍTÁSI FEJLESZTÉSEK

Hartmann Bálint

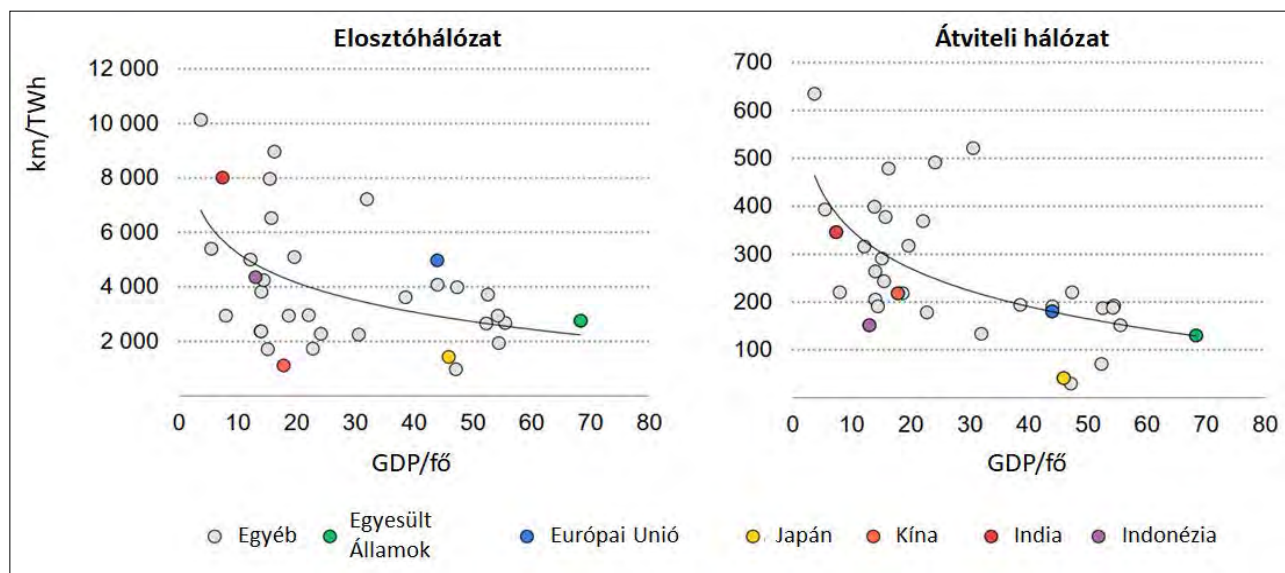
BME Villamos Energetika Tanszék, Budapest
E-mail: hartmann.balint@vik.bme.hu

A kritikus infrastruktúra

Mindennapjaink „láthatatlan”, mégis kritikus infrastruktúráját jelentik a villamos hálózatok: ugyanarra a rendszerre támaszkodik a fűtés, a közlekedés, az egészségügy, az ipari termelés vagy éppen a digitális szolgáltatások. Az elmúlt évtizedben ezt a függést tovább erősítette az energiaátmenet törekvése; egyre több megújuló energiaforrást hasznosító erőmű, és egyre több villamos energiát igénylő végfelhasználó (hőszivattyúk, elektromos járművek, adatközpontok stb.) jelent meg a hálózatokon. A két folyamat együttesen talán minden korábbinál kiemeltebb szerepbe helyezi a villamosenergia-hálózatokat, melyek azonban megfelelő beruházások hiányában

akár szűk keresztmetszetté is válhatnak. A Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency – IEA) 2023-as becslése [1] szerint közel 3000 GW megújulóenergia-kapacitás várt a világban hálózati csatlakozásra, a felgyorsult beruházási igényt pedig nem követték a hálózati beruházások, melyek világszinten évente körülbelül 300 milliárd dollár körül stagnáltak. (Hogy érzékeljük ennek nagyságát, Magyarország bruttó hazai terméke 223 milliárd dollár volt 2024-ben.)

Nem elhanyagolható szempont, hogy történelmi léptékben vizsgálva a villamosenergia-igény növekedése, a hálózati infrastruktúra kiterjedése és egyes makrotényezők (népesség, GDP stb.) között viszonylag erős összefüggések állnak fenn. Az 1. ábra ezt az össz-

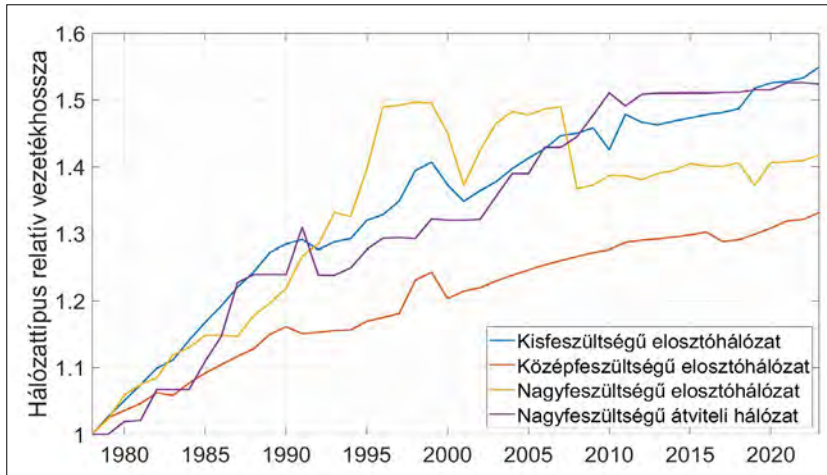


1. ábra. Az egységnyi villamosenergia-igényre jutó hálózathossz és az egy főre jutó GDP közötti összefüggés. A fekete vonal a vizsgált országok trendjét jelöli. Magyarország esetén a 2023. évi adatok alapján az elosztóhálózat esetén kb. 3940 km/TWh, az átviteli hálózat esetén kb. 86 km/TWh arányokkal számolhatunk, míg GDP-nk az Európai Unió átlagának kb. 77%-a [1]



Hartmann Bálint 2008-ban végzett okleveles villamosmérnökként a BME-n. 2013-ban szerzett tudományos fokozatot, 2022-ben habilitált, jelenleg a Villamos Energetika Tanszék tudományos főmunkatársa, a BME FASTER Kutatócsoport társalapítója, illetve a HUN-REN Energetikai Tudományi Központ tudományos főmunkatársa. Kutatási témáinak fókuszában az átviteli és elosztóhálózatok topológiai tulajdonságainak, fejlődési folyamatának megismerése állnak, valamint annak feltárása, hogy az előbbieket hogyan befolyásolják a rendszer energia- és ellátásbiztonságát.

szüggést mutatja az IEA adatai alapján – a függőleges tengelyen az 1 TWh villamosenergia-igényre jutó hálózathosszt, a vízszintes tengelyen pedig az egy főre jutó bruttó hazai terméket ábrázolva. Leolvasható, hogy az alacsonyabb jövedelmű gazdaságokban a villamos energia iránti kereslet növekedése elsősorban új háztartások, kisvállalkozások bekapcsolásának eredménye, ami jelentős hálózathálózatbővítést tesz szükségessé. Ezzel szemben a magas jövedelmű gazdaságokban a hálózati lefedettség jelenleg is magas, így egységnyi villamos-



2. ábra. A magyar elosztó- és átviteli hálózat vezeték hosszainak relatív növekedése 1978-hoz viszonyítva (saját szerkesztés a [2] alapján). Kisfeszültségű elosztóhálózat: 0,4 kV; Középfeszültségű elosztóhálózat: 11, 22 és 35 kV; nagyfeszültségű elosztóhálózat: 132 kV; nagyfeszültségű átviteli hálózat: 220 és 400 kV

energiaigény-növekedés arányaiban kevesebb hálózatfejlesztést igényel.

A villamos hálózatok gerincét a hurkolt kialakítású, nagyfeszültségű átviteli hálózatok adják, melyekben két hálózati csomópont között egynél több átviteli út létezik. A hurkolt hálózat vezetékén nincsenek kitüntetett energiaáramlási irányok, az árameloszlás a párhuzamos utakon az impedanciaarányok szerint alakul ki, ezáltal a hálózati veszteség a legkisebb. A közép- és kisfeszültségű elosztóhálózatok sugaras kialakításúak, a vezetékén az energiaáramlás iránya hagyományosan kötött volt, a tápponttól a fogadó pont felé mutatott. Napjainkban az elosztott energiatermelés térnyerésével az energiaáramlás iránya időszakosan már itt is az eredetivel ellentétes is lehet.

Villamosenergia-hálózataink ma már közel sem csak oszlopokból és drótból állnak, bár a hétköznapi szemlélődő számára valóban a vezeték hálózat jelenti a leggyakoribb kapcsolódást ehhez az infrastruktúrához. 2021-ben a világon mintegy 80 millió kilométernyi vezeték volt üzemben, melynek döntő többségét (93%) a kis- és középfeszültségű elosztóhálózatot alkotta. Az energiaátmenettel az elosztóhálózat fontossága tovább nő, hiszen ide csatlakoznak az elosztott energiatermelők, és nem utolsósorban az ügyfelek is. Magyarországon különösen látványossá vált ez a trend, hiszen 2025-ben a hazai napelemes kapacitás meghaladta a 8 GW összteljesítményt, azaz napsütéses időszakokban már egyedül ennek az energiaforrásnak a betáplálása meghaladja az ország villamosenergia-igényét. Mivel azonban a napenergia erősen időjárásfüggő, valamint szezonális változékonysággal is terhelt, elosztóhálózataink terheltsége sokkal volatilisabbá, változékonyabbá vált.

Kézenfekvő válasz lenne a hagyományos eszközhöz nyúlni, és bővíteni az infrastruktúra képességeit; a gyakorlatban azonban ez nem ilyen egyszerű. A hálózatfejlesztés sebessége nagyban függ a konkrét projekt műszaki tartalmától. Egy átviteli hálózati fejlesztés ese-

tén a tervezés és az üzembe helyezés között akár egy évtized is eltelhet, és ma már az elosztóhálózati fejlesztések is éveken átnyúló feladatok a feltorlódtó igények miatt. Ezzel szemben egy új napelemes rendszer vagy egy elektromos autótöltő telepítése viszonylag gyorsan végrehajtható, további nyomást generálva a rendszerre. Nem segíti a helyzet megoldását, hogy a legtöbb ország energiapolitikája „gyorsítósávba” terelte a megújuló energiaforrások hasznosítását, miközben a hálózatfejlesztés bürokratikus, lassú folyamat maradt. Az engedélyeztetést sok esetben késleltetheti például a nyomvonal-egyeztetés, a társadalmi konzultáció és a kivitelezői oldal humán erőforrás-

hiánya. A már említett IEA-jelentés egy külön forgatókönyvben (Grid Delay Case) vizsgálja, mi történhet, ha a hálózatfejlesztési reformok elmaradnak: 2050-ig összesen ez akár 58 Gt többlet- CO_2 -kibocsátást is eredményezhet. A negatív hatások pedig nem csak éghajlati szempontból tűnnek jelentősnek: a hálózati szűkületek miatt bekövetkező kényszerű termelői leterhelések az üzemeltetési költségeket is növelik.

A hálózatfejlesztésről dióhéjban

Magyarországon a nagyfeszültségű átviteli hálózat fejlesztésének alapkövét a MAVIR (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság) által gördülő jelleggel publikált hálózatfejlesztési terv (HFT) adja, mely évtizedes távlatra előre tekintve vizsgálja a hazai villamosenergia-rendszer szükségleteit és ütemezi a várhatóan szükséges beruházásokat. A HFT szervesen integrálódik a regionális és európai fejlesztési tervekbe; utóbbiakat az ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity – Európai Villamosenergia-átviteli Rendszerirányítók Szövetsége) koordinálja a tízéves hálózati fejlesztési terv (Ten-Year Network Development Plan – TYDNP) keretében. Az országos HFT ezenkívül az elosztóhálózat fejlesztési terveit is figyelembe veszi a két funkció egymásra utaltsága miatt. Az elosztóhálózati engedélyesek saját szolgáltatási területükre szintén gördülő jelleggel készítik a terveket, azonban a korábban már említett okok miatt ezek sokkal inkább kitétek a gyorsan változó környezetnek.

Részben erre a kihívásra reagálva folyamatos a hálózatfejlesztés jogi-szabályozási hátterének frissítése. A kiinduló, 2007. évi LXXXVI. törvény („villamosenergia-törvény”) például mára beemelte a „rugalmas hálózati csatlakozási szerződés” fogalmát, mely gyakorlatilag gyorsabb bekötésre ad lehetőséget azokon a helyszíneken, ahol egy fix teljesítményű, nem korlátozható csat-

lakozási kapacitás kiépítése időigényes lenne. Az új jogi forma szerint a betáplálás vagy vételezés előre rögzített feltételek melletti, ideiglenes korlátozhatóságáért cserébe a fogyasztó hamarabb kaphat csatlakozást. A jogszabályok mellett a tarifarendszer is ad olyan kezelhető eszközöket, melyek a fogyasztói viselkedés rugalmasságának növelésén keresztül csökkentik a hálózatfejlesztésre eső nyomást. Magyarországon régóta létezik az ún. két zónaidős A2 tarifa (alacsony terhelési időszakban olcsóbb sávval), a vezérelt B tarifa (köznyelvben éjszakai áram) vagy a fűtési idényekhez igazított H tarifa, mely kifejezetten a hőszivattyúk számára kínál kedvezményeket. Ezek a típusú tarifák megfelelő árazással ösztönözhetik a fogyasztókat saját tudatosságuk növelésére, melynek hatására a hálózat terhelése egyenletesebbé válik. Hasonló elvek mentén változott meg a háztartási méretű kiserőművek elszámolása is 2024-ben. Az ún. bruttó elszámolási rendszer ösztönzi a megtermelt energia minél nagyobb hányadának helyben történő elfogyasztását (és ezáltal az elosztóhálózat terhelésének csökkentését), mely megvalósítható például akkumulátorok telepítésével vagy nagy villamosenergia-fogyasztású eszközeink időzítésével.

A felhasználói oldal mellett természetesen a műszaki területeket is változásra ösztönzik az elmúlt évek. A hagyományos hálózatfejlesztési elvek („fektessünk vasa-ba”) mellett egyre gyakrabban fordulunk olcsóbb, gyorsabban kivitelezhető megoldásokhoz. A távvezetékek terhelhetőségének dinamikus kezelése például a mindenkori időjárás viszonyokhoz igazítja az engedélyezett áramterhelést, a korszerű feszültségszabályozó berendezések csökkenthetik a szűk keresztmetszeteket, a topológia rugalmas kezelése pedig az áramutak kijelölésével növelheti a meglévő infrastruktúra kihasználtságát. Fontos ugyanakkor azt is hangsúlyozni, hogy ezek a műszaki megoldások nem a hálózati infrastruktúra bővítését kívánják kiváltani, sokkal inkább kiegészítő lehetőséget jelentenek, melyekkel viszont adott esetben éveket lehet nyerni egy beruházásnál.

Végül, a hosszú távon is sikeres hálózatfejlesztésnek legalább ennyire fontos pillére a tervezhetőség. A MAVIR HFT-je nemcsak műszaki szempontú megközelítést ad és projekteket listáz, de egyben egy kiszámítható ütemtervet is biztosít az iparág szereplői (elosztói engedélyesek, nagyfogyasztók, beruházók stb.) számára. Az integrátori szerep egyben csökkenti annak a veszélyét, hogy az egyes szereplők saját szempontjaik mentén, szuboptimális műszaki állapotokba jussanak, növelve ezzel a rendszer teljes költségét.

Vékony jég

Cikkem bevezetőjében az IEA adataira hivatkozva írtam, hogy jelenleg évente kb. 300 milliárd dollárt fektetünk hálózatainkba, ami hatalmas összeg – mégsem elegendő. Ha a világ az energiaátmenet felé vezető úton akar maradni, az éves beruházási összegeket már ebben az év-

tizedben 500 milliárd dollárra kellene emelni, míg 2035 után már évi 1000 milliárd dolláros nagyságrendekkel is találkozhatunk. Ennek a szinte felfoghatatlan összegnek a nagy része elosztóhálózati fejlesztésekre fordítódik. Európában évente kb. 172000 db elosztóhálózati transzformátor és 262000 kilométer vezeték telepítésével számolunk, mely adatok mindegyike meghaladja Magyarország mai villamoshálózati infrastruktúrájának nagyságát [3]. Nemcsak új transzformátorok és vezetékek építésére van ugyanakkor szükség; pótolni kell az előregedő eszközöket is. Jóllehet a villamos hálózati eszközeink tervezési élettartama több évtized (1. táblázat), kifesztésű elosztóhálózatunk harmada már most 40 évnél idősebb. Az új telepítéseket és a felújításokat is számolva azt látjuk, hogy a következő húsz évben több vezeték fog épülni, mint amennyi ma egyáltalán létezik.

1. táblázat. Nagyfeszültségű berendezések napelemek, szélerőművek és elektromos járművek töltőállomásainak tipikus tervezési élettartama

| Berendezés | Tervezési élettartam [év] |
|----------------------------|---------------------------|
| Elektromos autótöltő | 10–15 |
| Napelem | 20–30 |
| Szélerőmű | 20–30 |
| Alállomási automatika | 15–20 |
| Megszakító | 30–40 |
| Erőátviteli transzformátor | 30–40 |
| Földkábel | 40–50 |
| Légvezeték | 50–60 |

Ekkora léptékű fejlesztések már az ellátási láncokat is kihívások elé állítják. A villamos berendezésekhez szükséges nyersanyagok (acél, réz, alumínium) iránti igény tartósan magas, a gyártókapacitások szűkösek, a beruházásoknak pedig már ma is kb. 20%-a szenved kése-delmet munkaerőhiány miatt. Egyik terület problémája sem oldható meg egyik napról a másikra; jól szervezett, évtizedes távlatban gondolkodó programokra van szükség. És bár mérnökként ennek a kihívásnak a megoldása a feladatunk, érdemes reálsan látni azt is, hogy mi lehet a kudarc következménye. Visszatérve az IEA pesszimista jövőképeire (Grid Delay Case – a hálózati fejlesztések csúszását feltételező forgatókönyv), a villamoshálózati infrastruktúra fejlesztésének csúszása drasztikusan megdrágíthatja az energiaátmenet egyébként sem alacsony költségeit. A meglévő fosszilizserőművek (elsősorban a szén- és gázfelhasználás) üzemen tartása, a szűkületek kezelése, a megújuló források visszaterhelése mind többletköltséget jelentenek, miközben ez ellátásbiztonsági kockázatokkal is jár. Pozitívabban szemlélve a helyzetet: a fizikai infrastruktúra felújítását proaktívan össze kell kötnünk a digitalizációval is, így kiaknázva a modern megoldásokban rejlő potenciált [3].

Az átlagos felhasználó számára mindez egészen hétköznapi döntésekre fordítódik le. Egy hőszivattyúval fűtő épület ugyan többlet hálózati kapacitást igényel egy gázra alapozott fűtéshez képest, ugyanakkor rugalmasságot is nyújt. Az otthonautomatizálási megoldások nemcsak az energiamegtakarítást segítik, de megfelelő keretek között a villamosenergia-rendszer egészének üzemeltetését is támogatják. Az új napelemes rendszerek megfelelő méretezése és saját felhasználói szokásainkhoz való illesztése jobb kihasználtságot eredményez; és a sor folytatható. A hálózat korszerűsítése a technológiai kérdéseken túlmutat, egyben kulturális változás is. A régi, centralizált rendszert a szemünk előtt váltja le a sok termelő és sok fogyasztó rugalmas működésére, egymás közötti adatcseréjére és digitális megoldásokra támaszkodó összhangja.

Az összhang eléréséhez azonban szükség van karmesterre is, aki felismeri, hogy a villamoshálózat ma már

nemcsak nagy rendszerek, vezetékerdők, trafóházak és hőerőművek izzadt, füstös verejtéke, hanem a korunk legfejlettebb technológiai megoldásait integráló csoda. A villamosenergia-szektor pedig nemcsak hisz a csodákban, de tesz is érte; folyamatosan megújulva, keresve a még jobb megoldásokat, sosem felejtve el, ki a legfontosabb ügyfele – az Olvasó.

Irodalom

1. International Energy Agency (2023): Electricity Grids and Secure Energy Transitions – Enhancing the foundations of resilient, sustainable and affordable power systems
2. MEKH-MAVIR (2024): A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2023. évi adatai
3. EURELECTRIC (2024): Grids for Speed Report
4. Vokony István, Hartmann Bálint (2025): A rendszer, amely nem tudta, hogy meg kell újulnia. Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest

AZ ATOMENERGIA ALKALMAZÁSÁNAK JELENLEG LÁTHATÓ TRENDJEI ÉS EGYES JÖVŐBELI TECHNOLÓGIAI LEHETŐSÉGEI

Aszódi Attila

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Budapest

E-mail: aszodi@reak.bme.hu

Az atomenergia napjainkban

Az atomenergia békés célú, polgári villamosenergia-termelésre szolgáló fejlesztésének és felhasználásának története több mint hetven évre tekint vissza. Az USA-ban 1951 decemberében lépett üzembe az EBR-I kísérleti reaktor, amelyhez már gőzturbina kapcsolódott, és négy darab 200 W teljesítményű villamos izzó működtetésével bizonyította, hogy lehetséges nukleáris alapon villamos energiát termelni. Az első, közhálózatra kapcsolódó atomerőmű a Moszkva melletti Obnyinszki Atomerőmű volt, amely 1954-ben kezdte meg a megtermelt villamos energia hálózatba táplálását. Mára mintegy húszezer reaktorévnyi üzemeltetési tapasztalat gyűlt össze az atomerőművekben. Világszerte 31 országban működnek

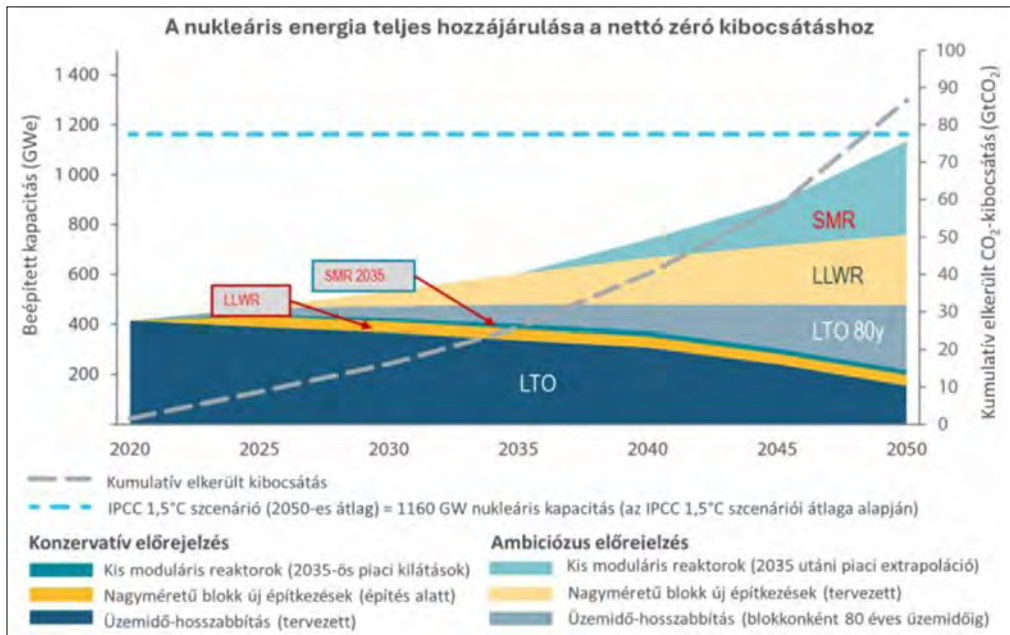
energetikai reaktorok, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) adatai szerint 2025 októberében 416 reaktor volt üzemben, amelyek 376 000 MW névleges beépített kapacitást képviseltek [1]. Ez az atomerőművi flotta 2024-ben 2617 TWh villamos energiát szolgáltatott.

2024-ben 14 ország villamosenergia-termelésének legalább egynegyede atomenergiából származott. Franciaország villamosenergia-termelésének mintegy 70%-át, míg Ukrajna, Szlovákia és Magyarország villamosenergia-termelésének körülbelül felét atomerőművekben állították elő (a magas magyar villamosenergia-import arány miatt a hazai ellátásban kb. 35%-os részt képviselt 2024-ben a paksi atomerőmű). Japán korábban villamosenergia-termelésének több mint egynegyedét atomenergiából fedezte, és várhatóan visszatér majd ehhez a szinthez, ha a most működő 14 blokk mellé üzembe helyezik még azt a 19 reaktort is, amelynek az üzemeltetési engedélye egyelőre fel van függesztve.¹ A teljes Európai Unióban 2024-ben 24% volt az atomenergia részesedése a villamosenergia-termelésben. Az Európai Unió 27 tagállamából 13 országban működik atomerőmű, amelyek az összekapcsolt európai villamosenergia-rendszeren



Aszódi Attila a BME Nukleáris Technikai Intézetének egyetemi tanára, a 2003-as áprilisi paksi üzemzavart követően 2004 júniusáig Paksra kiküldött miniszteri biztosként tevékenykedett, a fukusimai balesetet követően pedig az Európai Bizottság szakértőjeként vett részt az európai atomerőművek célzott biztonsági felülvizsgálatában. 1999-től 2014-ig (1 év megszakítással) a BME oktatóreaktorának vezetője. 2004 és 2014 között a Nukleáris Technikai Intézet igazgatója volt, a termohidraulika és reaktorbiztonság kutatási területek gondozója. Jelenleg a BME Természettudományi Kar dékánja.

¹ A szigetországban minden reaktor működtetését felfüggesztették a 2011-es fukusimai balesetet követően, mostanra 14 reaktort visszaindítottak, 19 reaktor újraindításra vár. Japánban 27 reaktor van véglegesen leállított státuszban.



1. ábra. A nukleáris kapacitások megháromszorozása 2050-ig – egy lehetséges forgatókönyv [3]

keresztül minden EU tagország zsinóráram-ellátásában fontos szerepet játszanak, beleértve ebbe az atomenergiát közvetlenül nem alkalmazó országokat is.

Atomenergia-trendek

2023 decemberében Dubaiban, a COP28 klímakonferenciához kapcsolódóan 25 ország aláírt egy nyilatkozatot, amelyben kifejezték, hogy a klímavédelmi célok eléréséhez szükséges a jelenlegi nukleáris kapacitások megháromszorozása 2050-ig. Később további 6 ország csatlakozott az elhatározáshoz, így mára 31 ország köteleződött el a terv mellett [2]. Ez a közös nyilatkozat lényeges az atomenergia további fejlesztése szempontjából, mert hosszú ideig úgy tűnhetett, hogy a magas szintű politikai nyilatkozatokban csak a megújuló energiaforrásokat tekintik karbonsemleges, a fenntartható fejlődést szolgáló forrásnak, míg ez a nyilatkozat egyértelművé tette, hogy sok ország számít az atomenergiára mint tiszta, magas rendelkezésre állású alaperőművi áramforrásra, amely hozzájárul az energiaellátás biztonságához és kiegészíti a megújuló energiaforrásokat a klímavédelemben és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésében.

A nyilatkozat aláírói felhívták a figyelmet az atomenergetikai befektetések előmozdításának szükségességére, valamint a nukleáris energia finanszírozási mechanizmusainak megújítására, továbbá a fejlett nukleáris technológiák alkalmazására, beleértve ebbe a kis moduláris reaktor (Small Modular Reactor, SMR) technológiákat is. Az aláíró országok vállalták, hogy biztosítják a nukleáris erőművek magas szintű biztonsági, fenntarthatósági és non-proliférációs szabályok² szerinti üzemel-

² A tömegpusztító fegyverek elterjedésének megakadályozását célzó nemzetközi erőfeszítések

tesétét, valamint a radioaktív hulladékok felelősségteljes kezelését. Felkérték továbbá a nemzetközi pénzügyi intézményeket (a Világbankot és a regionális fejlesztési bankokat), hogy hitelezési politikájukban kifejezetten támogassák az atomenergiát.

A 31 ország elköteleződése magában foglalja a meglévő atomerőművek élettartamának meghosszabbítását, amennyiben ez biztonságosan megvalósítható, az új reaktorok építésének felgyorsítását, valamint a legmagasabb szintű nukleáris biztonsági szabályok szerinti további polgári célú atomenergia-hasznosítás támogatását.

A nukleáris kapacitások 2050-ig történő megháromszorozására az OECD Nukleáris Energia Ügynöksége (NEA) adott egy lehetséges forgatókönyvet 2022-es tanulmányában, amit az 1. ábra foglal össze, és amelyről az alábbiakat olvashatjuk le. A meglévő közel 400 GW atomerőművi kapacitás közel felét leállítanák 2050-ig, ha a ma ismert üzemidő-hosszabbítási programok valósulnának meg. Mivel a műszaki vizsgálatok számos országban azt mutatják, hogy a meglévő blokkokban bőven vannak még biztonságosan kiaknázható üzemidő-tartalékok, a 70 vagy 80 éves teljes üzemidő eléréséhez további üzemidő-hosszabbítási programok lesznek szükségesek. (Ilyen van előkészítés alatt a paksi atomerőmű meglévő négy blokkja esetében is). A NAÜ adatai szerint jelenleg 62 reaktor van építés alatt világszerte (elsősorban Ázsiában), ezek 64 GWe kapacitást képviselnek. A jelenleg már építés alatt lévő nagy könnyűvízhűtésű és könnyűvíz-moderálású reaktorblokkok megépítésével, valamint az előbb említett hosszú távú üzemeltetési programokkal képzelhető el az, hogy a mostani kb. 400 GWe nukleáris kapacitás szinten marad 2050-ig. További, összesen kb. 400 GWe lehetséges nagy, 1000 MWe fölötti egységteljesítményű blokkok építése révén; tehát az ilyen építke-

zések felfuttatása szükséges rövid távon. A NEA azzal számolt, hogy a kis moduláris reaktorok (SMR) termelésbe való belépése számottevő mértékben a 2030-as évek közepétől lesz lehetséges, amellyel további, több mint 400 GWe kapacitás lesz hozzáadható a globális villamosenergia-termelési mixhez.

Ez a felfutás számos kérdést felvet – hiszen az atomerőművi kapacitások inkább stagnáltak az elmúlt három-négy évtizedben a fejlett világban, mint hogy fejlődtek volna. A nagy atomerőmű-építések inkább Ázsiában voltak jellemzőek, az a néhány nagy atomerőmű-építési projekt, ami a nyugat-európai és észak-amerikai régióban történt, inkább az ütemtervhez képesti nagyobb késedelmek miatt került be a hírekbe, semmint a sikeres projektmenedzsment miatt. Honnan teremthető meg ehhez a felfutáshoz a szükséges gyártókapacitás? Honnan lesz ehhez szakember? Honnan lesz meg a szükséges kompetencia? Biztonságosak lesznek ezek a létesítmények? Lesz elég üzemanyag? Mit kezdünk a kiégett üzemanyaggal és a keletkező hulladékkal? A fenti feszítő kérdéseken túl nyilván továbbiak is megfogalmazhatóak. A jelen cikk terjedelmi korlátai miatt röviden térek ki egyes aspektusokra, az SMR technológia felfutásának feltételeit részletesebben is elemzem.

A nagy teljesítményű hagyományos atomerőművek piaca

A hagyományos nagy atomerőművi blokkok gyártásának piaca jelentősen átalakult az elmúlt három évtizedben. Miközben az 1970-es és 1980-as éveket jellemző ún. II. generációs nyomottvízes és forralóvízes reaktorokat az új építésekben felváltották a III. generációs, továbbfejlesztett technológiák, egyes nagy nyugat-európai gyártók mint a Siemens vagy az ABB felhagyott ezzel az üzletággal. Az USA elveszítette nagy nehézipari gyártókapacitásait, a nagy komponensek (reaktortartály, gőzfejlesztő) gyártásához szükséges kovácsüzemi kapacitások az USA-ban ma már nem elérhetőek. Ha az amerikai Westinghouse reaktortartályt akar gyártani a III. generációs, passzív biztonsági rendszerekkel ellátott AP1000 reaktorhoz³, a dél-koreai Doosan Enerbility segítségét kell kérnie.

Nagy nyomottvízes atomerőművi blokkot ma az amerikai Westinghouse mellett a francia Framatome, az orosz Roszatom és a dél-koreai KEPCO tud a nemzetközi piacra szállítani. Valójában nem maradt más gyártó ezen a

³ Bizonyos 3/3+ generációs reaktorok ún. passzív biztonsági megoldásokat alkalmaznak egyes biztonsági funkciók megvalósításához. Ez azt jelenti, hogy az adott biztonsági rendszer működéséhez nem szükséges külső villamosenergia-betáplálás valamilyen aktív komponens, pl. szivattyú működtetéséhez, hanem a feladatot egyszerű fizikai elvek, mint a gravitáció által hajtott felhajtóerő működteti. Ez a műszaki megoldás csökkentheti a beépítendő berendezések számát és akár a biztonsági funkció nagyobb rendelkezésre állását is biztosíthatja egyes üzemzavari események során.

piacra. A kínai CNNC és CGN cégek jelentősen fejlődnek ezen a területen, és kacsingatnak a nemzetközi piac felé a Hualong One elnevezésű, francia alapokon nyugvó, kínai mérnökök által továbbfejlesztett 1000 MW-os nyomottvízes reaktorral, de a kínai és pakisztáni piacra kívül egyelőre nem tudtak megjelenni. A fenti öt országon kívül nem látszik olyan, amelyik képes lenne nagy energetikai reaktort gyártani és exportálni. Új szereplő megjelenésére utaló jelek nem látszanak ebben az üzletágban. Elvileg japán vállalatok szintén képesek lennének nagy atomerőművet építeni, ehhez a gyártókapacitásuk és tapasztalatuk is megvan, de ilyen törekvések a részük-ről nem tapasztalhatóak.

Fontos említeni, hogy a nagyberendezések gyártásához szükséges kapacitások sok iparilag fejlett országban (beleértve az USA-t is) megszűntek. Az 1000 MWe teljesítményosztályban nagyberendezést gyártani ma francia, orosz, dél-koreai, kínai és japán üzemek képesek csak, máshol nincsen ilyen gyártási kapacitás.

Németország az „Atomausstieg” (az atomenergia energiamixből történő kivezetése) következtében elveszítette a nukleáris kompetenciája számottevő részét, és nem látszik szándék ennek korrekciójára. Az új technológiák fejlesztése jelentős anyagi forrásokat igényelne Európában is. Jelenleg az EURATOM program forrásainak kb. 70%-a fúziós kutatásokra fordítódik, 30% megy a fissionális és nukleáris biztonsági kutatásokra, a következő költségvetési periódusban – elsősorban az ITER nagy fúziós kísérleti berendezés építési költségeinek elszállása következtében – a megnövelt EURATOM-költségvetés 80%-a megy majd a fúzió kutatására, a maradék 20% lesz fissionális témákra fordítható. És bár volumenében kismértékben növekszik ez utóbbi szelet is, de a ráfordítások aránya nagyon torz – miközben nem várjuk azt, hogy 30 vagy 50 éven belül a fúziós kutatások kereskedelmi léptékben hasznosítható fúziós energiatermeléshez vezethetnének. Tehát az EURATOM-források jelentős részét úgy költjük el, hogy nem várhatjuk azok hasznosulását energiapolitikai megoldásokat nyújtó új technológiákban. Németország maga is jelentős összegeket költ fúziós kutatási programjára, de hangsúlyozom, hogy ennek energiapolitikai hasznosulása belátható időtávban egyáltalán nem várható.

A következő fejezetekben leírt kis moduláris reaktorok ugyanakkor attraktívak lehetnek sok kisebb fejlesztő számára is, mert a kisebb erőműméret, a kisebb komponensek, a moduláris gyártás azzal kecsegtethet, hogy új szereplők is beléphetnek a (kis) atomerőmű-építési piacra.

A kiégett üzemanyagok kezelése tekintetében itt annyit említek meg, hogy a két nukleáris energiát alkalmazó skandináv országban, Svédországban és Finnországban is megépült már a mélygeológiai tároló, ahol a kiégett kazetták közvetlen elhelyezése meg tud valósulni. Az előző fejezetben leírt atomenergetikai felfutáshoz szükséges üzemanyag-ellátáshoz hasznos lesz

a kiegészítő üzemanyagok újrafeldolgozása, és a bennük lévő hasadóanyagok visszaforgatása az atomerőművi üzemanyag-ciklusba. Azt gondolom, az országok zöme ebbe az irányba fog fejleszteni, ami a végleges hulladék-elhelyezés számára is egyszerűbb helyzetet, kevesebb elhelyezendő hulladékot eredményezne. A negyedik generációs reaktorok megjelenése az SMR reaktorok között, illetve a nagyteljesítményű negyedik generációs reaktorok megjelenése után a kiegészítő üzemanyagok újrafeldolgozása során kivont, uránnál nehezebb izotópok felhasználását, ártalmatlanítását is meg kell oldják, ami szintén a fejlesztési célok között szerepel.

Kis moduláris reaktorok és a fejlődési potenciáljuk

Az utóbbi néhány évben nagy figyelem övezi szakmai körökben és a szélesebb közönség részéről is a kis moduláris reaktorokat (small modular reactors, SMR). Az atomerőművek méretosztályozását a 2. ábra mutatja, SMR-nek tipikusan a 10 MWe és a 300 MWe teljesítmény között tartományba eső reaktorokat nevezünk, de ez nem szigorúan megadott mérethatár. Az SMR-technológiákkal kapcsolatosan tapasztalható felfokozott érdeklődést meglátásom szerint számos tényező együttállása okozza, ezeket veszem most sorra.

Az orosz-ukrán háború és az annak kapcsán létrejött energiaellátási válsághelyzet, továbbá a földgáz árának megugrása számos kormány és piaci szereplő figyelmét felhívta arra, hogy az energiaellátással kapcsolatos korábbi álláspontot felül kell vizsgálni. Tehát az ellátásbiztonság kérdése felértékelődött, és fontossága kézzel foghatóvá vált.

Szintén lényeges elem, hogy mára a klímaváltozás nemcsak a tudósok és a politikusok vitáinak tárgya, hanem a mindennapokban is érzékeljük hatását, így a több-

ség számára világos, hogy ténylegesen csökkenteni kell a fosszilis energiaforrások felhasználását.

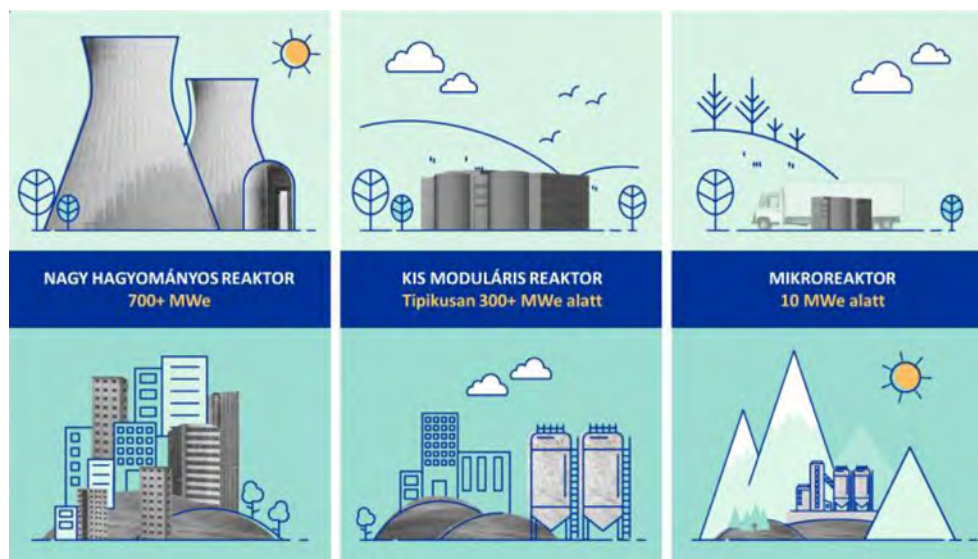
Harmadrésről mind Európában, mind Észak Amerikában azt tapasztaljuk, hogy a nagy atomerőmű-építések nagyon elhúzódnak, ami növeli a finanszírozási költségeket, és növeli a projektkockázatokat. Erre a problémára kell valamilyen megoldást találni, márpedig az SMR-ek azzal kecsegtetnek, hogy sorozatgyártás esetén sokkal rövidebb idő alatt lesznek megépíthetőek.

Negyedrésről a nagy techcégek (mint a Google, a Microsoft és az Amazon Web Services) belépése az SMR-ek fejlesztésébe olyanok számára is ráirányította a reflektort az SMR-ekre, akik eddig nem foglalkoztak a területtel [5]. Az, hogy viszonylag kisebb mérnöki cégek kockázati tőkét vagy éppen tőzsdei finanszírozást keresnek a technológiai fejlesztések finanszírozására, egyértelműen megnövelte ezen projektek láthatóságát.

Ötödikként pedig azt a jelenséget emelem ki, hogy a kisebb reaktorok láthatóan magasabb lakossági támogatásnak örvendhetnek, ami – ha élni tud vele a globális nukleáris ipar – egy új lehetőséget teremt. Hiszen politikai és lakossági támogatás nélkül a nukleáris ipar hosszú távú fenntarthatósága nem elképzelhető. Magyarországon ugyanezeket a szempontokat figyelhetjük meg; az SMR-ekkel kapcsolatos párbeszéd nálunk is a globális folyamatokkal párhuzamosan bontakozott ki és fejlődik napjainkban is.

Az SMR-technológiák sokszínűsége

Az OECD Nukleáris Energia Ügynöksége tavaly kiadta a Small Modular Reactor Dashboard (Kis moduláris reaktorok áttekintése) című jelentést [6], amely átfogóan összefoglalja a világszerte fejlesztés alatt álló különböző SMR-technológiákat. Ez a globális áttekintés 98



2. ábra. Az atomreaktorok méretosztályozása [4]

SMR-technológiát azonosított, amelyek azonban nagyon különböző fejlesztési fázisban vannak. Bár már néhány, 300 MWe alatti teljesítményű egység működik, a sorozatgyártásra és széles körű bevezetésre alkalmas SMR-ek még mindig a tervezési és engedélyezési fázisban vannak. A különböző technológiák és eltérő megoldások nagy számossága élénk érdeklődést mutat. Egyes SMR-konceptiók nagy atomenergetikai cégekhez, mérnökirodákhoz kötődnek, másokat kockázatitőkebefektetők támogatnak, megint másokat tőzsdére vitték tulajdonosaik, tehát a lehetséges megoldások egy sokkal szélesebb és színesebb közegekből érkehetnek, mint a nagy konvencionális reaktorok.

A legpotensebb SMR-technológiákkal kapcsolatban viták zajlanak még a nemzetközi atomenergetikában; én úgy gondolom, hogy a nagy darabszámú sorozatban gyártott SMR-eket a nyomottvízes vagy forralóvízes technológiától várhatjuk, amely reaktorok fizikai elveit tekintve tulajdonképpen a most használt nagy atomerőművek kicsinyített és továbbfejlesztett változatai. Itt a rövidebb építési idő, a passzív biztonsági megoldások alkalmazása, valamint a hatalmas meglévő engedélyezési és üzemeltetési tapasztalat a nagy vonzerő. Több kis moduláris reaktor olyan üzemanyagot használ, amit a ma működő nagyobb testvérei, így az üzemanyag engedélyezése és gyártása egyszerűsödik. Ez nagy előnyt jelenthet a nukleáris üzemanyag tervezési, engedélyezési és gyártási költségeinek csökkentése területén.

A passzív biztonsági megoldások új perspektívát adnak számos reaktornak, ugyanis a gravitáció, a természetes áramlás mérnöki megoldásként történő alkalmazása lehetővé teszi, hogy bizonyos reaktorokat ne kelljen folyamatosan árammal ellátni egy üzemzavar során, így a biztonsági követelmények biztosítása és annak igazolása sokkal egyszerűbb lehet. A szivattyúk, dízelgenerátorok, biztonsági hűtőrendszerek eliminálása a tervekből csökkenti a beruházási költségeket és egyszerűsíti az engedélyezést, ha ezen megoldások kísérleti és szimulációs vizsgálatok segítségével igazolhatóak.

Azok az ún. továbbfejlesztett (advanced, negyedik generációs) kis moduláris reaktorok, amelyek nem vizet használnak hűtőközegnek, hanem például olvadt fém, sóolvadékot vagy magas hőmérsékletű gázt, sokkal több technológiai és engedélyezési kihívást rejtegetnek, mint a könnyűvízhűtésű reaktorok. Ugyanakkor a magasabb reaktorhőmérséklet olyan ipari területekre is elviheti ezeket a technológiáknak az alkalmazását, ahol ma kizárólag fosszilis energiahordozókkal lehet az ipari hő előállítani. Emiatt remélem, hogy jópár negyedik generációs SMR-projekt is beérik majd, és ezek is kereskedelmi típusá válnak.

Az SMR technológia engedélyezési kérdései

Nemcsak Magyarországon, hanem az összes közép-európai országban (sőt, tulajdonképpen az Európai Unió

összes érdekelt tagállamában) felül kell vizsgálni az engedélyezési környezetet ahhoz, hogy az SMR technológia meghonosodhasson. Az SMR-ek széles körű elterjedése megköveteli, hogy létezzen a típusengedélyezés rendszere, ami az USA-ban, Kanadában és az Egyesült Királyságban része az atomenergia törvényi keretrendszerének, de a környékünkön sosem alkalmazták ezt az engedélyezési rezsimit.

Az is fontos lenne, hogy egy technológiát, egy adott típust még a konkrét projekt és a konkrét telephely kiválasztása előtt engedélyeztetni lehessen. Ezt az eljárást az USA-ban a technológia szállítója is kezdeményezheti, így a feladatok és projektkockázatok jobban megoszthatóak a technológiaszállító, a majdani tulajdonos és nukleáris engedélyes között. Ez az engedélyezési séma nemcsak jobban osztja el a projekt megvalósítási kockázatait, hanem az ütemezés szempontjából is kedvező, mert a nagyobb tőkét igénylő megvalósítási munkák már bizonyosan csak akkor indulnak el, amikor az összes szükséges engedély rendelkezésre áll. Az üzleti életben a kockázat valójában mindig pénzbe kerül, így a megvalósítási kockázatok mérséklése valójában szintén az összes költség kontrollálását, csökkentését szolgálja. Ezt a módszert alkalmazva az SMR-ekben előállított villamos energia fajlagos költsége is csökkenthető.

Az engedélyezési környezeten túl alapvető szempont még a véleményem szerint, hogy a technológia a lehető legjobban lokalizálható legyen: a közép-európai országok alapvető érdeke, hogy a gyártásba és építésbe a lehető legnagyobb mértékben bele tudjanak folyni. A kisebb berendezésméretnek eleve lehetővé teszik, hogy kisebb országok is gyártókapacitást fejlesszenek egyes SMR-berendezések előállításához – itt a szinergiák jobban kihasználhatóak, mint a nagy reaktorok esetében.

A lokalizáció erősítéséhez a mainál jelentősen több pénzre van szükség az európai físzációs kutatásokban. Az európai országok iparvállalatainak össze kell fogniuk, hogy a megfelelő technológia és gyártási kapacitások kiépüljenek. A 70-es és 80-as években európai cégek sora kínált atomerőmű-technológiákat és valósított meg projekteket. Ennek a kapacitásnak újra ki kell épülnie az öreg kontinensen, ha versenyképesek akarunk maradni a 21. században.

A fentiekhez azonban a tiszta jövőkép mellett iparfejlesztésre és nagyon tudatos, strukturált szakemberképzésre is szükség van hazánkban és az egész Európai Unióban egyaránt.

A kis moduláris reaktorok rendszerbe illesztése

Az SMR technológia egyik fontos jellemzője, hogy a reaktor és az egész létesítmény kisebb mérete következtében közelebb telepíthető lesz a felhasználás helyéhez. Egy nagy ipari üzem – akár ipari vezetékkel, a közhálózat

használata nélkül, ennek következtében a villamosenergia-rendszer rendszerhasználati díjának fizetési kötelezettsége nélkül – ellátható egy SMR-ből, amit közvetlenül az ipari üzem közelébe telepítenek. Ez a megoldás ráadásul lehetővé teszi, hogy a villamos energia mellett az SMR akár ipari hőt is szolgáltatson. Ez segít az ipari energiaellátás és a hőszolgáltatás dekarbonizációjában, továbbá – például a vezetéken importált földgázon alapuló energiaellátáshoz vagy az importált villamos energiához viszonyítva – jelentősen javítja az ellátásbiztonságot. Azt is fontos leszögezni, hogy az SMR reaktorok elérnek a magyar villamosenergia-rendszerben a Paks I és a Paks II mellett is. Sőt, az SMR technológia nagyobb rugalmassága, és adott esetben a hő- és villamosenergia-termelés kombinálása (később esetleg a hidrogéntermeléssel együtt is kombinálva) jelentősen javítja a villamosenergia-rendszer rugalmasságát, az időben változó igényekhez, a menetrendhez való alkalmazkodást is.

A magas hőmérsékletű hőtárolás (pl. olvadt só felhasználásával) érdekes és innovatív megoldás lehet, amelyet jelenleg SMR-alkalmazásokhoz is fejlesztettek. A magas hőmérsékletű hőtárolás és az atomerőművek kombinálása lehetőséget nyújt arra, hogy azok jobban alkalmazkodjanak a villamosenergia-kereslet hálózati szintű változásaihoz anélkül, hogy a reaktort gyakran le kellene állítani. Így a hálózati rugalmasság növelése tekintetében ezen a területen is nagy fejlődési potenciál mutatkozik.

Én hatalmas potenciált látok az SMR-ek számára a lakossági távhőszolgáltatás piacán is. Magyarországon és a környékbeli országokban is rengeteg távhőrendszer működik. Ezek zöme ma földgázt tüzel el, hogy használati melegvizet és télen fűtést biztosítson a lakosságnak. A specifikusan erre tervezett SMR-ek ki tudják váltani a földgázt ebben a szolgáltatási szektorban, kis helyigény mellett, magas biztonsági színvonalon. Egy erre tervezett távfűtő SMR akár a lakott terület közvetlen közelébe is telepíthető. Összességében tehát azt lehet mondani, hogy az SMR technológián alapuló kis erőművek és SMR-távfűtőművek jól illeszthetők a magyar rendszerbe.

A kis moduláris reaktorok elhelyezése

Ha áttekintjük az atomenergiával kapcsolatos aktuális nemzetközi diskurzust, pl. az USA-ban, Lengyelországban, de számos más országban is vizsgálják, hogy a kis moduláris reaktorok hogyan alkalmazhatóak ún. barnamezős telephelyeken, ahol jelenleg széntüzelésű blokkok működnek, de a dekarbonizáció következtében a szénfelhasználással rövid vagy középtávon fel kell hagyni.

A meglévő erőművi (akár szénerőművi, akár atomerőművi) telephelyek a barnamezős beruházások számára kiváló lehetőséget kínálnak, hiszen ott van az energetikában járatos munkaerő, van ipari telephely, amit elfogad a lakosság, van villamoshálózati csatlakozás, megvan a hűtővízellátáshoz szükséges infrastruktúra. Vannak olyan erőművek, amelyek mellé ipari üzemek települ-

tek (ilyen pl. Magyarországon a lignittüzelésű Mátrai Erőmű), mert szükségük van a hőre, amit az erőmű szolgáltat a számukra. Számos olyan régió van Európában, ahová a szénerőmű bezárása után, ha nem települne oda másik energetikai létesítmény, akkor sok ember maradna munka nélkül, és a hővel kiszolgált ipari tevékenység is ellehetetlenülne. Az adott települések, régiók szempontjából az ipari tevékenység fenntartása a helyi adóbevételek zuhanásának elkerülése érdekében is lényeges.

A fent említett problémákat egy pár 10 MW-os nap-erőműpark telepítése nem oldja meg, mert az nem tud hőt szolgáltatni, és alig van lokális munkaerőigénye. A megítélésem szerint az SMR-projektek számos európai régió számára az egyetlen kiutat jelentik az elnéptelenedéssel és az ipari tevékenység megszűnésével szemben. Emiatt a témának napjainkban intenzíven fejlődő irodalma van. Példaként említem, hogy az Oak Ridge Nemzeti Laboratórium (Oak Ridge National Laboratory) az USA Energiaügyi Minisztériuma számára készített tanulmányában azt találta, hogy az USA meglévő atomerőművi telephelyei 60–95 GWe, meglévő szénerőművi telephelyei 128–174 GWe új erőmű telepítési potenciált mutatnak [7]. Az amerikai Indiana állam vizsgálata nyolc olyan telephelyet azonosított, amely alkalmas lehet SMR telepítésére [8]. Kanada Ontario tartománya 2025. május 8-án jelentette be végleges beruházási döntését, amelyben zöld utat adott az Ontario Power Generation cégnek a GE Vernova Hitachi Nuclear Energy technológiaszállító első négy BWRX-300 típusú SMR-blokkja megépítésére a Darlington Atomerőmű telephelyén, ahol egyébként négy darab CANDU típusú (nagy) reaktor működik az 1990-es évek eleje óta. A négy új SMR-blokkból álló projekt teljes költsége 20,9 milliárd kanadai dollárra (12,9 milliárd EUR) becsülhető [9, 10]. A Darlington SMR-projekt lehet a G7 országok első megvalósuló SMR-projektje. Kontinensünkön az Európai Bizottság Európai SMR Ipari szövetséget hozott létre annak érdekében, hogy segítse az SMR technológia európai elterjedését és az ehhez szükséges beszállítói lánc kiépítését [11]. Európában az első SMR-építés még várat magára, bár a Rolls-Royce SMR nagyon jól halad az Egyesült Királyságban [12], illetve más európai országokban, például Csehországban [13] és Svédországban [14] is.

Összefoglalás

Az európai ipar és az egész energiaellátásunk átalakulóban van. Újra saját lábra kell álljunk. A jövő európai energiamixében is meghatározó szerep hárul az atomenergiára. Európában nem elképzelhető a stabil és megfizethető energiaellátás atomenergia nélkül. Az energetikai átálláshoz szükséges a meglévő atomerőművek élettartamának meghosszabbítása, nagy reaktorok és kis moduláris reaktorok építése is.

A lakossági elfogadás, az egyértelmű és támogató energiapolitikai attitűd elengedhetetlen. A lakossági támogatás fenntartása és folyamatos fejlesztése, valamint

a szakember-utánpótlás biztosítása szintén olyan alapfeltételei az atomenergetikának, ami nélkül a hosszú távú fenntarthatóság nem elképzelhető.

Mind a szakemberképzés és utánpótlás, mind pedig a széles körű lakossági támogatás alapvetően szükségesé teszi, hogy a társadalom széles rétegei értsék a természettudományok, ezen belül is a fizika alapvető összefüggéseit. Tudásalapú társadalmat tudás nélkül ugyanis nem lehet építeni. A mesterségesintelligencia-algoritmusok minden bizonnyal sok kérdésben a segítségünkre lesznek, de a természetes intelligenciát fenn kell ahhoz tartani, hogy a technológiai vívmányokat felelősen és hatékonyan hasznosítani tudjuk.

Irodalom

1. IAEA Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/>
2. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/more-countries-sign-declaration-to-triple-nuclear-capacity>
3. Angol nyelvű eredeti ábra forrása: NEA (2024), The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition, OECD Publishing, Paris; az ábra kisebb saját kiegészítésekkel és magyarítással készült
4. Angol nyelvű eredeti ábra forrása: <https://www.iaea.org/news-center/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>; saját magyarítással készült ábra
5. Aszódi Attila: Atomenergia hajtja majd a Google, az Amazon és a Microsoft szerverparkjait! Hogyan? És mi van ennek hátterében? Blog-

- bejegyzés, 2024. 10. 21. https://aszodiattila.blog.hu/2024/10/21/fontos_fejlemenyek_az_atomenergiaban_a_nagy_nemzetkozi_tech_cegek_a_kis_modularis_reaktorok_fele_nyi
6. OECD Nuclear Energy Agency: The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition. 2025. 07. 22. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition
 7. Omिताomu F., Belles R., Davidson E. (ORNL), Kim T. K. (ANL): Evaluation of Nuclear Power Plant and Coal Power Plant Sites for New Nuclear Capacity. September 03, 2024, ORNL/SPR-2024/3483
 8. Summary of study on SMR technology and its impact for Indiana, November 2024, Prepared for Indiana Office of Energy Development, Purdue University School of Nuclear Engineering
 9. Ontario Power Generation website, <https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/darlington-smr/>. [utolsó elérés 2025. 10. 26.]
 10. WNN: Canadian SMR project shortlisted for federal fast-track, 2025. 09. 18. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/canadian-smr-project-shortlisted-for-federal-fast-track>
 11. WNN: European SMR Industrial Alliance sets out action plan, 2025. 09. 17. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/european-smr-industrial-alliance-sets-out-action-plan>
 12. WNN: UK consultation begins on Rolls-Royce SMR design, 2025. 10. 06. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/uk-consultation-begins-on-rolls-royce-smr-design>
 13. WNN: CEZ completing Temelin SMR boreholes survey. 2025. 08. 06. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/cez-completing-temelin-smr-boreholes-survey>
 14. WNN: Vattenfall to select between BWRX-300 and Rolls-Royce SMR. 2025. 08. 21. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/vattenfall-to-select-between-bwrx-300-and-rolls-royce-smr>

FIZIKUSSZEMMEL AZ ENERGETIKAI JÖVŐ LEHETSÉGES ELEMEIRŐL

Csernai László

Bergeni Egyetem, Fizikai és Technológiai Tanszék, Bergen, Norvégia

E-mail: laszlo.csernai@gmail.com

Az emberiség energiaigénye egyre növekszik. A Földön elérhető energia túlnyomó része a napsugárzásból ered. Ez eredetileg hősugárzás, de a természeti körülmények során egy része „mechanikus” energiává alakul, mint a szél- és vízenergia, valamint a korábbi természeti folyamatok eredményeként felhalmozódott fosszilis energia-hordozók. Ezeket túl a gravitációs hatásra kialakuló árapály energiája is jelentős még.



Csernai László (1949) a norvég Bergeni Egyetem emeritus professzora. Humboldt-díjas elméleti fizikus, a Norvég Tudományos Akadémia (DNVA) tagja és az MTA külső tagja. Az 1970-es évek elején részt vett a Paksi Atomerőmű tervezésében. Pályája nagy részén nagyenergiájú atommagreakciók elméletével foglalkozott. Az Ötödik Európai Framework Programban a Bergen Computational Physics Laboratory igazgatója volt. Jelenleg a Nanoplazmonikus Lézerfúziós programon dolgozik.

A Napból eredetileg érkező hősugárzás termikus, ami $T \approx 6000$ K hőmérséklettel jellemezhető. Mivel az utóbbi 4 milliárd ($4 \cdot 10^9$) évben a Föld hőmérséklete nem változott jelentősen, a bejövő energiát (ΔQ) a Föld vissz sugározta, de $T \approx 300$ K hőmérsékleten. A hőmérséklet intenzív mennyiség, nem összeadható, és nincs rá megmaradási törvény, így az átlagára sincs fizikai törvény. A hozzá párosított *extenzív* mennyiség az *entrópia*. Ez összeadható, átlagolható, a rendszer rendezetlenségét jellemzi, és zárt rendszerben növekszik, amíg el nem éri a maximumát.

Ezért a kaotikus légkör állapotát az entrópia pontosabban jellemzi, mint az *átlaghőmérséklet*. A fenti sugárzási egyensúly következtében a Föld entrópiája ($\Delta S = \Delta Q/T$) csökken, azaz mivel a Föld tömege nem változik, komplexitása (eredetileg orderliness [2]) növekszik.

Ez annak köszönhető, hogy a Földön a víz három fázisban mint „termosztát” tartja a hőmérsékletet. Ha az anyag entrópiáját minden formájában megbecsüljük

[1], arra jutunk, hogy az emberi idegrendszer entrópiája a legkisebb egységnyi tömegű anyagra kisebb, mint a DNS-é vagy a mikroszipeké. Így a fenntartható fejlődést, amelyet kvantitatívan az entrópia csökkenése jellemez, még mindig a biológiai fejlődés dominálja. A fentiek szerint az entrópia csökkenése egy asztrofizikai kényszer. Így a fenntartható fejlődés is egy kényszer, hacsak egy nukleáris háború nem változtatja azt porrá és hamuvá. Mindazonáltal törekednünk kell arra, hogy ne növeljük feleslegesen a Föld entrópiáját, és az energiaátalakításnál törekedjünk a maximális határfokra és minimális hulladékhoz.

Az utóbbi évtizedekben divattá vált az úgynevezett „megújulók” erőltetése, és ezzel együtt járt az energia-termelés instabilitása, és a nagy kiterjedésű „blackout” események veszélye. A termelés és a fogyasztás közötti nem várt egyensúlykülönbség ma sokkal fontosabbá teszi az energia tárolását és szabályozhatóságát. Norvégia elvileg kedvező helyzetben van évi 150 GWh villamosenergia-termeléssel, ami jól szabályozható vízerőművekben elérhető, és a majd egy teljes évi fogyasztást kitevő energiatároló kapacitással. Amikor azonban a százmillió Németország hálózatát összekötötték egy 1,4 GW teljesítményű kábellel az ötmillió Norvégia déli részével, ezt már a norvég rendszer nem tudta kiegyensúlyozni, és a villany ára 10–20-szorosára emelkedett azokra az órákra, amikor a német fogyasztás megugrott. (Ennek hatására Norvégia is bevezette a saját rezsicsökkentését, amit úgy hívnak, hogy „strømstøtte”). Ebből a tanulság az, hogy csak olyan országok összekapcsolása előnyös, ahol mindkét partner biztosítja a saját stabil energiaellátását (pl. Norvégia és Svédország). Ezt az EU ideológiailag vezérelt „energiauniós” szabályozása nem veszi figyelembe.

Norvégiában egy érdekes új fejlemény az energiatárolás elosztott támogatása. A villamosenergia árát a Nord Pool rendszerben a következő nap minden órájára rögzítik, és a villanyórák a fogyasztást minden órában beküldik a szolgáltatóknak. Az újonnan vásárolt autók nagy része elektromos az adókedvezmények miatt, és ezeket otthon töltik. A töltést irányító program az internetről tudja az óránkénti árat, és ennek megfelelően a legolcsóbb időben tölt. Így a városban minden egyes elektromos autó hozzájárul az egyenletesebb terheléshez. Ez persze csak akkor segít, ha a közlekedés túlnyomó része elektromos. Hasonlóképpen az otthoni akkumulátoros energiatárolás is a hálózatstabilizálás egy, a fogyasztók által gyakorolt formája. Viszont, ha az elektromosenergia-termelés fosszilis energiaforrásból származik, akkor ez a többszörös energiaátalakítás miatt nagyon rontja a határfokot, felesleges energiafogyasztást okoz, és növeli az entrópiát. A hidrogénhajtásra – mivel jelenleg a hidrogéntermelés is fosszilisenergia-alapú, és ebből nem látszik kiút – ez még inkább érvényes. Az akkumulátorok újrafelhasználása további energiát fogyaszt, entrópiát és vegyi hulladékot termel, így hiába jobb az elsődleges nyersanyagból való gyártásnál, valójában nem jó megoldás.

A fenti példán kívül magyar szempontból két tárgykör lehet fontos, az i) energiatárolás, -szabályozás és a

vízgazdálkodás, valamint a ii) nukleáris energia. A fosszilis energia tárolása tekintetében Magyarország elegendő tárolókapacitással rendelkezik, és az ellátás biztonsága nem fizikai, hanem politikai kérdés. A villamos energia terén a helyzet más.

Korábban a dunai vízerőművek jelentősége nem volt nagyon fontos a viszonylag kisebb magyarországi vízszint-esés miatt. A bős-nagymarosi vízerőmű körüli ellenséges politikai indulatok sajnos a mai napig éreztetik hatásukat. A megbízhatatlan „megújulók” miatt az energiatárolás és szabályozhatóság jelentősége azonban ma már az egyik legfontosabb kérdés. Szerintem az, hogy a Duna vizét Magyarországon meg kellene tartani és tárolni, már mindenki számára elfogadott. De azt a lépést, hogy ehhez meg kellene építeni a Dunán a már sok-sok éve tervezett három gátat, erőművet és energiatározót, a politikusok nem merik megtenni. Pedig a Duna vízhozama óriási, és az egyetlen lehetőség nagy mennyiségű energia tárolására egy-két napra (természetesen nem fél éves periódusra, mint Norvégiában). Természetesen a Tisza-tó példája mutatja, hogy ennek számtalan más előnye is lenne: hajózás, öntözés, talajvízszint, árvízvédelem, üdülőterület, közlekedés, erőművek hűtése stb.

A Föld kialakulása nyomán rendelkezésünkre áll még nagy mennyiségű nukleáris energia. Ez a geotermikus energia forrása is, de mindeddig csak kis mértékben van kihasználva; a maghasadás energiája és a magfúzióból származó energia békés célokra való felhasználása még fejlesztés alatt van. A geotermikus energia leghasznosabb felhasználása fürdővárosok kialakítása lenne, ezek gazdasági haszna messze meghaladja azt, mint ha ezt csak lakások fűtésére használjuk. Érdekes, hogy a magfizikai energetika terén is a nem termikus, mechanikai energia megtartása és a hulladékho elkerülése a kutatás alapkérdéseire tartozik.

A maghasadás békés felhasználása terén Magyarország jó helyzetben van, a magyar lakosság elfogadja és optimálisnak tartja az atomenergia felhasználását. Ez Paks 1 eredményes és biztonságos eddigi működésének is köszönhető. A jelenleg folyó Paks 2 építkezés fizikai és technológiai szempontból optimális. Sajnos a politikai viszonyok ezt is bizonytalanná teszik, és csak remélhetjük, hogy a béke mihamarább helyreáll, és a bizonytalan helyzet megszűnik.

A magfúziós kutatások terén jelenleg az alapkutatás és az alkalmazott kutatás határterületén történik előrehaladás, különösen a lézerek által indukált fúzió terén. A hazai mágneses fúziós kutatás a Franciaországban Cadaracheban épülő International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) projekthez kapcsolódik, ami 1988-ban kezdődött, és ahol az előrehaladás az építésnek megfelelően lassabban halad, így egy-két éven belül nem várható jelentős eredmény. A lézeres begyújtás terén két, alapvetően különböző irányzat van: a hagyományos, lassú mechanikus sűrítéssel való begyújtás és egy újabb fénysugárzás által dominált, gyors vagy egyidejű begyújtás.

A hagyományos lassú mechanikus begyűjtés domináns képviselője az 1993-ban a Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) amerikai nemzeti laboratóriumban indult National Ignition Facility (NIF; Nemzeti Begyűjtő Létesítmény). Ebben 192 lézernyalábbal lőnek egy középpontban lévő milliméteres nagyságrendű fagyasztott deutérium-trícium targetre. Az extrém mechanikus összenyomásból eredő tágulás gyorsabb, mint az α -részecskék révén lassabban terjedő fúziós égés. Így csak a céltárgy kisebb része fuzionál, és elegendő idő van mechanikus instabilitások kialakulására. A NIF projekt most ért el jelentős eredményt: 2025 májusában 8,6 megajoule fúzióenergia-termelést. Ez intenzív fejlődést és versenyt váltott ki. Ezt reprezentálta az International Conference on Matter and Radiation at Extremes. A konferenciát 2025 május végén a kínai Xi'An-ban tartották meg, ahol a cikk szerzője tartott előadást a NAPLIFE projekt által elért proton-bór ($p + {}^{11}\text{B}$) fúzióról [3].

Ebben a másik, ultrarövid lézerimpulzusos, kétoldali és nanotechnológiával szabályozott, az erősített egyidejű begyűjtés módszerével történő fúzió eredményeiről számolt be. Ez a 2017-ben szabadalmazott módszer a közelmúlt eredményeit alkalmazza a lézertechnológia, a nanoplazmonika és az ultrarelativisztikus nehézionfizika terén, ahol az egyidejű gyors fázisátalakulást már több mint húsz éve elméletileg és kísérletileg is részletesen tanulmányozzák. Itt a nem termikus, monokromatikus, femtoszekundumos lézerfényt kihasználva, nanotechnológiai módszerrel szabályozzuk a lézerfény abszorpcióját a fúziós céltárgy anyagában. Nanoplazmonikus, rezonáns, nanométeres hosszúságú rúdantennákkal protonokat gyorsítunk közel egy irányba, ~150 keV energiára, ahol a $p + {}^{11}\text{B}$ reakció hatáskeresztmetszetének kiugró csúcsa van. A kísérletben protonok eltűnését és reakciótermék α -részecskék megjelenését tapasztaltuk. Ezt az módszert eddig csak a 2019-ben alapított NAPLIFE kollaborációban résztvevők használják. Ellentétben a NIF $d + t$ fúziós reakciójával, itt sem a fúziós target, sem a reakciótermékek nem radioaktívak, és neutronok sem keletkeznek. Ez az eredmény nagy feltűnést keltett.

A NAPLIFE módszer egyik jellemzője, hogy nem termikus, monokromatikus, lineárisan polarizált lézerfényből indulva, közel egy irányba protonokat gyorsítunk és az ezt követő fúziós reakciók kezdeti állapota sem termikus, így a fúziós reakciókban keletkezett részecskék sem. A termalizációs lépések elkerülésével minden lépésben csökkentjük az entrópia növekedését és így jobb határfokot érünk el, mint a termikus módszerek.

A NAPLIFE projekt által használt sugárzás által dominált detonáció magyar szempontból speciális, mivel a 800 nm-es hullámhosszú monokromatikus lézernyaláb periódusideje 2,65 femtoszekundum, és ezt a pontosságot csak a szegedi ELI-ALPS attoszekundumos pontosságú lézere tudja elérni. A két irányból történő szembeállításával így itt megvalósítható, hogy a két nya-

láb a két irányból konstruktívan erősítse egymást. A NAPLIFE módszer [4] kiválóan alkalmas későbbi ipari megvalósításra, mivel a lézernyaláb és a fúziós céltárgyba implantált nanorúdantennák, valamint az általuk gyorsított protonok és a kibocsátott részecskék impulzusai egymásra merőlegesek, míg a fúziós üzemanyag bejuttatása a harmadik merőleges irányból lehetséges [5]. A három egymásra merőleges irányba történő energia- és anyagátadás jó ipari megvalósításra ad lehetőséget. Az eredmények hatására már (a hagyományosan magfizikaellenes) Norvégia is csatlakozott az új módszerrel történő lézerfúziós kutatásokhoz, és a norvég FUSENOW projekt együttműködik NAPLIFE [6] projekttel. Sajnálatos, hogy ez a Magyarországról kiindult projekt csak nagyon korlátozott mértékben kap hozzáfért az ELI-ALPS létesítményeihez.

2025. március 13-án Németországban Hessen kormány, Boris Rhein miniszterelnök, Kaweh Mansoori gazdasági miniszter és Timon Gremmels kutatási miniszter megállapodást írt alá a Focused Energy vállalattal, a Darmstadti Műszaki Egyetemmel és a GSI Helmholtz Kutatóközponttal, hogy Hessen finanszírozza a 2011-ben leállított Biblisi Atomerőmű átalakítását atommagfúziós kutatási erőművé, majd később kereskedelmi fúziós erőművé. A tervek szerint az erőmű 2035-ben kezd el működni, a NIF-ben alkalmazott $d + t$ fúziós módszer alapján.

Az atomerőművekben a reaktor, a reaktortartály és a primerköri berendezések vannak nagyobb terhelésnek kitéve, míg a szekunderköri turbinák és generátorok hosszabb élettartamúak. Így az idősebb atomerőművek átalakítása fúziós erőművé gazdaságos lehet, mind az egyes berendezések további felhasználása, mind az alkalmazottak energetikai és magfizikai képzettsége miatt. Így ma lassan a fúziós kutatás már kevésbé alapkutatás, hanem inkább alkalmazott technikai és technológiai fejlesztés, mely a villamosenergia-termelés legalapvetőbb jövőbeli módját érinti. Ennek megfelelően lehetne más formában és más skálán támogatni. A Paksi Atomerőmű legidősebb blokkjai a Biblisi Atomerőműhöz hasonlóan az ilyen irányú technológiai kutatás színhelyei is lehetnek.

Irodalom

1. Csernai L. P., Spinnangr S. F., Velle S. (2017): Quantitative assessment of increasing complexity. *Physica A*, 473, 363–376.
2. Schrödinger E. (1944): What is life? – The Physical Aspect of the Living Cell, The Cambridge University Press.
3. Kroó N., Csernai L. P., Papp I., Kedves M. A., Aladi M., Bonyár A., Szalóki M., Osvay K., Varmazyar P., Biró T. S. (for the NAPLIFE Collaboration) (2024): Indication of $p + {}^{11}\text{B}$ reaction in laser induced nanofusion experiment. *Scientific Reports (Nature)* 14, 30087.
4. Csernai László, Kroó Norbert, Papp István, Veres Miklós, Biró Tamás (2025): Új módszer a lézerfúzióra. *Fizikai Szemle*, LXXV/9, 321–323.
5. László P. Csernai for the NAPLIFE Collaboration (2025): High-energy non-thermal, laser-induced nano-fusion. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 234, 2991–2992.
6. <https://cernai.no/naplife/>

INTERJÚ A RÁTZ TANÁR ÚR DÍJJAL KITÜNTETETTEKKEL

A fizika oktatásának területén 2025-ben Rátz Tanár Úr Életműdíjjal jutalmazták *Ábrám László* (Városmajori Gimnázium) és *Horváth Norbert* (Baár-Madas Református Gimnázium) tanárokat.

A Rátz Tanár Úr Életműdíjat az Ericsson Magyarország, a Graphisoft és a Richter Gedeon Nyrt. 2001-ben alapította a magyarországi tanárok munkájának elismerésére. A díj Rátz László (1863–1930) nevét őrzi, aki a

Budapesti Evangélikus Gimnázium (más néven Fasori Gimnázium) matematikatanára volt. A díjat az *Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért* alapítvány kuratóriuma ítéli oda a szakterületi zsűri ajánlására (forrás: https://www.ratztanarurdij.hu/az_alapitvany). A fizika szakterületi zsűri tagjait az Eötvös Loránd Fizikai Társulat delegálja. A két díjazott kollégával *Simon Ferenc*, a fizikazsűri elnöke készített interjút.



Ábrám László

Ábrám László neve négy évtizede összeforrt a magyar fizikatanítás és tehetséggondozás legjobb hagyományaival. 1984 és 1988 között a gyergyószentmiklósi Salamon Ernő Gimnáziumban, majd 1989-től nyugdíjazásáig a Városmajori Gimnáziumban tanított fizikát, meghatározó szerepet vállalva mindkét intézmény szakmai közösségének életében. Munkáját igényesség, kísérletező szemlélet és a tanítványok iránti figyelem jellemezte.

Tehetséggondozó tevékenysége országosan kiemelkedő: tanítványai számos hazai és nemzetközi versenyen értek el dobogós helyezéseket, köztük EUSO-arany- és -ezüstérmet, valamint OKTV- és diákolimpiai sikereket. Évtizedeken át vezette az eszközkészítő műhelyeket, rendszeresen kísérte diákjait országos és kárpát-medencei versenyekre.

Aktív szerepet vállalt a Jedlik-, Öveges-, Vermes- és Mikola-versenyek szakmai munkájában, valamint hosszú éveken át szervezett fizikatáborokat és tanulmányi programokat. Oktatómunkájában hangsúlyos volt a KöMaL és a Fizikai Szemle szerepe, tanítványait gondolkodó, a fizika iránt fogékony fiatalokká nevelte.

Szakmai kiválóságát és pedagógusi hatását számos rangos díj ismeri el. Ábrám László tanárként, nevelőként és közösségformálónaként is maradandót alkotott; szaktudása, embersége és elhivatottsága méltóvá teszi a Rátz Tanár Úr Életműdíjra.

SF: Tanár úr, először is szeretnénk szívből gratulálni ehhez a megérdemelt, értékes díjhoz. Mit jelent számodra a Rátz Tanár Úr Életműdíj, és hogyan tekintesz vissza pedagógusi pályád egészére ebből az alkalomból?

ÁL: Tulajdonképpen a 40 évnyi pedagógiai pályámnak a megkoronázásaként éltem meg. Nagyon szépen köszönöm a szakmának, hogy méltónak tartott erre az elismerésre.

SF: Mi indított el annak idején a fizika tanítása felé, és mi tartott meg ezen a pályán négy évtizeden át?

ÁL: Egyértelműen tanári indítatása volt. Remélem, méltó utódja lettem mind az általános iskolai, mind a gimnáziumi fizikatanáraimnak, akiktől nagyon sokat tanulhattam, és mindig nagy szeretettel gondolok rájuk.

SF: Tanári munkádban mindig hangsúlyos szerepet kapott a kísérletezés. Miért tartod ezt ennyire fontosnak a fizikaoktatásban?

ÁL: A kísérlet mindenkit egy kicsit közelebb visz a valósághoz; megmutatja, hogy az így alkotott modellek, fel-

adatok mennyire közelíthetik a valóságot. Mindig érdekesebb volt – akár egy egyszerűbb feladat is – a diákok számára, ha azt szemléltetni lehetett.

SF: Tehetséggondozó tevékenységed országosan is kiemelkedő. Mit gondolsz, mi a sikeres tehetséggondozás legfontosabb kulcsa?

ÁL: A megértés és megértetés, a „rendrakás” a fejekben, a tantárgy iránti alázat és elkötelezettség. És ami természetesen, a nagyon sok munka.

SF: Sok tanítványod ért el kimagasló eredményeket hazai és nemzetközi versenyeken. Hogyan lehet felkészíteni a diákokat úgy, hogy a verseny ne teher, hanem inspiráció legyen?

ÁL: Sajnos a kimagasló eredményeket elérő diákokat nem lehet tehermentesíteni. Az előbb munkának neveztem, de tulajdonképpen azt kell valahogy elérni, hogy hobbivá is váljon. Különösen nagy és nehéz ez a feladat az olyanoknál, akik több tantárgyból is kimagasló eredményekre képesek. Ott a terhelés megosztásával még óvatosabban kell bánni.

SF: Milyen szerepet játszanak a tanórán kívüli tevékenységek – műhelyfoglalkozások, táborok, versenyek – a diákok fejlődésében?

ÁL: Mindezek, természetesen, jelentősen hozzájárulnak az órai tananyagok elmélyítéséhez és továbbgondolásához, a kísérletezési készségek fejlesztéséhez, a kísérletek gondolatvilágának elmélyítéséhez, újabb és elvontabb kérdéscsoportok megjelenéséhez.

SF: Évtizedeken át részt vettél országos tanulmányi versenyek szakmai munkájában. Mit tanultál ezekből tanárként?

ÁL: A versenyek szakmai munkájában való részvétel a tehetséggondozást egy másik oldalról is megvilágította; a szervezői és feladatkitűzői oldalról, amit az évek során természetesen a diákokkal való munkába is be lehetett építeni és hasznosítani. Ezek a lehetőségek mindig nagy tapasztalatszerzést biztosítottak. Rászoktat ugyanakkor a csapatmunkára is.

SF: Fontosnak tartottad, hogy tanítványaid találkozzanak a KöMaL-lal és a Fizikai Szemlével. Mit adhatnak ezek a folyóiratok a fiatalok gondolkodásához?

ÁL: A KöMaL egyrészt egy sor érdekes feladatot biztosít havonta, amely feladatok megoldása akár többszöri nekifutást is igényel, esetleg komolyabb matematikai apparatus felhasználását is. Ez a tanulók kitartását és kutakodási készségeit is edzi. Ezen kívül egy rendszeres havi határidős munkára szoktat, valamint a feladatok megoldásának külalakját is megköveteli. A csapatban indulókat hozzászoktatja a csapatmunkához. Mindezek nemcsak a gondolkodásukhoz járulnak hozzá, hanem a fentebb említett „rend” kialakításához a fejekben. A *Fizikai Szemlében* a fiatalabb korosztály a versenyek döntőiről tájékozódhat, amelyeknek esetleg résztvevője volt. A kutakodóbbak pedig – jellemzően a 16–18 éves korosztály – már akár a jövőjét is tervezgetheti egyes cikkekbe beleolvastva, még ha a matematikai részével nem tud is mit kezdeni. Ismerkedhetnek továbbá korunk tudósaival (Nobel-díjasok), valamint az új kutatási területekkel.

SF: Hogyan látod; változott-e az elmúlt évtizedekben a diákok viszonya a fizikához és általában a természettudományokhoz?

ÁL: A diákok változtak, nem is a viszonyuk. Az új kor vívmányai (internet, mobiltelefon, MI) miatt, ha erre nem figyelünk, a gondolkodásuk erősen romolhat, illetve áthelyeződhet teljes egészében a virtuális világba. Gyorsan hozzájutnak rengeteg információhoz, és ebbe könnyen „bele is fulladhatnak”. Ezen a téren még igen sok lesz a tanári tennivaló az elkövetkezőkben. Tehetséges diák viszont mindig van és lesz is, akiknek pozitív hozzáállása van és lesz a természettudományokhoz. Az pedig, hogy hogyan lesz a csiszolatlan gyémántból drágakő, egy nagyon szép és nehéz tanári feladat.

SF: Mi volt számodra a legnagyobb szakmai vagy emberi sikerélmény a tanári pályád során?

ÁL: Ha röviden kellene válaszoljak, akkor azt mondanám, hogy az emberi kapcsolatok. A versenyek, osztálykirándulások, fizikatáborok és sítáborok során nagyon sok emberrel találkozhattam, akiktől szakmát, emberiséget, bölcsességet és kitartást tanulhattam. A sok közül egyet, ha kiemelhetek, 2016-ban a nagyváradi Schwartz Lajos Fizikaversenyen (vö. Bartos-Elekes István: *Fizikai Szemle*, 2024/1, 27. o.) találkozhattunk Krausz Ferencel (lásd a fotót lent), akit hét évre rá már mint fizikai Nobel-díjast üdvözölhettünk.

SF: Milyen tanácsot adnál azoknak a fiatal tanároknak, akik ma kezdenek el fizikát tanítani?

ÁL: Legyenek kitartóak, türelmesek, fejlesszék állandóan magukat szakmailag; emberileg pedig igyekezzenek mindig jó példát mutatni. Na, és figyeljenek oda a csiszolatlan gyémántokra!

SF: Ha egy mondatban kellene összefoglalnod, mit adhat a fizika egy fiatalember életéhez, mit mondanál?

ÁL: Ez is egy életforma – akár a színészi vagy sportolóié, amit ha szívvel-lélekkel csinálsz, sok örömet lelhetsz benne, és soha nem fárasztó munkaként éled meg, hanem életed végéig tartó hobbiként.



A Holnaposok szobránál Krausz Ferenc professzorral, a XXVI. Schwartz Lajos Emlékverseny alkalmából, Nagyváradon, 2016-ban. Álló sor balról: Raffai Péter (ELTE, Budapest), Karácsony János (Babeş-Bolyai TE, Kolozsvár), Horváth Norbert (Baár-Madas Református Gimnázium, Budapest) és Ábrám László (Városmajori Gimnázium, Budapest)



Horváth Norbert

Horváth Norbert tanár úr 25 éve tanít a Baár-Madas Református Gimnáziumban, és a hazai fizikaoktatás és tehetséggondozás meghatározó alakja. Pedagógiai hitvallásának középpontjában az áll, hogy minden diák számára megnyissa a fizikához vezető utat, személyre szabottan, támogató és örömteli tanulási légkörben. Tanítványai közel két évtizede az ország legeredményesebb KöMaL-versenyzői, rendszeresen kiemelkedő sikereket érnek el az OKTV-n és nemzetközi versenyeken. Sok diákja választotta a fizikát vagy ahhoz kapcsolódó természettudományos pályát, többen ma is aktív kutatók. Munkája túlmutat az iskolán: évek óta végez tehetséggondozó kutatási projekteket a Wigner Fizikai Kutatóközponttal együttműködésben, tanulmányutakat és kutatótáborokat szervez, országos szakmai fórumokon aktív előadó. Meghatározó szerepet vállal a Református Tehetséggondozó Alapítvány és a MATFIN Alapítvány munkájában. Számos rangos díjjal ismerték el különlegesen értékes munkáját, de legnagyobb hatása tanítványai pályaválasztásában, szemléletformálásában és tartós inspirációjában mérhető.

SF: Tanár úr, először is szívből gratulálok a rangos kitüntetéshez. Első kérdésem az lenne, hogy számítottál-e erre, vagy meglepetésként ért.

HN: Őszinte leszek, számítottam rá, de feleségem jobban. Feleségem egyik évfolyamtársa az előző Ericsson-vezető felesége, aki sokat posztolt a Rátz Tanár Úr Díjról.

SF: Mit jelent Neked személyesen ez az elismerés, és hogyan illeszkedik a pedagógusi pályádon eddig megtett úthoz?

HN: Megköszönöm Istennek és mindenkinek, akik a pályára és pályámon segítettek. Gondolok itt a feleségemre, tanáiraikra és kollégáimra. Két nevet mindenképp meg kell említenem. Az egyik Édes Péter, aki villamosmérnöksége után általános iskolában tanított fizikát, és mint az alapfogalomkészlet jó ismerője és használója, „tett engem helyre”. A másik Nagy Tibor, aki szenvedélyével és munkaszeretetével lett példaképem. A díj, mint minden díj, kötelez és újabb lendületet ad.

SF: Huszonöt év tanítás után mi az, ami ma is motivál a fizika tanításában, mi adja a mindennapi lendületet?

HN: Huszonöt csak a Baár-Madasban. Egyébként negyven mínusz négy. A négy év villamosmérnökség volt Bakos Jóska és Sörlei Zsuzsa csapatában a KFKI-ban. Visszatérve a kérdésre, az az inercia, ami belülről jön, és megállíthatatlan. Mint a lendkerekes kisautóban – na jó, azt meg lehet magyarázni, ezt nem lehet megmagyarázni. Ha kívülről nézem, akkor úgy látom, még veszélyes is lehet.

SF: Gyakran hangsúlyozod, hogy minden diák számára meg kell nyitni a fizikához vezető utat. Mit jelent ez a gyakorlatban egy heterogén osztályban?

HN: Minden fizika, ha akarják, ha nem. Azt kell észrevenni a gyerekeknek, hogy a körülöttünk lévő, természetesnek látott világgal kapcsolatban vannak, és ha

döntéseket kell hozniuk, akkor érteniük is kell azt. Csak egy példa így a tél közepén. Autóval a kanyarban olyan sebességgel kell menni, hogy a tapadás biztosítsa a kanyar bevetelét. Na igen, a 14, 15, 16 éves gyermek még nem vezet autót, de fog.

SF: A versenyeredmények kiemelkedőek, mégis gyakran beszél az tanulás élményéről. Hogyan fér meg egymás mellett az élményalapú tanítás és a magas szintű versenyfelkészítés?

HN: Szép szó ez az élményalapú tanítás. Inkább igaz a régi Arisztotelésznek tulajdonított mondás, „a tanítás (tanulás) gyökere keserű, a gyümölcse édes”. A tanórán arra kell törekednünk, hogy a tanulóknak legyen „aha, már értem” élménye. Ehhez az élményhez vezető úton kell munkálkodnunk. Kísérlettel, méréssel és gondolkodással, valamint természetesen a fogalomkészlet bővítésével.

A magasszintű versenyfelkészítésben való részvétel akár részemről, akár a tanítványaim részéről extra kihívás. Nekem ebben sokat segít a KöMaL-fizika, a feladataival, a megoldásaival és szakmai cikkeivel.

SF: Milyen szerepet játszik a közösség és az emberi kapcsolatok a sikeres tehetséggondozásban?

HN: Számomra két közösségi tér jelenik meg a kérdésben. Az egyik a tehetségek közössége, másik a tanári, a kollégák közössége. A tehetségek néhány évente cserélődnek, velük újra és újra végigjárjuk az igen sokféle versenyállomással, pályázati lehetőségekkel kikövezett utat. A tanári közösséggel folytonos kapcsolatban vagyok. Szűkebb körben együtt dolgozunk egyik vagy másik tehetséggondozó platformon (Református Tehetséggondozó Alapítvány, MATFIN program), tágabb körben a versenyeken találkozunk és cseréljük ki a tapasztalatainkat. A legbővebb közösségi tér az évenként megrendezett Fizikatanári Anket, egy

igazi feltöltődés, sok-sok újszerű, vagy akár elfeledett ötlettel.

SF: *Tapasztalatod szerint mi a legnagyobb kihívás ma a középiskolai fizikaoktatásban Magyarországon?*

HN: A beszűkült együttlét a gyerekekkel. Öveges professzor úr mondta egyszer, hogy könyvei szövegek, ábrák, számítások, a tanár tölti meg élettel azokat. A néhány negyvenötpercre igen komolyan kell felkészülni. Mint egy interaktív színi előadás szereplőjeként, nagyon tudnom kell a katartikus pillanatot előidézni. Ez kihívás.

SF: *A kutatói környezettel való együttműködés – például a Wigner FK-val – mit ad hozzá a diákok fejlődéséhez, amit az iskolai keretek önmagukban nem tudnának?*

HN: Learning by doing, ahogy az angol, vagy mentorem, kolléganóm a kutatóintézetben, Oláh Éva mondja. A Wigner FK-ban végzett munka hozzáadott értéke felbecsülhetetlen. Nézzünk rá lelki szemünkkel két képre. Az egyik gyermek az osztályteremben „végigüli” a padban az órát, a másik a Wigner FK Nagyenergiás Intézet kísérleti épületében plexit fűrészel, fúr, helyes arányú kétkomponensű ragasztót kever, felken, lesúlyoz. Majd szálát húz a 25 mikronos aranyozott volfrám szálú tekercsből, leforraszt, csúcsokat vág le sniccerrel. A kész detektorkamrákat összerakja, elektromos paneleket, földelő és jelvezetékeket forraszt, felszereli a kamrákat az elkészült elektronikai elemekkel, gázcsövekkel látja el az egységet, ráereszti a gázt, ráadja a tápfeszültséget, és már látja, méri a müonok nyomát, minden lépést fizikai megokolással. Ez a kép csak egy szelete annak az időnek, amit Varga Dezső mellett eltölthetünk. Azt hiszem, nem kell tovább magyaráznom a felbecsülhetetlen értéket.

SF: *Milyen készségeket tartasz ma a legfontosabbnak azok számára, akik később természettudományos pályán szeretnének továbbhaladni?*

HN: A legfontosabb a kitartás. Bármennyi is a tehetség, legyen az kevesebb, vagy több, legyen ilyen irányú, vagy olyan irányú, az marad a pályán, aki kitart. A kitartást táplálják az eredmények. Ha nincs eredmény, akkor lehet, hogy pályát kell módosítani. Magam is így voltam rövid idejű, nem túl eredményes villamosmérnöki pályámmal.

SF: *Hogyan látod, változott-e az elmúlt két-három évtizedben – vagy mióta te a pályán vagy –, a diákok viszonya a fizikához, a természettudományokhoz?*

HN: Régen is, akinek ment, annak ment, akinek nem, annak nem. Öveges professzor urat megkérdezték a hatvanas években, „Hogy lehet ezt a félelmetes tantárgyat közelebb vinni a gyerekekhez?”. A fizika régen sem volt könnyebb. Tudod, kedves Ferenc, évek óta tartok az iskolánkban 4. vagy 5. évfolyamos gyerekeknek játé-

kos fizikaszakkört. Nagyon élvezik a lufiversenyt, a hólégballon-eregetést, a Cartesius-búvár összeszerelését, működtetését és valamennyi játékot. A nehézség ott kezdődik, ha számokat kell összeadni, arányokat kell felállítani, vagyis, ha a felállított modellekkel számolgatni is kell. Ekkor már megjelenik a pánik, a kellemetlen érzés, és menekülni kell. Na, ezt a pánikot kell nekünk lebontani.

SF: *Számos tanítványod választotta a fizika hivatását. Mit érzel tanárként, amikor egykori diákjaid kutatóként, mérnökként vagy oktatóként térnek vissza?*

HN: Tartottam a Baár-Madasban végzett tehetségeimnek egy kötetlen szakmai beszélgetésnek indult összejövetelt 2025 karácsonya előtt. Harmincegy-néhány fiatal jött össze. Kértem tőlük, hogy egy-két képkockával mutassák be, hogy éppen mivel foglalkoznak. Legtöbben itthon kutatnak, fejlesztenek, de volt, aki Amerikából, egy konferenciáról jelentkezett be, volt, aki Heidelbergből, volt, aki csak ezért jött haza Gentből a világ chipkutatóközpontjából, másik a zürichi ETH-ből, hogy együtt lehessünk, hogy bemutassák tudományukat. A kicsit bulisnak képzelt hangulat helyett estébe nyúló konferenciás összejövetelünkön csak ámultam és bámultam a fejem fölött elhangzott adok-kapok kérdésektől és válaszoktól. Őszintén bevallom, kicsit törpe lettem, de jól van ez így. A mi feladatunk a tűzgyújtás, aztán menjenek a rakéták.

SF: *Mit tanácsolnál a fiatal fizikatanároknak, akik most keresik a saját pedagógiai útjukat?*

HN: Legyenek türelmesek a gyerekek felé és maguk felé is. A tanári pálya folyton-folyvást tanulás, ne féljenek a hibáikat bevallani, ki lehet és ki is kell azokat javítani. A gyerekek felé legyenek következetesek, ugyanakkor irgalmasok. Az idősebb kollégáktól tanuljanak. A fizikatanároknak ajánlom, hogy építsenek ki minél több kapcsolatot a fizikusi, fizikatanári társadalommal. Lépjenek be az Eötvös Loránd Fizikai Társulatba, járjanak a Fizikatanári Ankétra, ha tehetik, akkor vigyék a gyerekeket kisebb-nagyobb versenyekre, kísérleti bemutatókra, egyetemi és kutatóintézeti bejárásokra. Ja, még egy: oldják meg a KöMaL fizikai feladatait, küldjenek be mérési és elméleti feladatokat.

Van egy nagyon-nagyon személyes tanácsom is, mert én nem jól csináltam. Legyen első a családjuk, aztán az iskola.

SF: *Ha egyetlen gondolatot kellene megfogalmaznod arról, mit adhat a fizika egy fiatalember életéhez, mi lenne az?*

HN: Szeresse a fizikát továbbra is, találja meg benne önmagát és élvezze szépségeit. Lesznek nehézségek, de azokon túl fog jutni. A körülményeket ne hibáztassa, próbálja alakítani, legyen csapatjátékos.

fizikaiszemle.eft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

AZ RLC ÁRAMKÖRÖK MŰKÖDÉSÉNEK OSZCILLOSKÓPSZERŰ SZIMULÁCIÓJA*

Bartos-Elekes István

Ady Endre Líceum, Nagyvárad, Románia; E-mail: beistvan@yahoo.com

*„Tisztelt Kolléga, arra kérlek, hogy csak a jelenségekre koncentrálj, ne foglalkozzál a Windowsból már nem azonosítható DOS + BP + ASM-alapú rajzeszközökkel!
Fogadd el, hogy az e-mailezhető méretű prezentációmban kizárólag ezek az eszközök tették lehetővé a közel ezer, túléles oszcillogram bemutatását”.*

A szokatlan tartalmú mottó után a cím magyarázata következik. Az érthető, hogy egy lapba nem kerülhet élő kísérlet, mert az a szakterembe való (*sRLC és pRLC, azaz soros és párhuzamos RLC* [01]). Az viszont nehezebben fogadható el, hogy ez a szimuláció miért nem interaktív. Azért, mert a kísérlet nem arról szól, hogy „egy próbát megér”, hanem arról, hogy tudatosan keressük a jelenség belső okait, és *ezt csakis a helyes, meggondolt példákkal segíthetjük, az akármilyen értékek csak zavart keltenének!*

Az interneten számtalan interaktív szimulációt találtam, egyesek bármilyen alkatrésztérteket elfogadnak, mások előre megadják az értékintervallumot, de a hasznosnál jóval kisebbet. Olyannal is találkoztam, ahol a kapcsolatban a legkisebb kondenzátorként a mai legnagyobbnál is nagyobb ajánlanak (*a szokásosnál 5-6 nagyságrenddel nagyobb*), ráadásul egy ekkora kapacitású kondenzátor kizárólag elektrolitikus lehet, ami a váltóáramban robban! Igencsak hibás az az elképzelés, hogy vezérlőelv nélkül hagynák a diákat „kísérletezni”. A jelenség működési feltételeinek ismerete nélkül a diák nem ültethető le a drága készülékek mellé; a labor nem a gondtalan játszótér! Az egykori Fizikumban a diák semmihez sem nyúlhatott, csak ahhoz, aminek megkérdezte, és meg is értette a működési elvét. *Ezután együtt építettük fel a kísérleteket, egyesek éveken át dolgoztak velem. Az érdeklődőket bevezettem az assembly programozás rejtélyeibe is.*

Néhány szó a prezentáció szerkezetéről

A prezentáció létrehozásakor *feltételeztem, hogy az iskolában az élő kísérlet tárgyi feltételei nem állnak rendelkezésre.* A prezentációt *nem a kísérlet helyett, hanem a táblarajz mellé, de inkább helyette* ajánlom. Egy témához csak néhány dia szükséges, ezeket helyben, a kétlépcsős tartalomjegyzékkel [02] azonnal kiválaszthatjuk, de előre is el lehet küldeni a diákoknak. Sikeredt a (*szerintem*) szép, kontrasztos képekkel teli anyag összméretét egy picivel 25 MiB alá szorítanom, így egy gazdag tartalmú, *984 oldalas, e-mailezhető* anyag jött létre. A prezentációt hét fejezetre, ezeken belül több kategóriába osztottam. Az egytagú áramkörök három, a kéttagúak – a soros és párhuzamos változatok miatt – négy kategóriát képeznek. A háromtagú áramköröknél a rezonancia körüli mérések felbontási

finomságára három lehetőséget ajánlottam (*5, 9, 17 frekvencia*), ezért a soros és a párhuzamos változatokkal még hat kategória jött létre. „Háromtagú RLC áramkörök jellegváltása a rezonancia körül” című fejezet egy 112 oldalas ráadás, ott mutatom be a száraznak tartott oszcillogramok hozzáférhető üzeneteinek a felhasználását. Az RLC áramkörök esetében a jellegváltás és a rezonanciaképesség a legfontosabb, ezért oszcillogramokra lebontva mutatom meg a jelenségeket. A „Háttérjelenségek, mérőkapcsolások” fejezetben mutatom be azokat a megoldásaimat, amelyek lehetővé tették a „mérésekre is alkalmas” oszcillogramok létrejöttét. *Végtelen mennyiségű munkám van benne, örömmel teszem közzé.*

Az ajánlott bemutatóban a valamikori kísérlet idején beépített valódi alkatrészek és frekvenciák szerepelnek, ugyanis a kilencvenes években az áramköröket háziszabványos, dugaszolható kártyákra szereltem, a kártyacserével egy-egy új kísérlet jött létre. A kártyagyűjtő [03] négyféle (*A, B, C, D*) kártyát fogadott, egyúttal tápfeszültségeket is biztosított. Az egyszerű egyenirányítók áram- és feszültségjeleitől az RLC-kísérleteken [04] át az analóg, majd a CNC-tranzisztor-karakterográf és a külső fényelektromos hatás görbéinek bemutatásáig mindenre használtam. Nem volt jelgenerátorom, ezért 1964-ben egy *át-hidalt T-hidas* RC generátort terveztem és építettem [05]. A soros RLC áramköröket a belső erősítővel, a párhuzamosokat az 1 M Ω -os belső ellenállású kimeneten vezéreltem. Az oszcillogramok egy VGA monitoron egyenként jelentek meg, így közben magyarázhattam a görbék sietés-késését, az azonos vagy ellentétes fázisát, a csak belülről látható kioltásukat a rezonancián [06]. *Az akkori számítógép „óriásinak” tartott órajele 20 MHz volt, de nemigen siette el a dolgát. Azt ráadásul értékelem, hogy közben jutott idő a gondolkodásra és a magyarázat befogadására is.*

Visszatérve a szimuláció bemutatására, arra nagyon vigyáztam, hogy minden kísérletcsoportban jelezzem az alapfolyamatokat. Az *E24-es* értéksor alapján szokásos értékű alkatrészeket, feszültségeket vagy áramokat használtam. A jelenség komplexitásától függően az egyedi és a kéttagú áramköröknél *három*, a háromtagú áramköröknél *öt, kilenc és tizenhét* frekvencián mutattam be a különböző jeleket. A vizsgálati frekvenciák száma azért páratlan, mert a középső érték a legjellemzőbb az áramkörre (*lásd lentebb*), illetve az a rezonanciafrekvencia.

- Az egy- és kéttagú áramköröknél az alacsony frekvenciák mellé a kísérletező fizikatanár szertárában található,

* Lásd a *Fizikai Szemle* mellékletét az írás megjelenését követően: <https://fizikaiszemle.elft.hu/mellekletek>. Az érdeklődő Olvasó minden további vonatkozó dokumentumot a szerzőtől kaphat meg. (*a szerk.*)

esetleg könnyen beszerezhető R, L, C alkatrészeket válogattam, a frekvenciákat 1-2-5 lépésben választottam.

- A kéttagú áramkörök generátorjelének közepső frekvenciáját úgy választottam meg, hogy annak negyedperiódusa nagyjából a kétszerese legyen az áramkör időállandójának, azaz az áramkör hasznos munkaterületének.
- A háromtagú RLC áramköröknél az aktuális frekvenciaértékeket a rezonanciafrekvenciától való eltérés százalékos értékével jellemeztem: 0,0% majd a $\pm 0,1\%$ és a $\pm 20\%$ között a szabványos 1-2-5 lépésben összesen 17 vizsgálati frekvencia. N oszcillogram mutatja az illető áramkör viselkedését a három frekvencián vagy a rezonancia körül. Az N értéke az áramkörtagok számától függ. Az egyedi áramkör oszcillogramjaihoz $J = 2$ jel, a kéttagúhoz $J = 4$ jel szükséges, a háromtagú áramköröket pedig, $J = 5$ jellel ábrázoljuk – persze a megfigyelhetőség érdekében nem egyszerre. A léptetéskor az új jel adataival egyidőben megjelenik annak szinuszgörbéje is; az oszcillogram bal felső sarkában pedig azonos színnel kiíródik a jel neve. *A színek sok pótlólagos információt hordoznak.*

Az RLC áramkörök jeleinek bemutatásához egy J csatornaszámú oszcilloszkóp szükséges. Ezt valamikor úgy oldottam meg, hogy az 1989-ben szabadalmazott PIO (parallel input-output) [07] interfészem kapta az öt A/D (analóg-digitális) konverter által küldött TTL-jelsorozatot. Az A/D konverter [08] egy egyszerű impulzusüzemű feszültségstabilizátor volt, amely addig változtatta az általa létrehozott 20 μ s-os TTL-jel frekvenciáját, míg nem a bemeneti műveleti erősítő elfogadta a mérendő jel és egy kondenzátorban integrált TTL-jelsorozat feszültségének a megadott pontosságú egyenlőségét. Valamikor ennek a TTL-jelnek a frekvenciáját mértem a PIO belső, frontfigyelési ciklusideje alapján [09]. A Pentiumoknál az Intel hozzáférhetővé tette a PC belső, vezérlő kvarcoszcillátora 64 bites, bináris osztójának a kiolvasását [10; az *OpCode* a 4. sorban]. Létrejött egy szinte tökéletes óra, amely gyakorlatilag sohasem telitődik, toronyóráként mindig hozzáférhető, a gép bekapcsolásakor mindig újraindul. A nehezen megépíthető lokális termosztát helyett az atomórához kalibrált, ± 20 ppt (*parts per trillion*) pontosságú jelet a GPSDO [11] szolgáltatta, ezt etalonként fogadtam el, és bevezettem a mérendő jel mellé a PIO-ba. A kísérlet részletes leírása megjelent a *Fizikai Szemle* 2019/12. számának mellékletében.

Az oszcillogram építkezése

A frekvenciaválasztás után először a vizsgálati frekvenciát is tartalmazó „Alapadatok” jelenik meg, és a már kiszámított adatok alapján egy rövid összefoglalót kapunk az alapadatokhoz tartozó mérésekről. A legfontosabb a generátorjel időben kifejezett sietése-késése az időreferencia-jelhez képest. Ebből következik az áramkör jellege az illető frekvencián.

Az ábrázolás könnyebb olvashatósága érdekében először a jelek neve van kiírva. A jelnevek színe fontos, mert az oszcillogram görbéi is azonos színűek (*a programból*). Az időreferencia-jel az első, hiszen ennek a jelnek a pozitív nullátmenetekor indítatom az oszcilloszkóp idővonalát, így a fázisa természetesen $\varphi_{\text{REF}} = 0^\circ$. Másodikként a jelgenerátor-szinusz amplitúdója és az időreferenciához mért fázisa jelenik meg. Ezután következik a többi jel kiírása, mindegyik két lépésben, így a J számú görbét $2J$ lépésben írjuk ki. A szinuszokat egy Lissajous-ellipszis követi, ez az $N = 2J + 1$ -edik oszcillogram [12]. Az abszcisszatengelyre mindig az időreferencia-jel kerül, hiszen ez a szabadváltozó, az egyetlen idő, amit a triggerjel révén igen pontosan ismerünk (*kalibrált idővonalunk van*). Az ordinátatengelyre a függőváltozó, a jelgenerátor jele kerül. Bár a jelgenerátor adja a jelet, az tűnik a szabadváltozónak, de a triggerjel az úr, nála van az időorigó, mindent onnan kiindulva mérünk. Az egyenessé degradálódott ellipszis adja a legpontosabb rezonanciafrekvenciát.

A Lissajous-ellipszis megszerkesztése [13] igen nehéz. Ott van egy függőváltozó-színnel kiírt *Start*, ami mutatja a függő változó induláskori értékét és időbeni változásának irányát (*az ellipszis körbejárása egy periódus alatt*). Az ellipszis a *Start* időpontjában az ordinátatengely ellipszismetszete (a generátorjel értéke a triggerjel időpontjában) megadja az időreferencia-jelhez képesti generátorjel-késést (*negatív ordinátaérték*) vagy sietést (*pozitív ordinátaérték*). Az időkülönbségből meghatározható az áramkör jellege, az abszcisszától való távolsága pedig, a jelleg „erősségét” mutatja meg. Az ellipszis mellett látható számításaim grafikai ellenőrzése igen gyenge eredményt mutatna, ugyanis a rajz látható kis felbontása erre nem felel meg. A függvény előjelét a *Start* pont ordinátájának előjele adja meg. Az oszcillogramon látható távolságok számértékeit a generáló program analitikus mértannal számította ki legalább hat-hét számjegyes pontossággal. *Minden számjegypontosságot egy-egy globális változóban tároltam, így könnyen változtathattam a kiírások szerkezetét.* A program mindenütt kiírja a nyolc, meghatározott számértékből létrejött, a felhasználó által is érthető kísérleti eredményt és az áramkör jellegét. *Ennek a programozása volt a legnehezebb, angolul nem mertem vállalni.*

Kevésbé ismert fogalmak a prezentációban

A következőkben meg kell határoznunk az RLC-kísérlet alkatrészeit és a jelgenerátorok alaptulajdonságait, hogy azután számokkal is jellemezhesük őket. Mi kizárólag nem ideális alkatrészekkel építhetjük meg a kísérleti kapcsolást, ezért meg kell fogalmaznunk az elvárásokat. A prezentációt úgy szerkesztettem meg, mintha az egy valódi, élő kísérlet lenne (valójában az is volt három *évtizeddel ezelőtt*). Az egyes részkiérletekben a számítások helyessége érdekében megadtam az alkatrészek és a jelgenerátor paramétereit. Az „Alapadatok” beírásánál jutott eszembe, hogy a jelgenerátornak – a szinuszos frekvenciája mellett

– a feszültséggenerátor vagy az áramgenerátor tulajdonságaival kell rendelkeznie. Adatként csak akkor írhatom ki, hogy a generátorjel $E_0 = 180$ mV vagy $I_0 = 150$ μ A állandó, ha a terhelés változása miatt az E_0 vagy az I_0 értéke nem változik, más szóval a jelgenerátor egy *feszültséggenerátor*, illetve egy *áramgenerátor*.

Feszültséggenerátor. Egy olyan ideális energiaforrás, amelynek nincs belső ellenállása, így végtelen teljesítményt is szolgáltathat(-na). Ilyen nincs, de a gyakorlatban jól megközelíthető, ha az energiaforrás belső ellenállása több nagyságrenddel is kisebb a fogyasztó ellenállásánál. Az iskolai kísérleteknél egy hangerősítő sokat csökkentheti a jelgenerátor belső ellenállását. Az igazi megoldás a váltóáramú feszültségstabilizátor, ennek belső ellenállása szinte zérus. A kapcsolás a vezérlő jelgenerátor leosztott E_G feszültségének és a leosztott U_{out} kimeneti feszültségnek az egyenlőségét negatív visszacsatolással kényszeríti ki, vagyis a változó terhelés nem befolyásolja a kimenő feszültséget, azaz a belső ellenállás szinte zérus.

Áramgenerátor. Egy olyan ideális energiaforrás, amelynek végtelenül nagy a belső ellenállása, és egyúttal a forrásfeszültsége is, a szolgáltatott áram pedig ennek a kettőnek a hányadosa. Ilyen nincs, de a gyakorlatban jól megközelíthető, ha az energiaforrás belső ellenállása több nagyságrenddel nagyobb a fogyasztó ellenállásánál. Ez alig valószínűsíthető meg, ezért olyan eszközöket alkalmaznak, ahol a kimeneti áramot nem a terhelő ellenállás, hanem valamilyen más paraméterezhető jelenség (*a szinuszos bázisárammal vezérelt tranzisztor kollektorárama*) határozza meg. Az iskolai kísérleteknél elfogadható megoldás a nagy kimeneti feszültségű (≥ 20 V_{pp}) jelgenerátor „majdnem áramgenerátorra” alakítása egy jóval 100 k Ω feletti ellenállással. Ez olyan, mintha az már a jelgenerátor belső ellenállása lenne. Az igazi megoldás a váltóáramú áramstabilizátor, ennek belsőellenállása szinte végtelen. A kapcsolás a vezérlő jelgenerátor leosztott E_G feszültségének és a kimeneti áramfigyelő ellenálláson megjelenő feszültségnek az egyenlőségét negatív visszacsatolással kényszeríti ki, vagyis a terhelés nem befolyásolhatja a kimeneti áramot, azaz a belső ellenállás szinte végtelenül nagy.

A szimulációnál elég volt az E_0 vagy az I_0 állandóságának a kijelentése, és azzal számítottam ki a jellemzőket. Az élő RLC-kísérletnél az r_i belső ellenállás befolyásolja a rezonancia élességét! Az sRLC-nél az r_i legyen kicsi, a pRLC-nél, nagy!

R, L, C elemek. Ideális alkatrészek, amelyek csak a saját tulajdonságukkal rendelkeznek: az egyébként tekercselt ellenállásnak nincs induktivitása, az induktitásnak pedig nincs ellenállása, sem a menetek közötti kapacitása. A kondenzátor dielektrikuma tökéletes, az ellenállása végtelen, a feltekert fóliának nincs induktivitása. Egy-egy valódi alkatrész esetében ezen elemi alkatrészekből „összeszerakott” egyenértékű kapcsolással helyettesítjük a valódi alkatrész elképzelt szerkezetét. Ki gondolná, hogy az egyszerű oszcilloszkópok bemeneti feszültségosztóiban éppen a „bajt okozó” pótkondenzátorok okos megnövelésével ($R_1C_1 = R_2C_2$) hátrították el a jelek durva torzítását?

Az így kialakított RC osztók csak körülbelül tíz MHz-ig használhatóak, a nagyobb frekvenciáknál újabb, pici kondenzátorok és néhánymenetes „tekercek” hozzák létre a majdnem tökéletes kompenzációt.

Létrehozható kombinációk. A bemutatóban ezeket az elemeket egyenként vizsgáljuk, majd kettesével (*az LC csak a krétafizikában létezik*) vagy hármasával sorba, esetleg párhuzamosan kötjük, és a viselkedésüket figyeljük. A gerjesztés során az egyszerű és a soros kapcsolásokat egy feszültséggenerátorra, a párhuzamos kapcsolásokat egy áramgenerátorra kötjük, és a kialakult feszültségeket az oszcilloszkóp bemeneteihez csatlakoztatjuk. Az áramkör jellegét (*kapacitív, rezisztív, induktív*) a rákapcsolt váltófeszültség és a felvett áram fázisviszonya adja meg. Az egyedi és a kéttagú kapcsolásoknál a reaktív elem (L , C) jellege a meghatározó, más nem is lehet, de a kéttagúak „jellegességét” a kialakult sietési-késési idő határozza meg. A jelleg akkor „erős”, ha ennek az időnek az abszolút értéke közel áll gerjesztő jel negyedperiódusához. A jelenség fordítottja az, amikor ez az idő a negyedperiódusnak csak alig néhány százaléka, ilyenkor az áramkör jellegét az ellenállás határozza meg.

A háromtagú kapcsolások jellegmeghatározási elve ugyanaz, de a referenciajelhez való sietés-késés erősen változik a frekvenciával, és magát a jellegét is meghatározza. Ha a dipólusként elképzelt (*soros vagy párhuzamos, esetleg hibrid*) RLC áramkör által felvett áram késik a pólusokon megjelent feszültséghez képest, akkor az áramkör (*a szerkezetétől függetlenül*) *induktív* jellegű, ellenkező esetben pedig *kapacitív* jellegű. Amikor az áramkör által felvett áram fázisban van az RLC-kombinációra kapcsolt jellel, akkor az áramkör *rezisztív* jellegű és *rezonanciáról* beszélünk. Ekkor a jellegmeghatározó belső feszültségek (*sRLC*) vagy áramok (*pRLC*) azonos nagyságúak és ellentétes fázisúak, vagyis kívülről nézve kioltják egymást, és a jelgenerátor megmaradt feszültsége vagy árama az áramkör ellenállásán jelenik meg [14]. Kívülről csak a létrejött extrém értéket láthatjuk: a felvett áram rezonanciája az sRLC-nél, és az áramkörön megjelent feszültségrezonancia a pRLC-nél. Ez a két jelenség az elektronikai eszközök és mérések legfontosabb jelensége, ezért erre nagyobb hangsúlyt fektetve, külön kísérleti fejezetben tárgyaltam (*Háromtagú RLC áramkörök jellegváltása a rezonancia körül*).

*Akarattal hagytam ki az oszcilloszkópos mérés elvét, ugyanis a normál oszcilloszkópok nem alkalmasak az RLC áramkörök bemutatott méréseinek az elvégzésére. Az elv és a meghökkenítő megoldásokat is tartalmazó mérési kapcsolás az elvi magyarázattal együtt a mellékletekre ajánlott pdf-ben van. Az oszcilloszkópok csak feszültségeket képesek érzékelni, ezért áramfigyelő ellenállásokat helyezünk el, és visszaszámoljuk az ott folyó áramot. Ez igen egyszerűnek tűnik, de az oszcilloszkópok bemenetei közös nullponton rendelkeznek, így az áram- és a feszültségjel nem választható szét, de egy kapcsolással szétválasztottam őket, lásd az *RLC Signals Collection* prezentációt! A komplexebb digitális oszcilloszkópok bemenetei*

szigetelten is készülnek. Egyes gyártók a drágább változatokhoz kalibrált áramsöntöket is adnak.

Virtuális oszcilloszkóp. Csak a szimulációnak állítottam meg! A szabványos, 10×8 -as képernyőjű oszcilloszkóp idővonalának indítása és az X bemenete megfelel egy közepes kategóriájú analóg oszcilloszkópénak. Az Y öt BNC bemenete közül csak kettő szigetelt, $1 \text{ M}\Omega$ -os, 10 MHz -ig kompenzált, saját osztók vannak. Az X , Y csatornák érzékenysége a jelek nagysága függvényében 1-2-5 lépésben, *automatikusan állítódik*, a beállításokat mindig kijelezzük. *Velem történt meg, hogy a 961-es és a 962-es kép váltásakor az I_L amplitúdója fizikailag csökkent, de a 962-es képen az I_L szinusza jóval nagyobb lett* [15]. Átvizsgáltam a programot, de a „hiba” az automatikus érzékenységváltásban volt, *ugyanis nem vettem észre, hogy az addigi két, egyenlő $0,5 \text{ mA/div}$ és $0,5 \text{ mA/div}$ érzékenység a váltáskor $0,2 \text{ mA/div}$ és $0,5 \text{ mA/div}$ lett.*

LH Trigger. Pozitív frontú (low-high) nullátmeneti jel, ez indítja el az oszcilloszkóp idővonalát. A felhasználó feladata a jel forrásának a kiválasztása, majd az indítási front és az indítási szint beállítása. A kiválasztás kizárólag olyan jelre eshet, amely globálisan határozza meg jelenléte, és zavarkeltés nélkül hozzáférhető! A nullátmenet szintjét egy kicsi háromszög jelzi az Y csatorna függőleges nullvonalánál. Mindig az időreferencia-jelből származtatjuk, így megfigyelhetjük a többi jelnek az időreferencia-jelhez mért sietését-késését. Az egyszerű áramkörnél a referencia a feszültséggenerátor nullátmeneti LH frontja, a soros kapcsolásoknál feszültséggenerátor a gerjesztő, az áram közös, ezért ez a referencia. A párhuzamos kapcsolásoknál az áramgenerátor gerjeszt, de az áramkörön kialakult *feszültség a közös, így az a referencia.*

A prezentáció tartalomjegyzéke

A kétlépcsős tartalomjegyzék a majdnem ezer oszcillogramból *szinte azonnal kiválasztja* a célnak megfelelőt. Ez nem egy „hosszas diasor”! A fejezetek a fent említett R , L , C lehetséges kombinációira vonatkoznak, az egyedi (onlyR, onlyL, onlyC) elemeken kívül vannak kétagú kategóriák: az sRL és a pRL, az sRC és a pRC, *az LC csak a krétafizikában létezik.*

A prezentáció a háromtagú sRLC és a pRLC kapcsolásokat bővebben tárgyalja. A prezentáció 984 számozott oldalból áll, de az egy fogalomkörbe (*mindenféle soros vagy párhuzamos kombináció*) tartozó oszcillogramokat a jobb alsó sarokban a generáló program vastag, fehér számokkal sorszámozza. A kiválasztott frekvencia az első, majd jön az időreferencia-jel értéke, ezután a feszültségek vagy az áramok. Az RLC áramkörök vizsgálatát a jelenségek gazdagsága miatt három részre osztottam. A rezonanciafrekvencia körüli eltérést 1-2-5 lépésű, %-ban kifejezett 17 frekvencián mértem. Az ötfrekvenciás (sRLC05, pRLC05) változatban csak a rezonancia körüli két-két frekvenciát, a kilencfrekvenciásnál (sRLC09, pRLC09) a $\pm 20\%$ között minden másodikat, míg a tizenhét frek-

venciás (sRLC17, pRLC17) változatnál mind a tizenhet megtartottam. Ennyi méréssel már rezonanciagörbét és fázismentet is lehet rajzolni – ezeket láthatjuk az sRLC és pRLC diasoron [16]. Az oszcilloszkóp természetesen ábrázolja az időpontokat, ezért nem az időkülönbségből kiszámított szögeltérést, hanem a frekvenciatolás függvényében a magát az időtolást is ábrázoltam. Ekkor az „S görbe” jól ismert formája igencsak megtréfált! Nem az eddigi szimmetrikus formát hiányoltam, az aszimmetriát is „megbocsátottam”, de azt nehezen nyeltem le, hogy a Δt S görbéje a pozitív Δt értékek vége felé csökkent (*lásd a megjegyzéseimet*).

Összefoglaló helyett két ajánlat és néhány „nem értem”

A prezentációban található 960 + 6 oszcillogram az RLC áramkörökkel kapcsolatos jelenségek gazdag tárháza. Nem a kísérletek helyett, hanem azok előkészítését segítő, a táblarajzok mellé (*inkább helyettük*) ajánlom. *Második ajánlat:* a prezentációból számtalan képet lehet kiemelni, és belőlük új elképzelésben minidemókat készíteni, ezekkel egyénivé tehetik a fizikaórárt. *A megalapozott, szakmailag helyes bírálatokat szívesen veszem, és ha elfogadhatónak tartom, átírom a prezentációt is. A rajzeszközeim a Windows alól nem azonosíthatóak, ezért csak a tűéles képeket csodáljátok!*

A szövegben található linkek által mutatott illusztrációk bővebb, néhány képpel és gondolattal kiegészített összefoglalója (*RLC Signals képgyűjtemény.pdf*) külön is meghívható. A 47 képen felvillantom, esetleg magyarázom is azokat a saját tervezésű készülékeket, amelyek közvetlenül vagy közvetve segítettek az oszcillogramok létrehozását.

Nem értem, hogy az sRLC két ellentétes fázisú belső reaktív feszültségének kioltását miért neveznék *csak egy* feszültségrezonanciának! Azt sem értem, hogy miért neveznék a pRLC belsejében létrejött két ellentétes fázisú belső reaktív áram kioltását *csak egy* áramrezonanciának. Nem lenne elég a kívülről látható (sRLC) áram- és (pRLC) feszültségrezonancia? *Szerintem a rezonancia a hozzáférhető jel legnagyobb értékét, és nem két belső jel kioltását jelenti.*

A Tacoma-hídnál és a hintánál is (tanárként és nagyapaként) csak az egyre nagyobb kilengést (rezonanciát) látom. Erre még ráteszem a hat-hét évtizedes elektronikai konstrukcióimat, az abból szerzett tapasztalataimat, és maradok az sRLC áramkör által felvett áram, meg a pRLC áramkörön megjelenő feszültség rezonanciájánál. *Másként is érvelek: a XX. század rádió- és TV-technikája, az NMR ma is, a feszültségrezonanciás párhuzamos RLC-ről szól, de fontos szerepet kapott a hullámcsapdaként működő soros, áramrezonanciás RLC is.*

Lenzcel érvelve, nem hiszek a „nyugalmi” elektromágneses indukcióban sem. Az elektromágneses indukció kizárólag kölcsönhatáskor (energiacsere) jöhet létre, és a munkavégzést követelő ellenszegülés legyőzéséből keletkezik. „Nyugalomról” szó sem lehet, az félvezetési diákot! *Kísérletező típus lévén, én csak a kísérleteimből merek kiindulni!*

MARANGONI-CSEPPROBBANÁS VIZSGÁLATA KÖZÉPISKOLÁBAN

Tasnádi Bálint, Rossz Koppány, Szeidemann Ákos®
Eötvös József Gimnázium és Kollégium, Tata; ®E-mail: szeidiak@gmail.com

Bevezetés

A jelen cikk megírását elsősorban az motiválta, hogy egy példán keresztül bemutassuk a középiskolai kísérletezős önképzőkori munka lehetőségeit, valamint hogy rámutassunk: a tudományos megismerés lépéseinek bejárása már gimnazista korban is lehetséges. Természetesen nem egy teljesen új jelenség felfedezéséről van szó, de annak laboratóriumi előállítására, a korántsem triviális elméleti háttér és a releváns paraméterek megismerése, illetve azok hatásának vizsgálata elvezetett bennünket a kutatómunka legizgalmasabb területeire. Az általunk részletesen vizsgált jelenség meglehetősen bonyolult, azonban a mérhető mennyiségek között fennálló matematikai kapcsolatok és azok logikai láncolata – jól követhető következtetésekkel – a középiskolai tehetséggondozásban is megállja a helyét.

A jelenség bemutatása

A Marangoni-hatás egy határfelület-menti áramlás, amit egy felületifeszültség-gradiens indukál. A felületifeszültség-gradienst indukálhatja hőmérséklet-gradiens [1], vagy – mint esetünkben – a felületaktív anyag koncentrációjának gradiense [2–9]. Ez a hatás szerepet játszik egyes élőlények víz felületén történő mozgásában [2], de fontos tényező a félvezetőgyártásban is, a szilíciumlemezeket többek között a Marangoni-hatás segítségével is szárítják [3].

Dolgozatunk a borkönyvekhez mechanizmusában hasonló jelenséget mutat be: párolgás indukálta Marangoni-hatást egy olajágyra cseppentett elegy terülésében. A problémát a 2021–22-es IYPT (International Young Physicists' Tournament, Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye) témái között ismertük meg. Az IYPT-probléma hivatalos leírása [10]: „Előfordulhat, hogy ha víz és más folyadék (pl. alkohol) keverékéből egy cseppet hidrofób folyadék (pl.: olaj) felszínére csöppentünk, akkor a létrejövő csepp több kisebb csepre esik szét. [...]” A konkrét jelenséget több tanulmány is leírja. Vizsgálták már a csepp terülését, az elegyek párolgási rátáit és a csepp vastagságprofilját [6], majd a hőmérséklet hatását [7, 8] és a színezékanyag hatását [9]. Munkánk során megismételtük a szakirodalom eredményeit, és új módszereinkkel bővítettük is azokat – középiskolában egyik sem triviális feladat.

Elméleti megalapozás

A terülés feltétele a nedvesítés, azaz, hogy a csepp és az olaj közötti másodrendű kölcsönhatások (adhéziós erők)

nagyobbak legyenek a cseppen belülieknél (kohéziós erők). Ezt a felületi feszültségekkel kifejezve bevezethetjük az S területi paramétert:

$$S = \gamma_{oa} - \gamma_{mo} - \gamma_{ma},$$

ahol γ_{oa} az olaj-levegő, γ_{mo} a keverék-olaj, γ_{ma} pedig keverék-levegő határfelületi feszültség. Területet várunk, ha $S > 0$.

Nedvesítés a víz és olaj között

A víz dipólusos molekulái között erős másodrendű kötések jönnek létre (dipól-dipól, hidrogénkötés), így nagyok a kohéziós erők. Az olaj – esetünkben napraforgóolaj, nagyrészt gliceril-trioleát – hosszú szénláncú apolárisak, nagyon gyengék az adhéziós erők, így a csepp nem terül el.

Nedvesítés alkohol és olaj között

A kis szénatomszámú alkoholmolekulák között többféle másodrendű kölcsönhatás is létrejön: hidrogénkötés, dipól-dipól kölcsönhatás, diszperziós kölcsönhatás. Egy alkoholmolekula kevesebb hidrogénkötést tud kialakítani, mint egy vízmolekula, így az alkoholon belül kisebbek a kohéziós erők, mint a vízben.

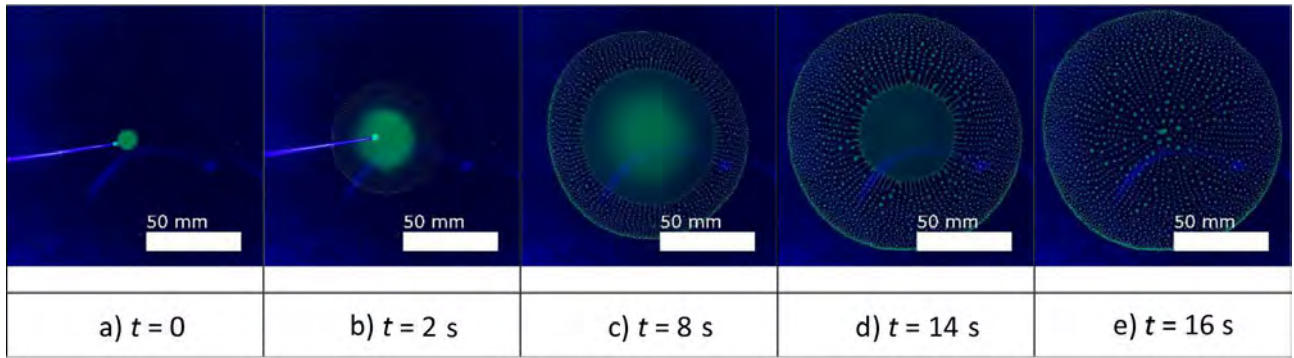
Az alkohol- és olajmolekulák között diszperziós kölcsönhatás lép fel. Mivel a kohéziós erők kisebbek, mint a víznél, az adhéziós erők pedig nagyobbak, az alkohol elterül az olajon.

Nedvesítés a víz-alkohol elegy és az olaj között

Az alkohol másodrendű kötések alakít ki a vízzel és az olajjal is, így, ha az elegy kezdeti alkoholkoncentrációja elég nagy, az elterül. Ezek alapján a jelenség feltétele az, hogy az elegy kezdeti alkoholtartalma (ϕ_0) nagyobb, mint egy határkoncentráció (ϕ_c). Az 1. táblázat tartalmazza ϕ_c általunk meghatározott értékeit különböző alkoholokra, illetve acetona. ϕ_0 értékét addig növeltük, amíg nem tapasztaltuk a jelenséget.

1. táblázat. ϕ_c különböző anyagokra

| Felületaktív anyag | ϕ_c |
|--------------------|---------------------|
| Metanol | $0,875 \pm 0,025$ |
| Etanol | $0,6375 \pm 0,0225$ |
| 1-propanol | $0,375 \pm 0,025$ |
| 2-propanol | $0,350 \pm 0,025$ |
| 1-butanol | – |
| Aceton | $0,763 \pm 0,013$ |
| Víz | – |



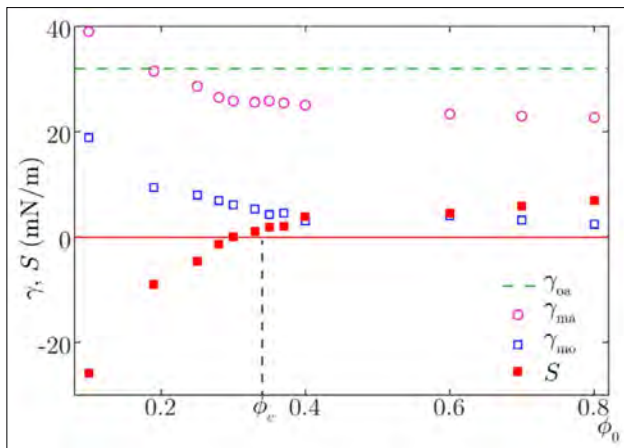
1. ábra. A jelenség szakaszai. A csepp térfogata: $\Omega_0 = 50 \mu\text{l}$; $\phi_0 = 0,425$, az anyag 2-propanol. A keverékhez fluoreszcein nátriumsót adtunk (saját felvételek)

Általánosságban elmondhatjuk, hogy kis szénatomszámú alkoholoknál ϕ_c a szénatomszámmal csökken, ahogy azt a Traube-szabály is leírja: az egy homológ sorba tartozó egyszerű szerves vegyületek esetén minden hozzáadott $-\text{CH}_2$ -csoport körülbelül háromszorosára növeli a vegyület felületfeszültség-csökkentő hatását [11].

A jelenséget akkor lehet pontosan számszerűen leírni, ha a használt felületaktív anyag párolgásához képest elhanyagolható a víz párolgása. Etanol esetében ez a közelítés helyes: a jelenség időtartamában (nagyságrendileg 30 másodperc) az etanol párolgási rátája sokkal nagyobb a használt koncentrációkon, mint a vízé [12, 6], így a víz párolgását elhanyagolhatónak tekinthetjük. Munkánk során etanol helyett főleg 2-propanolt használtunk, mivel az ahhoz tartozó határkoncentráció jóval kisebb, így szélesebb tartományban vizsgálhatjuk a jelenséget. Feltételeztük tehát, hogy a víz párolgása 2-propanol mellett is elhanyagolható.

Felületi feszültségek

Az egyes fázisok közötti felületi feszültségeket nem volt lehetőségünk megmérni, ezért [6] méréseit használtuk. Az olaj-levegő (γ_{oa}), keverék-olaj (γ_{mo}), illetve a keverék-levegő (γ_{ma}) felületi feszültségeket ábrázolva (2. ábra) látszik, hogy az alkoholkoncentráció növelésével γ_{mo} és γ_{ma} csökken, így az S terülesi paraméter nő,



2. ábra. A felületi feszültségek és az S paraméter 2-propanolra [6]. γ_{oa} az olaj-levegő, γ_{mo} a keverék-olaj, γ_{ma} pedig a keverék és levegő közötti határfelületi feszültség

zérushelye ϕ_c , a felületaktív anyagra jellemző kritikus koncentráció.

Terülés

Ha $\phi_0 > \phi_c$, a csepp elterül az olajon (1a.–1e. ábra). Az elterült csepp vastagsága nem állandó, kijebb vékonyabb. Ezt kvalitatívan a belső csepp színéből is meg lehet határozni (1c. ábra).

Terülés közben az egységnyi felületről egységnyi idő alatt elpárolgott alkohol mennyisége közel állandó [6], viszont a csepp vastagsága nem, ezért a csepp alkoholkoncentrációja nem egyenletesen változik: a vékonyabb részeiben gyorsabban csökken, mint a közepén. A helyi alkoholkoncentrációval a helyi felületi feszültség is változik, és amikor az alkoholkoncentráció eléri ϕ_c -t, a felületi feszültség túllépi a terüléshez lehetséges maximumot, tehát $S < 0$, a terülés megáll.

Mivel a belső csepp közepén a legvastagabb, feltételezhetjük, hogy közepén az alkoholkoncentráció folyamatosan ϕ_0 a jelenség időtartama alatt.

Marangoni-áram

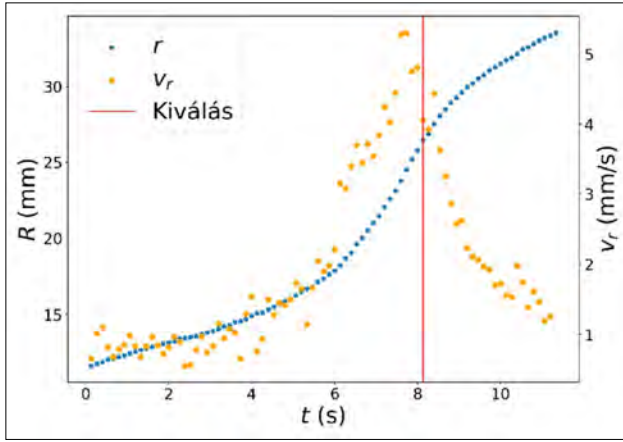
A cseppben az alkohol párolgása által indukált felületfeszültség-gradiens Marangoni-áramokhoz vezet. Az ezt hajtó feszültség arányos a felületfeszültség-gradiens nagyságával:

$$\sigma_M \sim \Delta\gamma/R,$$

ahol $\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_0$, hiszen a belső csepp közepén az alkoholkoncentráció ϕ_0 , a szélén pedig ϕ_c , R pedig a csepp sugara. Fontos megjegyezni, hogy ez az összefüggés csak akkor igaz, ha a csepp területe megáll, azaz a perem koncentrációja ϕ_c , így a továbbiakban csak a maximális sugárra tudunk összefüggéseket felállítani.

Az áramlási sebesség méréséhez CaCO_3 -port szórunk a már elterült csepp felszínére. A por mozgását követve azt láttuk, hogy a csepp közepén a sebesség nagyon alacsony, majd nő az „anyacsepp” pereméig, ahol a kiválás után az olajon fékeződik (3. ábra).

Az olajgyba hungarocellgyöngyöt helyeztünk, majd annak is követtük a mozgását. A csepp felületére szórt krétapor és az olaj felső részébe tett polisztirolgyöngy sebessége közel egyenlő volt, tehát nincs nyírás a csepp



3. ábra. A cseppbe szórt CaCO_3 -por sugár-idő, illetve sebesség-idő grafikonja. r a por és a csepp középpontjának távolsága, v_r a por sebessége (saját mérés)

és az olaj között. Így az olajat és a keverékcsepp határát egy közeghatárnak tekinthetjük

$$\gamma = \gamma_{\text{mo}} + \gamma_{\text{ma}}$$

effektív felületi feszültséggel.

Az olajban az áramlás az olaj felületéről indul, és lefele terjed. Mélysége az idő függvényében [13]

$$\delta(t) \approx 5,0\sqrt{\nu t},$$

ahol ν az olaj kinematikai viszkozitása, $\nu \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ napraforgóolajra. Esetünkben az olaj 10 mm magas volt, ezt δ pár másodpercen belül eléri, míg a jelenség több mint fél percig tart. Így jó közelítés, hogy a jelenség folyamán az olaj áramlási mélysége H (az olajágy mélysége), tehát abban a viszkózus feszültség

$$\sigma_o = \eta_{\text{olaj}} V_{\text{olaj}} / H$$

a newtoni viszkozitási törvény alapján.

Hogy megfeleljünk a feszültségkontinuitásnak, egyenlővé tesszük a tangenciális feszültségeket a határfelületnél:

$$\sigma_M = \sigma_o, \quad V_{R_{\text{max}}} = (\Delta\gamma H) / (\eta_{\text{olaj}} R_{\text{max}}).$$

Vezessük be τ -t mint a jelenség karakterisztikus idejét:

$$\tau = R_{\text{max}} / V_{R_{\text{max}}}.$$

Feltételezzük, hogy igaz, hogy $\tau \sim t_{\text{exp}}$.

Az elpárolgott alkoholmennyiség arányos az idővel, a területtel (a sugár négyzetével) és a párolgási fluxus szorzatával:

$$\phi_0 \Omega_0 - \phi_t \Omega_t = j \int_0^t R^2(t) \pi dt.$$

Ahol Ω_0 a cseppentés, Ω_t az elegy t időpontbeli térfogata, $j = \Delta m / (\Delta t A)$ a párolgási fluxus.

Az $R(t)$ függvények hasonlósága miatt igaz, hogy

$$\phi_0 \Omega_0 - \phi_c \Omega_{\text{végső}} \sim j R_{\text{max}}^2 \tau.$$

Mivel az $R(t)$ függvény R_{max} -ra tengelyesen tükrös, τ arányos lehet az R_{max} eléréséhez szükséges idővel ($t_{R_{\text{max}}}$), vagy a teljes robbanás idejével (t_{exp}).

Ha feltételezzük, hogy a jelenség során a víz nem párolog, akkor felhasználhatjuk a víz megmaradását:

$$(1 - \phi_0) \Omega_0 = (1 - \phi_c) \Omega_{\text{végső}}.$$

Ezt az előző arányosságba helyettesítve $\Omega_{\text{végső}}$ kiesik.

Az eddigi összefüggéseket egyesítve:

$$R_{\text{max}} \sim \left(\frac{(\phi_0 - \phi_c) \Delta\gamma H \Omega_0}{(1 - \phi_c) \eta_{\text{olaj}} j} \right)^{1/4},$$

ahol ϕ_0 a kezdeti keverék tömegszázalékos koncentrációja, ϕ_c a terüléshez szükséges minimális koncentráció, $\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_0$, H az olajkád mélysége, Ω_0 a cseppentés térfogata, η_{olaj} az olaj dinamikai viszkozitása, j_v pedig az alkohol párolgási fluxusa.

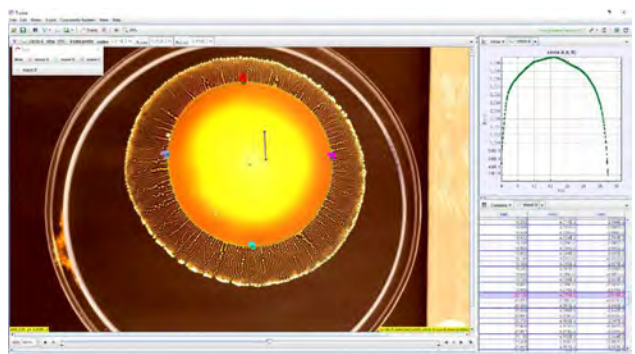
A továbbiakban R_{max} -ként hivatkozunk a mért maximális sugárra, R^* -ként pedig a fenti összefüggés segítségével számított karakterisztikus sugárra. Méréseinkkel bebizonyítjuk, hogy a kettő között valóban egyenes arányosság áll fent.

Gyakorlati megvalósítás

A jelenség pontos vizsgálata gyakorlati szempontból nem triviális feladat. Néhány mikrométer vastag folyadék-réteget kell úgy vizualizálni, hogy az pontosan elemezhető legyen, így kulcsfontosságú a megvilágítás. Először egy hagyományos írásvetítővel próbálkoztunk, azonban a pontszerű fényforrásra túl érzékeny volt a kameránk.



4. ábra. A mérési összeállítás



5. ábra. A terülés elemzése a Tracker szoftver segítségével

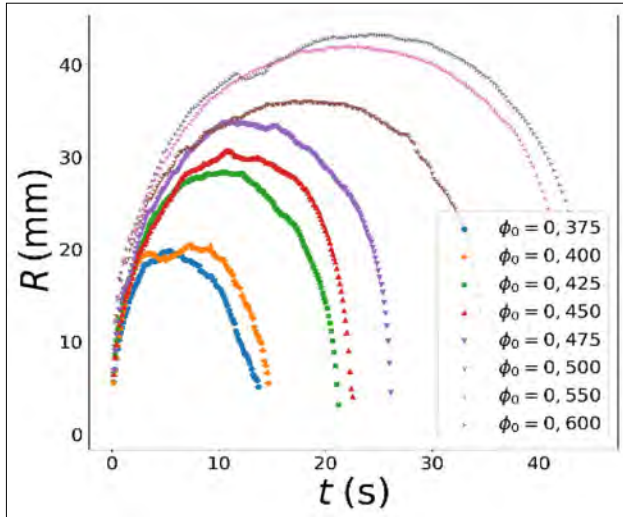
Az ideális megoldást egy rossz LCD monitor újrahasonosítása hozta el: az LCD-réteget eltávolítottuk, és az eredeti LED-háttérvilágítást nagyobb teljesítményű LED-szalagra cseréltük. A diffúzorrétegeket vissza-

helyezve egy homogén megvilágítót kaptunk, amin méréseinket egy 20 cm átmérőjű Petri-csészében végeztük.

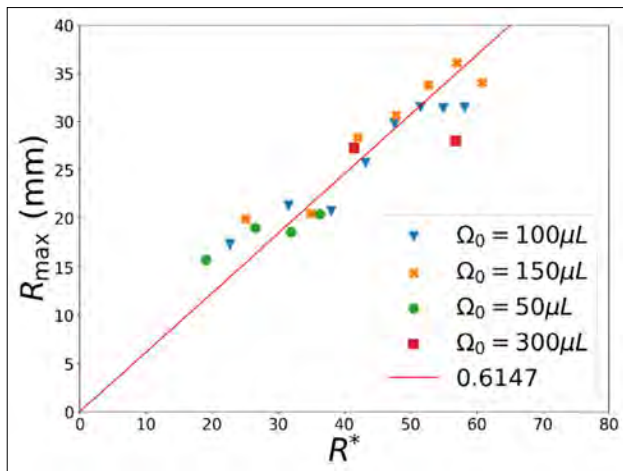
Szintén nem triviális feladat a pontos cseppentés: minél gyorsabban és pontosabban kell az olajra cseppenteni a keveréket. Kisebb térfogatokra ($10 \mu\text{l} \leq \Omega_0 \leq 80 \mu\text{l}$) kromatográfias fecskendőket használtunk, a közepesekre (100; 150 μl) mikropipettát, a nagyobbakra 1 ml-es üveg mérőpipettát.

Annak érdekében, hogy a csepp könnyen látható legyen, célszerű azt megfesteni. Ételszínezéket használva túlságosan megváltoztatnánk az elegy alkoholkoncentrációját, így metilkék indikátorport használtunk. Mivel a metilkék egy nagyon potens színezék, 10 g elegybe elegendő körülbelül 0,01 g színezék. Nagyobb alkoholkoncentrációkon a csepp jobban elterül, vékonyabb réteget alkot, így több indikátort igényel. Az alkohol párolgásával az indikátor kiválik az oldatból, kedvezőtlen eredményt hozva. Ideális esetben interferometriát kellene használni, így nem lenne szükség színezékre [6], azonban vékonyfilm-interferencia csak elég kis cseppentési térfogatoknál ($\leq 10 \mu\text{l}$) működne.

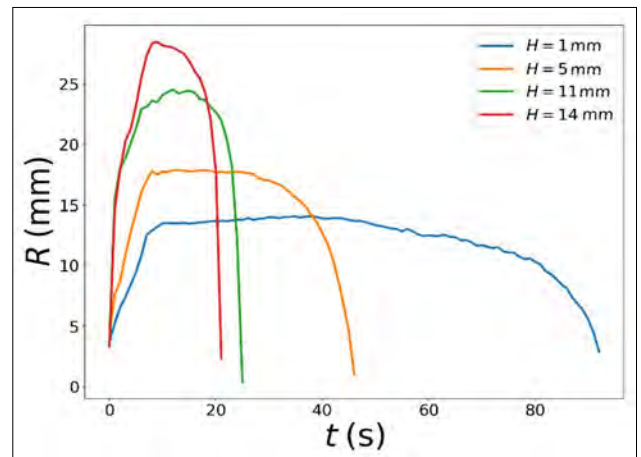
A videót 4K 30 fps-ben rögzítettük, ami kellő felbontást biztosított a jelenség pontos vizsgálatához. A terülést



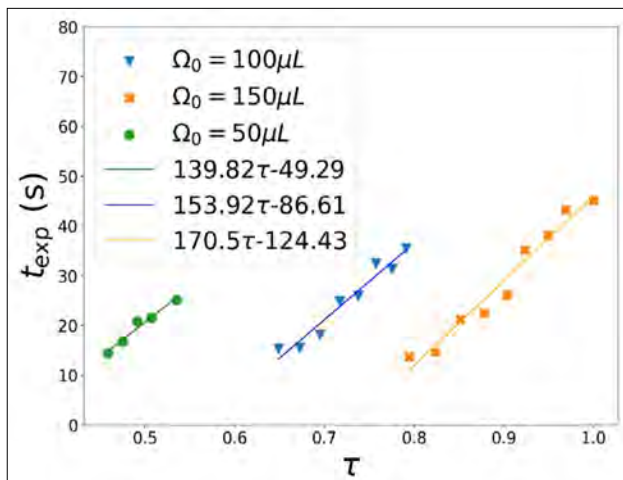
6. ábra. A belső csepp R sugara az időben. 2-propanol, metilkék, $\Omega_0 = 150 \mu\text{l}$



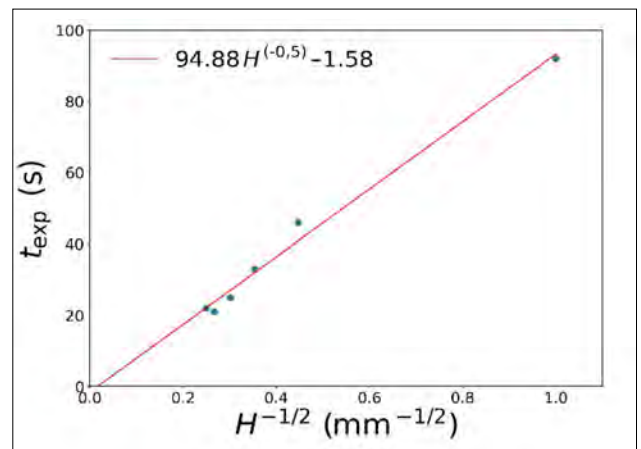
7. ábra. Számított R^* és mért R_{\max} . Az egyenes origón átmenő illesztés



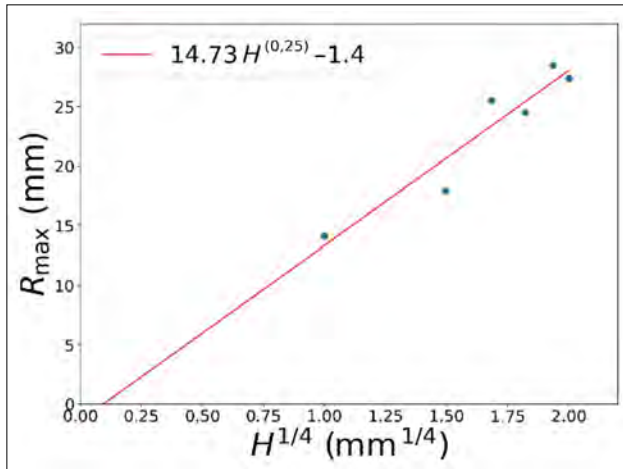
9. ábra. $R(t)$ függvények különböző olajmélységekre (saját mérések)



8. ábra. Számított τ és mért t_{\max} . Az egyenesek illesztések



10. ábra. A jelenség időtartama $H^{-1/2}$ függvényében



11. ábra. A csepp maximális sugara $H^{1/4}$ függvényében

a Tracker – Video Analysis and Modeling Tool szoftverrel végeztük (5. ábra).

Eredmények

A belső csepp sugarát körillesztéssel határoztuk meg a Tracker segítségével. Azt az idő függvényében ábrázolva különböző alkoholkoncentrációjú keverékekre azt láttuk, hogy az összes függvény hasonló alakú, az alkoholkoncentráció növelésével R_{max} és t_{exp} nő (6. ábra).

Észrevehetjük, hogy az összes görbe hasonló alakú, ezért használhattunk az elméleti leírásban arányossági törvényeket R_{max} és t_{exp} meghatározására. A várható karakterisztikus sugárra kialakított elméleti modellre jól illeszkednek a mérési adatok (7. ábra).

Az elméleti leírást ki lehet fejteni a jelenség τ karakterisztikus idejére is:

$$\tau \sim \left(\frac{(\phi_0 - \phi_c) \eta_{olaj} \Omega_0}{(1 - \phi_c) \Delta \gamma H j} \right)^{1/2}$$

Ezt a méréseinkkel összehasonlítva azt látjuk, hogy az azonos térfogatú cseppentések mind ugyanolyan meredekségű egyenesre illeszkednek, tehát az elméletünk részben helyes, azonban a különböző zérushelyek egy tranziens jelenségre utalnak (8. ábra).

Az olajkád mélysége elsöre meglepő paramétere lehet a maximális sugárnak, illetve a jelenség karakterisztikus idejének. H növelésével azt tapasztaltuk, hogy a csepp maximális sugara nőtt, az időtartam pedig csökkent. Méréseink jó egyezést mutatnak az elmélettel (9–11. ábra).

Kitekintés: más anyagok

A jelenség feltétele, hogy a kezdeti elegy teljesen nedvesítse az „olajat”, illetve, hogy az egyik komponens sokkal illékonyabb legyen, mint a másik, és enélkül a csepp nedvesítési képessége csökkenjen. Keiser, et al. alkohol he-

lyett egy halogénezett étert (metoxinonafluorobután) és víz helyett egy halogénezett szénhidrogént (perfluorodekalin) javasol, szilikonolaj ágyon. Mi sikeresen előidéz-tük a jelenséget acetonnal, bár a gyors párolgása miatt nem lehet olyan pontosan vizsgálni, mint a 2-propanolt.

Összefoglalás

Méréseinkkel vizsgáltuk a jelenség létrejöttének feltételeit, az egyes fázisok összetételét, illetve sikeresen áthidaltuk a vizsgálat technikai nehézségeit. A területre felállított elméletünk jól összefoglalja az eddigi tanulmányokat, és ki is egészíti azokat. A terület mérése jól egyezik a rá vonatkozó elmélettel és a már meglévő tanulmányokkal. Vizsgáltuk a fluoreszcenciás megvilágítás lehetőségét, ami a metilkéknél sokkal jobb megoldásnak bizonyult, így pontosabban vizsgálhattuk az instabilitásra vonatkozó elméleteket. Reméljük, hogy munkánkkal népszerűsíteni tudjuk ezt a különleges hidrodinamikai jelenséget. Vizsgálatainkat nem zártuk le a témában: a színezék hatásával és az instabilitás részletesebb vizsgálatával foglalkozó kísérleteket tervezünk a közeljövőben.

Irodalom

- Kataoka D. E., Troian S. M. (1997): A theoretical study of instabilities at the advancing front of thermally driven coating films. *Journal of Colloid and Interface Science*, 192/2, 350–362.
- Bush J. W. M., Hu D. L., (2006): Walking on water: Biocomotion at the interface. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 38/1, 339–369.
- Fyen W., et al. (2008): Chapter 19 – A detailed study of semiconductor wafer drying. In: *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (2nd ed.), Kohli R., Mittal K. L. (eds.) Oxford: William Andrew Publishing, pp. 795–854.
- Roché M., et al. (2014): Marangoni flow of soluble amphiphiles. *Phys. Rev. Lett.*, 112/20, 208302.
- Thomson J. (1855): XLII. On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 10/67, 330–333.
- Keiser L., Bense H., Colinet P., Bico J., Reyssat E. (2017): Marangoni bursting: Evaporation-induced emulsification of binary mixtures on a liquid layer. *Phys. Rev. Lett.*, 118/7, 074504.
- Hasegawa K., Manzaki Y. (2021): Marangoni fireworks: Atomization dynamics of binary droplets on an oil pool. *Physics of Fluids*, 33, 034124.
- Hasegawa K., Kishimoto Y. (2023): Fingering instability of binary droplets on oil pool. *Fluids*, 8, 138. <https://doi.org/10.3390/fluids8050138>
- Seyfert C., Marin A. (2022): Influence of added dye on Marangoni-driven droplet instability. *Phys. Rev. Fluids*, 7/4, 043602.
- http://hypt.elte.hu/wp-content/uploads/2022/09/Problemak_magyar_2022.pdf
- Traube J. (1891): Über die Capillaritätsconstanten organischer Stoffe in wässriger Lösung. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 265, 27–55.
- O’Hare K., Spedding P., Grimshaw J. (2008): Evaporation of the ethanol and water components comprising a binary liquid mixture. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 1, 118–128.
- Schlichting H. (1979): *Boundary-Layer Theory* (7th ed.), McGraw Hill, New York, USA, 160. o.

A Paksi Atomerőmű 1-2. blokki reaktorcsarnoka

