

fizikai szemle

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A FIZIKÁBAN

Neuromorfikus
számítástechnika
Csillagspektrumok
zajszűrése
Önvezérlő sikló-
repülő robotpilóta

2025/1

. 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

Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

Asbóth János, Bíró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkeket 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: Groma István főtítká

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 őrünk 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 Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 1800,- Ft (a dupla számoké 3600,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

MI által generált, statisztikus fizikát ábrázoló fantáziakép
(Forrás: tengrai.com)

TARTALOM

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A FIZIKÁBAN – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Somfai Ellák

- Somfai Ellák:* A mesterséges intelligencia a fizikában 1
- Berekméri Evelin, Pedro Lacerda, Göksel Keskin, Szarvas Zoltán, Palatitz Péter, Nepusz Tamás, Vásárhelyi Gábor, Nagy Máté:* Önvezérlő siklórepülő robotpilóta és a fedélzeti állatfelismerés fejlesztése 2
- A szerzők egy mesterséges intelligenciával vezérelt robot siklórepülő mutatnak be, amely a termikek kihasználásával energiahatékonyan repül, és valós idejű objektumfelismerés segítségével hasznos feladatokat old meg.*
- Pál Balázs, Dobos László:* Közepes felbontású csillagspektrumok zajszűrése neurális hálózatokkal 8
- A csillagok spektrumának gépi tanulási módszerekkel történő zajszűrése lehetőséget ad akár észlelés közben az ideális célpontok kiválasztására.*
- Fehérvári János Gergő, Balogh Zoltán, Halbritter András Ernő:* Neuromorfikus számítástechnika, avagy hogyan váltsuk aprópénzre a 2024-es fizikai Nobel-díjat? 13
- A neuronok által inspirált áramköri elem, a memristor felhasználásával olyan áramkör építhető fel, amely valós feladatokat old meg a numerikus számolásokhoz képest jóval kisebb energiafogyasztás mellett.*
- * * *

- Mócsy Ildikó:* A belső terek fizikai jellemzőiről és egyes szennyezőiről 20
- A mai fejlett ipari társadalmak polgárai idejük többségét belső terekben töltik, mely tereknek fizikai jellemzőiről és az azokkal kapcsolatos szennyezőkről szól ez az írás.*

REFLEKTORFÉNYBEN

- Ötvös Zoltán:* Pápa Zsuzsanna L'Oréal–UNESCO ösztöndíjas 27
- A L'Oréal–UNESCO A Nőkért és a Tudományért Magyar Ösztöndíjasa a pályájáról beszél.*

A FIZIKA TANÍTÁSA

- Országos Károlyházy Frigyes Problémamegoldó Verseny tanárszakos hallgatók számára 31
- Az idei évben 2025. január 31. és február 10. között rendezik meg a versenyt.*
- Borbélyné Bacsó Viktória, Komáromi Annamária:* Science on Stage Festival 2024 Turkuban 31
- A 2024-ben a finnországi Turkuban megrendezett nagyszabású fesztivál tapasztalatait és a magyar résztvevők bemutatóit összegzi az írás.*

KÖNYVESPOLC

- Ván Péter:* Bíró Tamás Sándor: Gintropy 36

~ ~ ~ ~ ~

AI IN PHYSICS – THEMATIC BLOCK

- E. Somfai:* AI in physics
- E. Berekméri, P. Lacerda, Göksel Keskin, Z. Szarvas, P. Palatitz, T. Nepusz, G. Vásárhelyi, M. Nagy:* Self-guided glider autopilot and development of on-board animal recognition
- B. Pál, L. Dobos:* Denoising medium-resolution stellar spectra using neural networks
- J. G. Fehérvári, Z. Balogh, A. E. Halbritter:* Neuromorphic computing, or how to turn the 2024 Nobel Prize in Physics into change?
- I. Mócsy:* On the physical characteristics of indoor spaces and some pollutants

IN SPOTLIGHT

Z. Ötvös: Zsuzsanna Pápa L'Oréal–UNESCO scholarship holder

TEACHING PHYSICS

National Károlyházy Frigyes Problem Solving Competition for teacher education students

V. Borbélyné Bacsó, A. Komáromi: Science on Stage Festival 2024 in Turku

BOOKSHELF

P. Ván: T. S. Bíró: Gintropy

A jelen szám színes nyomtatását az ELIAPLS Lézeres Kutóközpont támogatta.

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



Nemzeti Kulturális Alap



A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A FIZIKÁBAN

Somfai Ellák^{1,2}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Mesterséges Intelligencia Tanszék, Budapest

²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

E-mail: somfai.ellak@wigner.hun-ren.hu



A mesterséges intelligencia, és azon belül elsősorban a mesterséges neuronhálók alapuló gépi tanulás (adatalapú algoritmusok) korai fejlődéséhez alapvető módon járultak hozzá fizikai modellek, amit a 2024-es fizikai Nobel-díj is kifejez; erről többek között a *Fizikai*

Szemle 2024 decemberi számában olvashatunk részletesebben. A gépi tanulás fejlődése az utóbbi évtizedben robbanásszerű volt, aminek elsősorban az a forrása, hogy mind a tárolókapacitások és velük a rendelkezésre álló tanítóhalmazok nagysága, mind a számítási kapacitás időben exponenciálisan növekszik – ez utóbbit Moore-törvényként ismerjük. Az utóbbi néhány évben a mesterséges intelligencia felhasználása a hétköznapi életbe is kezdett beszivárogni, gondoljunk csak a parkolóházak megbízható rendszámfelismerő rendszereire vagy a mobiltelefon arcfelismerés-alapú feloldására. Így lehetővé vált az évtizedekkel ezelőttivel ellentétes hatás: ma már a fizika is felhasználója a mesterséges intelligenciának.

A felhasználások köre túlmutat az olyan gyakori irodai alkalmazásokon, mint a hosszabb szövegek (mint például emailek, cikkek) tömör összefoglalása, netán javítása; vagy valamilyen közismert információ párbeszédes jellegű lekérdezése. Megfelelően tanított rendszerek alkalmasak például arra, hogy egy adott, mondjuk asztrofizikai adatbázishoz bármilyen programozási ismeret nélkül férjünk hozzá: a természetes nyelven (angolul vagy akár magyarul) feltett kérdésünket a rendszer megfelelő, az adott adatbázis struktúrájához illeszkedő adatbázis-lekérdezési kóddá (pl. SQL) alakítja, lefuttatja, és humáncentrikus módon prezentálja. Mindez annak ellenére megbízhatóan működik, hogy az SQL kódban (mint ahogy bármely más programozási nyelvben is) akár egy karakter elírása is futási hibát vagy hibás eredményt okoz.

A jelen tematikus számban bemutatunk néhányat a mesterséges intelligencia innovatív alkalmazásai közül a fizika kontextusában. A gépi tanulás egyik változata, a megerősítéssel tanulás (angolul reinforcement learning) nagyon hatékony tud lenni egy ideális stratégia kiválasztására, melynek ikonikus példája a világ legerősebb gojátékosát 2017-ben legyőző AlphaGo program. *Berekméri Evelin és szerzőtársai* megmutatják, hogy a megerősítéssel tanulóval vezérelt robot-siklórepülő hatékonyan ki tudja használni a termikeket, továbbá a valós idejű tárgyfelismerés segítségével hasznos feladatokat tud megoldani.

Az asztrofizika a hatalmas adatmennyiségek strukturált feldolgozása érdekében régóta élen jár a gépi tanulás alkalmazásában. *Pál Balázs és Dobos László* mélyhálókat használ csillagok spektrumának zajszűrésére. A gyors, csupán ezredmásodperc alatt zajtalanított spektrumok lehetőséget adnak a távcsőidő csökkentésére, vagy akár arra, hogy észlelés közben, rövid expozíciós idő után döntsünk a megfigyelendő objektumokról, kiválasszuk az ideális célpontokat.

Végül *Fehérvári Gergő, Balogh Zoltán és Halbritter András* a Nobel-díj kapcsán is említett Hopfield-féle neurális hálók példáján keresztül engednek bepillantást a neuromorfikus számítástechnikába. Ez utóbbi célja a mesterséges neuronhálók működtetéséhez szükséges óriási energiaigény csökkentése olyan módon, hogy a hálók felépítéséhez illeszkedő célharvert használ. Ennek kulcseleme a memrisztor, amely egy belső memóriával rendelkező, a tranzisztortól eltérően működő, nemlineáris szilárdtest-alapú áramköri elem. Memrisztorok felhasználásával felépíthető olyan áramkör, amely valós feladatokat old meg a numerikus számolásokhoz képest összehasonlíthatatlanul kevesebb energiafogyasztás mellett.

* * *

Arra számíthatunk, hogy a gépi tanulás alkalmazásainak köre tovább bővül, és ezek a közeljövőben is újabb és egyre ötletesebb módon lesznek beilleszthetők a fizikai kutatásokba.

ÖNVEZÉRLŐ SIKLÓREPÜLŐ ROBOTPILOTA ÉS A FEDÉLZETI ÁLLATFELISMERÉS FEJLESZTÉSE

Berekméri Evelin^{1,2,3}, Pedro Lacerda^{1,2,3}, Göksel Keskin^{1,2}, Szarvas Zoltán^{1,4},
Palatitz Péter⁵, Nepusz Tamás³, Vásárhelyi Gábor^{2,3}, Nagy Máté^{1,2,6,@}

¹MTA-ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoport, Budapest

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

³CollMot Robotikai Kutató-fejlesztő KFT, Budapest

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar, Budapest

⁵MME/BirdLife Hungary, Budapest

⁶Max-Planck Institute of Animal Behavior, Konstanz

@E-mail: mate.nagy@ttk.elte.hu

A felszálló meleg légáramlatokat (termikeket) több madárfaj is mesterien hasznosítja, mégpedig azért, hogy az energiaigényes aktív repülés helyett a légoszlopon belül körözve nyerjenek magasságot, majd a termikek között kitárt szárnyakkal siklórepülésben tegyenek meg nagyobb távolságokat. Az MTA–ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoportban egyebek mellett ezt a jelenséget tanulmányozzuk, és a madarak termikelő viselkedéséből megismert törvényszerűségeket használjuk fel önvezérlő, fedélzeti állatfelismerő siklórepülő robot (drón) fejlesztéséhez. A következőkben ebbe a kutatásba szeretnénk betekintést nyújtani, a kutatás alkalmazásainak lehetőségeit is kiemelve. A madarak csoportos viselkedésének kutatása önmagában is érdekes. A környezet csoportos érzékelésével – mint ahogyan ezt termikelés közben is teszik – a madárcsoport egy összetett rendszerként működik, amely képes olyan feladatokat is ellátni, amelyeket az egyének önmagukban nem tudnának. Ennek a komplex problémának a megértése segít abban, hogy hatékony mesterséges rendszereket tervezzünk, amit a későbbiekben mutatunk be részletesebben.

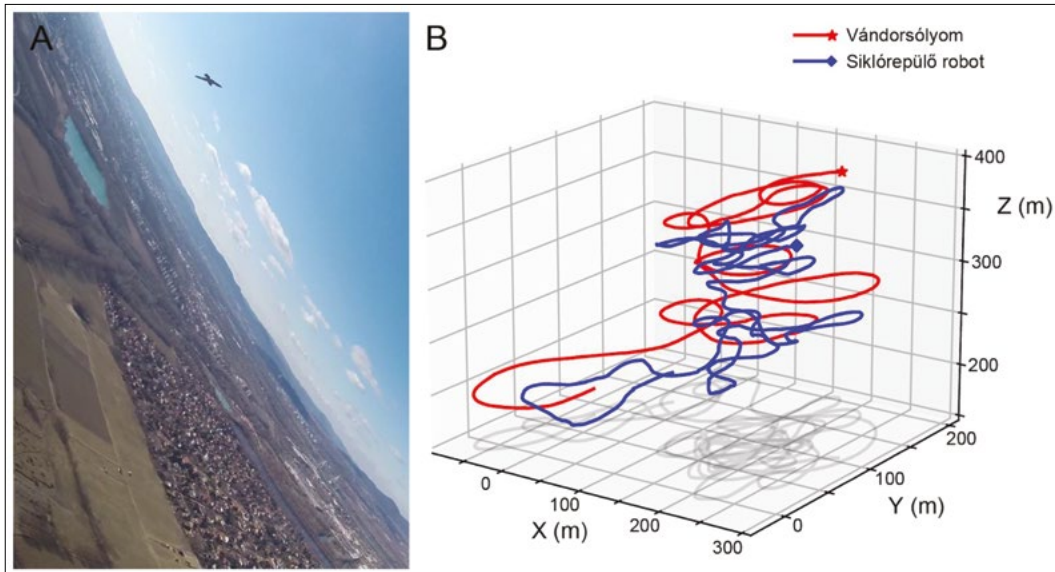
Mindemellett a vándormadarak kutatása fontos eredményeket tartogat, amik közvetve vagy közvetlenül hatással vannak a mi életünkre is. Vándorlásuk során távoli helyeket kötnek össze a Föld különböző pontjain, ezáltal egy globális hálózatot hoznak létre. Ez többek között betegségek terjedését is segítheti, ezért is fontos a rendszer pontos megismerése és megértése. A madarak nagyon érzékenyen reagálnak a környezeti változásokra, így az egészségi állapotuk és viselkedésük olyan globális környezeti változások fontos jelzői lehet, mint például a rendelkezésre álló táplálékforrások, a klímaváltozás vagy a környezeti szennyezések.

Kísérleti vizsgálatok – madarak és repülő robotok

A pilóta nélküli légijármű-rendszerek (UAV – unmanned aerial vehicle) fejlesztése során régóta próbálják az energiahatékonyságot növelni annak érdekében, hogy autonóm repülés közben hosszú ideig tudjon levegőben maradni a repülő. Az autonóm vitorlázó repülés alapját



(balról jobbra) Berekméri Evelin és Pedro Lacerda fizikus, Göksel Keskin biológus és Szarvas Zoltán informatikus a MTA–ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoport doktoranduszai, Nagy Máté fizikus a kutatócsoport vezetője. Palatitz Péter ornitológus, természetvédelmi szakember, szenior kutató. Nepusz Tamás mérnök-informatikus (nem kívánt képet közétetni) és Vásárhelyi Gábor mérnök-fizikus, szenior kutatók a CollMot Robotikai Kutató-fejlesztő Kft. társalapítói



1. ábra. Siklórepülő robot és vándorsólyom közös repülése. (A) A fedélzeti videófelvétel egy képkockája, amelyen látható a sikló drón és a vándorsólyom dőlésszöge termikelés közben. (B) A madár és a robotrepülő pályája GPS-adatok alapján, amely alapján nyomon követhető mennyire került közel a robotrepülő a madárhoz

a felszálló légáramlatok képezik. Ezeknek több formája van, a korábban említett – hőmérséklet-különbség hatására kialakuló – termikek mellett például a domborzati akadályba ütköző szél által okozott feláramlás. A kedvező feláramlások előfordulása a nap- és szélviszonyok talajformákra gyakorolt hatásától függ, tehát a felszálló régiók kihasználásának az egyik leghatékonyabb módja az, hogy a repülési útvonalakat a domborzat figyelembevételével tervezzük meg. A felszálló levegő függőleges sebességét hagyományosan variométerrel mérik.

A csoportos termikelés előnyeit mini-UAV-kkal is vizsgálták, és megállapították, hogy a termikek detektálása és a termik közepén való körözés egyszerűbb, ha csoportosan történik [1]. Egy másik vitorlázó repülési technikát, a tengeri madarak által használt dinamikus vitorlázást is, amellyel a különböző magasságú szelek előnyeit lehet kihasználni, sikeresen alkalmaztak pilóta nélküli vitorlázó járműveken, és ezzel megnövekedett repülési időt értek el [2]. Ezeket a fejlesztéseket figyelembe véve minden évben autonóm pilóta nélküli vitorlázórepülő-versenyeket rendeznek, amelyeken egyes modellek több órányi (akár 24 órát meghaladó) repülési időt is elértek már [3]. A GPS-adatokból kiolvasható, hogy a madarak hatékonyabban használják ki a termikeket a NASA által gyártott UAV-knál is [4] – bár ez egy gyorsan és folyamatosan fejlődő kutatási terület. A termikek keletkezési helyének megbecslését lehetővé tevő meteorológiai viszonyok és tájak előrejelzését fontos beépíteni a fedélzeti vezérlőrendszerbe annak érdekében, hogy egy előre telepített robotpilóta-rendszerrel hatékony repülési útvonalakat és pályát alakítsanak ki a hosszú repüléshez [5].

A madarak repülésének megértése a bioinspiráció egyik fontos fajtája. A vitorlázást többnyire kitárt, mereven tartott szárnyakkal hajtják végre a madarak, hasonlóan a merevszárnyú vitorlázó repülőgépekhez. A

távírányítású vitorlázó repülőgépekkel hosszan és csendesen lehet repülni. Kísérleteink során kereskedelmi célú vitorlázórepülő-modellkészletet választottunk, és fejlesztettünk tovább, hogy hosszabb és biztonságosabb repülést biztosítsunk, mely elbírja a saját kísérleti be rendezéseinket is: a manuális távírányításhoz szükséges kamerarendszert (FPV, mely segítségével a földi pilóta valós időben láthat úgy, mintha a drónban ülne), nagy felbontású kamerát az automatizált képfeldolgozáshoz és a mikroszámítógépet, amin az általunk fejlesztett önvezérlő rendszer fut (az utóbbiakról részletesen lásd később).

A siklórepülő robotunk egy solymászmadárként tartott vándorsólyommal (*Falco peregrinus*) repült együtt, mert ez a madár és robot alkotta hibrid rendszer lehetőséget teremt arra, hogy a madarak repülésirányítási döntéseit közvetlenül vizsgáljuk. Első körben fontos volt megbizonyosodni arról, hogy a madár nem reagál-e rosszul a hozzá közel repülő robotrepülőre. A próbarepülések során képzett pilóta vezette a robotrepülőt távírányítással, és nagy felbontású GPS-nyomkövetővel rögzítettük a drón és a madár mozgását. A teljes repülésről videót is rögzítettünk, melyet később automatizált objektumfelismerésre használtunk. A GPS-elemzés szerint (1. ábra) időnként akár 10 méteres távolságra is sikerült megközelíteni a drónnal a madarat, és még aktívan hajtott motorral (zajos üzemmódban) sem tapasztaltunk semmilyen negatív hatást a madár viselkedésében.

Automatizált objektumfelismerés mesterséges intelligencia alkalmazásával

Az objektumdetektálás egy olyan számítógépes látási módszer, amely vizuális felvételeken előre meghatáro-

zott objektumosztályokat azonosít és lokalizál a képkockán belül. Az elmúlt évtized fejlesztéseinek köszönhetően előtérbe került a mesterséges intelligencián alapuló objektumdetektálás, amely során neurális hálóval végezzük az objektumdetektálást, amelyet korábban az objektumokat körülhatároló „keret” pixelkoordinátáin tanítottunk sok-sok képkockán. Manapság már többféle neurálisháló-architektúra elérhető erre a célra nyilvánosan, több népszerű objektumosztályokon tanított súlyokkal együtt; így akár az úgynevezett transzfertanulás segítségével elegendő a számunkra érdekes objektumosztályokkal tanítani, kiegészíteni őket, nem kell az inicializálástól kezdve újratanítani a hálókat.

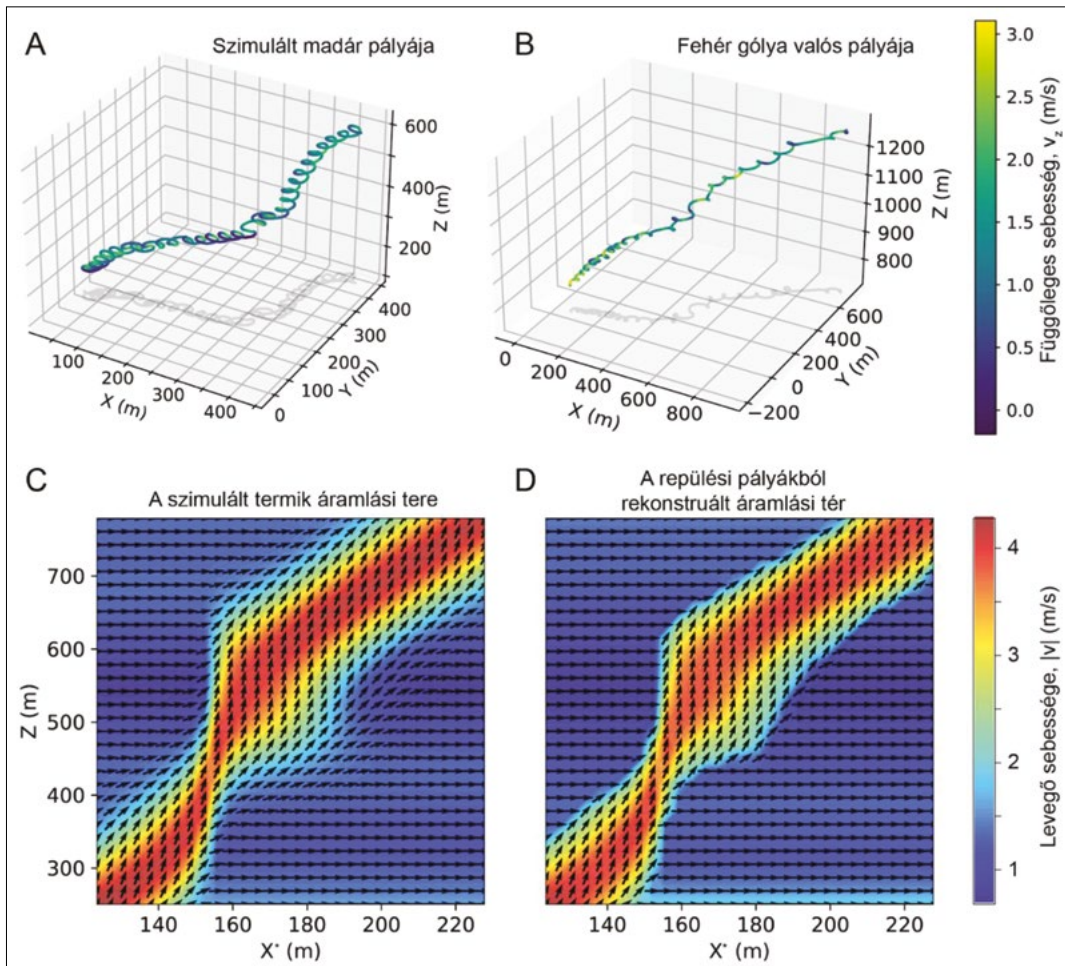
Az utóbbi évtizedek technikai fejlesztései révén mára a mindennapi élet részévé váltak a drónok, bár a távirányításos modellrepülésnek és a légifotók készítésének közel száz éves múltja van. A drónokra szerelhető kamerák egyszerre jelentettek minőségi és mennyiségi változást, és különböző területeket forradalmasítottak, hiszen például az ingatlangazdálkodás és a szórakoztatóipar mellett a tudományos kutatás [6] is hasznosítja a madártávlatból készült felvételeket. Drónok olyan helyekre is gyorsan eljuthatnak, amelyeket a szárazföldön nehéz lenne megközelíteni, és nem igényelnek fedélzeti jelenlétet, ezért alkalmazásuk számtalan lehetőséget tartogat. Többek között felgyorsíthatják a kereső- és mentőakciókat [7], szerepet játszhatnak a természetvédelmi területek megfigyelésében, az erdők, valamint az érintetlen helyek és fajállományuk felderítésében [8, 9], mezőgazdasági folyamatokat segíthetnek elő [10], de akár az emberek egyéni azonosítására is alkalmasak arcfelismerés alapján. Az így gyűjtött óriási adatmennyiség értelmezése idő- és energiaigényes, és emberi kiértékeléssel gyakran fel sem dolgozható. Ezért szükség van olyan technológiák kidolgozására, amelyek segítségével a „látottak” feldolgozása

akár valós időben történhet. A drónok gépi látásának valós idejű, azonnali objektumfelismerése egy olyan technológia, amely forradalmasítja és kibővíti a drónok tudományos és ipari hasznosítási lehetőségeit. A valós idejű feldolgozás azonnali reagálást tesz lehetővé, így a robotrepülő – vagy az ezekből összeálló automatizált raj – elkerülheti az esetleges összeütközéseket (madarakkal, fákkal, épületekkel, esetleg nem a saját csoporthoz tartozó más robotrepülőkkel stb.). A látásalapon vezérelt robotrepülők feladata lehet a kiválasztott objektum megkeresése, egy élőlény követése, esetleg szándékos terelése – mint például madár csapatok elriasztása nagy forgalmú repterek közeléből, vagy nagy testű vadon élő állatok távoltartása forgalmas autópályáktól és legelő- vagy egyéb mezőgazdasági területekről. Afrika emblematikus nagyvadjai gyakran esnek áldozatul efféle, az ember és a természetes élővilág közötti konfliktusoknak. Egy terület túllegelése is lehet olyan probléma, ami utána egy megszabadó, önerősítő folyamatot indít meg, és aztán elsivatagosodáshoz vezethet. A tudományos kutatás során a valós idejű, adaptív követés lehetőséget nyit arra, hogy egy kiválasztott egyedről vagy csoportról gyűjtünk hosszabb ideig adatokat és tanulmányozzuk a viselkedésüket. Az élőhelyeket, ökoszisztémákat sok szereplő viselkedése és a köztük lévő kapcsolatok alakítják ki [11], és az egyes elemek viselkedése, továbbá a rendszer egészének megértése csak az összes tag viselkedésének együttes mérésével valósítható meg. Ehhez elengedhetetlen automatizált módszerek használata.

A fentiekkel összhangban, kutatócsoportunkban a drónos objektumdetektálás fejlesztésén és implementálásán dolgozunk, elsősorban madarakra és személyekre szabva; úgy offline módon, mint valós időben, a fedélzeten. Utóbbit drónra szerelhető mikroszámítógépek segítségével oldjuk meg. A 2. ábrán egy vándormadár-



2. ábra. Madarak helyzetének meghatározása egy drónfelvételen mélytanuláson alapuló objektumfelismeréssel. A bal oldalon az eredeti kép látható, míg a jobb oldalon keretek mutatják a felismert madarakat



3. ábra. Szimulált és valós repülési pályák segítségével visszafejthető a repülő (madár vagy robot) viselkedése és a levegő komplex áramlási tere is. (A) Példa egy mesterséges madár szimulált röppályájára. A szín a függőleges irányú GPS-sebességet jelzi. A színekódolás megegyezik a B panellel. (B) Egy vadon élő gólya rögzített GPS-nyomvonala (adatok a [12]-ből). (C) A szimulált légsebességmező, melyet különböző magasságokban eltérő irányú és erősségű szél és egy normál eloszlású függőleges sebességprofilú, 4 m/s-os maximumú és 30 m sugarú termik összehatásaként hoztunk létre. A vízszintes tengelyt a termik fő vízszintes irányú sodródása mentén jelenítettük meg, a függőleges tengely a magasságot, a szín a levegő sebességét mutatja (megegyezően a D panellel). Nyilak jelzik a levegő áramlási irányát. (D) A visszafejtés után kapott becsült légsebesség. Az algoritmus a termiknek csak azon pontjaiban szolgáltat eredményt, ahol a madarak repültek

gyülekezőhely drónos felvételeinek offline feldolgozása látható, ahogyan a betanított hálónk több száz madarat detektál.

A szimuláció és a mérési adatok feldolgozása mint a termik szerkezetét és dinamikáját feltáró módszer

A termikelő madarak repülésének tanulmányozásával (a madarak viselkedésén túl) a termik működését – áramlási és fizikai törvényszerűségeit – is megérthetjük. Ezáltal olyan eszközöket fejleszthetünk, amelyek képesek a termikeket detektálni és hatékonyan hasznosítani.

A termik áramlási terének megértése, összetettsége miatt kihívást jelentő feladat, de számos madárfajnak

sikerült megbirkóznia ezzel a kihívással. A madaraknak a siker érdekében folyamatosan módosítaniuk kell a repülési útvonalukat, hogy a termik olyan részein maradjanak, ahol lehetőleg minél nagyobb magasságnövekedést érhetnek el. Gyakran csoportosan, rajban repülve néznek szembe ezzel a kihívással: más madarak jelenléte és viselkedése a termikben tájékoztathatja az egyes egyedeket arról, hogy mi történik a termik távolabbi pontjain. A vadon repülő madárrajok (például golyák vagy keselyűk) esetén nyomkövető jeladó segítségével mérhetjük meg a pontos térbeli koordinátáikat és sebességüket a globális helymeghatározó rendszer (GPS) segítségével. A mért sebességeket két részre bonthatjuk: a madarak levegőhöz viszonyított sebessége és a levegő földhöz viszonyított sebessége. Az előbbi a madarak viselkedéséről szolgáltat értékes információt, míg az utóbbi a levegő komplex mozgását tartalmazza, amelyben repülnek. Ez a felbontás azonban korántsem magától értetődő.

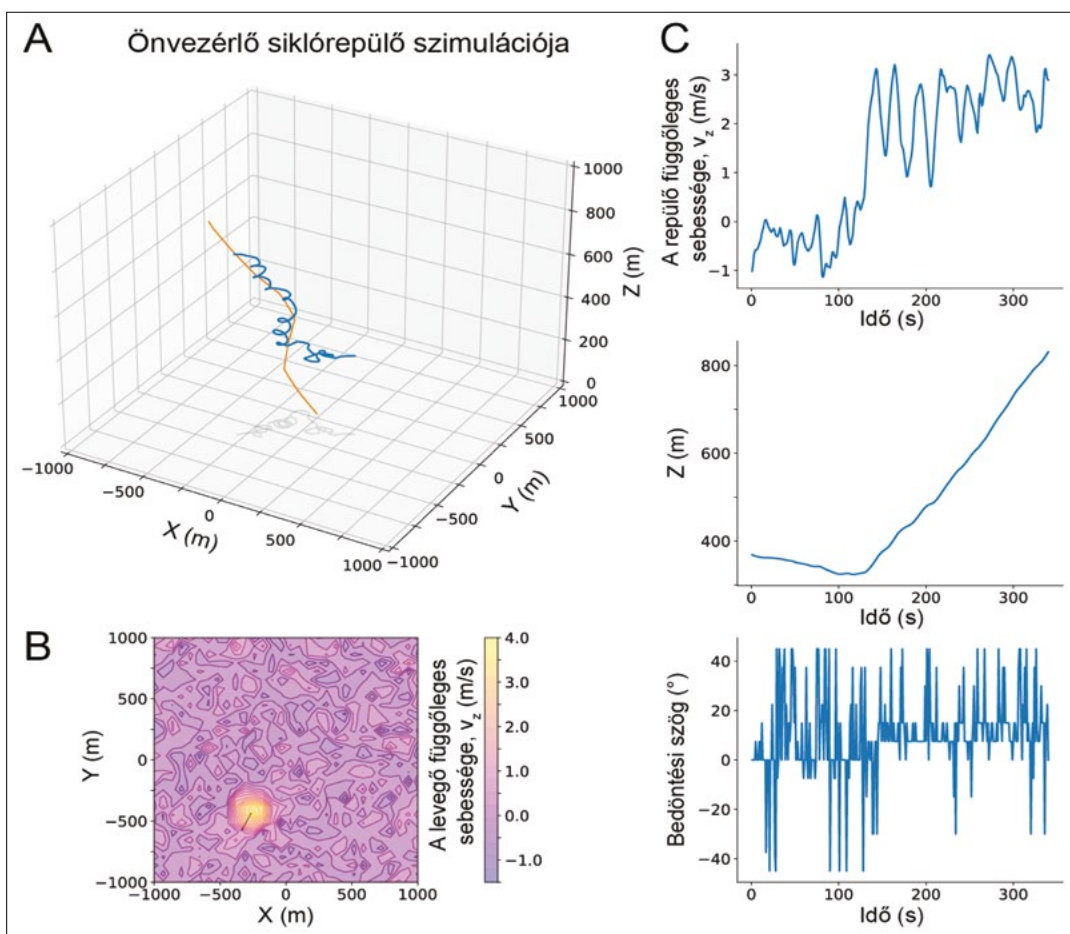
A felbontás vizsgálatára először mesterséges adathalmazokat hoztunk létre: általunk, tetszőlegesen definiált légáramlatokban szimuláltuk, hogy hogyan repülhetnének „mesterséges madarak”. A szimuláció segítségével különféle áramlási tereket állíthatunk elő: a legegyszerűbb lehetőségtől, mely pusztán állandó szél- és állandó feláramlási sebességeket tartalmaz, a részletes és valósághű, sztochasztikus, idő- és magasságfüggő szélsebesség-profilokat és összetett, turbulens termikeket tartalmazó lehetőségig. A röppályák létrehozása érdekében minden mesterséges madárhoz egy sor egyedileg meghatározott paramétert rendelünk, amelyek leírják a madár aerodinamikáját (például a szárnyterhelést) és repülési viselkedését (például mi alapján határozza meg a saját repülését).

A sebességkomponensek felbontásához a röppályák geometriájának figyelembevételével aerodinamikai modellezést alkalmazunk. Egy többszörös iterációs folyamat során egyidejűleg közelítjük a levegő áramlási terét és ebben a madarak mozgását jellemző paramétereket.

Az újonnan felbontott sebességek segítségével tanulmányozhatóak azok a döntések, amelyeket a vitorlázó madarak a környezetük előzetes ismeretében egyénileg (vagy akár rajban) hoznak meg. Ezek az eredmények a madarak viselkedésének megértésén túl az önvezérlő robotpilóta fejlesztésének alapjául is szolgálhatnak. Továbbá ez a felbontás lehetővé teszi, hogy reális szimulációs környezeteket hozzunk létre, ahol más madarak vagy repülő robotok viselkedése szimulálható, és így a madarakhoz hasonló egyéni és kooperatív technikákat is fejleszthetünk.

Önvezérlő robotpilóta fejlesztése mesterséges intelligencia alkalmazásával

A valósághű termik szimulációja lehetőséget biztosít, hogy önvezérlő robotrepülőt taníthassunk és tesztelhessünk biztonságos környezetben, akár sok ezer órát „repülve”, hogy aztán a valós repülések során már csak a



4. ábra. Önvezérlő siklórepülő tanítása realizisztikus komplexitású szimulációs környezetben. (A) Az algoritmus által irányított szimulált siklórepülő mozgása (kékekkel jelölve) a tanulás során. A széllel sodródó termik fő tengelyét a narancssárga vonal jelöli három dimenzióban. (B) Felülnézetből látható a repülőgép aktuális pozíciója, valamint a levegő feláramlási sebessége, amelyet a színskála jelöl. A sárgás folt középpontja a termik magja, és a termikelés annál hatékonyabb, minél közelebb tud körözni a siklórepülő a maghoz úgy, hogy közben a nagy bedöntés miatti merülősebesség még ne legyen túl nagy anélkül, hogy a fokozott dőlésszög okozta nagyobb merülősebesség miatt jelentős magasságot áldozna erre. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a levegő függőleges sebessége a termiken kívül sem homogén a szimulált turbulencia miatt. (C) A három grafikon fentről lefelé mutatja a siklórepülő pillanatnyi függőleges irányú sebességének, magasságának és az aktuális bedöntési szögének alakulását a repülés során

szimulációban megszerzett tudást kelljen finomhangolni. Az önvezető siklórepülő robotpilóta algoritmusának fejlesztése során a mesterséges intelligencia kutatásának legújabb vívmányait alkalmazzuk. A megerősítéses tanulás (reinforcement learning) segítségével több millió lépés során „megtaníthatjuk” a robotpilótának, hogy hogyan használja hatékonyan a termikeket. Valójában a tanulás során a robotpilóta maga „kísérletezi ki”, hogy milyen stratégia szerint érdemes repülnie. A tanítás során pusztán annyit csinálunk, hogy ha az önvezérelt repülőgépnél sikerül magasságot nyernie, akkor ezt bizonyos pontszámmal (jutalom, reward) jutalmazzuk. Az algoritmus célja, hogy ezt a pontszámot maximalizálja. A robotpilóta minden időpillanatban megkapja az eddigi repülésének szenzoradatait (visszamenőlegesen egy 30 másodperces ablakban). Ez szolgáltatja a memóriáját. A memóriában tárolt szenzoradatok között vannak a relatív mozgás adatai, a földhöz viszonyított sebesség és a repülőgép orientációja. Ezen szenzoradatok alapján kell a gépnek döntést hoznia, hogy egyenesen repüljön-e, vagy forduljon, és ha igen, akkor milyen mértékben ahhoz, hogy „meg tudja fogni” a termiket, és kiemelkedjen a segítségével. A forduláshoz a repülőgép hossz tengelye körüli elfordulást – a bedöntési szöget – szabályozza az algoritmus.

A döntési folyamathoz az algoritmus egy olyan gépi tanulással (machine learning) tanított modellt használ, melynek alapja a figyelmi mechanizmus (attention mechanism). A figyelmi mechanizmus segítségével a modell minden döntéshez a memóriában tárolt adatok más és más időpillanatára fókuszál. Ezáltal meg tudja határozni, hogy mi a fontosabb, és mi kevésbé fontos az adott döntés szempontjából. Például, ha a modell látja, hogy 10 másodperccel ezelőtt még emelkedett, de azóta elvesztette a termiket, akkor képes korrigálni a megfelelő irányba, hogy újra a termik felé repüljön. Hasonló figyelmi mechanizmus segítségével sikerült elérni a ChatGPT sikerét is.

A tanítás során változatos, szimulált szél-, turbulencia- és termikerősségű szituációkba helyezük a siklórepülőt – ezzel segítve, hogy a megtanult viselkedés minél általánosabb legyen; azaz minél több szituációban tudjon a termikek kihasználásához szükséges jó döntést hozni (generalization). A tanítás elején az algoritmus még inkább csak megpróbálja „felfedezni”, hogy az aktuálisan a memóriájában lévő egyes szenzoradatokhoz a választott kormánymozdulatoknak rövid és hosszú távon milyen következményei lesznek, és milyen viselkedés maximalizálja a pontszámot. Ezt hívjuk felfedezési szakasznak (exploration), majd ahogy az algoritmus már egyre jobban ki tudja használni a légáramlatokat, egyre kevesebbet kísérletez, találgat, hanem inkább egyre több időt fordít a termik lehetőségeinek „kiaknázására” (exploitation szakasz). A tanítás addig folyik, amíg az új és új szimulációk javítani tudják a teljesítményt, amíg az algoritmus magasabb pontszámot tud elérni, mint az előző verziói.

Összességében az automatizált, fedélzeti objektum- (állat-) felismeréssel rendelkező önvezérlő siklódrón megvalósításához több szerteágazó kutatás-fejlesztési irányban kell egyszerre haladnunk. Viszont a fejlesztés megvalósulása számos alkalmazási lehetőséget kínál a tudomány és az ipari felhasználások terén egyaránt. A fejlesztés során számos önmagában is kiemelten érdekes tudományos eredményhez juthatunk; mint például a termikek szerkezetének feltérképezése, illetve a madarak csoportos viselkedésének megértése. Az itt bemutatott kutatás egyúttal számos további fejlesztési lehetőséget tartogat magában a jövőre nézve. Például a madarak termikelő viselkedésének automatizált azonosításával a robotrepülő képes lehet a termikek távolból való felismerésére.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a vándorsólyommal való kísérleti repítésekben való közreműködésért Pataki Felícia, Pataki Zsolt és Puskás László solymászoknak.

Irodalom

- Hanson C. E. (2008): Cooperative autonomous thermal soaring for small uninhabited aerial vehicles. ProQuest. 29.
- Edwards D. J., Silberberg L. M. (2010): Autonomous soaring: The Montague cross-country challenge. *Journal of Aircraft* 47(5), 1763–1769. <https://doi.org/10.2514/1.C000287>
- Ákos Z., Nagy M., Leven S., Vicsek T. (2010): Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(4), 045003. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/4/045003>
- Irvine R., Innes F., Brown A., Vosper S., Rooney G., Devenish B., Hook M., Sparks E. (2007): Autonomous soaring project phase 2. In: 2nd SEAS DTC Technical Conference 33.
- Pogorzelski G., Silvestre F. J. (2019): Autonomous soaring using a simplified MPC approach. *The Aeronautical Journal*, 123(1268), 1666–1700. <https://doi.org/10.1017/aer.2019.6>
- Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. (2012): Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research. Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. (2011): Development of an UAV for search & rescue applications. *IEEE Africon '11*. IEEE. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/africon.2011.6072032>
- Laliberte A. (2009): Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033542. <https://doi.org/10.1117/1.3216822>
- Torresan C., Berton A., Carotenuto F., Di Gennaro S. F., Gioli B., Matese A., et al., Wallace L. (2016): Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Mogili U. R., Deepak B. B. V. L. (2018): Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>
- Hawes C. (2009): *Essentials of Ecology*. 3rd edition. By C. R. Townsend, M. Begon and J. L. Harper. Oxford: Blackwell Publishing (2008). ISBN 978-1-4051-5658-5. *Experimental Agriculture*, 45(1), 128–128. <https://doi.org/10.1017/s001447970800714x>
- Flack A., Nagy M., Fiedler W., Couzin I. D., Wikelski M. (2018): From local collective behavior to global migratory patterns in white storks. *Science*, 360(6391), 911–914. <https://doi.org/10.1126/science.aap7781>

KÖZEPES FELBONTÁSÚ CSILLAGSPEKTRUMOK ZAJSZŰRÉSE NEURÁLIS HÁLÓZATOKKAL*

Pál Balázs^{1,2,*}, Dobos László³

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék, Budapest

²Wigner Fizikai Kutatóközpont, Nehézion-fizikai Kutatócsoport, Budapest

³Department of Physics & Astronomy, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA

*E-mail: pal.balazs@ttk.elte.hu

1. Bevezetés

A galaktikus archeológia (GA) a kozmológia és asztrofizika határmezsgyéjén fekvő terület, melynek célja feltárni a galaxisok fejlődése és a bennük található csillagok tulajdonságai közötti kapcsolatot. Egy galaxis és környezetének egyedi kémiai és dinamikai fejlődése markáns nyomokat hagy hátra csillagainak kémiai összetételében és kinematikai tulajdonságaiban. A Tejútban és kísérőgalaxisaiban, valamint a Lokális Csoport galaxisaiban található csillagok minél nagyobb hányadának spektroszkópiai megfigyelése és elemzése közelebb juttat minket ahhoz, hogy megértsük a Tejút csillagkeletkezési történetét és dinamikai fejlődésének folyamatát. A dinamikai karakterisztikák feltérképezése révén megismerhetjük a sötét anyag kis skálás jellemzőit és a barionikus anyaggal való korai időkben történt kölcsönhatását, fényt derítve az utóbbi kozmológiai kontextusára is.

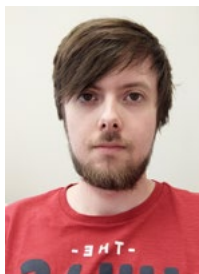
A GA mai egyik legfontosabb eszköze az alacsony és közepes felbontású csillagspektroszkópia, melyet nagy tükrőátmérőjű és egyben nagy látószögű távcsövekre épített üvegszál-aspektrográfokkal végzünk. Ezek a spektrográfok olyan eszközök, melyek a távcső látómezőjébe eső objektumok közül több ezer spektrumát is képesek egyidejűleg rögzíteni azáltal, hogy a célobjektumok fényét üvegszálak segítségével vezetik a spektrográfokba. A távcső fókuszsíkjaiban az üvegszálak pozicionálását precíz robotok végzik, melyek mikron pontossággal képesek a szálakat a megfigyelni kívánt csillagokhoz igazítani. Az olyan modern eszközök, mint a Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) vagy a Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS) a vörösóriás-ág csillagainak vizsgálatára akár az Androméda-galaxis távolságában is

alkalmasak, de a Tejút külső tartományaiiban a fősorozati csillagok megfigyelésére is képesek.

Még a legnagyobb távcsövek esetében is probléma, hogy a megfigyelendő csillagok igen halványak, ezért még a viszonylag alacsony spektrális felbontású észlelések is rendkívül hosszú, több órás expozíciós időt igényelnek. Emiatt olyan spektrumfeldolgozó algoritmusokra van szükség, melyek alacsony jel-zaj viszony mellett is képesek a fizikai paraméterek megbízható mérésére. Gyakori probléma az is, hogy a célobjektumok kiválasztásakor a megfigyelendő objektumok távolsága nem feltétlenül ismert, ezért például a kísérőgalaxisokban található vörös óriások helyett a Tejútban található azonos színű, de halvány fősorozati csillagok is bekerülhetnek a mintába. Ha ezeket az objektumokat már a megfigyelés során, viszonylag rövid expozíciós idővel készült, alacsony jel-zaj arányú spektrumokból is azonosítani tudnánk, úgy az üvegszálakat akár a megfigyelések közben is át lehetne pozicionálni más, ígéretesebb célpontokra, amivel a távcsőidő jobb kihasználását is elősegíthetnénk. Ennek a technikai megvalósítása már ma is lehetséges lenne a Subaru PFS optikaiszál-pozicionáló rendszerével, mely a fókusz síkban a szálakat egyesével, nagy pontossággal képes pozicionálni. Az alacsony jel-zaj arányú spektrumok automatikus osztályozásában nagy segítséget nyújthatnak a zajszűrésre kifejlesztett neurális hálózatok.

Ebben a tanulmányban azt vizsgáltuk meg, hogy a mély neurális hálózatok, az ún. zajszűrő autoencoderek (angolul *denoising autoencoder*, DAE) képesek-e kinyerni különböző jel-zaj arányú spektroszkópiai megfigyelésekből a zaj alatt rejlő tiszta csillagspektrumokat. Bár a DAE-k betanítása nagy számítási kapacitást és hosszú tanítási időt igényel, egy jól betanított neurális hálózat segítségével néhány ezredmásodperc alatt zajtalanítható

* Balázs Pál, László Dobos (2024): Denoising medium resolution stellar spectra with neural networks. <https://arxiv.org/abs/2409.11625>



Pál Balázs, az Eötvös Loránd Tudományegyetem doktoranduszhallgatója és a Kooperatív Doktori Program keretében a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos segédmunkatársa. Kutatási területe a számítógépes simulációk és a modern adatfeldolgozási módszerek alkalmazása elsősorban a kozmológia terén.



Dobos László, 2011-ben szerezte meg doktori fokozatát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. 2012 és 2019 között az ELTE oktatója, 2019 és 2024 között a Johns Hopkins Egyetem kutatója volt. Főbb kutatási területei a galaxisok és csillagpopulációk evolúciója, valamint nagy tudományos adatbázisok és gépi tanulási módszerek alkalmazása a csillagászatban.

egy megfigyelés. Emiatt a DAE-k az észlelések közben, akár már a detektorok kiolvasása során is alkalmazhatók lehetnek. A hagyományos spektrumfeldolgozási módszerek kiegészítéseként a DAE-k segíthetnek például a legjobban illeszkedő szintetikus spektrumok megtalálásában úgy, hogy optimális kezdőfeltételeket adhatnak a sablonillesztési algoritmusok iterációs lépéseihez, nagyban csökkentve az iteratív sablonillesztéshez szükséges számítási időt.

A cikkben felvázolt DAE modellünket egy 100000 szintetikus adatpontból álló adathalmazon tanítottuk, melyben szimulált, változó légköri paraméterekkel és különböző jel-zaj aránnyal rendelkező csillagspektrumok szerepeltek. A tanítás során a neurális hálózat bemenetére zajos spektrumokat adtunk, miközben azt követeltük meg, hogy a kimenet minél jobban megegyezzen a zaj nélküli szintetikus spektrummal.

2. Encoder–Decoder felépítésű neurális hálózatok

Az ún. *autoencoderek* [1] olyan előrecsatolt neurális hálózatok, amelyek nagyszámú bemenettel és kimenettel rendelkeznek, és a feladatuk a bemenetek kódolása, majd a kódolt információk dekódolása és az eredeti bemenetek rekonstrukciója a kód [2] alapján. Az autoencodereket megvalósító hálózatok ezért többnyire homokóra alakúak, ahol a bemenet után a rejtett rétegek neuronjainak száma csökken, majd a kimenet felé újra elkezdi növekedni. A hálózat középső szűk, ún. látens rétege csak kis számú neuronból áll, amik a sokdimenziós bemenetet jóval alacsonyabb dimenzióban reprezentálják. Az AE első felét – a bemenetek és a látens réteg között –, ahol minden réteget egy egyre kisebb neuronszámú réteg követ, *kódoló blokknak* (encoder) nevezzük. A hálózatnak ez a komponense felelős azért, hogy a bemenetet a látens réteg neuronjaiba kódolja. Az encoder valójában egy dimenzióredukációs algoritmus szerepét tölti be, ami egy nemlineáris leképzéssel a bemenet információtartalmának tömörítését végzi. A tömörítés mértéke és vesztesége az információtartalomtól, a hálózati architektúrától és a hálózat betanítottságának jóségától függ. Az AE második fele a *dekódoló blokk* (decoder), ami topológiai alátámasztásban az encoder tükörképe, és a kimenet felé növekvő számú neuront tartalmazó rétegekből áll. Ennek célja megtanulni, hogyan kell a látens réteg tömörített reprezentációjából rekonstruálni az eredeti bemenetet. Ez a hálózati topológia természetesen nemcsak a bemenetek pontos lemásolására alkalmas, hanem betaníthatjuk különböző transzformációk elvégzésére is, melyek közül a zajszűrés egy lehetséges feladat.

A DAE-k koncepciójukban nagyon hasonlóan a hagyományos AE-khez, de a tanítási céljuk eltérő [3]. Az AE-k súlyainak tanítása úgy történik, hogy a hálózatnak a bemeneti adatokat a kimenetére olyan pontosan kell lemásolnia, amilyen pontosan arra csak képes. Ez-

zel szemben a DAE-kat úgy tanítják, hogy a hálózatnak zajmentes vagy legalábbis kevésbé zajos kimenetet kell produkálnia egy zajos bemenetből. A DAE-k elsődleges célja a zaj lehető legnagyobb mértékű kiküszöbölése, nem pedig a bemenet tömörített reprezentációba történő leképezése – mint a hagyományos AE-k esetében –, így a DAE-k architektúrája nem feltétlenül követi a fent már említett homokóra alakot, és a látens rétegek általában több neuront tartalmaznak, mint az AE-k esetében.

A DAE zajszűrő képességéért elsősorban a látens rétegen keresztüli alacsony információáramlás felelős. Ha egy encoder blokk képes megfelelően megtanulni a tanítóhalmaz jeleiben szereplő zajnak és az alatta található „tisztá” (zajmentes) adatoknak a karakterisztikáit, akkor rákényszeríthető arra is, hogy a látens rétegben már kizárólag a zajmentes jelek reprezentációját kódolja le, amiből aztán a decoder már a tiszta jelet tudja rekonstruálni.

3. Szintetikus csillagspektrumok

A tanulmányunkban használt DAE tanításához nagyszámú szintetikus spektroszkópiai megfigyelést szimuláltunk le. Az elsődleges célunk az volt, hogy minél nagyobb tartományban lefedjük a Subaru PFS műszerével megfigyelendő objektumok fizikai jellemzőit, valamint minél általánosabban modellezzük a műszer karakterisztikáit és a megfigyelést befolyásoló környezeti paraméterek hatásait.

A csillagspektrumok szimulációját két lépésben végeztük. Az első lépésben egy rácson interpoláltuk a nagy felbontású szintetikus csillagspektrumokat a véletlenszerűen választott fundamentális paraméterekhez (fém-tartalom, effektív hőmérséklet és felszíni gravitáció). Ehhez a BOSZ [4] szintetikus csillagspektrum-rácsból [5] (spektrumkönyvtárból) indulunk ki. Második lépésben az összes olyan megfigyelési és műszeres jelenséget szimuláltuk, amely a csillag fényét a kibocsátás és a műszer általi észlelés között befolyásolja. Ezek közé tartozik a Doppler-eltolódás, csillagközi extinkció, légköri abszorpció és emisszió, a seeing miatti fényvesztés az üvegszál apertúráján, a távcső, az üvegszálak, valamint a spektrográf optikai elemeinek hullámhosszfüggő transzmissziója, illetve a spektrográf kameráján belüli fényterülési és fényszóródási effektusok. A szimulációkat saját programmal futtatuk, mely részben a Subaru PFS spektrográfjához készült expozíciós-idő kalkulátoron [6] alapul. A szimulációval meghatározott fotonszámok alapján és a detektor egyéb karakterisztikáit figyelembe véve meghatároztuk a pixelenkénti jel-zaj arányt, illetve a pixelbe eső fluxus varianciáját. A hálózat tanítása során az így kiszámított variancia szerint generáltunk zajt a szintetikus spektrumokra.

A spektrumokat úgy szimuláltuk, mintha a Subaru PFS közepes (tehát $\approx 1,6 \text{ \AA}$) felbontású üzemmódjához nagyon hasonló műszerrel figyeltük volna meg őket [7]. Ezt a műszert kifejezetten a galaktikus archeológia témakörében végzett kutatásokra tervezték. Az építéskor

az azzal lefedhető hullámhossz-tartományt célirányosan úgy választották meg, hogy olyan spektrális vonalakat lehessen vele észlelni, amelyek a lehető legtöbb információt hordozzák a csillagok kémiai összetételéről és radiális sebességéről.

A tanítóhalmaz generálásakor a szimulált csillagok fizikai paramétereinek tartományát úgy választottuk meg, hogy azok lefedjék a G-től M-ig terjedő csillagtípusokat valamennyi fémtartalom- és luminozitástartományban. Ezek az intervallumok némileg eltérnek a galaktikus archeológia tipikus célobjektumainak paramétereitől, hiszen a galaktikus archeológia többnyire F és G színképosztályú fémszegény óriáscsillagokra fókuszál. Az átfogóbb fémségtartományt és az alacsonyabb hőmérsékleti tartományt azért céloztuk meg, mert a fémekben gazdagabb, alacsonyabb hőmérsékletű csillagspektrumok olyan abszorpciós jellemzőket mutatnak, melyek miatt a zajszűrés feladat nagyobb kihívást jelent, és a neurális hálózat spektrális jellemzők megtanulására vonatkozó képességeit is jobban próbára tesszük.

4. Egy zajszűrő neurális hálózat tanítása

A neurális hálózat tanítása során több adatbővítő (*data augmentation*) transzformációt is alkalmaztunk a szimulált spektrumokra, melyek célja a hálózat túltanításának elkerülése, valamint a hálózat robusztusságának növelése volt. Az adott transzformációtól függően ezeket mind a hálózat bemenetén, mind a kimenetén (a veszteségfüggvény számítása előtt), vagy csak a hálózat bemenetén alkalmaztuk. Ezek a transzformációk a következők voltak:

1. A pixelenként független fotonzaj egy véletlenszerű realizációja a fluxus korábban kiszámolt szórása alapján, majd hozzáadása a bemeneti spektrumhoz. A kimenetet zajmentesen tartjuk. Ez az elsődleges zajkomponens, amit a szintetikus tiszta spektrumokhoz hozzáadunk.
2. A spektrofotometriai kalibráció hibáját szimuláló, hullámhosszban erősen korrelált hiba egy véletlenszerű realizációjának generálása, majd mind a bemeneti, mind a kimeneti spektrum megszorítása vele. A zajszűrő autoencoderünk így nem csupán a megfigyelési zaj kiszűrésére, hanem a fluxuskalibráció esetleges szisztematikus hibáinak áthidalására is megtanítható.
3. Egy véletlenszerű eltolás (additív tag) és skálázás (multiplikatív tag) alkalmazása, az előbbi az $\mathcal{N}(0, 0,01)$, míg az utóbbit az $\mathcal{N}(1, 1,01)$ normál eloszlásból húzva. Ez valójában a legáltalánosabb és legalapvetőbb adatbővítő technika, ahol kis Gauss-eloszlás szerinti véletlenszerű eltolásokat és skálázásokat adunk az adatokhoz.

Ezeket a véletlenszerű transzformációkat minden egyes tanítási epocha elején újrageneráltuk. Így, habár a hálózat minden tanítási epochában ugyanazon az el-

méleti spektrumokból álló tanítóhalmazon haladt végig, azokat minden egyes epochában más-más zajjal kiegészítve láthatja.

A zajszűrő autoencoder megvalósításához egy viszonylag sekély, homokóra alakú, teljesen összekapcsolt hálózatot tanítottunk be, ahol a neurális hálózat paramétereinek optimalizálásához egy egyszerű, sztochasztikus gradiensmódszert (SGD) [8] használtunk. Az SGD egy iteratív módszer, amelynek célja a veszteségfüggvény minimalizálása a modell súlyainak frissítésével a veszteség súlyokhoz viszonyított gradiense alapján. Habár léteznek kifinomultabb optimalizálási módszerek, azért döntöttünk mégis az SGD használata mellett, hogy megőrizzük a tanítási folyamat egyszerűségét és ellenőrizhetőségét, amelyet csak egy adaptív tanítási ütemezővel akartunk irányítani. Ez a gyakorlatban annyit jelentett, hogy a tanítás során adaptívan csökkentettük a sztochasztikus gradiens lépésközét (*learning rate*); amikor a modell egy előre meghatározott számú epocha alatt nem javult tovább, a lépésközüket megfeleztük.

A hálózatunk súlyait a korábban ismertetett sztochasztikus gradiensmódszer segítségével optimalizáltuk. A tanítási folyamat során a gradienst minden egyes lépésnél úgy értékeltük ki, hogy a hálózat bemenetére egy zajos spektrumot adtunk be, míg a kimeneten egy zajmentes spektrumot vártunk eredményül. A bemenetre adott spektrumok zajmentes változata is rendelkezésünkre állt, így a veszteségfüggvényt egyszerűen a hálózat kimenetének és a bemenethez tartozó zajmentes spektrumoknak az átlagos négyzetes hibájaként tudtuk definiálni:

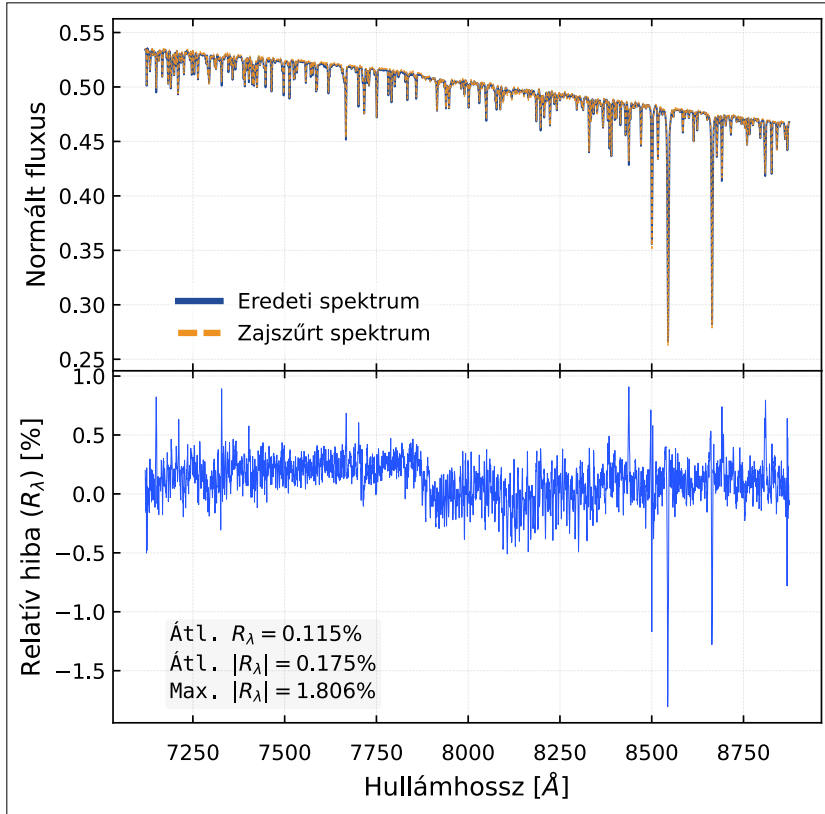
$$\mathcal{L} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^N (D_{\lambda}[\hat{F}_{\lambda}] - F_{\lambda})^2}, \quad (1)$$

ahol N a spektrális pixelek száma, D_{λ} a zajszűrő hálózatot jelölő vektorértékű függvény, $\hat{F}_{\lambda}$ a bemeneti zajos spektrum, és F_{λ} a hozzá tartozó elvárt kimeneti zajmentes spektrum.

5. Analízis és eredmények

A betanított zajszűrő autoencoder modellünket két eltérő teszten értékeltük ki. Az első teszt során a modell zajszűrési képességét mértük a csillagok fundamentális fizikai paramétereinek függvényében, míg a második tesztben azt vizsgáltuk, hogy a modell mennyire jól képes maguknak a csillaglégköröknek a spektrumokban kódolt fizikáját megtanulni.

Példaként az 1. ábrán egy tipikus G típusú vörös óriás eredeti spektrumát és annak egy zajos szimulált megfigyelésből rekonstruált verzióját tüntetjük fel. Az ábra alsó paneljében ábrázoljuk a rekonstrukció relatív hibáját is, melyet az elvárt és a rekonstruált fluxus különbsége, valamint a zajmentes fluxus hányadosaként számítjuk ki



1. ábra. Az ábrán a zajszűrő autoencoderünk egy tipikus G típusú vörös óriásra vonatkozó eredményeit mutatjuk be. A felső panel az eredeti zajmentes szimulált csillagspektrumot hasonlítja össze a zajszűrő autoencoderünk által zajtalanított spektrummal, ami szinte teljes átfedést mutat, ezzel a modell nagyfokú pontosságát jelezve. Az alsó panel az eredeti és a zajmentesített spektrumok közötti relatív hibát mutatja, kiemelve, hogy a hibacsúcsok a mély abszorpciós vonalak hullámhosszain jelennek meg

minden egyes spektrális pixelben. Amint az várható, a hiba nagyobb az erős abszorpciós vonalak közepén, például a kalciumtriplett vonalaiban. Ennek egyik oka, hogy az abszorpciós spektrumokban a vonalak közepén a kisebb foton zaj eleve nagyobb hibát okoz, másrészt a csillagok színképeiben a vonalak jóval nagyobb variációt mutatnak, mint a kontinuumpixelék, így ezeket a hálózati decoderének nehezebb megtanulnia.

Ahhoz, hogy a hiba csillagparaméterektől való függését általánosan is áttekinthessük, az

$$E_\lambda = D_\lambda[\hat{F}_\lambda] - F_\lambda \quad (2)$$

abszolút hiba és az

$$R_\lambda = \frac{D_\lambda[\hat{F}_\lambda] - F_\lambda}{F_\lambda} \quad (3)$$

relatív hiba abszolút értékben vett pixelenkénti maximumát és a pixelekre vett átlagát is felrajzoljuk a pixelenként vett jel-zaj arány, valamint a releváns csillagparaméterek, tehát a T_{eff} effektív hőmérséklet, a $\log g$ csillagfelszíni gravitáció és a $[\text{Fe}/\text{H}]$ fémtartalom függvényében a 2. ábrán.

Nem meglepő módon, amint az az ábrán látható, a zajszűrés teljesítménye a spektrumok jel-zaj arányával skálázódik, de mind az abszolút hiba, mind a relatív hiba átlaga egy tizeden belül van a $10 < S/N < 120$ jel-zaj

arány tartományában. A hiba jelentős emelkedést mutat az alacsonyabb S/N értékek irányába, ami egyelőre korlátozza a hálózatunk alkalmazhatóságát a valóban zajos spektrumok esetében.

Ha a hibát a T_{eff} effektív hőmérséklet függvényében nézzük, akkor megfigyelhetjük, hogy a hiba nagysága csak kis mértékben függ a hőmérséklettől, kivéve a $T_{\text{eff}} < 3750$ K hőmérsékletű csillagokat, ahol a relatív hiba lényegesen nagyobb szórást mutat, mint máshol. Ez könnyen visszavezethető az M spektrális típusú csillagok optikai színképeinek bonyolultságára, ami az M típusú csillagok légkörében rendkívül erős molekuláris abszorpciónak köszönhető.

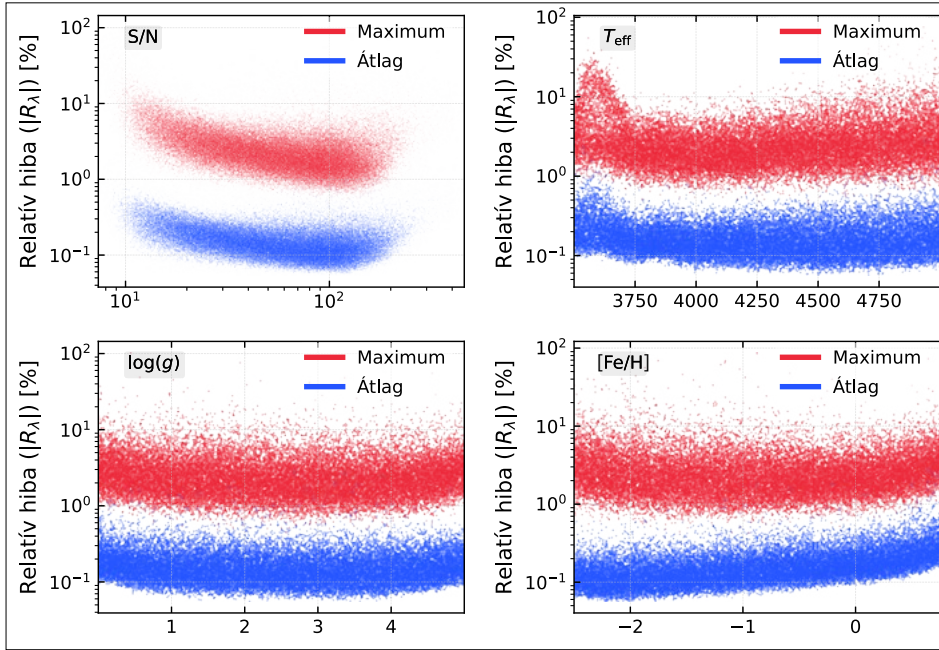
A hiba a $\log g$ csillagfelszíni gravitációtól csak gyengén függ. A validációs halmaz legszélsőségebb paraméterei felé haladva a relatív hiba átlaga megnő, ami a tipikusan elvárt viselkedés az azonos paramétertartományt lefedő adatsorokon tanított és validált hálózatok esetében.

A magasabb $[\text{Fe}/\text{H}]$ fémtartalomú csillagok színképeit a zajszűrő autoencoder hasonló módon nagyobb hibával rekonstruálja, ami nagy valószínűséggel a több és erősebb abszorpciós vonal jelenlétének köszönhető

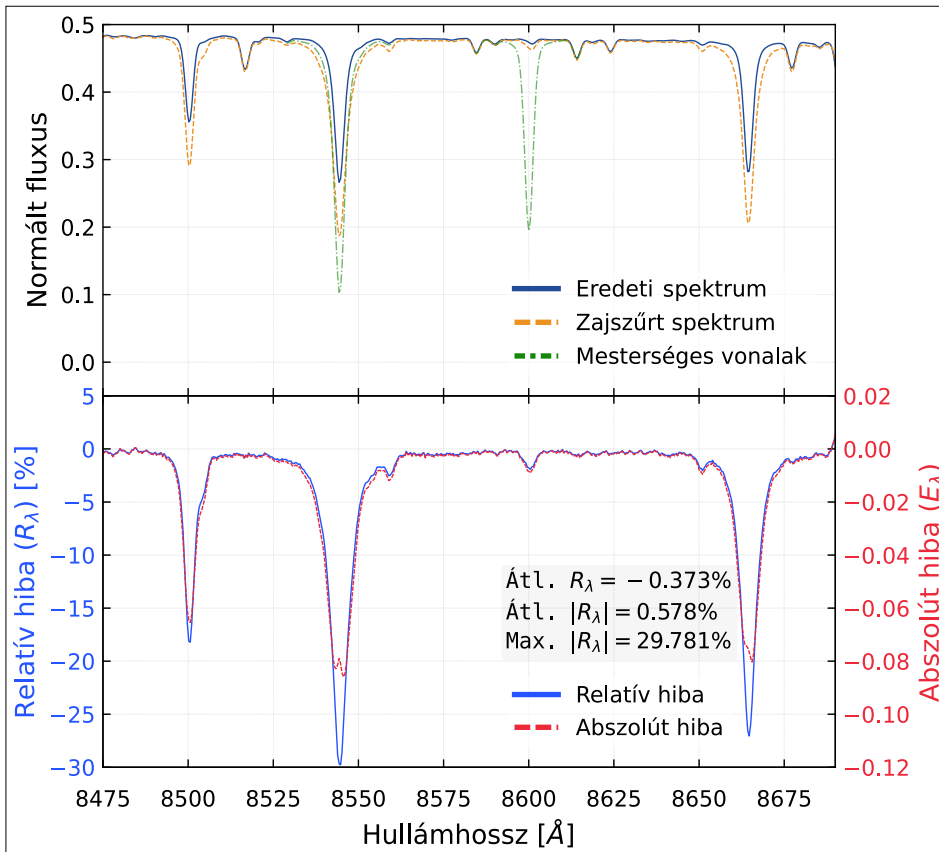
az ilyen csillagokban. Érdekes módon az átlagos relatív hiba meredekebben skálázódik a fémtartalommal, mint az átlagos abszolút hiba. Ez arra utal, hogy a rekonstrukciós hiba növekedéséért nem néhány hullámhossz, hanem nagy számú spektrális pixel felelős.

Az általunk vizsgált hálózat működéséről azt feltételezzük, hogy a zajszűrő autoencoder úgy működik, hogy az encoder blokk a bemenetből kinyeri a spektrumok a fizikai paraméterekkel valószínűleg szoros kapcsolatban levő leíróit. Ez tulajdonképpen a spektrumok egyfajta optimális beágyazása a látens térbe. A decoder blokk ezek után megtanulja, hogy miként hozzon létre szintetikus spektrumokat a látens tér változói alapján. Magyarán ahelyett, hogy a hálózat egyszerűen a bemenet valamiféle modellről független zajszűrését végezné el, megtanulja a spektrumok analíziséhez és szintéziséhez szükséges fizikát.

A hipotézisünk ellenőrzése végett olyan szimulált spektrumokon végeztük el a zajszűrést, melyekhez fizikailag nem valós, erős abszorpciós vonalakat adtunk. A mesterséges vonalakat a szokásos Voigt-profillal modelleztük, majd a spektrumokhoz a korábban ismertett módon zajt adtunk. Ezután feldolgoztuk a mesterséges vonalakkal kibővített spektrumokat a zajszűrő hálózatunkkal, amelyet csak valósághű szimulált spektrumok segítségével tanítottunk.



2. ábra. A zajszűrés relatív hibáinak pixelenkénti átlaga és maximuma a teljes validálási adathalmazra a releváns paraméterek függvényében, mint a jel-zaj arány (S/N), az effektív hőmérséklet (T_{eff}), a csillagfelszíni gravitáció ($\log g$) és a fémtartalom ($[Fe/H]$)



3. ábra. A felső panel egy zajmentes, mesterségesen behelyezett abszorpciós vonalakat tartalmazó, szimulált spektrumot hasonlít össze annak zajmentesített változatával. A két vonal egybeesése azt indikálja, hogy a zajszűrő hálózat viszonylag pontosan rekonstruálja az eredeti spektrumot, miközben figyelmen kívül hagyja a mesterséges vonalakat. Az alsó panel a zajszűrési folyamat relatív hibáját mutatja, kiemelve, hogy a zajszűrés nem képes rekonstruálni a mesterséges vonalakat. Az ábrán nem a teljes spektrum látható, hanem csak a kalciumtriplett vonalai vannak kiemelve

A 3. ábrán egy G típusú óriáscsillag spektrumának kalciumtriplett régióját ábrázoljuk az eredeti spektrumhoz manuálisan hozzáadott abszorpciós vonalakkal együtt. Ahogy az ábra zöld görbéje mutatja, a 8542 Å vonal mélységét megnöveltük, míg 8600 Å-nél egy teljesen új abszorpciós vonalat adtunk az eredeti spektrumhoz. Az ábra narancssárga színnel mutatja a zajmentesített spektrumot. Megállapítható, hogy a mesterségesen hozzáadott vonalak a fizikailag értelmes vonalak rekonstrukciójának hibáját a korábbi eredményekhez képest megnövelték, mely feltehetően annak köszönhető, hogy egy fontos fizikailag értelmes vonal mélységet jelentős mértékben mesterségesen megváltoztattuk. Ugyanakkor azt is érdemes megfigyelni, hogy azt a mesterséges vonalat, melyet fizikailag jelentéktelen 8600 Å-ös hullámhossznál adtunk a spektrumhoz, a zajszűrő hálózat teljesen eltávolította.

6. Következtetések

Megállapítottuk, hogy még az egyszerű neurális hálózatok, specifikusan a teljesen összekapcsolt rétegekből álló, szűk keresztmetszettel rendelkező zajszűrő autoencoderek (DAE-k) is képesek megtanulni a szimulált csillag-spektrum megfigyelések karakterisztikáit. Kimutattuk, hogy ez lehetővé teszi az autoencoderek számára, hogy hatékonyan zajmentesítsenek szimulált spektroszkópiai megfigyeléseket, ugyanakkor alkalmazhatóságuk kétségeket ébreszt abban az esetben, ha a tanításhoz használt csillagmodellek nem fedik a valóságot. A csillagok alapvető fizikai paramétereinek széles skáláján a zajszűrés százalékos pontossággal elvégezhető, még $S/N \approx 10$ érték mellett is.

A szimulált spektrumokhoz hozzáadott mesterséges abszorpciós vonalak segítségével sikerült bebizonyítanunk, hogy a DAE úgy működik, hogy a fizikai spektrumokat egy alacsony dimenziós látens térben reprezentálja, és ez alapján rekonstruálja a kimenetet helyett,

hogy a zaj eltávolítása a spektrumok lokális jellemzőinek valamilyen hatékony interpolációjával történne. Ennek következtében a zajszűrési képességek csak attól függenek, hogy az encoder blokk mennyire jól tudja leképezni a bemeneti zajos spektrumokat a hálózat látens terébe, valamint hogy a decoder blokk mennyire pontosan tudja a látens tér változóit zajmentes spektrumokká alakítani. A későbbiekben ez a felismerés segíthet olyan összetettebb topológiájú és nagyobb tanítóhalmazzal tanított modellek elkészítésében is, amelyek hasonlóan jól teljesítenek a zajosabb szimulációk és valós megfigyelések esetében is.

Irodalom

1. Kramer M. A. (1991): Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks. *AICHe Journal*, 37(2), 233–243. <https://doi.org/10.1002/aic.690370209>
2. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. (2006): Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 313(5786), 504–507.
3. Vincent P., Larochelle H., Bengio Y., Manzagol P.-A. (2008): Extracting and composing robust features with denoising autoencoders. In: *International Conference on Machine Learning*.
4. Bohlin R., Mészáros Sz., Fleming S. (2017 & 2024): The “BOSZ” Synthetic Stellar Spectral Library (“BOSZ”) – New 2024 Version + Legacy 2017 Version. <https://archive.stsci.edu/hlsp/bosz>
5. Bohlin R. C., Mészáros Sz., Fleming S. W., Gordon K. D., Koekemoer A. M., Kovács J. (2017): A new stellar atmosphere grid and comparisons with HST/STIS CALSPEC flux distributions. *The Astronomical Journal*, 153(5), 234.
6. Hirata C. M., Gehrels N., Kneib J.-P., Kruk J., Rhodes J., Wang Y., Zoubian J. (2012): The WFIRST galaxy survey exposure time calculator. *arXiv e-prints*, arXiv:1204.5151. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1204.5151>
7. Tamura N., et al. (2016): Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru telescope: Overview, recent progress, and future perspectives. In: C. J. Evans, L. Simard, H. Takami (eds), In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*. Vol. 9908 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. page 99081M.
8. Robbins H., Monro S. (1951): A stochastic approximation method. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(3), 400–407. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729586>

NEUROMORFIKUS SZÁMÍTÁSTECHNIKA, AVAGY HOGYAN VÁLTSUK APRÓPÉNZRE A 2024-ES FIZIKAI NOBEL-DÍJAT?

Fehérvári János Gergő, Balogh Zoltán, Halbritter András Ernő¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék, Budapest

✉E-mail: halbritter.andras@ttk.bme.hu

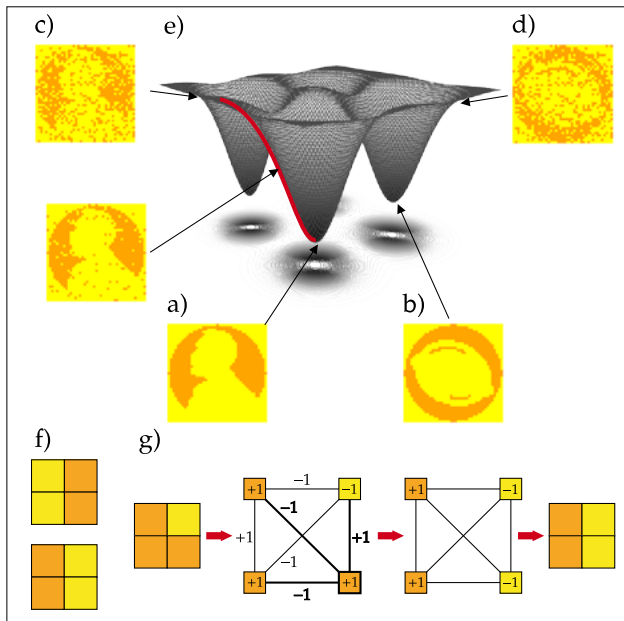
Egy elemzés [7] szerint 2030-ra a világ teljes energiafogyasztásának több mint 20%-át a mesterséges intelligencián alapuló információs technológia fogja igényelni. Ahhoz, hogy az adatközpontok mégse emésszék fel a világ áramtermelését, a mesterséges intelligencia algoritmusainak fejlesztése mellett új, energiatakarékos hard-

vereszközökre is szükség van, melyek jobban követik a neurális hálózatok felépítését, és még az adattárolást és a számítást is egy helyen kezelik. Ezen kutatás-fejlesztési területbe, az ún. neuromorfikus számítástechnikába adunk betekintést a 2024-es fizikai Nobel-díj szemszögéből.

1. A Hopfield-féle neurális hálózat mint asszociatív memória

Játsszunk el a gondolattal, hogy egy elmosódott levelet kaptunk valamilyen díj elnyeréséről. Az érmet ábrázoló homályos képről (1c., 1d. ábra) kell eldöntenünk, hogy egy egetrengető felfedezésünkért Nobel-díjban részesültünk (1a. ábra), esetleg valamelyik elfuserált projektünket citromdíjjal jutalmazták (1b. ábra). Humán intelligenciánk nem hagy kétségek között örölni minket, első ránézésre felismerjük az elmosódott képeket. A 2024-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazott John J. Hopfieldnek köszönhetjük azon mesterséges neurális hálózatok ötletét, amelyek hasonló képzettársításra, *asszociációra* képesek [1, 2].

A felismerésre szánt képeket persze először meg kell tanítanunk a hálózatnak. A tanítás során létrehozunk egy *térképet*, ami minden lehetséges, adott képpontokból álló képhez hozzárendel egyfajta *magasságot*, amit más néven a hálózat *energiájának* hívunk (1e. ábra). Az energiatérképen látható gödörök legmélyebb pontjai az előre betáplált „tisza” képeknek felelnek meg. A hálózat úgy működik, hogy minden egyes lépésnél kiválasztunk egy képpontot, és egy egyszerű szabállyal eldöntjük, hogy annak a színét a két lehetőség között (sárga vagy narancs) megváltoztassuk-e. A Hopfield által lefektetett szabállyal az energiatérképen minden egyes változtatásnál csak lefelé (alacsonyabb energia felé) tudunk mozogni (vagy változatlan energián maradni), így ha a Nobel-díjra „hasznító” elmosódott képből indulunk ki, akkor a hálózat lépésről lépésre letisztítja a képet, és eljut a tiszta, eredetileg betáplált képhez (1c., 1e., 1a. ábra). Ha a citromhoz



1. ábra. A Nobel-díj és a citromdíj pixeles változatai, illetve a feltanított hálózat energiafelületének matematikus illusztrációja a különböző mértékben elmosódott képek függvényében. (f, g) Az asszociatív memória működésének szemléltetése két egyszerű képpel (f), és a bal alsó hibás pixel javításának lépéseivel (g)

hasznító zajos képből indulnánk ki, akkor egy másik „gödörbe”, a letisztított citromképhez jutnánk (1d., 1b. ábra).

Nézzük meg egy egyszerű példán az emlékalapú keresést matematikailag is! Vegyünk két 2×2 pixelből álló képet, ahol az egyikben a jobb, a másikon a bal oldalon található egy függőleges narancssárga vonal (1f. ábra) a citromsárga háttérrel. Az ezen a két képen tanított hálózatot ekkor egy gráfként ábrázolhatjuk, melynek a csúcsai a képkockáknak feleltethetők meg (1g. ábra). A hálózat működése során ezen csúcsokat hívjuk *neuronoknak*, melyek $+1$ vagy -1 állapotban lehetnek, a $+1$ felel meg a narancssárga, a -1 a citromsárga képkockának. A 4 neuront a gráfok élei, az úgynevezett mesterséges szinapszisok kötik össze, melyekhez tanulás során -1 és $+1$ közé eső valós számokat, úgynevezett *szinaptikus súlyokat* rendelünk a lábjegyzetben ismertetett algoritmus alapján.¹ Ezek a súlyok kódolják az előre megtanított képeket. A példahálózatunkra a súlyok szintén az 1g. ábráról olvashatók le.

Vegyünk egy elmosódott képet, ami a bal oldali narancssárga vonalat ábrázolná, de a jobb alsó sarokban egy pixelhiba miatt a citromsárga helyett narancssárga képpont található. Mutassuk meg ezt a képet a hálózatnak (1g. ábra). Kiszemelve a hibás pixelt végezzük el egy döntéshozatali lépést! Elsőként számoljuk ki az ebbe a neuronba érkező „neurális jelek” súlyozott összegét: vegyük az összes többi neuron (képpont) értékét, ezeket szorozzuk össze az adott képpontot a kiválasztott képponttal összekötő szinapszis (él) súlyával, és összegezzük fel a kapott értékeket, azaz az i -edik sorszámu neuronra az $a_i = \sum_{j \neq i} W_{ij} \cdot x_j$ összeget számoljuk ki, ahol W_{ij} az i -edik és j -edik neuront összekötő súly, x_j a j -edik neuron értéke, a_i -t pedig az i -edik neuron aktivációjának nevezzük. Ha a képpontokat a bal felső saroktól az óramutató járásának megfelelően számozzuk, akkor a hibás képpont a harmadik pixel, ennek aktivációja:

$$a_3 = (-1) \cdot (+1) + (+1) \cdot (-1) + (-1) \cdot (+1) = -1 - 1 - 1 = -3.$$

Ha az aktiváció pozitív, a kiválasztott neuron értékét $+1$ -re, ha negatív, akkor -1 -re állítjuk. Rögtön látjuk, hogy a kiválasztott képpont ezen művelet hatására előjelet vált, és ezzel visszaáll a képpont helyes (citromsárga) értéke. Könnyen ellenőrizhetjük, hogy az 1f. ábrán bármelyik kép bármelyik képpontját kiválasztva ezek előjele nem változik, vagyis a két előre betáplált képet valóban két stabil megoldásnak (energiaminimumnak)

¹ Egy képünk összes képpontját számozzuk be (azaz az $n \times n$ képpontú képmátrixból készítsünk egy $N = n \cdot n$ hosszúságú vektorot). Ezután az i indexű képponthoz (azaz az i -edik neuronhoz) a színének megfelelően rendeljük hozzá $x_i = \pm 1$ értéket. Egy adott képből az i -edik és j -edik neuron közötti $W_{ij}^{\text{kép}}$ súlyt az $x_i \cdot x_j$ szorzat adja. Több kép tanítása esetén az egyes képeknek megfelelő $W_{ij}^{\text{kép}}$ súlyokat átlagoljuk a különböző képekre, így kapjuk meg a neurális hálózat W_{ij} szinaptikus súlyait. Fontos, hogy a neuronok önmagukkal nincsenek összekötve, azaz $W_{ii} = 0$. Az adott neuronállapothoz és az előre beprogramozott súlyokhoz rendelt energiát $E = -(1/2) \sum_{i,j} x_i \cdot W_{ij} \cdot x_j$ képlet szerint számoljuk.

tekinthetjük, míg bármelyik pixel hibás megjelenítése esetén a hálózat az adott pixelt javítja.

A súlyok szemléletesen azt mondják meg, hogy a hálózati működés során két neuron ad-e egymásnak információt, és ha igen, milyen. Nulla súly esetén a kiszemelt két neuron nem beszélget egymással. Nem nulla súly esetén beszélnek, sőt ha pozitív ez a súly, akkor ugyanolyan állapotba, ha negatív akkor pedig ellentétes állapotba való beállásra ösztönzik egymást.

A 2×2 képpontos példán bemutatott hálózati működés szabályai szerint járunk el sokkal nagyobb méretű képeknél is, csak ekkor a képpontoknak megfelelő neuronokat egymás után frissítgetve, akár az összes neuron többszöri frissítése során sokkal több lépésben jutunk el az energiaminimumot jelentő megoldáshoz.

2. A Hopfield-féle neurális hálózatok általánosítása valószínűségi optimalizálási feladatokra

Az előző példában a Hopfield-hálózat a legközelebbi minimumhely megtalálásával az előre betáplált képekre „asszociált” (1a–e. ábra). A Hopfield-hálózat megalkotása után nem sokkal kiderült, hogy bizonyos egzaktul nem megoldható matematikai feladatokat meg lehet úgy fogalmazni, mint egy ilyen energiafelület legmélyebb pontjának megtalálása. Vagyis ha a Hopfield-neuronok közötti kapcsolatba képek helyett egy matematikai optimalizációs feladatot kódolunk, akkor ugyanezzel az iterációs módszerrel a hálózat képes a megoldást megtalálni. Vegyük azonban észre, hogy míg a képek tárolásánál minden minimumhely egy külön emlék lehetett, és örültünk, hogy ezek szétváltak (különben a hálózat nem tudná az emlékeket megkülönböztetni), addig az optimalizációs feladatnál a legjobb megoldást, vagyis legeslegmélyebb pontot keressük. Felvetődik tehát az igény,

hogy úgy befolyásoljuk a hálózati működést, hogy az ne a legközelebbi szélsőértéken vagy energiagödörben álljon meg (2a. ábra, szürke pont), hanem eljusson a globálisan optimális megoldáshoz, a legmélyebb gödörhöz (2a. ábra, piros pont).

Ezt a működés randomizálásával, vagyis véletlen faktorok becsatolásával érhetjük el. Egyszerűen, amikor meghozunk egy döntést, akkor nem az a_i aktiváció előjelét nézzük meg, hanem az a_i aktivációhoz hozzáadunk egy véletlen számot, és az így kapott összeg előjelének megfelelően frissítjük a neuron értékét. Ennek köszönhetően a hálózat az energiát nem szigorúan, minden egyes lépésben csökkenti, hanem időről időre energianövelő lépéseket is végez. Ez pedig lehetővé teszi, hogy ne a legközelebbi minimumba érkezzen meg, hanem több szélsőértéket is felfedezzen, ezzel növelve esélyeit az energiatérkép legmélyebb pontjának megtalálásának. Ezzel a módszerrel természetesen nem lehet a megoldást biztosan megtalálni, de a kisorsolt véletlen számok tartományának megfelelő megválasztásával elérhető, hogy nagy valószínűséggel megtaláljuk a megoldást.

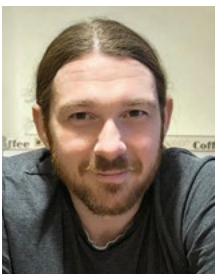
A véletlen aktiváció gondolatát a 2024-es fizikai Nobel-díj másik díjazottja, *Geoffrey Hinton* vitte tovább, aki a *Boltzmann-gép* megszerkesztésével olyan neurális hálózatot alkotott, amely már felépítéséből fakadóan is használ véletlen faktorokat, és ennek köszönhetően még szélesebb körben alkalmazható [4].

A fenti módszerrel egy bonyolultnak számító optimalizációs feladat, a gráfok maximális vágásának a megkeresése (max cut) is megoldható [5]. Itt egy gráf csúcspontjait (2b. ábra) kell úgy két csoportba osztani (narancssárga és citromsárga, lásd 2c. ábra), hogy a két csoportot összekötő élek száma maximális legyen. Megmutatható, hogy számos gyakorlati optimalizációs feladat visszavezethető a maximális vágási probléma megoldására, például az integrált áramkörök tervezése, logisztikai feladatok megoldása vagy gyártási optimalizáció területén [6].

A 2c. ábrán a 2b. ábrán szereplő gráf maximális vágásának megoldását ábrázoljuk, úgy, hogy a narancssárga és citromsárga csúcspontok között futó élek vastagon vannak jelölve, így csak a vastag élek számát kell leszámolni, ami jelen esetben 8. Ez a feladat tetszőlegesen nagy gráfra megoldható próbálgatással, hiszen egy adott állapotnál az ellentétes színű csúcsokat összekötő élek száma könnyen megszámlálható. Azonban N csúcs esetén az összes lehetséges variáció végigpróbálása 2^N



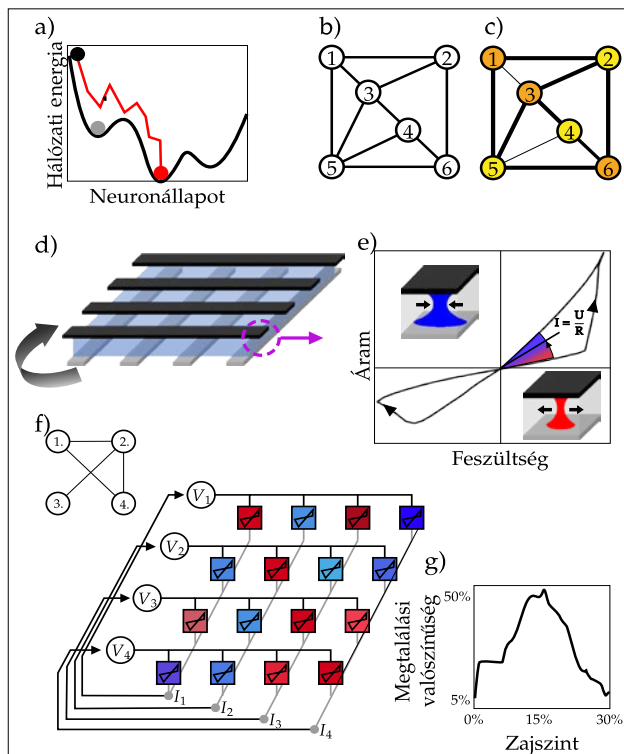
Fehérvári János Gergő a BME Fizika Tanszék Kooperatív Doktori Program (KDP) ösztöndíjas doktorandusza a Semilab Zrt.-vel együttműködésben. Kutatási témája atomerő-mikroszkópiai módszerek fejlesztése félvezetőipari alkalmazásokhoz, melynek része a memrisztorok fizikájának vizsgálata vezető atomerő-mikroszkópiával. OTDK-nyertes TDK-dolgozatában memrisztív Hopfield-féle neurális hálózatokat vizsgált.



Balogh Zoltán egyetemi docens (BME Fizika Tanszék). Kutatási területei: memrisztorok, valamint atomi és molekuláris rendszerek zajjelenségeinek vizsgálata. Korábbi Bolyai János Kutatói Ösztöndíjas, jelenleg a „Nanoelektronikai eszközök elektromos zajának feltárása, testreszabása és hasznosítása” című OTKA FK-pályázat vezetője.



Halbritter András Ernő a BME Fizika Tanszék egyetemi tanára, az MTA doktora. 2012 és 2024 között a Fizika Tanszék tanszékvezetője, jelenleg a BME Fizikai Intézet igazgatóhelyettese. A HUN-REN–BME Kondenzált Anyagok Fizikája kutatócsoport vezetője. Kísérleti kutatócsoportja neuromorfikus elektronikával, illetve atomi és molekuláris elektronikával foglalkozik.



2. ábra. A maximális vágási probléma megoldása memrisztív Hopfield-féle neurális hálózatok segítségével. (a) A Hopfield-hálózat energiatérképében a globálisan legjobb megoldást (piros pont) csak úgy találhatjuk meg, ha az aktiváció számításánál véletlenszerűséget, vagy zajt is bevezetünk. (b) Hatcsúcsú gráf, melynek a maximális vágását keressük. (c) A maximális vágási probléma megoldása. A Hopfield-hálózatban a neuronok narancssárga (+1) és citromsárga (-1) értéke adja meg, hogy melyik csoportba soroljuk a csúcspontot, míg a W_{ij} súlyoknak egy, illetve zérus értéket adunk, ha az i -edik és j -edik csúcst össze van kötve vagy nincs összekötve [3]. (d, e, f) Memrisztív neuromorfikus hardverek. Memrisztorok $I(V)$ görbéje (e): kis feszültségeken az áram-feszültség kapcsolat lineáris, a megfelelő küszöbfeszültségnél viszont egy kapcsolási folyamat indul el: pozitív feszültségnél a két elektróda közötti filamentum elkezd nőni, majd megfelelő negatív előfeszítésnél a folyamat megfordítható, a filamentum átmérője csökken. (d) Keresztthuzalozású memóriahálózat készítése memrisztorokból. (f) A panel bal felső sarkában látható gráfnak megfelelő Hopfield-féle neurális hálózat megvalósítása keresztthuzalozású memrisztorhálózat-tal. (g) A maximális vágási probléma megoldásának megtalálási valószínűsége 60×60 -as memrisztív Hopfield-féle neurális hálózatban a zajszint függvényében [3]

műveletet igényel, ami 1000 csúcspont esetén $3,4 \cdot 10^{284}$ év számolási időt jelent, feltételezve hogy egyetlen műveletet $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ alatt el tudunk végezni. A fenti, Hopfield-hálózattal végzett valószínűségi optimalizálás ennél jóval hatékonyabb megoldást jelent, azonban ennél a megközelítésnél is $\approx N^2$ szorzást és összeadást el kell végezni ahhoz, hogy egy iterációs körben az összes neuron értékét egyszer frissítsük. Ez ezer neuron esetén egymillió szorzást jelent. A későbbiekben olyan, ún. neuromorfikus hardvereszközöket mutatunk be, melyekkel egymillió szorzás helyett egyetlen lépésben kiértékelhető az összes neuron aktivációja, így a hagyományos számítógépeken megvalósított Hopfield-hálózatok helyett lényegesen gyorsabban és energiahatékonyabban végzik el az optimalizálást.

3. A memrisztorhálózatok mint a mesterséges intelligencia hatékony hardvergyorsítói

Általánosan is elmondható, hogy a mesterséges intelligencia alapját képező mesterséges neurális hálózatok nagyon bonyolult feladatok megoldására képesek, de futtatásuk hagyományos digitális számítógépeken elképesztő számítási igénnyel jár, hiszen nagyon-nagyon sok neurális kimeneti értéket és szinaptikus súlyt kell összeszorozni és összeadni. Ezenkívül az adattárolás és a műveletvégzés fizikailag szeparált egységekben történik, így a memória és a processzor közötti adatmozgatás is szűk keresztmetszetté válik. A ChatGPT-nek a maga 175 millió paraméterével és a Hopfield-hálózatnál jóval összetettebb felépítésével saját bevallása szerint 10–20 trillió (milliárdszor milliárd) számítási műveletet kell elvégeznie egyetlen kérdésünk megválaszolásához. Ez a számítási igény már energiafogyasztásban is számottevő, egy elemzés szerint 2030-ra a világ teljes energiafogyasztásának több mint 20%-át a mesterséges intelligencián alapuló információtechnológia fogja igényelni [7]. Emiatt a mesterséges intelligencia további fejlődéséhez nem elég az algoritmusokat fejlesztünk és bonyolultabb feladatokat megoldani képes hálózatokat kigondolnunk. Legálább ugyanilyen fontos az, hogy a háttérben meghúzódó számításokat is hatékonyan, energiatakarékosan tudjuk elvégezni újfajta hardvereszközökkel, melyek felépítésükben jobban követik a neurális hálózatok struktúráját, és akár egy helyen meg tudják oldani az adattárolást és a számítást.

Ezen új, ún. *neuromorfikus* hardverek fejlesztéséhez a biológiai idegrendszer szolgáltat inspirációt, hiszen gondoljuk csak bele, hogy az emberi agy mintegy 30 W-os energiafogyasztás mellett milyen hihetetlen hatékony-ságra képes!

3.1. A memrisztorok mint mesterséges szinapszisok

Az ilyen neuromorfikus hardverek lehetséges építőkövei az úgynevezett *memrisztorok*, azaz memóriával rendelkező ellenállások. Ezek olyan fizikai rendszerek, melyek ellenállása nagy feszültséggel hangolható, kis feszültséggel pedig információvesztés nélkül olvasható. Fizikailag egy memrisztort úgy valósítunk meg, hogy két fém elektróda közé egy speciális, eredetileg szigetelő réteget helyezünk. Megfelelően nagy elektromos feszültséggel a szigetelőben ionokat, pl. ezüstionokat tudunk mozgatni úgy, hogy adott polaritású feszültséggel az ezüstionokból egy vékony vezeték (filamentumot) építünk fel a két elektróda között. Ellentétes polaritású feszültséggel viszont leépítjük a filamentumot, az egyre kisebb átmérőjűvé válik, majd végül akár meg is szűnik. Ezt a reprodukálhatóan elvégezhető folyamatot szemlélteti a 2e. ábrán bemutatott $I(V)$ áram-feszültség karakterisztika. Itt a kapcsolat egy kisebb ellenállású (kék) és egy nagyobb ellenállású (piros) állapot között történik, de a megfelelő feszültség alkalmazásával gyakorlatilag folytonosan han-

golhatjuk a filamentum átmérőjét, és az ennek megfelelő R ellenállást (lásd a piros-kék átmenetben szemléltetett tetszőleges meredekségű $I(V)$ görbét a 2e. ábrán). Alacsony feszültségen viszont a rendszer megőrzi az állapotát, azaz az ellenállásállapot kiolvasható az ellenállás megváltoztatása nélkül. Vegyük észre, hogy a memrisztorok analóg memóriának felelnek meg, amik kiválóan alkalmasak arra, hogy a szinte folytonosan hangolható $G = 1/R$ vezetőképességükben adatot tároljunk. A következőkben pedig megmutatjuk, hogy akár mesterséges neurális hálózatok szinaptikus súlyfaktorainak reprezentálására is lehet használni őket.

3.2. Kereszthuzalozású memrisztorhálózatok és memrisztív Hopfield-hálózatok

A memrisztorok információtechnológiai felhasználásához azonban hálózatba is kell rendezni őket. Ez meglepően egyszerűen megvalósítható, elég a memrisztorok kialakítására alkalmas szigetelőréteget a 2d. ábrán látható szürke és fekete fém elektródák közé helyezni. Egy adott szürke és fekete elektródapárra feszültséget kapcsolva a két elektróda találkozásánál kialakul a memrisztorkontaktus, aminek a vezetőképessége szinte tetszőlegesen beállítható.

Memrisztív eszközök és hálózatok nagyon sokféle anyagcsaládból, különböző architektúrákban hozhatók létre [8–10]. A továbbiakban a Hopfield-féle neurális hálózatok példáján vizsgáljuk meg, hogy a 2d. ábrán látható kereszthuzalozású memrisztorhálózatok hogyan is alkalmazhatóak hatékony hardvergyorsítóként. Először is a hálózat súlyait kell beállítani a megoldandó problémának megfelelően. A 2f. ábra memrisztív hálózata az ábra bal felső sarkában látható egyszerű, négycsúcsú gráfot valószínűsíti meg, melyen az 1–2, 1–4, 2–3 és 2–4 csúcsok vannak összekötve. Ezt úgy programozhatjuk be a kereszthuzalozott hálózatba, hogy a felső fekete és az alsó szürke elektródákat beszámozzuk, és azon számú elektródák között alakítunk ki nagy vezetőképességű memrisztív kontaktust (2f. ábra, kék memrisztorok), ahol a gráf megfelelő számú csúcsai is össze vannak kötve, míg a többi fekete és szürke elektróda közé kifejezetten kis vezetőképességű memrisztorkontaktust alakítunk ki (2f. ábra, piros memrisztorok). Az adott neuron állapotát pedig a fekete elektródákra kapcsolt V_1, V_2, V_3, V_4 feszültségek jellemzik: +1 állapotban $+V$, míg -1 állapotban $-V$ feszültséget alkalmazunk, azaz az i -edik elektródára kapcsolt V_i feszültség arányos az i -edik neuron x_i állapotával. A szürke vezetéseken pedig az adott neuron aktivációját határozhatjuk meg az ott mérhető áramon keresztül, ami alapján eldöntjük, hogy az adott neuron állapotát megváltoztassuk-e. Válasszunk ki egy adott neuront a 2f. ábrán, például az első! Mivel a különböző elektródákból érkező áramkomponensek összeadódnak, az első szürke vezetékre

$$I_1 = G_{1,1} \cdot V_1 + G_{1,2} \cdot V_2 + G_{1,3} \cdot V_3 + G_{1,4} \cdot V_4$$

áram adódik. Itt a $G_{1,2}, G_{1,3}$ és $G_{1,4}$ vezetőképességek az 1–2, 1–3 és 1–4 neuronok közötti $W_{1,2}, W_{1,3}, W_{1,4}$ szinaptikus súlyokat reprezentálják, amik a 2f. ábra bal felső gráján szereplő összeköttetések alapján rendre nagy, kicsi és nagy vezetőképességnek felelnek meg. A Hopfield-hálózatban a neuronok önmagukkal nincsenek összekötve, így $G_{1,1}$ egy nagyon kicsi, szinte nulla vezetőképességnek felel meg. Jól látszik, hogy a szürke vezetéseken mért áramok valóban az adott neuron aktivációját, azaz a többi neuron állapotának az összekötő súlyokkal vett súlyozott összegét adják meg.

Rögtön látható, hogy egy N neuronból álló memrisztív hálózatban az összes neuron aktivációja egyszerre, egyetlen lépésben *kiszámolódik* az Ohm-törvény és a Kirchhoff-törvények alapján, azaz a digitális számítógépekkel ellentétben nincs szükség $\approx N^2$ szorzási művelet szoftveres elvégzésére és az ehhez szükséges memória és processzor közötti adatmozgatásra. A neurális állapotok ún. vektorának és az összeköttetéseket jelentő szinapszisok ún. mátrixának összeszorozása egy alpművelet mindenfajta neurális hálózatban, így a szoftveresen N^2 műveletet igénylő vektor-mátrix szorzás leegyszerűsítése egy lépéses hardveralapú vektor-mátrix szorzássá jelentős energiamegtakarítást jelent tetszőleges neurális hálózatban. Ez manapság már nemcsak elvi alapon működik, hanem többször tízmillió memrisztor hálózatba építésével olyan mesterséges neurális hálózatokat lehet építeni, melyek meghökkenítő energiahatékonyság mellett képesek komplex képfelismerési vagy egyéb számítási feladatok nagy pontosságú elvégzésére [9, 11], és a fenti példában szereplő maximális vágási probléma is hatékonyan megoldható nagyméretű memrisztív Hopfield-hálózatok segítségével [12].

3.3. A memrisztorok zaja

Visszatérve a maximális vágási probléma Hopfield-féle neurális hálózatos megoldásához, felmerül a kérdés, hogy a valószínűségi optimalizáláshoz szükséges véletlenszerűséget (2a. ábra) egy hardveres memrisztív hálózatban (2f. ábra) hogyan tudjuk biztosítani. Szerencsére a memrisztorok nemcsak mesterséges szinapszisnak tekinthetők, hanem hangolható zajforrásként is működnek, azaz a memrisztorok vezetőképesség-állapotának beállítása közben az adott állapot vezetőképességének időbeli fluktuációja is változik, az utóbbi mennyiséget a G vezetőképesség ΔG időbeli szórásával írhatjuk le. Tipikusan minél kisebb G vezetőképességet állítunk be, annál nagyobb lesz a $\Delta G/G$ relatív vezetőképesség-zaj. Ez azt jelenti, hogy a 2f. ábrán a kék, jól vezető memrisztorok vezetőképességét úgy választhatjuk meg, hogy a vezetőképesség relatív zaja optimális legyen a maximális vágási probléma megoldásának megtalálásához. Egy korábbi tanulmányunkban ezt a kérdést vizsgáltuk, azaz hogy különböző, valós memrisztív rendszereken mért zajszintek mellett a memrisztorhálózat megadott számú lépés elvégzése után milyen arányban, milyen va-

lósínűséggel képes az optimális megoldást megtalálni. Tapasztalataink egyik konklúziója a 2g. ábrán látható, megmutatva, hogy az optimális működést meglepően magas zajszintnél érjük el, amikor a memrisztoregységek vezetőképességének időbeli fluktuációja az átlagos vezetőképesség 15%-át is eléri [3].

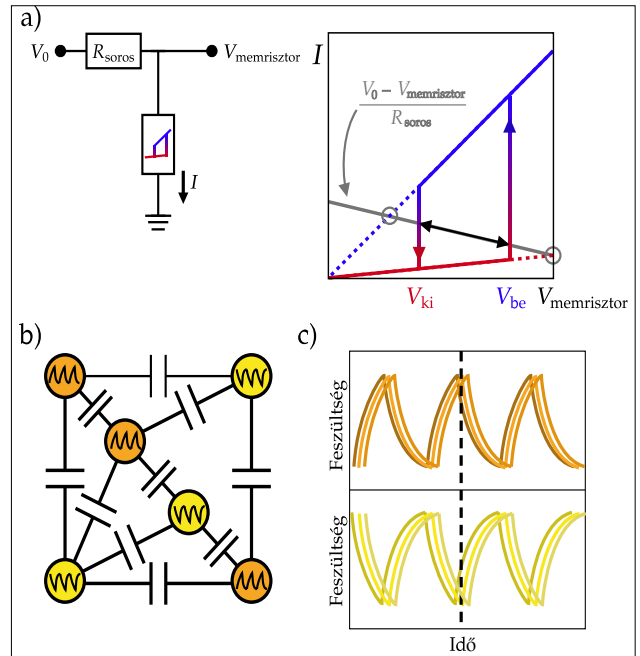
Míg a valószínűségi optimalizáláson alapuló neurális hálózatokban a működés lényegi részét adja a memrisztorok vezetőképességének jelentős időbeli fluktuációja, a hagyományos, determinisztikus működést nyújtó neurális hálózatokban a memrisztoregységek zaja jelentős problémát jelent, hiszen a szinaptikus súlyok felbontásának nyilvánvaló korlátja a memrisztorok vezetőképességének időbeli ingadozása. A memrisztorokban jelentkező fluktuációk kísérleti vizsgálata, megértése és csökkentése kutatócsoportunkban kiemelt kutatási terület [13–15]; illetve a szakirodalomban is kulcsfontosságú volt a zajcsökkentés a világrekordnak számító 11 bites súlyfelbontás elérésében [16].

4. És ha az egész számítást a fizika végezné el?

A fenti példában a memrisztorok mesterséges szinapszis-ként működtek, és alapvetően a neurális értékek és szinaptikus súlyok egylépéses, hardveralapú összeszorzásában nyújtottak kifejezetten energiahatékony alternatívát a hagyományos digitális számításokhoz képest. Ettől függetlenül, a bemutatott memrisztív Hopfield-féle neurális hálózatokban az aktivációk kiolvasását és a neurális állapotok ennek megfelelő frissítését továbbra is hagyományos számítógépek végezték [12]. Felmerül a kérdés, hogy elképzelhető-e olyan számítási módszerek, ahol hagyományos számítógépek helyett egy teljesen önműködő fizikai rendszer végzi el a számítást. Memrisztorok segítségével ilyen eszközök is építhetők. Ebben az esetben ún. illékony memrisztorokat kell használni, pl. a kutatócsoportunkban is vizsgált Mott-fázisátalakuláson alapuló VO₂ memrisztorokat [17–19]. Míg a 2e. ábrán bemutatott nem illékony filamentáris memrisztorokra mint a biológiai szinapszisok mesterséges megfelelőire gondoltunk, addig a VO₂ memrisztorok a biológiai neuronokhoz hasonló működést mutatnak, velük számos neurális jelalak létrehozható [20]. Az egyik legegyszerűbb alkalmazásuk ún. oszcillátoráramkörök készítése, melyekben egy egyenfeszültség hatására a VO₂ alapú áramkör a ki- és bekapcsolt állapotok közötti önműködő váltogatással periodikus feszültségoszcillációt mutat. Ezt a folyamatot a 3a. ábrán érthetjük meg, ahol a jobb oldali panel az illékony VO₂ memrisztor $I(V)$ görbáját szemlélteti. Zérus feszültségből indulva egy nagy ellenállású állapotban van a rendszer (piros egyenes), majd a V_{be} bekapcsolási feszültségnél egy lokális szigetelő-fém átalakulás zajlik le az aktív tartományban, és a memrisztor átkapcsol egy kisebb ellenállású állapotba (kék egyenes). A feszültséget visszacsökkentve némi hiszterézissel, V_{ki} feszültségnél visszkapcsol a rendszer az eredeti nagy ellenállású

állapotba. Az ilyen oszcillátor-áramkörökben egy nagy soros ellenállást is alkalmazunk, amin keresztül egy V_0 egyenfeszültséget kapcsolunk a rendszerre (3a. ábra, bal oldal). Ekkor az áramkörben $I = (V_0 - V_{memrisztor})/R_{soros}$ áram alakul ki, ahogy a jobb oldali szürke vonal mutatja. A két (piros és kék) ellenállás-állapotnak megfelelő lehetséges áramértékek (szürke körök) viszont instabil állapotoknak felelnek meg: mire elérnénk a jobb oldali szürke kört, az áramkör már bekapcsol, ekkor viszont hirtelen lecsökken a feszültség a soros ellenállással történő feszültségosztás miatt, de még a bal oldali szürke kör elérése előtt visszkapcsol a rendszer a nagy ellenállású állapotba, és kezdődik az egész előlről. Így a meghajtó egyenfeszültség a memrisztor feszültségének periodikus oszcillációját eredményezi, a periódusidőt pedig egy memrisztorral párhuzamosan kötött kapacitással tudjuk beállítani.

2024-ben az IBM Zürich kutatói demonstráltak olyan áramköröket, melyek a maximális vágási problémát csatolt VO₂ oszcillátorokkal tudják önműködően megoldani [21]. Ebben a megközelítésben a neuronok a VO₂ oszcillátoráramkörök, melyeket a vizsgált gráfon szereplő összeköttetések szerint kondenzátorokkal összecsatolunk, azaz a 3b. ábra szerint valósítjuk meg a 2b. ábrán levő gráfot. A csatolás hatására az oszcillátoráramkörök szinkronizálódnak, és egy részük az első oszcillátorral azonos fázisban, míg másik részük az első oszcillátorral ellentétes fázisban kezd el oszcillálni (lásd a 3c. ábrán a



3. ábra. A maximális vágási probléma megoldása oszcillátorhálózatokkal. (a) A fém-szigetelő átalakuláson alapuló vanádium-oxid illékony memrisztorok működési sémája. (b, c) A maximális vágási probléma megoldását kapacitívan csatolt oszcillátorok segítségével kaphatjuk meg az azonos, illetve ellenfázisba beálló oszcillátorok szerint választjuk szét a vizsgált gráf csúcsait. A fázisok két lehetséges beállítását segíti, ha a közös oszcillációs frekvencia kétszeresének megfelelő szinuszos jelet is csatolunk az oszcillátorhálózathoz [21]

fázisban levő narancs és az ellenfázisban levő citromsárga oszcillációkat). A maximális vágási feladat megoldását a fázisok rendeződése adja. Az azonos fázisban működő oszcillátorokat színezzük narancssárgára, míg az ellentétes fázisban működő oszcillátorokat citromsárgára, ami meg is adja a 2c. ábrán már bemutatott megoldást. Ezzel a módszerrel egyelőre maximum kilenc oszcillátort tartalmazó csatolt áramkört sikerült megvalósítani mintegy 2 kHz oszcillációs frekvencia mellett, helyes megoldást adva a maximális vágásra [21]. Ezen a területen kutatócsoportunk a működés felgyorsításának kutatásán dolgozik. Az egyedi VO₂ memrisztív eszközöket az ETH Zürich laboratóriumával együttműködve sikerült 15 ps idő alatt bekapcsolni, ami egészen meghökkenítő, pár fJ-os kapcsolási energiának felel meg [19]. Ezen extrém kapcsolási idők oszcillátoráramkörökben bizonyos fizikai korlátok miatt nem érhetők el, de kutatásaink alapján az eddigi VO₂ oszcillátoroknál lényegesen gyorsabb, 100 MHz-es oszcillációs frekvenciák már megvalósíthatók [22, 23].

5. Összegzés

A 2024-es fizikai Nobel-díjhoz kapcsolódóan egy speciális optimalizálási feladat, a maximum vágási probléma mentén tekintettünk át olyan lehetséges megoldási sémákat, melyek jól szemléltetik az információtechnológia fejlődési irányait. A próbálgatásos megoldás könnyen beprogramozható egy hagyományos számítógépbe, azonban a gráf méretével exponenciálisan elszáll a megoldási idő. A Hopfield-féle neurális hálózatok egy hatékony valószínűségi optimalizálási megoldást nyújtanak, de szoftveres megoldás esetén minden egyes iterációs körben N^2 szorzási műveletet kell elvégezni, ami nagy gráfméretnél erőforrásigényes feladat. Ehhez képest egy lényegesen energiahatékonyabb megoldást kapunk, ha a neurális értékek és súlyok szorzását hardveresen, egyetlen lépésben végezzük el kereszthuzalozású memrisztorhálózatokkal. Végezetül egy elegáns megközelítést is bemutatunk, ahol a problémát a fizika oldja meg csatolt oszcillátorok szinkronizálódásán keresztül.

Nyilvánvaló, hogy korunk exponenciálisan növekvő számítási igényeit a Neumann-féle számítógépek nem fogják tudni kezelni; a hagyományos számítástechnikát ki kell egészíteni kifejezetten energiahatékony célhardverekkel illetve hardvergyorsítókval, melyek akár peremeszközként, az adatok keletkezési helyén képesek „aprópénzből üzemeltetett”, minimalizált fogyasztású adatelemzésre. A terület hihetetlen fejlődését látva számíthatunk rá, hogy az újfajta, *neuromorfikus* hardverek a közeljövőben megjelennek mindennapi eszközeinkben. Látva pedig, hogy ebben a technológiai fejlődésben az oszcillátoralapú neurális hálózatok is fontos szereplővé válhatnak, ne feledkezzünk meg arról, hogy a Neumann-féle számítógépek korlátait esetlegesen feloldó oszcillátorhálózatok ötletéhez maga Neumann János is alapvetően járult hozzá [24, 25].

Irodalom

- Hopfield J. J. (1982): Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554–2558.
- Hopfield J. J., Tank D. W. (1986): Computing with neural circuits: A model. *Science*, 233(4764), 625–633.
- Fehérvári J. G., Balogh Z., Török T. N., Halbritter A. (2024): Noise tailoring, noise annealing, and external perturbation injection strategies in memristive Hopfield neural networks. *APL Machine Learning*, 2(1), 016107, 01.
- Hinton G. E., Sejnowski T. J., Ackley D. H. (1984): Boltzmann machines: Constraint satisfaction networks that learn.
- Zhang J. L., Wu L. Y., Zhang X. S. (2001): Application of discrete Hopfield-type neural network for max-cut problem. In: *ICONIP*, pp. 1439–1444.
- Nieberg F. T., Pardella G. (2011): Minimization in VLSI Chip Design Application of a Planar Max-Cut Algorithm.
- Jones N. (2018): How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, 561, 163–166.
- Ielmini D., Waser R. (2016): *Resistive Switching*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Aguirre F., et al. (2024): Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks. *Nature Communications*, 15(1), 1974.
- Xia Q., Yang J. J. (2019): Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing. *Nature Materials*, 18, 309–323.
- Huang Y., et al. (2024): Memristor-based hardware accelerators for artificial intelligence. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 1(5), 286–299.
- Cai F. (2020): Power-efficient combinatorial optimization using intrinsic noise in memristor Hopfield neural networks. *Nature Electronics*, 3, 409–418, 07.
- Balogh Z., Mezei G., Pósa L., Sánta B., Magyarkuti A., Halbritter A. (2021): 1/f noise spectroscopy and noise tailoring of nanoelectronic devices. *Nano Futures*, 5(4), 042002.
- Sánta B., Balogh Z., Pósa L., Krisztián D., Török T. N., Molnár D., Sinkó Cs., Hauert R., Csontos M., Halbritter A. (2021): Noise tailoring in memristive filaments. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(6), 7453–7460. PMID: 33533590.
- Sánta B., Balogh Z., Gubicza A., Pósa L., Krisztián D., Mihály Gy., Csontos M., Halbritter A. (2019): Universal 1/f type current noise of Ag filaments in redox-based memristive nanojunctions. *Nanoscale*, 11, 4719–4725.
- Rao M., et al. (2023): Thousands of conductance levels in memristors integrated on CMOS. *Nature*, 615(7954), 823–829.
- Pósa L., Hornung P., Török T. N., Schmid S. W., Arjmandbasi S., Molnár Gy., Baji Zs., Dražić G., Halbritter A., Volk J. (2023): Interplay of thermal and electronic effects in the Mott transition of nanosized VO₂ phase change memory devices. *ACS Applied Nano Materials*, 6(11), 9137–9147.
- Molnár D., Török T. N., Kövecs R., Pósa L., Balázs P., Molnár Gy., Jimenez Olalla N., Leuthold J., Volk J., Csontos M., Halbritter A. (2023): Autonomous neural information processing by a dynamical memristor circuit. <https://arxiv.org/abs/2307.13320>
- Schmid S. W., Pósa L., Török T. N., Sánta B., Pollner Zs., Molnár Gy., Horst Y., Volk J., Leuthold J., Halbritter A., Csontos M. (2024): Picosecond femtojoule resistive switching in nanoscale VO₂ memristors. *ACS Nano*, 18(33), 21966–21974.
- Yi W., et al. (2018): Biological plausibility and stochasticity in scalable VO₂ active memristor neurons. *Nature Communications*, 9(1), 4661.
- Maher O., et al. (2024): A CMOS-compatible oscillation-based VO₂ Ising machine solver. *Nature Communications*, 15(1), 3334.
- Pollner Zs. S. (2023): Ultragyors, memrisztív oszcillátor-áramkörök fejlesztése. TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Pollner Zs. S. (2024): VO₂ oszcillátor nagy sebességű oszcillációs neurális hálózathoz. TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- von Neumann J. (1954): Non-linear capacitance or inductance switching, amplifying and memory devices.
- Wigington R. L. (1959): A new concept in computing. *Proceedings of the IRE*, 47(4), 516–523.

A BELSŐ TEREK FIZIKAI JELLEMZŐIRŐL ÉS EGYES SZENNYEZŐIRŐL

Mócsy Ildikó

E-mail: mocsyil@gmail.com

Bevezetés

Az ember környezete az a része a világnak, amelyben él, és amelyben közösségének élete zajlik. A mai fejlett ipari társadalmak polgárai idejük többségét, mintegy 80–85%-át belső terekben töltik. Gondoljunk abba bele, hogy akár a gyerekek, akár az aktív felnőtt emberek, akár az idősebb korosztály tagjai hogyan alakítják napjaikat. Kiderül, hogy mindegyik korosztály tagjai közül a nagy többség körülbelül 8 órát munkahelyen, iskolában, különböző közösségi helyeken tölt, majd 14–15 órát lakóhelyükön, otthonukban. Ezért nyilvánvaló, hogy az emberek egészségében, közérzetük alakításában ezeknek a belső tereknek a tulajdonságai igen fontos szerepet játszanak.

A korábbi kevés figyelemhez képest a belső terek tanulmányozása az utóbbi évtizedekben jelentősen felértékelődött. Ezt a megváltozott életformánkkal, szokásainkkal és a technika életvitelünkbe való behatolásával magyarázhatjuk. A környezetünknek ezen részére hívta fel a figyelmet és igazolta a kutatások szükségességét az utóbbi évek világpandémiája is, amikor tömegesen hosszabb időre zárt terekbe kényszerültünk. A pozitív változások ellenére még ma is biztosan igaz, hogy a belső terek jellegzetességeiről, azok fizikai paramétereiről alig esik szó; és kevés az az ismeret, amely e terek legfontosabb jellemzőivel foglalkozik.

Áttekintő összefoglalásunknak hármas célja van.

- Egyrészt szeretné hangsúlyosan felhívni a természettudományok iránt is érdeklődők figyelmét a belső terek tanulmányozásának fontosságára, és át kívánja tekinteni az e terek fizikájával kapcsolatos legfontosabb ismereteket.
- Másrészt sorban tárgyalni fogja a belső terek kialakításában szerepet játszó fizikai paraméterek tulajdonságait és azt, hogy hogyan lehet e paraméterek változtatásával egészséges, jó közérzetet biztosító tereket tudatosan kialakítani. Ezzel kapcsolatban kitérünk arra is, hogy a belső térben tartózkodó személy maga

a tér szennyezőforrása is. Ennek kezelése a fizikában ismeretlen mennyiségek bevezetését igényli, melyeket itt az eltérő gondolkodás példáiként mutatunk be.

- Harmadrészen röviden ismertetjük a szerző és munkacsoportja több évre kiterjedő vizsgálatainak eredményeit számos kolozsvári lakás belső terével kapcsolatban. Itt, tudva azt, hogy a belső terek mérése mindig egy múltó állapotról hoz információkat, amelyek gyorsan változhatnak, összefoglaljuk az ezekből a kiterjedt mérésekből mégis levonható általános tanulságokat.

A belső terek fizikai jellemzői

A belső terek állapotát a legnagyobb mértékben a levegő minősége határozza meg. A vizsgálatok elsősorban a belső levegőminőségre (indoor air quality, IAQ) fókuszálnak. A szennyezett levegő megbetegedésekhez vezet. Az Egészségügyi Világszervezet (World Health Organization, WHO) 2023-ban kiadott jelentése szerint 2020-ban az otthonok légszennyezésével kapcsolatosan 3,2 millió halálos esetet azonosítottak, amelyből 237 ezer eset 5 év alatti kisgyermek elhalálózását jelentette [1].

A belső terek, lakások szennyezését részben a külső levegő beáramlása, részben bent a használati tárgyakból, építőanyagokból kiáramló illékony szerves vegyületek, a dohányfüst, a fűtés égéstermékai, a radon, a zaj, a penész, baktériumok, vírusok koncentrációja határozza meg. A szennyező anyagok koncentrációját és viselkedését a belső tér levegőjének fizikai tényezői, a hőmérséklet (T), a nyomás (p), a páratartalom és a légmozgás mértéke is befolyásolja. A fűtési energia takarékos használata legtöbbször a szellőztetés csökkentését is jelenti, ami a belső tér levegőjének romlásához vezet. A szellőztetés mértékét befolyásolja az időjárás és szokásaok is.

Ez a cikk tárgyalja a belső terek, lakások fizikai paramétereinek tulajdonságait, a mikroklímát meghatározó tényezőket, valamint a befolyásukat a por és az ember által okozott szennyezőkre.

A belső terek fizikai jellemzői legnagyobb részben közvetlenül mérhető mennyiségek. A hőmérsékletet (T), a nyomást (p) és a térfogatot (V) mint termodinamikai állapotjelzőket mérhetjük. Emberi használatra alkalmas zárt terekben a levegő közel ideális gázként viselkedik. A belső terek levegőjének hőmérséklete, nyomása és térfogata befolyásolja a páratartalmat és a légmozgást, valamint meghatározza a belső tér mikroklímáját, és hatással van a szennyező anyagok mennyiségére. A mikroklímát jellemző fizikai paraméterek csak bizonyos



Mócsy Ildikó a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen fizika szakon végezett, majd a Bukaresti Atomkutató Intézetben doktorált. 2001-ben a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemen a Környezettudomány Tanszék alapítója és hat évig vezetője volt. Főbb kutatása: a belső terek fizikai paramétereinek vizsgálata. EU- és OTKA-pályázatok résztvevője. Közel száz közleménye mellett négy könyv szerzője. Kitüntetései: ELFT Sugárvédelmi Emlékérem, 2007, „Diploma of Excellence”, Gh. Benga Foundation, 2011, Herman Ottó-díj, Kolozsvár, 2011, a Magyar Érdemrend Tisztikeresztje, 2013.

1. táblázat. A hőkomfort fokozatai a helyiségben mért hőmérsékletek alapján								
Hőmérséklet [°C]								Fokozat
Teljes hőkomfort $T = T_0 - T_m$		Egyenlőtlen hőszugárzás* $T_d = T_{fi} - T_{le}$		Fej-láb hőmérsékleti gradiens** $T_G = T_F - T_L$		Padlóhőmérséklet T_{F0}		
min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	
-1,5	+1,5	<8		<3		+17	+27	0
-2,5 ↔ -1,5	+1,5 ↔ +2,5	>8	<12	3	5	+15 ↔ +17	+27 ↔ +29	1
<-2,5	>+2,5	>12		>5		<15	>29	2
<i>*Az egyenlőtlen hőszugárzás (T_d) a szemben levő falakon (T_{fi} és T_{le}) 1,7 m-re a padlótól mért hőmérséklet értékeiből adódik.</i>								
<i>**A fej-láb hőmérsékletet (T_G) egy függőleges vonalon, a padlótól 0,1 m (T_F) és 1,8 m (T_L) pontokban mért hőmérséklet különbségéből határozzuk meg.</i>								

értékintervallumokban biztosíthatják a komfortérzést és az egészséges, tiszta levegőt.

Hőmérséklet

A hőmérséklet a legfontosabb termodinamikai paraméter, amelynek változása maga után vonja a többi fizikai jellemző módosulását. A belső terek hőmérsékletérzetét a hőkomfort (termálkomfort) írja le. Ennek szokásos kifejezése más paraméterek (páratartalom, légmozgás stb.) függvényében az IGTC (index of global thermal comfort).

A hőkomfort viszonylagos, hiszen emberfüggő. *Povl Ole Fanger* (1934–2006) dán kutató nevéhez fűződik az „objektív” termálkomfort meghatározása és kidolgozása, amelyet szabványosítottak (ISO 7730:2005). A hőkomfortot azok a megfigyelések határozzák meg, hogy az emberek mikor érzik jól magukat, mikor tartják kellemesnek a hőmérsékletet. Ezt a tartományt a PMV és PPD indexekkel határolják körül, ahol a PMV (predicted mean vote) az átlagos komfort előrejelezhető értékét, míg a PPD (predicted percentage dissatisfied) az adott paraméterek mellett magukat várhatóan elfogadhatatlannul érzők arányát jelenti.

A hőkomfortot – így a PMV-t is – egy hétfokozatú skálán –3-tól +3-ig értelmezzük: –3 (nagyon hideg), –2 (hideg), –1 (kissé hideg), 0 (kellemes hőérzet, semleges), +1 (langyos) +2 (forró), +3 (nagyon forró) [2].

A hőérzetet befolyásolja levegő érzett hőmérsékletén túl annak térbeli, időbeli eloszlása és változása, a levegő relatív nedvességtartalma, illetve a levegőben lévő vízgőz parciális nyomása, a levegő mozgásának sebessége és az emberi test saját hőszabályozása. A PMV érték kiszámolható a helyiség mérete, az ember anyagcseréje (metabolizmusa), az öltözködése, foglalkozása, a levegő mozgása és a páratartalom figyelembevételével.

A kellemes hőérzet az a tudati állapot, amely a természetes környezettel kapcsolatos elégedettséget fejezi ki. Ezt a komplexebb hőkomfortot egy háromfokozatú skálán értelmezzük: a 0. az a fokozat, amely komfortérzést ad,

a 1. fokozatban fázunk vagy melegünk van, nem érezzük kényelmesen magunkat, és a 2. az a körülmény, amelyben akár megbetegedés is létrejöhet [2, 3].

A termálkomfort kialakításához több, a belső tér hőmérsékletére jellemző értéknek kell teljesülnie. Ezeket a helyiség különböző pontjaiban mért hőmérsékletből lehet kiszámítani, amelyekből meghatározható a hőkomfort fokozata.

Az *effektív tervezett hőmérsékletet* (T_a) a helyiség közepén (egyenlő távolságra a falaktól és a padlótól, plafontól) mért T_0 hőmérsékletből és az ugyanabban a mérési pontban meghatározott légmozgás v_0 sebességéből határozzák meg:

$$T_a = T_0 - 7,66 \text{ °C} \cdot (\text{s/m}) \cdot (v_0 - 0,15 \text{ m/s}).$$

Itt a hőmérséklet értéket °C-ban, a levegő mozgásának sebességét m/s-ban adjuk meg.

A teljes testre érvényes hőkomfortot ugyanazon a függőleges vonalon a padlótól 0,1 m (T_{h1}), 1,1 m (T_{h2}) és 1,7 m (T_{h3}) magasságban mért hőmérsékletek átlagának (T_m [°C]) figyelembe vételével számoljuk. A helyiség komfortját befolyásolja még a helyiség és a helyiség középpontjában mért T_0 [°C] hőmérséklet eltérése ettől.

$$T_m = (1/3)(T_{h1} + T_{h2} + T_{h3}), \quad T = T_0 - T_m.$$

Ma már a szimulációs modellek figyelembe veszik az egyén ruházatát, foglalkozását, valamint a belső tér hőmérsékletét a helyiség különböző pontjaiban és a levegő mozgását [3, 4].

Légnyomás

Normál körülmények között a belső terekben a légnyomás megegyezik a külső légnyomással. Kivételt képez, amikor mesterségesen pozitív nyomást hozunk létre (pl. ^{222}Rn -mentesítés esetében). A belső terek hőmérsékletének függvényében a szennyező aeroszolok (nedves vagy száraz) koncentrációja hozzájárulhat a nyomás növekedéséhez.

A zárt térben a hőmérséklet változása, növekedése és csökkenése maga után vonja a belső térben a légnyomás növekedését és csökkenését. A légnyomás a mikroklíma-tényezők függvénye, amelyet a hőmérsékleten kívül a levegő mozgása és a páratartalma is befolyásol.

Térfogat

Adott belső tér térfogatát a falak és az ajtók, ablakok, mélyedések elhelyezése határozza meg, és állandónak tekinthető. V -vel jelöljük és m^3 -ben fejezzük ki.

Páratartalom

A levegő nedvessége, páratartalma nagy mértékben befolyásolja a komfortérzetet. A levegőben mindig van pára, legfontosabb forrása az emberi, állati és növényi metabolizmus, illetve a háztartásban használt víz párolgása.

A gyakorlatban a relatív nedvességet mérjük (ϕ [%]), amely megadja, hogy a vizsgált térfogatú levegőben levő víz tömege hányad része annak a vízgőztömegnek, amely az adott hőmérsékleten telítené a levegőt. A nedves levegő sűrűsége befolyásolhatja a belső tér légnyomását. A belső tér levegője megfelelő és egészséges, ha a levegő relatív nedvessége (relatív páratartalom) 30% és 60% között van [6]. Magas páratartalmú belső terekben (a relatív páratartalom >60%) páraelszívókat használnak, ha viszont száraz a levegő (a relatív páratartalom <30%), akkor párologtatókat szerelnek fel az egészséges légtér biztosításáért. Azokban a helyiségekben, ahol központi fűtés van, vagy klímaberendezést használnak, a levegő relatív páratartalma nagyon gyakran 30%-nál kisebb lesz, ami a légutak nyálkahártyájának kiszáradásával jár, és ez légúti megbetegedésekhez vezethet.

Légmozgás

A belső terek légmozgásának jellemzője az áramlási sebesség [m/s] és a levegőtérfogat cserélődési sebessége, amelynek jelölése ACR (air change rate) [$1/\text{s}$ vagy m^3/h]. A levegő cserélődését légrétegenként is mérjük. A kicserélődés értéke a padlótól felfelé legtöbbször növekedést mutat kb. 1 m magasságig, majd tovább felfelé állandó marad.

A belső tér komfortnak megfelelő levegőcseréje irodahelyiségekben vagy zsúfolt termekben 0,35 ach (air changes per hour, óránkénti légcserezszám), a lakásokban 0,1 ach. Az ajánlott légsebesség 24°C hőmérsékletnél $0,15 \text{ m/s}$ a helyiség padlójától mért 1,8 m magasságig és az oldalfalaktól $0,15 \text{ m}$ távolságig terjedő zónában [5, 6].

A légmozgások függenek a külső meteorológiai viszonyoktól, a külső és belső hőmérsékletek különbségétől, az épület állagától, az ajtók, ablakok záródásától, a szellőztetés gyakoriságától és az emberek életvitelétől, szokásaitól. A nem megfelelő légcsere a belső tér szennyezettségéhez vezet, növelheti a hőmérsékletet és a páratartalmat.

A belső tér levegője mozgásának meghatározására három módszer ismert: a szimulációs számítás, a kísérleti eljárás, amely mesterségesen bevitt, különböző méretű részecskék mozgásának megfigyelésén alapul, és a CO_2 -koncentráció megfigyelése. A leggyakrabban alkalmazott módszer a CO_2 koncentrációjának követése, amelyet *Max von Pettenkofer* (1818–1901) dolgozott ki. Ő a légcserét, a levegő tisztaságát és a CO_2 koncentrációját vizsgálta. A külső levegőben a CO_2 -koncentráció $\sim 400 \text{ ppm}$, a lakásokban $\sim 900 \text{ ppm}$, és az előadótermekben még magasabb értéket is elérhet. Szerinte egészségügyi okokból a CO_2 megengedett koncentrációja mint a „jó levegő” kritériuma legfeljebb $\sim 1000 \text{ ppm}$ lehet. Sokáig a Pettenkofer-féle érték volt az irányadó a belső terek CO_2 -tartalmával kapcsolatban. A mai szabványok 1500 ppm koncentrációt engednek meg a belső tér levegőjében.

A minőségi követelmények és a szennyezőanyag-terhelés alapján megbecsülhető a belső levegő megfelelő frissítéséhez szükséges friss levegő térfogatárama. A komfortos és egészséges állapothoz szükséges légmozgás:

$$Q_c = \frac{G}{C_{cj} - C_0} \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \quad Q_h = \frac{G}{C_{hj} - C_0} \cdot \frac{1}{\varepsilon},$$

ahol Q a légcseré sebessége [$1/\text{s}$], G a szennyező anyag kibocsátásának sebessége [g/s], C_j a megengedett koncentráció [g/l], C_0 a külső levegőben mért érték [g/l], és ε a ventiláció hatásfoka (Pettenkofer-szám) [%], amely ideális szellőzésnél $\varepsilon = 100\%$. Itt a c indexek a komfortra, a h indexek az egészségre vonatkoznak – mindkét minőségi elvárásra képezhető a minimális szellőzési igény.

A szellőztetés történhet természetes úton egyszerű ablak- és ajtónyitással vagy mesterségesen, elszívók, ventilátorok segítségével. A kötelező levegőcsere, a szellőztetés az adott helyiség tulajdonságaitól függ [7].

2. táblázat. A helyiség komfortszintje a CO_2 -koncentráció függvényében

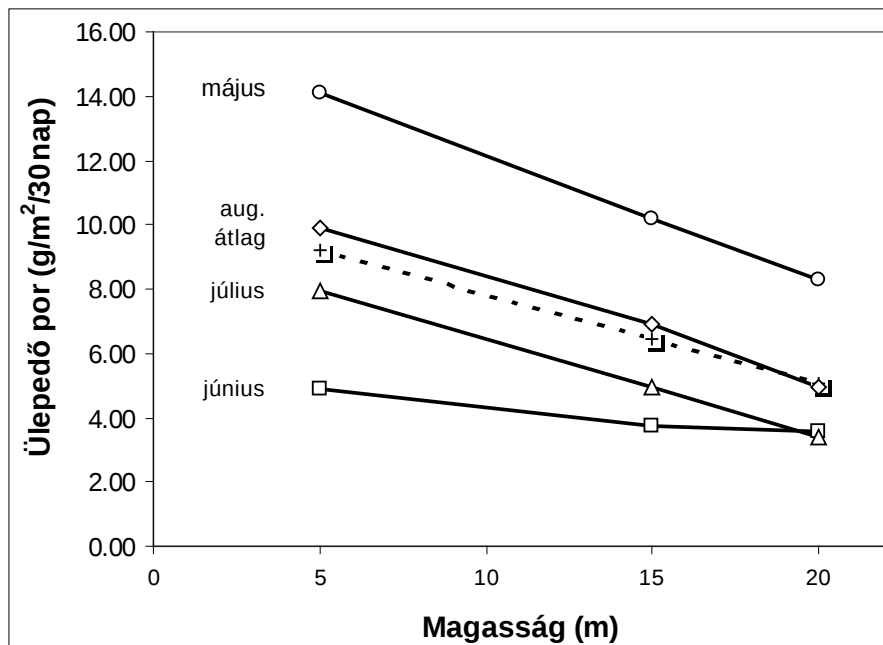
A helyiség komfortszintje	A megengedett CO_2 -koncentráció a külső levegőben mért érték felett [ppm]
A – magas	300
B – közepes	500
C – alacsony	800

A belső környezet egyik legszennyezőbb forrása a cigarettafüst, ami a szükséges légcseré kiszámításához is alapul szolgált.

A belső terek fizikai szennyezői

Aeroszol, por

1 cm^3 -ben 250–500 részecske (aeroszol) van a legtisztábbnak tartott levegőben is. Ha a természetes összetevőkön kívül idegen anyag kimutatható, a levegő szennyezett.



1. ábra. Az ülepedő por mennyisége a felszíntől mért eltérő magasságokban és különböző hónapokban

3. táblázat. Az egészséges levegőhöz szükséges légcsera a dohányzás figyelembe vételével [11]

A helyiség komfort-szintje	Kötelező légcseresebesség [l/s személyenként]			
	Nincs cigarettázó	Cigarettafogyasztása*		
		20%	40%	100%
A – magas	10	20	30	60
B – közepes	7	14	21	42
C – alacsony	4	8	12	24

* Átlagos cigarettafogyasztás: 1 cigaretta/óra (Európában 1,2 cigaretta/óra), ha minden bent tartózkodó ennyit fogyaszt, akkor érvényes a 100%.

Az aeroszolok egy része a külső környezetből származik, amely levegőáramlással, valamint ruházattal, cipővel kerül a belső térbe. Mértékét a szellőztetés gyakorisága, az épület helyi koordinátái és az emberi tevékenységek befolyásolják.

Az aeroszolok lehetnek száraz, gáz vagy cseppfolyós halmazállapotúak.

A száraz aeroszol a *por*. Átmérő szerinti osztályozása (feltételezve, hogy a részecskék gömb alakúak): ha 10 μ m-nél nagyobb, akkor *ülepedő*, és ha kisebb, akkor *lebegő* vagy *szálló* pornak nevezik.

Az *ülepedő por* a gravitációs erő hatására közel állandó sebességgel (3 mm/s) lerakodik a padlóra, bútorokra. Ezek a részecskék lokálisan szennyeznek. Ezt az időegység alatt 1 m² területegységre leülepedő anyagmennyiség jellemzi, mértékegysége [g/(m²s)].

Az alapszint 0,1 és 1 g/m²/hónap között van (természetes porszint). Az egészségre káros ülepedő pormennyiség figyelmeztetési szintje 4 g/m²/hónap.

A külső légtérből a belső térbe diffundáló por ismeretéhez szükséges a külső levegő mennyiségi és minőségi tanulmányozása is. Egy ilyen mérés során három éven keresztül mértük a külső és belső terek levegőjében a lerakódó és a lebegő port Kolozsvár 12 gyűjtőpontjában¹ [10]. A város területén tömbházakban, magánházakban, mind a zöldövezetben, mind a forgalmas és kevésbé forgalmas utak közelében mértünk, 1,5 és 3–5 m-re a talajtól.

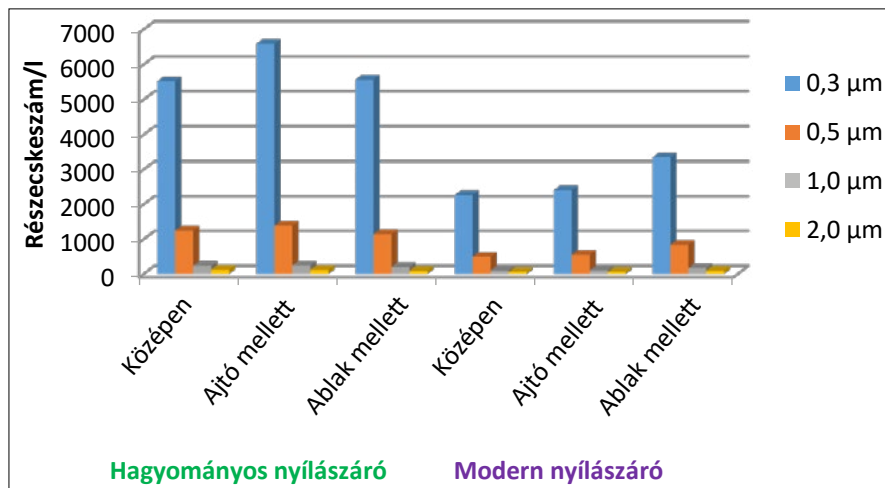
Azokban a mintavételi pontokban adódott az ülepedő por mennyisége legmagasabbnak, ahol útjavítás, építkezés és intenzív közlekedés volt (a legmagasabb 18,4 g/m²/hónap), a legalacsonyabbat (2,47 g/m²/hónap) a zöldövezetben mértük. A nyári hónapokban 1,73-szor magasabb volt a leülepedett por mennyisége (átlagosan 7,73 g/m²/hónap), mint a téli hónapokban (4,46 g/m²/hónap).

A három hónaponként összegyűjtött porból meghatároztuk az ólom (Pb), a kadmium (Cd), a cink (Zn), a nikkel (Ni) a réz (Cu) és a vas (Fe) koncentrációját.

A réz (40 $\pm$ 1,4 és 148 $\pm$ 5,2 mg/kg között), az ólom (162 $\pm$ 6 és 2734 $\pm$ 86 mg/kg között) antropogén eredetű, és nagyobb méretű porrészecskékhez kötődik leginkább. A legmagasabb értékeket mindkét elemre nézve évszaktól függetlenül a trolibuszvonalak mentén mértük. A porminták Ni- és Cd-tartalma gyakorlatilag a mintavétel helyétől független volt.

A 10 emeletes ház különböző emeletein mérve az ülepedő por emelet-magasság szerinti eloszlása jó megközelítéssel lineárisan változott, és különbözőnek adódott a különböző hónapokban (1. ábra).

¹ A szerző munkatársaival több éven át folytatott méréseket Kolozsvár számos pontján és sok lakásában. A mérések eredményeit e dolgozat hosszabb, a *Fizikai Szemle* honlapjára feltöltött változatában mutatjuk be. A cikk jelen változata a mérések eredményei közül a más helyre is általánosítható eredményeket tekinti át röviden.



2. ábra. A földszinti lakások szállópor-koncentrációja hagyományos és modern nyílászárókkal. A cigarettázás mindenütt komolyan rontja a belső terek levegőjének minőségét. Két azonos méretű (75 m³), központi fűtéssel, modern nyílászárókkal ellátott lakás egyikének szobájában még mérés közben is cigarettáztak, a másikban nem. Abban a szobában, ahol cigarettáztak, a porkoncentráció háromszor (0,3 µm méretű), tizenegyszer (1,0 µm), illetve tizenháromszor (5,0 µm) volt magasabb, mint a nem dohányzó helyiségekben

A külső *üledő* porgyűjtők közvetlen közelében választottuk ki a lakásokat az üledő és szálló por mennyiségének meghatározására. A méréseket az EU-ajánlásoknak megfelelően december és január hónapokban végeztük, párhuzamosan a külső porok begyűjtésével. A két hónap alatt összegyűlt papírporszokok tartalmában sűrű szitálással elválasztottuk az egyéb anyagokat (szálas, darabos részek) a finom szemcsés portól; majd elemeztük az átlagolt minták fémtartalmát. Az eredmények azt mutatják, hogy a háztartási porok ólomtartalma (átlagban 147 ± 15 mg/kg) arányos a külső porban mért ólomtartalommal (180 ± 32 mg/kg). A többi nehézfém esetében nem találtunk szignifikáns eltérést a kinti és benti értékek között.

A *szálló por* (aeroszol) a levegőben lebegő szilárd és cseppfolyós részecskék halmaza, amelyek átmérője a 0,01–10 µm-es mérettartományba tartozik. A gravitációs erő hatására csak igen lassan ülednek, a levegő gázaival együtt mozognak. A mozgásuk irányát és a megtett távolságot a belső tér paraméterei befolyásolják, úgymint a páratartalom, a levegőmozgás sebessége és iránya. Azokat a részecskéket, amelynek átmérője 10 µm-nél kisebb, PM₁₀-zel és a 2,5 µm-nél kisebbeket PM_{2,5}-del jelöljük (a PM a particulate matter angol kifejezés betűrövidítése). A PM₁₀-es durva részecskék belélegezve a felső légutakba, a PM_{2,5} finom porszemcsék a tüdő mélyébe jutnak, amelyek egy része lerakódik, mások felszívódnak, és a vérkeringésbe kerülnek.

A szálló por koncentrációját hordozható mérőműszerrel határoztuk meg a külső és belső levegőben 30 l levegőből. A külső környezetben a mérési pontok 1,5 m-re voltak a járdaszintől, miközben mértük az átmenő autóforgalmat is. A mérési eredmények bizonyították, hogy a szálló pornak egyik fő forrása a közlekedés.

A lakótérbe több úton kerül be por (szálló por, behordott por). Ezek mennyiségét a lakott környezet állapota (tisztított közterek, a járműforgalom intenzitása stb.), a meteorológiai viszonyok (száraz vagy esős, havas idő) határozzák meg. A szilárd por elsősorban a cigarettafüstből, a gáz halmazállapotú a berendezésekből kiáramló illóolajokból, a cseppfolyós pedig az ember által kibocsátott aeroszolokból származik. Ez utóbbiak mennyisége függ a lakók számától és szokásaitól (a takarítás gyakorisága, a szellőztetések frekvenciája, időtartama stb.)

A kolozsvári földszinti lakásokban mért szálló por tulajdonságai igazolták, hogy a por legnagyobb részt külső forrásból ered, és elsősorban a nyílászárókon keresztül jut a belső térbe. Azt találtuk, hogy ahol percnként több mint 40 autó halad el, és még építkezés is folyt, akár 2 nagyságrenddel is több beltéri porrészecske volt mérhető, mint egy kis forgalmú (percnként kevesebb, mint 20 autó) utcában levő zöldövezeti lakásban. A magasabban fekvő emeleti lakásokban a szálló por koncentrációja lényegesen alacsonyabb volt, mint a földszinten. Minden belső térbe a legkisebb méretű (esetünkben 0,3 µm) porból érkezett a legtöbb; ez jelentősen csökkent a megfigyelt legnagyobb méretű (10 µm) részecskecsoporra.

A folyamatban meghatározó szerepet játszanak a nyílászárók (2. ábra). A hagyományos nyílászárókon keresztül általában háromszor annyi por jut be a lakásokba, mint a modern, jól illeszkedő nyílászárókon keresztül.

Az ember mint a belső terek szennyezőforrása

Az ember jelenlétével természetesen hozzájárul a belső terek szennyezéséhez. A szennyezés mértékét és hatásait azonban csak a fizikai paramétereken túlmenő mennyi-

ségekkel, körülményekkel lehet jól meghatározni; és az is túlnyúlik a fizikán, hogy milyen kívánatos paraméterértékekkel tudjuk a belső terek minden szempontból komfortos és egészséges leírását megadni. Ezen kérdések mélyebb elemzésébe nem megyünk bele, de röviden ismertetjük azt, hogy milyen, a fizikában kevésbé ismert mennyiségek helyes beállításával juthatunk előbbre a kívánatos környezet kialakítása terén.

A belső térben tartózkodó emberek testének hőmérséklete megváltoztatja a tér levegőjének hőmérsékletét. A mintegy $37 \pm 0,5$ °C-os test hőt ad le és vesz fel az aktivitása szintjének függvényében konvekció (30–32%), sugárzás (41–44%) és párolgás (21–26%) útján. A személyenként 100 és 400 W között felszabadult hő felveszi a beltéri levegő, és ez hozzájárul a hőkomfort kialakításához. A hőleadási formák arányai változnak a belső tér levegőjének hőmérséklete, páratartalma, mozgása és az ember tevékenységének függvényében.

Az ember energialeadásának mértékegysége a met (metabolic equivalent of task). Ezzel lehet kifejezni, hogy egy megadott tevékenységnél milyen az energialeadás a nyugalmi állapothoz képest. Nyugalmi állapotban 58 W/m² hőt ad le egy átlagember. Az átlagember testfelülete ~1,8 m². A test fedettsége, ruházata is befolyásolja a hőleadást vagy hőfelvételt. A ruházat hőszigetelésének mértékegysége a clo (clothing insulation). 1 clo az a szigetelés, amely egy embert 21 °C hőmérsékleten nyugalomban éppen hőmérsékleti egyensúlyban tart.

A hőleadás intenzitásával kapcsolatban állhat az ember által kibocsátott szennyezőanyagok, szaganyagok mennyisége is. Az ezt mérő olf mértékegységet a korábban említett Ole Fanger fizikus vezette be. 1 olf szennyező anyagot termel egy ülőmunkát végző átlagos felnőtt ember (180 cm magas, 70 kg), ha termikus egyensúlyi állapotban van, egészséges, és átlagosan tisztálkodik (0,7 fürdés/nap). Egyszerű becsléssel ellenőrizhető, hogy 1 clo = 155 m²·K/kW.

4. táblázat. Az ember okozta szennyeződés belső térben			
Foglalkozás	Hőleadás [met]	Egyéni terhelés*	Szennyezés [olf/személy]
Ülő állapot, gyenge fizikai munka	1–1,2	0% cigarettázó	1
		20%	2
		40%	3
		100%	6
Fizikai munka	3	könnyű	4
	6	közepes	10
	10	nehéz	20
* Átlagos cigarettázó: 1 cigaretta/óra (Európában 1,2 cigaretta/óra), a 100% minden órában egy elszívott cigarettát jelent			

Ha a belső térben a levegő térfogatáramlása 10 l/s (36 m³/h), és az ember okozta szennyezés 1 olf, a levegő minősége 1 decipol.

$$1 \text{ decipol} = \frac{1 \text{ olf}}{10 \text{ l/s}}.$$

A decipol a fizikában szintén nem ismert egység, ez az érzékelhető levegőminőség mértékegysége (a mérőszám a szennyezéssel nő).

A belső levegő minőségi követelményei és a szennyezőanyag-terhelés alapján kiszámolható a levegőminőség szinten tartásához szükséges friss levegő térfogatárama [7, 11]

$$V = \frac{K}{C_b - C_k} \cdot \frac{1}{\varepsilon},$$

ahol V a légcseré sebessége (térfogatárama, most 10 l/s egységekben), K a szennyezőanyag (-források) összessége [olf], C_b a belső levegő minősége [decipol], C_k a külső levegő minősége [decipol], ε a levegőkeveredés, a szellőzés hatékonysága (jól szellőző tereknél ~100%). Nyomgáz-módszerrel megállapítható az egyes helyiségekre jellemző decipol érték.

5. táblázat. A külső levegő minősége különböző földrajzi helyeken	
Hely	Minőség [decipol]
Hegyekben, tenger mellett	0,05
Városokban	
Jó levegő	0,1
Közepes levegő	0,2
Gyenge levegő	0,5

6. táblázat. A belső tér osztályozása a szennyezettség figyelembevételével	
A helyiség komfortszintje	Minőség [decipol]
A – magas	0,7
B – közepes	1,4
C – alacsony	2,5

A belső környezetet meghatározó fizikai paraméterei (hőmérséklet, légmozgás, relatív páratartalom) és az ember által okozott szennyezettség (az egyén foglalkozása és öltözete) értékei széles intervallumokban szórhatnak a helyi sajátosságok függvényében. Az effajta számítások elősegítésére például 2023-ban a Berkeley Egyetem CBE (Center for a Built Environment) intézete kidolgozta a Thermal Comfort Tool programot (az ASHRAE-55 szabvány szerint), amely segítségével meghatározható a hőkomfort [12].

A szennyezett belső tér okozta egészségkárosodás

A belső térrel foglalkozó kutatók és orvosok megfogalmazták a nem megfelelő minőségű belső térben tartóz-

kodóknál észlelt hatást mint különböző tünetek együttesét. Két elkülönített fogalom járul a nem megfelelő belső terek okozta betegséghez:

- „betegépület-szindróma”, SBS (sick building syndrome), azaz egy „épületi tünetegyüttes”, valamint
- „épülettel összefüggő betegség”, BRI (building-related illness).

A két fogalom közötti különbség a diagnosztizálásban van. Az SBS esetében feltételezzük, hogy az egyéneknél jelentkező tünetek, tünetegyüttesek a nem megfelelő minőségű belső tér hatásaként jelentkeztek, és annak elhagyásával elmúlnak; a BRI viszont klinikailag igazolt betegség, amelynek oka a belső tér rossz minősége. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) 1984-es jelentésében már az áll, hogy a tünetek, illetve a megbetegedések 30%-a a belső terek nem megfelelő minőségének tudható be. A WHO által megjelölt SBS-tünetek a következők: fejfájás, szem-, orr- és torokirritáció, száraz köhögés, száraz és viszkető bőr, kábultság, szédülés, hányinger, gyenge koncentrációs képesség.

Az Európai Bizottság felkérésére – a Tiszta Levegőt Európának (Clean Air For Europe, CAFE) folyamat részeként – átfogó elemzés készült a légszennyezés környezetre és emberi egészségre gyakorolt hatásairól [13].

Összefoglalás

1. A dolgozatunk célja felhívni a figyelmet azokra a fizikai tényezőkre, amelyek befolyásolják az egészséges belső terek, lakások környezetét és komfortérzetét.
2. A lakásokban végzett mérések a mikroklima paramétereire, a tiszta levegő biztosításához szükséges légcserére, valamint a por és az ember okozta szennyeződésre fókuszáltak.
3. Az eredmények bizonyítják, hogy minden lakásnak és lakóinak komfortjához külön értékelés szükséges. Ez kiindulópontja lehet egy összetett kutatásnak. Az eredmények egy program létrehozását tennék lehetővé, amely a mi sajátos éghajlatunkat, építkezéseinket, építőanyagainkat és fűtési szokásainkat venné figyelembe a hőkomfort mint a komfort fő eleme értékének megállapításánál.

Irodalom

1. WHO, „Household air pollution”, 2023. december 15.
2. International Standard Organization, ISO/DIS 7730-2015 (helyettesíti a 7730-2005), Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local comfort criteria.
3. Fanger P. O. (1970): Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York.
4. Bánidi L. (1976): Zárt terek hőérzeti méretezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
5. Bánhidi L., Kajtár L., Szabó J. (2011): Zárt terek komfortkövetelményei – méretezési alapok MSZ CR 1752 és EU 15251, 2011 december 20.
6. Wolkoff P. (2018): Indoor air humidity, air quality, and health. Int. J. Hyg. Environ. Health, 221(3), 376–390.
7. Küçükhüseyin Ö. (2021): CO₂ monitoring and indoor air quality. REHVA, 1, 54–59.
8. Mócsy I., Kékedy-Nagy L. (2013–2014): A por mint mindennapos környezetszennyező. Acta Scientiarum Transylvanica, 21–22/3, 42–51.
9. Farkas Gy., Mócsy I., Nagy K., Neda T., Szigyártó L., Zsigmond A. (2010): A belső tér szennyezői. Ábel Kiadó, Kolozsvár, ISBN 9789731141145
10. Kékedy-Nagy L., Mócsy I., Darvasi E., Zsigmond A. (2008): Assessment of atmospheric dust pollution in Cluj-Napoca. In: International Conference on Metrology of Environmental, and Nutritional Measurements, Budapest, ISBN 978-963-9319-83-7, p. 10
11. Roelofs P. (2018): A new methodology for the evaluation of the perceived air quality depending on the air pollution, caused by human bioeffluents, the temperature, the humidity as well as the air velocity. Intelligent Buildings International, 10(39), 154–161.
12. CBE hőkomfort szerszám az ASHRAE-55-höz
13. Joshi S. M. (2008): The sick building syndrome. Indian J. Occup. Environ. Med., 12(2), 61–64.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jelen van a  -on!



<https://www.facebook.com/people/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/100057390380604/>

PÁPA ZSUZSANNA L'ORÉAL-UNESCO ÖSZTÖNDÍJAS

Ötvös Zoltán

ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

E-mail: Zoltan.Otvos@eli-alps.hu



Pápa Zsuzsanna

Pápa Zsuzsanna 2007-ben a mohácsi Kisfaludy Károly Gimnáziumban érettségizett. 2012-ben a Szegedi Tudományegyetemen szerzett mesterszakos fizikus-diplomát. Ugyanitt PhD-fokozatot kapott 2017-ben. 2018-tól tudományos munkatárs az ELI ALPS-ban. Elismerései: Junior Prima Díj magyar tudomány kategóriában (2021), Bárány Róbert-díj (2022), Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (2024), L'Oréal-UNESCO A Nőkért és a Tudományért Magyar Ösztöndíj (2024).

★ ★ ★

Pápa Zsuzsanna 2024 szeptemberének végén a L'Oréal-UNESCO A Nőkért és a Tudományért Magyar Ösztöndíjat vehette át. Zsuzsit, korosztályának egyik ígéretes képviselőjét, az ELI ALPS tudományos munkatársát pályájáról kérdeztük.

Hogyan élted meg a hirtelen jött népszerűséget?

Készültem rá, mégis meglepetésként ért a számtalan megkeresés. Noha az utóbbi években valóban több szakmai díjat kaptam, ezekre kutatóközösségünk elismeréseként tekintek. Remélem, hogy rajtam keresztül a fizika, a fizikusszakma sokak érdeklődését felkeltette. A pályaválasztás előtt álló lányoknak talán feltűnik, hogy nőként is sikeres lehet valaki a tudományos életben. Ha az érintettekhez eljut az üzenet, hogy mi is boldogulhatunk ezen a pályán, hogy a gyermekvállalás miatt nem feltétlenül kell kiesünk a szakmánkból, akkor már megérte. Ha a tévhiteket a hozzám hasonló példákkal cáfolhatjuk, akkor az elismerések messze túlmutatnak rajtunk.

Lehet, hogy naiv kérdésem, de a fizikában van annak jelentősége, hogy az adott kutató nő vagy férfi?

A szakmában nem, de a nagyközönségben élhet az a sztereotípia, hogy a fizikusok inkább férfiak. Valóban sokkal több férfi dolgozik a pályán, de ez nem jelenti azt, hogy nőként bármilyen negatív megkülönböztetésben lenne részünk; vagy legalábbis úgy gondolom, hogy ez egyre kevésbé jellemző. Én sohasem éreztem annak hátrányát, hogy nő vagyok. Éppen ellenkezőleg, mindenki szívesen beszélt velem szakmai kérdésekről. Mindig úgy éreztem, hogy a férfiak egyenrangú partnereként kezelnek.

Miért választja mégis kevés nő ezt a pályát?

Ma is tetten érhető az a sztereotípia, hogy a műszaki és természettudományos pályák inkább a férfiaknak valók. Elképzelhetőnek tartom, hogy általában a férfagy alkalmasabb erre az irányra, de nagyon sok olyan nőt ismerek, aki kiváló matematikából, aki logikusan gondolkodik. Azt kell elérni, hogy az ilyen adottságú nők bátran válasszák a kutatói pályát. Ne hátráljanak meg azért, mert azt feltételezik, hogy nehézségekbe ütköznek. Aki érzi magában az erőt és a tehetséget, ne torpanjon meg, mert korábban valakitől rossz példát hallott.

Érdekes ezt attól hallani, aki nem is fizikusnak készült, hanem kalandvágyból, kíváncsiságból választotta ezt a szakot. Az érettségi előtti időszakról van olyan emléked, ami mégis megalapozhatta ezt az irányt?

Nagyon sok gyerek érdeklődik a csillagászat iránt. A szintén Szegeden végzett Kiss L. László, a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont főigazgatója mondta egy alkalommal, hogy a csillagászat kiválóan alkalmas arra, hogy felkeltsük az érdeklődést a természettudományok iránt. Nem biztos, hogy mindenki csillagász lesz, de elindul ebbe az irányba. Általános iskolás koromban engem is megbabonázott a csillagos égbolt látványa. Hobbítávcsovet kaptam, hogy az ablakból nézhessem a Hold felszínét. Megkerestem a csillagképeket, lestem az

üstökösöket. Emlékszem egy esti sétára, amikor a szüleim elmondták, hogy a csillagok borzasztó messze vannak, sőt, elképzelhető, hogy már nem is léteznek, csak a jóval korábban kibocsátott fényüket látjuk. Ez az információ szöveget ütött a fejembe.

A mohácsi Kisfaludy Károly Gimnáziumban sok minden érdekelt, a humán tárgyakat is szerettem. Éppen az jelentett problémát, hogy a szerteágazó érdeklődésemből adódóan sok mindennel foglalkoztam volna. Sokáig nem láttam, hogy mi lesz az én utam. Végzős gimnazistaként gondolkodtam el azon, hogy a matematika szeretete milyen pályákra tesz alkalmassá. A felvételi tájékoztatóban olvastam a fizikus szakról, ami a matematikára épül, de megannyi szállal kapcsolódik a mindennapi élethez, hiszen ilyen diplomával a zsebben az ember az adatelemzéstől a meteorológián át a csillagászatig sok mindennel foglalkozhat. Ez a nyitottság, a lehetőségek széles tárháza megtetszett. Az egyetemen azonban rájöttem, hogy napjaink csillagásza nem a Hold felszínét nézi, általában nem az égi objektumokban gyönyörködnek, hanem a munkájuk zöme adatfeldolgozás. Én végül más irányba indultam el.

A családban jelen volt a természettudományos gondolkodás, hiszen édesapád földrajz-biológia szakos tanár, édesanyád matematikus. Elvárás volt a természettudományos érdeklődés a részükről?

Szó sincs erről. A bátyám például közgazdász lett. Ugyanakkor tagadhatatlan, hogy ez a szemlélet áthatotta mindennapjainkat. Ha a világ működésével kapcsolatban kérdés merült fel bennem, válaszoltak rá.

Hogyan kerültél a Szegedi Tudományegyetemre?

A felvételi időszakban Pécs és Szeged között választhattam volna, de minden a Mohácstól jóval távolabb fekvő Tisza-parti város mellett szólt. Ott éltek rokonaim, illetve édesanyám is ott végzett. S ha már fizikus szakra mentem, akkor az országszerte elismert fizikaoktatás is Szeged mellett szólt. Az optika, a lézerfizika és a csillagászat nagyon erős volt, és most is az a napfény városában.

Úgy lettél fizikushallgató, hogy nem tettél emelt szintű érettségi vizsgát ebből a tárgyból. Könnyen behoztad az esetleges lemaradást?

Az első félév döntően arról szólt, hogy az egyetemistákat közös tudásszintre hozzák. Én olyan beugró dolgozatot írtam, hogy a felzárkóztató kurzust nem kellett elvégeznem. Kísérleti rutinom viszont nem volt, így azt az egyetem elején tanultam meg, hogy hogyan kísérletezzek, készítsék jegyzőkönyvet. Az első félév végére mindannyian közös nyelvet beszéltünk.

A felzárkózás olyan sikeres volt, hogy Szegedi Tudományegyetem másodéveseként egy kutatócsoport tagja lehettél...

Budai Judit figyelt fel rám. Laborgyakorlatot vezetett, és mint utólag kiderült, a jegyzőkönyveim mellett az

órai hozzáállásom is elnyerte a tetszését. Már akkor az volt a mottóm, hogy amit csinálok, azt jól csináljam. Alapos legyek, mindig olyan munkát adjak ki a kezemből, amire évek múltán is jó szívvel gondolok. Örültem a lehetőségnek, megtisztelőnek éreztem, hogy másodévesként feljárnak ezt a pozíciót. Megnéztem, hogy mivel foglalkoznak – leginkább az ellipszometriával –, és ott ragadtam. Az ellipszometria néven ismert vizsgálati módszerrel a fény segítségével nyerünk különböző anyagokról – leginkább vékonyrétegekről – információt. A beeső fény polarizációs állapotának változtatását egy ellipszissal szokás megjeleníteni. Innen ered az ellipszometria kifejezés. Mi azt néztük, hogy ez a polarizációs állapot hogyan változik a visszaverődés során.

Maga a mérés viszonylag egyszerű: egy készülékbe tesszük a mintát, amit az eszköz megvilágít, majd detektálja a visszaverődő fényt. Utóbbi elemzésével következtetünk a minta tulajdonságaira. Ebben az esetben az a nagy kihívás, hogy a polarizációs állapot megváltozásával próbáljuk megmagyarázni a vizsgált minta optikai és szerkezeti tulajdonságait. Tudományos nyomozásként is tekinthetünk erre a folyamatra. Egyetemistaként azt éreztem, hogy ebben a módszerben nagyon sok potenciál van, hiszen megannyi érdekes és egzotikus anyagi rendszert elemezhetünk a segítségével. Volt, hogy készen kaptunk mintákat vizsgáltunk, de olyan is előfordult, hogy mi készítettünk különleges rétegrendszereket. Az eszköz kezelése mellett azt is megtanultam, hogyan állíthatunk elő lézerrel vékonyréteget – ez impulzuslézeres vékonyréteg-leválasztási technikaként ismert. Felejthetetlen élményem, hogy az egyetemi tanulmányok végén, egy amerikai konferencián mutathattam be csoportunk eredményeit. Ott olyan kutatók jöttek hozzám, akiknek a nevét addig csak cikkeken láttam. A közösség támogató, pozitív légkörének köszönhetően ellipszometriából született meg a BSc- és az MSc-szakdolgozatom, illetve a PhD-disszertációm.

Mikor döntött el, hogy az egyetem befejezése után a kutatói pályát választod?

Fokozatosan alakult ki bennem ez a gondolat. Csoportunkban megismertem, hogyan épül fel egy kutatási program; megtanultam, hogy egy fizikai probléma megértésére hogyan tervezzük meg az azt értelmező kísérletet. A mérés után következik az adatok kiértékelése, megvitatása, publikálása. Egyre több dolgot tudtam önállóan elvégezni, ami sikerélményt jelentett. A kollégáim folyamatosan arra bátorítottak, hogy legyek kutató. Megért bennem, hogy ez valóban az én utam. Azt reméltem, ha a pályán maradok, folytatódnak ezek a pozitív élmények. Az eredmények erősítettek abban, hogy talán van keresnivalóm ezen a területen. Azt azonban a legmerészebb álmaimban sem gondoltam, hogy majdan ilyen lehetőségeim lesznek. Logikus lépésként PhD-hallgató lettem.

A pályaválasztásodat mennyiben befolyásolta, hogy akkor már épült az ELI ALPS?

A lézeres kutatóközpontról szóló első híreket az egyetemi tanulmányaim közepén hallottam. Úgy voltam vele, hogy ugyan tanultam lézerfizikát, de én nem lézerfizikus vagyok, hanem az optikai módszerek érdekelnének igazán. Csakhogy a lézerek működtetéséhez, a nyalábvonalak irányításához rengeteg tükröt kell, amelyek közül sok különféle vékonyréteggel van bevonva; így akár az ellipszometriai tudásomra is szükség lehet itt. PhD-hallgató koromban jelentek meg az első álláskiírások. 2015-ben optikai elemek minősítésére hirdettek állást. Jelentkeztem, de végül nem oda, hanem Dombi Péter csoportjába kerültem kutatónak. Az ő ajánlására dolgoztam 2017-től 2024-ig a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban.

Az Ultragyors Nanooptika „Lendület” Kutatócsoport tudományos munkatársaként mi volt a feladatod?

A kísérleti eredményeket támogató szimulációkat végeztem, illetve az adatok értelmezését segítettam diszkusziókon keresztül. Kisméretű rendszereknél azt kutattuk, hogy miként viselkednek, ha fénnel világítjuk meg azokat. Ha intenzív lézerfelvillanásokkal világítunk meg valamilyen alkalmas mintát, abból elektronok lépnek ki. Ezeknek az elektronoknak a detektálásából visszakövetkeztethetünk arra, hogy a minta környezetében milyen, úgynevezett közelterek alakultak ki. Ez ugyan más, mint az ellipszometria, de mivel sokat tudok a különböző anyagok optikai viselkedéséről, ez hasznos tudásnak bizonyult a nanooptikai kutatásokban.

Tapasztalataid szerint milyen tulajdonságok kellenek ahhoz, hogy valakiből jó fizikus legyen?

Az egyik az újdonságkeresés iránti vágy. Azt vallom, hogy az embernek időről időre új ismereteket kell szereznie. Váltania kell, hogy megőrizze a kíváncsiságát. A kutatói lét egyik jellemzője, hogy ha igazán új eredményt akarunk elérni, akkor új módszereket is el kell sajátítani. Nem elégedhetünk meg azzal, hogy egy eljárást tizenöt-húsz hasonló helyzetben alkalmazunk.

Nekem sokszor segített a jó memóriám. Évekkel korábban kidolgozott módszerekre vagy olvasott cikkekre visszaemlékezve általában viszonylag gyorsan találok megfejtést egy-egy felvetésre. A fizikus szakma másik alapeleme a kritikus gondolkodás. Szülessen bármilyen eredmény a kísérletek során, azt górcső alá kell venni. Reális az eredmény, vagy sem? Ne higgyünk el mindent első blikkre! Ha több oldalról meggyőződünk az igazunkban, akkor álljunk elő az eredménnyel! Ezt a szemléletet nemcsak itt lehet alkalmazni, hanem az élet megannyi területén hasznos lehet. Az elvárt készségek mindegyike azonban szinte senkiben sincs meg. Ezért alakult ki az a helyzet, hogy a kutatók csoportokban dolgoznak. Mindenkinek megvan a maga erőssége. Ha ezt az erősséget testhez álló feladatokkal sikerül kiaknázni, akkor csoportszinten zseniális eredmények szülehetnek.

Mit tartasz a legfontosabb eredményednek?

Két példa jut eszembe. Budai Judittal 2022-ben megjelent közös munkánkban a nanooptikai vizsgálatokhoz kapcsolódó plazmonikai kutatást kombináltuk az ellipszometriával. Ilyen megközelítéssel előtűnt senki sem próbált információkat szerezni. Mi aranyrétegben plazmont gerjesztettünk, azaz kollektív mozgásra bírtuk annak elektronjait, közben ellipszometriával az arany optikai tulajdonságainak változását néztük. Ebből nagyon sok alapvető információhoz jutottunk. Ezt az eredményt az egyik legnagyobb presztízsű tudományos lapban, a *Nature Communications*-ben publikáltuk.

A másik példa szintén szegedi eredmény. Az ELI ALPS nanofabrikációs laborja részben külső kutatók által kitalált programokhoz készített speciális – általában néhány nanométeres – mintákat, amelyekkel a pályázó kollégák megfigyelhetik a számukra izgalmas jelenségeket. A Grazi Műszaki Egyetem munkatársai különleges mintát kértek, amivel Grazban elvégezték a kísérletet. Szerencsére itt nem állt meg az együttműködés, mert megosztottak velünk egy furcsa anomáliát, amire nem találtak magyarázatot. Nekem ugrott be egy ötlet, amiről utóbb kiderült, hogy valóban azzal írható le a szokatlan jelenség.

Most milyen kérdések foglalkoztatnak?

A legfontosabb újdonság, hogy új szerepbe kerültem. Pár évvel ezelőtt még nekem volt témavezetőm, most nemem van két PhD-hallgatóm. Társtémavezetőként arra törekszem, hogy minél nívósabb munkát végezzenek a doktoranduszok. Az egyikük munkája az ELI ALPS-ban épített ultragyors ellipszométerhez kötődik. Ezzel a berendezéssel azt is látjuk, hogy a gyors felvillanással megvilágított mintáknak hogyan változnak az optikai tulajdonságaik. Ezekből az információkból a minta elektronrendszerének a változására következtethetünk. Másik hallgatóm fő eszköze a pásztázó közeltermikroszkóp. Ő a nanostruktúrák környezetében kialakuló téreloszlásokat térképezi fel. Egészen pontosan a királis viselkedésű molekulákkal – ilyenek az aminosavak és a cukrok – analóg fémszerkezeteket elemez.

Megértél arra, hogy saját kutatócsoportod legyen?

Az egyértelmű, hogy képes vagyok távlatokban gondolkodni, nem akadok le mellékszálakon. Tudom, hova szeretnék eljutni. Ez a képesség talán alkalmassá tehet arra, hogy később több ember munkáját koordináljam. Erre adhat esélyt egy olyan nemzetközi pályázat, amely nagyobb összeggel támogatja a saját kutatásokat. Ugyanakkor azt is látom, hogy egy ilyen pozíció hatalmas felelősség. Azaz évek múlva esetleg szó lehet erről, de most minden úgy jó, ahogy van. Vannak hallgatóim, saját kutatásaim, de még sincs rajtam az a felelősség, ami hat-nyolc ember napi munkájának koordinálásával jár. Mondom ezt annak ismeretében, hogy a kisfiam éppen elkezdte a bölcsődét. Én most kutató és anyuka is akarok lenni.

A férjed, Major Balázs szintén az ELI ALPS fizikusa. Hol találkoztatok?

Az egyetemen ismerkedtünk meg. Már ott kiderült, hogy mindketten nagyon ambiciózusok vagyunk. Ezeket az ambíciókat időnként nehéz összehangolni, de eddig mindig sikerült. Nem kell elmagyarázni a másiknak, hogy mivel jár ez a munka, hiszen a másik fél is azt csinálja. Különböző területeken dolgozunk, ennek ellenére ötletekkel segítjük a másikat. Éppen az eltérő nézőpont segíthet egy-egy probléma megválaszolásában. A saját kutatásaink is haladnak, miközben mindent megteszünk azért, hogy a kisfiunkkal a lehető legtöbb időt töltsünk. Hat hónapos kora óta hétköznapiakon is felváltva otthon voltunk vele. Hogy hogyan? Mindketten részmunkaidőben dolgozhattunk az intézetben. Ehhez kellett az ELI ALPS vezetésének a rugalmassága, támogatása – ami logikus lépés egy családbarát munkahelytől.

Példaképként tekintenek rád a fiatalabbak?

A médianyilvánosságot arra szeretném felhasználni, hogy a fiatalok lássák, vannak olyan kutatók, akik családos nőként is sikeresek. Ráadásul úgy, hogy az élet egyetlen területét sem kell jelentősen háttérbe szorítani. Érettségi táján nem tudtam, tudhattam, hogy a kutatói lét mivel jár, de azt hiszem, ahova eljutottam, az messze meghaladja akkori álmaimat. Ha a mostani középiskolások közül egy-két lány elgondolkodik a példámon, már érdemes volt elindulni ezen az úton.

A L'Oréal-UNESCO A Nőkért és a Tudományért Magyar Ösztöndíj egyik célja, hogy a díjazottak érthetően beszéljenek a tudományokról. Egyik interjúdban em-

lítettél, hogy olykor te is azon kapod magad, hogy a szakzsargont használod. Eladható szakszavak nélkül a modern tudomány?

Erre kell törekedni, hiszen a fizika körülvesz bennünket. Fizikai oka van a szívdáványnak, az égi jelenségeknek, hogy miért nem ég az egyik izzó a karácsonyfán, illetve hogy miként működnek a mobiltelefonok. Nekünk sokat kell tennünk azért, hogy a tudománnyal szemben az átlagemberekben meglévő ellenérzés csökkenjen. Be kell bizonyítanunk, hogy a fizika sem olyan bonyolult, igenis megérthető. Rá kell venni az embereket, hogy rácsodálkozzanak a világra. Ezt segítjük az ELI ALPS-nál, illetve az országosan sok egyéb kutatóintézetben megszervezett nyílt napokkal. Ehhez persze olyan fizikusok kellenek, akik szívesen és közérthetően beszélnek a munkájukról.

Végül megismétlem a bevezető kérdést: hogyan élted meg a hirtelen jött népszerűséget?

Ilyen helyzetben könnyű elkényelmesedni, de én ezt próbálom elkerülni. Nem dőlhetek hátra. Ha egyszer érdemesnek találtak ezekre az elismerésekre, akkor úgy akarom folytatni a munkámat, hogy utólag senki se mondhassa, hogy visszaesett a teljesítményem. A kutatói lét ugyanis speciális versenyfutásnak is tekinthető. Ahhoz, hogy az élvonalba kerülj, és ott is maradj, folyamatosan nívós lapokban publikált eredményekkel kell előállni. Ehhez természetesen az is kell, hogy jó szemmel észrevedd az ígéretes témákat. Alapvető számomra, hogy a munkám során nem a rutin, hanem az állandó rácsodálkozás visz előre.

Köszönöm a beszélgetést!



A fényképet Balázs Gábor (ELI ALPS) készítette

ORSZÁGOS KÁROLYHÁZY FRIGYES PROBLÉMAMEGOLDÓ VERSENY TANÁRSZAKOS HALLGATÓK SZÁMÁRA

A 2024. évi verseny szervezőbizottsága

E-mail: Karolyhazy-verseny@gmail.com

Az ELTE Fizikai Intézete 2016 óta minden tanévben meghirdeti a Károlyházy-versenyt a fizikatanár-szakos hallgatók önálló munkára, kutatásra nevelése céljából. A névadást Károlyházy Frigyes bámulatos feladatalkotó készsége és a fizika, különösen a modern fizika tanításában kifejtett tevékenysége iránt érzett tisztelet motiválta.

A verseny mintája a fizikushallgatók számára 1970 óta futó Ortvy Rudolf Problémamegoldó Verseny. A versenyzők tetszőleges számú, szabadon választható feladatot küldhetnek be a rendelkezésre álló 10 nap alatt. A megoldások elkészítésében minden segédeszköz megengedett, kivéve más személyek segítségét.



A verseny plakátja

A Károlyházy-versenyt az Ortvy-versennyel azonos időben és azonos szabályokkal rendezik meg. Érdemes akár egyetlen megoldott feladattal is indulni a versenyen, hiszen a kivételesen jó megoldásokat a szervezőbizottság különdíjjal is jutalmazhatja. A verseny célja, hogy segítse hallgatóinknak a sokoldalú tanári szerepre való készülését. Mivel a tanári és a fizikusi kutatások eltérő jellegűek, a kitűzött problémák jórészt különbözőek. Ennek megfelelően a megoldásra váró feladatokat is három kategóriába csoportosítva kínáljuk a versenyzőknek:

- **Szaktudományi jellegű feladatok:** például óravázlat készítése nem hagyományos témában, egyszerű, közoktatásba is bevezethető fizikai kísérletek elvégzése, vagy

modern tanítási módszerek és stratégiák (pl. játékosítás, szabadulószóba, digitalizáció) alkalmazása egy adott oktatási feladatban.

- **Közepes nehézségű versenyfeladatok, esszé írása:** ide tartozhatnak például demonstrációs kísérletek tervei, vagy az aktuális Nobel-díj eredményeinek középiskolások számára közérthető bemutatása (ha a téma ezt lehetővé teszi).
- **Ortvy-jellegű feladatok:** nehezebb versenyfeladatok mellett a szervezőbizottság (mely a feladatkitűzőkből áll) mindig áttemel 3–4 Ortvy-feladatot is a párhuzamosan futó versenyből. Örömteli tapasztalat, hogy minden évben vannak tanárhallgatók, akik ezeket tökéletesen megoldják.

A verseny <https://physics.elte.hu/content/fizikatanar-kepzes.t.3002?m=1516> honlapján keresztül elérhetőek az eddigi összes verseny feladatai.

A feladatmegoldások egysíkúságát elkerülendő, a szervezőbizottság felső határt szab arra, hogy egy versenyző egy adott kategóriában hány feladatot küldhet be. Így igazán jó versenyeredményt csak olyan versenyző érhet el, aki több kategóriában is jeleskedik. Hasonlóan az Ortvy-versenyhez, az egyes feladatmegoldásokat az illető feladatot kitűző személy értékeli.

Az utóbbi években több felsőoktatási intézmény is csatlakozott a Károlyházy-versenyhez, növelve a verseny országos jelenlétét. A 2024. évi verseny eredményes résztvevői:

- I. díj: *Mészáros Dávid*, V. éves fizikatanár-hallgató (Eötvös Loránd Tudományegyetem).
- II. díj: *Tar Márta Flóra*, fizikatanár-hallgató, rövid ciklusú képzés (Nyíregyházi Egyetem); *Lóki Ráhel*, II. éves fizikatanár-hallgató (Eötvös Loránd Tudományegyetem); *Lengyel Katalin*, III. éves fizikatanár-hallgató (Szege-di Tudományegyetem).

Dicséretben részesült:

Jáki László, fizikatanár-hallgató, levelező képzés (Eszterházy Károly Katolikus Egyetem); *Kiss Kincső Réka*, I. éves fizikatanár-hallgató (Eötvös Loránd Tudományegyetem); *Nyers Gréta Johanna*, II. éves fizikatanár-hallgató (Eötvös Loránd Tudományegyetem); *Orosz Péter*, fizikatanár-hallgató, levelező képzés (Eszterházy Károly Katolikus Egyetem).



A 2024-es Károlyházy-verseny néhány résztvevője (Kiss Kincső Réka, Mészáros Dávid, Lóki Ráhel, Tar Márta Flóra, Nyers Gréta Johanna, Orosz Péter) a Werner Heisenberg által 1964-es látogatása során táblára írt „világegyenlet” alatt az ELTE Elméleti Fizikai Tanszéken

Szeretnénk kérni a kollégákat, tanárokat és hallgatókat, hogy bíztassák és motiválják a fizikatanár-szakos hallgatókat a IX. Károlyházy Frigyes Problémamegoldó Versenyen való részvételre annak érdekében, hogy a verseny országos lefedettsége tovább javulhasson.

A verseny feladatai és szabályai a <http://fiztanar.elte.hu/hallgatoknak/karolyhazy-frigyes-fizikatanari-problemamegoldo-verseny> honlapon érhetőek el.

A verseny ideje:

**2025. január 31. (péntek, dél) –
február 10. (hétfő, dél).**

A SCIENCE ON STAGE FESTIVAL 2024-BEN TURKUBAN

Borbélyné Bacsó Viktória^{1,@}, Komáromi Annamária^{2,&}

¹Medgyessy Ferenc Gimnázium, Művészeti Szakgimnázium és Technikum, Debrecen

²Budapest XVII. Kerületi Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest

@E-mail: bacsoviktoria@gmail.com; &E-mail: annamarcsi1015@gmail.com

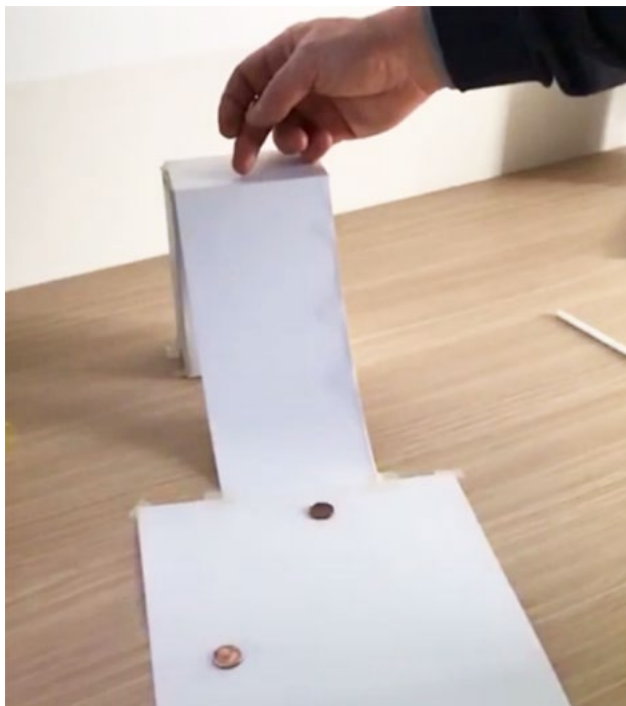


A kétévenként megrendezett nagyszabású – idén 450 projektet felvonultató – fesztivál a finnországi Turkuban volt. A szakmai fejlődést biztosító, a tanításba is beépíthető számos új ötleten túl felejthetetlen közösségi és kulturális élményekkel gazdagodhattak a résztvevők.

Minden országban helyi válogatón jelölték ki az egyes kategóriákban azokat a projekteket, melyek tulajdonosai nemzetközi szinten is bemutathatták munkáikat. A delegáltak munkáival bővebben poszter formájában a fesztivál honlapján [1] lehet megismerkedni, a projektről készített videók a rendezvény youtube-csatornáján tekinthetők meg [2]. A kategóriák között voltak klasszikusnak tekinthetőek, mint például: „Alacsony költségvetésű”, de voltak olyanok is, amelyek kifejezetten a korunkat foglalkoztató kérdésekre vonatkoztak, mint például: „STEM-oktatás a fenntartható fejlődésért”.

Talán meglepő, de annak ellenére, hogy alapvetően általános iskolai és középiskolai tanárok vehetnek részt a fesztiválon, a „STEM a legfiatalabbnak” kategóriában szerepelt finn színekben egy anyanyelvét tekintve magyar óvodapedagógus is. Megható volt látni, ahogy projektjének minden részletébe magyar elemeket csempézt bele.

A projektek között nagy számmal szerepeltek olyanok, melyek egyszerűségükben voltak nagyszerűek. Példaként említhető egy olasz fizikatanár projektje, ami a lendületmegmaradás törvényére vonatkozó kísérletről szólt [3]. Az olasz kolléga elmondta, mennyire zavaró a fizikatanításunkban, hogy amikor erről a törvényről esik először szó, legtöbbször az egymással egyenes vonalban szemben haladó, esetleg különböző tömegű kiskocsis kísérletet mutatjuk meg a diákoknak, majd ennek a kí-



Két pennys kísérlet a lendület megmaradásához [3]

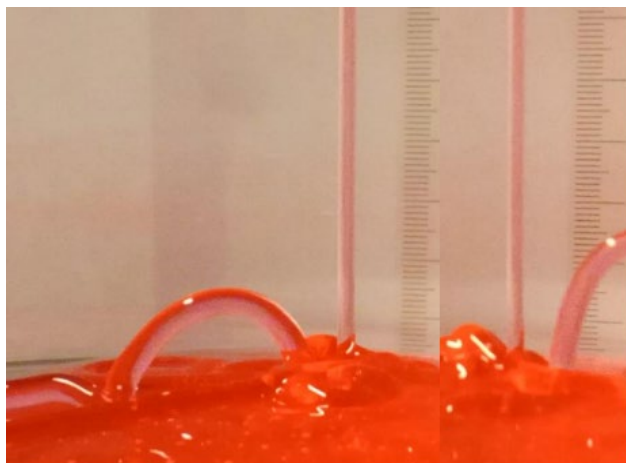
sérletnek a mérési eredményi alapján fogalmazzuk meg a törvényt. Csak ezek után következik, hogy általánosítunk, és felhívjuk a figyelmet, hogy igazából az impulzus egy vektormennyiség. Az olasz kolléga az olaszországi fizikatanításból indult ki, de valószínűleg általánosságban ugyanez a helyzet nálunk is. A kísérletéhez első körben nincs másra szükség, mint két egyforma pénzdarabra és egy rajzlapra. Lényeges eleme a projektjének, hogy a kísérleti elrendezést is maguk a diákok készítik el a megadott instrukciók alapján. A kísérletet végrehajtva le lehet mérni a szétlökött két pénzdarab által megtett utat, illetve a mozgásuk irányát, és számítással lehet igazolni, hogy vektoriálisan igaz a lendület megmaradásának törvénye [3]. Számítógépes animációt is készített olasz kollégánk a kísérlethez, tehát így is bemutatható a diákoknak, hogy nemcsak a nagyság, hanem az irány is ugyanolyan fontos szerepet játszik a lendületnél. A bemutatott kísérlet – amint az a poszterből is kiderül – nemcsak a lendületmegmaradás törvényének bevezetésekor, hanem később a modern fizika oktatásakor is segítséget nyújthat a tanításban.

Egy másik, szintén olasz fizikatanár kísérlete már nem kimondottan a klasszikus értelemben vett fizikával kapcsolatos. A projekt címe: „Albedo and Ice” [4]. Ez a kísérlet a sarki óceán természetes rendszerét szimulálja, ahol a tengerjég hatalmas területei érintkeznek az alatta lévő vízzel. Két azonos tálcát használnak a kísérletben, az egyiket fehér felülettel, a másikat fekete felülettel (ami az óceánt szimulálja), és ezeket infralámpa alá helyezik (ami a Napot szimulálja). Mindkét tálcára egy réteg fagyasztott tejet helyeznek (ami a tengeri jeget szimulálja), és az olvadt tej térfogatát mérik az eltelt idő függvényében.



A kísérlethez szükséges eszközök [4]

Egy holland kémia tanár kolléga egy olyan jelenséget mutatott be, amely egyrészt nem tananyag – még jelenség szinten sem –, másrészt nemcsak kémiai, de fizikai oldalról is meg lehet közelíteni. Ezt a jelenséget 1963-ban írta le Alan Kaye brit mérnök, innen a neve: Kaye-effektus [5]. A jelenség lényege, hogy ha viszkózus folyadékot, például sampont folytatunk egy felületre, akkor egy ideig úgy tűnik, mintha a felszín fölött „ugrálna” vagy „kiugrana” egy másik irányba egy vékony sugár formájában. A jelenség kialakulása közben a következő történik. Amikor a folyadékot öntik, az ütközés pillanatában részben a felhalmozódó folyadék nyomása miatt, részben a viszkóelasztikus tulajdonságok miatt a folyadék egy része felfelé mozdul. Ez a „kiugrás” egy vékony, gyors mozgású sugár formájában történik, amely bizonyos esetekben több centiméter magasságot is elérhet. Ez a jelenség azért különleges, mert látszólag ellentmond annak a megszokott viselkedésnek, amelyet a viszkózus folyadékoktól elvárunk, miszerint azok egyszerűen összefolynak és szétterjednek. A Kaye-effektust gyakran használják a viszkóelasztikus anyagok sajátos tulajdonságainak illusztrálására. A jelenség tekinthető kaotikus jelenségnek is, így amennyiben valaki a kaoszelméletet már említette diákjainak, ezt a jelenséget is meg tudja említeni. De csak említeni, hiszen a matematikai leírása jóval meghaladja a középiskolás matematikát.



Ugráló sampon [5]



A magyar csapat

Magyarországot egy ötfős csapat képviselte. A delegáltak az ország különböző tájairól és nagyon különböző oktatási intézményekből érkeztek. A Budapestről érkező *Komáromi Annamária* projektje, a „GRACE-FO Satellites in the Classroom” az „Alacsony költségvetésű” kategóriában szerepelt. A munka egy korábbi változatban már be lett mutatva a Fizikusok Vándorgyűlésén Sopronban 2019-ben. A projektet a GRACE-FO műholdpáros mérési elve ihlette meg, mely szerint a folyamatosan szabadesésben lévő műholdak közötti távolság változásából lehet következtetni a Föld gravitációs mezőjének változatosságára. Az iskolai kísérletben egy adó-vevő szenzor valósítja meg a távolság változásának követését, majd az Arduino serial plotter alkalmazásával grafikonon is lehet követni a távolság változását. A serial plotter az Arduino IDE beépített eszköze, amely valós időben képes az adatokat grafikus formában megjeleníteni.

Szintén ebben a kategóriában szerepelt *Orosz László*, aki Mátészalkáról érkezett a fesztiválra. Projektjének mottója: „a természetben rejlő rend törvényeit gondolkodás és tapasztalat útján ismerhetjük meg”. Projektjéből többek között megtudhattuk, hogy például mitől mozog a szivacsrakéta, vagy hogyan tudunk egy üveggolyónak extra energiát adni, hogy kiguruljon egy görbe csőből, továbbá miért nem lehet kézzel kicsavarni a csavaranyát, hogyan emelkednek a körhinta karjai, miért világít a LED-lámpa, és miért nem világít a hagyományos izzó egyféle áramforrástól. Oktatóvideójában azt is megnézhetjük, hogy hogyan viselkedik egy csokis teakeksz vákuumban.

A „Digitális technológia” kategóriában versenyző *Szabó János* és *Lévai Edit* Kaposvárról érkezett a „Vulkáni energiák” című projektjükkel. A vulkanikus jelenségek mérését szimulált környezetben modellezték.

Ehhez programozott mikrokontrollereket és külső érzékelőket használtak. A vulkánmodellben fizikai és kémiai kísérletekkel imitálták a jelenségeket. A vulkánmodell környezetében elhelyezett mérőállomás bluetooth-kapcsolaton keresztül továbbította a mérési adatokat egy távoli vulkanológiai központba. A vulkanológiai központot egy 3D-nyomtatott földrengésbiztos modell reprezentálta. A mérési eredményeket grafikonokon szemléltették. Az adatok elemzését követően kiderült, hogy a mérések a valósággal megegyeznek, és a vulkáni és geotermikus energia hasznosításán alapuló technológiákat támasztják alá.

A Debrecenből érkező *Borbélyné Bacsó Viktória* a „Fenntartható fejlődés” kategóriában tudományos tehetségfejlesztő programjukat mutatta be, amelyet 2017-ben indítottak el a Medgyessy Ferenc Művészeti Gimnáziumban. Tevékenységeik során egyszerű szenzoros eszközöket készítenek hétköznapi problémák megoldására, szem előtt tartva az ENSZ 17 fenntartható fejlődési céljának ajánlását. A probléma felvetését követően a diákok ötletelnek, majd a mérnöki tervezési és kivitelezési feladatok által megvalósítják ötleteiket. A program fejleszti a diákok gondolkodását, problémamegoldó készségét, kreativitását. A diákokat a kutatói és mérnöki pálya felé orientálják – életre szóló tapasztalatokat szerezhetnek a feladatok által. A tanár bemutatta azokat a szenzoros projekteket, amelyekkel a diákok innovációs versenyeken is szép eredményeket értek el (Low Energy Room – okos világítás; WeCare – szállópormérés otthon; okos pince; Scooter Dust Meter – szállópormérés elektromos rollerrel; 4H – Hogyan válasszunk jól használt autót?; 3DMM – szálhúzó gép fejlesztése; erdőtüzek vizsgálata; röntgengépek fejlesztése Geant4 szimulációval stb.).



A szerzők cubesat-modell összeállítása közben

A fesztiválon bemutatott magyar projektekről a <https://www.facebook.com/SonS.Hungary/> linken lehet további információt szerezni.

A nagyszabású rendezvényen lehetetlen volt négy nap alatt a 450 innovatív ötlet mindegyikét megismerni. Mindenki elsősorban a saját érdeklődési területén belül próbált tájékozódni, hasonló területen tevékenkedő pedagógusokkal tapasztalatot cserélni. Legtöbben magányos „tudományos szigetként” funkcionálnak, de természetesen nagyon jó példát mutatva országukban a tanítási lehetőségek kihasználása terén. Az ötletek egyesítése azonban ettől nagyobb pedagógiai és innovációs eredményt mutat: országos, sőt országokon átívelő összefogásokra láttunk rendszerszinten megnyilvánuló, inspiráló példákat. A nyertes projektek legtöbbje a nemzetközi együttműködések dicsérte.

Arra is lehetőségünk nyílt, hogy workshopok keretében a tanárokat napjainkban leginkább foglalkoztató témákról szerezzünk gyakorlatias ismereteket. Például a különböző oktatási műholdak (Kitsat és CanSat NeXT) felhasználásának lehetőségeit átbeszéljük. Hallhattunk az ESA ESERO program által hirdetett iskolai projektekről és arról, hogyan építik be ezeket más országokban a STEM-oktatásba. Megismerkedtünk a röntgentomográfias mérések alapgondolatával [6]. Ötletes példákon keresztül megvizsgáltuk, hogyan lehet néhány külső méréssel kideríteni, hogy mi van a célpont belsejében és a feladatok megoldásához – egyszerű módon – elegendő volt az általános iskolai szintű matematika használata.

2025-öt a kvantumtudomány és -technológia nemzetközi évének javasolták. Az egyik ebédidőben tartott ötletbörzén együtt gondolkodhattunk arról, hogyan lehetne ezt beépíteni az osztályteremi munkába. Egy másik börze témája az EU Code Week program volt. Ez az alulról szerveződő mozgalom a kreativitást, a problémamegoldást és az együttműködést hangsúlyozza a programozás és más technológiai tevékenységek révén. Az ötlet lényege, hogy láthatóbbá tegyük a programozást, megmutassuk, hogyan lehet a kód segítségével életre kelteni a kreatív gondolatokat, demisztifikáljuk ezeket a készségeket, és összehozzuk a motivált gyerekeket, hogy együtt tanuljanak.

Az együtt töltött hét során számos lehetőségünk volt még a közös gondolkodásra egy olyan inspiráló közegben, ahol a legfőbb érték az innovatív szemlélet, a korszerű tudás és annak átadása volt.

Irodalom

1. <https://www.sons2024.eu/festival-projects/>
2. https://www.youtube.com/watch?v=mab7HuQVZMc&list=PLfkygVNo_A-DgdHSDYNbhpCr6_MtdRoW
3. <https://www.sons2024.eu/low-cost-experiments-in-stem-education/>
4. <https://www.sons2024.eu/low-cost-experiments-in-stem-education/>
5. https://www.sons2024.eu/wp-content/uploads/2024/05/2024_F_pr_NL_05_Scheele_Netherlands-1.pdf
6. <https://www.youtube.com/watch?v=7pdRq4XLT90>

fizikaiszemle.elft.hu

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

BIRÓ TAMÁS SÁNDOR: GINTROPY (A FICTION ON INEQUALITY)

Ván Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; E-mail: van.peter@wigner.hun-ren.hu

A „Gintropy” sokrétű könyv. Tudományos-fantasztikus lehetne a műfaja, azaz science fiction, de a szó szigorú, mindezidáig nem létező értelmében. Ugyanis Bíró Tamás Sándor könyve egy műfaji kísérlet: egy olyan történet, ahol a többnyire párbeszédekben elhangzó gondolatmeneteket számítások támogatják alá. A mű sajátos módon igyekszik megkerülni a tudományos könyvek Hawking-törvényét, amely szerint minden egyes képlet felezi az olvasók számát. A formulák elhagyása helyett egyedi megoldással a könyvet felezi meg: a regényes rész és a matematikai rész külön-külön is olvasható, illetve egyfajta lapozgató kalandkönyvként ugorhatunk oda és vissza a levezetések és a történet között, ha a gondolatmeneteket szeretnénk alaposabban megérteni. Világos az is, hogy itt azért a szellemi kalandon van a hangsúly, a világ megértése, fizikai alapú modellalkotás kihívásai és a rájuk adott válaszok teszik különösen érdekessé a könyvet. Vagy talán unalmassá, mert hiszen az additivitás, konkavitás vagy a részletes egyensúly tartalmi megértése bizony olvasáslassító kihívás, és feltételezi, hogy az olvasót érdekli a skálafüggetlen hálózatokkal szoros kapcsolatban álló hatványtörvényeloszlások eredete, vagy úgy általában a statisztikus fizika. Különösen ajánlható ez a könnyed bevezető mindazoknak, akik a statisztikus fizika utóbbi évtizedeinek egyik legfontosabb és legvitatottabb problémakörébe, a nem extenzív termostatiztika nem additív entrópiáinak világába szeretnének bepillantást kapni.

A rövid és érdekes levezetések a különböző statisztikus entrópiafogalmakkal kezdődnek. Először megérthetjük a Boltzmann-, Shannon-, Rényi- és Tsallis-entrópiák tulajdonságait, előnyeiket és hátrányaikat mint információértékeket. Utána a populációdinamika ötletesen alkalmazott közönségsé differenciálegyenletei segítenek a malthusianizmus és a demográfia alapjainak átgondolásában. Végül a harmadik matematikai csomag rámutat, hogy bizonyos sztochasztikus differenciálegyenletek hogyan kapcsolódnak a különféle entrópiafogalmakhoz. Itt kapunk magyarázatot a könyv címére. Habár Martini fogyasztása előfordul a könyvben, a „gintropy”-nak nincs köze alkoholos italokhoz. A Gini-index és az entrópia összekapcsolásával elnevezett fogalomról van szó, amely kiválóan alkalmas a társadalmi egyenlőtlenségek jellemzésére.

Maga a történet tudósokról és tudományról szól, a jövő-jelenben játszódik. Azzal kezdődik, hogy hét fizikus-matematikust toboroz-elrabol-összegyűjt valaki, hogy megoldjanak számára egy problémát. A hét tudós között van magyar, német, amerikai, brazil, olasz – mindegyikük valódi személyek alteregója, jellemzően különböző gondolkodásmódokkal. Gondolkodásukat a könyvben leginkább abból ismerjük meg, ahogyan nekilátnak az említett probléma megoldásának. Ez a probléma a rossz irányba haladó világ; a megoldás pedig a megértés általi megmentését eredményezheti. A társadalmi egyenlőtlenségek okait kell a csapatnak felderítenie, jellemeznie, és modelleznie. A tudósok tehát nekilátnak, sajátos nemzeti és tudományos

karakterekként közösen gondolkodni kezdenek, határozottan haladva a megoldás felé, amikor természetesen kiderül (?), hogy mi is áll a látszólag tisztán intellektuális projekt mögött...

Ami hiányolható a könyvből, az a tárgymutató a nyomtatott kiadásban. A tudományos részt teljesebbé tenné több termodinamikai fogalom, illetve a vonatkozó stabilitási kérdések említése. Ennek még a történet sem látná feltétlenül kárát, illetve a matematikai részben elérne a Ljapunov-függvény fogalmának bemutatása. Aki viszont érti a könyv gondolatmeneteit, annak már nem okozhat gondot további egyszerű dinamikai modelleket gyártani, például Thomas Piketty egyenlőtlenségi elveihez [1], vagy megérteni, hogy a Barabási által javasolt log-normális eloszlásnak [2] mik a korlátai az idézettség (és más) hálózatok jellemzésében. Akit pedig mélyebben is érdekel a társadalomfizika, vagyis a fizikai fogalmak és modellalkotás társadalmi folyamatok leírására történő alkalmazása [3], annak természetesen ajánlottak a szerző további vonatkozó cikkei, például a [4], ahol a „gintropy” megszületett. Bíró Tamás tudományos munkássága jóval kiterjedtebb, elsősorban a nehézionfizikához kötődik, de a variációs elvektől a kvantumkáoszon és a relativisztikus termo- és hidrodinamikán át a rácsstérelméletig terjed. Magyar és angol nyelven írt könyvei [5–8], amelyek elemi bevezetéssel, lényegi meglátásokkal a tudomány nyitott kérdéseire viszik az olvasót, tanulságos, többször forgatható, utánolvasásra inspiráló művek. A „Gintropy” sem kivétel.

Végül pedig a fizikatörténet szempontjából is érdekes a könyv, ha megpróbáljuk kitalálni, kiről is mintázta eredetileg a szerző a hét főszereplőt. Talán a legkönnyebb rejtvény az első pár oldal után merül fel: magyar matematikus, (AI)Frednek hívják, vajon ki lehet?

A könyv angol nyelvű, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont kiadványa, a „A Fizika Minden Színe/All Colors of Physics” könyvsorozat első kötete. Nyomtatott formában megvásárolható és elektronikusan elérhető. Információk: <https://pubs.wigner.hu/wigner/catalog/book/gintropy>

Irodalom

1. Thomas Piketty (2015): Tőke a 21. században, Kossuth.
2. Dashun Wang, Barabási Albert-László (2020): A tudomány tudománya. Libri.
3. Francesco dell’Isola (2019): Big-(Wo)men, Tyrants, Chiefs, Dictators. Emperors and Presidents. Springer.
4. Bíró T. S., Neda Z. (2020): Gintropy: Gini index based generalization of entropy. Entropy, 22(8), Paper: 879.
5. Bíró T. S. (2010): Variációs elvek a fizika alaptörvényeiben. Budapest, Magyarország: Typotex Kiadó.
6. Bíró T. S. (2023): Variational Principles in Physics. Cham, Springer Nature.
7. Bíró T. S. (2011): Is There a Temperature? Conceptual Challenges at High Energy, Acceleration and Complexity. New York, Springer.
8. Bíró T. S., Jakovác A. (2019): Emergence of temperature in examples and related nuisances in field theory. Cham, Springer.

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizika Társulat 2025. évi tagdíjairól

Tisztelt Társulati Tagjaink!

Mindenekelőtt szeretném tolmácsolni a Társulat Elnökségének üdvözlét és újévi jókívánságait a Társulat tagjainak és a Fizikai Szemle valamennyi olvasójának. A Társulat és a Fizikai Szemle az idén is változatlan erővel kívánja megvalósítani mindazokat a feladatokat, amelyek betöltésére Alapszabályában vállalkozott.

Kérem, hogy a 2025. évre vonatkozó tagdíjukat, melynek összege a 2024. évhez képest változott, az alábbiak figyelembevételével szíveskedjenek befizetni.

Ha Ön a **Társulatunk rendes tagja** és

– a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában kéri**, akkor a 2025. évi tagdíja **12.500 Ft.**

– a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel kéri**, akkor a 2025. évi tagdíja **15.000 Ft.**

Ha Ön a Társulat tagjaként **általános- vagy középiskolai tanár** és

– a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában kéri**, akkor 2025. évi tagdíja 1.000 Ft alaptagdíj + 7.000 Ft kiegészítő tagdíj, azaz összesen **8.000 Ft.**

– a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel kéri**, akkor 2025. évi tagdíja 1.000 Ft alaptagdíj + 9.500 Ft kiegészítő tagdíj, azaz összesen **10.500 Ft.**

Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjasként tagja** a Társulatnak és

– a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában kéri**, akkor 2025. évi tagdíja **6.000 Ft.**

– a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel kéri**, akkor 2025. évi tagdíja **8.500 Ft.**

Ezúttal is tisztelettel kérem azokat a nyugdíjas korú tagjainkat, akik nyugdíjuk mellett teljes munkaviszonnyal vagy közalkalmazotti jogviszonnyal rendelkeznek, hogy a tagdíjfizetés szempontjából ne tekintsék magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **tanulmányait végzi és a Társulat ifjúsági tagja** (felsőoktatási intézmény alap- és mesterképzésben résztvevő hallgatója, aki munkaviszonnyal nem rendelkezik vagy középiskolai tanuló), akkor **nem kell tagdíjat fizetnie**, és a Fizikai Szemle számaikat elektronikus formában fogja megkapni. A kedvezmény érvényesítéséhez évente hallgatói jogviszony igazolása szükséges az elft@elft.hu e-mail címre.

Ha Ön **még nem töltötte be 30. életévét**, és már nem tanul, akkor tagdíja az alábbi:

– a **Fizikai Szemle** számaikat **elektronikus formában kéri**, akkor kedvezményes 2025. évi tagdíja **6.000 Ft.**

– a **Fizikai Szemle** számaikat **papíralapú terjesztéssel kéri**, akkor kedvezményes 2025. évi tagdíja **8.500 Ft.**

Kérem, hogy **bármilyen adatváltoztatást** (pl. e-mail-cím, postacím, telefonszám, munkahely megváltozása)

e-mailben **legyenek szívesek megírni az elft@elft.hu címre.**

Kérem, hogy tagdíjukat mielőbb szíveskedjenek rendezni. A tagjainknak tagsági jogon járó Fizikai Szemle folyamatos küldését csak azok számára tudjuk biztosítani, akik 2025. évi tagdíjukat rendezték. Tájékoztatni szeretnénk Önöket, hogy **tagdíjuk megfizetését esetleg munkahelyük is átvállalhatja**. Továbbá felhívom szíves figyelmüket az önkéntes többletfizetés lehetőségére. Kérem, hogy a leírtakra – különösen az utóbbira – külföldön élő ismerőseiknek is hívják fel a figyelmét. Nekik a Fizikai Szemlét elektronikus formában, e-mailen küldjük el; ha nyomtatott Szemlét kérnének, akkor kérjük, a lényegesen magasabb postázási költséget vegyék figyelembe.

Az újonnan belépni kívánók a Társulat **honlapján jelentkezhetnek** társulati tagnak: <http://elft.hu/jelentkezés-a-tarsulatba/>.

Amennyiben lehetőségük van rá, kérem, hogy a **tagdíj befizetését átutalással** szíveskedjenek rendezni a **K&H Banknál vezetett 10200830-32310274-00000000** sz. folyószámlánkra. A közlemény rovatba a befizető nevét, városát és a „**2025. tagdíj**” szót kérjük feltüntetni. A Titkárságon (1092 Bp. Ráday u. 18. fsz. 3.) időpont egyeztetéssel lehetőség van készpénzes befizetésre is, illetve csekk is kérhető.

Az EPS-be a továbbiakban csak egyéni tagként lehet belépni. **Kérem a kollégákat, hogy a hazai fizika megfelelő képviselője érdekében az EPS-be minél nagyobb számban lépjenek be.** Az EPS-be annak weblapján, a www.eps.org címen lehet belépni; ugyanott fizetheti be az EPS-tagdíjat is.

FELHÍVÁS TAGJAINKHOZ ÉS A FIZIKA MINDEN BARÁTJÁHOZ

Tájékoztatom a Társulat tagjait és a Fizikai Szemle olvasóit, hogy a 2023. évről szóló **személyi jövedelemadó-bevalláshoz** kapcsolódó **felajánlások** révén a Társulat **2024-ben 1.020.345 Ft** bevételhez jutott, amit a korábbi évekhez hasonlóan a működési költségek és a Fizikai Szemle megjelentetési költségeinek részbeni fedezeteként használtunk fel. Ezért köszönetünket fejezzük ki a Társulat javára rendelkezőknek. Kérem a fizika minden barátját, hogy ha teheti, az **idén is rendelkezzen személyi jövedelemadója 1%-ának** a Társulat céljaira való felajánlásáról és buzdítsa erre barátait, ismerőseit is.

Az **Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak** a nyilatkozaton feltüntetendő **adószáma 19815644-2-43.**

Tisztelettel:

Groma István,
az ELFT főtájkára



Fizikai formulák
MI-val generálva
(Forrás: tengrai.com)