

MAGYAR TUDOMÁNY

Pálffy Péter Pál és munkatársai
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
MATEMATIKAI TUDOMÁNYOK
OSZTÁLYÁNAK ÜNNEPI ÖSSZEÁLLÍTÁSA

Dunai László és munkatársai
HÍDSZERKEZETEK ÉS
A MÉRNÖKI TUDOMÁNY



TARTALOM

BICENTENÁRIUMI ÖSSZEÁLLÍTÁS

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MATEMATIKAI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK ÜNNEPI ÖSSZEÁLLÍTÁSA

Ízelítő a magyar matematika kétszáz évéből

Vendégszerkesztő: Pá,fy Péter Pál

Pá,fy Péter Pál

Bevezető 609

Laczkovich Miklós

A Bolyai János nemzetközi matematikai díj egykor és most 611

Molnár Lajos

A szegedi *Acta Scientiarum Mathematicarum* száz éve 620

Bérczi-Kovács Erika – Frank András

A magyar módszer 629

Füredi Zoltán – Simonovits Miklós

Nagy matematikusaink hatása a magyar matematika elismertségére 641

Stipsicz András

A Rényi Intézet: múlt, jelen és remélt jövő 655

Benczúr András – Gyimóthy Tibor – Szegedy Balázs

Mesterséges intelligencia témájú kutatások Magyarországon 663

TERÜLETI BIZOTTSÁGOK

Gelencsér András

Pannonia Superior meghódítása

A Veszprémi Akadémiai Bizottság mint a régiós együttműködés zászlóshajója 676

TEMATIKUS ÖSSZEÁLLÍTÁS**HÍDSZERKEZETEK ÉS A MÉRNÖKI TUDOMÁNY***Vendégszerkesztő: Dunai László**Dunai László***Bevezető** 683*Dunai László***Duna-hidak – modelltől a valóságig** 685*Kövesdi Balázs***MTA–BME Lendület Új Generációs Acélhidak Kutatócsoport** 700*Dunai László – Horváth Adrián – Kollár Dénes – Kövesdi Balázs – Szigeti Zoltán – Vigh László Gergely***A Széchenyi lánchíd felújítása: korróziós állapotmérés és kockázatelemzés** 710*Dunai László – Kövesdi Balázs – Kollár László – Hegyi Péter – Pál Gábor – Kemenczés András – Medveczki István***Az Osztdószigeti ferdekábeles híd – kábelcsillapítók tervezése és fejlesztése** 724*Kövesdi Balázs – Hegyi Péter – Dunai László – Szigeti Zoltán – Gondár Péter – Vad János – Havasi-Tóth Balázs***A sátoraljaujhelyi Nemzeti összetartozás hídja – széldinamikai vizsgálatok** 735*Joó Attila László – Mátyásky László***A Monostori Duna-híd tervezése és digitálisiker-fejlesztése** 744*Kovács Tamás – Hartmann Péter – Szinrai Szabolcs***Előregyártott hídgerendacsalád fejlesztése új anyagok és technológiák felhasználásával** 756**TANULMÁNYOK***Márovics Gergely – Girán János***A globális éghajlatváltozás egészséghatásai** 769*Rucska Andrea – Lakatos Csilla***Középisikolások szerhasználati szokásainak és mentális jóllétének mintázatai Észak-Magyarországon – alkoholfogyasztás** 776

*Dembrovsky Fanni**A Clostridioides difficile-fertőzés és kezelése* 788*Vida Krisztián*

Flerek és koronaanyag-kidobódások keresése gépi tanulással 794

TUDÓSPORTRÉ

Pauk János

Barabás Zoltán, az invenciózus növénynemesítés vezéregyénisége 802

KÖNYVSZEMLE

Laczkovich Miklós

Oláh Vera – Fried Katalin szerkesztők

Válogatás az Érintő első 7 évéből 805*László Tamás*

András Némethi

Normal Surface Singularities 807*Kolossváy István*

Balázs Bárány – Károly Simon – Boris Solomyak

Self-similar and Self-affine Sets and Measures 810*Bollobás Enikő*

Hay Diana – Palasik Mária – Schadt Mária szerkesztők

*Nők a tudomány fellegvárában**Kutatói életutak a Magyar Tudományos Akadémián 1949–2021* 812

BICENTENÁRIUMI ÖSSZEÁLLÍTÁS

**A Magyar Tudományos Akadémia
Matematikai Tudományok Osztályának ünnepi összeállítása**
Ízelítő a magyar matematika kétszáz évéből

**Bicentennial Collection of the Mathematical Sciences
Section of the Hungarian Academy of Sciences**
A Taste of Two Hundred Years of Hungarian Mathematics

Vendégszerkesztő: Pálffy Péter Pál

Bevezető

Introduction

Pálffy Péter Pál

az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor
HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Budapest
ppp@renyi.hu

Mi a titka a magyar matematikának? Hol találhatók a mai sikerek gyökerei? 1894-ben rendezte meg a Matematikai és Fizikai Társulat az első tanulóversenyt matematikából, és ugyanebben az évben jelent meg a *Középiskolai Matematikai Lapok* első teljes évfolyama. Ezek a versenyek és a kitűzött érdekes feladatok azután sok tehetséges fiataalt vonzottak a matematikához és a rokon tudományokhoz. A 20. század első évtizedeiben már több világszínvonalú eredményt értek el magyar matematikusok. Fokozatosan kialakultak azok a tudományos iskolák, amelyek a mai napig meghatározzák a magyar matematika sajátos „ízvilágát”.

A Magyar Tudományos Akadémia (MTA) alapításának kétszáz éves jubileuma alkalmából készült visszatekintés a folyóirat terjedelmi korlátai között természetesen nem alkalmas arra, hogy teljes képet adjon két évszázad magyar matematikájáról. Csupán néhány fontos témát tudtunk itt kiemelni, olyanokat, amelyek kapcsolódnak az MTA-hoz vagy egyes nagy hatású akadémikusokhoz. Mindeközben változatosságra is törekedtünk: lesz szó matematikai díjról, folyóiratról, intézetről, matematikai módszerről, kiemelkedő matematikusokról és eredményeikről, és a mesterséges intelligencia kutatásáról is.

Az első nemzetközi jelentőségű matematikusunk a kétszázötven éve született Bolyai Farkas (1775–1856) volt, akit 1832-ben választottak a Magyar Tudós Társaság levelező tagjává. Fia, Bolyai János (1802–1860) a nemeuklideszi geometria zseniális felfedezőjeként a tudománytörténet legnagyobb alakjai közé tartozik. Emlékükre alapította az MTA 1902-ben a Bolyai-díjat, amely abban az időben a legjelentősebb nemzetközi matematikai díj volt. Ennek történetébe avatja be az olvasót Laczkovich Miklós írása.

Az 1872-ben alapított Kolozsvári Magyar Királyi Tudományegyetemen több kiváló matematikaprofesszor tanított. A trianoni döntés után az egyetem Szegeden folytatta működését, itt indította el 1922-ben az *Acta Scientiarum Mathematicarum* című folyóiratot Haar Alfréd (1885–1933) és Riesz Frigyes (1880–1956). Molnár Lajos cikke a nagy múltú folyóirat történetét és három akadémikus szerkesztőjének – az alapítók mellett Szőkefalvi-Nagy Béla (1913–1998) – munkásságát mutatja be.

Bérczi-Kovács Erika és Frank András dolgozata a matematika tudománya iránt érdeklődőket vezeti be az optimalizálási feladatok széles körére alkalmazott algoritmus megszületésének érdekes története mellett magának a matematikai módszernek a részleteibe. Két, 1931-ben magyar nyelven megjelent cikk (a szerzők: König Dénes [1884–1944], illetve Egerváry Jenő [1891–1958]) alapján alkotta meg Harold W. Kuhn 1955-ben az eljárást, amelyet „magyar módszer”-nek nevezett el.

A legendás világotutató magyar matematikus, Erdős Pál (1913–1996) néhány kiemelkedő eredményének bemutatása mellett széles körű kitekintést nyújt Füredi Zoltán és Simonovits Miklós cikke a magyar matematika nemzetközi elismertségének tényeiről és gyökereiről. Itt olvashatunk a nagyszerű tanítványokat nevelő Fejér Lipótról (1880–1959) és Rényi Alfrédéről (1921–1970) is.

Az egyetemek mellett a magyar matematika fontos bástyája az 1950-ben alapított matematikai kutatóintézet, amely 1999 óta első igazgatójának, Rényi Alfrédnek a nevét viseli. Az alapítástól 2019-ig az MTA kötelékébe tartozott intézet múltjáról, jelenéről és remélt jövőjéről Stipsicz András írt összefoglalót.

A Matematikai Tudományok Osztálya az elméleti és az alkalmazott matematika mellett a számítástudományoknak is a gazdája – együttműködve a Műszaki Tudományok Osztályával. A mesterséges intelligencia (MI) matematikai alapjait hosszú ideje kutatják hazánkban. Az összeállítás utolsó cikkében a három legjelentősebb műhely – a HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI), a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) és a Rényi Intézet – vezető kutatói, Benczúr András, Gyimóthy Tibor és Szegedy Balázs katalógusszerűen tekinti át az MI kutatása terén elért eredményeket és a jövő terveit.

A Bolyai János nemzetközi matematikai díj egykor és most

The János Bolyai International Mathematics Award Then and Now

Laczkovich Miklós

az MTA rendes tagja, professor emeritus, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest
miklos.laczkovich@gmail.com

Összefoglalás

A Bolyai János nemzetközi matematikai díjat a Magyar Tudományos Akadémia alapította 1902-ben, Bolyai János születésének századik évfordulója alkalmából. A díjat az első világháborút megelőzően két alkalommal adták át. Ezután a díj adományozása megszakadt, és csak 1994-ben újították meg. A dolgozatban áttekintjük a díj kétszeri megalapításának történetét, tudománytörténeti háttérét és fogadtatását.

Abstract

The János Bolyai International Mathematics Award was established by the Hungarian Academy of Sciences in 1902, on the occasion of the centenary of János Bolyai's birth. The prize was awarded twice before the First World War. After that, it was discontinued and was not renewed until 1994. This paper reviews the two foundings of the prize, its historical background, and its reception.

Kulcsszavak: matematika, Bolyai János nemzetközi matematikai díj, a Magyar Tudományos Akadémia története

Keywords: mathematics, János Bolyai International Mathematics Award, history of the Hungarian Academy of Sciences

A hiperbolikus geometria felfedezése a tudománytörténet különleges eseménye volt. Egyrészt a felfedezés „a levegőben volt”, hiszen egymástól függetlenül hárman is ráta-
láltak: a magyar Bolyai János (1802–1860), a német Carl Friedrich Gauss (1777–1855) és az orosz Nyikolaj Ivanovics Lobacsevszkij (1793–1856). Másrészt azonban a felfedezés megelőzte korát, amennyiben a korabeli tudóstársadalom értetlenséggel fogadta, és nem vette komolyan. Már aki egyáltalán értesült róla, hiszen Bolyai János műve csak kevés példányban jelent meg édesapja, Bolyai Farkas (1. ábra) könyvének függelékeként, Lobacsevszkij dolgozata a távoli Kazany¹ egyetemének közleményeiben jelent meg, Gauss pedig meg sem kísérelte közölni a hiperbolikus geometriával kapcsolatos gondolatait. A felfedezők azt gondolhatták, hogy ha megpróbálnák elküldeni a

¹ Ma Tatárország fővárosa.



1. ábra. Bolyai Farkas (1775–1856) matematikus, 1832-től a Magyar Tudós Társaság levelező tagja és fia, Bolyai János (1802–1860) matematikus és hadmérnök szobra Marosvásárhelyen (Izsák Márton és Csorvássy István alkotása)

Forrás: Szabados László képeslapgyűjteményéből (<https://real-i.mtak.hu/16876/>)

műüket a híres *Journal für die reine und angewandte Mathematik* folyóiratnak (amelyet 1826-ban alapított August Leopold Crelle), az valószínűleg nem közölné. A matematikusok ugyanis évszázadok óta meg voltak győződve arról, hogy csak egyetlen geometria van: az, amelyet Eukleidész írt le, és megpróbálták bebizonyítani, hogy Eukleidész híres-hírhedt 5. posztulátuma (amely az euklideszi geometriát egyértelművé teszi) a többi axiómából levezethető. Dacára annak, hogy a bizonyítás senkinek sem sikerült, ez a meggyőződés az újkorban általános volt.²

Évtizedekig tartott, amíg felismerték, hogy ez az elképzelés téves, és hogy Bolyai és Lobacsevszkij felfedezése óriási horderejű eredmény, amely nemcsak a térről való filozófiai elképzelésünket változtatja meg alapjaiban, de a fizikai tér vizsgálatában is releváns. Így a 19. század végére immár világos lett, hogy Bolyai János a magyar matematika korszakos génusza volt.

Bolyai János születésének századik évfordulóját méltó módon kívánták megünnepegni, és a Bolyai-díj megalapításának gondolata is ennek keretében merült fel. A díj alapításának történetét többen is leírták: lásd Ágoston (2002) és Szénássy (1993), legalaposabban pedig Ács Tibor írását (Ács 2002). Szénássy Barna két olyan

² Csak az 1960-as években vált ismeretessé Tóth Imre kutatásai nyomán, hogy az ókori görög matematikában már Arisztotelész előtt is felmerült a nemeuklideszi geometria lehetősége (Tóth 1967).

eseményt említ, amely esetleg motiválhatta a díj alapítását. Az egyik a nemzetközi Lobacsevszkij-díj létesítése volt 1895-ben, a másik a Nobel-díj elindításának bejelentése ugyanebben az évben. Az utóbbi esetében külön motiváló tényező lehetett, hogy – mint ismeretes – matematikai Nobel-díj nincs (Pálffy 2013). Az MTA III. (Matematikai és Természettudományi) Osztálya létrehozott egy bizottságot a századik évforduló megünneplésének kidolgozására. A bizottság a III. Osztály 1901. decemberi ülésén tett indítványt, amelyben többek között „a két Bolyai emlékére alapítandó Bolyai-jutalom” létesítésére tesz javaslatot. Jegyezzük meg tehát, hogy a Bolyai-díj az alapítók szándéka szerint mindkét Bolyai, apa és fia szellemének és munkájának állít emléket, amint azt Ágoston Hugó is hangsúlyozta a díj történetéről szóló cikkében (Ágoston 2002). Azt is érdemes tudatosítanunk, hogy a díj neve eredetileg Bolyai-jutalom volt.

A bizottság javaslatát a III. Osztály egyhangúlag elfogadta, és egy indítványt terjesztett az „összes ülés” elé. Eszerint a III. Osztály Bolyai János és vele együtt apja és mestere, Bolyai Farkas méltó emlékének „csak egy Bolyai-jutalmat tart a világirodalom legkiválóbb matematikai vizsgálatainak kitüntetésére. Midőn ily díj alapítását indítványozza, nemcsak több külföldi akadémia fényes példája lebeg előtte, hanem ama nagy haszon reménye is, melyet e díjtól hazánkban a tudomány fejlődésére, külföldön a magyar szellem dicsőségének emelésére nézve vár.”

A III. Osztály díjalapítási indítványát az MTA igazgatótanácsa 1902. február 23-i ülésén tárgyalta meg Eötvös Loránd elnökletével. A jegyzőkönyv szerint „a Bolyai János százéves jubileumának megünneplésére vonatkozó javaslat egyhangúlag elfogadtatik”. E döntés után Szily Kálmán főtítkárra a III. Osztály indítványa alapján elkészítette a díj szabályzatának tervezetét, amelynek első pontja így szól:

„Bolyai János születése századik évfordulójának ünnepén a Magyar Tudományos Akadémia a halhatatlan tudósnak, valamint Bolyai Farkasnak, mély gondolkodású atyjának és a tudományban mesterének emlékét azon elhatározásával örökíti meg, hogy először 1905-ben és azután minden ötödik évben a decemberi összes ülésben az illető évet megelőző öt évben bárhol és bármely nyelvben megjelent, legkiválóbb matematikai vizsgálat szerzőjét, tekintetbe véve előbbi tudományos működését is, tízezer korona³ »Bolyai-jutalom«-mal és éremmel tünteti ki, melynek egyik oldalát a M. Tud. Akadémiának és Budapestnek képe, másik oldalát magyar felirat díszíti.”

A szabályzat szerint a díjazottról a III. Osztály által felkért bizottság határoz, amely két belső és két külső tagból áll. A bizottság határozata az *Akadémiai Értesítő*ben jelenik meg, azon kívül a Magyar Tudományos Akadémia gondoskodik a jelentésnek külföldön való közzétételéről is.

³ 10 000 korona 1902-ben mai értékben kb. 26 000 000 forintnak felelt meg (URL1).

Az elkészült tervezetet rögtön ki is nyomatták, majd márciusban lefordíttatták német és francia nyelvre. Egy levél kíséretében április 28-án elküldték a tervezetet Párizsba a francia tudományos akadémia titkárának, Jean Gaston Darboux-nak és Stockholmba Gösta Mittag-Lefflernek (az MTA mindkettejüket május 9-én választotta meg külső tagjának), valamint megkapta véleményezésre az 1899. május 4-e óta külső tag Felix Klein is Göttingenben. Mind Darboux, mind Klein teljes mértékben egyetértettek a tervezettel. (Valószínűleg Mittag-Leffler is, de az ő válaszevele nem maradt fenn.) A későbbiekben a Bolyai-díj szabályzatát tíz külföldi (három német, két olasz, két svéd, egy francia, egy brit és egy amerikai) matematikai folyóiratnak is elküldték. A Bolyai-díj szabályzatát az 1903. január 26-i összes ülés az akadémiai ügyrendbe iktatta, és közreadta az *Akadémiai Értesítő* 1903. februári füzetében.

A Bolyai-jutalmat 1905-ben adták át először. A díjazottat kiválasztó bizottság belső tagjai König Gyula és Rados Gusztáv voltak, külső tagnak pedig Darboux-t és Felix Kleint kérték fel. A bizottság 1905 októberében ülésezett Budapesten, elnöknek Darboux-t, előadónak pedig Kleint választotta meg. A tárgyalásokon két tudós, David Hilbert és Henri Poincaré munkáit tartották szinte egyenlő mértékben elismerésre méltónak, de hosszas mérlegelés után „a bizottság egyhangúlag úgy határozott, hogy a Bolyai-jutalmat Henri Poincarénak javasolja odaítéltetni, akinek 1879-ben megindult kutatásai a matematika egész területe körül mintegy körfutásukat azóta bevégezték, mindenütt új nézőpontokkal szolgálva a matematikai kutatásnak”. A bizottság határozata alapján Felix Kleinnek kellett volna méltatnia Poincaré munkáit. Azonban Klein gyenge egészségi állapota miatt a Bolyai-bizottság jelentését az 1905. évi Bolyai-jutalomról Rados Gusztáv készítette el. A bizottság döntése után Heinrich Gusztáv főtitkár feladata volt a díjjal járó arany Bolyai-érem tervezésének és elkészítésének megszervezése.

Rados Gusztáv az Akadémia 1905. december 18-i összes ülése elé terjesztette a bizottság határozatait. Az ülés tudomásul vette a döntést, s elrendelte, hogy a jelentést tegyék közzé az *Akadémiai Értesítő*ben, „a megjutalmazott Henri Poincaré pedig az Akadémia határozatáról, a jutalomdíj és az aranyérem megküldésével, értesítetik”. Már december 21-én elküldték Párizsba az értesítést Henri Poincarénak az alábbi szöveggel:

„Mélyen tisztelt Uram!

Öszinte örömmel értesítem, hogy a M. Tud. Akadémia mai napon tartott összes ülésén a Bolyai Farkas és János halhatatlan emlékére alapított s ezúttal első ízben kiadott Bolyai-jutalmat és -érmet, az illetékes szakbizottság javaslata alapján, a matematika terén kifejtett korszakos működése elismeréséül egyhangúlag Önnek ítélte oda.

Midőn e kiváló kitüntetéshez legmelegebb szerencsekívánataimat tolmácsolom, egyúttal tudatom, hogy a tízezer korona jutalomösszeget egyidejűleg

közvetlenül a M. Földhitelintézet útján fogja venni, a Bolyai-aranyérmet pedig azonnal megküldöm, amint a kir. pénzverde elkészíti.

Fogadja, mélyen tisztelt Uram, kitűnő tiszteletem nyilvánítását.

Budapest, 1905. decz. 18.

Elnök”

Berzeviczy Albert MTA-elnök levelére Párizsból már december 28-án megérkezett Poincaré válasza.

„Tisztelt elnök úr!

Van szerencsém tudatni, hogy megkaptam nagybecsű közlését a magyar Akadémia rám nézve oly nagyon hízalgő határozatáról, valamint a küldött cheque-et is. Fogadja, kérem, hálám nyilvánítását, s legyen szíves ezt azon társaságnak is tolmácsolni, melynek Ön az elnöke.

Alig tudom kifejezni, mennyire megtiszteltnek érzem magam, annival is inkább, mert e megtiszteltetés Bolyai dicső nevével van kapcsolatban, s oly néptől jön, mely iránt mindig nagy rokonszenvet éreztem 1877-ben Magyarországon tett utazásom óta, mely felejthetetlen emlékeket hagyott bennem hátra.

Maradtam, Elnök úr, kiváló tiszteletem nyilvánítása mellett:

híve, Poincaré”

A külföldi tudományos közélet nagy elismeréssel fogadta a nemzetközi matematikai Bolyai-díj első adományozását. Ezt bizonyítja a párizsi Académie des Sciences 1905. december 18-i éves közgyűlése is, amelyen Louis Joseph Troost elnök a beszédében külön kitért a Bolyai-díjra, és gratulált Poincarénak a díj elnyeréséhez. (Jegyezzük meg, hogy még a díj odaítélésének hivatalos kihirdetése előtt!) Troost így fogalmazott:

„Megragadjuk ezen alkalmat, hogy üdvözljük testvérünket, a magyar Akadémiát azon szolgálatért, melyet a tudományos kutatásnak tett oly férfiú emlékére alapított díj által, kinek művei az emberiség díszére válnak, és örvendünk, hogy az egész Institut de France szerencsekívánatait tolmácsolhatjuk a Bolyai-díj első elnyerőjének, s üdvözlhetjük őt azon dicsőségért, melyet az emberi gondolkodás ezen nemzetközi versenyén a francia tudománynak szerzett.”

A Bolyai-díj első adományozásának története 1906. március 24-én zárult le, amikor az elkészült Bolyai-érmet a Magyar Tudományos Akadémia elküldte Henri Poincarénak Párizsba. Henri Poincaré (1854–1912) nemcsak matematikusként, de fizikusként és filozófusként is maradandót alkotott. A tudománytörténet úgy tekint rá, mint az egyik utolsó polihisztorra, aki nemcsak a matematika, de a fizika és a tudományfilo-

zófia fejlődésére is nagy hatással volt. Henri Poincaré 1912. július 17-én hunyt el, 58 éves korában. A *Nyugatban* megjelent nekrológiában Fejér Lipót ezt írja:

„[Poincaré] a kutatás lázában töltötte egész életét. Úgyszólván nincs fejezete a tiszta matematikának, geometriának, a matematikai fizikának, asztronómiának, geofizikának, geodéziának, mely neki fényes fölfedezést vagy nagyértékű földolgozást ne köszönhetne. Utóbbi években közölt filozófiai munkái tudományos körökben nagy feltűnést keltettek, s élénk megvitatásban részesültek. [...] 1905-ben adta ki először akadémiánk a Bolyai emlékére alapított fényes nemzetközi Bolyai-díjat. A választás egyhangúan Poincaré-ra esett. 1910-ben Poincaré Budapesten járt, mint a Bolyai-jutalom odaítélésére megbízott nemzetközi bizottság külföldről meghívott tagja. Az akadémia e bizottságának jelentését, mely magyar és francia nyelven adatott ki, Poincaré szerkesztette” (Fejér 1912).

A Bolyai-díjat 1910-ben is kiadták. Ez alkalommal a jutalmat odaítélő bizottság belső tagjai König Gyula és Rados Gusztáv voltak, külső tagnak pedig Poincarét és Mittag-Lefflert kérték fel. A bizottság a Bolyai-díjat egyhangú határozattal David Hilbertnek javasolta adományozni. A bizottság jelentését Poincaré készítette el, amelyet az MTA 1910. december 21-i összes ülése jóváhagyott.

David Hilbert (1862–1943) a 19. század végének és a 20. század első felének talán legnagyobb matematikusa volt. Alapvető felfedezéseket tett a geometriában, kommutatív algebrában, algebrai számelméletben, a spektrálméletben és a matematikai logikában. Hilbert hatása a matematika fejlődésére mind a mai napig meghatározó. Hilbert az MTA főtitkárához intézett 1911. január 17-i levelében megköszönte, hogy kora legmagasabb – a Nobel-díjjal egyenértékű – nemzetközi matematikai elismerésben részesült. Mint írta: „Annál is inkább büszke vagyok rá, mivel ilyen kiemelkedő kitüntetést eddig még nem kaptam.”

A Bolyai-díjnak tehát igen nagy volt a tekintélye a nemzetközi tudományos életben. A két kitüntetett valóban a matematikai élet legkiemelkedőbb személyiségei közé tartozott, és egy díj igazi súlyát nem csupán az adományozó, hanem legalább olyan mértékben a díjazottak is adják. A díjról Rados Gusztáv 1940-ben így írt:

„A Bolyai-jutalom létesítésével sikerült a tudós világnak figyelmét hazánkra irányítani. A Nobel-jutalom szabályzata szerint matematikusnak nem ítéltető oda, azért Akadémiánk Bolyai-jutalma – bár anyagilag a Nobel-díjnál sokkal szerényebb – matematikusokra nézve erkölcsi tekintetben vele teljesen egyenértékűnek bizonyult.”

Az első világháború kitörése miatt a Bolyai-jutalom adományozása megszakadt. Erről az MTA III. Osztálya az 1915. február 15-i ülésén döntött. Az ülés jegyzőkönyvében ez áll:

„Az osztálytitkár fölveti a kérdést, vajjon az 1915-ben esedékes Bolyai-jutalom ügye – melynek tárgyában az ügyrend 93. §-a szerint legkésőbb a f. évi március havi zárt osztályülésen kellene bizottságot választani –, tekintettel a fennforgó politikai bonyodalmakra, melyek ily nemzetközi bizottság működését majdnem lehetetlenné teszik, nem halasztatnék-e el? Rados Gusztáv r. t. felszólalása után az osztály a Bolyai-jutalom ügyét a háború utáni időre halasztja.”

Csak találgatni lehet, hogy ki kapta volna a harmadik Bolyai-díjat, ha az kiosztásra kerül. Constance Reid azt állítja Hilbertről szóló könyvében (Reid 1970), hogy Hilbert a netán kiosztandó harmadik Bolyai-díjat Einsteinnek javasolta odaítélni. Ugyan Szénássy Barna erre nézve semmilyen bizonyítékot nem talált, de Reid azt írta Toró Tibornak, hogy ezt Szegő Gábortól hallotta, aki Hilbert munkatársa volt Göttingenben (Staar 2005). Másrészt – amint Szénássy Barna megjegyzi – Riesz Marcellnek egy Fejér Lipóthoz írott leveléből kiderül, hogy Mittag-Leffler az esetleg 1915-ben kiosztandó Bolyai-díjat Riesz Frigyesnek szánta.

A díj újbóli meghirdetése a következő évtizedekben többször felmerült, általában Rados Gusztáv kezdeményezésére. Rados 1927-ben javasolta az MTA III. Osztályának és elnökségének, hogy hirdessék meg újból a Bolyai-díjat, de pénzügyi nehézségek miatt erre nem került sor. Rados Gusztáv 1940-ben ismét felvetette a kérdést. Még egy általa készített módosított szabályzatot is előterjesztett, miszerint az Akadémia ügyrendjébe kellene iktatni, hogy az MTA „harmadízben 1946-ban és azután minden ötödik évben a decemberi összes ülésén a megelőző öt évben bármely nyelven megjelent legkiválóbb matematikai munka szerzőjét tizenkétezer pengő Bolyai-jutalommal és éremmel tünteti ki”. Ennek az indítványnak a bevezetését a második világháború akadályozta meg.

A díj megújítására vonatkozó következő komoly kísérletre a rendszerváltásig kellett várni. 1991-ben volt a Matematikai és Fizikai Társulat alapításának századik évfordulója. Az ünnepi rendezvényen Toró Tibort, aki a kolozsvári Bolyai Társaság elnöke volt, Teller Ede és Gábor Zoltán társaságában az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteleti tagjává választották. Toró Tibor az előadásában felvetette a Bolyai-díj felújításának kérdését. Berényi Dénes, az MTA fizikus alelnöke felkarolta a javaslatot, és az MTA elnöksége az 1991. november 12-i ülésén Berényire bízta a Bolyai-díj felújításáról szóló javaslat előkészítését. Berényi egy általa felkért *ad hoc* bizottság segítségével dolgozta ki a tervezetet, amely 1992 januárjára készült el. Az indítvány a következőket javasolta:

- az MTA elnöksége határozza el a Bolyai-díj felújítását és annak 1995-ös adományozását,
- a díj összegét huszonötezer dollárnak megfelelő konvertibilis forint értékben határozza meg,
- a díjhoz Bolyai-érem is társuljon, továbbá hogy
- a Matematikai és Fizikai Tudományok Osztálya dolgozza ki a Bolyai-díj szabályzatát, és terjessze jóváhagyásra az elnökség elé.

Az elnökség 3/1992. számú határozatában elfogadta a javaslatot. A matematikai tudományok osztálya⁴ 1994. április 20-i ülésén tárgyalta meg a díj szabályzatát. A vita utáni nyílt szavazás során tízen amellett voltak, hogy a díj aranyéremből és huszonezer dollár jutalomból álljon, tizennégyen viszont azt támogatták, hogy csak aranyéremből. Végül az a döntés született, hogy a Bolyai-díjat az aranyérem jelenti, de a költségvetési keretben a pályadíjak címszó alatt kérik előirányozni a Bolyai-díj anyagi fedezetét is. A Bolyai-díj megújított szabályzatát Császár Ákos, a matematikai tudományok osztályának elnöke terjesztette elő, az MTA elnöksége a 15/1994. számú határozatával hagyta jóvá, és az *Akadémiai Értesítő* 1994. augusztus 12-i számában hivatalosan megjelent.

A megújított Bolyai-díj szabályzata szerint (URL2) a díj odaítélését a III. Osztály öt rendes tagjából és öt kiemelkedő külföldi matematikusból álló, választott bizottság végzi. A Bolyai-díj aranyéremből⁵ áll, amelyhez anyagi fedezet esetén 25 000 dollár összegű jutalom is jár, és ötévente adják ki. Ugyan az Elnökség 15/1994. számú határozata szerint a díjat már 1996-ban ki kellett volna adni, de ez nem volt tartható. Végül, kilencven esztendei szünet után a Bolyai-díjat harmadik esetben is kiadták. Glatz Ferenc, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke a 2000. november 4-i ünnepségen nyújtotta át a Bolyai János nemzetközi matematikai díjat az izraeli Saharon Shelah professzornak *Cardinal Arithmetic* című könyvéért. A díjat azóta négy alkalommal ítéltek oda (1. táblázat).

1. táblázat. A 2000-es években odaítélt Bolyai-díjak

Év	Díjazott	A díjazott monográfia
2000	Saharon Shelah	<i>Cardinal Arithmetic</i> . Oxford University Press, 1994
2005	Mikhail Gromov (IHÉS, Párizs)	<i>Metric Structures for Riemannian and Non-Riemannian Spaces</i> . Birkhäuser, 1999
2010	Yuri Ivanovich Manin (Max-Planck-Institut, Bonn)	<i>Frobenius Manifolds, Quantum Cohomology and Moduli Spaces</i> . AMS, 1999
2015	Barry Simon (CalTech)	<i>Orthogonal Polynomials on the Unit Circle</i> . AMS, 2005
2020	Terence Tao (UCLA)	<i>Nonlinear Dispersive Equations</i> . AMS, 2006

Forrás: a szerző saját szerkesztése

⁴ A Matematikai és Fizikai Tudományok Osztálya 1993-ban szétvált. A Matematikai Tudományok Osztálya lett a III. Osztály, a Fizikai Tudományok Osztálya pedig a XI. Osztály.

⁵ Ez valójában aranyozott bronzmedál.

Megállapíthatjuk, hogy a Bolyai János nemzetközi matematikai díj megőrizte színvonalát (és ezzel a tekintélyét is), amennyiben a modern matematika legkiválóbbjai nyerték el a díjat. E cikk írásakor a 2025. évi díjazott kiléte még nem ismert.

Irodalomjegyzék

- Ács Tibor (2002). „A Magyar Tudományos Akadémia nemzetközi Bolyai-díjának megalapítása és százéves kálváriája”. *Valóság*, 45/5, 50–60.
https://adt.arcanum.com/hu/view/Valosag_2002/?pg=579&layout=s&query=%C3%81cs+tibor
- Ágoston Hugó (2002). „A nemzetközi Bolyai-díj bővülő története”. *Korunk*, 11, 125–126.
https://adt.arcanum.com/hu/view/Korunk_2002/?pg=1490&layout=s&query=%C3%A1goston+hug%C3%B3
- Fejér Lipót (1912). „Néhány szó Henri Poincaré-ról”. *Nyugat*, 15.
<https://epa.oszk.hu/00000/00022/00109/03499.htm>
- Pálffy Péter Pál (2013). „Nemzetközi matematikai díjak, avagy miért nincs matematikai Nobel-díj?” *Magyar Tudomány*, 7, 830–836.
- Reid, Constance (1970). *Hilbert*. New York: Springer. Második kiadás: 1996, New York: Springer.
- Staar Gyula (2005). „A székeltek fizikusa. Beszélgetés Toró Tiborral, Akadémiánk külső tagjával”. *Tiszatáj*, LIX, 10, 29–45.
- Szénássy Barna (1993). „Adalékok a Bolyai-díj történetéhez”. *Természet Világa*, 124/7, 291–294.
- Tóth Imre (1967). „Das Parallelenproblem im Corpus aristotelicum” [A párhuzamosok problémája a Corpus Aristotelicumban]. *Archive for History of Exact Science*, 3, 249–422.

URL1: <https://artortenet.hu/magyar-penzertekindex-arak-es-devizak-alapjan-1754-tol/>

URL2: <https://mta.hu/dijak-kituntetesekek/bolyai-janos-nemzetkozi-matematikai-dij-105815>

A szegedi *Acta Scientiarum Mathematicarum* száz éve¹

One Hundred Years of *Acta Scientiarum Mathematicarum* Szeged

Molnár Lajos

az MTA doktora, egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem, Szeged
molnarl@math.u-szeged.hu

Összefoglalás

A cikkben rövid áttekintést adunk a szegedi *Acta Scientiarum Mathematicarum* elmúlt száz évéről Riesz Frigyes és Haar Alfréd alapítók és a 35 éven keresztül főszerkesztő Szőkefalvi-Nagy Béla tudományos munkásságának bemutatásán keresztül.

Abstract

In this article we give a brief overview of the last one hundred years of the *Acta Scientiarum Mathematicarum* in Szeged through the scientific work of its founders, Frigyes Riesz and Alfréd Haar, and its editor-in-chief, Béla Szőkefalvi-Nagy, who held this position for 35 years.

Kulcsszavak: *Acta Scientiarum Mathematicarum*, Szegedi Tudományegyetem, Riesz Frigyes, Haar Alfréd, Szőkefalvi-Nagy Béla

Keywords: *Acta Scientiarum Mathematicarum*, University of Szeged, Frigyes Riesz, Alfréd Haar, Béla Szőkefalvi-Nagy

Köztudomású, hogy a Szegedi Tudományegyetem, illetve jogelődje 1921-ben, a trianoni szerződés folyományaként átrajzolt országhatárok és politikai történések következményeként, a kolozsvári Ferenc József Tudományegyetem Szegedre történő költözésével jött létre. Riesz Frigyes és Haar Alfréd, a kolozsvári egyetem professzorai így kerültek Szegedre, és lettek az itteni nemzetközi hírnű matematikai iskola megalapítói. A következőkben vázoljuk, hogy milyen tudományos tevékenység állt ekkor Riesz és Haar mögött.

Riesz Frigyes (1880–1956) egyetemi tanulmányait Zürichben kezdte (1897–1899) és Budapesten folytatta (1899–1901). Egy évet töltött Göttingenben (1901–1902), és Budapesten doktorált, illetve szerzett matematika–fizika szakos tanári oklevelet 1902-ben. Lőcsén, majd 1908-tól Budapesten volt középiskolai tanár, 1911-ben került a kolozsvári egyetemre. Kutatómunkájára nagy hatással volt a Göttingenben, a David

¹ Korábbi cikkünkben (Molnár 2022), illetve annak az *Érintő* című lap 2023. évi 27. számában megjelent fordításában hasonló címmel már közöltünk egy írást a témában. Jelen munkában igyekszünk újabb információkkal szolgálni, elkerülve a korábbi írással való jelentősebb átfedést.

Hilbert nevéhez kötődő tudományos fellegvárban eltöltött év, az ott szerzett ismeretek, valamint a modern analízis akkori francia iskolájának tevékenysége. A Szegedre költözés előtt elért legnevezetesebb eredményei közül a következőket említjük: a Riesz–Fischer-tétel (Riesz 1907), Riesz reprezentációs tételei, ezek közül is elsősorban a folytonos függvények terének funkcionáljait leíró tétel (Riesz 1909), valamint a kompakt operátorok Riesz-féle elmélete (Riesz 1916).²

A Riesz–Fischer-tétel Riesz-féle verziója azt állítja, hogy a négyzetesen szummábilis sorozatok ℓ^2 tere és az $[a, b]$ zárt intervallumon négyzetesen Lebesgue-integrálható függvények $L^2[a, b]$ tere izometrikusan izomorf. (Fischer megfogalmazásában a tétel az $L^2[a, b]$ tér teljességét mondta ki.) A tétel több szempontból is rendkívüli jelentőségű. Például a kvantumelmélet két, látszólag különböző alakjának, a Schrödinger-féle hullámmechanikának és a Heisenberg-féle mátrixmechanikának az ekvivalenciáját is ez az eredmény magyarázza meg.

Az említett reprezentációs tétel szerint az $[a, b]$ intervallumon folytonos függvények $C[a, b]$ terének (korlátos) lineáris funkcionáljai éppen a korlátos változású függvények szerinti Riemann–Stieltjes-integrálások. Annak bemutatásához, hogy ez az eredmény Riesz ismertségéhez milyen mértékben járult hozzá, Edgar R. Lorch cikkéből (Lorch 1998) idézünk:

„1910 körül, egy európai matematikai kongresszuson 3-4 kiváló fiatal matematikus együtt teázott egy kávéházban, és úgy döntött, küld egy üdvözlőlapotot a nagyra becsült angol kollégának, G. H. Hardynek. Egyikük sem írta alá a nevét, hanem mindegyikük egy olyan képletet írt rá, amelyet ő alkotott, és híressé tette a nevét. Riesz azt a képletet írta rá, amely a folytonos függvények $C[0, 1]$ terében előállította a legáltalánosabb lineáris funkcionált:

$$If = \int_0^1 f(x) d\mu(x)$$

Ezt Riesz-féle reprezentációs tételnek is nevezik. Mondani sem kell, Hardy azonnal tudta, kinek az aláírása...”.

Riesz kompakt operátorok elméletével kapcsolatos cikkéről Jean Dieudonné a következőket írja (Dieudonné 1983): „In my opinion, F. Riesz’s 1918 paper is one of the most beautiful ever written; it is entirely geometric in language and spirit, and so perfectly adapted to its goal that it has never been superseded and that Riesz’s proofs can still be transcribed almost verbatim.” Riesz munkájának súlyát az is jelzi, hogy a dolgozat megjelenésének századik évfordulójáról külön megemlékezés történt (Pietsch 2019). A cikkel kapcsolatban érdemes még megjegyezni, hogy ugyan az

² A publikáló folyóirat, az *Acta Mathematica* ezen kötetének évszáma a különböző forrásokban hol 1916, hol 1918. A magyarázatért, amely röviden az első világháború okozta helyzet, lásd Albrecht Pietsch cikkét (Pietsch 2019).

absztrakt Banach-tér fogalma „espace du type (B)” név alatt Banach 1922-ben közzétett téziseiben jelent meg először, de az axiómarendszer, elnevezés nélkül, már ott szerepel Riesz 1916/1918-as munkájában. (A dolgozat egyébként magyarul is olvasható a *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* 35. kötetében, ugyanis Riesz, hasonlóan több más cikkéhez, először magyarul közölte azt.) Riesz Frigyest a Magyar Tudományos Akadémia 1916-ban levelező tagjává, majd húsz év múlva rendes tagjává választotta.

Haar Alfréd (1885–1933) a Budapesti Fasori Evangélikus Gimnáziumban tanult, Rátz László volt a matematikatanára. Részt vett a *Középiskolai Matematikai Lapok* kiadása körüli munkában, 1903-ban mégis a Műegyetem Vegyész-mérnöki Karára iratkozott be. Azonban az év őszén megnyerte a Matematikai és Fizikai Társulat matematikaversenyét (a későbbi Eötvös Loránd-versenyt), s ez végül a matematika irányába terelte. 1904 tavaszán Budapesten kezdte, 1905 őszétől pedig Göttingenben folytatta tanulmányait. 1909-ben Hilbert irányítása mellett doktorált. A doktori fokozat megszerzése után nyomban *privatdozent* kinevezést kapott a göttingeni egyetemen. 1911-ben rövid ideig a Zürichi Egyetemen is dolgozott, itt került barátságba Albert Einsteinnel. Az 1905-től a kolozsvári egyetemen oktató Fejér Lipótot 1912-ben Budapestre hívták, s az ő, illetve a Kolozsvárt 1911-ben ugyancsak elhagyó Schlesinger Lajos pótlására 1911-ben Riesz Frigyest, 1912-ben pedig Haar Alfrédot hívta és nyerte meg az egyetem.

Haar 1921 előtti munkásságával kapcsolatban kiemeljük, hogy doktori értekezésében (Haar 1910) vezette be a róla elnevezett ortogonális függvényrendszert. A Haar-rendszer szerteágazó kutatások kiindulópontjává vált. Haar rendkívül sok energiát fektetett az oktatási tevékenységbe, de emellett lendületesen folytatta kutatásait Kolozsvárott, elsősorban a függvényapproximációk, variációszámítás és lineáris egyenlőtlenség-rendszerek területein. Kiemeljük azon dolgozatát (Haar 1918; Haar 1924), amelyben Farkas Gyula a lineáris programozás és optimalizáláselmélet egyik alaptételét adó eredményének fontos általánosítását adta.

Ilyen személyes és tudományos életúttal érkezett tehát Riesz és Haar 1921-ben Szegedre. Az itteni kezdeti körülmények meglehetősen mostohák voltak. A tudományos kutatáshoz nélkülözhetetlen könyvtárat és folyóirat-állományt Kolozsvárott kellett hagyni, s eleinte a magyar állami támogatás is igen szűkös volt. Riesz Frigyestnek Svédországban élő Marcell öccséhez írt egyik levele szerint az első évben 200 000 korona volt az egész egyetem könyvtárára szánt összeg (ami egy fellelhető táblázat szerint mai értéken számolva kevesebb mint 3 millió forint). Ahhoz, hogy mihamarabb beszerezzék a kutatómunkához szükséges könyv- és folyóirat-állományt, Riesz és Haar többféle eszökhöz folyamodott.

Riesz magával hozta Kolozsvárról a kölcsönzési nyilvántartást. A kölcsönzőket levélben kérték (többszörre sikerrel), hogy a kérdéses könyveket a szegedi egyetem Matematikai Szemináriumának könyvtárába juttassák el. Haarnak jó kapcsolata volt Klebelsberg Kunóval, a belügy-, majd vallás- és közoktatásügyi miniszterrel. Elpanaszolta neki a pénztelenség miatti nehézségeket, és segítséget kért. A miniszter mun-

katársainak tudtára jutott, hogy egy Hámori-Bíró Pál nevű gyáros nagyobb összeggel tartozik az államnak. Klebelsberg közbenjárására a befizetett tartozás a szegedi egyetem Matematikai Szemináriumához került. Alkalmi adományok, például a Rockefeller Alapítvány támogatása is érkeztek. Valamint értékes magángyűjtemények is gyarapították a könyvtárat, ezek vásárlás vagy ajándékozás útján kerültek birtokukba. Például (a súlyos szembetegségben szenvedő) Farkas Gyula a Matematikai Szemináriumnak adományozta könyvtárát.

Ami pedig jelen cikk szempontjából a legfontosabb, Riesz és Haar arra az elhatározásra jutott, hogy nemzetközi folyóiratot indítsanak, amely majd csereként szolgálhat külföldi folyóiratok beszerzéséhez. A folyóirat-alapításhoz az anyagi fedezetet társadalmi egyesület létrehozásával teremtették meg. A város nagyjai és tehetős polgárai létrehozták a Ferencz József-Tudományegyetem Barátainak Egyesületét, ez lett a lap kiadója.

Így indult útjára 1922-ben a szegedi *Acta* (amelyet a matematika mellett később más tudományágak *Actái* is követtek). Riesz és Haar szerkesztősége mellett Radó Tibor lett a technikai szerkesztő (többek között az ő feladata volt két szegedi nyomdászt megtanítani a matematikai cikkek szedésére). A folyóirat pontos elnevezése eleinte a következő volt: *Acta Litterarum ac Scientiarum Regiae Universitatis Hungaricae Francisco-Josephinae, Sectio Scientiarum Mathematicarum*. E hosszú címet az 1941-ben megjelent 10. kötettől *Acta Scientiarum Mathematicarum*-ra, rövidítve *Acta Sci. Math.*-ra változtatták. Még egyszerűbben, itthon szegedi *Acta*ként, külföldön *Acta Szeged*ként említették és említik.

A folyóirat indulásakor Riesz és Haar levélben fordult a világ számos nagynevű matematikushoz (akik közül sokakat személyesen is ismertek), illetve magyar kiválósághoz, és cikkeket kértek tőlük. Néhány szerző neve a szegedi *Acta* első öt kötetéből: Riesz és Haar mellett Erdős Pál, Fejér Lipót, Keréjártó Béla, Lánosz Kornél, Neumann János, Radó Tibor, Riesz Marcell, Szegő Gábor, George D. Birkhoff, Salomon Bochner, Constantin Carathéodory, Norbert Wiener. E névsor láttán nem meglepő, hogy a fiatal *Acta* néhány év alatt jelentős ismertségre tett szert. Rövidesen megindult a csere is. Számos matematikai folyóirat – köztük a legismertebbek is – fogadta el az ajánlatot, hogy cserekapcsolatba lépjen az *Actával*. Ezen az úton több mint 150 különböző szakmai folyóirat került a szegedi egyetem Bolyai Intézetének könyvtárába az elmúlt 100 év alatt. A cseréket segítette több külföldön élő magyar matematikus is. Például Riesz Marcell Svédországban megszerezte a tekintélyes svéd *Acta Mathematica* teljes sorozatát a szegedi *Acta* kezdetben vékonyka füzetéiért. A folyóirat a könyvállomány gyarapításának is jelentős forrása volt. A különböző könyvkiadók új monográfiáikból ingyenes példányokat ajánlottak fel a folyóiratban való ismertetésért cserébe. Így jött létre Szegeden az a matematikai könyvtár, amely hamarosan az egyik legjobb lett Európának e régiójában. Az indulás utáni folyamatos sikerekben természetesen szerepe volt Riesz és Haar már szegedi professzorokként végzett nagy hatású kutatási tevékenységének.

Riesz 26 cikket publikált a szegedi *Actában*. A legelső füzetben jelent meg nevezetes dolgozata (Riesz 1922), amelyben bevezette a szubharmonikus függvények fo-

galmát (amelyeket aztán alapvető eszközként használt a potenciálelméletben). Egyik dolgozatában (Riesz 1930a) elemi bizonyítást adott a korlátos önadjungált operátorok Hilbert-féle spektráltételére, illetve annak a nemkorlátos esetre történő Neumann-tól, illetve Stone-tól származó kiterjesztésére. (A szakirodalomban ezt a cikket szokás idézni az absztrakt Hilbert-tér axiómarendszerének első forrásaként.) Riesz 1934-ben megjelent cikkében bizonyította be a Hilbert-terek funkcionáljaira vonatkozó reprezentációs tételét (Riesz 1934).

Rendkívül eredetiek és fontosak Riesz valós függvénytani munkái. Henri Lebesgue klasszikus elméletében a felépítés sorrendje: mérték – integrál – differenciálás. Riesz megmutatta, hogy ez a sorrend nem kőbe vésett. A monoton függvények majdnem mindenütt differenciálhatóságáról szóló tételre, amely Lebesgue könyvének végén található mint az egész elmélet egyik utolsó következménye, Riesz a szegedi *Actában* megjelent (1930b) cikkében közvetlen, egyszerűségben és eleganciában felülmúlhatatlan bizonyítást adott. A kulcsfontosságú észrevétel az úgynevezett felkelő nap lemma, amelyet később több más vonatkozásban is felhasználtak. Riesz bizonyításával lehetővé vált, hogy a klasszikus integrálfogalomhoz hasonlóan a Lebesgue-féle integrál is mint a differenciálás műveletének a megfordítása legyen tárgyalható. Az egyetemi előadásaiban már korábban is követett, a számegyenesen a Lebesgue-integrálhoz közvetlenül, szakaszonként konstans függvények monoton sorozatain keresztül, csupán a nullmértékűség fogalmának felhasználásával való eljutás a Szőkefalvi-Nagy Bélával közös tankönyvben (Riesz–Szőkefalvi-Nagy 1952) jelent meg nyomtatásban.

Haar Alfréd hat cikket publikált a szegedi *Actában*. Legkiemelkedőbbnek tekintett eredménye a lokálisan kompakt csoportokon eltolásinvariáns Borel-mérték létezése, amit az 1931-es MTA levelező taggá választása utáni székfoglaló előadásának írásos verziójában (Haar 1932), majd az *Annals of Mathematics*-ben megjelent cikkében (Haar 1933) közölt. Haar ezen eredményének hátterében Hilbert 5. problémája állt, amely azt kérdezte, hogy a Lie-csoportokat lehetséges-e a differenciálhatósági feltételek nélkül, pusztán topológiai úton jellemezni. A kérdésre az 1950-es években született meg a teljes válasz: a Lie-csoportok mint topologikus csoportok éppen a lokálisan euklideszi csoportok. Ezen megoldáshoz való eljutásban Haar tételének igen fontos szerepe volt. Érdekességként említjük, hogy Haar az általa korábban még csak sejtett mérték létezéséről konzultált Neumann Jánossal, aki állítólag kételkedését fejezte ki az ügyben, de később maga is szerepet játszott abban, például a Haar-féle mérték egyértelműségének bizonyításával kapcsolatban.

Haar 1933-ban, súlyos betegségben elhunyt. Szegedi ravatalánál Riesz mondott beszédet (Riesz 1933), az *Acta* 6. kötet 3–4. füzeté pedig gyászkeretes borítóval jelent meg. Haar szerkesztői munkáját Kerékjártó Béla vette át, majd a 10. kötettől szerkesztő lett Szőkefalvi-Nagy Béla is. Riesz 1947-től 1956-ban bekövetkezett haláláig Budapesten élt és dolgozott, utolsó publikációja 1952-ben jelent meg.

Riesz és Haar kétségtelenül korszakos jelentőségű matematikusok voltak. Több írásból képet kaphatunk emberi vonásaikról, személyiségükről is (Vincze 1991; Lorch 1998; Móra 1964), továbbá bővebb információk és érdekességek is olvashatók róluk

(Halmos 1977; Szőkefalvi-Nagy 1949; Szőkefalvi-Nagy 1977; Varga 2008; Varga-Szabó 2018).

Az 1946–1981 közötti 35 évben Szőkefalvi-Nagy Béla (1913–1998) látta el a szerkesztői és főszerkesztői teendőket. Megőrizte azokat a szigorú szerkesztési elveket és azt a magas színvonalat, amellyel a folyóiratot megalapítói útjára bocsátották. Ebben az időben a publikált cikkek száma jelentősen megnőtt, a *MathSciNet*-ben 1229 szegedi *Acta*-cikk ismertetése található ebből az időszakból. Amellett, hogy főszerkesztése idején a lapban mint általános matematikai folyóiratban a magyar matematikusok színe-java publikált, a szegedi *Acta* az operátorelmélet és funkcionálanalízis egyik nemzetközi vezető folyóiratává vált. Ez természetesen összefüggésben állt Szőkefalvi-Nagy Béla ezen területeken kifejtett, nagy nemzetközi elismertséget kiváltó tudományos tevékenységével.

Kutatásainak csak két (egymással összefüggő) területét említjük, a dilatációelméletet és az általános Hilbert-tér kontrakciókkal kapcsolatos, Ciprian Foiaşsal közösen kidolgozott elméletét, amely a nem feltétlenül normális operátorok vizsgálatában meghatározó kutatási iránnyá vált. Ebben a témában több mint 75 dolgozatot publikált, köztük mintegy 50-et Foiaşsal közösen. A dolgozatok jelentős része a szegedi *Actában* jelent meg. Az alapvetést egy 12 közleményből álló, Szegeden megjelent cikksorozatban végezték el, amelynek első (Szőkefalvi-Nagy 1953) és második része még egyszerűs, a további tíz már Foiaşsal közös munka, az utolsó rész 1966-ban jelent meg. Ezen dolgozatok képezik a híres Szőkefalvi-Nagy–Foiaş-könyv alapját (Szőkefalvi-Nagy–Foiaş 1967). Ennek bővített kiadásában (Szőkefalvi Nagy et al. 2010) az irodalomjegyzék 105 a szegedi *Actában* megjelent cikket tartalmaz, ami jól mutatja a folyóirat szerepét az elmélet fejlődésében. Dilatációelméleti eredményei (köztük a Szőkefalvi-Nagy [1953] vonatkozó eredménye, majd az általános dilatációs tétel, amely a Riesz–Szőkefalvi-Nagy-könyv 1955-ös újabb kiadásának függelékében jelent meg) igen nagy nemzetközi visszhangot keltettek. Továbbá tudományos tevékenysége kapcsán nem mellőzhető azon eredményének említése, amelyben pontos jellemzést adott invertálható operátornak unitér operátorhoz való hasonlóságáról (Szőkefalvi-Nagy 1947).³ Szőkefalvi-Nagy Béla összességében 65 cikket közölt a szegedi folyóiratban, az elsőt az 1936/37-es 8. kötetben, az utolsót az 1985-ös 48. kötetben. Munkásságáról részletes képet ad a (Kérchy 2004) megemlékezés.

Írásunkban nincs hely azon jeles matematikusok nevének felsorolására, akik szerkesztői tevékenysége idején publikáltak a folyóiratban. Kiemelkedő példaként hadd említsük meg az 1950-es teljes 12. kötetet, amelyet Riesz és Fejér hetvenedik születésnapja alkalmából szerkesztettek; érdemes áttekinteni a szerzők névsorát. Szőkefalvi-Nagy Béla 1945-ben lett az MTA levelező tagja, majd 1956-ban rendes tagja. A főszerkesztői székben Leindler László, majd Kérchy László követte (1982–1992, illetve 1993–2017 között).

³ A tétel bizonyítása sokak szerint a „Proofs from the Book” kategóriájába esik.

Az e tanulmány előzményének tekinthető cikkben (Molnár 2022) röviden ismertettünk néhány különösen nagy hatású, a folyóiratban publikált dolgozatot. Jelen munka írásakor megkerestük az aktuálisan legtöbbet hivatkozott cikkeket. A *MathSciNet*-ben (1940-ig terjedő adatokkal) az első helyen Prékopa András cikke szerepel (Prékopa 1973), jelenleg 182 hivatkozással. A dolgozatról írtunk is a korábbiakban (Molnár 2022). A második keresést a *Web of Science*-ben végeztük (ami matematikán kívüli területeket is figyel, időben 1975-ig terjedő adatokkal). Eszerint a leghivatkozottabb cikk Alain Connes dolgozata (Connes 1977), jelenleg 142 hivatkozással. Ez a Fields-érmes szerző azon cikkeinek a sorából való, amelyek végén eljutott az úgynevezett hipervéges III. típusú faktor Neumann-algebrák teljes klasszifikációjáig. Alain Connes ezen eredményét a 20. századi matematika csúcsteljesítményei között szokás említeni. Büszkeséggel tölthet el bennünket, hogy ennek a munkának egy darabja a szegedi *Actában* jelent meg.

Szőkefalvi-Nagy Béla 1998-ban hunyt el. Emlékére lánya, Szőkefalvi-Nagy Erzsébet 1999-ben megalapította a Szőkefalvi-Nagy Béla-érem elismerést. Ezzel a díjjal az SZTE Bolyai Intézet Tanácsa olyan matematikusokat tüntet ki, akik jelentős műveket publikáltak a folyóiratban. Eddig 24 került átadásra, a díjazottak listája megtalálható a Wikipédián (URL1). Az idei, 25. kitüntetett Javad Mashregi, a Université Laval (Québec) professzora (egyebek között a Kanadai Matematikai Társulat korábbi elnöke).

Jelen munka szerzője 2018 óta főszerkesztője a folyóiratnak. Ebben az időszakban jelentős változások történtek a lap életében, amelynek kiemelkedő eseménye volt a 2022-es jubileumi év. A történések részletesebb leírásáért lásd Molnár Lajos (2022) cikkének harmadik szakaszát. Kiemeljük, hogy az ott leírt eseményeknek olyan nagyságok voltak a résztvevői, mint a fentebb már említett Fields-érmes Alain Connes vagy a szabad valószínűségelmélet megalapítója, Dan Voiculescu.

Jelenleg a szokásos napi folyóirat-szerkesztési tevékenység mellett egy speciális szám összeállítása folyik az operátorközepek témájában, amely az operátor- és mátrixelmélet közös kurrens területe.⁴ Reméljük, hogy kitartó munkánk eredményeként a szegedi *Acta* hosszú távon fog még sikeres, elismert folyóiratként működni.

⁴ Időközben a szóban forgó szám megjelent, lásd URL2.

Irodalomjegyzék

- Connes, Alain (1977). „Periodic Automorphisms of Hyperfinite Factor of Type II_1 ”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 39, 39–66.
- Dieudonné, Jean (1983). *History of Functional Analysis*. Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics, 83. New York: Marcel Dekker Inc.
- Halmos, Paul R. (1977). „Riesz Frigyes munkássága”. *Matematikai Lapok*, 29 (1977–1981)/1–3, 13–20.
- Haar Alfréd (1910). „Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme”. *Mathematische Annalen*, 69, 331–371.
- Haar Alfréd (1918). „A lineáris egyenlőtlenségekről”. *Matematikai és Természettudományi Értesítő*, 36, 179–196.
- Haar Alfréd (1924). „Über lineare Ungleichungen”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 2, 1–14.
- Haar Alfréd (1932). „A folytonos csoportok elméletéről”. *Matematikai és Természettudományi Értesítő*, 49, 287–307.
- Haar Alfréd (1933). „Der Massbegriff in der Theorie der kontinuierlichen Gruppen”. *Annals of Mathematics*, 34, 147–169.
- Kérchy László (2004). „Szőkefalvi-Nagy Béla 1913–1998”. *Matematikai Lapok*, 2004–2005/2, 12–37.
- Lorch, Edgar R. (1998). „Szeged – 1934. Ahogyan egy amerikai matematikus látta”. *Természet Világa*, 129/3. Különszám, 21–25.
- Molnár Lajos (2022). „100 Years of *Acta Szeged*”. *European Mathematical Society Magazine*, 126, 27–32.
- Móra Ferenc (1964). „Frédi”. In: Móra Ferenc. *Szegedi tulipános láda*. Budapest: Magvető Könyvkiadó, 541–545.
- Pietsch, Albrecht (2019). „The 100th Jubilee of Riesz Theory”. *European Mathematical Society Newsletter*, 111, 31–33.
- Prékopa András (1973). „On Logarithmic Concave Measures and Functions”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 34, 335–343.
- Riesz Frigyes (1907). „Sur les systèmes orthogonaux de fonctions”. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 144, 615–619.
- Riesz Frigyes (1909). „Sur les opérations fonctionnelles linéaires”. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 149, 974–977.
- Riesz Frigyes (1916). „Über lineare Funktionalgleichungen”. *Acta Mathematica*, 41, 71–98.
- Riesz Frigyes (1922). „Sur les valeurs moyennes du module des fonctions harmoniques et des fonctions analytiques”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 1, 27–32.
- Riesz Frigyes (1930a). „Über die linearen Transformationen des komplexen Hilbertschen Raumes”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 5, 23–54.
- Riesz Frigyes (1930b). „Sur l'existence de la dérivée des fonctions monotones et sur quelques problèmes qui s'y rattachent”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 5, 208–221.
- Riesz Frigyes (1933). „Riesz Frigyes l. t. gyászbeszéde Haar Alfréd l. t. ravatalánál 1933. március 19-én”. *Akadémiai Értesítő*, 43, 167–168.
- Riesz Frigyes (1934). „Zur Theorie des Hilbertschen Raumes”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 7, 34–38.
- Riesz Frigyes – Szőkefalvi-Nagy Béla (1952). *Leçons d'analyse fonctionnelle*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Szőkefalvi-Nagy Béla (1947). „On Uniformly Bounded Linear Transformations in Hilbert Space”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 11, 152–157.
- Szőkefalvi-Nagy Béla (1949). „Riesz Frigyes tudományos munkásságának ismertetése”. *Matematikai Lapok*, 1, 170–182.
- Szőkefalvi-Nagy Béla (1953). „Sur les contractions de l'espace de Hilbert”. *Acta Scientiarum Mathematicarum*, 15, 87–92.
- Szőkefalvi-Nagy Béla (1977). „Riesz Frigyes élete és személyisége”. *Matematikai Lapok*, 29 (1977–1981), 1–5.
- Szőkefalvi-Nagy Béla (1985). „Alfred Haar (1885–1933)”. *Results in Mathematics*, 8, 194–196.

- Szőkefalvi-Nagy, Béla – Foiaş, Ciprian (1967). *Analyse harmonique des opérateurs de l'espace de Hilbert*. Paris–Budapest: Masson et Cie – Akadémiai Kiadó.
- Szőkefalvi-Nagy, Béla et al. (2010). *Harmonic Analysis of Operators on Hilbert Space*. New York: Springer.
- Varga Antal (2008). „75 éve halt meg Haar Alfréd”. *Polygon*, 17/1–2, 1–10.
- Varga Ferencné – Szabó Péter Gábor (2018). „Elmélkedések egy Neumann–Haar-levél ürügyén”. *Polygon*, 25/1, 1–12.
- Vincze István (1991). „Emlékezés Riesz Frigyes professzor úrra”. *Matematikai Lapok*, 1 (Új sorozat), 6–14.
- URL1: Béla Szőkefalvi-Nagy. *Wikipedia* (letöltés: 2025. feb. 26.).
https://en.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9la_Sz%C5%91kefalvi-Nagy
- URL2: *Acta Scientiarum Mathematicarum* Volume 90, Issue 3–4. *Springer Nature Link* (letöltés: 2025. feb. 26.).
<https://link.springer.com/journal/44146/volumes-and-issues/90-3>

A magyar módszer

The Hungarian Method

Bérczi-Kovács Erika¹ – Frank András²

¹ PhD, egyetemi adjunktus, Eötvös Loránd Tudományegyetem Operációkutatási Tanszék, Budapest;
HUN-REN-ELTE Egerváry Jenő Kombinatorikus Optimalizálási Kutatócsoport, Budapest
erika.berczikovacs@ttk.elte.hu

² az MTA rendes tagja, professor emeritus, Eötvös Loránd Tudományegyetem Operációkutatási Tanszék, Budapest;
HUN-REN-ELTE Egerváry Jenő Kombinatorikus Optimalizálási Kutatócsoport, Budapest
andras.frank@ttk.elte.hu

Összefoglalás

A hozzárendelési probléma a gyakorlatban széles körben alkalmazott optimalizálási feladat, amelynek matematikai alapjait König Dénes és Egerváry Jenő fektették le. Harold W. Kuhn az ő eredményeikre alapozva dolgozta ki a megoldásra vonatkozó hatékony algoritmust, amelyet König és Egerváry előtt tisztelve *magyar módszernek* nevezett el. A módszer mind elméleti, mind alkalmazott kutatási területek kiindulópontjává vált. A dolgozatban a magyar módszer történetének rövid felvázolásán túl nem matematikus olvasóink számára is igyekszünk érthetővé tenni a megoldás matematikai alapjait anélkül, hogy magának az algoritmus leírásának a technikai részleteit itt bemutatnánk.

Abstract

The assignment problem is an optimization problem that occurs in a large number of practical applications. Dénes König and Jenő Egerváry laid the theoretical foundations for its solution. Their results led Harold W. Kuhn to develop a particularly efficient algorithm, which he named *the Hungarian method* in honour of König and Egerváry. The method became the starting point for further theoretical and applied research. In this paper, in addition to outlining the background of the Hungarian method, we will attempt to explain its mathematical basis for non-mathematician readers as well, without going into the technical details of the description of the algorithm itself.

Kulcsszavak: hozzárendelési feladat, hatékony algoritmus, gráfok, min-max tétel, páros gráfok párosításai

Keywords: assignment problem, efficient algorithm, graphs, min-max theorem, bipartite matchings

A hozzárendelési probléma

A hozzárendelési (angolul: assignment) probléma egy tisztán matematikai kérdéskör, amely több egymással rokon modellt foglal magában, és amelynek hátterében megannyi (ipari, katonai stb.) gyakorlatban megfogalmazott optimalizálási feladat áll. A matematikában nem ritka, hogy egy absztrakt problémát az egyszerűbb beszédmód kedvéért egyfajta hétköznapi nyelven fogalmaznak meg. König például az egyik tételét egy táncterembe érkező hölgyek és urak párba állításával illusztrálta (König 1935). Egy sportnyelven elmondott képzeletbeli példa a következő.

Az úszóválogatott kapitánya a női 4×100 méteres vegyes váltó összeállításán töri a fejét. A csapat négy főből áll, egy-egy úszó indul hát-, mell-, pillangó- és gyorsúszásban. Összesen tíz válogatott szintű versenyzőből lehet választani, akiknek mindegyikéről tudjuk, hogy az egyes úszásnemekben mennyi a legjobb ideje. Hogyan állítsuk össze a váltót, ha azt szeretnénk, hogy az összidő a lehető legkisebb legyen?

Robert L. Thorndike pszichológusnak a *Psychometrika* című folyóiratban 1950-ben megjelent dolgozata azt a rokon kérdést vizsgálja, hogy miként lehet egy munkahelyen megüresedett álláshelyekhez úgy hozzárendelni jelentkezőket, hogy a hozzárendelés összértéke a lehető legnagyobb legyen, ahol mindegyik jelentkezőre egy-egy számértékkel előre adott, hogy az egyes álláshelyekre mennyire alkalmas.

Első ránézésre a feladat semmitmondónak tűnik, hiszen véges sok esetből kell a legjobb hozzárendelést kiválasztani. Például egy 5-ször 5-ös hozzárendelési feladatban, ahol tehát 5 munkahely van és 5 jelentkező, összesen $5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 120$ (azaz 5 faktoriális, jelölése $5!$) módon tudjuk a jelölteket sorba állítani, és ezek közül kiválasztani a legjobb hozzárendelést, ráadásul ezt akár még kézzel, papíron is viszonylag gyorsan ki lehet próbálni. Az úszóválogatott összeállításánál is csak $10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 = 5040$ esetet kell számba venni és összehasonlítani, ami kézzel ugyan már elég macerás lenne, de egy egyszerű számítógépes programnak ez nem okoz gondot.

Ugyanakkor, ha tíz állásra tíz jelölt nyújt be pályázatot, akkor az összes lehetőség kipróbálása már $10!$ eset összehasonlítását igényli, ami több mint 3,5 millió lehetséges hozzárendelés. Ez kézzel már nyilván kezelhetetlen, bár egy számítógépes programnak még ez sem okoz leküzdhetetlen nehézséget.

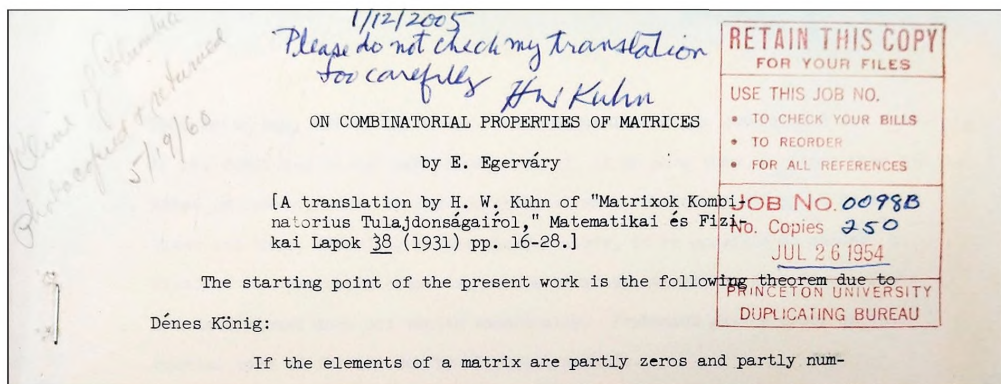
De az igazi katasztrófa csak most jön. Az n faktoriális ugyanis olyan elképesztő gyorsasággal nő az n egyenkénti növelésekor, hogy nincs olyan számítógép, amelyik akár csak $50!$ esetet végig tudna nézni, és akkor még nem is említettünk egy olyan n -szer n -es hozzárendelési problémát, ahol például $n = 1000$, ami könnyen felbukkan valódi gyakorlati alkalmazásokban.

Érdemes felidézni Thorndike 1950-es cikkét. A feladattal ő egy matematikushoz fordult, aki éppen azzal háritotta el a kérdést, hogy a feladat matematikai szempontból érdektelen, mert csak véges sok eset összehasonlítását igényli. Thorndike a cikkének 218. oldalán joggal jegyzi meg (magyarra fordítva): „Egy pszichológusnak ez sovány vigasz [...] egyenként kipróbálni az összes számba vehető esetet matematikai szempontból lehet, hogy a probléma megoldását jelenti, de a gyakorlatban ez nem használható megoldás” (Thorndike 1950).

Jó szerencse, hogy a matematikusok időben felismerték az e gyakorlati probléma mögötti matematikai kihívást, és ki is dolgoztak egy hatékony és elegáns megoldást. Ez a magyar módszer. Ennek két alapköve van: König Dénes páros gráfok párosításainak maximális elemszámára vonatkozó tétele 1931-ből, valamint ennek Egerváry Jenő által kidolgozott, súlyokkal (vagy költségekkel) ellátott kiterjesztése, szintén 1931-ből. E két tétel bizonyításának ötvöztetésével Harold W. Kuhn amerikai matematikus 1955-ben publikált egy hatékony algoritmust a hozzárendelési probléma megoldására. Ő vezette be a *Hungarian method* elnevezést is, amely azóta széles körben elterjedt.

Felvetődhet a kérdés, hogy miként jutott e két magyar matematikus munkája az amerikai Kuhn tudomására, amikor mind König, mind Egerváry cikke magyar nyelven jelent meg (König 1931; Egerváry 1931). A válasz az 1935-ben megjelent, a világon legelső gráfelméletéről szóló, Königtől származó, német nyelvű könyvben van. Ebben már szerepel König tétele, de az ezt általánosító Egerváry-tételre csak egy rövid utalás van a 240. oldal lábjegyzetében. Ezt vette észre Kuhn 1953-ban, majd beszerezve Egerváry cikkét és egy magyar–angol szótárt, két hét alatt elkészítette az angol fordítást, amely meg is jelent a Princeton Egyetem Másolási Hivatalának sokszorosításában 1954 nyarán.

Kuhn cikke megjelenésének fél évszázados jubileuma alkalmából az MTA–ELTE Egerváry Kutatócsoportja 2005-ben egynapos ünnepi konferenciát szervezett az Akadémián, amelynek fő előadója maga Kuhn volt. Ebből az alkalomból Kuhn az Egerváry Kutatócsoportnak ajándékozta az Egerváry-cikk fordításának egy eredeti példányát, rajta a Másolási Hivatal piros pecsétjével és Kuhn frissen ráírt megjegyzésével: „Please do not check my translation too carefully” (1. ábra).



1. ábra. Egerváry Jenő 1931-es cikkét Harold W. Kuhn angolra fordította, és az angol cikk különlenyomatát átadta e tanulmány egyik szerzőjének (F. A.), aki ezt a fényképet készítette a dedikált címlapról

A jelen írás célja nem csupán az, hogy magyar tudósok által megalapozott jelentős matematikai eredményekre érdekes történetek bemutatásával emlékezzünk, hanem az is, hogy nem matematikus olvasók számára megpróbálja megvilágítani, hogy mire is megy itt ki a játék. Ezen az úton a legelső kérdés az, hogy miként lehet különbséget tenni két véges lépésszámú algoritmus hatékonysága között.

Az algoritmusok hatékonysága

Az algoritmusok a matematika minden területén jelen vannak. Egy egész szám prímtényezőkre bontása, egy háromszög területének kiszámítása mind-mind egy algoritmus megkeresését célozzák. Az a felismerés azonban, hogy egy algoritmus végessége önmagában nem mindig elegendő, csak a számítógépek felbukkanásával fogalmazódott meg.

Olyan algoritmusra volna szükség, amely nem csupán azt tudja, hogy véges sok lépésben kiadja a helyes eredményt, hanem valamilyen értelemben hatékony is. Az algoritmus hatékonysága azt akarja jelezni, hogy az input méretének függvényében milyen felső korlát adható arra, hogy hány elemi lépés elvégzésével kapjuk meg a keresett végeredményt.

A matematikában akkor neveznek egy algoritmust *polinomiálisnak* (elméleti matematikai értelemben hatékonynak), ha ez a lépésszám a bemenet (input) n -nel jelölt méretének egy polinomjával korlátozható. Természetesen egy n^{100} -os lépésszámú algoritmus, bár polinomiális, a gyakorlatban használhatatlan, de az az általános tapasztalat, hogy az eddig létrehozott polinomiális algoritmusok döntő többségénél az n kitevője kicsi, és ezek az algoritmusok a gyakorlatban már kiválóan helytállnak. Például, ha valaki az n -szer n -es hozzárendelési problémára tudna létrehozni egy n^5 -es lépésszámú (futásidejű) algoritmust, akkor ezt egy jobb számítógépen akár $n = 1000$ -re is le lehetne futtatni. Emiatt van az, hogy a polinomiális futásidejű (lépésszámú) algoritmusokat tekintik jónak, hatékonynak, míg egy exponenciális (például 2^n) futásidejű algoritmus messziről kerülendő.

A hozzárendelési probléma a gráfok nyelvén

Egy $G = (V, E)$ gráf egy egyszerű modell dolgok, objektumok közötti kapcsolatok megjelenítésére, például egy társaságon belüli ismeretségek leírására. Itt V jelöli a gráf csúcsait: ezek felelnek meg a társaság tagjainak, míg az E elemei az élek. Egy u és v között vezető $e = uv$ él azt jelzi, hogy az u és v csúcsoknak megfelelő két személy ismeri egymást (ahol az ismeretségekről feltesszük, hogy kölcsönösek). Ilyenkor azt is mondjuk, hogy u és v szomszédosak, illetve hogy az e él fedi az u és v csúcsokat.

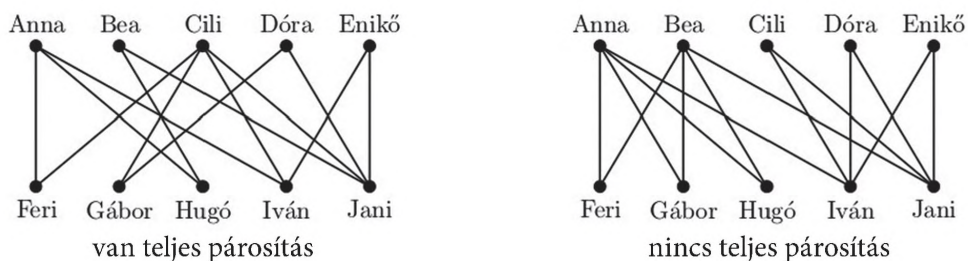
A gráf egy M párosítása az éleknek egy olyan részhalmaza, amely minden csúcsot legfeljebb egyszer fed. A párosítás teljes, ha valamennyi csúcsot fedi. Az a kérdés tehát, hogy mikor lehet egy társaság tagjait úgy párba állítani, hogy minden pár mindkét tagja ismeri egymást, úgy fogalmazható meg, hogy egy gráfnak mikor van teljes párosítása. Ezt hívják teljes párosítási problémának. Ha nincsen teljes párosítás, kíváncsiak lehetünk egy legnagyobb elemszámú párosítás meghatározására: ez a maximális párosítás problémája. További általánosítás, és a hozzárendelési problémában bennünket ez érdekel igazán, ha az E élhalmazon adott egy h (tipikusan egész vagy racionális értékű) függvény, és egy erre nézve maximális vagy minimális össz h -értékű (teljes) párosítást keresünk. A jobb szemléltetés kedvéért maximalizálásnál w súlyfüggvényről, minimalizálásnál pedig c költségfüggvényről beszélünk.

Az alábbiakban csak páros gráfokkal fogunk foglalkozni. Egy gráfot akkor hívunk páros gráfnak, ha a csúcsai két osztályba sorolhatók úgy, hogy csak a két osztály elemei között vezetnek élek. Akkor van szó teljes páros gráfról, ha az egyik csúcsosztály minden eleme össze van kötve a másik csúcsosztály minden elemével.

A hozzárendelési probléma alapváltozata valójában egy maximális w súlyú teljes párosítás megkeresése, ami természetesen egyenértékű egy minimális ($-w$) költségű teljes párosítás megkeresésével.

Kissé általánosabb a kérdés, ha nem tesszük fel, hogy a páros gráf két osztálya egyforma méretű, és a kisebbiket fedő legolcsóbb párosítás iránt érdeklődünk. Például az úszó vegyes váltó összeállításának problémáját azzal a $G = (U, W; E)$ teljes páros gráffal modellezhetjük, ahol a 10-elemű U az úszóknak felel meg, a négyelemű W pedig a négy úszásnemnek. Egy uw élnek a „költsége” az u úszó legjobb ideje a w úszásnemben. Ekkor a feladat egy olyan négyélű (azaz W -t fedő) párosítás megkeresése, amelynek összköltsége minimális.

Amikor hölgyek és urak közötti ismeretségeket akarunk kódolni, akkor az is egy páros gráffal tehető meg kényelmesen. Képzeljük el, hogy egy táncórára 10 hölgy és 10 úr jött el, de sajnos nem minden hölgy ismer minden urat. Szeretnénk a résztvevőket úgy párba állítani, hogy mindenki ismerje a párját, vagy ha ez nem lehetséges, akkor minél több párt találni, amelyek tagjai ismerik egymást. Egy ilyen szituációt egy $G = (U, W; E)$ páros gráffal lehet jól ábrázolni, amelyben az U elemei az uraknak, a W elemei a hölgyeknek felelnek meg, és egy U -beli u csúcs akkor van egy W -beli w csúccsal összekötve, ha u és w ismerik egymást. Akkor tudunk mindenkinek párt találni, ha a társított gráfmodellben van teljes párosítás (2. ábra).



2. ábra. Hölgyek és urak közötti ismeretséget szemléltető páros gráf

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Optimalitást garantáló igazolvány

A hozzárendelési probléma megoldására szolgáló magyar módszer lényegének megértéséhez érdemes először a súlyozatlan speciális esetet vizsgálni. Az egyik alapkérdés az, hogy egy páros gráfban miképp lehet algoritmikusan eldönteni, hogy létezik-e teljes párosítás, illetve ha nem létezik, miként lehet meghatározni egy maximális elemszámú párosítást. De itt már mindenféle algoritmikus tervezgetés előtt felbukkan egy alapvető elvi probléma.

Ha valaki betoppan egy konkrét párosítási feladat megoldására hozott teljes párosítással (és az most nem érdekes, hogy ő ezt hogyan találta), akkor egyszerűen és hatékonyan ellenőrizni tudjuk, hogy ez jó-e, azaz hogy a párok valóban ismerik-e egymást. Sokkal fogósabb a szituáció, ha az illető azzal a szomorú hírrel érkezik, hogy ő ugyan mindent megpróbált, de szerinte a konkrét esetben a keresett teljes párosítás nem létezik. Van-e valamiféle könnyen ellenőrizhető igazolvány, amelyre ránézve meggyőzve érezhetjük magunkat, hogy a konkrét esetben teljes párosítás tényleg nem

létezik? Másként fogalmazva, egy algoritmus értékét, használhatóságát emeli, ha van hozzá egy leállási szabály, amely tehát egy könnyen és gyorsan ellenőrizhető igazolvány az algoritmus által szolgáltatott output helyességére.

Képzeliük el, hogy a fentebb említett tánciskola vezetője átadja a másnap érkező tíz hölgy és tíz úr ismeretségi táblázatát avval, hogy keressünk egy teljes párosítást. Más szóval, adott egy $G = (U, W; E)$ páros gráf, ahol U és W is egyaránt tíz csúcsból áll, és kell találnunk egy teljes párosítást. Hiába dolgozunk a feladaton egész éjjel, nem találunk ilyen párosítást. Mit mondjunk a főnöknek, hogyan győzzük meg, hogy valóban nincs teljes párosítás? Azt nyilván nem várhatjuk el, hogy a hosszadalmas számításaink részleteit ellenőrizze.

Mindenesetre roppant szerencsés helyzetben vagyunk, ha például Márta a tíz úr egyikét sem ismeri, mert ekkor nyilván nem létezhet teljes párosítás. Persze könnyen előfordulhat, hogy mindenkinek van legalább egy másik nemű ismerőse, de a kívánt teljes párosítás mégsem létezik. Például, ha Márta is, és Kati is kizárólag Jánost ismeri, akkor az egyiküknek garantáltan nem jut pár. Így aztán fel kell tennünk, hogy bármely két hölgy együtt legalább két urat ismer. És itt újra felvetődik a kérdés, hogy ha ez a feltétel is teljesül, akkor vajon már bizonyosan létezik-e a kívánt összepárosítás. E példából már gyanítható, hogy ez elég valószínűtlen, és valóban, ha van például hét hölgy, akik összesen kevesebb mint hét urat ismernek, akkor ezen hölgyek egyikének garantáltan nem jut pár. Általában azt mondjuk, hogy a hölgyek egy $X \subseteq W$ részhalmaza hiányos, ha az általuk együttesen ismert urak száma kisebb, mint az X elemszáma.

Megállapíthatjuk tehát, hogy ha van hiányos halmaz, akkor garantáltan nem létezhet teljes párosítás, és egy ilyen hiányos halmaz bemutatása már a főnököt is azonnal meggyőzi erről (függetlenül attól, hogy mi hogyan is akadtunk a hiányos halmazra). Például a 2. ábra jobb oldalán a Cili–Dóra–Enikő–hármás ilyen, mert együtt is csak két urat ismernek.

De az igazi kérdés csak most jön. Ha nincs hiányos halmaz, azaz bármely j hölgy összesen legalább j urat ismer minden $j = 1, 2, \dots, 10$ egészre, akkor már egész biztosan létezik a keresett teljes párosítás, avagy nagyon is előfordulhat, hogy van valami másfajta, összetettebb strukturális ok, ami ezt megakadályozza? A problémával először szembetalálkozó olvasó számára megítélhetetlen, hogy mi is itt a helyes válasz.

A veszélyt jól érzékelteti egy általánosabb helyzetben fellépő szituáció. A teljes párosítási problémát ugyanis tetszőleges gráfra is meg lehet fogalmazni, vagyis hogy adott egy $2n$ csúcsból álló $G = (V, E)$ gráf, és ebben keresünk teljes párosítást. Könnyen belátható, hogy ha van egy olyan $X \subset V$ csúcshalmaz, amelyen belül nem vezet él, és az X -ből csak X elemszámánál kevesebb csúcshoz vezet él, akkor garantáltan nem létezhet teljes párosítás. Itt is az lehet a titkos remény, hogy ha ilyen típusú hiányos halmaz nem létezik, akkor már biztosan van teljes párosítás. Szomorúan kell jelentenünk, hogy van olyan példa, ahol nincs hiányos halmaz, és még sincs teljes párosítás.

Ennek fényében annál örömtelibb meglepetésnek érezhetjük Philip Hall 1935-ben publikált tételét, amely azt állítja, hogy páros gráfoknál ilyen jellegű nehézség nem fordul elő.

Hall tétele. Egy $G = (U, W; E)$ páros gráfban akkor és csak akkor létezik teljes párosítás, ha U és W azonos méretűek, és W -nek nincs hiányos részhalmaza, más szóval teljesül a Hall-féle feltétel, miszerint minden $X \subseteq W$ halmaz legalább annyi darab U -beli csúccsal szomszédos, amennyi az X elemszáma.

Hall tételére úgy is tekinthetünk, mint egy páros gráfbeli teljes párosítást kereső algoritmus leállási szabályára. Az algoritmus vagy megtalálja és kiadja az input gráf egy teljes párosítását, vagy megtalál és kiad egy Hall-feltételt megsértő (azaz hiányos) X halmazt, ezzel igazolva, hogy teljes párosítás a konkrét esetben garantáltan nem létezik.

Valójában a Hall-tétel azonnal következik Kőnig fentebb már említett 1931-es általánosabb tételéből, amelynek alábbi megfogalmazásában akkor mondjuk, hogy egy v csúcs lefog egy élt, ha az él egyik végpontja v .

Kőnig tétele. Egy G páros gráf legnagyobb párosításának elemszáma egyenlő a gráf éleit lefogó csúcsok minimális számával, vagy más megfogalmazásban, G -ben akkor és csak akkor létezik egy v élű párosítás, ha a G éleit nem lehet v -nél kevesebb csúccsal lefogni.

A tétel igazi tartalma az, hogy egy maximális elemszámú M párosításhoz létezik egy igazolvány, amely rögtön jelzi, hogy M valóban maximális elemszámú. (Nevezetesen, az igazolvány egy M elemszámával megegyező méretű csúcshalmaz, amely a gráf valamennyi éleit lefogja.)

Maximális súlyú vagy minimális költségű párosítások

A magyar módszer mögött álló legfontosabb eredmény Egerváry tétele egy teljes páros gráf teljes párosításának maximális súlyáról. A tétel maximális súlyú teljes párosításokról szól, itt egy legolcsóbb teljes párosításokra vonatkozó egyenértékű formában mondjuk ki. Kívülállónak valószínűleg nem világos, hogy miről is van itt szó, de meg fogjuk mutatni, hogy a tétel mögött egy mindenki által könnyen megérthető szemléletes jelentés húzódik.

Egerváry tétele legolcsóbb teljes párosításra. Legyen $G = (U, W; E)$ teljes páros gráf, amelyben U és W azonos méretűek, és amelynek élhalmazán adott egy c egész értékű költségfüggvény. Ekkor egy teljes párosítás költségének minimuma a következő maximummal egyenlő:

$$\max_{y: U \cup W \rightarrow \mathbb{Z}} \left\{ \sum [y(v) : v \in U \cup W] : y(u) + y(w) \leq c(uw) \text{ minden } uw \in E \text{ éltre} \right\}.$$

Célunk bemutatni a tétel fő tartalmát, nevezetesen azt, hogy egyszerű, meggyőző igazolványt szolgáltat egy konkrét teljes párosítás költségének minimalitására. Ehhez

nézzünk először egy élhalmazon értelmezett szélsőségesen speciális költségfüggvényt, amely úgy áll elő, hogy veszünk a csúcshalmazon egy tetszőleges y függvényt, és minden uv élnek az y által generált költségét a $c_y(vw) = y(v) + y(w)$ összeggel definiáljuk. Rögtön látszik, hogy erre a speciális költségfüggvényre nézve minden teljes párosításnak a költsége ugyanaz, nevezetesen a szóban forgó y -értékek összege. Emiatt egy így előálló c_y költségfüggvényt joggal nevezhetünk semlegesnek.

Térjünk rá a fő kérdésre, ami tehát az, hogy egy M teljes párosítás esetén miként tudunk valakit (legelőször saját magunkat) egyszerűen meggyőzni arról, hogy az M egy c -legolcsóbb teljes párosítás. Abban az esetben, ha c nemnegatív, akkor persze minden teljes párosításnak a c -költsége nemnegatív, és így ha olyan kivételes szerencsében van részünk, hogy az M valamennyi élének a c -költsége 0, akkor az M abszolút biztosan a legolcsóbb teljes párosítás.

Mit tehetünk, ha nem vagyunk ennyire szerencsések? Mindenesetre, ha a c -ből levonunk egy tetszőleges c_y semleges költségfüggvényt, akkor egy egyenértékű feladathoz jutunk abban az értelemben, hogy minden teljes párosítás költsége ugyanazzal az értékkel csökken, nevezetesen a y -értékek összegével. Emiatt egy teljes párosítás pontosan akkor a legolcsóbb a kiindulási c költségfüggvényre nézve, ha a legolcsóbb a módosított $c' = c - c_y$ -re nézve. Így aztán, ha véletlenül c' nemnegatív, és az M minden élének a c' -költsége 0, akkor is biztosak lehetünk abban, hogy az M teljes párosítás c -költsége minimális. Egy ilyen c' tehát egy lehetséges igazolvány arra, hogy M minimális c -költségű teljes párosítás. A nagy kérdés az, hogy egy c -re nézve legolcsóbb teljes párosítás optimalitására vajon mindig létezik-e egy ilyen elegáns igazolvány.

Mármost Egerváry tételének fenti alakja pontosan azzal egyenértékű, hogy a válasz igen, azaz ha M egy c -legolcsóbb teljes párosítás, akkor erre mindig van egy olyan c_y semleges (egész értékű) költségfüggvény, amelyet c -ből levonva a keletkező c' nemnegatív, és M valamennyi élének c' -költsége 0.

Az alábbi konkrét példa segítheti a tisztánlátást, de első olvasáskor ki is hagyható. Tekintsük azt a $G = (U, W; E)$ teljes páros gráfot, amelyben $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ és $W = \{w_1, w_2, w_3, w_4\}$. Az élek költségeit a 3. ábrán szereplő 4×4 -es Q mátrix adja meg, ahol a Q sorai az U elemeinek, az oszlopai a W elemeinek felelnek meg, vagyis az $u_i w_j$ él $c(u_i w_j)$ költsége q_{ij} .

Figyeljük meg, hogy a G gráf egy teljes párosításában az élköltségek éppen a Q mátrix négy független elemének felelnek meg, ahol a függetlenség azt jelenti, hogy egyik sorban vagy oszlopban nincs két kiválasztott elem. Tekintsük a Q mátrix $q_{11} = 1$, $q_{23} = 2$, $q_{34} = 1$, $q_{42} = 7$ elemeit (ezeket a 3. ábrán vastagított számokkal jelöltük), amelyek a G egy $M = \{u_1 w_1, u_2 w_3, u_3 w_4, u_4 w_2\}$ teljes párosításának felelnek meg, amelynek költsége $1 + 2 + 1 + 7 = 11$.

És most meggyőzzük a kedves olvasót, hogy ez az M egy legolcsóbb teljes párosítás. Definiáljuk az y függvényt az U elemein rendre 0, 2, 3, 5-nek, míg a W elemein rendre 1, 2, 0, -2-nek. Ekkor y a 3. ábrán szereplő Q_y mátrix által leírt semleges költségfüggvényt definiálja.

A semlegesség azt jelenti, hogy akárhogy is választjuk a mátrixnak négy független elemét (azaz minden sorból és minden oszlopból egyet), ezeknek az összege ugyanaz (nevezetesen 11). Az u_4w_2 élnek például az így definiált semleges költsége $y(u_4) + y(w_2) = 5 + 2 = 7$. E semleges Q_y mátrixot levonva Q -ból az ábrán lévő Q' mátrixot kapjuk (3. ábra).

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 4 & 7 & 2 & 1 \\ 4 & 8 & 5 & 1 \\ 7 & 7 & 5 & 3 \end{pmatrix} & \begin{matrix} y \\ 0 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \end{matrix} \begin{matrix} 1 & 2 & 0 & -2 \\ 1 & 2 & 0 & -2 \\ 3 & 4 & 2 & 0 \\ 4 & 5 & 3 & 1 \\ 6 & 7 & 5 & 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 Q & Q_y & Q' = Q - Q_y
 \end{array}$$

3. ábra. A mátrixok részletes magyarázatát lásd a szövegben
Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A Q' által leírt c' költségfüggvény nemnegatív, és a fent definiált M teljes párosítás mind a négy élének c' -költsége 0, emiatt M a legolcsóbb teljes párosítás c' szerint. Mivel a c szerinti, illetve a c' szerinti minimális teljes párosítások megegyeznek, M valóban a legolcsóbb teljes párosítás c szerint is. (Innen az is látszik, hogy az $N = \{u_1w_2, u_2w_3, u_3w_1, u_4w_4\}$ teljes párosítás is 0 c' -költségű élekből áll, és így szintén egy c -re nézve legolcsóbb teljes párosítás.) Fontos megjegyezni, hogy Egerváry bizonyítása algoritmust is jelent a maximális súlyú (vagy minimális költségű) teljes párosítás kiszámítására, valamint az optimalitást igazoló semleges c' meghatározására, bár ez az eredeti algoritmus nem polinomiális. Kuhn megközelítésének éppen az a lényege, hogy König és Egerváry eredményeit ötvözve polinomiális futásidejű algoritmust ad. Ennek egy magyar nyelvű leírása megtalálható például Frank dolgozatában (Frank 2002).

Tanulságos Kuhn beszámolója arról, hogy az általa frissen kifejlesztett magyar módszer segítségével hogyan számolt ki kézzel kevesebb mint két óra alatt egy $12 + 12$ pontú páros gráfban egy M maximális súlyú párosítást (Kuhn 2012). Ne felejtjük, hogy az összes teljes párosítás egyenkénti számbavétele $12!$, azaz több mint 479 millió eset megvizsgálását jelentette volna. Így ebben a helyzetben különös jelentősége volt annak, hogy az algoritmus az Egerváry-tétel által biztosított igazolványt is kiadta, amely a kapott teljes párosítás optimalitását, vagyis a számításainak helyességét Kuhnnak is garantálta.

Előélet – utóélet

2007-ben egy meglepő cikk jelent meg François Ollivier és Brahim Sadik tollából (Ollivier–Sadik 2007). Carl Gustav Jacob Jacobinak egy halála után majd negyven évvel, 1890-ben megjelentetett latin nyelvű cikkét tanulmányozva észrevették, hogy Jacobi differenciálegyenletek rendszereit vizsgálva szembetalálkozott a hozzárendelési problémával. Ollivier 2023-ban egy 90 oldalas tanulmányban tárta fel Jacobi idevonatkozó

munkásságát és annak viszonyát a magyar módszerhez (Ollivier 2023). Vizsgálatának a végkövetkeztetése az, hogy Jacobi cikke, amely több mint 100 évvel Kuhn magyar módszeres cikke előtt íródott, gyökereiben már magában rejtje a magyar módszer bizonyos aspektusait. Ezt a véleményt támasztja alá Kuhn és Martello (Kuhn 2012; Martello 2010). Ugyanakkor Ollivier egy magánlevélben azt írja (magyar fordításban): „Meggyőződésem, hogy a magyar matematikusok és Kuhn hozzájárulása alapvető. Jacobi eszközeit fel lehet ugyan használni az eredményeik bizonyítására, de az eredmények megfogalmazása szinte lehetetlen csak Jacobi nyelvezetét használva.” Vagyis Jacobi e korai cikkének felfedezése a legkevésbé sem halványítja el Kőnig, Egerváry és Kuhn érdemeit, hiszen az általuk megalapozott és kidolgozott magyar módszer lett az egyik legfőbb kiindulópontja a hatékony kombinatorikus algoritmusokkal és ezek alkalmazásaival foglalkozó új matematikai területnek, a kombinatorikus optimalizálásnak. Itt külön ki kell emelni Kőnig min-max tételének és az ennek súlyozott általánosítását szolgáltató Egerváry-tételnek azt a nagy hatású aspektusát, hogy egy gyorsan ellenőrizhető igazolványt adtak arra, hogy meggyőződjünk a javasolt megoldás optimalitásáról.

A súlyozott párosításokra vonatkozó alapvető elméleti és algoritmikus felismeréseket később több irányban fejlesztették tovább. Ezek közül alapvető fontosságú a Lester R. Ford és Delbert R. Fulkerson által megalapozott hálózati folyamatok elmélete (Ford–Fulkerson 1962). Egy más irányú jelentős kiterjesztés Jack Edmondstól származik, aki egy általános gráf maximális súlyú párosításának megtalálására fejlesztett ki egy nehéz elméleten alapuló hatékony algoritmust. Egy harmadik kapcsolódó nagy terület a matroidelmélet, ahol például Edmonds súlyozott matroid metszet tétele és algoritmusai tengernyi alkalmazást tesz lehetővé. Mindezekről viszonylag részletes áttekintést nyújt Frank kétrészes magyar nyelvű cikke (Frank 2008). A területen komolyan elmélyülni szándékozókna Frank, Lovász–Plummer és Schrijver könyvei ajánlhatók (Frank 2011; Lovász–Plummer 2009; Schrijver 2003).

Az algoritmust számos helyen használják a gyakorlatban, mind a mai napig jelennek meg új alkalmazások (Bérczi–Bérczi-Kovács–Szögi 2023). A bevezetőben szereplő példa az álláshelyek és jelentkezők összepárosításáról a robotikában nyert új értelmezést, amikor egymással együttműködő, mozgó robotoknak szeretnének feladatokat kiosztani (multi-robot task allocation). Az adatelemzés és mesterséges intelligencia területéhez is számos új alkalmazás kapcsolódik. A számítógépes képfeldolgozás egyik központi feladata az objektumfelismerés (object detection), amelynek során egy képen egyszerre több objektum helyzetét kell meghatározni és osztályozását elvégezni. Gyakran alkalmazzák a „Hungarian loss” veszteségfüggvényt, amikor a valós és vélt objektumokat úgy párosítják össze, hogy azok össztávolsága minimális legyen (Stewart–Andriluka–Ng 2016). Egy másik, szintén a képfeldolgozás témakörébe tartozó alkalmazásban egy videófelvételen szeretnénk nyomon követni több mozgó dolgot (angolul: multiple object tracking). Emellett klaszterezési feladatok eredményének kiértékelésénél is felbukkan a magyar módszer.

Fontos hangsúlyozni, hogy a magyar módszer magyar matematikusok között is egy széles kutatási irány kiindulópontjává vált. Gallai Tibor, Lovász László, Tardos

Éva alapvető ilyen irányú kutatási eredményeket ért el, de meg kell említeni Győri Ervin, Jordán Tibor és Sebő András nevét is. Mindezek nyomán 2002-ben a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával az Eötvös Loránd Tudományegyetemen megalakulhatott és azóta is folyamatosan működik az Egerváry Kutatócsoport, népszerű néven EGRES, amely a hazai kombinatorikus optimalizálási kutatások fellelőjévé lett: az elmúlt bő két évtized során több mint 300 EGRES-publikáció született. Kuhn 2012-es cikkében szerepel a következő:

„A living tribute to Egerváry is the existence of the Egerváry Research Group on Combinatorial Optimization (EGRES) [...] affiliated with the Eötvös University and the Hungarian Academy of Sciences. [...] This vibrant group carries on the ideas of Egerváry in the Budapest of today” (Kuhn 2012).

Befejezésül idézzük Kuhn ugyanezen dolgozatának zárómondatait, magyar fordításban:

„Két következtetés kézenfekvően adódik. Először is, a fentiekben elmesélt történetek világosan illusztrálják, hogy a matematikusok is emberi lények, akiknek élete igencsak komplikált tud lenni az adott kor körülményei között. A második következtetés pedig az, hogy az általuk felfedezett matematika független attól a társadalmi és politikai környezettől, amelyben éltek. A porosz monarchia, a fasiszta, majd kommunista Magyarország és a háború utáni Egyesült Államok igencsak különböztek egymástól, mégis ugyanannak az algoritmusnak az összetevőit fedezték fel mindegyikben. Az értékes matematikai eredmények függetlenek azokról a társadalmi és politikai viszonyokról, amelyekben felfedezték azokat. Az igazi matematika felfedezésre várva ott van kiterítve mindannyiunk előtt.”

Az idézetben említett társadalmi és politikai viszonyok a matematikai eredményekre valóban nincsenek hatással, a matematikusok életére azonban annál inkább. A fenti szép történetet annak a megrendítő egybeesésnek a felidézésével kell zárunk, hogy mind König Dénes (1884–1944), mind Egerváry Jenő (1881–1958), Magyarország e két kiemelkedő matematikusa, más-más korban, a kilátástalan politikai helyzet miatt önkéntes véget vetett életének. Reméljük, hogy írásunk hozzájárul emlékükhöz méltó megőrzéséhez és az általuk indított kutatások intenzív folytatásához.

Irodalomjegyzék

- Bérczi, Kristóf – Bérczi-Kovács, Erika – Szögi, Evelin (2023). „A Dual Approach for Dynamic Pricing in Multidemand Markets”. *SIAM J. on Discrete Mathematics*, 37/3, 1771–1787.
- Egerváry Jenő (1931). „Matrixok kombinatorius tulajdonságairól”. *Matematikai és Fizikai Lapok*, 38, 16–28.
- Ford, Lester R. – Fulkerson, Delbert R. (1962). *Flows in Networks*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Frank András (2002). „A Magyar Módszer és általánosításai”. *Sigma*, 33/1–2, 13–44.
- Frank András (2008). „Összefüggések a kombinatorikus optimalizálásban: I. Optimalizálás gráfon”. *Matematikai Lapok*, 1, 20–76; „II. Szubmoduláris optimalizálás és poliéderes kombinatorika”. *Matematikai Lapok*, 2, 14–75.
- Frank, András (2011). *Connections in Combinatorial Optimization*. Lecture Series in Mathematics and its Applications, 38. Oxford: Oxford University Press.
- Hall, Philip (1935). „On Representatives of Subsets”. *Journal of the London Mathematical Society*, 10, 26–30.
- Kőnig Dénes (1931). „Graphok és matrixok”. *Matematikai és Fizikai Lapok*, 38, 116–119.
- Kőnig, Dénes (1935). *Theory der endlichen und unendlichen Graphen*. Providence, RI: American Mathematical Society, Chelsea Publishing.
- Kuhn, Harold W. (1955). „The Hungarian Method for the Assignment Problem”. *Naval Research Logistic Quarterly*, 2, 83–97.
- Kuhn, Harold W. (2012). „A Tale of Three Eras: The Discovery and Rediscovery of the Hungarian Method”. *European Journal of Operational Research*, 219, 641–651.
- Lovász, László – Plummer, Michael D. (2009). *Matching Theory*. Providence, RI: American Mathematical Society, Chelsea Publishing.
- Martello, Silvano (2010). „Jenő Egerváry: From the Origins of the Hungarian Algorithm to Satellite Communication”. *Central European Journal of Operations Research*, 18/1, 47–58.
- Ollivier, François (2023). „Jacobi’s Bound: Jacobi’s Results Translated in König’s, Egerváry’s and Ritt’s Mathematical Languages”. *Applicable Algebra in Engineering Communication*, 34, 793–885.
- Ollivier, François – Sadik, Brahim (2007). „Le borne de Jacobi pour une diffiété définie par un système quasiregulier”. *Comptes Rendus Mathématique*, 345/3, 139–144.
- Schrijver, Alexander (2003). *Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency*. Berlin: Springer.
- Stewart, Russel J. – Andriluka, Mykhaylo – Ng, Andrew Y. (2016). „End-to-End People Detection in Crowded Scenes”. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.255>
- Thorndike, Robert L. (1950). „The Problem of Classification of Personnel”. *Psychometrika*, 15/3, 215–235.

Nagy matematikusaink hatása a magyar matematika elismertségére

The Impact of Our Great Mathematicians on the Recognition of Hungarian Mathematics

Füredi Zoltán¹ – Simonovits Miklós²

¹ az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor, HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Budapest
furedi@renyi.hu

² az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor emeritus, HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Budapest
miki@renyi.hu

Összefoglalás

A magyar matematikai kutatások folyamatosan világszínvonalúak a 19. század vége óta. Ebben a két legfontosabb tényező valószínűleg a tehetséggondozás és a nemzetközi beágyazottság. Ezen állításunkat néhány kiemelkedő matematikusunk, elsősorban Erdős Pál (1913–1996) munkásságán keresztül illusztráljuk.

Abstract

Hungarian mathematical research has been consistently world-class since the end of the 19th century. The two most important factors in this are probably talent management and international embeddedness. We illustrate this claim with the work of some of our most prominent mathematicians, most notably that of Pál Erdős (1913–1996).

Kulcsszavak: Erdős Pál, Fejér Lipót, König Dénes, *Középiskolai Matematikai Lapok*

Keywords: Paul Erdős, Leopold Fejér, Dénes König, *Középiskolai Matematikai Lapok* (Mathematical Journal for Secondary Schools)

A magyar matematikai kutatások sikerei számokban

Az 1893 óta általában négyévenként tartott Matematikusok Világkonferenciáján (International Congress of Mathematicians, ICM) eddig 60 magyar matematikus volt meghívott előadó, összesen 80 alkalommal. Ez jelentős elismerés, az összes meghívott előadások (4573) 1,75%-a. Közülük nyolc plenáris előadó volt: Riesz Frigyes (1932), Neumann János (1950 és 1954), Lánosz Kornél (1958), Erdős Pál (1983), Lax Péter (1983), Lovász László (1990), Babai László (1994) és Kollár János (2014). Sajnálatos, hogy az utolsó 20 év 20 magyar meghívottjából 11 már nagyon fiatalon végleg elhagyta Magyarországot, már PhD-t is neves nyugati egyetemeken szereztek. Szintén nagyon elszomorító, hogy az ezt megelőző 100 év 40 magyar meghívottjának közel fele (legalább 16) politikai okokból volt kénytelen elhagyni hazáját.

A magyar matematika jelenleg legelismertebb ága a kombinatorika, azaz a véges struktúrák elmélete. Elsősorban e témában dolgozott Erdős Pál is, és e témában kapott két magyar matematikus is Abel-díjat: Szemerédi Endre 2012-ben és Lovász László 2021-ben. Ezt a díjat a Norvég Akadémia évenként adományozza, és presztízse a Nobel-díjével megegyező.

Világhírű professzorok a 19. századból

A mindenki által ismert Bolyaiak után a 19. század végéről két nevet emelünk ki, mindkettőjük eredményei ma tankönyvek törzsanyagához tartoznak. König Gyula (1849–1913) 1871–1905 között a Műegyetem tanára, egy ideig dékánja, rektora. Bécsben Hermann Ludwig von Helmholtztól tanult fizikát, Berlinben Leopold Kronecker és Karl Weierstrass matematikaóráit látogatta. A matematika alapjait is vizsgálta. Az 1904-es matematikai világkonferencián Heidelbergben meghívott előadó volt. Ugyan nem plenáris előadónak hívták meg, de olyan érdekes előadást hirdetett meg, hogy a nagy érdeklődés miatt az előadása idejére az összes párhuzamos szekciót törölték.

Farkas Gyula (1847–1930) gimnazistaként Jedlik Ányos tanítványa, később, 1888 és 1915 között a kolozsvári Ferenc József Tudományegyetem tanára. A 19. század végén egy olyan tételt bizonyított (a nevezetes Farkas-lemmát), amely azóta a lineáris programozás egyik fő eszköze lett, így máig tanítják minden pénzügyi és alkalmazott matematikai kurzuson. Érdekes, hogy Farkas Gyula a lemmáját akkor tisztán elméleti okokból vezette le, gyakorlati alkalmazásokra nem gondolt. Ugyanis akkoriban folyt a matematika alapjainak tisztázása, a logika határainak felmérése. Ebben egy fontos lépés volt David Hilbert zéróhely tétele (az úgynevezett Nullstellensatz, 1883), amely szerint ha egy $f(x_1, \dots, x_k) = 0$ polinomiális egyenlet következménye egy több egyenletből álló egyenletrendszernek, akkor ez a megadott egyszerű módon be is bizonyítható. Azaz van a polinomoknak egy olyan kombinációja, amely valamilyen n egészre az $f^n = 0$ egyenlethez vezet. Farkas hasonló tételt bizonyított lineáris egyenlőtlenségekre. Farkas Gyula egy szinten állt kora legnevesebb kutatóival, elsőként tartott egyetemi előadásokat Pesten a relativitáselmétről, jelentős eredményeit vezető külföldi folyóiratokban közölte. Számos elismerésben részesült (az MTA tagja 1898-tól, a Padovai Egyetem díszdoktora, 1893). Sajnos kutatásainak jó része feledésbe merült. A Farkas-lemma jelentőségét amerikai kutatók az 1950-es évek elején ismerték fel az operációkutatás központivá válásával kapcsolatban.

A magyar matematikus tehetséggondozás

A tehetségek korai kiválasztásának három eszközét vesszük sorra: (1) a *KöMaL*, azaz a *Középiskolai Matematikai Lapok*, (2) a tantárgyi versenyek és (3) a speciális tanszervi gimnáziumok, szakkörök. Arany Dániel (1863–1945) Győrben már 1893-ban elindította az eredeti nevén *Középiskolai Matematikai Lapokat*. Ez egy havi folyóirat volt, amelyben érdekes cikkek jelentek meg, és egyben nagy hatású feladatmegoldó

verseny volt: a középiskolai tananyagon messze túlmenő feladatokat adtak fel, azok megoldásait a diákok beküldték a laphoz, ezeket kijavították, és a megoldók neveivel, később, Faragó Andor főszerkesztősége idején, a legjobb megoldók fényképeivel közölték. E feladatsorok azóta diákok tízezreinek tették lehetővé az önálló, elmélyült gondolkodást, és a – később fizika rovattal bővített – *KöMaL* a magyar műszaki és természettudományos elit kinevelésének egyik oszlopává vált. A feladatok különböző színvonalúak, de jó néhánynak a megoldása még a középiskolai tanároknak is nehéz.

A szigorú határidők és a sok munkát igénylő feladatok miatt a megoldások utolsó beadási napján jó néhányszor előfordult, hogy a diákok kevéssel éjfél előtt a postán futottak össze, ahol legkésőbb az aznapi dátummal kellett feladniuk a megoldásokat. Jelenleg mindez már online történik. A havonta beérkező, néha ezernél is több megoldás értékelését önkéntesek serege segíti. Azóta sok országban indultak hasonló középiskolai lapok, hasonló sikerrel.

A tehetséggondozás egy másik oszlopa a különféle országos tanulmányi versenyek hálózata. Minden magyar matematikus és matematikatanár kötelességüknek érzi az aktív közreműködést ezek szervezésében, a megoldások értékelésében. Sajnos általában díjazás nélkül. A Matematikai és Fizikai Társulat 1894 óta szervez országos tanulmányi versenyeket. A legrangosabb matematikaverseny 1949 óta Kürschák József, a fizikaverseny Eötvös Loránd nevét viseli. A díjazottak között számos később világhírű tudós található (köztük Nobel-díjasok is). Az e cikkben mássutt nem említettek közül például Kármán Tódor, Haar Alfréd, Riesz Marcell, Szegő Gábor, Szilárd Leó, Teller Ede, Simonyi Károly. Már hosszú ideje a Bolyai János Matematikai Társulat, természetesen jelentős állami segítséggel, adja ki a *KöMaL*-t, és szervezi a matematikaversenyek önkéntes segítőinek munkáját.

A Bolyai János Matematikai Társulat által szervezett előadások, kis matematikus körök, szakkörök és a versenyekre, egyetemre felkészítő szakkörök közül kiemelkedik az 1960 körül indult, Reiman István vezette szakkör. Ide kéthetente meghívták az ország minden részéből a legjobb diákokat, és ez a hagyomány azóta is folytatódik, például Pósa Lajosnak köszönhetően. A Fazekas Mihály Gimnáziumban a speciális matematika tagozat 1962-ben indult. Az itt és a többi speciális tagozaton végzetek azóta is a természettudományos értelmiség élvonalát adják.

Iskolateremtő professzorok a 20. század első felében

Fejér Lipót (1880–1959) jelentősége felmérhetetlen a magyar matematikára. Azon túl, hogy nemzetközileg kiemelkedő kutató volt, tucatnyinál több világhírű matematikusnak volt doktori témavezetője, közéjük tartozott például Riesz Marcell (1908), Fekete Mihály (1909) (a Jeruzsálemi Héber Egyetem egyik alapító professzora, aki fiatal egyetemi oktatóként a gimnazista Neumann János privát tanára is volt), Pólya György (1912), Kalmár László (1926), Neumann János (1926), Erdős Pál (1934), Turán Pál (1935), Fejes Tóth László (1938), Sós Vera (1957). Fejér Lipót fantasztikusan világos, inspiráló előadásairól számos tanítványa megemlékezett. Többek között Ottlik

Géza is nagyon nagy tisztelettel beszélt Fejér Lipót kristálytisza előadásairól (URL1). Ottlik azonfelül, hogy kitűnő író volt, matematikusdiplomát is szerzett. Ugyanez mondható el Esterházy Péterről is. Ennek ugyan nem vették hasznát irodalmi munkáikban, mert mint Ottlik költőien megfogalmazta, „a matematika messze fölötté áll minden evilági és túlvilági hasznossági kritériumnak, akárcsak a művészet”.

Fejér matematikája

Bármely folytonos valós függvény egyre magasabb fokú polinomokkal egyre pontosabban approximálható. Periodikus függvényeknél (ahol a periódushossz legyen 2π) Jean-Baptiste Joseph Fourier a polinomok helyett a $\sin x$, $\cos x$, $\sin 2x$, $\cos 2x$, $\sin 3x$, $\cos 3x$ stb. függvények kombinációiból definiálta az N -edik approximációt, amelynek alakja

$$s_N = \sum_{n=0}^N (a_n \sin nx + b_n \cos nx).$$

Ezek az approximációk nem minden esetben közelítik egyre jobban az eredeti függvényt. Fejér tétele (1900-ból) azt a felismerést tartalmazza, hogy ezen approximációk számtani közepei mégis minden folytonos függvényre már egyenletesen konvergálnak. Ez a felfedezés és a bizonyításban központi szerepet játszó segédfüggvények, az úgynevezett Fejér-magok, megújították a Fourier-analízist, és mind a mai napig használják azokat a telekommunikációban és mindenhol, ahol a Fourier-analízis alkalmazásra talál. Fejér Lipót tételei nagyon megváltoztatták a matematika világát (erről bővebben lásd Turán 1970).

König Dénes

König Dénes (1884–1944) Kürschák József és Hermann Minkowski tanítványa volt. Ő írta a világon az első gráfelméleti könyvet, 1936-ban. Az általa vezetett szeminárium az 1930-as években a magyar matematika egyik fantasztikus szerencséje volt. Akkoriban és még sokáig a véges struktúrák matematikáját neves kutatók is a rejtvényfejtés, a rekreációs matematika világába utalták, nem ismerték fel jelentőségét. E felismerés csak a számítógépek tömeges megjelenésével és a kommunikációelmélet szükségleteivel született meg. Kiderült, hogy a véges, de nagy rendszerek kezelése egyáltalán nem könnyű, a kódelmélet, a játékelmélet, a gráfok és a nagy hálózatok elmélete, a számítógép-programozás nagyon sok új és nehéz diszciplína kialakulását siettetette.

A számítógépek gyorsaságánál nagyon fontos, hogy megfelelő struktúrába rakjuk az adatokat, ahogyan a szótárak használatánál is nagyon fontos a szavak ábécérendbe tétele. Ezt gyorsan kell tenni, és erre is a kombinatorika adja a megfelelő válaszokat. Kombinatorikus algoritmusokat használunk az internetes kereséshez is, egy GPS-ben a legrövidebb út megkereséséhez és a modern élet szinte minden területén. A mérnöki kutatásokat összehangoló nagy tekintélyű amerikai tudományos társaság, a SIAM

(Society for Industrial and Applied Mathematics) több mint hatvan évvel König Dénes halála után Dénes König-díjat alapított.

Az alábbiakban, terjedelmi okok és személyes érdeklődés miatt, egyedül Erdős Pál életútjára koncentrálunk, nem említjük számos további legendás hírű matematikusunk (például: Riesz Frigyes, Riesz Marcell, Haar Alfréd, Pólya György) munkásságát.

A fiatal Erdős Pál

Erdős Pál, a világhíres magyar matematikus, a modern kombinatorika és gráfelmélet és a magyar matematika egyik legmeghatározóbb alakja 1913. március 26-án Budapesten született. Szülei mindketten matematikatanárok voltak. Születésekor mindkét (három- és ötéves) nővére szeptikus skarlátban elhunyt. E szörnyű tragédia miatt aggódó szülei jórészt magánúton taníttatták. Erdős csodagyerek volt, matematikai tehetsége hamar megmutatkozott. Szeretett számolni, és kisgyerekként felfedezte magának a negatív számokat. Középiskolásként a *KöMaL* lelkes és igen eredményes megoldójává vált. 17 évesen kezdte egyetemi tanulmányait a (mai) Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Itt találkozott Turán Pállal, aki megmutatta neki, hogyan kell bebizonyítani, hogy a prímszámok reciprokösszege végtelen. Személyes találkozásuk előtt már jól ismerték egymást a *Középiskolai Matematikai Lapokból*. Erdős 1934-ben fejezte be az egyetemet, és nemcsak diplomát, hanem doktori címet is kapott.

Anonymus, egy alkotó baráti közösség

Az Anonymus az 1930-as évek fiatal matematikusainak egy baráti és egyidejűleg önképző csoportja volt. Rendszeresen találkoztak a városligeti Anonymus-szobornál, és vasárnaponként gyakran együtt kirándultak. Formálódó kutatási érdeklődésüket a problémamegoldó gondolkodás jellemezte. Talán azért, mert a két fő szervező Erdős és Turán voltak, talán azért, mert többen már középiskolából is ismerték egymást a *KöMaL* rendszeres megoldóiként. A tagok mind elismert matematikusok lettek.

Lázár Dezső és Grünwald Géza a világháború idején haltak meg. Klein Eszter (1910–2005) és Szekeres György (1911–2005) az üldöztetések elől 1939-ben Sanghajba menekültek, majd 1948-tól évtizedeken át Szekeres az ausztráliai matematikai élet meghatározó jelentőségű vezető professzorává vált.

Wachsberger Márta (1910–2005) (férje után Svéd Márta) szintén Ausztráliába ment. Vázsonyi Endre (1916–2003) az USA-ban lett vezető kutató. Itthon maradt Turán Pál, Alpár László (1914–1991) és Gallai Tibor (1912–1992).

Erdős első külföldi útjai

Erdős 1934-ben ösztöndíjat kapott Angliába. A Manchesteri Egyetemen számtalan fontos újabb matematikai kapcsolatra tett szert. Közben rendszeresen hazalátogatott. 1938-ban is hazajött, viszont szeptember 3-án, amikor Hitler elfoglalta Ausztriát, és

letárgyalta Csehszlovákia felosztását, Erdős felismerte a közelgő veszélyeket, és Amerikába ment. 1938–39-ben Princetonban, az Institute for Advanced Studyban töltött egy évet.

Eredeti látásmódja, szokatlan matematikai kérdései, a nagyobb elméletek kis problémákon keresztül megközelítése nem annyira tetszett az intézet igazgatójának (aki egyébként kitűnő matematikus volt). Így csak fél évvel hosszabbították meg alkalmazását. Ez döntően megváltoztatta életét: ekkor kezdett bele abba az életmódba, amelyet az állandó helyváltoztatás jellemez.

Két korai, világraszóló eredmény

Erdős valóban csodagyerek volt (Erdős 1997), és matematikai óriássá nőtte ki magát. Meghatározó a szerepe a mai matematika számos területén, és emellett az egyik legismertebb matematikus egyéniség a világon. Pályája tipikusan indult. Már a *KöMaL* feladatmegoldójaként megismerte számos későbbi kollégáját. Az egyetemen Fejér Lipót tanítványaként a függvénysorok és a Fourier-analízis legújabb eredményeit tanulta. Érdeklődése hamar a számelmélet felé fordult. A König Dénes vezette szeminárium hatására a gráfelmélet és általában a véges matematika eszközeit nagyon korán elkezdte használni.

Első cikkét még mint Erdős Pál VI. osztályos gimnáziumi tanuló írta 1929-ben. A második cikk az alább ismertetendő Csebisev-tétel elemi bizonyítása volt. Korai cikkei túlnyomóan számelméleti témájúak, késői cikkei leginkább gráfelmületről szólnak. Hamar elkezdte a társszerzős cikkek írását.

A prímszámok eloszlása, a Csebisev-tétel

Doktori értekezésében Erdős elemi, csak középiskolai anyagot használó, rövid, zseniális bizonyítást adott Csebisev tételére, miszerint bármely $x > 1$ esetén x és $2x$ között van prímszám.

A prímszámok azok az 1-nél nagyobb egész számok, amelyek csak 1-gyel és önmagukkal oszthatóak, azaz 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... A prímek már az ókori görög matematikusokat is foglalkoztatták. Eukleidész *Elemekje* tartalmazza azt a gyönyörű tételt, hogy a prímek sorozata végtelen. Lenyűgöző, hogy a prímek, bár egyáltalán nem véletlenek, de nagyon véletlenszerűen viselkednek. Az is lenyűgöző, hogy szám-talan, prímekre vonatkozó kérdés egyszerűen megfogalmazható, de a megoldásuktól mégis reménytelenül távol vagyunk. Erdős teljesítménye világszenzáció volt. Erdőst egész életében elkísérték a prímszámok. Princetoni tartózkodásának meghatározó momentuma volt, amikor a prímszámtételre Erdős és Atle Selberg elemi, komplex függvénytant nem használó bizonyítást adtak. A prímszámtétel azt mondja ki, hogy a prímszámok száma egy nagy x korlátig körülbelül $x/\log x$. (Itt $\log x$ a természetes logaritmust jelöli.) Ezt már Carl Friedrich Gauss is sejtette, de csak sokkal később és nagyon bonyolultan bizonyították be a 19. század végén.

Teljes rendezetlenség nincs: a Ramsey-tétel

Erdős kezdetben elsősorban elemi számelmélettel foglalkozott. Virtuóz módon számolt, egyedi ötleteivel lehetővé tette reménytelennek látszó problémák kezelését. Később egyike lett a kombinatorika megalapítóinak. A kombinatorika (gráfok, hálózatok, algoritmusok, kódelmélet) a matematika egészének a képét átformálta.

Egy gráf egy részgráfját *teljesnek* nevezzük, ha bármely két pontja között fut él, és *üresnek*, ha a részgráfnak nincs éle. Egy korai eredmény 1928-ból Frank Ramsey tétele, miszerint minden elég nagy gráf tartalmaz egy teljes vagy egy üres k -pontú részgráfot. A $k = 2$ eset nyilvánvaló: két ember vagy ismeri egymást, vagy nem. A $k = 3$ eset még mindig egyszerűen igazolható: hat ember között mindenképpen van három, akik kölcsönösen ismerik egymást, vagy három, akik közül semelyik kettő nem ismeri egymást. A Ramsey-tételt 1936-ban Ramsey-től függetlenül felfedezte Erdős és Szekeres is, mert szükségük volt rá egy kombinatorikus geometriai kérdés megoldásához.

Erdős gyorsan felismerte, hogy ez egy, a matematika számos ágában megtalálható jelenség (számelmélet, geometria, halmazelmélet): minden elég nagy rendszernek mindig van egy nagy szabályos részstruktúrája. A Ramsey-tétel vezette Turánt azon tételéhez, amelynek hatására kifejlődött az extrémális gráfelmélet, a mai kombinatorika egyik nagyon fontos területe.

A legnagyobb hatású eredmény: a véletlen módszer kifejlesztése

Erdős munkássága hihetetlenül nagy, mély és széles. Erdősnek döntő szerepe volt a számelmélet egyes területeinek kibontakozásában. Turán Pállal számos tételt bizonyított véges algebrai csoportok statisztikus tulajdonságairól. A csoportok a fizikában és a matematikában alapvető fontosságúak. Fejér tanítványaként sok eredménye volt az analízisben is.

Erdős munkásságának legnagyobb hatása a véletlen módszer szisztematikus használatának elterjesztése, azaz rendszeressé tette ezt a konstrukcióhelyettesítő eljárást. Erdős az úgynevezett nem konstruktív módszerek legnagyobb mestere lett. Ez a módszer abban a helyzetben hasznos, amikor a matematikusok nem találják meg, nem tudják expliciten leírni a keresendő struktúrát. Gyakran azért, mert szinte lehetetlen is leírni egy alkalmas megoldást. Leggyakrabban akkor kerülünk ilyen helyzetbe, amikor egy sejtésre ellenpéldát keresünk, vagy egy állítás érvényességi határait szeretnénk megállapítani. Nem konstruktív bizonyítás a már említett euklideszi eredmény, hogy végtelen sok prím szám létezik, de az nem használ véletlent. Erdős a nem konstruktív eljáráshoz gyakran a véletlent, a valószínűségi módszert alkalmazta. A módszer első nagy sikerei az ő nevéhez fűződnek. E módszerrel néha nagyon elegánsan és egyszerűen megmutatható, hogy nemcsak hogy létezik a kérdéses tulajdonságú struktúra – bár konkrét konstrukciót nem tudunk leírni –, a szóba jövő esetek döntő többsége kielégíti a kívánt feltételeket.

A módszer egyik legelső sikere az volt, amikor Turán Pál egy levélben feltett gráfelméleti kérdésére Erdős azt válaszolta, hogy egy megfelelően óriási nagy véletlenül választott gráf ellenpélda Turán sejtésére. Körülbelül tíz évvel később több megoldatlan problémára is hasonló választ adott: ha egy állításra ellenpéldát keresünk, azt megtehetjük úgy is, hogy egy nagyobb sokaságból véletlenszerűen kiválasztunk egy tipikus egyedet, majd – ha szükséges – egy kicsit módosítjuk. Ez a megközelítés hamarosan a kombinatorika egyik leghatékonyabb módszerévé vált. 1960 körül Rényi Alfréddal közösen elkezdték szisztematikusan kutatni a véletlen gráfok viselkedését. Egyik figyelemre méltó eredményük, hogy egy tipikus gráfnak majdnem biztosan nincsenek szimmetriái.

A következő lépés a véletlen gráfok evolúciója volt. Ez az evolúció olyan, mint a fizikában a fázisátalakulás, halmazállapot-váltás, kristályosodás. Amikor egy óriási gráfhoz egyesével adogatjuk hozzá az éleket, akkor eleinte szigetszerűen sok apró összefüggő részgráf keletkezik. Egy bizonyos sűrűségnél egy relatíve hirtelen átmenettel kialakul néhány nagyobb földrész a tengerben, majd ezek is összekötődnek egyetlen óriási földrésszé, és marad néhány izolált pont. Legvégül az izolált pontok is bekötődnek a nagy földrészhez. Érdekes mindezt a matematikai formulákon keresztül megfigyelni. Meglepő, hogy ez akkor következik be, amikor a gráfnak kb. $\frac{1}{2} n \log n$ éle van.

Rényi Alfréd

Rényi Alfréd (1921–1970) Riesz és Fejér tanítványa, 1946–1947-ben Leningrádban (ma Szentpétervár) Jurij Linnyik doktorandusza, akkori szóhasználattal aspiránsa volt. Erdősnek és Rényinek volt a legnagyobb szerepe abban, hogy Magyarországon kialakultak valószínűségszámítási iskolák.

Rényi is rendkívül termékeny, aktív kutató volt. Kiemelendő, hogy nagyon sokat tett azért, hogy az alkalmazott matematikai kutatások mellett a tisztán elméleti matematikai kutatások is beinduljanak, majd magas szintet érjenek el. Erdőssel 32 közös munkája jelent meg. Kidolgozták a véletlen gráfok elméletét, a nevezetes Erdős–Rényi-modellt, amely azóta is a kutatások egyik legfontosabb eszköze. Az Erdős–Rényi-féle véletlen gráfmodell ihlette a legutóbbi időkben a kutatások fókuszába került Barabási–Albert-modellt is. (Kevésbé ismert, hogy Barabási Albert–László tanítványa Albert Réka, a modell kettőjük nevéhez fűződik.) A Barabási–Albert-modellben a csomópontok száma folyamatosan növekszik, ezért kiválóan alkalmas növekvő nagy kapcsolati hálózatok viselkedésének tanulmányozására. Bizonyos eseteket az Erdős–Rényi-modell vagy annak általánosítása ír le (például egy fertőzés terjedése vagy az interneten a különböző csoportok növekedése), más esetekben a Barabási–Albert-modell használható jobban.

Erdős matematikája, problémafelvetései

Erdős Pál két erősségét emeljük ki. Az egyik a hallatlan problémaérzékenysége, mindig nyitott volt új és újszerű eredményeket, kérdéseket meghallgatni. Azonkívül ő maga is ontotta az érdekesnél érdekesebb vizsgálandó témákat, megoldandó problémákat. Nagyon sok társszerzője volt, és sok kutatási területet alapozott meg.

Említsünk meg egy tipikus „Erdős-típusú” kérdést, azaz egy egyszerű, de mégis meglepően nehéz és mindmáig megoldatlan problémát. Erdős azt sejtette, hogy ha a síkon felveszünk n pontot, akkor – elég nagy n szám esetén – ezek között egy megadott távolság kevesebbszer fordulhat elő, mint $n^{1+\varepsilon}$, ahol ε egy előre megadott tetszőlegesen kicsi pozitív szám.

A matematikában, mint minden tudományban, néha nagyon nehéz megítélni, hogy melyik téma, kérdés fontos, és melyik nem. Vannak egymásnak feszülő, teljesen eltérő matematikai hozzáállást valló iskolák. Mindezt nagyon plasztikusan írja le Tim Gowers Fields-érmes matematikus (Gowers 2000). A lényeg az, hogy vannak az induktív és a deduktív gondolkodású kutatók. Erdős, Turán és a legtöbb magyar matematikus az induktív matematizálást követi: még ha kitűz is egy távolabbi, nagyobb célt, gyakran először annak a legegyszerűbb alesetét támadja meg, próbálja bebizonyítani. Ha azt elintézte, megy az általánosabb felé. Ezzel szemben áll a deduktív módszer, ahol a kérdéseket a lehető legáltalánosabban próbáljuk megfogalmazni, majd abból levezetni a konkrét, fontos eseteket. A deduktív matematizálás egyik ágát bourbakizmusnak nevezzük. Ebben mindig a lehető legáltalánosabb tételt keressük, még ha az olyan bonyolult is, hogy gyakran a jelenség lényegét elhomályosítja. A 20. század közepén francia matematikusok egy csoportja elhatározta, hogy nem a saját nevükön, hanem Nicolas Bourbaki néven publikálnak. Ezzel a saját ambíciójukat háttérbe szorítva matematikailag a legjobbat akarták adni. Nagyon magas színvonalon dolgoztak, és a világ matematikájára nagyon nagy hatással voltak. Arról mindmáig vita folyik, hogy a túlzott absztraktságukkal több kárt okoztak-e, mint hasznot. Erdős stílusa a bourbakizmus éles fordítottja volt.

Erdősre tehát az volt a jellemző, hogy feltett egy apró matematikai kérdést. Ha az megoldhatónak bizonyult, akkor rögtön feltett egy következő kérdést, majd egyre újabb és újabb kérdéseket, és ezekkel hihetetlen magasságokig ért el. Ehhez természetesen nem egy mechanikus kérdéssorozatra, hanem lényeglátó megértésre volt szüksége, így módszerét lehetetlen megfelelő intuíció nélkül lemásolni.

Erdős Pál munkastílusa

Erdős napi négy-öt órát aludt, hajnali négytől megírt hat-nyolc (papír) levelet, lektori véleményt, értékeléseket a világ különböző tájaira. Amikor Budapesten volt, szinte elsőként ért a Matematikai Intézetbe, és azonnal elkezdett a kollégákkal matematikáról beszélgetni.

A tehetséggondozást is nagyon egyedi módon csinálta. A háború után 1949-ben még hazajött, de azután évekig nem volt itthon. Amikor szabad távozás lehetőségével

ismét hazajárhatott, akkor valahányszor megismerkedett egy, a matematikában kiemelkedő tehetségű gyerekkel, arra odafigyelt, felkarolta és különös érzéssel kezdte olyan problémákkal bombázni, amelyek az illetőnek a legjobban megfelelték. Amikor Magyarországon volt, beült a Matematikai Kutatóintézet igazgatói szobájába, és ott fogadta a látogatókat. Furcsák voltak ezek a találkozások, mert Erdős számtalan különböző témával tudott egyszerre foglalkozni. Hárman, négyen, vagy többen is körbeülték, többnyire fiatal kollégák, és néha egyiküktől kérdezett valamit, vagy elmondott egy bizonyítást, néha többeknek, de mindig pontosan tudta, kitől mit kérdezzen.

Erdős rengeteg érdekes problémát generált, annyi ötlete és meglátása volt, amennyit idő híján nem tudhatott kidolgozni, hogy egy külön műfajt, az Erdős-féle problémacikket hozta létre. Sok problémára (játékból) a megoldásért jelképes pénzjutalmat ajánlott fel. Legalább három tucat cikket írt kizárólag megoldatlan problémákról, felfedezendő témákról. Ezek egy részét a halála után Amerikában könyvbe gyűjtötték, és azóta is kollégák tucatjainak kutatását segíti. Ha valaki megoldott egy Erdős-problémát, az komoly rangot adott.

A 14 éves Pósa Lajostól olyasmit kérdezett (a Hamilton-körökről), amiből egy nagyon fontos cikk és módszer keletkezett. E témában később több közös cikket is írtak. Ezen eredményeik nagyon sok további kutatást generáltak. Egyszer Pósa Lajos elhozta Erdőshöz Ruzsa Z. Imrét, aki akkor még csak középiskolás volt, a Fazekas Gimnázium matematika tagozatára járt. Ruzsának nagyon fontos volt, hogy Erdős meghallgassa, és Erdős valóban odafigyelt rá. Itt a szerepek felcserélődtek, a fiatal Ruzsa egy meglehetősen nehéz témában próbálta elmagyarázni a professzornak a saját sejtését. Bollobás Béla elmesélte, hogyan üzent Erdős utána, hogy látni szeretné, és hívta meg a Royal Cukrászdába. Hajnal András leírta, hogyan találkozott aspiránsként Szegeden Kalmár László szobájában Erdőssel, aki egyebek között megkérdezte, nem mennének-e fel együtt a szegedi fogadalmi templom tornyába. Erdős nagyon szeretett magas tornyokba felmenni, magas hegyeket megmászni. Az ifjú aspiráns Hajnalnak eszébe sem jutott, hogy erre a kérésre nemmel is felelhetne. Menet közben matematikáról beszélgettek, és mire visszatértek a szegedi Matematika Intézetbe, addigra tartalmilag meg is volt az első közös cikkük anyaga.

Erdős Pál két eredménye az 1970-es évekből

Megemlítünk Erdős Pál világraszóló eredményei közül kettőt, mindkettő Selfridge-dzsel közös.

Egy diofantoszi egyenlet

A diofantoszi egyenlet azt jelenti, hogy az egyenletet egész számokban szeretnénk megoldani. A nevezett eredmény annak bizonyítása volt, hogy egymást követő pozitív egész számok szorzata sosem teljes hatvány. Azaz az $x(x+1)\dots(x+k) = y^n$ egyenletnek nincs pozitív egész megoldása ha $x, y, k \geq 1, n \geq 2$.

E tétel (akkor még sejtés) speciális eseteit elsőrangú matematikusok sora vizsgálta (Christian Goldbach már 1724-ben, később Daniel Bernoulli és Joseph Liouville). Erdős az 1930-as évek végétől kezdve vissza-visszatért a problémához, újabb és újabb eseteket igazolt, és végül 1975-re sikerült teljesen befejeznie. Erdős igazi mestere volt a szitamódszernek, ahol a szita egy megszámlálási módszert jelent. Itt Erdősnek a számelmélet egyik igen sok ötletet és lényeglátást kívánó eszközére, a Brun-szítára volt szüksége, amellyel a megoldások számára gyakran nagyon pontos becsléseket lehet nyerni.

Kombinatorikus játékok és determinisztikus algoritmusok

Erdősnek sikerült nehéz kombinatorikai problémák egész osztályát játékelméleti kérdéssé átalakítani, és egy nagyon egyszerű, de zseniális ötlettel közelítő megoldást adnia ezekre. Ez a módszer azóta is a kutatások centrumában van, és kritikus szerepet játszik a véletlent használó algoritmusok determinisztikussá alakításában (derandomization). Noga Alon szerint az Erdős–Selfridge-eredmény tette lehetővé a diszkrét matematika egyik legnagyobb eredménye és eszköze – a Szemerédi-féle regularitási lemma – explicit algoritmikus verziójának bizonyítását. Ezeknek az explicit algoritmusoknak – mint sok tételnek a matematikában – egyelőre nincs közvetlen haszna a számítógép-tudományban, mert az állításuk csak nagyon nagy számokra használható vagy bizonyítható, de pusztán az algoritmikus verziók létezésének ténye irányt ad a további kutatásoknak.

Erdős, az excentrikus tudós

Erdős korát megelőzve rengeteget utazott, hozta-vitte a híreket, az új eredményeket. Ennek hasznát, fontosságát a mostani internet és e-mail uralta korunkban szinte el sem tudjuk képzelni. Utazásaiban szerepe volt annak, hogy már nagyon fiatalon világosan látta, hogy el kell hagynia a hazáját. Több hosszabb külföldi út után a második világháború előtt, Bartók Bélához hasonlóan, szinte az utolsó pillanatban ment el. Ugyanakkor nagyon szoros kapcsolatot tartott fenn hazai kollégáival, rengeteg levelet írt, roppant sok közös kutatásban vett folyamatosan részt. Mivel nemcsak kiemelkedő tudós, hanem nagy hatású előadó és kiváló munkatárs is volt, ezért mindenhol szívesen látták. Egyformán könnyen beszélt magyarul, németül és angolul. Bár szinte állandóan úton volt, mégsem tudott minden meghívásnak eleget tenni.

Miután jelen szerzők abban a szerencsében részesültek, hogy évtizedekig rendszeresen dolgozhattak együtt Erdős Pállal, ezért most a szórakozott professzorra jellemző és időnként gyermeki naivitásra utaló anekdoták helyett Erdős világos gondolkodására és széles műveltségére hozunk fel példákat.

Erdős a nagyvonalú filantróp: egy magyar énekesnő (eredetileg matematika-fizika szakos tanár) az 1970-es évek végén felvételt nyert a Bécsi Zeneakadémia opera tanszakára. Akkoriban a kiutazáshoz (sőt elvileg a hivatali levelezéshez is) engedély

kellett, amihez egy külföldi szponzort kellett találni. Közös ismerősei javaslatára Erdős hajlandó volt egy támogató levelet írni. Amikor az ismeretlen fiatal elment a levélért, és hogy a köszönetét fejezze ki, Erdős az iskolakezdéshez 1000 dollárt adott neki (ami mai pénzben legalább 4000 euró). „Majd megadja, amikor nagy énekesnő lesz”, válaszolta Erdős a diáklány idevonatkozó kérdésére.

Erdős nagyon érdeklődött a történelem iránt, sőt emellett érdekelte az orvostudomány is. A történelemnek is realista szemlélője volt. Egy baráti beszélgetésben az a kissé történelmietlen kérdés merült fel, hogy mennyivel másképp nézett volna ki a muhi csata, ha már 1241-ben is lett volna ágyú. Erdős, a sajnos hazánkban gyakori, délibábos elképzelésektől élesen eltérően azt mondta, „ha akkor már lett volna ágyú, akkor valószínűleg a tatároknak valamivel jobb ágyúik lettek volna”. Ez sajnálatos módon így is volt a 16. században. A hódító törököknek sokkal jobb és több lőfegyverük és francia tüzérségük volt.

Erdős egész életét a matematikai kutatások töltötték ki. Egyidejűleg nagyon igényelte az emberek társaságát, a barátokat. Szeretett kirándulni, szerette a szép tájakat, szeretett pingpongozni, igen sokoldalúan művelt volt. Szerette a költészetet, szeretett klasszikus verseket sajátos humorral átkölni. Erdős nagyon sokat levelezett. El szokták róla mondani, hogy leveleiben azonnal a matematikára tért. Ez ugyan igaz, de a beszélgetésekből kiderült, hogy nagyon is odafigyel az emberekre.

Mitől jó a magyar matematika?

A magyar matematika nemzetközileg igen elismert. Ennek a fent részletezett okain kívül (nemzetközi beágyazottság, tehetséggondozás) alább két további tényezőjét említjük. Fontos, divatos témákban kiemelkedő matematikusaink voltak/vannak. Ha megnézzük, hogy ma milyen magyar matematikai iskolák működnek, a kombinatorikai, a számelméleti és még jó néhány iskola erősen kapcsolódik ahhoz, amit Erdős, Turán Pál és még néhányan az 1930-as évek közepén indítottak el. A magyar kombinatorikai iskola folyamatos kiválósága természetesen sok tanár és kutató munkájának köszönhető, és az olyan alkotócsoporthoz is, mint amilyen az Anonymus volt.

Kiemelendő az MTA, ezen belül a Matematikai Intézet szerepe (jelenlegi nevén HUN-REN Rényi Intézet). A Magyar Tudományos Akadémia a szerény költségvetésével az intézet megalapításával (1950) lehetővé tette, hogy a magyar matematikai iskolák ne vesszenek el, tovább virágozhassanak. Példaként említhetjük a világon elsőként és közel hatvan éve folyamatosan működő, alapítóirol csak Hajnal-T. Sós-szemináriumként emlegetett intézeti kombinatorika szemináriumot. Természetesen az intézet segítségével és kiemelkedő tudósok vezetésével más iskolák is létrejöttek, például korát messze megelőzve a diszkrét geometriai iskola Fejes Tóth László vezetésével, ami a számítógépes grafika szükségletei miatt az utóbbi évtizedekben szintén jelentősen felértékelődött. Az MTA támogatása ugyancsak lehetővé tette, hogy a tudományos diákkörökre, a fiatal tehetségek témavezetésére több idő és energia jusson.

Konklúzió: matematikai iskolák, egymásra épülő generációk

Erdős 1996 szeptemberében Varsóban megtartotta utolsó előadását, és másnap meghalt. Ez majdnem az, amit megálmodott magának: megtartani egy előadást, letenni a krétát és meghalni. De hol van ma már kréta? Egész életében magyar állampolgár maradt, mindig magyar útlevelel utazott, ami akkoriban sok nehézséget okozott. Pedig sok országban szívesen adtak volna mellé egy kisebb kutatócsoportot titkárnőekkel. Az akkori magyarországi rendszer annyi kedvezményt engedett neki, hogy nem akadályozták az utazásait. Erdős körülbelül 1500 cikket írt, és 500 társszerzője volt. Hozzá hasonló produktivitás csak Leonhard Eulert jellemezte. Ez a magas szám önmagában félrevezető, sem Euler, sem Erdős nagysága és hatása nem fejezhető ki a cikkeik számával. Az 1989-ig elkészült művei megtalálhatóak az alábbi webcímen: URL2.

Életéről több könyvet írtak, ezek közül van, ami magyarul is megjelent. Az alábbi bibliográfiából a nem matematikus olvasónak elsősorban Babai László cikkét ajánljuk (Babai 1993), amelyik Erdőssel való beszélgetések alapján készült, továbbá T. Sós Vera cikkét (T. Sós 2002), amelyik a háború alatti Erdős–Turán-levelezést is tartalmazza. Saját élményeken alapulnak Bollobás Béla, Pach János, Simonovits Miklós visszaemlékezései (Bollobás 1998; Pach 1996; Pach 1997; Simonovits 2013). A University of Chicago emlékdalt szentel Erdős Pálnak (URL3). Reuben Hersh és Vera John-Steiner (1993) cikke és a University of St Andrews gyűjteménye (URL4) kiváló adalék ahhoz, hogy hogyan tekintenek a magyar matematikára angolszász területen.

Erdős élete és munkája jól illusztrálja, hogy van egy 150–200 éves magyar matematikai iskola, amelyben a generációk és csoportok folyamatosan hatnak egymásra, és amely a zseniális, kiemelkedő tudósokon kívül a tanár- és tudósközösség kollektív munkáján alapul. Csak remélhetjük, hogy ez az érték nem vész el rövidlátó döntések miatt, és a hazai kutatások még sokáig gazdagítják nemzetközileg kiemelkedő szinten a világról való tudásunkat.

Irodalomjegyzék

- Babai László (1993). „In and Out of Hungary, Paul Erdős, His Friends, and Times”. In: Dezső, Miklós – Vera, T. Sós – Tamás, Szőnyi, szerk. *Combinatorics: Paul Erdős Is Eighty. (Bolyai Society Mathematical Studies 2.)*. Budapest: János Bolyai Mathematical Society, 7–95.
- Babai László – Spencer, Joel (1998). „Paul Erdős, (1913–1996)”. *Notices of the American Mathematical Society*, 45/1, 64–73.
- Bollobás Béla (1997). „Erdős Pál (1913–1996)”. *Természet Világa*, 128, 77.
https://adt.arcanum.com/hu/view/TermtudKozl_1997/?pg=130&layout=s&query=Bollob%C3%A1s
- Bollobás Béla (1998). „To Prove and Conjecture”. *The American Mathematical Monthly*, 105/3, 209–234.
<https://doi.org/10.1080/00029890.1998.12004872>
<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/00029890.1998.12004872?needAccess=true>
- Erdős, Paul (1977). „Paul Turán, 1910–1976. His Work in Graph Theory”. *Journal of Graph Theory*, 1/2, 97–101.
- Erdős Pál (1997). „Hogyan lettem matematikus és világvándor”. *Természet Világa*, 2, 78–79.
- Filep László (1981). „Farkas Gyula élete és munkássága”. *Matematikai Lapok*, 29/4, 231–244.

- Gowers, Timothy (2000). „The Two Cultures of Mathematics”. In: V. Arnold et al., szerk. *Mathematics: Frontiers and Perspectives*. Rhode Island: American Mathematical Society, 65–78.
- Hersh, Reuben – John-Steiner, Vera (1993). „A Visit to Hungarian Mathematics”. *The Mathematical Intelligencer*, 15, 13–26.
<https://doi.org/10.1007/BF03024187>
- Pach János (1996). „Két helyen egyszerre”. *Világosság*, 37/12, 70–79.
https://adt.arcanum.com/hu/view/Vilagossag1957_1996-2/?pg=493&layout=s&query=Pach
- Pach, János (1997). „Two Places at Once: A Remembrance of Paul Erdős”. *Mathematical Intelligencer*, 19, 38–48.
- Simonovits Miklós (2013). „Erdős Pál a 21. században”. *Magyar Tudomány*, 174/11, 1358–1368.
https://epa.oszk.hu/00600/00691/00122/pdf/EPA00691_mtud_2013_11_1358-1368.pdf
- T. Sós, Vera (2002). „Turbulent Years: Erdős in His Correspondence with Turán from 1934 to 1940”. In: *Paul Erdős and His Mathematics, I*. Bolyai Society Mathematical Studies 11. Budapest: János Bolyai Mathematical Society, 85–146.
- Turán Pál (1963). „Erdős Pál 50 éves”. *Matematikai Lapok*, 14, 1–28.
- Turán Pál (1970). „Leopold Fejér” In: *Fejér Lipót összegyűjtött munkái – Leopold Fejér Gesammelte Arbeiten, Vol. I*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 13–20.
- URL1: <https://ematlap.hu/gazda-g-sag-2022-20/1226-ottlik-geza-fejer-lipot-tanitvanya>
 URL2: https://users.renyi.hu/~p_erdos
 URL3: <http://theory.cs.uchicago.edu/erdos.html>
 URL4: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Erdos/>

A Rényi Intézet: múlt, jelen és remélt jövő

The Rényi Institute: Past, Present, and Hopes for the Future

Stipsicz András

az MTA rendes tagja, igazgató, HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Budapest
stipsicz@renyi.hu

Összefoglalás

A Matematikai Kutatóintézet alapítása 1950-re nyúlik vissza, és 1999 óta viseli első igazgatója, Rényi Alfréd nevét. Az intézet történetének áttekintése mellett bemutatjuk egyes kiemelkedő személyiségeit és mai sokoldalú tevékenységét, valamint a jövő terveit.

Abstract

The Institute of Mathematics was founded in 1950, and has borne the name of its first director, Alfréd Rényi, since 1999. In addition to an overview of the institute's history, we will present some of its prominent personalities, its multifaceted current activities, and its plans for the future.

Kulcsszavak: HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Erdős Pál, Rényi Alfréd, Szemerédi Endre, ERC grant

Keywords: HUN-REN Alfréd Rényi Institute of Mathematics, Paul Erdős, Alfréd Rényi, Endre Szemerédi, ERC grants

A Rényi Intézet (aktuális hivatalos nevén HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet) Budapest történelmi belvárosában, a Reáltanoda utcában található, egy, a 19. század második felében épült gyönyörű palotában. Az intézet fő küldetése a matematikai kutatás legmagasabb szintű művelése; az itt folyó tudományos munka által a Rényi Intézet központi és meghatározó szerepet tölt be a magyar matematikában. Az épület azonban természetesen csak keretét adja az itteni kutatásoknak, a főszereplők azok a matematikusok, akik eredményeikkel, tételeikkel, gondolataikkal ezt a keretet megtöltik. Mielőtt az intézet múltjára rátérünk, elevenítsünk fel egy-egy epizódot, eredményt az elmúlt évtizedekből!

A 20. század matematikájának egyik meghatározó alakja Erdős Pál, vagy ahogy környezete hívta, Pali bácsi. Különleges életvitele számtalan történet és legenda forrása volt és marad. Az intézet máig büszke arra, hogy ha utazásai közben Magyarországon tartózkodott, akkor a Rényi Intézetben (akkor még Matematikai Kutatóban) volt a székhelye. Ez a gyakorlatban azt jelentette, hogy az igazgató arra az időre egy másik irodába költözött, Erdős pedig az igazgatói irodában fogadta számos szerzőtársát rövidebb-hosszabb közös munkára (amikor „agya nyitva állt” a közös gondolkodásra).

Erdős arról is nevezetes volt, hogy az általa fontosnak, érdekesnek (vagy csak nehéznek) ítélt problémák megoldására pénzdíjat tűzött ki, inkább súlyt adva a problémának, mintsem a megoldásba fektetett energiát honorálva. (Meg is jegyezte néha, hogy a megoldásokra fordított idő messze nem volt arányban a pénzdíjjal, és szigorúan véve evvel megsértett a minimális órabérre vonatkozó minden szabályt.) Szemerédi Endre is az intézet munkatársaként látta be nevezetes tételét a számtani sorozatokról (amelynek nyomán aztán évtizedekkel később, 2012-ben Abel-díjat kapott). A tétel, amelynek megoldására Erdős egyébként 1000 dollárt tűzött ki, azt állítja, hogy ha a pozitív egész számok közül elég sokat kiválasztunk (ez azt jelenti, hogy van egy olyan a pozitív szám, hogy minden elég nagy N számra az N -nél kisebb számoknak legalább $a\%$ -át kiválasztottuk), akkor a kiválasztott számok között van akármilyen hosszúságú számtani sorozat. (Emlékeztetőül, egy k hosszúságú számtani sorozat olyan $a_1, a_2, \dots, a_k$ számok k elemet tartalmazó gyűjteménye, hogy az egymás után következő tagok különbsége mindig ugyanannyi.) Kéttagú számtani sorozatot könnyű találni, mert bármely két szám ilyent alkot, de háromtagút már nem egyszerű: a fenti Szemerédi-tételt a $k = 3$ esetre Klaus Roth látta be, és ennek az eredményének része volt abban, hogy 1958-ban megkapta a Fields-érmet. Szemerédi először a $k = 4$, majd az összes többi k esetét oldotta meg egy kivételesen összetett, nehezen átlátható, zseniális gondolatmenettel. Ennek leírásában komoly segítséget kapott Hajnal Andrástól, az intézet későbbi igazgatójától. A legenda szerint, amikor Erdős egy levélben rákérdezett az épp készülöben lévő bizonyítás helyességére, Hajnal (az 1000 dolláros jutalomra reflektálva) azt válaszolta: „Még nem vagyok teljesen biztos abban, hogy a megoldás helyes, de 700 dollárért már megvenném.”

A fenti kis kitérő után térjünk vissza az intézet történetéhez (Vincze 1976). Matematikai kutatóintézet Magyarországon először a Minisztertanács 155/1950. (VI. 3.) MT számú törvényerejű rendelete alapján 1950. augusztus 1-jével alakult meg, elnevezésében is mutatva Akadémiánkhoz való szoros kapcsolódását: Magyar Tudományos Akadémia Alkalmazott Matematikai Intézete. Az intézet létrehozásáról a Tudományos Tanács valójában már egy évvel korábban, 1949. augusztus 1-jén döntött, a kezdeti lépésekben az Egerváry Jenő vezette (és a Köznevelési Minisztérium keretében működő) alkalmazott matematikai csoportra építve mind a szervezetet, mind annak feladatait. A világháború utáni újjáépítés természetes követelménye volt a matematika alkalmazott ágainak fejlesztése, az eredmények minél szélesebb társadalmi hasznosítása. Megalakulásakor az intézet vezetését az akkor 29 éves Rényi Alfréd vette át, akit Egerváry Jenő mint az intézet Tudományos Tanácsának elnöke segített. Az alkalmazott jelleg dominanciáját jól mutatja a megalakuláskor létrejött öt tudományos osztály neve is: Mechanikai és Szilárdságtani Osztály, Valószínűségszámítási Osztály, Biztosítási és Gazdasági Matematikai Osztály, Vegyipari Osztály, és végül a Numerikus és Grafikus Módszerek Osztálya. (Két évvel később két csoport, az Elektrotechnikai és a Biometriai Csoport csatlakozott ezekhez.) Az osztályokat az előbbi felsorolás sorrendjében Egerváry Jenő, Rényi Alfréd, Vincze István, Fenyő István és Hajós György vezették. Az intézet létszáma, köszönhetően Rényi aktivitásának és tudományos te-

kintélyének, öt év alatt 55 főre nőtt. 1954 végére a fent felsorolt osztályokhoz a Valós Függvénytan és a Differenciálegyenletek Osztály csatlakozott, elindítva az intézet fókuszának az elméletibb területek felé tolódását. Ezt teljesítette ki az MTA elnökének 14/1955. számú rendelkezése, amely nemcsak az intézetet szervezte át, de megváltoztatta célját is (előtérbe helyezve a közvetlen alkalmazásoktól távolabb álló területek fejlesztését), sőt az intézet nevét is, amely ettől fogva MTA Matematikai Kutató Intézete lett.

Megalakulásakor az intézet a Műegyetem központi épületében kapott négy szobát, ahonnan először a Sztálin (ma Andrásy) út 31-be, majd a Zichy Jenő utca 4-be költözött, végül 1958-ban foglalta el mai helyét a Reáltanoda utcában. Eleinte más szervezetekkel társbérletben birtokolta az eredetileg Redl Béla báró által az 1870-es években építtetett palotát (osztozva például az Ebtenyésztek Egyesületével, amelynek emlékét ma is őrzi az egyik szemináriumi szoba Kutyas elnevezése), amely korábban a Magyar Mérnök és Építész Egylet, illetve a Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége (MTESZ) székháza is volt.

Az 1960-as években a magyar és egyetemes matematika olyan óriásai dolgoztak az intézet falai között, mint a matematika utazó nagyköveteként is ismert, már korábban említett Erdős Pál, a későbbi igazgató Fejes Tóth László vagy a következő matematikus-nemzedék kinevelésében is kulcsszerepet játszó Turán Pál és felesége, T. Sós Vera, és természetesen Rényi Alfréd, aki döntő mértékben járult hozzá a valószínűségszámítás, gráfelmélet és számelmélet honi fejlődéséhez. De munkatársai között tudhatta az intézet (egy szegedi részleggel, az ottani egyetemmel összefonódva) Szőkefalvi-Nagy Bélát és Rédei Lászlót is. Rényi amúgy menedéket nyújtott számos, politikai okokból támadott vagy üldözött tudósnak is, még a matematika berkein kívül is. Így került az intézetbe például Lakatos Imre (aki aztán az Egyesült Királyságban a tudományfilozófia világhírű tudósa lett) és Szabó Árpád klasszika-filológus, aki az intézetben vált az ókori görög matematika világszerte elismert kutatójává. De több évet töltött a Matematikai Kutatóban Vekerdi László is, aki tudomány- és művelődéstörténésként angolra fordította Rényi valószínűségszámítási tankönyvét.

Rényi Alfréd azonban nemcsak kitűnő intézetvezető és szervező volt, maga is kiemelkedő matematikusként volt ismert. 1921-ben született Budapesten, egyetemi tanulmányait a Pázmány Péter Tudományegyetemen végezte Fejér Lipót tanítványaként. A világháború után a szegedi egyetemen, Riesz Frigyes témavezetésével doktorált, majd Leningrádban Jurij Vlagyimirovics Linnyik és Ivan Matvejevics Vinogradov irányításával írta meg kandidátusi disszertációját. Témája a kvázi Goldbach-sejtés megoldása volt. A Goldbach-sejtés (amely szerint minden páros szám két prímszám összegeként írható fel) máig a számelmélet egyik legnagyobb presztízsű nyitott problémája. 1949-ben választották az MTA levelező tagjává, 1956-ban pedig már rendes tag volt. A kutatóintézet irányításával párhuzamosan számos további fontos szervezési feladatot vállalt magára, például 1952-től 1970-ben bekövetkezett korai haláláig az ELTE Valószínűségszámítási Tanszékét is vezette. Matematikai eredményeit felsorolni is hosszú lenne: a fent említett számelméleti munkája mellett maradandót alkotott

a valószínűségszámítás, a statisztika, a gráfelmélet témakörében is. Sokat foglalkozott (és publikált) matematikával kapcsolatos filozófiai kérdésekről is, de írt egyetemi tankönyvet és népszerűsítő tudományos könyvet is. *Dialógusok a matematikáról, Levelek a valószínűségről* című kötetei számos világnyelvre lefordítva terjedtek el, és nyertek meg sokakat mind a matematikán belül, mind azon kívül ennek a dinamikusan fejlődő új ágának. Emlékét nemcsak az intézet neve, de 1972-től egy díj, a Rényi-díj is őrzi.

Az 1960-as években az intézet a kombinatorika (és tágabban a diszkrét matematika) egyik legfontosabb központjává vált. Erdős véletlen módszere, az extrémális gráfok és extrémális halmazrendszerek elméletének megalapozása, és számos további, a diszkrét matematika manapság is sűrűn használt eredménye, módszere is az intézethez, illetve az itt dolgozó kutatókhoz köthető. Kiemelkedőek voltak a halmazelmélet és matematikai logika terén folyó kutatások, hasonlóan Hajnal András (korábbi igazgató) kombinatorikus halmazelméleti munkáihoz. A diszkrét geometria, amelynek indulásánál egy további egykori igazgató, Fejes Tóth László is bábáskodott, a mai napig az intézet nemzetközi mércével mérve is kiugróan sikeres kutatási témája. Turán Pál munkássága nyomán a számelmélet klasszikus fejezetei is a legmagasabb szinten voltak képviselve. Szemerédi Endre számtani sorozatokra vonatkozó nevezetes tétele (amelyről korábban már volt szó) is ebből a korszakból és ebből a szellemi műhelyből került ki a Szemerédi-féle regularitási lemmával együtt (URL1).

Az ELTE Természettudományi Karának (TTK) (és így a matematikus hallgatók és matematikát oktató egyetemi kollégák) közelsége természetes szimbiózis kialakulását segítette elő. A Múzeum körüti egyetemi épülethől pár perces sétával lehetett a Kutatóba átugrani, számos szeminárium, speciális kollégium itt találta meg a helyét, és az intézet kutatóival való kapcsolattartás nagyon egyszerű volt. A TTK Lágymányosra költözése ezt a kapcsolatot valamennyire lazította, de mind az ELTE, mind a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Matematikai Intézetéhez továbbra is számos szállal kapcsolódik a Rényi. Az intézet most használatos neve (a Rényi) is ebből az időszakból származik: 1999-ben, Katona Gyula (mint egykori Rényi-tanítvány) igazgatósága alatt vette fel az intézet első igazgatója nevét, és kapta az MTA Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet nevet.

A 2000-es évek, majd Magyarország csatlakozása az Európai Unióhoz komoly változást hozott az intézet életében: sokkal nagyobb hangsúllyal jelentek meg az európai kapcsolatok. Ennek első gyümölcse a Centre of Excellence cím elnyerése volt, amit aztán további hasonló pályázati sikerek követtek. Az intézet csatlakozott az ERCOM-hoz (European Research Centres on Mathematics), az Európai Matematikai Társulat (European Mathematical Society) egyik bizottságához, amely majd minden jelentős európai matematikai intézetet a soraiban tudhat. Az évenként esedékes ERCOM-találkozókon a Rényi mindig képviselteti magát, és számos tapasztalatot, ötletet tud átvenni európai társintézeteitől (Pálfi 2007).

Az intézet fennállásának 75. évfordulójához közeledve az uniós pályázatok egyre komolyabb szerepet játszanak a kutatók életében. Az elnyert grantok nemcsak pénzügyi háttérrel és komoly lehetőségeket adnak, de a kiválasztási rendszer szigora és

szakértelme miatt vissza is igazolják egy-egy kutatási irány létjogosultságát, az európai matematikai térben betöltött fontos szerepét. A 11. ERC-támogatás elnyerését a kutatók egy humorosnak szánt fotóval (1. ábra) ünnepelték meg: a 11-es szám a köztudatban egy focicsapat (mondjuk, a magyar válogatott) egyszerre pályán lévő játékosainak száma, ezért válogatott mezben felsorakozva készült egy közös kép (Stipsicz 2022). Ám azonnal látszik, hogy nem egy valódi focicsapatról van szó, hiszen nincs kapus, de hát nem is ez a lényeg...



1. ábra. A Rényi Intézet ERC-pályázatot elnyert kutatói. Álló sor (balról jobbra): Abért Miklós, Szemerédi Endre, Pintz János, Bárány Imre, Lovász László, Pyber László, Pach János; első sor: Stipsicz András, Pete Gábor, Tardos Gábor, Szegedy Balázs
Forrás: Szilágyi Gergely, HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet

Az elmúlt majd húsz évben az intézet kutatói számos rangos ösztöndíjat nyertek el, mind európai, mind országos szinten. Kiemelendő ezek közül a 12 ERC-támogatás (különböző szinteken), több Marie Skłodowska-Curie-ösztöndíj, és sok Lendület és Élvtal pálya, utóbbiakat a Magyar Tudományos Akadémia, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) írta ki. Nem feledkezhetünk meg két Abel-díjas kutatónk, Szemerédi Endre (2012) és Lovász László (2021) kiemelkedő eredményeinek méltatásáról sem. Az Abel-díjat eredetileg a Nobel-díj matematikai megfelelőjeként kívánta a norvég parlament létrehozni Niels Henrik Abel születésének 100. évfordulóján, 1902-ben. Az akkori politikai helyzet (Norvégia kiválása Svédországból) ezt akkor nem tette lehetővé, így a terv csak éppen száz évvel később, 2002-ben valósulhatott meg. Az elmúlt 23 évben elnyert két hazai Abel-díj (különösen, ha idevesszük Lax Péter budapesti születésű, de Amerikában élő matematikus 2005-ös Abel-díját is) a magyar matematika különleges erejét és nemzetközi sikerességét demonstrálja.

A matematikai közélet egyik legrangosabb fóruma a négyévente megrendezésre kerülő Nemzetközi Matematikai Kongresszus (International Congress of Mathematicians, ICM), amely 1897-ben indult útjára, és 1900-tól fogva minden negyedik évben (a világháborús időket leszámítva) hívta össze a világ matematikusait valamely neves egyetem vagy kutatóintézet szervezésében. A kongresszuson osztottak és osztanak ki számos meghatározó matematikai díjat, amelyek közül fontosságában és elismertségében kiemelkedik a Fields-érem (amelyet legfeljebb négy, legfeljebb negyvenéves matematikus kaphat meg egy kongresszuson). A tudományos program keretében 10–15 plenáris előadás és (a legutóbbi időkben) 17 szekcióban egyenként 8–10 meghívott előadó témaspecifikus előadása hangzik el. A kongresszusra való, előadás megtartására szóló meghívás már maga kiemelkedő elismerést jelent a matematikai közéletben. A Rényi Intézet különösen büszke arra, hogy a statisztikák szerint az elmúlt harmincöt évben (meghívott vagy plenáris előadókkal) minden Nemzetközi Matematikai Kongresszuson képviseltette magát. 2018-ban egyenesen négy rényi matematikus tartott előadást Rio de Janeiróban az ICM 2018-on. Az intézet kutatói gyakori résztvevői továbbá az Európai Matematikai Kongresszusoknak (European Congress of Mathematics, ECM) is – a 2020-as ECM8-on (a pandémia miatt 2021-re halasztották) egy plenáris előadó képviselte a Rényit.

Ma a Rényi Intézet az elméleti matematika minden főbb területén foglalkoztat kutatókat, külön osztályt szentel az algebra, a geometria, az analízis, a valószínűségszámítás, a számelmélet, a topológia, a halmazelmélet és a diszkrét matematika számos ágának tanulmányozására. Az elmúlt években az intézet bővítette kutatási részlegét alkalmazottabb irányok, például a hálózattudomány, a pénzügyi matematika és a mesterséges intelligencia (MI) matematikai alapjai felé is. Az utóbbi tématerület különösen fontos a 21. század tudományos kihívásainak kezelésében. Az intézet kutatói nemcsak az MI mindennapokban való alkalmazhatóságát vizsgálják, de tanulmányozzák az MI-alapú módszerek matematikai kutatásokban való felhasználhatóságának lehetőségeit is. Az elméleti és az alkalmazott oldal kölcsönhatása már eddig is izgalmas eredményeket hozott, és az intézet arra törekszik, hogy továbbra is előmozdítsa az ötleteknek és módszereknek ezt az áramlását.

Az intézet legutóbbi éveinek fontos története volt a 2019-es átalakulás, amikor az MTA alá tartozó kutatóintézet egy újonnan alakult hálózat, az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat része lett. 2023-ban a hálózat neve Magyar Kutatási Hálózat, majd az angol név (Hungarian Research Network) rövidítéseként HUN-REN lett, így a matematikai kutató is új nevet kapott: HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet. A számos adminisztratív jellegű változás azonban az intézetnek sem fő célkitűzéseit (legmagasabb szintű matematikai kutatások folytatása és az elért eredmények minél magasabb hatású publikálása), sem a kutatások sikerességét, sem mindennapi gyakorlatát nem befolyásolta lényegesen. Reméljük, hogy az elkövetkezendő években, a kihívásokra válaszolva, a kor és a nemzetközi matematikai élet változásaira reagálva és megújulva, hasonlóan sikeresen tudja az intézet továbbvinni azokat a hagyományokat, amelyeket a nagy elődök a mostani kutatókra hagyományoztak.

Az intézet nagy múltra tekint vissza nemzetközi szintű konferenciák, workshopok, illetve nyári és téli iskolák szervezésében. 1996-ban az intézet alapvető szerepet játszott a 2. Európai Matematikai Kongresszus megszervezésében, 2013-ban Erdős Pál, 2021-ben pedig Rényi Alfréd születésének századik évfordulójáról emlékezett meg (az MTA segítségével) nagyszabású nemzetközi konferencia keretében. 2023-ban pedig a matematika tanítását kutatók gyűltek össze Budapesten, hogy az intézet szervezésében (helyileg az ELTE kampuszán) vitassák meg mintegy 1000 résztvevővel európai szinten a CERME 2023 konferencia (Conference of the European Society for Research in Mathematics Education) keretében legújabb eredményeiket.

Mint számos más európai matematikai intézet, például a Newton Intézet Cambridge-ben, a Mittag-Leffler Intézet Stockholmban, az Henri Poincaré Intézet Párizsban vagy a Schrödinger Intézet Bécsben, a Rényi is ezekkel a rendezvényekkel tud a legmegfelelőbb módon az európai matematikai vérkeringésbe bekapcsolódni. Ezen tevékenységek sikere vezetett az Erdős Központ 2022-es elindításához. A központ keretét ad az intézet kutatói (és valójában a tágabb magyar matematikai kutatóbázis) számára, hogy tematikusan szemesztereket szervezzenek olyan nemzetközileg elismert témákban, amelyek vagy már kiemelkedően sikeresek hazánkban, vagy megerősítést kívánnak a nemzetközi szintén. A remények szerint ezek a félévek lehetőséget adnak arra is, hogy a Budapesten tanuló matematikushallgatók első kézből értesüljenek élvonalbeli kutatási eredményekről. A választott témák felölelik a matematika klasszikus fejezeteit (geometria, topológia, számelmélet, valószínűségszámítás), de nyitnak olyan újabb területek felé is, mint a hálózattudomány és a tervek szerint a mesterséges intelligencia. A speciális félévek mellett nyaranta az Erdős Központ úgynevezett fókuszált heteknek ad otthont: ezek során néhány (tipikusan 10–15) kutató találkozik egy hétre, és valamely téma részleteit, esetleg egy, a szakmai közéletet épp lázban tartó új eredményt tárgyalnak meg kimerítően. Ezen találkozók nemegyszer indítanak útjára új kollaborációkat, és számos tudományos cikk első lépései fogalmazódtak meg ezeken az eseményeken. A központ nemzetközi elismertségét mutatja a 2025-ben elnyert, a Simons Foundation által megítélt támogatás, amely jelentős anyagi segítséget nyújt az elkövetkezendő évek speciális féléveinek szervezésében.

Az intézet számos további területen vesz részt a magyar matematikai közösség életében. Ösztöndíjak rendszerével segíti fiatalok pályakezdését (illetve doktori disszertációjuk befejezését), az egyetemeken kutató kollégáknak pedig egy sabbatical rendszerű vendégkutatói lehetőséget ajánl. Az intézet kutatói biztosítják a magyarországi matematikai folyóiratokban végzett szerkesztői munkák jelentős részét. A *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica* (a Rényi Alfréd által alapított matematikai folyóirat) és az *Acta Mathematica Hungarica* (a Magyar Tudományos Akadémia alapította folyóirat) jelentős részben a Rényi szerkesztésében jelenik meg. A Rényi Intézet a matematikai kutatási eredmények szélesebb körben való megismertetéséből is megpróbálja kivenni a részét. A Bolyai János Matematikai Társulattal közösen kiadott *Érintő* elektronikus folyóirat matematikai eredményeknek a nagyközönség számára is érthető módon való bemutatását célozza, célközönségként az érdeklődő

középiskolásoktól a kutatókig és más tudományágak művelőiiig bővítve a spektrumot. Az intézet szemináriumai természetesen az ország valamennyi matematikusát szívesen látják, néhány szeminárium egyenesen „országos”, fórumot biztosítva egyes témák hazai képviselőinek a rendszeres tudományos eszmecserére. Az egyetemekkel ápolt szoros kapcsolat szintén a kiemelt célok közé tartozik: intézeti kutatók kapcsolódnak be számos egyetemi tanszék munkájába mind óraadóként, mind témavezetőként.

Az intézeti könyvtár számos feladatot lát el, például gondolja az online elérhető oldalak rendszerét, de természetesen elsőrendű feladata a szakkönyvek és szakfolyóiratok kezelése, beszerzése és az olvasók kiszolgálása. Komoly energia és anyagi erő kerül felhasználásra a célból, hogy a könyvtár (a lehetőségekhez mérten) erős szakkönyvtár maradjon, és tartalmazza a szinte követhetetlenül növekvő szakirodalom meghatározó műveit és a legfontosabb szakfolyóiratokat.

A Rényi Intézet tehát 2025-ben fennállásának 75. évfordulóját ünnepli. Bár számos névváltoztatáson ment át e háromnegyed évszázad alatt, a matematika minél magasabb szintű művelése, az eredmények széles körben való ismertetése mindig is az intézeti kutatóközösség legfőbb célja volt és marad. A múlt tiszteletet parancsoló öröksége, a jelen lehetőségeivel ötvözve inspirálja az újabb és újabb matematikusnemeket, remélhetőleg még sokáig.

Irodalomjegyzék

- Pálffy Péter Pál (2007). „ERCOM: Alfréd Rényi Institute, Budapest, Hungary”. *Newsletter of the European Mathematical Society*, 63, 36–37.
<https://www.ems-ph.org/journals/newsletter/pdf/2007-03-63.pdf>
- Stipsicz András (2022). „The Rényi Institute”. *European Mathematical Society Magazine*, 125, 31–33.
<https://doi.org/10.4171/mag/100>
<https://ems.press/journals/mag/articles/7406263>
- Vincze István (1976). „Az MTA Matematikai Kutató Intézetének huszonöt éve”. *Magyar Tudomány*, 83/1, 86–96.
<https://real-j.mtak.hu/131/>

URL1: <https://ematlap.hu/tudomany-tortenet-2021-7/1098-a-regularitasi-lemma>

Mesterséges intelligencia témájú kutatások Magyarországon

Research on Artificial Intelligence in Hungary

Benczúr András¹ – Gyimóthy Tibor² – Szegedy Balázs³

¹ PhD, kutatólabor-vezető, HUN-REN SZTAKI, Budapest; Széchenyi István Egyetem, Győr
benczur@sztaki.hun-ren.hu

² az MTA levelező tagja, professor emeritus, Szegedi Tudományegyetem, Szeged
gyimothy@inf.u-szeged.hu

³ az MTA doktora, kutatóprofesszor, HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet, Budapest
szegedy@renyi.hu

Összefoglalás

A mesterséges intelligencia (MI) az elmúlt időben rendkívül látványos fejlődésnek indult, különösen a gépi tanulás és azon belül a mélytanulás (deep learning) területén, valamint a nagy adatbázisok és a számítási kapacitás robbanásszerű növekedésének köszönhetően. A hazai kutatók korán felismerték az MI jelentőségét, bekapcsolódtak a nemzetközi kutatásokba, és jelentős eredményeket értek el mind elméleti, mind gyakorlati területeken. A cikk a hazai MI-kutatások néhány kiemelkedő eredményét ismerteti. Bemutatja a mélytanulás berobbanása előtti időszak (a 2010-es évek eleje) eredményeit, majd ismerteti a 2010 utáni jelentősebb hazai elméleti kutatásokat. Végezetül rövid áttekintést ad a 2010 utáni, MI-hez kapcsolódó alkalmazásorientált tudományos eredményekről.

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has recently undergone a remarkable development, particularly in the fields of machine learning and deep learning, driven by the explosive growth of large databases and computational capacity. Hungarian researchers recognized the significance of AI early on, actively participated in international research, and achieved significant results in both theoretical and practical domains. This article presents some of the key achievements of Hungarian AI research. It highlights results from the period before the rise of deep learning (the early 2010s), and then discusses major theoretical advances in Hungary after 2010. Finally, it provides a brief overview of AI-related applied scientific achievements since 2010.

Kulcsszavak: mesterséges intelligencia, mélytanulás, hazai kutatások, alkalmazások

Keywords: Artificial Intelligence, deep learning, research in Hungary, applications

1. Bevezetés

A mesterséges intelligencia (MI) évszázadunk első évtizedének közepétől rendkívül látványos fejlődésnek indult a gépi tanulás, különösen a mélytanulás (deep learning), valamint a nagy adatbázisok elterjedésével és a számítási kapacitás robbanásszerű növekedésével. Az interneten keresztül hatalmas mennyiségű adat állt rendelkezésre, és a grafikus processzorok (GPU-k) elősegítették a komplex neurális hálózatok előállí-

tását olyan kiemelkedő jelentőségű alkalmazási területeken, mint a képfelismerés, a természetes nyelvfeldolgozás és az önvezető autók.

Az MI számos hullámon keresztül jutott el a mai szintre, amelyet technológiai előrelépések, kutatási eredmények, finanszírozási ciklusok és a mesterséges intelligenciával kapcsolatos társadalmi elvárások határoztak meg. Az 1950-es években megszületett a Turing-teszt koncepciója, az első egyszerű gépi tanulási kísérletek alapján a kutatók úgy hitték, hogy az MI néhány évtizeden belül megoldhatja a legtöbb emberi problémát. Az elvárások azonban túlzottak voltak, az 1970-es évek közepén az optimizmus kifulladásra került. Az 1980-as években az MI új lendületet kapott a szakértői rendszerek megjelenésével. Ezek azonban kudarcot vallottak, mivel statikusak voltak, nem voltak képesek önállóan tanulni vagy alkalmazkodni új helyzetekhez, költségesek és korlátozottan skálázhatók voltak. Két csalódottsági fázis, úgynevezett AI Winter után jelenleg az MI dinamikusabban fejlődik, de a múlt tanulságai miatt óvatosabb elvárásokkal közelítik meg a technológia lehetőségeit és korlátait.

A hazai kutatók korán felismerték az MI-szakterület jelentőségét. Bekapcsolódtak a nemzetközi kutatásokba, és jelentős eredményeket értek el mind az elméleti, mind pedig a gyakorlati területeken. Ugyanakkor kevés olyan tanulmány született, amelyik áttekinti a hazai MI-kutatásokat. Kivételt jelent Sántáné-Tóth Edit tanulmánya (Sántáné-Tóth 2007a), illetve Dömölki Bálint „A mesterséges intelligencia múltja Magyarországon” címmel megjelent írása (Dömölki). Sántáné-Tóth Edit eredetileg az 1996-ban Budapesten megrendezett „European Conference on Artificial Intelligence” (ECAI’96) alkalmából készített egy összefoglalót a hazai MI-kutatásokról és ipari fejlesztésekről. A hivatkozott tanulmány ennek bővített változata, amely bemutatja, hogy milyen szervezeti keretek között alakult ki a hazai MI-kutatás-fejlesztés, illetve megemlíti az MI legfontosabb hazai kutatási területeit is a kapcsolódó intézményekkel együtt. A tanulmány kiegészítéseként egy bibliográfia is készült a hazai MI-kutatásokról (Sántáné-Tóth 2007b).

Dömölki Bálint informatív tanulmányában a magyar MI-kutatások néhány fontosabb eredményét emeli ki, amelyek egyrészt a Magyarországon folyó számítástudományi fejlesztések fő irányához tartoznak, másrészt nemzetközi jelentőségük is van. A tanulmány hivatkozásai a Neumann János Számítógéptudományi Társaság Informatikatörténeti Adattárában (iTA) összegyűjtött és tárolt eredményekre, tényekre mutatnak, amelyek jól reprezentálják a magyar informatika történetének eseményeit.

Ebben a cikkben a hazai MI-kutatások ismertetésénél konkrét kutatási eredmények rövid bemutatására törekedtünk. Magyarországon már az 1970-es években is folytak az MI területeihez kapcsolódó kutatások, azonban mint mindenütt a világon, nálunk is a mélytanulás előretörésével indult el az MI-kutatások robbanásszerű fejlődése. Ezért döntöttünk úgy, hogy cikkünkben három külön fejezetben részletezzük a hazai MI-kutatásokat. Előbb a mélytanulási eredmények berobbanása előtti időszak (2010-es évek eleje) eredményeit, majd a 2010 utáni jelentősebb hazai elméleti eredményeket mutatjuk be. Végezetül rövid áttekintést adunk a 2010 utáni MI-hez kapcsolódó, alkalmazási jellegű tudományos eredményekről.

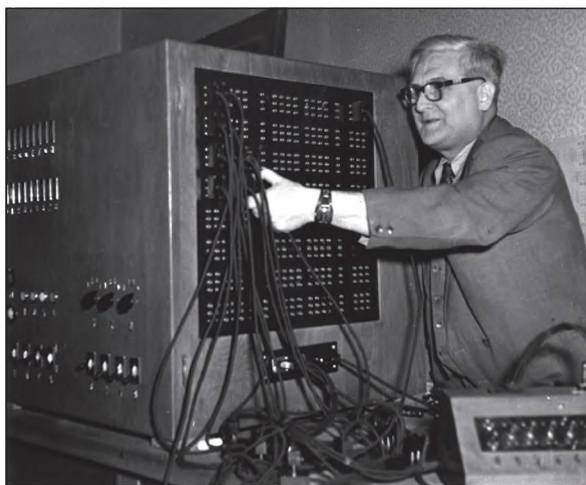
2. Az MI-kutatások múltja Magyarországon

2.1. Kezdetek

John McCarthy amerikai matematikus 1955-ben egy két hónapos nyári szeminárium szervezésére tett javaslatot Dartmouth-ban. A szervezési javaslatban a szeminárium témájaként elsőként használja az „Artificial Intelligence” megnevezést. Sokan ezért ezt a szemináriumot tekintik az MI indulási eseményének. Végül a szemináriumot 1956-ban tartották meg, többek közt Marvin Minsky, Claude Shannon és Ray Solomonoff részvételével. Érdekesség, hogy a szervezők MI-területként az alábbi diszciplínákat jelölték meg: computers, natural language processing, neural networks, theory of computation, abstraction, creativity.

Alig hat évvel a neves esemény után Kalmár László, a Szegedi Tudományegyetem (korábban József Attila Tudományegyetem) professzora „Colloquium on the Foundations of Mathematics, Mathematical Machines and Their Applications” címmel szervezett konferenciát Tihanyban. A rendezvényen a hazai matematikusok mellett többek közt részt vett Alonzo Church, John McCarthy és Yehoshua Bar-Hillel is. A konferenciának mesterséges intelligencia, gépi tanulás szekciója is volt.

Kalmár Lászlót tekinthetjük a hazai MI-kutatások elindítójának. A matematikai logika iránt már az 1920-as években elkezdett érdeklődni, és Péter Rózsával együtt kiváló eredményeket értek el ezen a területen. Az elektronikus számítógépek megjelenésével szinte azonnal felismerte a bennük rejlő lehetőségeket. 1956-ban szemináriumot szervezett a szegedi egyetemen a matematikai logika műszaki alkalmazási lehetőségének feltárására. Ezután Kalmár László tervei alapján Muszka Dániel 1958-ban megépítette a Kalmár-féle logikai gépet (1. ábra), amelynek segítségével az



1. ábra. Kalmár László a Kalmár-féle logikai géppel
Forrás: Tóth Béla felvétele 1958-ból, Szabó Péter Gábor archívuma

ítéletkalkulus logikai formuláiról lehetett eldönteni, hogy azok mikor kielégíthetők. A logikai gép ötletéből kiindulva 1959-ben egy varsói konferencián ismertette egy formulavezérlésű számítógép tervét. Az ilyen számítógép anyanyelve nem alacsony szintű gépi nyelv, hanem egy magasabb szintű programozási nyelv. Kalmár László munkásságáról Szabó Péter Gábor készített kiváló összefoglalót (Szabó 2015).

2.2. Elméleti eredmények

Ebben a fejezetben néhány konkrét eredmény bemutatásával igyekszünk áttekintést adni a 2010 előtti elméleti jellegű hazai MI-kutatásokról. A gépi tanulással kapcsolatos eredmények mellett itt szerepelnek az emberi viselkedéssel és gépi látással kapcsolatos munkák, illetve a korai MI-kutatásokban jelentős szerepet játszó Prolog nyelv hazai fejlesztése is említésre kerül.

Szepesvári Csaba, a SZTAKI munkatársa kollégájával, Kocsis Leventével kidolgozott egy algoritmust (UCT) a Monte Carlo-alapú fakeselési stratégia optimalizálására (Kocsis–Szepesvári 2006). Ennek az algoritmusnak jobbak az elméleti alapjai, mint a korábbi algoritmusoké, és emellett a gyakorlatban is jobban teljesített azoknál. Ennek köszönhetően a módszer alapvető jelentőségű lett a megerősítéses tanulás területén, az UCT-algoritmus nagyon sok kutatás-fejlesztési munka kiindulási pontjává vált. Többek között az algoritmus egyik változatát használta a DeepMind MuZero programja. Ez volt az első olyan program, amely a go játék során erősebbnek bizonyult a legerősebb emberi játékosnál.

Lőrincz András, az ELTE IK Mesterséges Intelligencia Tanszék munkatársa az agyi folyamatok tanulmányozására építette kutatásait. James Chrobakkal és Buzsáki Györggyel együttműködve olyan modellt készítettek, amelyik megmutatta, hogy a humán tanulás egyik fontos eleme lehet a nagy mennyiségű szenzoros információból rejtett, közel független összetevők és közel önálló folyamatok azonosítása (Chrobak et al. 2000). Szita Istvánnal publikált cikkükben megmutatták, hogy a komponenseken alapuló megközelítések a megerősítéses tanulásba (ahol a gépek úgy tanulnak, hogy bár késleltetve, de jutalmat vagy büntetést kapnak a válaszsorozatok eredményeképpen) is belefoglalhatók, és jelentősen lerövidíthetik a tanulási időt (Szita–Lőrincz 2009).

Vicsek Tamás, az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének vezetője munkatársaival kevés paraméterrel modellezhető emberi viselkedéseket vizsgált. Ilyen eset például, amikor sok ember pánikszerűen menekül egy szobából. A *Nature* folyóiratban 2000-ben megjelent cikkükben (Helbing et al. 2000) megmutatták, hogy pánik során sok ember viselkedését (mozgását) 4-5 paramétert tartalmazó egyenletrendszerrel valószínűen lehet számítógéppel szimulálni, és az eredményekből hasznos következtetések vonhatók le.

A SZTAKI-ban a Roska Tamás vezette kutatócsoportnak nemzetközileg is vezető szerepe volt a celluláris neurális hálózat (CNN) kutatásában (Roska–Chua 1993; Chua–Roska 1993). A matematikai háttér, a fizikai modellek, valamint a biológiai

analógiák közel hozták az alapszintű mesterséges látás és a biológiai modellek kapcsolatát. E célra speciális analóg három-, illetve négyrétegű neurális hálókra alapuló csipek is készültek 16×16 , illetve jobb felbontással. Az új diszciplína ígéretesnek bizonyult, és serkentőleg hatott a gépi és az emberi látás modellezésében és a közöttük lévő kapcsolat kutatásában. Ez a kutatás elhalványult, amikor megjelentek a mélytanuló hálózatok és az azokat támogató nagy összekötöttségű (D-CNN), részben a grafikus processzorok technológiájára épülő csipek. A régi CNN-technológia egyes eredményeit pedig alkalmazni kezdték speciális képfeldolgozó hardverekben, textúradetekcióban, gyors felismerő rendszerekben (Szirányi–Csicsvári 1993).

Csuhaj Varjú Erzsébet, az ELTE Algoritmusok és Alkalmazásai Tanszék kutatója egyik elindítója és kiépítője volt a grammatikarendszerek elméletének, amely alkalmassá tette a formális nyelvek és automaták eszköztárát a multiágens rendszerek szintaktikai modellezésére (Csuhaj Varjú et al. 1994). A tárgykört és annak egyik részterületét elindító dolgozatában definiálta a táblaarchitektúra-alapú problémamegoldó rendszer formális nyelvi modelljét kooperáló osztott grammatikarendszer néven, ahol a problémamegoldó ágenseket együttműködő formális nyelvtanok, a probléma megoldását formális nyelvek reprezentálták (Csuhaj Varjú–Dassow 1990).

Szeredi Péter, a Számítástechnikai Kutató és Innovációs Központ (SZKI) munkatársa, majd pedig később a BME kutatója, 1975-ben a világon másodikként készített el Prolog interpretert, aminek köszönhetően számos kísérleti Prolog-alkalmazás született Magyarországon az 1970–1980-as években. 1978–1987 között az MPROLOG-rendszer fejlesztésének volt a szakmai vezetője – ez volt az egyik első olyan magyar szoftvertermék, amelyet főleg külföldön forgalmaztak. 1987 és 1990 között az Egyesült Királyságban dolgozott David H. D. Warren csoportjában, ahol multiprocesszoros Prolog implementációk fejlesztésével foglalkozott (Calderwood–Szeredi 1989).

Az MTA–SZTE Mesterséges Intelligencia Kutatócsoport (RGAI) 1996-ban alakult meg Szegeden Csirik János vezetésével. Kutatásaiknak jelentős lendületet adott, hogy az 1990-es években csatlakozhattak egy nagy nemzetközi gépi tanulási kutatási projekthez (Inductive Logic Programming). Turán György, az RGAi kutatócsoport munkatársa a számítógépes tanulás elméletével és kapcsolódó bonyolultságelméleti kérdésekkel foglalkozott. A neuronhálózatok diszkrét változatára, a küszöbüggyvény-hálózatokra Hajnal Andrással, Wolfgang Maass-szal, Pavel Pudlákkel és Szegedy Márióval exponenciális alsó becslést adtak 2-mélységű, polinomiális súlyú hálózatok bonyolultságára (Hajnal et al. 1993). Ennek az eredménynek a kiterjesztése tetszőleges súlyokra, illetve legalább 3-mélységű hálózatokra jelenleg is megoldatlan probléma. Számos interaktív tanulási modellt vizsgáltak, például Dana Angluinnal, Martins Krikisszel és Robert Sloannal. Azokra az esetekre adtak tanuló algoritmusokat, ahol a kérdésekre adott válaszok hiányosak vagy hibásak is lehetnek (Angluin et al. 1997).

Jelasity Márk az RGAi, majd a Szegedi Tudományegyetem dolgozójaként a sok lokális optimummal rendelkező függvények optimalizálása területén ért el jelentős

eredményt. Szerzőtársával olyan genetikus algoritmust javasolt, amely a fajok keletkezésének modellezése alapján több, hierarchikusan strukturált lokális populációt hozott létre dinamikusan, amelyek egy-egy lokális optimumba konvergáltak (Jelasity–Dombi 1998). Későbbi munkájában kollégáival pletykaalgoritmusokon dolgoztak, ahol nagyszámú ágens véletlenszerű kommunikációja segítségével valósítottak meg gépi tanulási algoritmusokat (Ormandi et al. 2013).

Dombi József az RGAI, majd a Szegedi Tudományegyetem munkatársaként folytonos logikák műveleteinek kutatása területén ért el jelentős eredményeket. Megalkotott egy fuzzy operátor családot, amelynek komoly nemzetközi visszhangja volt, több kutató használta munkájában (Dombi 1982; Dombi 2008).

Gyimóthy Tibor az RGAI kutatójaként azt vizsgálta, hogy a szoftverfejlesztés területén kifejlesztett algoritmikus nyomkövető módszerek hogyan alkalmazhatók logikai programok tanulására. Kidolgoztak egy olyan eljárást, amely negatív példák felhasználásával bizonyos esetekre egy általános logikai programból képes előállítani egy adott feladat megoldására alkalmas programot (Alexin et al. 2003).

A komputeralgebrai, komputer-számelméleti kutatások az 1980-as években kezdődtek a Kossuth Lajos Tudományegyetemen Debrecenben. Bár ezeket nem szokás az MI-hez sorolni, a formális matematikai átalakítások végrehajtása komoly intellektuális eredmény, és ebben a számítógép ma már sokkal eredményesebb, mint a gyakorló matematikus. Pethő Attila diofantikus egyenletek megoldására dolgozott ki algoritmusokat, legjelentősebb eredménye az elliptikus görbékre illeszkedő egész (Gebel et al. 1994) és S-egész pontok (Pethő et al. 1999) meghatározására vonatkozik.

Gergely Tamás, az Alkalmazott Logikai Laboratórium munkatársa kiemelkedő eredményeket ért el az elméleti számítástudomány megalapozása területén (Gergely 1971; Andréka et al. 1975). Egy matematikai alapokra épülő egységes számítástudomány létrehozásával foglalkozott, kidolgozva egy konstruktív programozásméletet hatékony specifikációs eszközökkel és módszertannal. Eszközt adott programozási logikák egységes logikai megalapozására; a szoftverfejlesztés területén kidolgozott egy egységes konstruktív logikai keretet a programok jelentésének egzakt meghatározására és verifikálására.

Vámos Tibor, a SZTAKI alapítója meghatározó szerepet töltött be a hazai MI-kutatások megalapozásában. Eredményeket ért el a számítógépes alakfelismerés (Vámos 1977), illetve robotika (Siegler–Vámos 1981) területén. Fő kutatási területe az episztemológia, azaz a megismerés tudománya volt, amely a valóság és az agyunkban róla keletkező kép elválasztásának kérdéseit vizsgálja (Vámos 1991).

Kóczy László, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Távközlési és Mesterséges Intelligencia Tanszék (BME TMIT) kutatója az 1970-es évek első felében kezdett fuzzy témában publikálni, és hamarosan kapcsolatba került az akkoriban a világ élvonalába tartozó fuzzy kutatókkal. Az 1980-as évektől kezdődően számos publikációja jelent meg Hirota Kaorual, először a digitális elemi tárolók fuzzy általánosításairól (Kóczy–Hirota 1993a), majd teljesen új ötletként, a fuzzy szabályalapú rendszerekben alkalmazható interpolációs algoritmusokról (Kóczy–Hirota 1993b).

2.3. Alkalmazások

Az MI technológiai alkalmazási lehetőségei nagyon korán felkeltették a hazai kutatóközösségek érdeklődését. Számos nemzetközileg is jelentős eredmény született a beszédtechnológia, természetes nyelvi feldolgozás, alakfelismerés, gyártástudomány, intelligens mérőműszerek, robotika területén. Néhányat ismertetünk ezekből az eredményekből. A BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszékén Gordos Géza vezetésével már az 1970-es években létrejött egy beszédkutatói csapat, azóta is eredményesen működve ezen a területen. Fő eredményük a magyar nyelvű gépi beszédkeltés- és beszédfelismerés-technológia több generációjának kidolgozása és gyakorlati alkalmazások megvalósítása (Németh–Olaszy 2010). Legfontosabb korai alkalmazásai a MultiVox formáns szintézisen alapuló szövegfelolvasó család 12 nyelven, illetve a ProfiVoxDiád elemösszefűzésen alapuló gépi szövegfelolvasó rendszer változatai (Olaszy et al. 2000). Az utóbbit integrálták a Jaws for Windows képernyő-felolvasó programba, amely a mai napig a legelterjedtebben használt program hazánkban látássérült emberek számára. A ProfiVox-Korpusz elemkiválasztásos technológia működik a MÁV hangos utastájékoztatójában számos állomáson.

A SZTAKI munkatársai korán felismerték, hogy az MI alkalmazása milyen lehetőségeket jelent a gyártástudomány és -technológia területén. „Efficient use of deficient knowledge” – írta Hatvany József, aki a sokszínű, töredékes, akár ellentmondásos mérnöki tudás megragadásának és hasznosításának eszköztárát látta meg benne, amit Márkus Andrással együtt majd négy évtizede szisztematikusan fel is mérték (Márkus–Hatvany 1987). Hazai kutatók nevéhez fűződik a genetikai algoritmusok egyik első műszaki alkalmazása, amelyben egy ma ontológiának nevezett módszerrel írták le a technológiatervezés fogalmi rendszerét (Váncza–Márkus 1991). Hasonlóan, a SZTAKI kutatója javasolta elsőik között nemzetközi szinten mesterséges neurális hálózatok alkalmazását megmunkálási folyamatok modellezésére és felügyeletére (Monostori 1993). Monostori László 1991-ben megszervezte Budapesten az első „IMS ’91 – Learning in Intelligent Manufacturing Systems” című nemzetközi konferenciát, majd munkatársaival összegezte, hogy az akkori gépi tanulási módszerek hol és miként szolgálhatják a gyártással kapcsolatos műszaki problémák megoldását (Monostori et al. 1996). A későbbiekben úttörő szerepe volt az ágensalapú módszerek bevezetésében (Monostori et al. 2006; Csáji et al. 2006).

A BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszékének dolgozói már az 1980-as évek közepétől intenzív kutatás-fejlesztési tevékenységet végeztek az intelligens (mérő)rendszerek területén (Papp et al. 1988; Sztipanovits 1989). Megalkották a valós idejű alkalmazásokhoz illeszkedő LISP nyelvet, és ezen a bázison a valós idejű szakértő keretrendszert, amelyet sikerrel használtak számos ipari alkalmazásban (Papp et al. 1989). Kutatásaik természetes módon egyre szélesebb területre terjedtek ki, például többágenses rendszerekre (Mészáros–Dobrowiecki 1997), ember–gép kapcsolatra, továbbá a tudásábrázolás és tudásfúzió különböző formáira (Várkonyi-Kóczy et al. 1998). A 2000-es évektől Horváth Gábor vezetésével megerősöd-

tek a tanszéken a neurális kutatások. Komplex fizikai rendszerek modellezésére (Valyon–Horváth 2001) és az azokra alapozó orvosi döntéstámogatás képi diagnosztikájára születtek eredmények (Horváth et al. 2004). Ezzel párhuzamosan foglalkoztak ontológiaalapú természetes nyelvi elemzési problémákkal is (Varga et al. 2003).

A BME Automatizálási és Alkalmazott Informatika Tanszék kutatói a modellalapú kódgenerálás, valamint a domainspecifikus modellezéssel és metamodellezéssel kapcsolatos területeken érték el eredményeket (Lengyel et al. 2006; Forstner et al. 2006). A technológia lehetővé tette, hogy komplex szoftveres feladatokat egyszerűsített nyelven és metamodellek szintjén lehessen definiálni, és a komplex kód generálását az intelligens algoritmusok képesek voltak megoldani a betanított minták alapján. Peer-to-peer (P2P) intelligens algoritmusokat fejlesztettek hálózati protokollok megvalósíthatóságára mobil környezetben (Forstner et al. 2005; Ekler et al. 2009). A tanszék jellegzetessége, hogy az informatika mellett villamosmérnöki területekkel is foglalkozik, ahol többek között az intelligens robotvezérlés is a kutatási területek közé tartozik. Intelligens autonóm robot kutatásában vett részt a kutatócsoport, többek között automata navigációs megoldások fejlesztése és újrachasznosító robotok fejlesztése területén érték el eredményeket (Kiss et al. 2008a; Kiss et al. 2008b).

A MorphoLogic Kft.-ben Prószéky Gábor vezetésével alapvető eredmények születtek a hazai nyelvtechnológia területén. A legelső eredmény a magyar nyelvhez 1991-ben elkészített HUMOR (High-speed Unification Based Morphology) morfológiai elemző program és a hozzá tartozó leíró formanyelv volt (Prószéky 1995). Kidolgozták a „Helyes-e?” helyesírás-ellenőrző módszert, amely a szavak értelmezését a formális morfológiai elemzés alapján végzi (Prószéky 2000). A választékos fogalmazás támogatására a MorphoLogic Kft. munkatársai létrehozta egy toldalékoló szinonimaszótárt, a „Helyette” rendszert (Prószéky–Tihanyi 1993). Ez három, nyelvi szempontból fontos funkciót valósít meg: felismeri a forrás szóalak szótári tövét, megkeresi a forrásszó jelentésköreit és az azokhoz tartozó szinonimákat; majd visszaírja a szövegbe a kiválasztott szinonima megfelelő alakját. A „Helyette” a megjelenésekor gyakorlatilag az első és egy ideig az egyetlen olyan programrendszer volt a világon, amelyik ezen a módon működött.

Az MTA Nyelvtudományi Intézetben Váradi Tamás vezetésével kiemelkedő eredmények születtek a magyar nyelvtechnológia területén. 1997-ben megalapította a Korpusznyelvészeti Osztályt, ahol vezetésével elkészült a Magyar Nemzeti Szövegtár (Oravecz et al. 2014). Az intézet munkatársai jelentős eredményeket értek el a gépi fordítás (Senellart et al. 2003) és párhuzamoskorpusz-építés (Váradi–Kiss 2001) területén is.

A Debreceni Egyetemen Papp Ferenc vezetésével már az 1960-as évektől folytak kutatások a számítógépes nyelvészet területén. Az amerikai Brown Corpus után elsőként hozta létre egy nyelv (a magyar) számítógépes szótárát (Papp 1969), de azt jóval túlszárnyalva olyan grammatikai információk nyújtásával, amelyekre későbbi

számítógépes alkalmazásokban lehetett támaszkodni. Tanítványai és ez utóbbiak munkatársai a számítógépes nyelvészetet a generatív nyelvészettel ötvözve vizsgálták a nyelvi rekurzió megjelenését a kognícióban (Hunyadi 2006).

Az MTA–SZTE Mesterséges Intelligencia Kutatócsoportban a gépi tanulási kutatások mellett jelentős eredmények születtek az MI alkalmazásainak területein is. Tóth László, a kutatócsoport munkatársa a beszédfelismerés területén dolgozott. Kocsor Andrással kifejlesztették a BeszédMester beszédterápiás és olvasást segítő programot kisiskolások számára (Kocsor–Tóth 2004). Neuronhálós módszereket fejlesztettek beszédfelismerésre szegmensalapú hibrid modellekben (Tóth–Kocsor 2007) és tandem rendszerekben (Tóth et al. 2008). Csirik János szerzőtársával az alakfelismerés területén ért el jelentős eredményeket. A futáshosszkódolás egy tömörítési eljárás, amellyel egy karaktersorozatban a hosszasan ismétlődő karaktereket egyetlen értékként és számként tárolják az eredeti teljes karaktersorozat helyett. A szerzők hatékony módszert dolgoztak ki a futáshosszkóddal megadott karaktersorozatok távolságának meghatározására (Bunke–Csirik 1995a). Egy másik cikkükben a szerkesztési távolság olyan általánosításával foglalkoztak, amelyben a törlés és beszúrás költsége egy konstans, a csere költsége pedig egy paraméter. Hatékony algoritmust adtak a szerkesztési távolság meghatározására (Bunke–Csirik 1995b). Gyimóthy Tibor munkatársaival gépi tanulási módszerekkel valódi szoftverrendszerekre igazolták, hogy egyszerűen számítható szoftvermetrikák segítségével jól lehet becsülni a programkódok minőségét (Gyimóthy et al. 2005). A kutatócsoport munkatársai létrehozták az 1,2 millió szavas annotált magyar nyelvi korpuszt (Szeged Korpusz), amelynek meghatározó szerepe volt a hazai számítógépes nyelvészeti kutatásokban (Alexin et al. 1996). Ugyancsak a kutatócsoport munkatársai indították el 2003-ban a „Magyar Számítógépes Nyelvészeti Konferenciát”, amely azóta minden évben a hazai nyelvészeti kutatási eredmények ismertetésének jelentős fóruma.

3. Modern elméleti MI-kutatások Magyarországon

A mesterséges intelligencia nagyon általános és nehezen körülhatárolható fogalom, amely magában foglalja a gépi tanulást, ezen belül pedig a mélytanulást, amely manapság különösen nagy figyelmet kap. Tágabb nézőpontból azonban minden matematikai módszer, amelynek célja adathalmazokban és struktúrákban mintázatok, összefüggések keresése, illetve hiányzó információk jóslása, az MI részének tekinthető. Ez magyarázza, hogy az MI elméleti alapjai között fontos szerepet kap a statisztika, a valószínűségszámítás és kevésbé ismert módon a statisztikus fizika is. Egy másik lényeges elméleti pillér a többváltozós optimalizáció, amely az MI-modellek tanításához kapcsolódik. A mélytanulásra épülő algoritmusok elterjedésével pedig egyre fontosabbá váltak azok a kutatások is, amelyek ezen modellek magyarázhatóságát, sebezhetőségét és általában véve működésüket vizsgálják. Mindezen kutatási irányok közül itt különösen a magyar vonatkozásokat emeljük ki. A 2010-es

években számos (részben váratlan) áttörés történt a mélytanulás területén, amelyek az MI-forradalom első jeleinek tekinthetők. Ennek az időszaknak az elejére tehető, hogy a mélytanulás keretrendszerében számos lényeges elem letisztult, mint például az aktivációs függvények jelentősége, illetve a regularizációs és optimalizációs módszerek különböző típusai. Az MI-forradalom számos nagy áttörésének magyar vonatkozása is van. Ezek részben magyar származású kutatók által külföldön elért eredmények, részben pedig hazai kutatások eredményei.

2013-ban Szegedy Krisztián és szerzőtársai megmutatták, hogy a mély neurális hálózatok átverhetők (Szegedy et al. 2014). Példájukban vizuálisan észrevehetetlen módon tudtak perturbálni képeket úgy, hogy egy adott modell azokat látványosan rosszul ismerje fel. Ez a cikk egy teljes kutatási területet alapozott meg, amely a neurális hálózatok sebezhetőségével foglalkozik, és ezért elnyerte az ICLR 2024 Test of Time díjat is. A témakör kutatása hazai intézményekben is folytatódott.

A Szegedi Tudományegyetemen Jelasity Márk és szerzőtársai több meglepő eredményt publikáltak. Az egyik ilyen cikkben (Megyeri et al. 2020) megmutatták, hogy több különböző modell egyszerre is átverhető ugyanazzal a perturbációval egy adott képlista esetén, ráadásul a tévedés típusát is irányítani tudták. Később (Halmosi et al. 2024) pedig a különböző támadások elleni robusztusság témáját is megvizsgálták.

A Pázmány Péter Katolikus Egyetemen Horváth András és Józsa Csaba a Neural Radiance Fields (NeRFs) módszer elleni lehetséges támadásokat vizsgálták (Horváth–Józsa 2023). Ez a módszer kétdimenziós képekből képes háromdimenziós reprezentációt létrehozni, amelyet a robotikában és a kiterjesztett valóságban is alkalmaznak. A Google DeepMind által kifejlesztett AlphaGo sikertörténetének is több magyar vonatkozása van. Ez a program 2015-ben elsőként győzött le profi gójátékost, és ezzel a váratlan eredménnyel a témában laikusok figyelmét is az MI-technológiára irányította. Az AlphaGo hatékonysága két fontos pilléren nyugszik. Az első a Monte Carlo-fakeresési (Monte Carlo Tree Search, MCTS) módszer finomítása, amely a már korábban említett Kocsis Levente (SZTAKI) és Szepesvári Csaba által jegyzett híres „Bandit Based Monte-Carlo Planning” című cikkekre épül. A másik alappillére a mély vizuális, konvolúciós hálózatok tanításának fejlődése, amelyben fontos szerepet játszik a Szegedy Krisztián által kidolgozott batch normalization módszer (Ioffe–Szegedy 2015). Az AlphaGo sikere látványosan illusztrálja a megerősítéses tanulási módszerek (Reinforcement Learning, RL) hatékonyságát. Nem véletlen, hogy ez a témakör is hatalmas fejlődésen ment keresztül viszonylag rövid idő alatt.

A magyar kutatók közül még kiemelkednek Neu Gergely eredményei az RL területén (Neu–Szepesvári 2007), amelyek a téma elméleti alapjaihoz járulnak hozzá. A 2010-ben elindult MI-forradalom számos izgalmas fordulatot és paradigmaváltást hozott. Az egyik ilyen meglepő eredmény, hogy a túlparametrizált hálózatok mégsem hajlamosak a túltanulásra, ahogy azt korábban feltételezték. Ez az észrevétel rengeteg új kutatást inspirált. Egy sokat hivatkozott cikkben (Du et al. 2019) Póczos Barnabás és szerzőtársai bebizonyították, hogy az ilyen hálózatokon a gradient descent algo-

ritmus az optimumhoz konvergál. Szintén részben Póczos Barnabás nevéhez köthető az MMD-GAN modellek megalkotása (Li et al. 2017), amelyek ötvözik a GMMN-ek (Generative Moment Matching Network) és a GAN-ok (Generative Adversarial Network) előnyeit. A túlparametrizált hálózatok hatékonysága is motiválja azt az elméleti kutatási irányt, amelyben növekvő neurális hálózatok határértékét vizsgálják annak reményében, hogy a limeszben letisztultabb modellt kaphassunk. Ennek a gondolatnak több megvalósulása is van.

Az egyik ilyen, amely a gráfalapú neurális hálózatok (GNN) limeszét vizsgálja, közvetlenül épít a sűrű gráfok limeszelméletére, amit Christian Borgs, Jennifer Chayes, Lovász László, T. Sós Vera, Szegedy Balázs, Vesztergombi Katalin (Borgs et al. 2006) indított el, illetve a Backhausz Ágnes és Szegedy Balázs által kidolgozott action convergence általános limeszelméletre. A mesterséges intelligencia matematikai alapjainak tisztázásához minden olyan állítás hozzájárul, amely a mélytanulás robusztusságát igazolja. A Rényi Intézetben Csiszárík Adrián, Kőrösi-Szabó Péter, Matszangosz Ákos, Papp Gergely és Varga Dániel olyan módszertant dolgozott ki (Csiszárík et al. 2021), amellyel különböző betanított modellek belső reprezentációinak az inicializálástól való függetlenségét tudták vizsgálni, és jelentős robusztussági tulajdonságokat fedeztek fel. A neurális hálózatok döntéshozatali folyamata gyakran nehezen érthető és követhető még a fejlesztők számára is. Ezt hívják fekete doboz tulajdonságnak. Az interpretálhatóság kérdése az, hogy milyen mértékben lehet értelmezni és megmagyarázni a hálózat által hozott döntéseket vagy előrejelzéseket. Ebben a témában ért el fontos eredményeket az SZTE kutatója, Turán György, aki többféle kontextusban is vizsgálta az interpretálhatóság kérdését. Az egyik ilyen ígéretes irány a mélytanulás segítségével generált hibajavító kódok interpretálhatósága (Devroye et al. 2022).

A gépi tanulás matematikai alapjainak kutatásában az egyik fő terület a statisztikai tanuláselmélet. Idetartozik a gépi tanulásban és rendszer-azonosításban fellépő sztochasztikus modellek valószínűségelméleti és statisztikai vizsgálata. Ennek a témának a hazai szakértője Csáji Balázs (SZTAKI), aki a kernelmódszerek és a konfidenciatartományok vizsgálatában is kiemelkedő eredményeket ért el (Csáji et al. 2015; Csáji–Kis 2019). Fontosnak tartjuk megemlíteni, hogy van több jelenleg előkészületben lévő, illetve nemrég kezdődött nagyobb interdiszciplináris kutatási projekt is, amelyek a mesterséges intelligencia új megközelítéseit, illetve felhasználásait keresik. Az egyik ilyen projekt a DYNASNET ERC szinergiaprogram keretében zajlik a Rényi Intézetben, amelynek koordinátorai Barabási Albert-László, Lovász László és Jaroslav Nešetřil. E kutatás célja, hogy a hálózatelmélet eredményeit közelebb hozza a neurális hálózatok világához (Pósfai et al. 2024). Egy másik, Barabási Albert-László nevéhez köthető irány a táplálkozástudomány szilárdabb alapokra helyezését célozza meg gépi tanulás segítségével.

4. Modern MI-alkalmazások

Az MI már kiforrott, klasszikus területének számítanak az ajánló rendszerek. Ezen a területen hazánkat a Tikk Domonkos vezette csapat tette világhíressé, amely a Netflix versenyén hajszállal maradt le az egymillió dolláros fődíjról (Takács et al. 2009). Hozzájuk fűződik a rekurrens neuronháló alapú ajánlórendszerek (Hidasi et al. 2015) vizsgálata, amellyel új kutatási területet nyitottak. Hasonlóképpen klasszikus és hazánkban nagyon erős terület a hálózatok elemzése (Pósfai et al. 2024). A hálózatkutatás legújabb trendje a vektortér-beágyazások alkalmazása (Rozemberczki et al. 2021), amelyeket olyan teljesen eltérő területeken alkalmazunk, mint a közösségi médiában az oltásokkal kapcsolatos vélemények terjedése (Béres et al. 2023) vagy a kriptopénzek anonimitásvizsgálata (Béres et al. 2021). A nyelvtechnológia területén fontos eredményeket értek el a Nyelvtudományi Intézet munkatársai (Ligeti-Nagy et al. 2024), valamint Kornai András csoportja (Acs et al. 2023). A Társadalomtudományi Kutatóközpontban fontos kapcsolódó kutatási terület a politikai szövegek elemzése (Sebők-Kacsuk 2021). A gépi látás területén belül erős a hazai geometriai modellezéssel (Baráth–Matas 2021), pontfelhő alapú követéssel (Nagy et al. 2021) kapcsolatos iskola és az alkalmazott kutatások (Szemenyei–Estivill-Castro 2022). Az autonóm közlekedés alkalmazásaiban a gépi látás (Zsedrovits et al. 2016) mellett a megerősítéses tanulás (reinforcement learning) (Antal et al. 2023) is kiemelt szerepet kap.

Az egészségügy területén mind a képalkotó diagnosztikában (Ribli et al. 2018), mind az elektronikus egészségadatok, laboreredmények vizsgálatában (Juhász et al. 2024) több hazai orvosi egyetem (Paragh et al. 2018) és klinika partner. Új irány az öregedéskutatás genetikusok (Vellai Tibor), orvosok és bioinformatikusok (Kerepesi Csaba) vezetésével (Kerepesi et al. 2018). Megerősítéses tanulást használva sikerült automatizált összejtyártó platform irányítási rendszerét optimalizálni (Egri et al. 2020), valamint a gyógyszergyártás támogatására gépi látást alkalmazni (Nagy et al. 2023). Fontos kutatási terület a fordított irány, a biológiai neuronhálózatok viselkedésének vizsgálata, amellyel nemzetközi hírű agykutatóink foglalkoznak (Hegedüs et al. 2023).

A gyártás, robotika, ipar 4.0 területén kiemelkedő a Monostori László nevével fémjelzett iskola (Gao et al. 2024). Kutatásaik legfontosabb partnerei a hazai gyártó nagyvállalatok: az Audi, a Bosch (Mándli et al. 2017), az Opel (Viharos et al. 2021) és a Knorr-Bremse. A BME-n gépi látás (Geier et al. 2022; Shaheen et al. 2023) és a mért adatok modellezése (Fóthi et al. 2024) segítségével precíziós gyártási feladatokra született megoldás (Adizue et al. 2023). Az Eötvös Loránd Tudományegyetemnek a Bosch által alapított tanszékén többek között ember–gép együttműködéssel kapcsolatos kutatásokat folytat Lőrincz András csoportja (Fóthi et al. 2024).

Az MI távközlési alkalmazásaival kapcsolatos kutatásokat a budapesti Ericsson (Kelen et al. 2023) és Nokia (Horváth et al. 2023) fejlesztőközpontok vezetésével végezzük. A következő, 5G utáni mobilhálózatok architektúrájának központi komponense lesz az MI-megoldások támogatása, amelynek kutatásába bekapcsolódunk (Merluzzi et al. 2023).

Az adatok elemzése, modellezése, előrejelzése, magyarázatok, okok keresése megjelenik az energiahálózatok, megújulóenergia-termelés (Csáji et al. 2020), épületek (Kurent et al. 2024) és földszerkezetek (Li et al. 2022), az agrárium (Kovács 2021) és az oktatás (Berezvai et al. 2021) területein is.

Irodalomjegyzék

A teljes irodalomjegyzék terjedelmi okok miatt külső mellékletben tekinthető meg:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14917762>

TERÜLETI BIZOTTSÁGOK

Pannonia Superior meghódítása

A Veszprémi Akadémiai Bizottság mint a régiós együttműködés zászlóshajója

Conquering Pannonia Superior

The Veszprém Academic Committee as a Flagship of Regional Cooperation

Gelencsér András

az MTA levelező tagja, az MTA Veszprémi Területi Bizottság elnöke, MTA Veszprémi Területi Bizottság, Veszprém;
Pannon Egyetem Mérnöki Kar, Veszprém
gelencser.andras@mk.uni-pannon.hu

Összefoglalás

A Magyar Tudományos Akadémia Veszprémi Területi Bizottsága (VEAB) 1972-ben harmadikként jött létre a területi bizottságok sorában, az ország a tudomány szempontjából módfelett hátrányos helyzetű régiójában. A középvárosokból álló térség tudományegyetem híján csak néhány szakegyetemet és kutatóintézetet tudott felmutatni, a műszaki és agrártudományokra szorító portfólióval. Ugyanakkor az alapítás idején az ébredező nemzetközi turizmus figyelmének középpontjába került, értékes természeti környezettel megáldott térségben már tagadhatatlanul jelentkeztek a felelőtlenül erőltetett iparosítás következményei, amelyek beavatkozásért kiáltottak. Mivel abban a korszakban a politikai döntéshozók még a valóságban kerestek működő megoldásokat, természetesen adódott, hogy ehhez a magyar tudomány értékeinek legfőbb letéteményesétől, a Magyar Tudományos Akadémiától kértek és kaptak segítséget. Így jött létre az egyre súlyosbodó problémák megoldására a tudomány és a politika között a nemzeti együttműködés rendszere, a VEAB, amely korát megelőzve elsősorban a környezetvédelem területén demonstrálta az intézményeken és tudományterületeken átívelő (multidiszciplináris) összefogás előnyeit. A modell olyannyira sikeresnek bizonyult, hogy az MTA elnöksége néhány évvel később a területi bizottságok feladatait a VEAB mintájára alakította át. Napjaink történéseinek fényében különösen tanulságos és több mint elgondolkodtató a VEAB múltjában tett időutazás.

Abstract

Established in 1972, the Veszprém Academic Committee (VEAB) of the Hungarian Academy of Sciences was the third regional committee in the country, located in a region that was particularly disadvantaged in terms of science. Northwest Transdanubia was a region of medium-sized towns with no university of science and had only a few universities and research institutes, whose portfolio was limited to technical and agricultural sciences. On the other hand, the landscape was rich in natural beauties, which were already the focus of domestic and international tourism, and at the time of the Committee's foundation, it was showing undeniable signs of deterioration as a result of extensive industrial and mining activities, which called for intervention. As the political decision-makers at that time were still looking for practical solutions, it was only natural that they should seek and receive help from the Hungarian Academy of Sciences, the main guardian of the values of Hungarian science. This is how the system of national cooperation between science and politics, the VEAB, came into being. Ahead of its time, this act demonstrated the benefits of cross-institutional and cross-disciplinary cooperation, especially in the field of environmental protection. The model proved so successful that a few years later, the Academy's Governing Board reorganized the tasks of the regional committees along the lines of the VEAB. In the light of current events, a journey through the VEAB's past is particularly instructive and more than thought-provoking.

Kulcsszavak: Veszprémi Akadémiai Bizottság, alapítás, környezetvédelem és regionális fejlesztés, tudományos tanácsadás, nemzeti együttműködés

Keywords: Veszprém Academic Committee, foundation, environmental and regional development, scientific consulting, national cooperation

Az MTA területi bizottságainak születéséről a *Magyar Tudomány* bicentenáriumi sorozatának első számában megjelent bevezető tanulmányom (Gelencsér 2025) folytatásaként ezúttal a Balatontól északra eső nagyrégió (Pannonia Superior) akadémiai meghódításának történetében kalandozunk. A kiindulópont a Magyar Tudományos Akadémia Elnökségének 1961. március 3-án kelt 136/1961. számú határozatának egyik mondata, amely további vidéki akadémiai bizottságok alapításának szándékára utal: „Az országban folyó tudományos munka, valamint a jobb központi irányítás és ellenőrzés elősegítése érdekében kívánatos, hogy egyes vidéki egyetemi városokban (elsősorban Szeged, Debrecen és Pécs, későbbi időpontban esetleg Sopron, Miskolc) akadémiai bizottságok létesüljenek.”

A szövegrészlet belső ellentmondása, hogy *egyetemi* városokat nevesít, miközben Sopronban 1961-ben *de jure* nem létezett egyetem (a nagy múltú selmecbányai Bányászati és Erdészeti Akadémia 1919-ben Sopronba települt utódintézménye 1952 és 1962 között önálló Erdőmérnöki Főiskolaként működött). Ahhoz, hogy megkíséreljük kinyomozni, hogyan lett Sopron helyett Veszprém az akadémiai bizottság székhelye, először a régió akkori felsőoktatási és kutatóintézet-hálózati térképét kell felrajzolnunk. Észak-Dunántúlon 1961-ben mindössze két egyetem működött, Veszprémben az 1949-ben alapított Veszprémi Vegyipari Egyetem, valamint az 1945-ben a „népi hatalom első egyeteme”-ként Gödöllő székhellyel központosított Agrártudományi Egyetemnek (nincs új a nap alatt!) egy-egy, akkoriban „osztály”-nak nevezett szervezeti egysége Keszthelyen és Mosonmagyaróváron (Szabó 1993). Emellett mindössze két főiskola volt a régióban az 1960-as évek elején, az Erdőmérnöki Főiskola mellett az 1958-tól létező Felsőfokú Tanítóképző Szombathelyen. Győrről a Közlekedési és Távközlési Műszaki Főiskola, Dunaújvárosban a miskolci egyetem főiskolai kara, Zalaegerszezen a Pénzügyi és Számviteli Főiskola kihelyezett tagozata csak az 1960-as évek végén létesült.

A térségben az 1960-as években több tudományos kutatóintézet működött, mint felsőoktatási intézmény: a Klebelsberg Kunó által 1927-ben alapított Magyar Biológiai Kutatóintézet Tihanyban, az 1949-ben létrehozott MTA Mezőgazdasági Kutatóintézet Martonvásáron, az 1952 óta létező MTA Geofizikai Kutatólaboratórium (a későbbi Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet jogelődje) Sopronban (Ádám 1998), Sárváron pedig az 1897-ben(!) alapított Erdészeti Tudományos Intézet. Veszprém tudományos életét az egyetem mellett abban az időben három (azóta megszűnt) ipari kutatóintézet is erősítette, az 1949-ben alapított Nehézvegyipari Kutatóintézet (NEVIKI), az 1948-ben létrehozott Magyar Ásványolaj- és Földgázkísérleti Intézet (MÁFKI) és az

1960-ban megalakult MTA Műszaki Kémiai Kutatóintézet. Noha az előbbi két kutatóintézet nem tartozott az MTA szervezetéhez, alapító igazgatóik az MTA tagjai voltak (Polinszky Károly, illetve Freund Mihály), akik jelentős akadémiai befolyással bírtak. Az akkor még nem így nevezett lobbierőről még annyit, hogy Polinszky Károly 1974 és 1980 között oktatásügyi miniszter, a VEAB alapító titkáráként tevékenykedő Kapolyi László pedig 1983 és 1987 között ipari miniszter lett. Emellett Veszprém megyeszékhely (nem melleleg püspöki székhely is), komoly iskolavárosi múlttal, sőt, egyes kutatók szerint 1276-ig Veszprémben működött Magyarország első egyeteme (studium generale) is (Szegedi 2022).

Tehát a korszak minden vektora abba az irányba mutatott, hogy Nemezc Ernő, a Veszprémi Vegyipari Egyetem akadémikus rektora kezdeményezésére, a megyei pártvezetés támogatásával az MTA 1961-es határozatában foglaltakkal szemben Veszprém váljon az észak-dunántúli nagyrégió tudományos központjává, ami az MTA Elnöksége 1972. szeptemberi ülésén hozott 48/1972. számú határozatával meg is történt. (A VEAB szervezeti és működési szabályzatát az MTA akkori elnöke, Erdey-Grúz Tibor 1973. május 16-án hagyta jóvá, ezért a VEAB alapításának éve 1973.) Erdey-Grúz Tibor az alapítás körülményeiről egy napilapnak adott interjújában kijelentette, hogy „a VEAB létesítését egyrészt Veszprémnek, mint tudományos központnak, másrészt Észak-Dunántúl tekintélyes ipari bázisának jelentősége indokolja” (B. Cs. 1973).

Az interjú folytatása át is vezet bennünket az MTA területi bizottságainak a VEAB alapításánál újragondolt küldetésére is, jelesül hogy

„a vidéki akadémiai bizottságok az Akadémia országos tevékenységének rendszerébe illeszkednek, és ezt a regionális jellegű munkák átvállalásával mozdítják elő. Jelentős feladatuk a különböző munkahelyeken dolgozó és a tudományok iránt érdeklődő szakemberek találkozásának elősegítése, ezzel a napjainkban mind nagyobb jelentőségűvé váló interdiszciplináris szellem erősítése. Figyelmünket olyan témákra kell irányítaniuk, amelyek kutatása révén előmozdítható az országos távlati tudományos kutatási terv érvényesülése és más, társadalmilag fontos problémák megoldása.”

A regionális küldetés egyértelmű szándékát erősítik Erdey-Grúz Tibor a VEAB 1973. február 28-án megtartott alakuló ülésén kifejtett gondolatai is:

„A pécsi és a szegedi akadémiai bizottság után a VEAB-nak rövidített harmadik vidéki tudományos centrum csak nevét és székhelyét tekintve kötődik Veszprémhez, feladatai és hatásköre messze meghaladják a történelmi és szellemi hagyományokban oly gazdag város és a rendkívüli természeti szépségekkel megáldott megye határait. Szervezeti és működési szabályzata szerint feladata a Közép- és Észak-Dunántúlon, tehát Fejér, Győr-Sopron, Komárom, Vas és Veszprém megyében folyó tudományos tevékenység társadalmi, helyi és területi erőikkel való ösztönzése, támogatása és koordinálása” (Bakács 1973).

Itt meg kell állnunk egy pillanatra, hiszen Zala megye kimaradt a felsorolásból, miközben az alakuló ünnepi ülésen annak vezetői is részt vettek. Megjegyzendő, hogy a „VEAB Szervezeti és Működési Szabályzata” a megyék taxatív felsorolását nem tartalmazza. Ugyanakkor a 40 éves jubileumra készült kiadvány (MTA VEAB, 2012) belső oldalán színes térképen a VEAB működési területe Zala megyét is magában foglalja, amire ugyanúgy területi követelést formál a Pécsi Akadémiai Bizottság is (Barabás 2021). Kétségtelen tény, hogy a VEAB megalakítása óta több kihelyezett ülést is tartott Zala megyei intézményekben és üzemekben, tevékenységéről a *Zalai Hírlap* rendszeresen beszámolt, több munkabizottságának (például olajipari, urbanisztikai) elnöksége a megyéből került ki, nem is beszélve arról, hogy a VEAB első elnöke a Keszthelyi Agrártudományi Egyetem akadémikus rektora lett (bár a történeti hűséghez hozzátartozik, hogy Keszthely a VEAB alapításakor még Veszprém megyéhez tartozott). A területi vita azonban nem fajult el, lévén hogy a két területi bizottság hagyományosan kiváló kapcsolatot ápol egymással, olyannyira, hogy Pannon Tudományos Nap néven több mint húsz éve minden évben közös előadótűt is szerveznek, ahol a Paksi Atomerőmű Zrt. támogatásával Pannon Tudományos Díjat ítélnek oda felváltva a két régió legkiválóbb kutatóinak.

A VEAB megalapítása tehát új fejezetet nyitott az MTA történetében, hiszen általa egy területi bizottság elsőként kapta meg az MTA-tól egy földrajzi régió egészére kiterjedő képviselői jogát és az azzal járó tudományszervezési feladatokat. Ilyen széles körű felhatalmazással sem az elsőként megalapított Szegedi Akadémiai Bizottság (SZAB), sem pedig az 1969-ben létrehozott Pécsi Akadémiai Bizottság (PAB) nem rendelkezett (Gelencsér 2025). Az MTA elnöksége csak 1978-ban, a Miskolci Területi Bizottság megalapítását követően vizsgálta felül a területi bizottságok működését, megállapítva, „hogy az 1961-ben megjelölt célok túlhaladottá váltak, [...] és az elnökség a tudományos, tudománypolitikai és tudományszervezési szempontok kellő mérlegelésével a bizottsági munkában mindenekelőtt a területi jelleg erősítését jelölte meg” (Szentágotthai 1981).

A regionalitás jegyében a VEAB az alapításakor nyolc szakbizottsággal kezdte meg működését, amelyek elnökei öt(!) megye kutatóintézetéből kerültek ki: 1. Agrártudományi Szakbizottság; 2. Biológiai és Orvostudományi Szakbizottság; 3. Erdészeti Szakbizottság; 4. Kémiai Szakbizottság; 5. Műszaki Szakbizottság; 6. Számítástechnikai és Rendszerelméleti Szakbizottság; 7. Társadalomtudományi Szakbizottság; 8. Településtörténeti Szakbizottság. A régiós szándék hitelét erősítette, hogy a VEAB első elnöke az időközben újra önálló intézménnyé vált Keszthelyi Agrártudományi Egyetem akadémikus rektora, Belák Sándor, alelnöke Nemez Ernő (Veszprém) és Kapolyi László (Tatabánya) lett. E helyütt idézzük fel, kik töltötték be az elmúlt több mint fél évszázadban a VEAB elnöki tisztét: Belák Sándor (1973–1978), Nemez Ernő (1979–1985), Salánki János (1985–1996), Markó László (1996–2002), Mészáros Ernő (2003–2008), Bíró Péter (2009–2014), Pósfai Mihály (2014–2019), Padisák Judit (2019–2023), Gelencsér András (2023–). A VEAB a megalapítását követően eleinte a Veszprémi Vegyipari Egyetem épületében működött, 1978 júniusában költözött át

a Veszprém Város Tanácsa által még 1972-ben a VEAB-székház céljára felajánlott Tolbuhin utca (ma ismét Vár utca) 37-es számú épületébe, az egykori Dravecz-féle, teljesen felújított és kibővített kanonoki házba. Termeinek falait azóta is a veszprémi Laczkó Dezső Múzeum tulajdonát képező műtárgyak díszítik.

De mi volt az észak-dunántúli régióban az a kovász, amely a VEAB akadémiai küldetéséhez szakmai tartalmat tudott adni? Legfőképpen az az igény, hogy a politikai döntéshozóknak a régióban felmerült komplex problémák megoldásához *ténylegesen* szükségük volt a tudományban jártas szakemberek közreműködésére, és ennek megszervezésében kizárólagosan az MTA testületeire támaszkodtak. Ahogy Nemecz Ernő fogalmazott elnöki köszöntőjében a VEAB 1979. évi plenáris ülésén: „Nem lévén részei partikuláris érdekeknek, mindezekről független és kötetlen és csak a tudomány segítségére támaszkodó gondolatalkotással kívánunk hozzájárulni társadalmi viszonyaink fejlődéséhez” (A VEAB 1979. évi plenáris ülése, 1980). Erre abban az időben még a döntéshozók részéről is megvolt a fogadókészség: „Mindannyiunk számára örömdetes, ahogyan az országos főhatóságok, irányító szervek értékelik az Akadémia területi testületeinek munkáját. Segítségét igénylik különböző koncepcióknak, a régiót közvetlenül is érintő elgondolásoknak a kidolgozásához, véleményüket kéri adott témakörökben készült tervezetekhez, döntéseik meghozatala előtt” – fogalmazott Szentágothai János, az MTA akkori elnöke (Szentágothai 1981). Tehát akkoriban a társadalom és a politika részéről egyaránt nagy fokú bizalom nyilvánult meg a Magyar Tudományos Akadémia tagjai és testületei iránt. Előbbi napjainkra kissé megkopott, az utóbbi pedig már sajnos történelem.

De milyen komplex problémák vártak akkoriban a régióban megoldásra? Hazánk kiemelt természeti értékeinek jelentős része található a VEAB régiójában, míg az iparosítás mértéke is itt volt a legerősebb. Például ebben az országgrészben hozták felszínre az ország bauxittermelésének 100 százalékát, barnaszénkészletének felét, és itt gyártották a timföld teljes mennyiségét. Az ipari, nagyüzemi mezőgazdasági és bányászati tevékenység az 1960-as évek második felére már több fenyegető környezeti problémát is eredményezett a régióban, amit nem lehetett egyszerűen a szőnyeg alá söpörni, a tudomány közreműködése nélkül megoldani még kevésbé. Így természetes módon a környezetvédelem vált a VEAB fő védjegyévé és tevékenységének rendező elvévé, egy olyan történelmi időszakban, amikor ennek fontossága a társadalomban még egyáltalán nem volt magától értetődő. Olyannyira, hogy a VEAB 1976-ban a szakbizottsági struktúráján felül létrehozta a Környezetvédelmi és Tájhasznosítási Koordinációs Tanácsot, amely különböző szakterületek képviselőinek tevékenységét hangolta össze konkrét környezeti problémák hatékony megoldása érdekében, ma úgy mondanánk, hogy multidiszciplináris szakértői teameket menedzsel. Ilyenek voltak például a szűnyogirtás hatásainak vizsgálatára és a bauxitbányászattal összefüggő vízsüllyedés okainak feltárására alakult eseti bizottságok (Czingráber 1979). A VEAB rendezésében valósult meg 1976 szeptemberében Szombathelyen „Jog a környezet védelmében” címmel az emberiség történetében első nemzetközi környezetvédelmi jogi tanácskozás 100 hazai és 42 külföldi szakember részvételével, ahol különböző

társadalmi rendszerű államok jogtudósai találkoztak, hogy kicseréljék a környezetvédelemmel kapcsolatos tapasztalataikat (*Napló* 1976).

De az országosan legnagyobb figyelmet kapott környezeti probléma a Balaton ökológiai állapotának romlása volt, amely eleinte az algásodás szembetűnővé válásában, majd 1965-ben az első és 1975-ben egy második, méretét tekintve kisebb halpusztulásban vált a nagyközönség számára is nyilvánvalóvá. Ennek megállítására 1976-ban a VEAB aktív közreműködésével egy középtávú kutatási program is indult 140 millió forintos költségvetéssel. Ez a program sok közvetlenül hasznosítható eredményt hozott, megalapozva a Minisztertanács 1983. évi határozatát, amely 43 milliárd(!) forintot irányzott elő a tó védelmére. A Balaton mai érdekviszonyainak ismeretében módfelett izgalmas olvasmány, milyen megoldásokat javasoltak a kutatók a vízminőség javítására tisztán tudományos alapon: „sokkal intenzívebb és szelektívebb halászatra volna szükség, [...] szigorúan szabályozni kell a Balatonon a sporthorgászatot” – pont az ellenkezőjét annak, ami azóta történt (Hlavay 1995).

A rendszerváltást követően a VEAB intézményektől független szervezetként fontos szerepet játszott a térség felsőoktatásának újjászervezésében, a témában 1992-ben három ankétot is szervezett. Jellemző kortünet (illetve napjaink politikai gyakorlatát illetően inkább kórtünet), hogy az akkoriban illetékes Művelődési és Köznevelési Minisztérium vezetői még időt és figyelmet szántak az érintett intézmények vezetőivel folytatott párbeszédre, illetve meghallgatták az MTA javaslatait is. Biszterszky Elemér, a minisztérium államtitkára még erősen szabadkozva egy gondolatfutamra is vállalkozott, hogy mit tenne, ha a VEAB-régióban lenne rektor. Majd így folytatta: „ha: – Győrben élnék, a városban hoznék létre egy főiskolai társulást, és 2000-ig ennek tökéletes infrastruktúráját építeném ki (ma is minimum hat karra való profil van a városban); – Veszprémbe élnék, Keszthellyel szövetkeznék, és 30–40 km távolságban társulást ajánlanék az itt működő főiskoláknak; – a nyugati végeken pedig egy agrár humánművészeti és természettudományi profilú egyetemet hoznék létre” (Szabó 1993). Gondolatai minden bizonnyal megfontolandók lehettek, és termékeny talajra hullhattak, mert alig egy évtizeddel és két politikai rendszerrel később főbb vonalaikban meg is valósultak. Képzeliük el azt, hogy napjainkban a kormányzat illetékes vezetői egy MTA által szervezett vitafórumon vesznek részt az autonóm egyetemek és főiskolák rektoraival, akik előtt kifejtik a hazai felsőoktatás reformjára vonatkozó javaslatukat...

A tudományra támaszkodó nemzeti együttműködés ars poeticáját a legkifejezőbbben talán Nemező Ernő, a VEAB elnöke fogalmazta meg egy interjújában: „Tisztában vagyunk azzal, hogy a fejlődés kérdéseiben a döntés a társadalom megbízásából a politikáé, a tudomány szerepe pedig kettős: a döntés alternatíváinak előkészítése és döntés után a megvalósítás legjobb módjának kidolgozása. Ez azonban nem kevés. Ha a jövő alakításába akár csak gondolati úton is képesek vagyunk bevenni az észszerűséget, a cselekvés ismereteink szerinti optimumát, azt hiszem, a tudomány megtette a társadalommal szembeni kötelességét” (R. Farkas 1981, a kiemelés tőlem, G. A.). Nagy kár érte, hogy a mai politika erre nem tart igényt. Meg is látszik rajtunk.

Irodalomjegyzék

- A Magyar Tudományos Akadémia Veszprémi Területi Bizottsága* (2012). Veszprém: MTA VEAB.
- „A VEAB 1979. évi plenáris ülése” (1980). In: Dr. Bakács Tiborné – Dr. Magyar Miklós, összeáll. (1980). *A Magyar Tudományos Akadémia Veszprémi Akadémiai Bizottságának Értesítője*. Veszprém: Az MTA Veszprémi Akadémiai Bizottsága, 6–44.
https://adt.arcanum.com/en/view/MTA_VEAB_Ertesito_1980_1/?pg=0&layout=s
- Ádám Antal – Bencze Pál – Verő József (1998). „A Magyar Tudományos Akadémia Geofizikai Kutató Laboratóriumának története (1972–1952)”. *Soproni Szemle*, 2, 99–124.
https://epa.oszk.hu/01900/01977/00199/pdf/EPA01977_Soproni_Szemle_1998-lii-2.pdf
- B. Cs. (1973). „A Veszprémi Akadémiai Bizottság a Dunántúl tudományos életének központjává válhat. Interjú Erdey-Gruz Tiborral, a Magyar Tudományos Akadémia elnökével”. *Napló* (1973. dec. 24.), 4.
https://adt.arcanum.com/hu/view/VeszpremiNaplo_1973_12/?pg=187&layout=s&query=erdey-gr%C3%BAz
- Bakács Tibor (1973). „Látogatás az MTA Veszprémi Akadémiai Bizottságánál”. *Vasi Szemle*, 4, 530–535.
- Barabás Gábor, szerk. (2021). *A Pécsi Akadémiai Bizottság 50 éve 1969–2019*. Pécs: MTA Pécsi Területi Bizottsága.
- Czingráber János (1979). „Összehangolni a sokrétű tevékenységet. Interjú dr. Kárpáti Istvánnal, a környezetvédelmi és tájhasznosítási koordinációs tanács elnökével”. *Napló* (1979. szept. 26.), 5.
https://adt.arcanum.com/hu/view/VeszpremiNaplo_1979_09/?pg=200&layout=s&query
- Gelencsér András (2025). „Vidéken nemcsak a föld terem... – gondolatok az MTA területi bizottságainak megalapításáról”. *Magyar Tudomány*, 186/1, 62–68.
<https://doi.org/10.1556/2065.186.2025.1.7>
- Hlavay József, szerk. (1995). *Környezetvédelmi problémák a VEAB régióban*. Veszprém: Veszprémi Akadémiai Bizottság Könyvei.
- „Nemzetközi környezetvédelmi jogi tanácskozás kezdődött Szombathelyen a VEAB szervezésében”. *Napló* (1976. szept. 7.), 1.
https://adt.arcanum.com/de/view/VeszpremiNaplo_1976_09/?pg=44&layout=s&query=Jog+a+k%C3%B6rnyezet+v%C3%A9delm%C3%A9ben
- R. Farkas Klári (1981). „A tudomány kettős feladata. Beszélgetés Nemecz Ernő akadémikussal”. *Magyar Nemzet* (1981. jún. 10.), 8.
https://adt.arcanum.com/en/view/MagyarNemzet_1981_06/?pg=87&layout=s&query=nemecz+ern%C5%91
- Szabó Márta, szerk. (1993). *A régió felsőoktatásának jelene és jövője – a MTA Veszprémi Területi Bizottsága ankétja, 1992. november 27.*, Veszprém. Veszprém: VEAB.
https://real-eod.mtak.hu/8979/1/MTA_VEAB-konyvek_937858.pdf
- Szegedi László (2022). „Két középkori magyar egyetem története”. *Veszprémi Szemle*, 3, 6–78.
https://epa.oszk.hu/03000/03021/00027/pdf/EPA03021_veszpremi_szemle_2022_3_006-078.pdf
- Szentágothai János (1981). „Az Akadémia regionális tudományos fórumai”. *Magyar Tudomány – Az MTA Értesítője*, 7–8, 489–491.

TEMATIKUS ÖSSZEÁLLÍTÁS

Hídszerkezetek és a mérnöki tudomány

Bridges and Engineering Science

Vendégszerkesztő: Dunai László

Bevezető

Introduction

Dunai László

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
dunai.laszlo@emk.bme.hu

Az építőmérnöki szakma egyik leglátványosabb, szimbolikus alkotása a híd. A hídépítés szorosan kapcsolódik a közlekedési infrastruktúra fejlődéséhez, és akkor éli „aranykorát”, amikor az út-/vasútépítés lendületet kap egy országban. Hazánkban három ilyen korszakot emlegetnek „hídépítési aranykorként”. Az első a millennium időszaka, amikor – az azóta nemzeti jelképpé vált – történeti Duna-hídjaink második generációja megépült, a rohamosan fejlődő közút- és vasúthálózat nagyszámú hídja mellett. A második időszak szomorú előzménye a második világháború barbár pusztítása, amikor az ország hídjainak nagy része megsemmisült. A hidászok emberfeletti munkával építették újjá a romokból hídjainkat a háborút követő évtizedben.

A harmadik intenzív hídépítési korszak a 2000-es évek elején kezdődött, és napjainkban is tart. A korszak első részét három impozáns híd fémjelzi: a Kőröshegyi völgyhíd, a Pentele híd és a Megyeri híd. A hidak megvalósítását és az azt megalapozó tudományos kutatásokat a tervezők és kutatók a Magyar Tudományos Akadémia által rendezett tudományos ülésen, 2007. május 10-én mutatták be. A programot színesítette a szintén akkoriban épült pozsonyi Apolló Duna-híd is. A hét előadás anyaga „Hídszerkezetek – A tudománytól a megvalósulásig” címmel írásban is megjelent a *Magyar Tudomány* tematikus összeállításaként a 2008/4. számban, amelynek vendégszerkesztője Kollár László volt.

A hídépítés lendülete a továbbiakban sem torpant meg, szép új hidak épültek, és megújultak történeti hídjaink is. Ezek közül néhányat kiemelve:

- Duna-hidak: Monostori híd (Komárom), Tomori Pál híd (Kalocsa–Paks), Deák Ferenc híd (M0-s autópálya új déli híd), Újpesti vasúti híd, Déli összekötő vasúti hidak;
- Tisza-hidak: Móra Ferenc híd (Szeged), M4-es autópálya híd (Szolnok), II. Rákóczi Ferenc híd (Vásárosnamény), M44-es autótú híd, Szolnoki vasúti híd;
- Körös-híd: Berkó Dezső híd (M44-es autótú, Kunszentmárton);
- gyalogos-/kerékpárhidak: Tiszavirág híd (Szolnok), Tisza-tavi kerékpárhidak, Osztószigeti (Robinson) híd (Budapest), Nemzeti összetartozás hídja (Sátoraljaújhely);
- történeti Duna-hidak felújítása: Szabadság híd, Margit híd, Széchenyi lánchíd;
- tervezett új hidak: Új Duna-híd (Budapest), Mohácsi Duna-híd, Szegedi Tisza-híd.

A kiragadott példák mellett számos, a teljes országra kiterjedő hídprojekt valósult meg. A változatos funkciókra tervezett, innovatív, esztétikus hídszerkezetek bizonyítják a hazai hidászok kreativitását, szakmai tudását és elhivatottságát. A nagy volumenű hídépítési tevékenységet ipari háttérű K+F+I- és tudományos kutatási projektek támogatták, és támogatják ma is. A tudományos igényű feladatok területei több tudományterületet ölelnek fel: műszaki mechanika (szerkezeti modellezés és analízis, méretezéselmélet), anyagtudomány (új építőanyagok, korrózió), áramlástan (széldinamika), informatika (BIM [Building Information Modelling, építményinformációs modellezés], digitalizáció, mérés technika), valamint kiterjednek a fenntarthatóság és gyártás/szerelés technológia kérdéseire is. A kutatási eredmények és alkalmazási tapasztalatok alapján az utóbbi években megújultak a hidakra vonatkozó nemzetközi és hazai szabályzatok is.

A *Magyar Tudomány* jelen tematikus összeállításában a hazai hídépítés elmúlt másfél évtizedéről adunk ízelítőt hét cikkben, új kutatási eredményeket és azok alkalmazását mutatva be néhány érdekesebb hídszerkezet kapcsán. Az első cikk egy összefoglaló a szerző MTA rendes tagi székhelyű előadásáról, amely „Duna-hidak – modelltől a valóságig” címmel hangzott el 2023. március 3-án. A második cikkben bemutatkozik az új generációs acélhidak méretezéselmélete szakterületen – Kövesdi Balázs vezetésével – működő MTA–BME Lendület kutatócsoport. Ezt követi a történeti Széchenyi lánchidunk felújítását áttekintő cikk, majd az Atlétikai Stadionhoz kapcsolódó Osztószigeti (Robinson) híd és a sátoraljaújhelyi – világrekorder méretű – Nemzeti összetartozás hídja tervezésének jellegzetességeit és a megvalósítást támogató tudományos kutatásokat ismertető két cikk. A komáromi Monostori híd érdekes szerkezeti megoldásai mellett a gyártási-szerelési folyamatot végigkövető digitális iker fejlesztése is bemutatkozik. A blokkot lezáró cikk egy új anyagokon és technológián alapuló vasbeton hídgerendacsalád K+F+I-projektjét mutatja be. Végül köszönettel tartozom a *Magyar Tudomány* folyóiratnak a tematikus blokk megjelenéséért, valamint a szerzőknek a cikkek elkészítéséért.

Duna-hidak – modelltől a valóságig

Danube Bridges: From Model to Reality

Dunai László

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
dunai.laszlo@emk.bme.hu

Összefoglalás

A cikk első fele történeti áttekintés a hidtervezésben alkalmazott statikai és méretezéselméleti eljárások fejlődéséről és arról, hogyan támogatta ezzel a hazai tudomány Duna-hídjaink megvalósítását. A jelenkori, az utóbbi négy évtizedben folyamatosan kidolgozott módszertan numerikus modellen alapul, és összekapcsolja a szerkezetek statikai és méretezési modelljeit. A harmonizált modelleken alapuló módszertan beépült az új generációs Eurocode-ba a szerző által vezetett nemzetközi kutatócsoport támogatásával. A módszer alkalmazását Duna-hidakhoz kapcsolódó, tudományos igényű feladatok megoldása szemlélteti.

Abstract

The first half of the article is a historical overview of the development of structural analysis and design theory in bridge design and how the scientific background has supported the construction of the Hungarian Danube bridges. The current methodology, which has been continuously developed over the last four decades, is based on numerical models and combines the analysis and design procedures. The harmonized design by analysis methodology has been incorporated into the new generation of Eurocode with the support of an international research team led by the author. The application of the methodology is illustrated by scientific design tasks related to Danube bridges.

Kulcsszavak: híd szerkezet, numerikus modell, analízis és méretezés, korrózió, stabilitás, fáradás

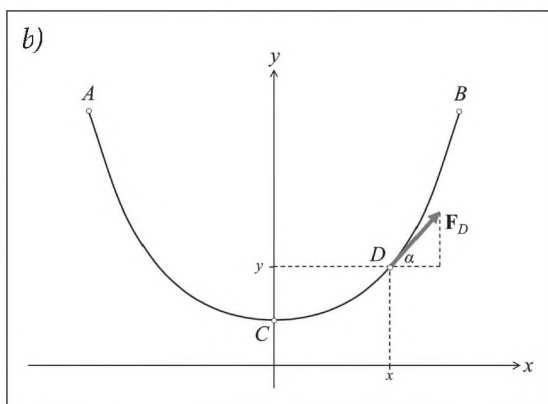
Keywords: bridge structure, numerical model, analysis and design, corrosion, stability, fatigue

Bevezetés

A cikkben összefoglalom az MTA rendes tagi székfoglaló előadásomat, amely az MTA Székházában hangzott el 2023. március 3-án. A cikk első része egy tudománytörténeti áttekintés a statikai és a méretezéselméleti módszerek fejlődéséről a hazai Duna-hidak példáin szemléltetve. Ezen alapokon elindulva ismertetem saját munkásságomat a jelenkori módszertan kialakításában, a numerikus modellalapú méretezés terén. Végül ennek az alkalmazását szemléltetem a Duna-hidakhoz kapcsoló gyakorlati, tudományos igényű feladatok megoldása kapcsán.

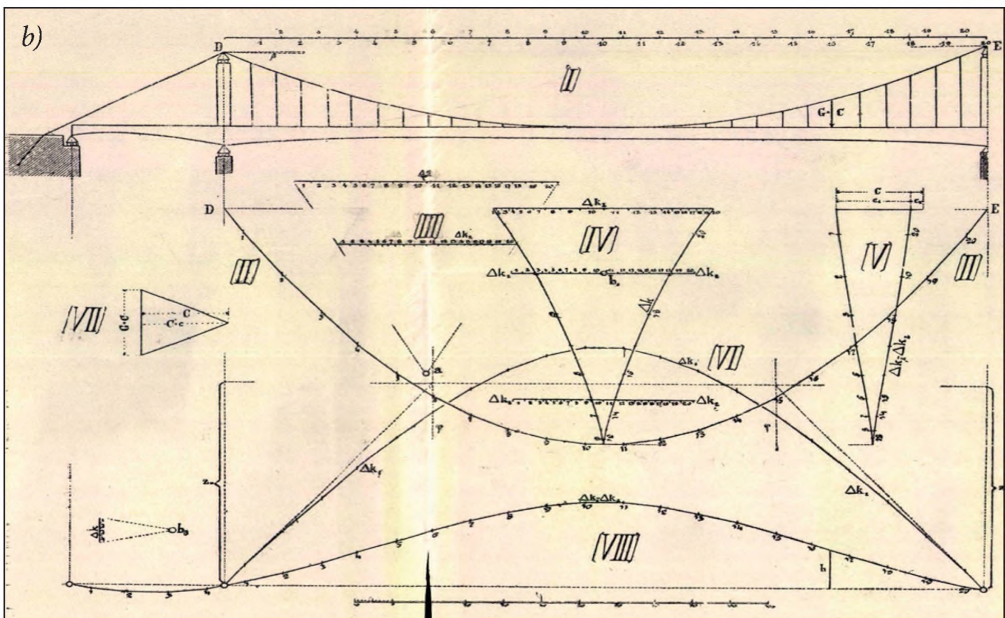
A hazai hídtervezés a 19. és 20. században – statikai és méretezési modellek fejlődése

A hídépítés története szorosan összefügg a tudomány és a technológia fejlődésével. Ez nyomon követhető a hazai Duna-hídjaink szerkezeti rendszereiben, a tervezés és építés jellegzetességeiben is. Első állandó Duna-hidunk, a Széchenyi lánchíd tervezésekor William Tierney Clark az egyszerűen számítható kötélgörbe modell mellett a megépült hidakon szerzett tapasztalatait használta fel. A kötélgörbe alapján adódik a lánclemekben fellépő húzóerő (1. ábra), és az akkor alkalmazott acélon végrehajtott kísérleti eredményekből meghatározható volt a szükséges lánclemez mérete. Ez a szerkezet nem rendelkezett egy ma szokásos gerendaszerű pályaszerkezettel, ún. merevítő tartóval, ezért a terhelés hatására nagy elmozdulásokat szenvedett, így később megerősítésre szorult. Ehhez azonban olyan pontosított statikai modellt kellett alkalmazni, amely figyelembe tudta venni a függesztőrendszer és a gerenda együttes teherviselését.



1. ábra. a) Az eredeti Lánchíd,
b) kötélgörbe modell

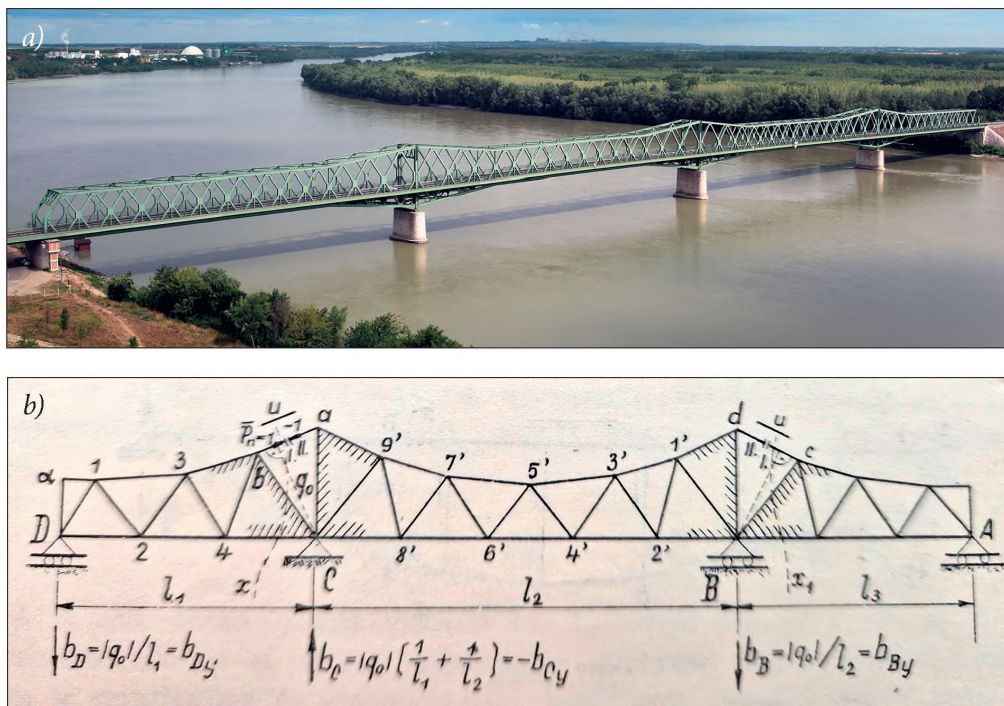
Forrás: a) a Hidak és Szerkezetek Tanszék archívuma, b) a szerző saját szerkesztése



2. ábra. a) Az Erzsébet lánchíd, b) grafostatikai modell
 Forrás: a) a Hidak és Szerkezetek Tanszék archívuma, b) Kherndl 1891

Erre adott lehetőséget a millennium kori hídtervezésben alkalmazott grafostatikai eljárás. Ez egy szerkesztésen alapuló módszer, amellyel meghatározható a szerkezet egyensúlyát jellemző erővektor-polygon, a kiadódó erővektorok hosszát lemérve pedig meg lehetett határozni a belső igénybevételeket. Kherndl Antal műegyetemi professzor – a Hidak és Szerkezetek Tanszék elődjének első tanszékvezetője – kidolgozta azt a grafostatikai eljárást, amellyel meg lehetett határozni az együtt dolgozást a lánccs és a merevítő tartó között. Ezt az elméletet 1890-ben akadémiai székfoglaló előadásában „Lánchidak merevítő tartóinak elmélete” címmel mutatta be (Kherndl 1891), ezt illusztrálja a 2. ábra. A képen az első Erzsébet híd modellje látható, ezen számítás alapján készült el 1903-ban az elegáns lánchíd, amely a számítási módszer mellett számos szerkezeti újítással is rendelkezett. Ezzel a statikai modellel lehetett kiszámítani és megerősíteni a Széchenyi lánchidat is tíz évvel később.

Kherndl tanítványa, Kossalka János, majd később Korányi Imre a múlt század első felében a hidak grafoanalitikus és analitikus statikai módszereit fejlesztették tovább, eredményeiket a hidász szakma meghatározó monográfiáiban publikálták. Ezekben a számításokban a szerkezet erőjátékát állapotegyenletekkel írták le, matematikai módszerekkel ezeket megoldva lehetett a szerkezet viselkedését követni, így olyan, összetettebb szerkezetek váltak vizsgálhatóvá, amelyekre a korábbiakban nem



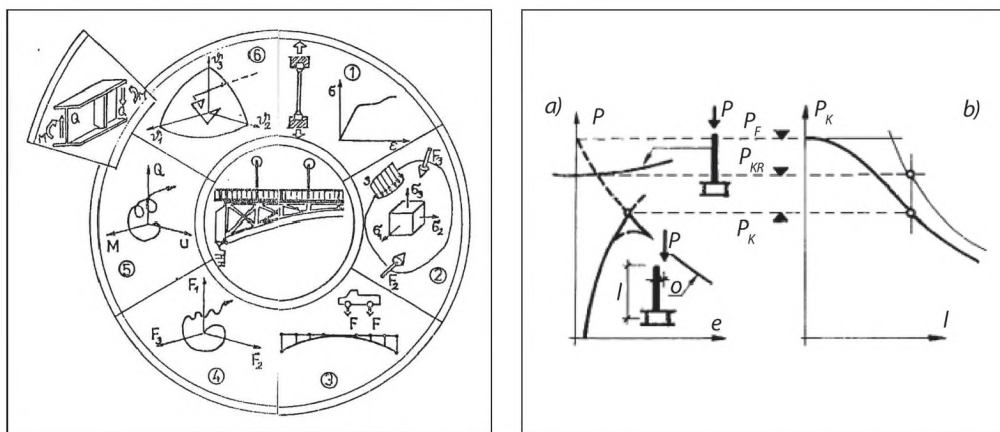
3. ábra. a) Beszédes József híd, b) grafoanalitikus modell

Forrás: a) Oravecz István, b) Kossalka 1941

volt mód. Kossalka a *Tartók sztatikája és kinematikája* című könyvéből (Kossalka 1941), a 3. ábrán szemléltetett határozatlan rácsos tartó modell alapján számította ki, majd tervezte meg a dunaföldvári Beszédes József Duna-hidat. Az ő tanítványa volt Korányi Imre, aki fontos szerepet játszott a *Stabilitási kérdések a mérnöki gyakorlatban* című könyvében publikált stabilitási méretezési modell, majd a hazai hídszabályzatok fejlesztésében (Korányi 1965).

A sok egyszerűsítésen alapuló kézi számítási eljárások azonban nem alkalmasak a szerkezetek valós viselkedésének pontosabb követésére. A modellt a valósággal a – folyamatosan fejlődő szabványokban megjelenő – kísérleteken alapuló szemiempirikus méretezési eljárások kapcsolják össze.

Az 1960-as években – a Műegyetemen Szabó János akadémikus úttörő szerepével – kezdődött el a tartószerkezetek numerikus statikai módszereinek fejlesztése. Munkatársaival olyan alpműveket írt – mint például a *Rúdszerkezetek elmélete és számítása* (1971) –, amelyek alapján hazánkban is megkezdődött a számítógépes statikai programok fejlesztése. Ezekből az egyetemi programokból rohamosan nőttek ki és terjedtek el világszerte azok a végeselemes szoftverek, amelyeket a tervezési gyakorlat napjainkban is használ. A numerikus statika gyors fejlődésével azonban nem tudott lépést tartani a méretezési modellek fejlődése. A fejlett statikai modellek mellett a teherbírás ellenőrzésekor még mindig a hagyományos, leegyszerűsített méretezési eljárásokat alkalmaztuk. Doktori témavezető professzorom, Halász Ottó 1983-ban tartott akadémiai székfoglaló előadásában – „Tartószerkezetek méretezése – modell és valóság” címmel – bemutatta azokat a megfontolásokat, hogyan lehet a részletkiemelő és globális numerikus statikai modellekhez a stabilitási méretezési modellt hozzáilleszteni (Halász 1987) (4. ábra). Az egymást felváltó modellek és eljárások csak nehezen nyertek elismerést, az új módszertanok minden korszakban alapvető szemléletváltást igényeltek.

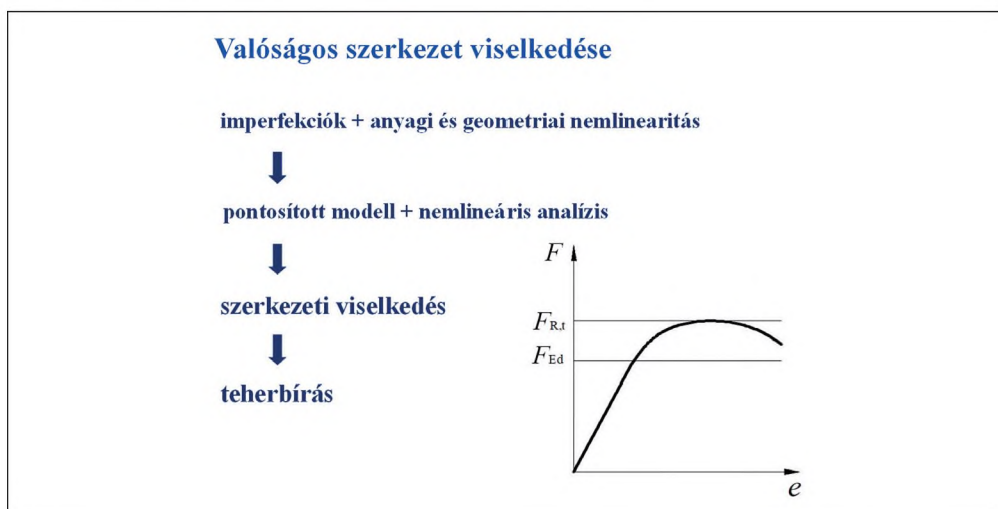


4. ábra. a) Globális és részletkiemelő modell, b) stabilitási méretezés

Forrás: a Hidak és Szerkezetek Tanszék archívuma

Magyar kutatók részvétele az új nemzetközi méretezési módszertan kialakításában

A numerikus statikai modellekkel kompatibilis méretezési módszerek igénye a műszaki tudomány hagyományos területi felosztásán és módszertanán túllépő feladatok elé állította a kutatókat és a mérnököket. A pontosított számítási modellek és a valóság viszonyának elemzése, valamint a kísérleti és számítógépi szimulációs eljárások párhuzamos alkalmazása paradigmaváltást eredményezett a tartószerkezetek analízisében és méretezésében. Az imperfekciókat tartalmazó numerikus modellen alkalmazott nemlineáris analízis alapján végrehajtott közvetlen teherbírás-számítás elvi sémáját az 5. ábra mutatja be.



5. ábra. Valóságos szerkezet: modell – analízis – méretezés

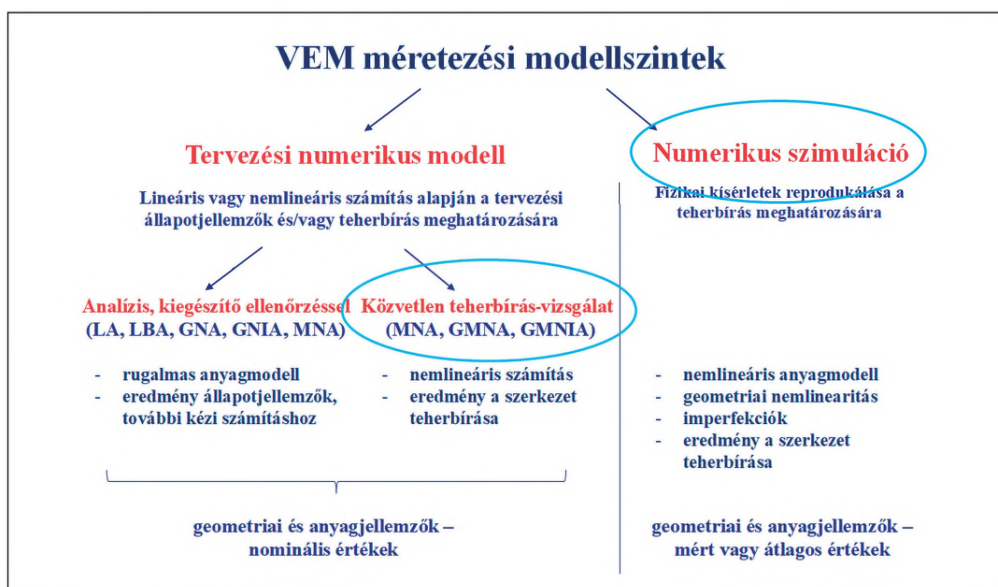
Forrás: a szerző saját szerkesztése

Az ehhez kapcsolódó négy évtizedes tudományos munkásságom az új méretezési módszertan kidolgozására irányul, amely magában foglalja mind az alapkutatás kísérleti és elméleti vizsgálatait, mind az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságának céljával végzett kutatást. A csoportommal végzett kutatásaink valós szerkezeti problémákra irányulnak, hangsúlyos nemzetközi és ipari együttműködéssel. A tudományos műhelyemben témavezetői irányítással eddig 16 doktorandusz védte meg a disszertációját, jelenleg pedig két aktív doktorandusszal kutatunk.

Eredményeink beépültek az új generációs európai szabványokba. Egy rangos európai egyetemek kutatóiból álló munkacsoport az utóbbi hat évben – a vezetésemmel, valamint két további magyar kollégám, Kövesdi Balázs és Ádány Sándor közreműködésével – kidolgozott egy új, előzmény nélküli, végelelemes analízisen alapuló Eurocode-szabványt, amely várhatóan irányadó lesz a következő évtizedek acélszer-

kezeti tervezésében. A hiánypótló új kötet címe *EN 1993-1-14, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1–14: Design Assisted by Finite Element Analysis*; ehhez kapcsolódik egy hosszabb háttérdokumentum, amely megmagyarázza, kifejti, kommenteket fűz a szabványos leírásokhoz, validációs és tervezési mintapéldákkal egészíti ki azokat, segítve ezzel a szabvány alkalmazását gyakorlati tervezők számára.

A szabványos végeleemes modell- (VEM) és analízisalapú méretezési módszertant a 6. ábra foglalja össze. Ez kitér a hagyományos szabványos eljárásokhoz kapcsolódó, különböző szintű analízishez csatlakozó méretezési modellre (az ábra bal oldalán); a pontosított statikai modellel és analízissel végrehajtott közvetlen teherbírás-vizsgálatra (az ábra közepén), valamint a tényleges szerkezeteken végrehajtott számítógépi szimulációra, amelyekkel a valós kísérleteket lehet pótolni/kiegészíteni (az ábra jobb oldalán). Az új szabványkötet és a háttérdokumentum elkészült, és a Eurocode-tagországok elfogadták, a gyakorlati tervezésben hivatalosan 2025-től alkalmazható.



6. ábra. VEM-alapú méretezés
Forrás: a szerző saját szerkesztése

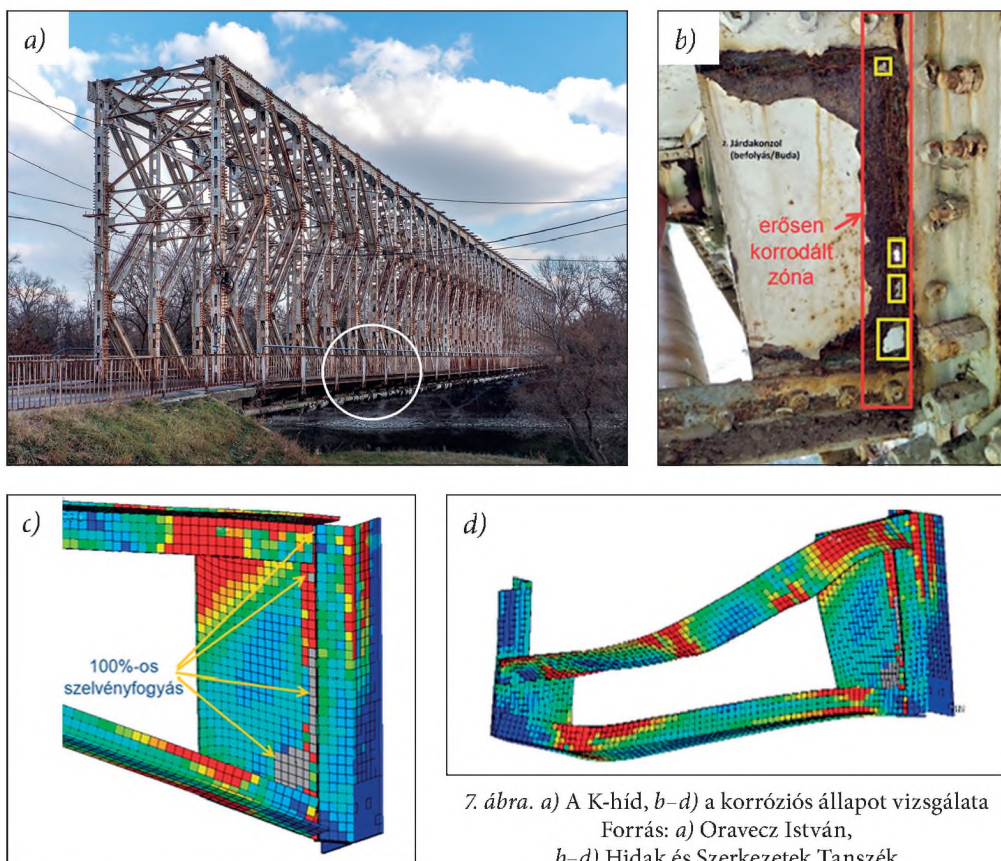
A módszertan alkalmazása Duna-hidak vizsgálatára

Tanszéki kutatócsapatommal ezt a globális módszertant alkalmaztuk az utóbbi bő két évtizedben az új és meglévő Duna-hidak problémáinak tudományos igényű megoldásában. Többek között ezek a vizsgálatok is segítették az előzőekben ismertetett új szabvány létrejöttét. Amint a jelen tematikus blokk bevezetőjében szerepel, ez az időszak bővelkedett hidas feladatokban, így méltán emlegetik a hidászok „hídépítési aranykornak”. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szer-

kezetek Tanszéken hozzávetőlegesen húsz Duna-híddal foglalkoztunk kutatási, szakértési, tervezési feladatok kapcsán, amit az új szerkezeti kialakítások, az új gyártástechnológia vagy szerkezeti károsodások indokoltak. A székfoglaló előadásban ezek közül tizenegy hídról beszéltem, ezek közül jelen cikkben – különböző vizsgálatok illusztrálásaként – öt példát mutatok be, további három hídról részletesebben, külön cikkben számolunk be a tematikus blokkban. Vizsgálatainkat határozott alkalmazási céllal, tudományos igényességgel és háttérrel hajtottuk végre, ipari partnereinkkel szorosan együttműködve. Tudományos eredményeinket nemzetközi konferenciák keynote előadásában ismertettem, valamint nagyszámú cikkben rangos nemzetközi folyóiratokban publikáltuk.

Korróziós károsodás

A korróziós károsodások teherbírásra gyakorolt hatását a Széchenyi lánchíd és a K-híd esetén elemeztük részletesen. Mivel a Lánchíd felújításáról a tematikus blokkban külön cikk készült, így ebben az összefoglalóban csak az utóbbiról írok. A K-híd



7. ábra. a) A K-híd, b–d) a korróziós állapot vizsgálata

Forrás: a) Oravecz István,

b–d) Hidak és Szerkezetek Tanszék

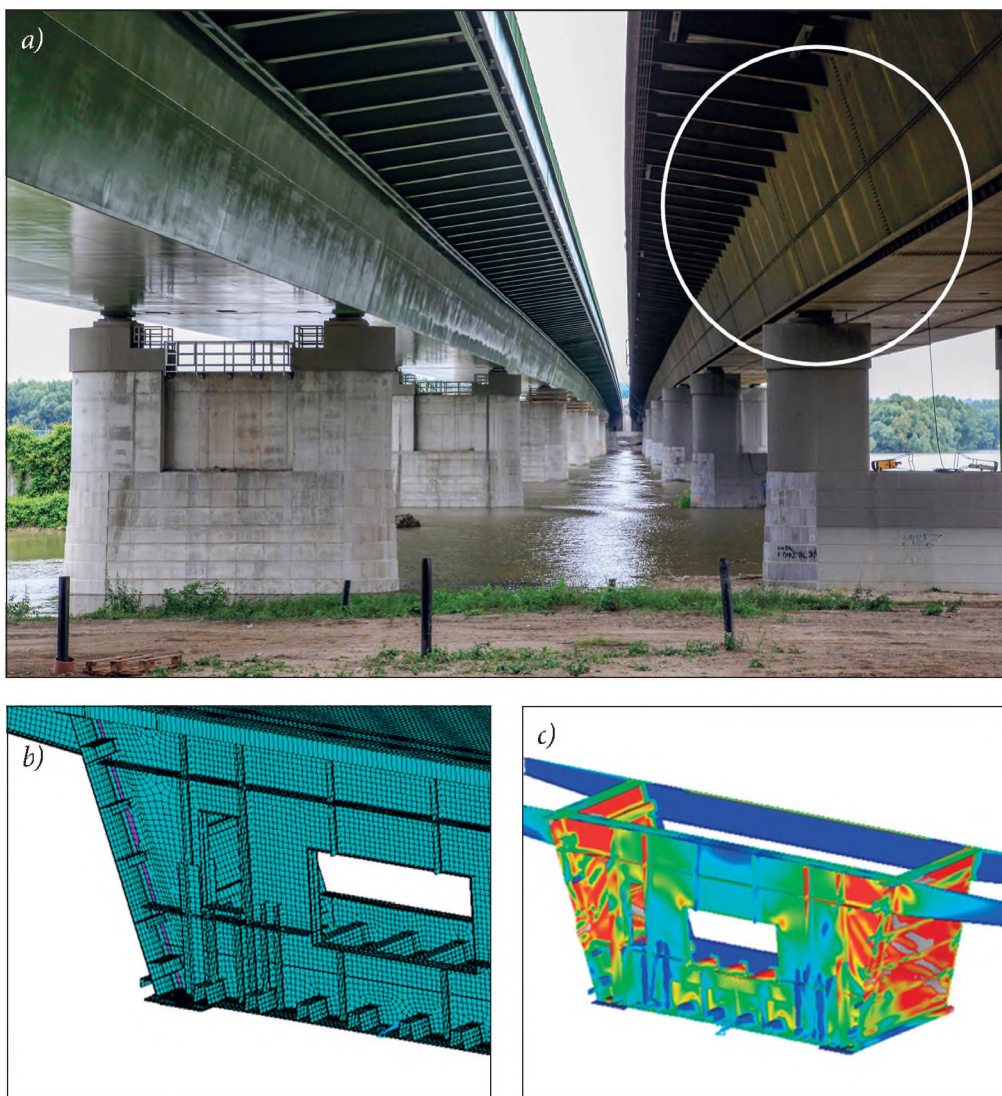
egy rácsos gerendahíd, eredetileg vasúti híd volt, jelenleg gyalogoshídként elsősorban a Sziget Fesztivál kizárólagos megközelítését szolgálja. A híd és a vizsgálat néhány jellemzője a 7. ábrán látható. A felülvizsgálatot végző hidász kollégák a közelmúltban megállapították, hogy erősen előrehaladott korrózió tapasztalható a híd több részén is. A kérdés az volt, hogy ez a korrózió nem veszélyezteti-e több százezer ember bejutását a Szigetre. A végrehajtott részletes állapotvizsgálat kvantitatív módon jellemezte a korróziós károsodást. Ezek alapján a mértékadó helyeket kiválasztottuk, és pontosított numerikus modellel vizsgáltuk, a korrodált részek lokális teherbírását és a szerkezeti redundanciát részletesen elemeztük. Így – bár a hagyományos módszerekkel nem volt kimutatható a kellő teherbírás – az új módszertannal igazolni lehetett, hogy a gyalogosforgalom az előrehaladott korrózió ellenére felvállalható kockázattal engedhető át a hídon. A korrodált részek javítása viszont elengedhetlenné vált, és azóta meg is történt.

Lokális erőbevezetés hatása

Amikor egy szerkezetre nagy intenzitású, kis felületen koncentrálódó erőt hat, megfelelő szerkezeti részletet kell tervezni a lokálisan kialakuló feszültségkoncentráció felvételére. Az erre vonatkozó vizsgálatainkat a székfoglaló előadásban a Pentele híd és az M0-s autópálya régebbi déli hídjá, a Deák Ferenc Duna-híd kapcsán mutattam be. A cikkben az utóbbiról írok (a Pentele híd részletesen szerepelt a *Magyar Tudomány* 2008-as tematikus összeállításában). A Deák Ferenc Duna-híd többtámaszú, szekrény keresztmetszetű kialakítású, amelyen 2020-ban több változtatást, korszerűsítést hajtottak végre, köztük olyan beavatkozásokat is, amelyek érintették a feszültségkoncentrációs zónákat is a megtámasztó szerkezetek környezetében. Az új, korszerűbb megtámasztó elemek – hídsaruk – mérete szükségessé tette a nagyobb feszültségkoncentráció miatt a szerkezet megerősítését. Ez egy nagyon összetett kialakítást eredményezett, amely hagyományos szabványos eljárásokkal nem volt vizsgálható. A 8. ábrán látható részletet – a saru fölötti diafragma környezetet – pontosított numerikus modellel elemeztük, közvetlen teherbírás-vizsgálat végrehajtásával. Ehhez – a híd kiemelt szerepét és forgalmát tekintve – a modellt validálnunk kellett, amelyet helyszíni terheléses vizsgálat, próbaterhelés alapján hajtottunk végre. A vizsgálatok alapján a forgalom megfelelő biztonsággal elindítható volt a felújított Duna-hídon.

Fáradási károsodás

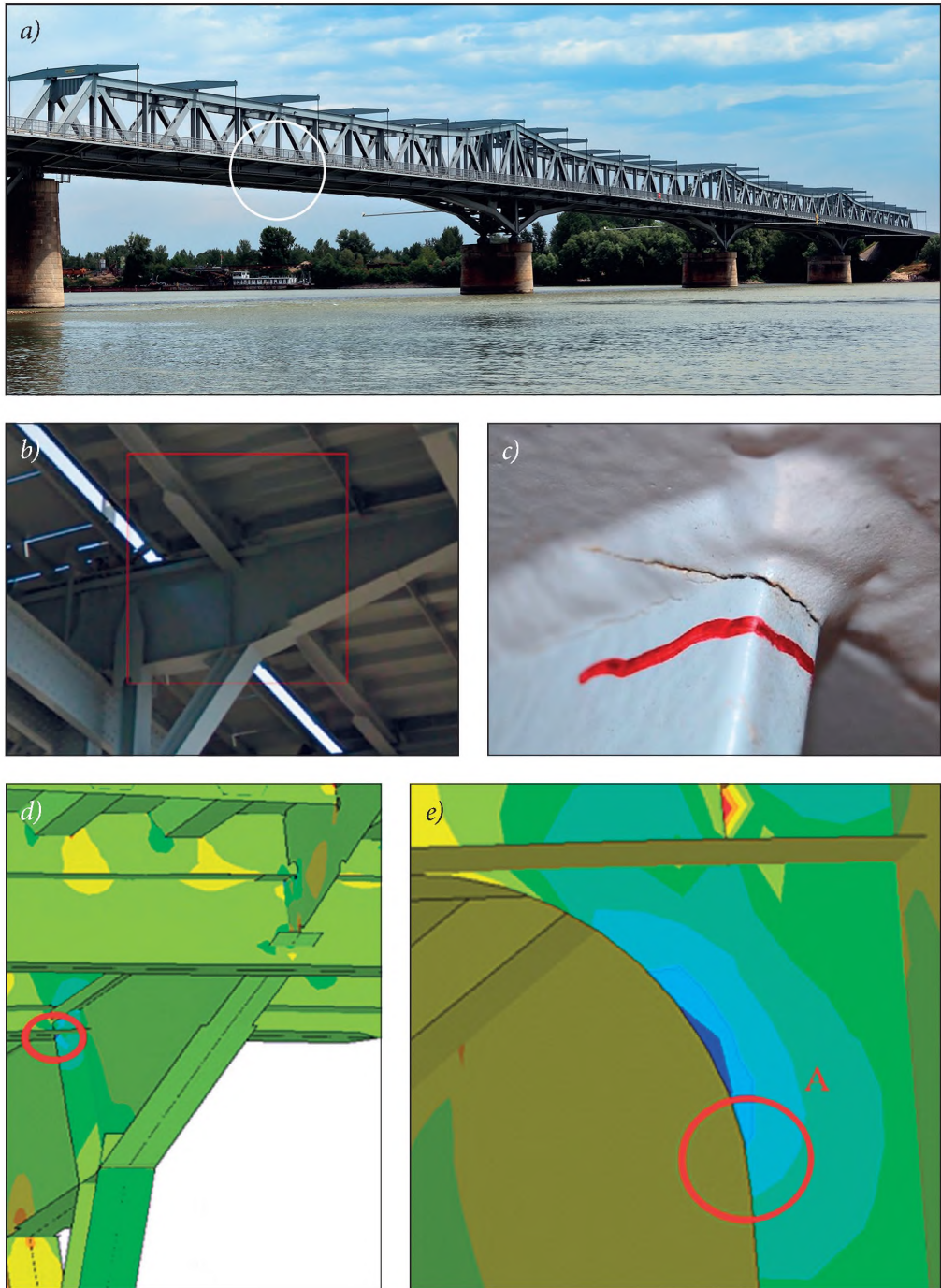
A Duna-hidak fáradási élettartamát a Szabadság híd és a bajai Türr István Duna-híd kapcsán elemeztük részletesebben, a továbbiakban az utóbbira vonatkozó vizsgálatokat ismertetem. A híd többtámaszú rácsos szerkezetű, eredetileg közös vasúti és közúti forgalmat szolgált azonos pályán, időszakos átengedéssel. 1999-ben a közúti pálya a főtartókon kívülre került, a konzolokat felfüggesztették, ilyen módon



8. ábra. a) A Deák Ferenc Duna-híd, b–c) erőbevezetési zóna vizsgálata

Forrás: a) Oravecz István, b–c) Hidak és Szerkezetek Tanszék

függetlenné vált a vasúti-közúti forgalom. Az új pályaszerkezet egy részletében lokálisan fáradt repedések keletkeztek. A pontosított numerikus modell és méretezési módszer alkalmazására volt szükség a repedések megjelenésének magyarázatára a nem szabványos kialakítású részletekben (9. ábra). Ugyanezzel a módszertannal igazolni lehetett azt is, hogy a lekerekítéssel megváltoztatott szerkezeti részlet fáradási szempontból megfelel, a híd tervezett élettartama során újabb repedésekkel nem kell számolni.



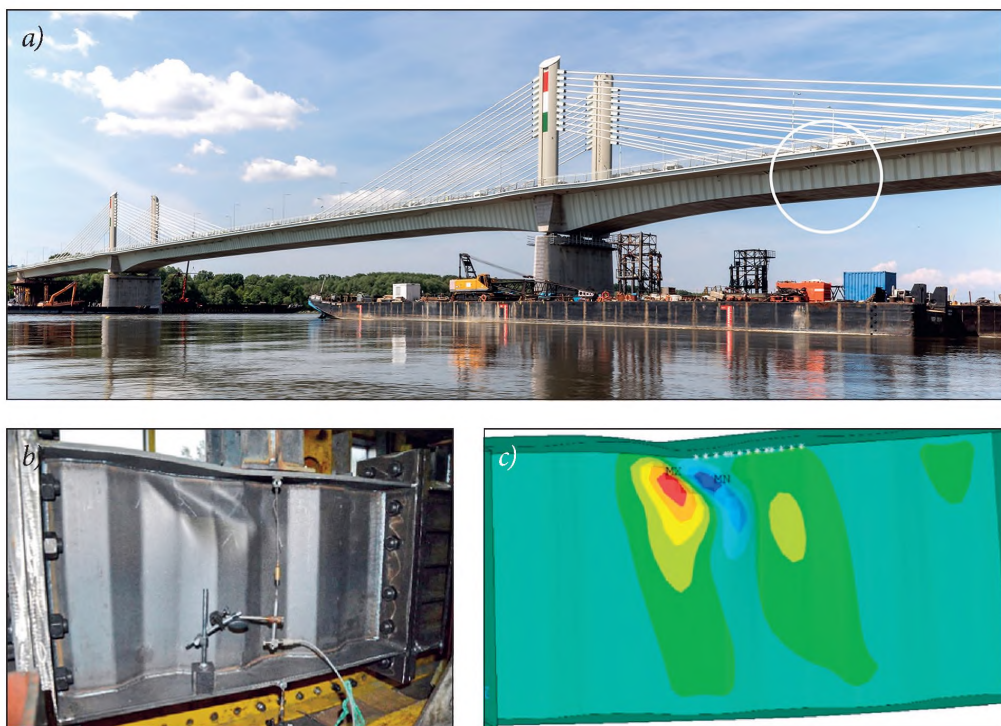
9. ábra. a) Türr István Duna-híd, b–e) fáradási vizsgálat
 Forrás: a) Oravecz István, b–e) Hidak és Szerkezetek Tanszék

Innovatív hídszerkezetek

Új Duna-hídjaink számos – nemzetközi szempontból is – újszerű megoldással valósultak meg. A tematikus összeállítás bevezetőjében már említett, korábban publikált Pentele híd és Megyeri híd mellett, az utóbbi időszak innovatív megoldásai a következő hidakban jelentek meg, a teljesség igénye nélkül:

- új M0-s Déli Duna-híd – szereléstechnológia;
- Kalocsa–Paks közötti Tomori Pál Duna-híd – szerkezeti rendszer, trapézgerincű kialakítás;
- komáromi Monostori Duna-híd – pilonkialakítás, BIM-modell;
- Osztószigeti (Robinson) gyalogoshíd – kábelcsillapító rendszer;
- tervezett Galvani úti Új Duna-híd – pályaszerkezet-pilon kapcsolat.

A fenti listában szereplő hidak közül a Monostori Duna-híd és az Osztószigeti (Robinson) híd újdonságairól külön cikkekben számolunk be az összeállításban, a továbbiakban a Tomori Pál Duna-hídnál alkalmazott innovatív megoldásról írok. A Kalocsát Pakssal összekötő átkelő egy újszerű, úgynevezett feszített-függesztett rend-



10. ábra. a) Tomori Pál Duna-híd, b–c) a trapézlemez gerinc vizsgálata
Forrás: a) Oravecz István, b–c) Hidak és Szerkezetek Tanszék

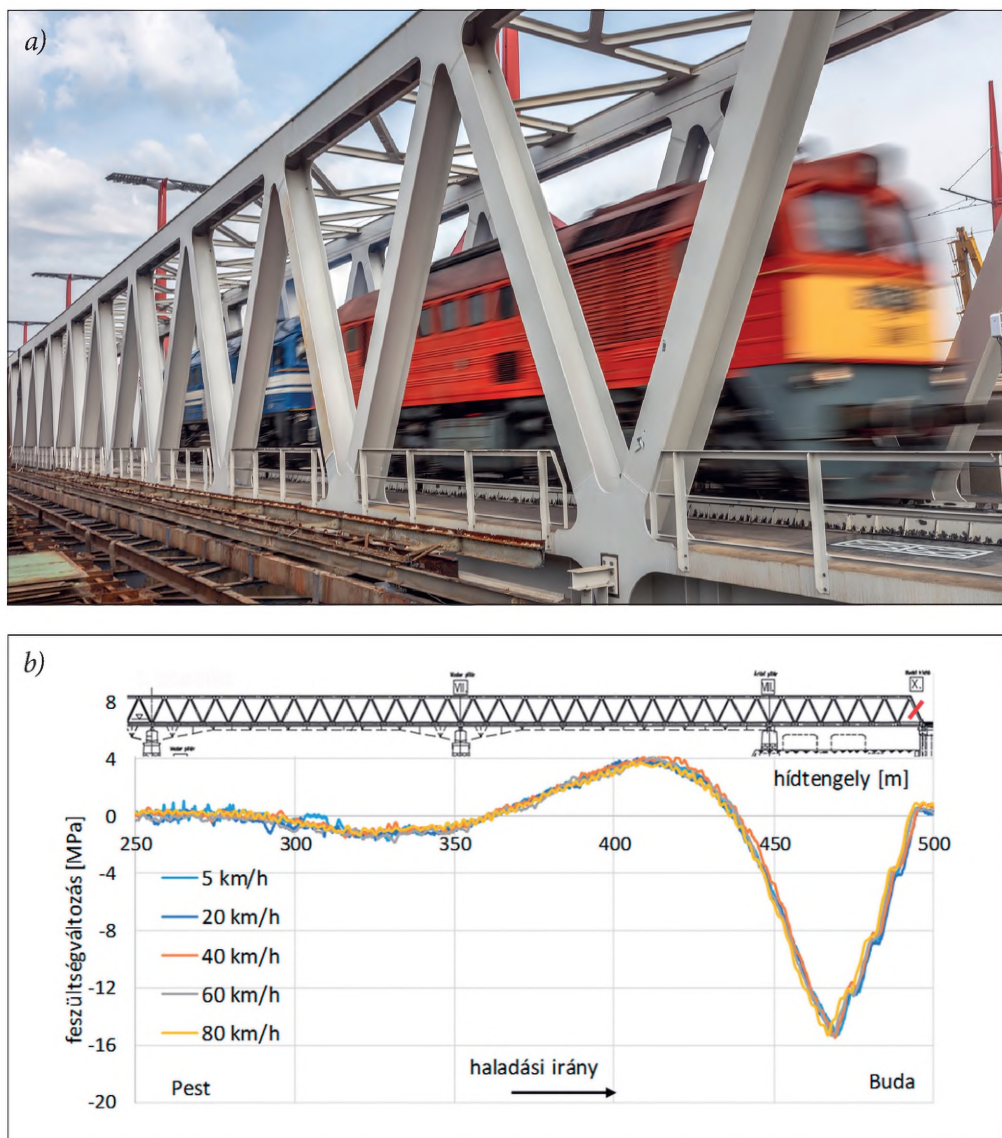
szerű híd. A szekrény keresztmetszetű kialakítás trapézlemez gerinccel készült. A szegedi Móra Ferenc Tisza-híd több mint tíz évvel korábban hasonló szerkezeti rendszerrel készült. Akkor még kevés alkalmazási tapasztalat volt, ezért a tervezőkkel együttműködve több kutatást végeztünk a trapézlemez gerinccel szerkezeti viselkedésének megismerésére. A vizsgálatok egyrészt a fáradásra, másrészt a lemezhorpadásra vonatkoztak (10. ábra). A kutatásokat laboratóriumi kísérletek alapozták meg. A viszonylag kisszámú próbatesten végrehajtott vizsgálatokat – validált numerikus modellek alkalmazásával – számítógépes szimulációval, többes mintára terjesztettük ki. Ezek elemzésével a kísérleti és numerikus vizsgálatok eredménye így nem csupán a két híd megvalósítását támogatta közvetlenül, hanem széles körű nemzetközi publikálás után a kidolgozott új méretezési módszerek beépültek a szabványos előírásokba is. Ebben a témában folytatódnak a kutatások – az összeállítás következő cikkében bemutatott – MTA–BME Lendület Kutatócsoportban.

Próbaterhelés, monitoring

Az előadásban több híd példáján is kitértem a helyszíni monitoring- és terheléses vizsgálatokra, amelyekkel a hidak valóságos viselkedését elemezve támogattuk a tervezést és kivitelezést, valamint validáltuk a pontosított modelljeinket. A próbaterhelés a hidak életében az egyik legfontosabb mérföldkő: ekkor kapják meg az első terhelésüket, és tipikusan ez a legnagyobb terhelés az élettartamuk során. A viszonylag nagy teher – a tervezési teher kb. 80%-a – hatására vizsgáljuk a híd: elemezhető, mi a modell és a valóság viszonya, azaz a modell megfelelő módon közelíti-e a valóságos szerkezet viselkedését. A tényleges szerkezeteken végrehajtott, teljes léptékű kísérletek így nagyon jól felhasználhatók a numerikus modellek validálására is. A statikus próbaterhelés mellett elvégzett dinamikus vizsgálatokkal a hídszerkezet válaszait különböző sebességgel mozgó teherre elemezzük. Különösen érdekesek a gyalogoshidak dinamikus próbái, amikor a gyalogoscsoportok okozta rezgéseket mérésrel vizsgáljuk, és értékeljük az áthaladók szubjektív komfortérzetét is. 2000 óta 15 Duna-hídon hajtottunk végre próbaterhelést, és volt olyan híd, amelyen többször is (például a Szabadság hídon a felújítás előtt és után is). Több hídon terveztünk, kiépítettünk és működtettünk rövidebb-hosszabb ideig helyszíni monitoringrendszereket is. A székfoglaló előadásban három különböző funkciójú hídon – közúti, vasúti és gyalogos – illusztráltam a próbaterhelés folyamatát, a 11. ábrán példaként az új Déli Összekötő Vasúti Duna-híd dinamikus vizsgálatát szemléltetem.

Konklúzió

Az utóbbi négy évtized tartószerkezeti fejlesztésének eredményei lehetővé tették az acélszerkezeti méretezés végrehajtását a – pontosított modellekkel és nemlineáris analízissel meghatározott – valóságos szerkezeti viselkedés alapján. A kidolgozott módszertan méretezésméleti háttere és gyakorlati alkalmazása kellő tapasztalatot



11. ábra. a) Déli Összekötő Vasúti Duna-híd próbaterhelése b) dinamikus vizsgálat
 Forrás: a) Oravecz István, b) Hidak és Szerkezetek Tanszék

nyújtott egy új nemzetközi szabvány kidolgozásához. A Duna-hidakhoz kapcsolódó kutatási feladatok megoldása – az ipari szakemberek támogatása mellett – az új eljárás szabványosítását is támogatta.

Kutatásaink nem jöhettek volna létre tanszéki elődeink munkássága nélkül, és nagy öröm számomra, hogy fiatal kollégáim számos esetben innovatív módon fejlesztik tovább az eredményeinket.

Irodalomjegyzék

- Halász Ottó (1987). *Tartószerkezetek méretezése: modell és valóság. Akadémiai székfoglaló 1983. február 23. Értekezések, Emlékezések.* Budapest: Akadémiai Kiadó.
https://real-eod.mtak.hu/3409/1/MTA_ErtekezesekEmlekezesek_058_000810336.pdf
- Kherndl Antal (1891). „A Lánchidak merevítő tartóinak grafikai elméletéről. Kherndl Antal l. t. székfoglaló értekezésének kivonata.” *Mathematikai és Természettudományi Értesítő*, 9, 54–67.
https://adt.arcanum.com/hu/view/MatEsTtudErtesito_09/?pg=2&layout=s
- Korányi Imre (1965). *Stabilitási kérdések a mérnöki gyakorlatban. Kihájlás a síkban.* Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Kossalka János (1941). *Tartók sztatikája és kinematikája.* Budapest: M. Kir. József Nádor Műegyetem, Mech. Techn. Intézet Nyomdája.
- Szabó János – Roller Béla (1971). *Rúdszerkezetek elmélete és számítása.* Budapest: Műszaki Könyvkiadó.

MTA–BME Lendület Új Generációs Acélhidak Kutatócsoport

MTA–BME Lendület New Generation Steel Bridges Research Group

Kövesdi Balázs

az MTA doktora, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kovesdi.balazs@emk.bme.hu

Összefoglalás

2021. szeptemberben kezdte meg működését az MTA–BME Lendület Új Generációs Acélhidak Kutatócsoport a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszékén. A kutatási program az új generációs acélhidak tervezési metodikájának felülvizsgálatát és megújítását tűzte ki célul. A kutatási program a következő három területre fókuszál: (1) az új generációs acélhidak méretezéselméleti háttérének pontosítása, (2) az új gyártástechnológiák méretezési eljárásokban való figyelembevétele és (3) a tradicionális méretezési módszerek megújítása az új technológiai lehetőségek figyelembevételével. Ebben a cikkben kutatási területenként mutatjuk be a kutatócsoport főbb célkitűzéseit és eddigi eredményeit.

Abstract

The MTA–BME Lendület New Generation Steel Bridges Research Group at the Department of Structural Engineering of the Budapest University of Technology and Economics started its activities in September 2021. The research programme aims to investigate and renew the design methods and theoretical background of new generation steel bridges. The research group focuses on three areas: (1) refining the design theory background for new generation steel bridges, (2) incorporating new manufacturing technologies into the design procedures, and (3) renewing traditional design methods to take into account innovative technological solutions. This article presents the main objectives and achievements of the research group in all three research areas.

Kulcsszavak: Lendület kutatócsoport, acélhidak, méretezéselmélet

Keywords: Lendület Research Group, steel bridges, dimension theory

Bevezetés

A Lendület kutatócsoport kutatási programjának fő célkitűzése az elmúlt évek hídépítési technológiai újításainak méretezéselméletbe való átültetése, mely jelentős gazdasági előnyöket hozhat az építőiparban a tradicionális méretezési eljárásokhoz képest. A kutatócsoport által definiált új generációs acélhidak az anyagtudomány, a gyártástechnológia, a méretezéselmélet és az új szerkezeti rendszerek innovatív fejlesztéseiből profitálnak. A kutatási program globális célja az elmúlt évek építőipari innovációjának során elért fejlesztések beépítése a tudományos elveken alapuló méretezési módsze-

rekbe az új generációs acélhidak esetén. A második generációs Eurocode-szabványok (tervezett megjelenésük 2024–2026) célja, hogy ezeket a kutatási eredményeket beépítse a mindennapi tervezési gyakorlatba. A tervezett kutatási program részei azok a közös európai kutatási tevékenységek is, melyek célja a szabványfejlesztés, ami lehetővé teszi az új eredmények nemzetközi és hazai gyakorlati alkalmazását is.

A kutatási programunk a következő négy fókuszterületre összpontosít: (1) nagy szilárdságú acélszerkezetek méretezéselmélete, (2) új gyártási módszerek és azok méretezéselméletben való figyelembevétele, (3) acélszerkezetek numerikus modell alapú tervezése és (4) új, innovatív szerkezeti rendszerek méretezési módszereinek fejlesztése. A kutatócsoport magját – Kövesdi Balázs vezetésével – négy tehetséges fiatal kutató alkotja: Somodi Balázs, Kollár Dénes, Jáger Bence és Budaházy Viktor, valamennyien a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Hidak és Szerkezetek Tanszék adjunktusai. A kutatócsoporthoz szervesen hozzátartoznak a PhD-hallgatók: Bärnkopf Erzsébet, Mohammad Radwan (sikeres védés 2024-ben), Horváth András és Pap Tibor. Ezt a csoportot egészítik ki MSc-diplomázó és TDK-zó hallgatók, akikkel évente frissül a kutatócsoport, és akik biztosítják a PhD-hallgatói utánpótlást is. Az elmúlt három évben 10 TDK-zó és 16 MSc-diplomázó hallgató munkája kötődött a kutatócsoport működéséhez.

Különösen nagy szilárdságú acélok méretezéselmélete

A különösen nagy szilárdságú acélanyagok (S500–S960 minőségek) hídépítési alkalmazása a nemzetközi gyakorlatban növekvő tendenciát mutat, különösen nagy fesztávú hidak esetén, erre egy példa az 1. ábrán látható. Széles körű elterjedésüket azonban korlátozza a hiányos méretezési háttér.



1. ábra. Tokyo Gate híd – nagy szilárdságú acélrácsos tartó

Forrás: Daisuke Tashiro – Flickr: Tokyo Gate Bridge, Wikipedia CC BY-SA 2.0 licenc

A gazdaságos alkalmazás egyik akadálya, hogy a normál szilárdságú acélszerkezetekre kidolgozott méretezési módszerek gyakran túl konzervatívak, illetve sok esetben nagy szilárdságú acélszerkezeteknél nem is alkalmazhatók. Ebből a szempontból a kritikus határállapotok a globális kihajlás és a lokális lemezhorpadás, valamint a fáradás. A kutatócsoport célja a kihajlási és lemezhorpadási méretezési módszerek szilárdsági osztálytól független kidolgozása, a korábbi kutatási eredmények általánosítása, mely gazdaságos alkalmazhatóságot és kellő pontosságot biztosít a nagy szilárdságú acélszerkezetek esetén is. Az elmúlt évek kutatási eredményeként egy átfogó numerikus paramétervizsgálat keretében bemutattuk, hogy az acél anyag szilárdsági osztálya milyen mértékben befolyásolja a zártszelvények lokális horpadási és globális kihajlási ellenállását. Megvizsgáltuk, hogy a szelvény oldalaránya, illetve az I-szelvények övlemez és gerinclemez méreteinek aránya hogyan befolyásolja ezen stabilitási ellenállásokat. Numerikus szimulációkkal igazoltuk, hogy a zártszelvényű nyomott rudak lokális horpadási ellenállásának meghatározására a jelenleg alkalmazott Winter-görbe-alapú méretezési képlet nem alkalmazható, és megadtunk egy új függvényt, amely pontosabban adja meg a horpadási ellenállás értékét. A vizsgálatainkat S235–S960 szilárdsági osztályú szelvényeken végeztük el, és olyan méretezési görbét javasoltunk, mely szilárdsági osztálytól függetlenül alkalmazható.

Zártszelvényű nyomott rudak méretezésének témájában csatlakoztunk ahhoz az új nemzetközi kutatási trendhez, amely a numerikusmodell-alapú méretezési eljárásokban a szükséges helyettesítő geometriai imperfekció meghatározásával foglalkozik. Ismert, hogy az eddigiekben kidolgozott imperfekció amplitúdója a geometriailag nemlineáris, de anyagilag lineáris számítási eljárásokhoz lett kidolgozva, és emiatt változatlan formában nem alkalmazható az anyagilag és geometriailag nemlineáris számításokhoz. Numerikus paramétervizsgálat keretében meghatároztuk, hogy négyzetes zártszelvények, valamint téglalap szelvények esetén milyen nagyságú helyettesítő geometriai imperfekcióra van szükség a kihajlási ellenállás pontosabb, és méretezéseméleti alapokon helyes meghatározására. Kidolgoztunk egy képletet, mely a vizsgált szelvények esetén megadja a karcsúság függvényében a szükséges imperfekció értékét. Ezzel egy szilárdsági osztályokon átívelő, általános megoldást sikerült adnunk a helyettesítő geometriai imperfekció felvételének módjára.

A hibrid gerendák újszerű, az ipari gyakorlatban ritkán alkalmazott szerkezetek, melyek méretezésére csekély szakirodalmi adat és kutatási eredmény áll rendelkezésre. A hibrid tartók gerinclemezei általában normál szilárdságú acélból, övlemezei nagy szilárdságú acélból készülnek. Néhány svédországi gyakorlati alkalmazástól és kutatási eredménytől eltekintve ezek a szerkezettípusok új megoldások az acélhidak területén, méretezésük elméleti háttere hiányzik a szabványos méretezési eljárásokból. A kutatócsoport célja ezen gerendatípus hídépítési célú méretezéseméleti hátterének kidolgozása, valamint az alkalmazási lehetőségük demonstrálása és tesztelése laboratóriumi kísérleti program és numerikus szimulációk alapján. A hibrid tartók gazdaságos tervezése megköveteli a részleges képlékenyedés figyelembevételét

a határállapot-alapú tervezésben, ami jelenleg hidaknál nem, vagy csak korlátozottan megengedett. A kutatás célja annak kidolgozása, hogyan lehet figyelembe venni a teherbírás határállapotban a részleges képlékenyedést, és milyen kiegészítő vizsgálatokkal (maximális megengedett képlékeny nyúlásra vonatkozó korlátok) kell igazolni ezen gerendák hídépítési alkalmazhatóságát.

Ebben a témában megterveztünk és végrehajtottunk egy átfogó kísérleti kutatási programot, melynek keretében különböző keresztmetszeti osztályú és hibridségi fokú acélgerendák teherbírását vizsgáltuk. A végrehajtott kísérleti program hiánypótló a nemzetközi szakirodalomban, jelentős új tudományos eredményekkel. A kísérleti és numerikus vizsgálatainkkal bemutattuk, hogy a hajlítási ellenállás Eurocode-alapú, hagyományos acéltartókra kidolgozott méretezési módszere milyen korlátokkal és pontossággal alkalmazható hibrid szerkezetekre. Továbbá a hibrid tartók nyírási horpadási méretezésére új méretezési eljárást dolgoztunk ki, amely figyelembe veszi az öv- és gerinclemez folyáshatára közötti különbséget.

Gyártástechnológiai újítások méretezéselméleti vizsgálatai

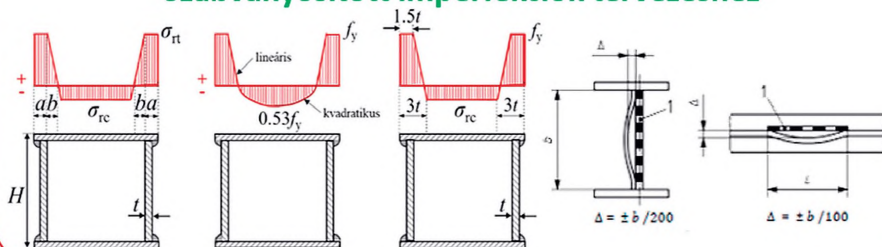
A jelenlegi tervezési gyakorlatban alkalmazott méretezési módszerek csak korlátozottan tudják figyelembe venni a gyártástechnológiai sajátosságokat. A fejlettebb gyártástechnológiával készülő szerkezetek viselkedése kedvezőbb lehet, ami az ellenállás és a tartósság növekedését eredményezheti. A kutatási célunk ezen a területen a (1) fejlett, numerikus szimuláción alapuló tervezési módszerek és ezek elméleti hátterének kifejlesztése, valamint (2) hegesztési szimuláción alapuló méretezési módszerek alkalmazása tipikus hídépítési szerkezeti megoldások esetén. Az új méretezési módszertant a 2. ábra foglalja össze.

Az általunk javasolt eljárás hiányzik a szerkezettervezési gyakorlatból és a szabványosított méretezési módszerekből. Kutatási programunk célja a hegesztésszimuláción alapuló numerikus számítások integrálása a teherbírás-számításba. A kutatási program keretében egyrészt kidolgozunk sajátfeszültségi modelleket és a különböző szerkezeti elemek geometriai imperfekcióit, melyeket figyelembe lehet venni a pontosított tervezési modellekben, vagy akár a virtuális gyártmányokon is lehet szimulációt végrehajtani az ellenállás pontosabb meghatározására. A kutatási program keretében egy laboratóriumi mérési programot hajtottunk végre különböző módon gyártott zártszelvényeken, melyeken a hegesztési eljárásból származó sajátfeszültségeket és geometriai imperfekciókat határoztuk meg. Majd numerikus szimulációval végrehajtott paramétervizsgálat eredményeként gyártásspecifikus sajátfeszültségi modelleket dolgoztunk ki négyzetes hegesztett zártszelvények esetére. A hegesztésszimulációt összekapcsolva a teherbírás vizsgálatával a szerkezet lokális horpadási és kihajlási ellenállását a hegesztéstechnológia függvényében tudtuk elemezni. A kutatási program továbbá tartalmazza a hegesztésszimuláción alapuló vizsgálatok alkalmazásának kiterjesztését komplex hídszerkezetekre is, melyet a 3. ábra illusztrál.

Gyártásszimuláció eredménye Virtuális gyártmány

Sajátfeszültség és geometriai imperfekciók

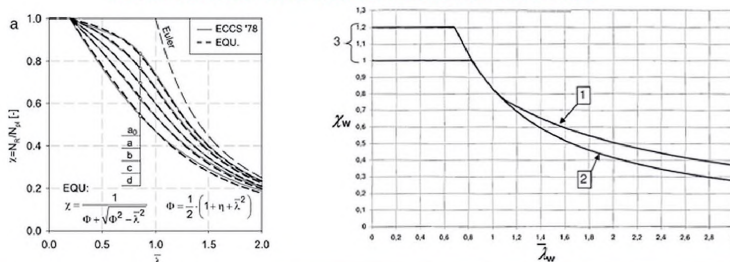
Szabványosított imperfekciók tervezéshez



Teherbírási szimuláció (GMNIA) eredménye Virtuális kísérlet

Szabványosított imperfekciók alkalmazása

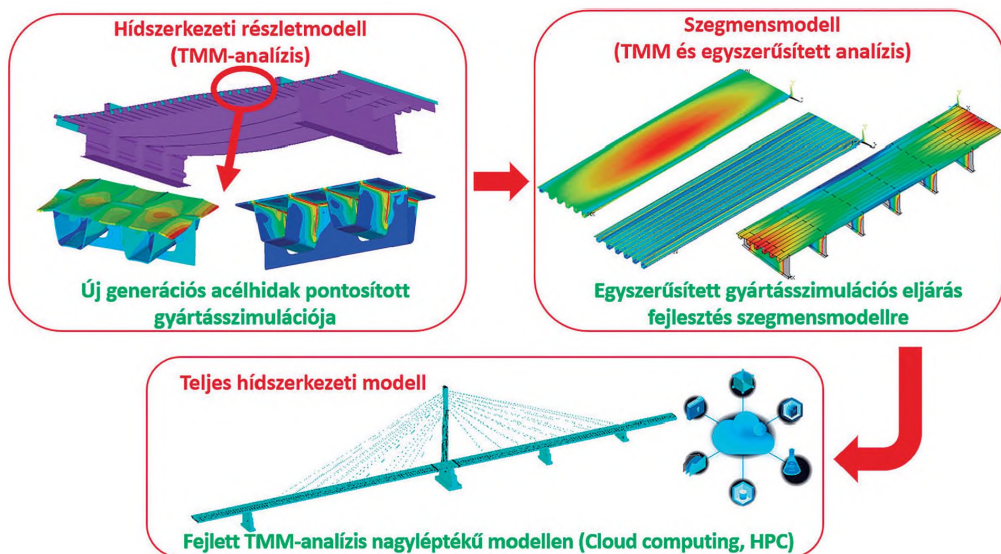
teherbírás karakterisztikus értéke



2. ábra. Hegesztésszimuláción alapuló numerikus tehervizsgálatok sematikus ábrája

Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Napjainkban a nagy számítási erőforrások igénye miatt a hegesztésszimulációt általában kisléptékű, lokális modellekben alkalmazzák. A teljes léptékű modelleknel egyszerűsített elméleteket alkalmaznak, melyek pontossága sok esetben megkérdőjelezhető. A kutatási programunk célja egy olyan módszertan elméleti alapjainak kidolgozása, amely lehetővé teszi komplex termometallurgiai és mechanikai elemzések alkalmazását nagyléptékű numerikus modelleken is. Az első eredményeink a komáromi Monostori Duna-híd acél pályaszerkezetének gyártásához kötődnek, amelyen kidolgoztuk és bemutattuk az új eljárás alkalmazását.



3. ábra. Hegesztésszimuláción alapuló vizsgálatok kiterjesztése komplex hídszerkezetekre
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Numerikusmodell-alapú méretezés

A csoport harmadik kutatási területe az új, numerikusmodell-alapú méretezéssel foglalkozó Eurocode-szabvány (prEN 1993-1-14) háttéranyagának kidolgozása, az új szabványos eljárások méretezéselméleti hátterének pontosítása. Az európai trendekhez kapcsolódó kutatásaink két fő fókuszterületre irányulnak: (1) a feszültségkoncentrációs zónák vizsgálata, valamint (2) a numerikus modellek bizonytalanságának meghatározása. A tervezési gyakorlatban egyre pontosabb és részletesebb numerikus modellek kerülnek alkalmazásra, melyek sok esetben megmutatják a szerkezetekben fellépő feszültségkoncentrációs zónákat. Az eddigi nemzetközi szakirodalomból és szabványokból hiányzik ezen zónák numerikus modellezéssel segített teherbírás-vizsgálatban való figyelembevétele. A pontosított numerikus modell által meghatározott feszültségkoncentráció a legtöbb esetben együttesen tartalmazza a valós fizikai feszültségkoncentrációt és a numerikus szingularitást. A kutatási program keretében méretezési módszereket és tervezési ajánlásokat dolgozunk ki a fejlett héj- és testelemes modellek feszültségkoncentrációs zónáinak figyelembevételére, valamint a numerikus szingularitás és a valós feszültségkoncentráció szétválasztására.

Elemezzük továbbá a feszültségkoncentráció teherbírásra gyakorolt hatását különböző határállapotokban, annak eldöntésére, hogy milyen feltételek mellett hanyagolható el a valós feszültségkoncentráció a méretezésben, illetve milyen kiegészítő ellenőrzéseket kell a tervezési gyakorlatban megtenni. Az eddigi vizsgálatainkat

numerikus szimulációs és törésmechanikai módszerekkel is elvégeztük. Kidolgoztunk egy méretezési módszert, mely a feszültségkoncentrációs zónában a numerikus szingularitás leválasztása után a szerkezet megfelelőségét feszültséghatár helyett alakváltozás-határ alapján ellenőrzi. Jelenleg az alakváltozáshatár értékének pontosított meghatározásán, valamint a méretezési eljárás különböző határállapotokban való alkalmazhatóságának vizsgálatán dolgozunk.

A numerikusmodell-alapú tervezés témájának másik kiemelt kutatási iránya a diszkrét modell pontosságának ellenőrzése, valamint a modellbizonytalanság méretezésméletileg helyes figyelembevétele a közvetlen teherbírás-vizsgálatban. Ennek egyik lehetséges módja a validáció keretében meghatározandó numerikus modell-től függő parciális tényező, a modellfaktor alkalmazása. A modellfaktor definíciója a közvetlen teherbírás-vizsgálat szabványosítási folyamatának keretében került bevezetésre, meghatározásának módja azonban jelenleg kiforratlan, és további kutatómunkát igényel. A kutatócsoport ezt a munkát folytatja nemzetközi partnerekkel együttműködve. A kutatás célja a modellfaktor definíciójának és méretezésméleti szerepének tisztázása, valamint meghatározása adott numerikus modellek és tönkremeneteli módok esetére.

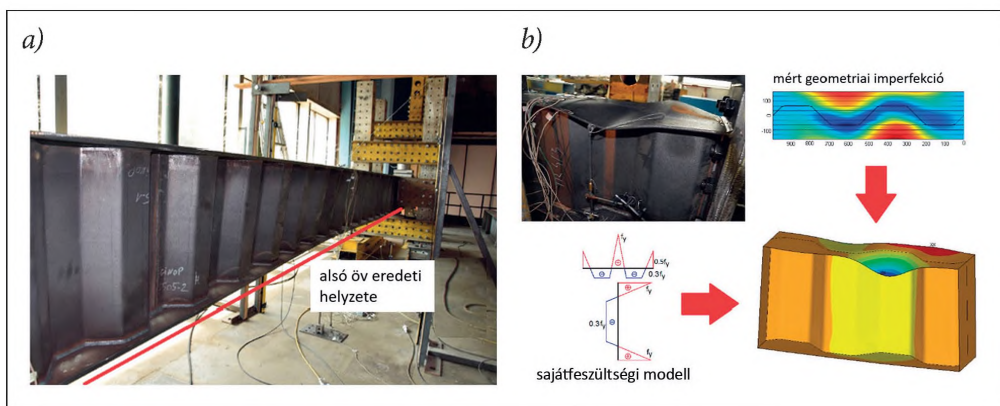
A kutatómunka során a Lendület programban elvégzett kísérleti eredményeket felhasználva a hegesztett gerendák hajlítási ellenállására vonatkozóan mutattuk be a modellfaktor meghatározásának módját, majd determinisztikus és sztochasztikus vizsgálatokkal igazoltuk ennek a helyességét. A különböző tönkremeneteli módokra végrehajtott kísérleti és numerikus vizsgálatok alapján igazoltuk, hogy a modellfaktor meghatározására javasolt jelenlegi eljárás a biztonság oldalán van. Megbízhatóságielmélet-alapú számításokkal is igazoltuk, hogy a numerikus modellel végzett közvetlen teherbírás-vizsgálat a modellfaktor alkalmazásával kellően biztonságos.

A numerikusmodell-alapú méretezés témájához kapcsolódóan a kutatócsoport aktívan részt vesz az új, prEN 1993-1-14 méretezési szabvány és annak háttérdocumentumaként szolgáló „Technical Report” (CEN/TR 1993-1-141: Background and Explanations on EN 1993-1-14 Design Assisted by Finite Element Analysis) fejlesztéséért felelős nemzetközi bizottság munkájában. Kutatási eredményeink jórészt felhasználásra kerültek ennek a szakmai anyagnak az összeállításában is.

Új szerkezeti kialakítások méretezési módszerei

Az innovatív szerkezeti kialakításokkal készülő új generációs acélhidak szerkezeti viselkedése jelentősen eltér a hagyományos szerkezetektől, így ezek a hagyományos hidakhoz képest fejlettebb számítási módszereket igényelnek. A kutatási program keretében trapézlemez gerincű tartókat vizsgálunk (4. ábra), melyek napjainkban terjedőben vannak a hídépítésben, a trapézlemez számos kedvező tulajdonságának köszönhetően. Magyarországon eddig a Móra Ferenc Tisza-híd, illetve a 2024-ben átadott, Kalocsa és Paks közötti Tomori Pál Duna-híd készült ilyen szer-

kezettel. A trapézlemez gerincű tartók szerkezeti viselkedésének megértésére és méretezési módszereinek fejlesztésére számos korábbi nemzetközi szintű vizsgálat készült Magyarországon. A Dunai László, Kövesdi Balázs és Jáger Bence alkotta kutatócsoport 2010–2020 között is intenzív kutatásokat végzett ezen hídtypus (1) speciális feszültségeloszlásának, (2) beroppanási ellenállásának, (3) övhorpadási ellenállásának és (4) a hajlítás-nyírás-keresztirányú erő együttes hatásának vizsgálatára. A jelen kutatási program két további területre fókuszál: (1) a kifordulási ellenállás meghatározására, valamint (2) nagy szilárdságú acél alkalmazására a trapézlemez gerincű tartókban. Trapézlemez gerincű tartók esetén a hibrid szerkezeti kialakítás különösen aktuális, mivel az ún. harmonikahatás következtében a gerinclemez nem, vagy csak nagyon korlátozott mértékben vesz részt a gerenda hosszirányú teherviselésében. Így ezen szerkezeti rendszerek esetén különösen gazdaságos lehet a gerinclemez normál szilárdságú acélból, az övlemezeket pedig nagy szilárdságú acélból készíteni, amire eddig nem készültek kutatások. A trapézlemez gerincű tartók a hullámzó gerinclemez következtében kifordulási szempontból a síklemez gerincű és a zártszelvényű tartók között helyezkednek el, melynek kifordulási ellenállása lényegesen nagyobb lehet a síklemez gerincű tartókéhoz képest. A kifordulási kritikus nyomaték és a kifordulási ellenállás meghatározására azonban jelenleg nincs kellően megalapozott méretezési módszer, illetve csak nagyon kisszámú laboratóriumi vizsgálat található a nemzetközi szakirodalomban.



4. ábra. Trapézlemez gerincű tartók a) kifordulási és b) övlemez-horpadási tönkremenetele
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A trapézlemez gerincű tartók a hagyományos I-tartókhoz képest jelentősen különböző gyártástechnológiával készülnek, emiatt a kifordulási ellenállás meghatározásához szükséges geometriai imperfekció, sajátfeszültség-eloszlás, valamint helyettesítő geometriai imperfekció hiányzik a szabványokból és a szakirodalomból. Kísérleti eredmények alapján validált numerikus modellel meghatároztuk a szükséges imperfekciókat két modellezési szinthez: (1) helyettesítő kezdeti alakhiba és (2) kezdeti alakhiba

és a gyártási sajátfeszültség-rendszer. Meghatároztuk a méretezésben közvetlenül alkalmazható kifordulási görbét, mind determinisztikus numerikus modell, mind sztochasztikus számítások alapján is. Továbbá a kutatócsoport a hiánypótló vizsgálatok során paramétervizsgálat keretében bemutatta a hibrid trapézlemez gerincű tartók alkalmazhatóságának feltételeit és azt, hogy a nem hibrid trapézlemez gerincű tartókra kidolgozott méretezési eljárás milyen hibridségi arányszámig alkalmazható módosítás nélkül.

Az eredmények publikálása

A kutatócsoport nagy hangsúlyt fektet a tudományos eredmények hazai és nemzetközi szintén való megmérettetésére és eredményeinek publikálására. A kutatócsoport elmúlt hároméves működése során összesen tíz D1-es, hat Q1-es és több mint tíz Q2/Q3 minősítésű nemzetközi folyóiratcikket publikált, valamint négy magyar nyelvű cikket is megjelentetett hazai folyóiratokban.

Az eddigi eredményeinkből néhány fontosabb publikáció:

- Bärnkopf, Erzsébet – Jáger, Bence – Kövesdi, Balázs (2022). „Lateral-Torsional Buckling Resistance of Corrugated Web Girders Based on Deterministic and Stochastic Nonlinear Analysis”. *Thin-Walled Structures*, 180, 109880.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109880>
- Bärnkopf, Erzsébet – Kövesdi, Balázs – Dunai, László (2023). „Investigation of Stress Concentration Zones in FEM-Based Design of Welded Plated Structures”. *Buildings*, 13/4.
<https://doi.org/10.3390/buildings13041057>
- Jáger, Bence – Dunai, László – Kövesdi, Balázs (2022). „Lateral-torsional Buckling Strength of Corrugated Web Girders – Experimental Study”. *Structures*, 43/1, 1275–1290.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.053>
- Kollár, Dénes et al. (2022). „Assessment of Deformation in Bridge Bearing Areas Using Measurements and Welding Simulation”. *Journal of Constructional Steel Research*, 194, 107305.
<https://doi.org/10.1016%2Fj.jcsr.2022.107305>
- Radwan, Mohammad – Kövesdi, Balázs (2023). „Equivalent Geometrical Imperfections for Local and Global Interactive Buckling of Welded Rectangular Box-Section Columns”. *Thin-Walled Structures*, 192, 111140.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111140>
- Radwan, Mohammad – Kövesdi, Balázs (2024). „Enhanced Buckling Reduction Factors Using Amplified Imperfections for Existing Steel Structures”. *Journal of Constructional Steel Research*, 214, 108478.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108478>
- Somodi, Balázs – Bärnkopf, Erzsébet – Kövesdi, Balázs (2023). „Applicable Equivalent Bow Imperfections in GMNIA for Eurocode Buckling Curves – SHS, RHS and Welded Box Sections”. *Journal of Constructional Steel Research*, 204, 107860.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107860>

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéknek, különösképpen Dunai László professzor úrnak, aki irányítása alatt nevelkedett a kutatócsoport minden tagja, és aki folyamatosan figyelemmel kíséri és támogatja kutatómunkánkat. A Tanszék és az Építőmérnöki Kar olyan befogadó intézmény, ahol magas színvonalú kutatómunkát lehet végezni, és nemzetközi szinten is jegyzett kutatási eredményeket lehet elérni. Köszönetünket fejezzük ki a Magyar Tudományos Akadémiának, hogy lehetővé teszi a kutatócsoport anyagi finanszírozását és a Lendület programon keresztül erkölcsi megbecsülést is ad a hídépítési témájú acélszerkezeti kutatásoknak. Fontos eredménynek tartjuk, hogy a kutatócsoport vezetője sikeresen védte meg a Lendület kutatás témájában készült MTA doktori disszertációját 2023 januárjában.

A Széchenyi lánc hídfelújítása: korróziós állapotmérés és kockázatelemzés

Rehabilitation of the Széchenyi Chain Bridge: Corrosion Assessment and Risk Analysis

Dunai László¹ – Horváth Adrián² – Kollár Dénes³ – Kövesdi Balázs⁴ – Szigeti Zoltán⁵ –
Vigh László Gergely⁶

¹ az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
dunai.laszlo@emk.bme.hu

² ipari professzor, Főmterv Zrt., Budapest;
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
horvath.adrian@fomterv.hu

³ PhD, adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kollar.denes@emk.bme.hu

⁴ az MTA doktora, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kovesdi.balazs@emk.bme.hu

⁵ műszaki igazgató-helyettes, felelős tervező, MSc Kft., Budapest
szigeti@mschu.hu

⁶ egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
vigh.laszlo.gergely@emk.bme.hu

Összefoglalás

A Széchenyi lánc hídfelújítása közel 175 éves történeti szerkezetünk, nemzeti szimbólumunk, amelynek legutóbbi felújítására 2021–2023 között került sor. A híd főtartója, a lánckötegek jelentős része több mint százéves, a lánc elemeket összekötő csapok elfordulási képessége az előrehaladott korrózió és a jelentős súrlódás miatt kérdéses volt, ami jelentősen befolyásolja a lánc elemek és a felfüggőrendszer statikai viselkedését. Ezért a felújítási folyamathoz kapcsolódva a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék a tervezőkkel (Főmterv Zrt. és MSc Kft.) együttműködve megvizsgálta a lánc elemek csapjai elfordulási képességének, a lánc elemek korróziós állapotának a teherbírási gyakorlat hatásait. További tervezői és kutatói együttműködést igényelt a lehorgonyzó tömbön átvezetett nyomócsővezeték szerkezetre gyakorolt hatásának vizsgálata. A cikkben ezen két, a híd felújításához kötődő vizsgálat eredményét mutatjuk be.

Abstract

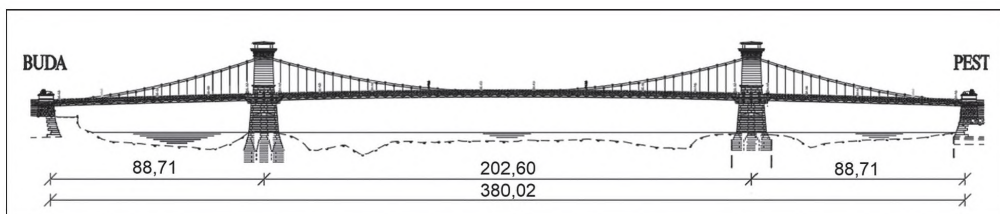
The Széchenyi Chain Bridge is an almost 175-year-old historical structure, a national symbol, which was last rehabilitated between 2021 and 2023. The chain system of the bridge is more than 100 years old, and the rotation capacity of the pins was questionable due to advanced corrosion and significant friction, which considerably affected the static behaviour of the chain elements and the entire suspension system. Therefore, in connection with the renovation process, the Department of Structural Engineering of the Budapest University of Technology and Economics in cooperation with the designers (Főmterv Co. and MSc Ltd.) investigated the rotation capacity of the pins of the chain elements and the corrosion grade of the chain bars. Further design and research collaboration was required to investigate the impact on the structure of the pressure pipeline passing through the bridge foundation block. This paper presents the results of these two investigations in relation to the rehabilitation of the bridge.

Kulcsszavak: Széchenyi lánchíd, numerikus modellezés, korrózió, megbízhatósági analízis

Keywords: Széchenyi Chain Bridge, numerical modelling, corrosion, reliability analysis

Bevezetés

A közel 175 éves Széchenyi lánchíd (1. ábra) nemzeti szimbólumunk, és még napjainkban is meghatározó szerepet tölt be Budapest infrastruktúrájában és a belvárosi közlekedésben. A Dunán átívelő közúti és gyalogoshíd jelentős napi forgalmat bonyolít le, és elsődleges összeköttetésként szolgál Buda és Pest között. Az 1839–1849 között felépült híd korának egyik legkiemelkedőbb műszaki alkotása volt. Jelenleg is csak a braziliai Hercílio Luz híd (339 m) és az angliai Clifton függőhíd (214 m) múlja felül nagyobb nyílástávolságával az ilyen szerkezeti rendszerrel készült hidak közül.



1. ábra. A budapesti Széchenyi lánchíd oldalnézete a főbb méretekkel [m]

Forrás: Főmterv–MSc–CÉH Konzorcium; Kiviteli tervek

A híd több felújításon esett át a múltban. A pályaszerkezeten a kezdetektől fogva észleltek függőleges és vízszintes irányú lengéseket, ezért 1883-ban előírták a híd állapotának teljes körű felülvizsgálatát. A vizsgálatok elkészülte után, a Kherndl Antal műegyetemi professzor számításai alapján megszületett döntés szerint előírták az egész felszerkezet lebontását és új vasszerkezet készítését. Az új szerkezetet nagyobb terhelésre méretezték, tömege az eredetinek több mint duplájára növekedett, ezért a hídfőket is meg kellett erősíteni. Ez az átépítés megduplázta a láncrudak hosszát, 1,8 m-ről 3,6 m-re növelve a csapok, illetve a függesztőrudak közötti távolságot. A teljes vasszerkezet tömege 5200 tonnára nőtt egy új, 480–560 MPa szakítószilárdságú szénacélból készült merevítőtartóval. További fejlesztések közé tartozott a vasbeton pályalemez beépítése is. Az átépített Széchenyi lánchidat 1915. november 27-én adták át a forgalomnak, majd a második világháború során a német csapatok 1945. január 18-án felrobbantották a pesti lánckamrárt. A robbanás következtében a pesti nyílás szerkezetei elpusztultak, a medernyílás, valamint a budai nyílás a folyóba zuhant. A híd újjáépítésekor a leomlott szerkezeten végzett alapos vizsgálatok után a láncok háromnegyedét újra felhasználhatónak ítélték, a merevítőtartót azonban teljes egészében

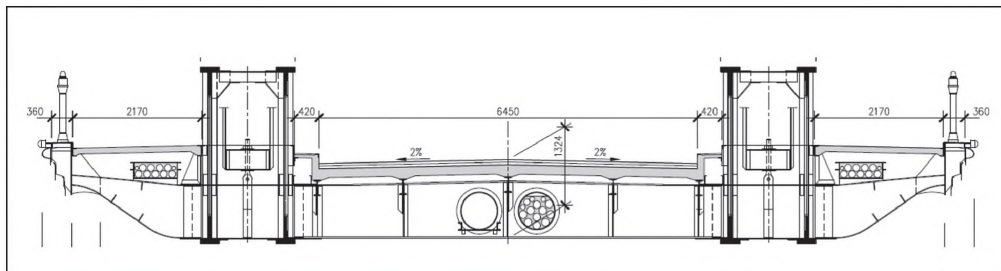
szében újra kellett gyártani. Így a lánclemek túlnyomó többsége több mint százéves, a pályaszerkezet több mint hetvenéves, melyen jelentős korróziós károsodások voltak tapasztalhatók az elmúlt években.

A korróziós károsodás jelentősen befolyásolja a lánckötegek statikai viselkedését a láncokat összekapcsoló csapok elfordulási képességének meggátlása révén, amit 2018-ban a Főmterv Zrt. megbízásából a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Hidak és Szerkezetek Tanszék által végrehajtott terheléses célvizsgálat eredményei is megerősítettek. A 2002-ben, 2019-ben és 2021–2022-ben végzett helyszíni korróziós mérések eredményeit felhasználva sztochasztikus megbízhatósági vizsgálatot végeztünk, ami egyértelműsítette a pályaszerkezet sürgős felújításának szükségességét, és a láncok esetén is rámutatott a további korróziós szelvénycsökkenés megállításának fontosságára. Ezért a 2021–2023 közötti felújítás során különös figyelem irányult a láncok korróziós állapotára és a csapok elfordulási képességére. Hasonló megbízhatósági vizsgálat és kockázatelemzés készült a hídfőn átvezetett főnyomócső építése közbeni kockázatok vizsgálatára, a tervezett nyomócső-átépítés megvalósíthatóságára és biztonságosságára, melyet a jelen cikkben szintén bemutatunk.

A felújítás bemutatása

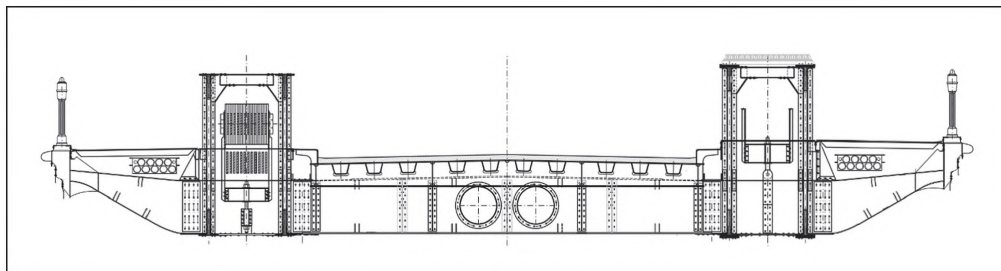
A Lánchíd felszerkezete rácsos merevítőtartóval kialakított függőhíd. A függőleges értelemben két párhuzamos görbe mentén futó, egymáshoz csapokkal kapcsolt lánclemezekből álló láncra van felfüggesztve a merevítőtartó. A láncok a budai, illetve pesti hídfőben található lánckamrákban vannak lehorgonyozva. A híd szimmetrikus elrendezésű, a szélső nyílások hossza 88,71 m (a merevítőtartó támaszköze 82,10 m), a középső nyílás 202,60 m (a merevítőtartó támaszköze 195,40 m), a híd teljes hossza 380,02 m. A lánc lehorgonyzások közötti pozícióját a pillérek tetején kialakított, vízszintes mozgást megengedő koronasaruk, illetve a hídfőknél található, ingaoszlop-szerűen működő iránytörő saruk biztosítják. A merevítőtartó a hídfőkre fix sarukkal, a pillérekre hosszirányú mozgást megengedő görgős sarukkal támaszkodik. A tervezés és kivitelezés időtartamát is figyelembe vevő 2013–2023 közötti felújítás során a ma már alig előforduló szerkezettypus szinte valamennyi eleme nem szokásos feladat elé állította a tervezőket (Álló–Nagy 2023; Szigeti et al. 2022). Egyrészt a fő teherviselő elemet alkotó, az újjáépítés során részben a régi elemek felhasználásával helyreállított kettős láncsor, a három folyamanyílásban külön szerkezeti egységet alkotó merevítő tartók, az azokat a láncokra függesztő karcsú függesztőrudak, valamint a híd sarurendszer szerves egységet alkot. Másrészt a hídon a régi vasbeton pályá- és járdalemezt (2. ábra) az azokon jelentkező súlyos károsodások miatt el kellett bontani, helyettük zárt hosszbordákkal és másodrendű keresztartókkal kialakított ortotop acél pályaszerkezet és járda épült (3. ábra).

Egy új pályalemezrész beemelését a 4. ábra mutatja be. Harmadrészt meg kellett oldani, hogy a lehorgonyzó tömböket és az azokba befutó föld alatti láncszakaszt fogadó kamrákban a szerkezeti elemek megfelelő védelme megtörténjen.



2. ábra. Régi pályaszerkezet

Forrás: Főmterv-MSc-CÉH Konzorcium; Kiviteli tervek



3. ábra. Új pályaszerkezet

Forrás: Főmterv-MSc-CÉH Konzorcium; Kiviteli tervek



4. ábra. Új pályalemez beemelése

Forrás: Főmterv Zrt.

A hídszerkezet felújításának első tervezési fázisa egy tanulmányterv készítése volt (2013–2014-ben), mely során a tervezők megvizsgálták a járdák szélesítésének lehetőségét (2 méterről 3 vagy 4 méterre), illetve több lehetséges pályaszerkezet-változatot (acél vagy vasbeton) is. Örökségvédelmi szempontok miatt a járdák szélesítése elmaradt, mivel a híd jelenlegi, jól átgondolt arányrendszere, jellegzetes képe megváltozott volna. Ugyanakkor a pályaszerkezet cseréje is jelentős hatással van a szerkezet alakjára és erőjátékára, melyre külön figyelmet fordítottak a tervezés során. A híd alakját függőhidaknál nagy érzékenységgel változtatja a függesztőrudakon leadódó terhelés helye. Emiatt különös gonddal kellett eljárni mind a régi vasbeton pálya bontásának megtervezésekor, mind az új acél pályaszerkezet építése során a hídalak meghatározásánál. Nehezítette a feladatot, hogy a rendelkezésre álló idő szükségessé tette, hogy az új pálya építése a teljes bontás előtt elinduljon. A hídalak a bontott elemek eltávolításával, az új elemek behelyezésével, sőt a hőmérséklet változásával folyamatosan változott. A tervezett feszültségmentes hídalakot a teljes folyamat minden lépésére vonatkozó számítási eredményeket a folyamatos helyszíni mérések adataival összevetve tudta megvalósítani a kivitelező. A láncszerkezetet a merevítőtartóval a függesztőrudak kötik össze. Ezek közül néhány az előrehaladott korróziós állapotuk miatt cserére szorult, melynek végrehajtása során a függesztőrúd folyamatos teherviselését meg kellett oldani.

Különösen érzékeny volt a kapuzat melletti néhány függesztőrúd, melyek esetében helyszíni méréssel kellett megbizonyosodni a szükséges rúderő meglétéről. Az 1946–1949-ben készült merevítőtartó fokozottan ki volt téve a korrózió hatásának.



5. ábra. Lánckötegek az új korrózióvédelmi bevonattal
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

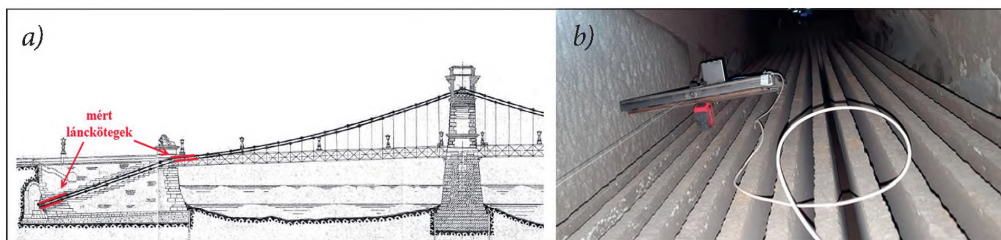
Emiatt a teljes szerkezetet testközelből, elemről elemre át kellett vizsgálni, és egyenként meghatározni a szükséges javításokat. A merevítőtartó melletti függesztőrudak megfelelő működését jelentősen befolyásolja, hogy a kapuzaton levő saruk magassága jól legyen beállítva, ennek hiányában azok vagy túlterhelődnek, vagy nem fognak dolgozni. Ezért helyszíni mérésekkel és kiegészítő statikai számításokkal kellett a saruk helyét pontosan meghatározni, amivel a merevítőtartó és a láncok megfelelő együttdolgozása biztosítható volt.

A tervezés során komoly megfontolást igényelt a főtartó szerkezeti funkciót ellátó lánckötegek felújítása is (5. ábra). A közel merev csomópontúként viselkedő láncban – különösen az iránytörő és a koronasarunál – járulékos többletfeszültségek keletkeznek hajlítónyomatékból, melyekre a szerkezetet statikai szempontból vizsgálni kell. Kedvező körülmény, hogy a hajlítónyomatékból származó többletfeszültségek nem a korrózióval leginkább érintett lánckötegeken keletkeznek, így a két kedvezőtlen hatás nem teljes értékkel összegződik, azonban mindkét hatás csökkenti a láncok teherbírását. Ennek részletes elemzésére készült egy pontosított, helyszíni méréseket (Kövesdi et al. 2024) és korróziós modellfejlesztést is tartalmazó megbízhatósági analízis (Kövesdi et al. 2023).

A láncokon végzett korróziós vizsgálatok

Helyszíni korróziós mérések

A helyszíni korróziós méréseket a leginkább korrodált láncelemeken végeztük el a lehorgonyzókamrában, valamint a legnagyobb nyomatékhelyen, a hídfőkben lévő iránytörő saruknál. A vizsgálati helyeket és az alkalmazott, a lánchíd lánclemezeihez fejlesztett lemezvastagság-mérő műszer képét működés közben a 6. ábra mutatja.

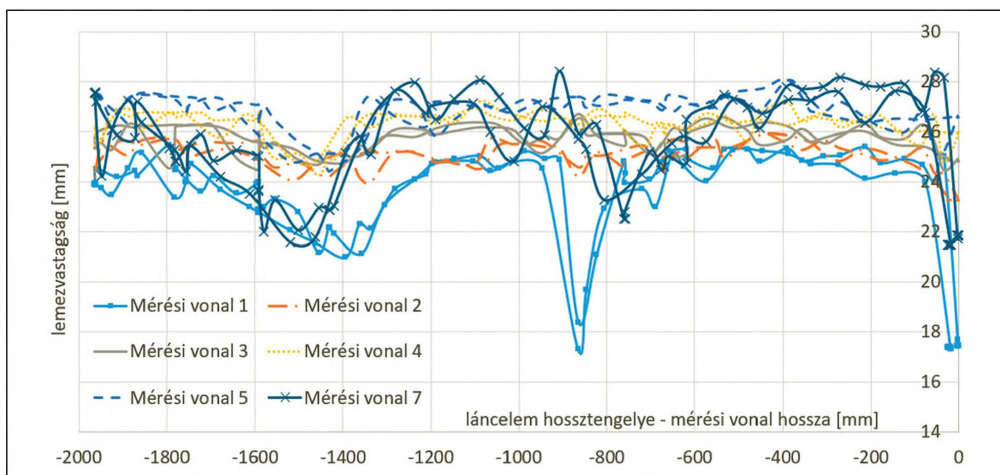


6. ábra. Korróziós vizsgálatok helye és az alkalmazott mérőműszer

Forrás: a) Főmterv–MSc–CÉH Konzorcium; Kiviteli tervek, b) BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A mérési eredmények alapján elemezni tudtuk a láncok aktuális korróziós állapotát, valamint a korróziós lemezvastagság-csökkenés mértékének időbeli változását is, mivel hasonló mérési eredmények rendelkezésünkre álltak 1986-ból és 2002-ből is. Példaként a 7. ábra egy 2 méter hosszú mérési zónán belüli mérési eredményeket mutatja egy adott láncelemre (budai oldal, befolyási oldal, alsó lánclem) vonatkozóan.

Az ábrázolt eredmények hét mérési vonal mentén mért vastagsági értékeket mutatnak be, a vízszintes tengelyen a láncok hossz tengelye, a függőleges tengelyen a mért lemezvastagság látható. A mérési eredmények jelentős változékonyságot mutattak a lánclemez vastagságában, ezért statisztikailag elemeztük valamennyi ($8 \times 11 = 88$ db) mért lánclemezre vonatkozóan a minimális, maximális és átlagos lemezvastagságok értékeit.



7. ábra. Korróziós mérési eredmények – budai oldal, befolyási oldal, alsó lánclem – első lánclemez
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A 2022-ben mért mérési adatok alapján a teherbírás-vizsgálat során figyelembe vendő maradék keresztmetszeti terület 79–90% között változik (azaz a szelvénycsökkenés mértéke 10–21%) a lehorgonyzás közelében mért nyolc láncköteg esetében. Az iránytörő saru környezetében, a legnagyobb hajlítónyomatékkal érintett szakaszon ugyanez az érték 94–100% között van, ami mutatja, hogy a két kedvezőtlen hatás nem maximális értékkel jelenik meg egy keresztmetszetben.

Korróziós modellfejlesztés

A 2022. évi mérési eredmények kiértékelésénél ugyanazt a stratégiát alkalmaztuk, mint az 1986. és 2002. évi mérések esetén, így azok eredményei összehasonlíthatók. A közvetlen összehasonlíthatóságot azonban akadályozza, hogy a méréseket 1986-ban és 2002-ben is festékréteggel bevont lánclemezeken, míg 2022-ben a felújítás közben, a láncok tisztítása után, a festékréteg felhordása előtt végeztük el. Az eltérő festékréteg-vastagságok miatt szükséges kompenzációt elvégeztünk annak érdekében, hogy a lánchídra specifikus, időfüggő korróziós szelvénycsökkenést reprezentáló eloszlásfüggvényt tudjunk kidolgozni, amellyel a szerkezet jövőbeli viselkedése is elemezhetővé válik. A mérési adathalmazra illesztett függvények elemzése során a Weibull-eloszlás mutatta a legkedvezőbb eredményt, és a Kolmogorov–Smirnov-teszt alapján

is ez a függvény mutatkozott a legmegfelelőbbnek a jelenség leírására. Ez jól illeszkedik a korábbi szakirodalmi megállapításokhoz (Paik–Kim 2012), melyek acéllemezek időfüggő korróziójának modellezésével foglalkoznak. A hisztogramokra illesztett Weibull valószínűségi sűrűségfüggvények paramétereit az 1. táblázatban adtuk meg. Az α alakparamétert és a β skálaparamétert is az idő függvényében írtuk fel, így a modell a lánclemezek időbeli lemezvastagság-csökkenését képes modellezni. A feldolgozott mérési adatok a korrózió gyorsuló tendenciáját mutatják, amennyiben nem készül a szerkezeten új korrózióvédelmi bevonat (ezért volt kiemelten fontos a felújítás mihamarabbi elkezdése és a korróziós folyamat új védelmi bevonattal való megállítása), így a korrózió időfüggésének vizsgálatára exponenciális függvényeket használtunk:

$$\alpha(t - \tau_c) = 1,162 \times \exp[0,032(t - \tau_c)],$$

$$\beta(t - \tau_c) = 1,3846 \times \exp[0,0373(t - \tau_c)],$$

ahol t az idő években kifejezve, τ_c pedig a korrózió megindulása előtti idő. 2022-ben új korrózióvédelmi bevonatot vittek fel az acélszerkezetre, ezért a láncrendszer későbbi elemzéséhez a τ_c -t 2022-re kell beállítani, és a folytonosság biztosítása érdekében további $\alpha_{re} - \alpha_c$ és $\beta_{re} - \beta_c$ kifejezéseket kell bevezetni, ahol α_c és β_c a $\tau_c = 1986$ -os évnél illesztett Weibull-paramétereket, α_{re} és β_{re} pedig a korrózióvédelem felújítása-kor a megfelelő illesztett paramétereket jelöli (azaz először a korrózióvédelem felújítása esetén szükséges a fenti egyenletek szerinti paraméterek meghatározása a korábbi τ_c -vel). A mérési eredmények és azok statisztikai értékelése alapján a következő többfázisú nemlineáris korróziós modellt dolgoztuk ki időfüggő Weibull-eloszlási paraméterekkel:

$$d(t - \tau_c) = \left\{ \frac{\alpha(t - \tau_c)}{\beta(t - \tau_c)} \left(\frac{t - \tau_c}{\beta(t - \tau_c)} \right)^{\alpha(t - \tau_c) - 1} \exp \left[- \left(\frac{t - \tau_c}{\beta(t - \tau_c)} \right)^{\alpha(t - \tau_c)} \right] \right\}, \quad 0, \quad t > \tau_c \quad t \leq \tau_c,$$

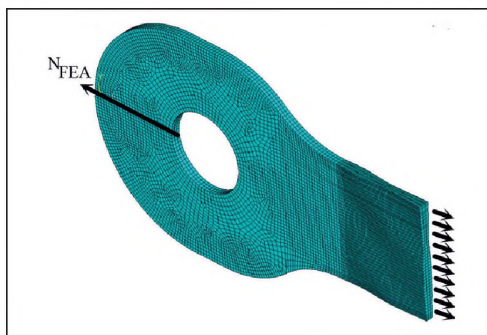
ahol d a korróziós mélység vagy gödörmélység, figyelembe véve a lemezek két ellentétes felületén mért korróziós veszteségeket, t az idő években, τ_c a korrózió megindulása előtti idő, míg α és β az időfüggő alak- és méretarányos paraméterek. A képlet feltételezi, hogy a bevonat élettartamának végéig τ_c korróziós károsodás nem következik be.

1. táblázat. A Weibull-sűrűségfüggvény paraméterei a mérések alapján

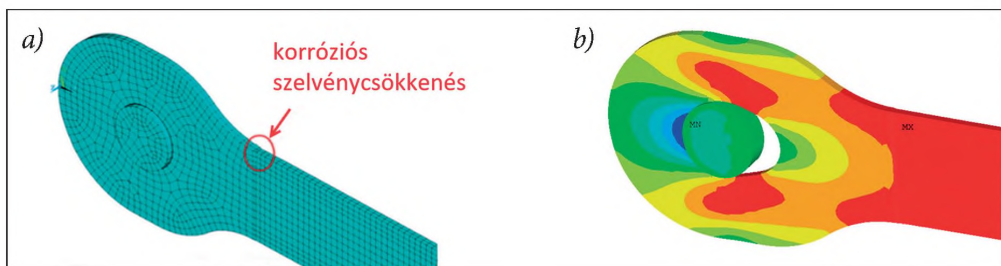
Paraméter/Év	1986	2002	2022
α	1,2302	1,7489	3,8445
β	1,3362	2,6801	5,1502

Láncok megbízhatóságielmélet-alapú teherbírás-vizsgálata

A kifejlesztett korróziós modellt valószínűségi végeselemes számításokban is felhasználtuk a lánclemezek tönkremeneteli valószínűségének meghatározására. A valószínűségi változókat, a megfelelő eloszlásfüggvényeket és paramétereket nemzetközi ajánlások alapján (URL1), valamint a saját korróziós mérések és a kifejlesztett korróziós modell alapján vettük fel. Geometriai és anyagilag nemlineáris (GMNA) számításokat végeztünk a láncok húzási ellenállásának meghatározására. A lánclemezek névleges vastagsága 29 mm, a névleges szélessége 365 mm a párhuzamos zónában, a csap átmérője 240 mm. A lánclemez teljes hossza 7999 mm. Az alkalmazott végeselemes háló maximális mérete 15 mm ($\sim B/24$), a lemez vastagsága mentén hat-hat elemet alkalmazunk. A végeselemes háló a 8. ábrán látható, melynek megfelelőségét konvergenciavizsgálattal igazoltuk. A 9. ábrán látható a geometriai modell a korróziós lemezvastagság-fogyással és a jellemző tönkremeneteli mód.



8. ábra. Egy tiszta húzásnak kitett lánclemez végeselemes modellje
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

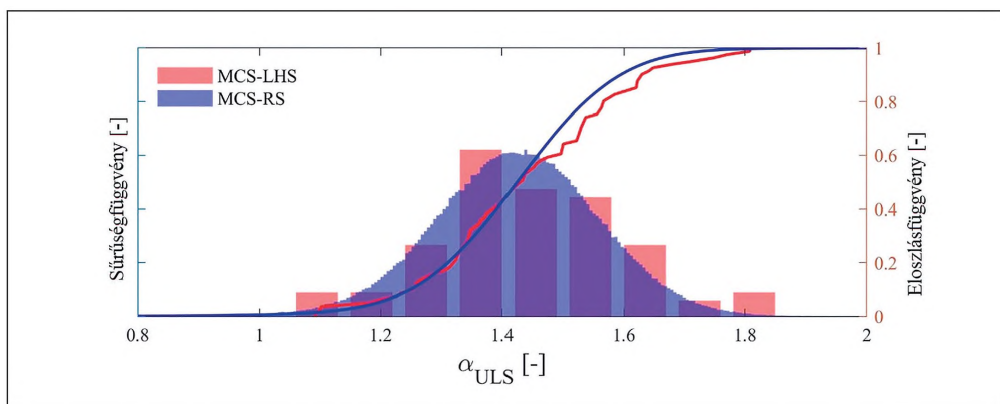


9. ábra. a) Tipikus normálfeszültség-eloszlás, b) a korrodált lánclemez tönkremeneteli módja végeselemes analízis segítségével

Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A valószínűségi elemzést véletlenszerű latin hiperkocka mintavétellel (LHS) végzett Monte Carlo-szimulációval végeztük. A szimuláció során összesen n mintát használtunk, minden egyes véletlen bemeneti változót egyenlő valószínűségű ($p = 1/n$) intervallumokra osztva, míg az egyes intervallumokon belül véletlenszerű mintavételezés

történt. A meghatározott minta nagysága minden teherbírasi szimuláció esetén 100 volt – a valószínűségi változók számához igazodva. A GMNI-analízis eredményeire válaszfelületet illesztettünk, mely származtatott válaszfelületen egy második Monte Carlo-szimulációt végzünk $N = 10^6$ szimulációval. A szimuláció eredménye a lánclelmek teherbírása volt, amit statisztikailag kiértékelünk, és meghatároztuk a teherbírás átlagos (50%-os), karakterisztikus (alsó 5%-os) és tervezési (alsó 0,1%-os) értékét. Egy esetre az eredményeket a 10. ábra mutatja be.



10. ábra.¹ Monte Carlo-szimuláción alapuló empirikus valószínűségi sűrűségfüggvények és kumulatív eloszlásfüggvények latin hiperkocka mintavételezéssel (MCS-LHS) és válaszfelülettel (MCS-RS), 2022

Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A megbízhatóságielmélet-alapú teherbírás-vizsgálattal igazolni tudtuk, hogy a lánckötegek a 2022. évi korróziós állapotukban teljesítik a szabványok által megkövetelt biztonságot mind a korrózióval legjobban érintett, mind a legnagyobb nyomatókkal érintett szakaszon, így a szerkezet kellő biztonsággal képes viselni a terhet.

Lehorgonyzókamra átfúrásának vizsgálata

A budapesti vízellátásban kiemelkedő jelentőséggel bír az 1200 mm átmérőjű IV. főnyomócső. Ez a SENTAB típusú feszített vasbeton nyomócső az 1970-es években épült ki a Margit híd és az Erzsébet híd közötti pesti szakaszon, nehezen hozzáférhető helyen, közút és villamospálya alatt, lakó- és középületek mellett. Az idők során egyes szakaszait már át kellett építeni, és a vezeték rekonstrukciója most is folyamatban van, a Fővárosi Vízművek tervei között szerepel. Az északi Kossuth téri szakasz már új nyomvonalra került, és a Széchenyi tértől az Erzsébet hídig terjedő szakaszokra is elkészültek a tervek. A Lánchíd felújításához kapcsolódóan a pesti oldalon tervezett

¹ Az összeállítás egyes ábráin látható tizedesponatok a nem magyar szoftverek használatából erednek.

vezeték nem valósulhat meg az eredeti terv szerinti mélyvezetésű védőalagútban, így az ideális nyomvonal a Lánchíd pesti lehorgonyzótömbjét keresztezi. Ezért a Lánchíd hídfőjén átvezetni tervezett csővezeték kapcsán egy mélyreható kockázatelemzést kellett elvégezni, amely segítséget nyújtott a műszaki peremfeltételek meghatározásához. A kockázatelemzés valós adatokon alapuló valószínűségelméleti analízist jelent a várható kockázatok alapján a szükséges beavatkozások meghatározására, figyelembe véve a felmerülő költségeket.

A kockázatelemzést az MSZ EN szabványsorozattal (különös tekintettel a valószínűségi analízist és kockázatelemzést megalapozó MSZ EN 1990:2011 és MSZ EN 1991-1-7:2015 szabványokra), valamint nemzetközi szakirodalmakkal (URL1) összhangban hajtottuk végre. Az elemzés az alábbi lépések mentén történt: (1) a mechanikai modell megalkotása, (2) a tönkremeneteli módok azonosítása és a kárkövetkezmények meghatározása, (3) a megbízhatósági modell felépítése: határállapot függvények/komponensek meghatározása, valószínűségi változók felvétele, megbízhatósági rendszermodell megalkotása, (4) megbízhatósági analízis a tönkremeneteli valószínűség meghatározására, (5) a kockázatok számítása, illetve (6) a kockázat értékelése. Összesen tizenegy lehetséges tönkremeneteli módot azonosítottunk közelítő számítás alapján:

1. a hídfő felemelkedése;
2. a hídfő elcsúszása;
3. a falazat tönkremenetele átfúrási keresztmetszet tengelyében;
4. a boltozatzáradék tönkremenetele;
5. a boltozattalp tönkremenetele;
6. a hídfőközép „boltozat” beomlása;
7. a vasbeton cső tönkremenetele a felső részen;
8. boltozat tönkremenetele láncok lehorgonyzóerejére;
9. vasbeton cső tönkremenetele láncok lehorgonyzóerejére;
10. a hídfőközép „boltozat” roskadása, az útpálya süllyedése;
11. a boltozat roskadása.

Mindezekre egyesével megalkottuk a megbízhatósági modelleket, melyek a tönkremeneteli módhoz tartozó specialitások bizonytalanságain felül ellenállás és hatás modellbizonytalanságot is magukban foglaltak. Elsőrendű megbízhatósági analízist (first order reliability analysis, FORM) hajtottunk végre a definiált határállapot-függvényekre. A legnagyobb tönkremeneteli valószínűséggel a boltozat talpának tönkremenetele rendelkezett gyémántvágásos technológia esetén, számszerűen $P_f = 2,0 \times 10^{-2}$ valószínűséggel.

Ezzel szemben a legkisebb tönkremeneteli valószínűsége a láncok lehorgonyzóereje miatti boltozat tönkremenetelének volt ($P_f = 6,7 \times 10^{-5}$) mikrotunnelling technológia mellett. Az egyes eseményekhez tartozó kockázatot a P_f tönkremeneteli valószínűség és a C_F kárkövetkezmény szorzataként kapjuk. A teljes R kockázatot az egyes

kockázatok összegeként kaphatjuk meg. Hangsúlyozzuk, hogy a kockázatszámítás kizárólag a tizenegy kiválasztott tönkremeneteli módra fókuszált, és emiatt a cső építési technológiáinak értékelésére alkalmazható, nem a teljes szerkezet teljes kockázatát jelenti. A meghatározott *R* kockázatok azt mutatták, hogy a mikrotunnelling eljárás alkalmazása egyértelműen előnyösebb, kisebb kockázatokkal jár. Ugyanakkor a kezdeti költséget is tekintve a gyémántvágásos technológia a középső szakasz kiinjektálásával gazdaságosabb megoldásnak tekinthető. A kockázatok értékelését és elfogadhatóságát az MSZ EN 1991-1-7 szerinti mátrixmódszerrel hajtottuk végre (11. ábra).

a)						b)					
Nagyon nagy						Nagyon nagy					
Nagy	2), ←3)					Nagy	2), ←3), ←6)				
Közepes	↗1)					Közepes	↗1)	4), ↘8)	5)		
Kicsi	8)	4)	5)			Kicsi					
Nagyon kicsi	←10)		11)			Nagyon kicsi			11)		
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	$>10^{-1}$		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	$>10^{-1}$

11. ábra. Bekövetkezési valószínűség-kárkövetkezmény mátrixok:

a) mikrotunnelling, b) gyémántvágásos technológia esetén

Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A mátrixokban a vízszintes tengelyen a bekövetkezési valószínűség, a függőleges tengelyen a kárkövetkezmény mértéke jelenik meg. Az egyes számok a táblázatokban az egyes tönkremeneteket jelölik. A sötétszürkével jelölt zóna a nem megengedhető kockázatokat jelöli. Megjegyezzük, hogy a szerkezet kiemelt fontosságára tekintettel a normál szerkezetekhez képest emelt követelményeket támasztva a halványyszürke főátlót (mely a határt jelöli) eltoltuk a bal alsó cella irányába. A bemutatott esetekben a hídfőközép injektálásával minden esetben számoltunk. Az értékelés alapján kijelenthető, hogy a mikrotunnelling kockázati szintjei jellemzően elfogadhatók. A gyémántvágásos technológia esetében a 4)–5) és 8) túl magas kockázatot mutat, mely kezelést igényel. Javasolt volt az elemzés alapján rövidebb (maximum 60 cm) betölési szakaszokkal dolgozni az omlásveszély folyamatos értékelése mellett, csökkentendő mind a beomlás valószínűségét, mind a kárkövetkezményt. A vizsgálatok eredményeként a mikrotunnelling technológiát alkalmazták (12. ábra); a fúrás során folyamatos monitoringrendszerrel követve a beavatkozás hatását a lehorgonyzókamrában és a lánccsatornában.



12. ábra. Csőátvezetés kiépítése mikrotunnelling technológiával
Forrás: Főmterv Zrt.

Összefoglaló megállapítások

A Széchenyi lánchíd felújításának tervezési és kivitelezési munkáira 2013–2023 között került sor, amelynek keretében a több mint 175 éves szerkezet korróziós állapotromlását sikerült időben megállítani, a régi vasbeton pályaszerkezet helyett új modern acél pályaszerkezet készült. A nemzetünk történelmi büszkeségének és az ország egységének szimbólumaként is tekintett szerkezeten megtiszteltetés volt dolgozni. A felújítás keretében a tervezők (Főmterv Zrt., MSc Kft.), a kivitelező (A-Híd Zrt.), a szakértők (BME Hidak és Szerkezetek Tanszék) és számos, a felújításban részt vevő partner együttműködésének köszönhetően a hídszerkezet a következő években is megbízhatóan be fogja tudni tölteni meghatározó szerepét Budapest belvárosának közlekedésében.

Irodalomjegyzék

- Álló László – Nagy Zsolt (2023). „A Széchenyi láncíd rekonstrukciója”. *Főmterv Híradó*.
- Dunai, László – Horváth, Adrián (2019). „Rehabilitation of Historical Bridges over the Danube in Budapest”. *International Journal of Architectural Heritage*, 13/1, 2–14.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1497223>
https://www.researchgate.net/publication/326716284_Rehabilitation_of_historical_bridges_over_the_Danube_in_Budapest
- Kövesdi, Balázs – Kollár, Dénes – Dunai, László (2024). „Temporary Structural Health Monitoring of Historical Széchenyi Chain Bridge”. *Buildings*, 14/2, No. 535
<https://doi.org/10.3390/buildings14020535>
- Kövesdi, Balázs et al. (2023). „Investigation on the Historical Széchenyi Chain Bridge”. 10th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2023, Amsterdam, 12–14 September, 2023. *CE/FAPERS*, 6/3–4, 1086–1092.
<https://doi.org/10.1002/cepa.2482>
- Paik, Jeom Kee – Kim, Do Kyung (2012). „Advanced Method for the Development of an Empirical Model to Predict Time-Dependent Corrosion Wastage”. *Corrosion Science*, 63, 51–58.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.05.015>
- Szigeti, Zoltán – Gondár, Péter – Bódi, Miklós (2022). „A Széchenyi láncíd maradó acélszerkezeteinek felújítási tapasztalatai tervezői szemmel”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, 2, 55–67.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202.pdf>
- URL1: Probabilistic Model Code. *Joint Committee of Structural Safety* (2001. márc. – 2013. márc.)
<https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>

Az Osztószigeti ferdekábeles híd – kábelcsillapítók tervezése és fejlesztése

The Osztósziget Cable-Stayed Bridge – Design and Development of Cable Dampers

Dunai László¹ – Kövesdi Balázs² – Kollár László³ – Hegyi Péter⁴ – Pál Gábor⁵ –
Kemenczés András⁶ – Medveczki István⁷

¹ az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
dunai.laszlo@emk.bme.hu

² az MTA doktora, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kovesdi.balazs@emk.bme.hu

³ az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kollar.laszlo@emk.bme.hu

⁴ PhD, adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
hegyi.peter@emk.bme.hu

⁵ felelős tervező, Speciálterv Építőmérnöki Kft., Budapest
pal.gabor@specialterv.hu

⁶ tervező, projektvezető, Speciálterv Építőmérnöki Kft., Budapest
kemenczes.andras@specialterv.hu

⁷ projektvezető, Hídépítő Zrt., Budapest
medveczki.istvan@hid.hu

Összefoglalás

A ferdekábeles hidakon alkalmazott kábelek jellemzően érzékenyek a gyalogosok által keltett dinamikai hatásokra, aminek következtében sok esetben a kábelekre csillapítóelemek kerülnek beépítésre. A budapesti atlétikai stadion beruházása keretében megépült Osztószigeti ferdekábeles hídra – vagy elterjedt nevén Robinson hídra – a kivitelező (Hídépítő Zrt.) döntése és a tervező (Speciálterv Építőmérnöki Kft.) támogatása alapján nem kész termék, a piacon elérhető csillapítóelem, hanem egyedi gyártású, saját fejlesztésű csillapítóelem került megtervezésre a Speciálterv Építőmérnöki Kft. és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék együttműködésében. A cikkben a híd bemutatása után ezen csillapítók tervezésének és fejlesztésének folyamatát és specifikumait mutatjuk be.

Abstract

Cables used in cable-stayed bridges are typically sensitive to the dynamic effects of pedestrian-induced vibration, which often results in the installation of cable dampers to reduce cable vibration. In the case of the Osztósziget Cable-Stayed Bridge—commonly known as the Robinson Bridge—built as part of the Budapest Athletics Stadium project, the decision of the contractor (Hídépítő Zrt.) and the designer (Speciálterv Építőmérnöki Kft.) was to have a custom-made, self-developed damping element designed in cooperation between Speciálterv Építőmérnök Kft. and the Department of Structural Engineering of the Budapest University of Technology and Economics. After introducing the bridge, the paper presents the process and specifications of the design and development of these particular cable dampers.

Kulcsszavak: gyalogoshíd, ferdekábeles híd, kábelcsillapító, Stockbridge-csillapítóelem

Keywords: pedestrian bridge, cable-stayed bridge, cable damper, Stockbridge damper

Bevezetés

Az Osztószigeti ferdekábeles híd, elterjedt nevén Robinson híd, a ráckevei Duna-ágon ível át, összekötve Pestet a Csepel-szigettel (1. ábra). A híd a Nemzeti Atlétikai Stadion beruházásának részeként épült meg, amely a korábban elhanyagolt vízpartot könnyen megközelíthető és színvonalas közterületté alakította. A híd funkciója, hogy a budapesti Országos Atlétikai Központ stadionját – amely a 2023. évi atlétikai világbajnokság fő helyszíne is volt – összekösse a Csepel-szigeten található edzőpályákkal. A híd alaprajzilag ívesen halad át a Duna-ág felett, egy középső pilonnal, amely az Osztószigeten kapott helyet. A híd tervezése során fontos szempont volt, hogy a nagy volumenű Atlétikai Stadion-beruházás keretében az új híd Budapest ékköve legyen, karcsú kialakításával harmonizáljon a stadionépület építészeti és környezeti koncepciójával. A 168 m hosszú híd Magyarország legnagyobb, kizárólag gyalogosok



1. ábra. Az Osztószigeti (Robinson) híd a ráckevei Duna-ág felett
Forrás: Magyar Építők – BC Zrt., a képet készítette: Nagy Mihály

és kerékpárosok számára kialakított hídja. Először ismertetjük a hídszerkezetet és azon tervezési szempontokat, melyek végeredményeként ez az egyedülálló és több nemzetközi díjat is elnyert híd elkészült.

A szerkezet tervezése során a tervezőknek számos, a híd szerkezeti kialakításából, karcsúságából, valamint íves vonalvezetéséből és egyoldali pilon elhelyezkedéséből fakadó szerkezeti kialakítási sajátosságot kellett megoldaniuk. A szerkezet karcsúságából kifolyólag a dinamikai hatásokra a szokásosnál érzékenyebb, aminek következtében mind a pályaszerkezetbe, mind a kábelekre csillapítók elhelyezése volt szükséges. A szerkezet dinamikai viselkedését forgalomba helyezés előtt próbaterheléssel teszteltük, ami igazolta, hogy a pályaszerkezetbe tervezett csillapítók hatékonyan csillapítják a szerkezet rezgéseit. De a vizsgálatok megmutatták azt is, hogy az 56 tartókábel közül melyek érzékenyek a dinamikus hatásokra, melyekre szükséges kábelcsillapítót alkalmazni. A cikk keretében bemutatjuk a kábelek dinamikai érzékenységét, és az alkalmazott kábelcsillapítók tervezését és fejlesztését is.

A híd bemutatása

A hídszerkezet kéttámaszú, egypilonos, ferdekábeles gyalogoshíd, hibrid – kibetonozott acélszerkezetű – merevítőtartóval és ortotrop pályalemezzel. A hídpályát kétsíkú kábelezési rendszer függeszti fel a pilonhoz. A hídszerkezet látképét háttérben az atlétikai stadionnal a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. A híd és a stadionépület látképe

Forrás: Magyar Építők – BC Zrt., a képet készítette: Nagy Mihály



3. ábra. A híd oldalnézete a Kvassay-zsilip irányából
Forrás: Magyar Építők – BC Zrt., a képet készítette: Nagy Mihály

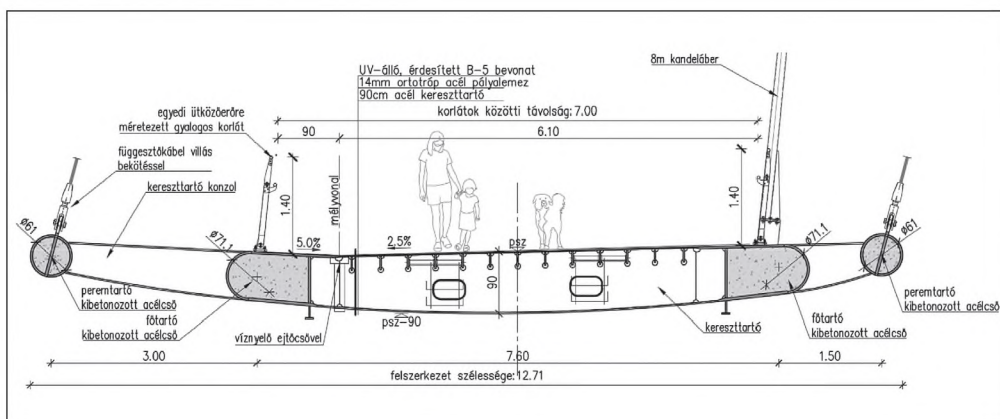
A híd jellemzőbb adatai:

Támaszköz:	168,00 m közbenső alátámasztás nélkül
Hídhossz:	168,90 m
Útpálya hasznos szélessége:	7,00 m
Felszerkezet szélessége:	12,71 m
Pilon magassága:	65,00 m (gyártott méret: 69,80 m)
Acélszerkezet össztömege:	1000 t (pilon: 150 t + főtartó: 850 t)

Az egyedi formájú acélszerkezetű pilon a Kvassay-zsilip előtt a Duna-ágot kettéválasztó mesterséges szigeten, az Osztószigeten került elhelyezésre. Magassága a cölöpösszefogó gerenda felső síkjától mérve 65,00 m, a pályaszint feletti magassága 56,34 m. A pilontest kör keresztmetszetű, maximális átmérője 2,00 m, amely mind felfelé, mind lefelé kónuszosan szűkül. Tengelye a hídtól kifelé döntött, a függőlegeshez képest $9,0^\circ$ -os ferdeséggel.

A kábelhálózat csomópontjai a merevítőtartón – a keresztartókhoz igazodóan – 6 m-es, a pilonon pedig 1,5 m-es kiosztással lettek megtervezve. A kábelek elrendezése hosszirányban szimmetrikus, legyező alakú (3. ábra). A hídpályát összesen 53 db függesztőkábel tartja. A pilont stabilizáló hátrahorgonyzás a pilontól 25 m-re került kialakításra, melyet három darab nagyobb átmérőjű kábel biztosít. A hátrahorgonyzó kábelek felső végpontjai a pilonon egymástól 9,00 m-re találhatók, míg az alsó lehorgonyzásuk egy közös csomólemezzel valósult meg.

A felszerkezet a teljes hosszán $R = 275$ m sugarú tiszta körívben fekszik, teljes szélessége 12,71 m, a korlátok közötti szabad járőfelület 7,00 m széles. A pályalemez két oldalán hegesztett, zárt keresztmetszetű szekrényes főtartók találhatók, melyek között ortotrop acél pályalemez készült, 40 cm-enként hosszabordával merevítve. Az íves alsó övű, 90 cm magas keresztartók sugárirányban vannak elhelyezve, 6,0 m-es kiosztással. A gyalogos úrszelvény magassága az íves alaprajzú hídon úgy volt csak biztosítható, hogyha a kábelek a főtartókon kívül konzolosan kerültek bekötésre – így a hídpálya mellett mindkét oldalon egy-egy peremtartó cső található, melyek a keresztartók folytatásaként a hídpályához csatlakoznak. Az ív belső oldalán a peremtartó tengelye a főtartó tengelyétől 3,00 m-re, míg az ív külső oldalán 1,50 m-re helyezkedik el. Mind a főtartó, mind a peremtartó acélcsövei kibetonozásra kerültek. A híd jellemző keresztmetszetét a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A felszerkezet keresztmetszete

Forrás: Speciálterv Kft.

A közel 170 m hosszú karcsú íves pálya alsó megtámasztás nélkül „lebeg” a Duna-ágak felett (5. ábra). A függesztőelemek teljesen zárt szerkezetű acél sodronykötelek, villás öntvényfejekkel, átmérőjük 35–65 mm között változik. A karcsú pilon egyensúlyát biztosító három hátrakötő kábel névleges átmérője 100 mm. A pilon teljes acélszerkezetét öt gyártási egységből állították össze.

A pilontest S460 ML minőségű acél síklemezekből készült, speciális hengerítési eljárással. Az egyszer görbült kúpos felületre felhegesztendő csomólemezek megadása 3D-BIM-modell (Building Information Modelling, épületinformációs modellezés) segítségével történt. A felületek kiterítési alakjainak és a csatlakozó elemek élvonalainak megadásán kívül sablonok és ellenőrző mérésekre alkalmas technológiai elemek meghatározására is szükség volt, szoros kivitelező-tervező együttműködés keretében. A csomólemezekre ható erőket belső merevítőgyűrűkbe kötő ellendiafragmák vezetik be a pilonba, ezáltal a palást hajlítása minimalizált. A pilon belseje kibetonozásra



5. ábra. A folyó fölött átívelő hídszerkezet látványa
Forrás: Speciálterv Kft.

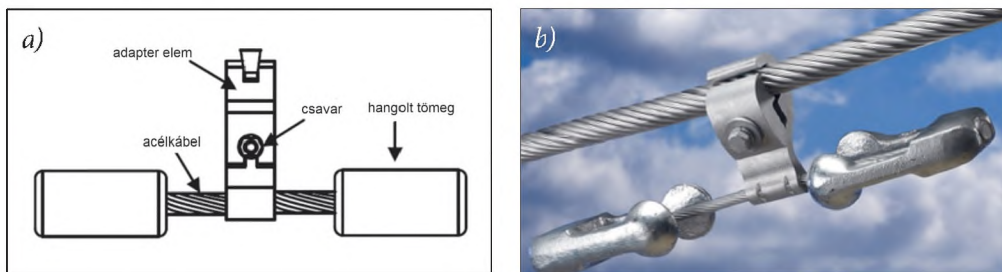
került, az acélcső nyomási teherbírásának a növelésére. Az ortotrop pályalemez közrefogó két zárt keresztmetszetű főtartó 711 mm átmérőjű, 30 mm falvastagságú acél félcsőből, 30 mm-es felső övből, 40 mm-es alsó övből és egy belső 30 mm-es függőleges gerincből kialakított szekrénytartó. A peremtartókat 610 mm átmérőjű, 30 mm falvastagságú acél csőszelvényből gyártották, melyeket a hídpálya térbeli ívességét követő alakra kellett hajlítani. A kereszttartók és az ortotrop pályalemez S355 M acélból, míg a hegesztett zárt szekrénytartók, peremcsövek, valamint a konzolosan kinyúló kereszttartók S460 ML acélból készültek.

A híd jelentős gyalogosfelülete és karcsúsága miatt érzékeny a gyalogosok által gerjesztett dinamikus hatásokra. Tekintettel a híd városszerkezeti elhelyezkedésére, várhatóan jelentős gyalogosforgalmat fog lebonyolítani a jövőben. A tervezési cél az volt, hogy a híd feleljen meg a nemzetközi ajánlásokban meghatározott irányelv szerinti maximális komfortfokozat kritériumainak. Ezt a felszerkezetbe beépített 12 db hangolt tömegcsillapító alkalmazásával sikerült elérni. A rezgéscsillapítók beépítése előtt és után dinamikus próbaterhelések készültek a csillapítók hatásának vizsgálata és finomhangolása érdekében. A mérések bizonyították a csillapítók hatékonyságát és a tervezői számítások megfelelőségét. Ugyanakkor a mérések felhívták a figyelmet a kábelekre helyezendő csillapítók szükségességére is, amit a következőkben mutatunk be részletesen.

Kábelcsillapító tervezése és méretezése

Kábelcsillapító elem kialakítása

A nemzetközi szakirodalomban számos különböző kábelcsillapító elem található, melyeket hatékonyan lehet alkalmazni ferdekábeles hidak kábelrezgéseinek csillapítására (Sun–Chen–Huang 2022). Az adott híd sajátosságaihoz és esztétikai megjelenéséhez legjobban illeszkedőnek az ún. Stockbridge típusú csillapítóelemet találtuk (Yin–Zhao–Liu 2021). A csillapítóelem felépítését és egy, a kereskedelembe kapható jellemző csillapítót a 6. ábra mutat be. A csillapítóelem egy, a kábelre rögzített, tömeggel rendelkező elem, mely a kábelhez egy olyan elemmel csatlakozik, amelynek meghatározott merevsége és jelentős csillapítása van. A számításainkhoz kísérleti eredmények alapján határoztuk meg a modell bemenő adataként szolgáló csillapítás mértékét és merevségét, mely jelentősen függ az ún. *messenger* kábel mechanikai jellemzőitől.



6. ábra. Stockbridge-damper a) sematikus ábrája (Yin–Zhao–Liu 2021) és b) jellemző kialakítása
Forrás: Preformed Line Products, 2013

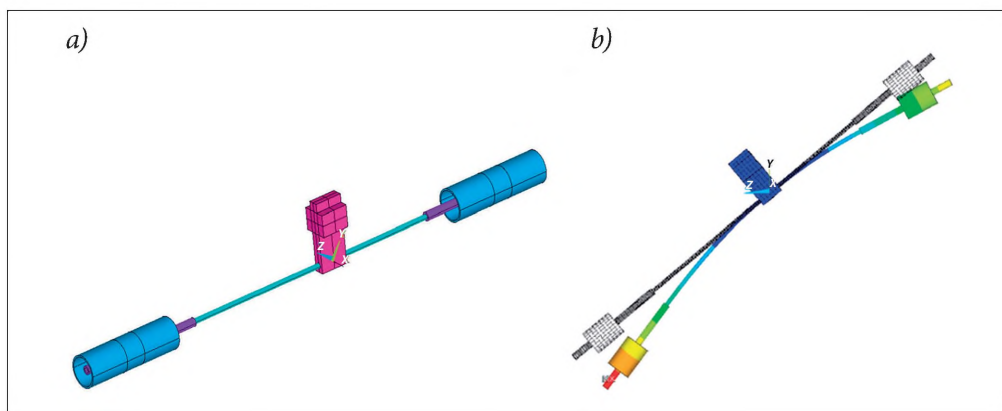
A messenger kábel a csillapítóelem tervezésének kulcsfontosságú része, mivel a mechanikai jellemzőitől és a végére helyezett tömeg nagyságától és kialakításától függ a csillapítóelem hatékonysága. Mivel azonban a sodronyok hajlítási jellemzőinek és hiszterézis viselkedésének, valamint csillapítási arányának meghatározásával a nemzetközi szakirodalomban kisszámú tanulmány foglalkozik (Foti–Martinelli 2018), így a sodronykiválasztást kísérleti paraméteres elemzéssel hajtottuk végre. A kísérleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Hidak és Szerkezetek Tanszék Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában végeztük el, melyek eredményeként kiválasztottuk az adott hídszerkezet esetén a merevség és csillapítás szempontjából legmegfelelőbb csillapítóelem-kialakítást, amelyet a 7. ábra mutat be.

Ebben a kialakításban egy központi megfogó elem kapcsolja össze a ferdekábelt és a csillapítót, amelyet metrikus csavarokkal lehet a ferdekábelre rögzíteni (8.a ábra). A csillapító a központi megfogóból két irányban kilógó acélsodronyból (messenger kábelből) áll, melynek végére egy speciális menetes vég került rögzítésre. Erre egy hengeres, közepén menettel ellátott acéltömb (adapterelem) került. A hengeres



7. ábra. Legyártott és összeszerelt csillapítóelem
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

acéltömbre egy csőszelvényből kivágott elem készült, melynek oldalán oválfurat helyezkedik el, így elősegítve a csillapítóelem hangolását. A tömeg pozíciójának állítása révén a csillapítóelem széles frekvenciatartományban állítható, ami lehetővé teszi, hogy ugyanaz a gyártmány alkalmazható legyen több, különböző dinamikai tulajdonsággal rendelkező ferdekábel esetén is. A kifejlesztett csillapítóelem moduláris kialakítású, széles paramétertartományban állítható, így könnyen adaptálható más hídszerkezetre is. A tervezés során arra is figyelni kellett, hogy a ferdekábelek sajátfrekvenciája időben is változik (a napi/éves hőmérséklet-változás miatt a kábeleken lévő feszítőerő változik). A tervezés során figyelembe vettük azt is, hogy a csillapítóelem üzemi körülmények között rezonanciában van, vagyis várhatóan nagy amplitúdójú rezgést végez. Ez a rezgés azonban nem járhat azzal, hogy a csillapító nekiütközik a ferdekábelnek, vagy idővel a messenger kábel elfárad, így ellenőriztük a maximális elmozdulásait, valamint a fáradási élettartamot is. A kábelerők időbeli változása miatt a csillapítóelemeket aszimmetrikus elrendezéssel alakítottuk ki, melynek alsó és felső része eltérő sajátfrekvenciára lett beállítva. Ez a kialakítás egy viszonylag tág frekvenciatartományban alkalmas a kábel rezgéseit csillapítani, így képes a hőmérséklet-változásból adódó elhangolódások kezelésére (Kövesdi et al. 2023). Az új típusú csillapítóelem tervezésének és méretezésének nemzetközi publikációja folyamatban van.



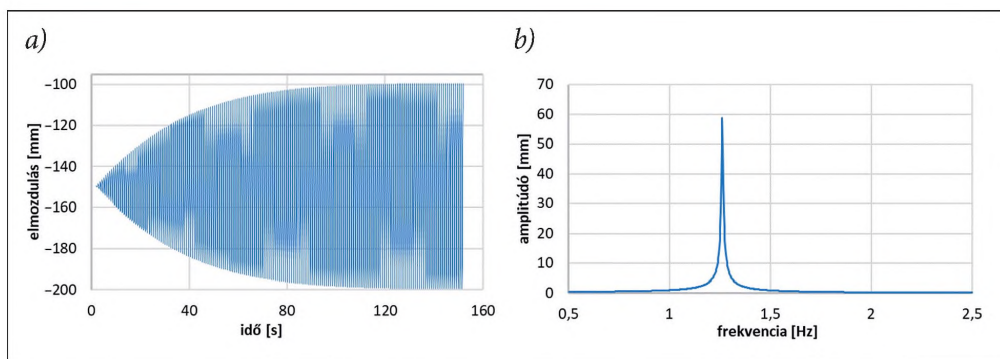
8. ábra. a) Csillapítóelem lokális numerikus modellje, b) 3D-nézet és elmozdulási ábra
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A kábelcsillapító dinamikai számítása

A csillapítóelemek számításához két végeselemes modellt dolgoztunk ki. Az egyik egy testelemes lokális modell, amelyet a csillapítóelem sajátfrekvenciájának meghatározására, hangolására használtunk (8. ábra). A másik egy globális modell, amelyel azt vizsgáltuk, hogy a csillapítóelem és a ferdekábel együttes rendszere hogyan viselkedik, milyen hatékonysággal működik a csillapító, mekkora a csillapítóelem tömegpontjának maximális elmozdulása, hova kell pozicionálni a csillapítóelemet a kábel hossz tengelye mentén, milyen mértékben kell elhangolni a csillapító két oldalát a teljes vizsgált frekvenciatartományban a kellően hatékony csillapítás eléréséhez. Mindkét modell alapvető bemenő paramétere a messenger kábelt modellező rúd hajlítómerevsége, valamint csillapítási mértéke volt. A lokális modellen először geometriailag nemlineáris számítást hajtottunk végre, és meghatároztuk a csillapítóelemek önsúly hatására várhatóan kialakuló geometriáját (8.b ábra). Mivel a csillapítóelem önsúly alatti geometriáját (lehajlását) jelentősen befolyásolja a ferdekábele dőlése és a csillapítóelem önsúly hatására kialakuló lehajlása is, ezért minden kábel esetén figyelembe vettük a kábeldőlés pontos értékét, és ennek függvényében határoztuk meg a csillapítóelem alakját, majd sajátfrekvenciáját.

A globális modellben rúd végeselemekkel modelleztük a ferdekábelt, a csillapítóelemet pedig két tömegpontból és a ferdekábel megfelelő pontja között definiált rugó-csillapító elemmel modelleztük, melynek rugóállandóját és csillapítását a kísérletek alapján vettük fel. A ferdekábel gerjesztéséhez egy, a kábelek végpontjait összekötő egyenesbe eső hatásvonalú harmonikus erőt alkalmaztunk. Ez az erő azért okozott a kábel tengelyére merőleges irányú rezgést, mert a kábel az önsúlyának hatására belóg (melyet az önsúllyal terhelt kábel és geometriailag nemlineáris számítás alkalmazásával figyelembe vettünk), vagyis a gerjesztő erő hatásvonalja nem esett egybe a ferdekábelével. A dinamikai számítások során először tranziens módon, *time-history* analízissel meghatároztuk a szerkezet gerjesztésre adott időbeni válaszát, a rezgésamplitúdó időben fokozatos növekedését (9.a ábra). Ezt követően harmonikus analízissel meghatároztuk a szerkezet gerjesztésre adott állandósult (steady state) válaszát (9.b ábra). A két számítás eredményeinek összehasonlításával validáltuk a modellünket.

Minden kábel esetén megvizsgáltuk, hogy a ferdekábel hossza mentén különböző pozíciókba helyezett csillapítóelemek hogyan viselkednek, mennyire hatékonyak. A vizsgálatokat két konfigurációban végeztük el: először szimmetrikus csillapítóval, amikor a csillapítóelem két ága azonos hosszúságú volt, majd aszimmetrikus, elhangolt csillapítókkal. A kábel középső keresztmetszetének amplitúdója és a tömegpontok amplitúdójának részletes elemzése alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a pontosan hangolt csillapító hatékonysága romlik a ferdekábel elhangolódásával, ugyanakkor az elhangolt esetben javul a csillapítóelem hatásfoka. Ebből következik, hogy az elhangolt csillapítók jóval tágabb frekvenciatartományban hatékonyak, alkalmazásukat ez a viselkedés teszi észszerűvé.



9. ábra. A J07 kábel eredménye a) tranziens analízissel; b) harmonikus analízissel

Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A kábelcsillapító helyszíni hangolása

A csillapítóelemek gyártása és helyszíni elhelyezése az előzetes terveknek megfelelően történt, ugyanakkor a megfelelő csillapítási hatások biztosításához szükséges volt a kábelcsillapítók helyszíni hangolása, melyet a kábeleken végzett sajátfrekvenciamérések alapján végeztünk el. A ferdekábel mért sajátfrekvenciája minden esetben a korábbi mérések által kijelölt tartományba esett. A csillapítóelemek hangolását a ferdekábel sajátfrekvenciájához képest $\pm 10\%$ -os eltéréssel terveztük elvégezni. A kábelek beállítása során törekedtünk arra is, hogy a messenger kábeleket olyan irányban állítsuk be, hogy a gravitáció hatására történő lehajlás, valamint a kábel terheletlen állapotban látható görbülete ellentétes irányba essenek, így a csillapítóelem látszólagos statikus lehajlását csökkenteni tudtuk.

Összefoglalás

A cikkben az „Atlétikai Stadion projekt” keretében megépült Osztószigeti ferdekábeles gyalogoshíd bemutatása után a hídon alkalmazott kábelcsillapító elemek fejlesztésének és tervezésének folyamatát mutattuk be. A Stockbridge rendszerű kábelcsillapító egyedi geometriai kialakítással és széles frekvenciatartományban való állíthatósággal lett kifejlesztve. A cikkben ismertettük a csillapítóelem szerkezeti kialakítását, működésének mechanikai hátterét. A fejlesztés laboratóriumi vizsgálatok és lokális/globális numerikus modelleken végzett dinamikus analízis támogatásával történt. A hazai együttműködés keretében fejlesztett, tervezett és gyártott kábelcsillapító elem további hidakon is hasonló módon lesz alkalmazható a jövőben.

Köszönetnyilvánítás

A kábelcsillapító elem megtervezésében, gyártásában és kiépítésében szoros együttműködésben dolgozott a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék, a Speciálterv Építőmérnöki Kft., valamint a Hídépítő Zrt. A csillapítóelemeket az Acélhidak Kft. gyártotta le.

Irodalomjegyzék

- Foti, Francesco – Martinelli, Luca (2018). „Hysteretic Behaviour of Stockbridge Dampers: Modelling and Parameter Identification”. *Mathematical Problems in Engineering*, 1.
<https://doi.org/10.1155/2018/8925121>
- Kövesdi Balázs et al. (2023). „Az osztószigeti ferde kábeles híd kábelcsillapítóinak tervezése és dinamikai számítása”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, 20/2, 36–45.
- Preformed Line Products (2013). *Aeolian Vibration Basics*. Cleveland: Preformed Line Products.
https://plp.com/th/images/pdfs/Energy/Transmission/EN-ML-1007-4_Aeolian_vibration_basics.pdf
- Sun, Limin – Chen, Lin – Huang, Hongwei (2022). „Stay Cable Vibration Mitigation: A Review”. *Advances in Structural Engineering*, 25/16, 3368–3404.
<https://doi.org/10.1177/13694332221132316>
- Yin, Quing et al. (2021). „The Approximate Calculation of the Natural Frequencies of a Stockbridge Type Vibration Damper and Analysis of Natural Frequencies Sensitivity to the Structural Parameters”. *Mechanical Sciences*, 12/2, 863–783.
<https://doi.org/10.5194/ms-12-863-2021>

A sátoraljaújhelyi Nemzeti összetartozás hídja – széldinamikai vizsgálatok

The Bridge of National Unity in Sátoraljaújhely – Aerodynamic Analysis

Kövesdi Balázs¹ – Hegyi Péter² – Dunai László³ – Szigeti Zoltán⁴ – Gondár Péter⁵ –
Vad János⁶ – Havasi-Tóth Balázs⁷

¹ az MTA doktora, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kovesdi.balazs@emk.bme.hu

² PhD, adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
hegyi.peter@emk.bme.hu

³ az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
dunai.laszlo@emk.bme.hu

⁴ műszaki igazgatóhelyettes, felelős tervező, MSc Kft., Budapest
szigeti@mschu.hu

⁵ szakági főmérnök, tervező, MSc Kft., Budapest
gondar.peter@mschu.hu

⁶ az MTA doktora, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék, Budapest
vad.janos@gpk.bme.hu

⁷ PhD, adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék, Budapest
havasi-toth.balazs@gpk.bme.hu

Összefoglalás

Idegenforgalmi vonzerejüknek köszönhetően a nagy fesztávú gyalogoshidak népszerű hídszerkezeti megoldások, amelyek napjainkban egyre nagyobb számban épülnek világszerte. Sátoraljaújhely csatlakozott a nemzetközi trendhez, és a Zemplén Kalandpark fejlesztéséhez kapcsolódóan, a várost ölelő hegyek összeköttetéseként 2024-ben elkészült az önkormányzat által megálmodott 700 m-es, világrekorder támaszközü kötélhíd. Jelen cikkben bemutatjuk a szerkezetet, illetve annak tervezési szempontjait, kiemelt figyelmet szentelve a széldinamikai vizsgálatoknak, amelyekben a kutatás és az ipari alkalmazás szoros kapcsolata valósult meg.

Abstract

Thanks to their tourist appeal, long-span pedestrian bridges are a popular bridge design solution and are now being built in increasing numbers around the world. Sátoraljaújhely joined the international trend in 2024 when the construction of a 700 m long pedestrian rope bridge connecting two mountains was completed as part of the development of the Zemplén Adventure Park. This paper presents the structural details of the bridge and its design, with special emphasis on the aerodynamic analysis, which closely linked research and industrial application.

Kulcsszavak: gyalogoshíd, kötélhíd, széldinamika, CFD

Keywords: pedestrian bridge, suspension bridge, aerodynamics, CFD

Bevezetés

Sátoraljaújhely városa kiemelt stratégiai ágazatként tekint a turizmusra. Ennek szellemében az önkormányzat üzemeltetésében működő Zemplén Kalandpark bővítéséként egy olyan grandiózus, 700 méter fesztávolságú összeköttetést álmodtak meg a város határán emelkedő Szárhegy és Várhegy között, amely azontúl, hogy biztosítja a két hegyoldal közötti közvetlen átjárást, önmagában is a kalandpark, illetve a térség turisztikai zászlóshajójává válhat. A nagy fesztávú gyalogoshidak mint turisztikai attrakciók egyre népszerűbbek. Ennek ellenére az ilyen jellegű szerkezetek tervezése és kivitelezése még nem tartozik a hidászok mindennapi gyakorlatához. A sátoraljaújhelyi kötéllhíd is számos egyedi megfontolást igénylő műszaki kihívást rejtett magában, ilyen volt a szerkezet széldinamikai viselkedésének elemzése is.

2017 és 2018 között az MSc Kft. mint generáltervező, a Magyar Turisztikai Ügynökség megbízásából elkészítette a híd engedélyezési és tenderterveit. Már ebben a fázisban is kiemelt fontossággal bírt a tervezett szerkezet dinamikai viselkedésének vizsgálata, melyet Kovács Imre (Dynamik Consulting Kft.), a terület nemzetközileg elismert szakértője hajtott végre. A statikai és dinamikai számítások független ellenőrzését a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Hidak és Szerkezetek Tanszék végezte. Ezt követően, 2021-ben a Graboplan Industrie Kft. megkezdte a kivitelezés előkészítését, az MSc Kft. pedig a kiviteli és szereléstechológiai tervek elkészítését. A kivitelező felülvizsgáltatta és pontosította a korábban készült széldinamikai számításokat, különös tekintettel az ezzel kapcsolatban tendertervi szinten javasolt konstrukciós megoldásokra. Az ehhez szükséges numerikus és fizikai modellvizsgálatokat az Unitef'83 Zrt. megbízásából a BME Áramlástan Tanszék és a Hidak és Szerkezetek Tanszék hajtotta végre, szoros együttműködésben a híd tervezőivel. Jelen cikkben bemutatjuk a világrekorder szerkezetet, annak speciális hídszerkezeti kialakításait és szerkezeti viselkedését, valamint ismertetjük a BME és a tervezők együttműködésében elvégzett széldinamikai vizsgálatokat, laboratóriumi kísérleteket és numerikus szimulációkat, melyek együttesével lehetett igazolni a hídszerkezet statikai és dinamikai megfelelőségét.

A híd bemutatása

A szerkezet egy kötéllhíd, amely egy olyan függőhíd, ahol a gyalogospálya közvetlenül a fő tartókábelekre kerül, ezáltal nincs szükség pilonra és függőleges függesztő elemekre. Az egymástól 700 m-re lévő végpontok között kifeszített, másodfokú parabolához közelítő alakban futó hat darab, 70 mm átmérőjű acél főkábel tartja a hierarchikus felépítésű pályaszerkezetet. A szerkezet hídközponti terheletlen belógása ~27 m. Az 1,2 m széles, kétirányú közlekedést biztosító gyalogospályát a peremeken futó hossztartók között kialakított járórács biztosítja. Ennek legnagyobb völgy fölötti magassága ~84 m. A hossztartók 2 méterenként elhelyezett pályatartó keretekre támaszkodnak, a terhelés ezen keresztül jut a fő tartókábelekre. A megépült szerkezet az 1. ábrán látható.



1. ábra. A megépült hídszerkezet

Forrás: MSc Kft.

A hidat egy kétoldali, elleníves lefeszítő szélkábelrendszer merevíti, amely két darab 70 mm átmérőjű fő szélkábelből, illetve ezeket a főkábelekkel összekötő 18 mm-es mellékszélkábelekből áll. A szélkábelrendszer elsősorban a szél okozta oldalirányú elmozdulások csökkentésére hivatott, de többlet csavarómerevséget is biztosít a szerkezetnek. Ugyanilyen funkciót látnak el a híd induló szakaszain található, fix alépítményekhez csatlakozó 18, illetve 26 mm-es lekötő kábelek. A felszerkezet összesen 149 t (6490 m) kábelből és további 96 t acélszerkezetből áll. A kábelekben ébredő jelentős húzóerőt (fő kábelekben: 6-szor ~2200 kN) vasbeton alépítményekbe integrált acélszerkezetek veszik fel. Ezek helyzeti állékonyságát a hegyoldalakra jellemző, erősen töredezett dácitba beépített, 23 m hosszú acélpázmás közethorgonyok biztosítják, amelyek alkalmazása hazai viszonylatban szintén egyedinek számít. A hídon egyszerre maximum 300 látogató tartózkodhat folyamatos üzemeltetői felügyelet mellett, kedvező időjárású viszonyok esetén. A szerkezetről további információ „A sátoraljaújhelyi gyalogos kötéllhíd tervezése” cikkben található (Szigeti–Gondár 2024).

Szerkezeti viselkedés

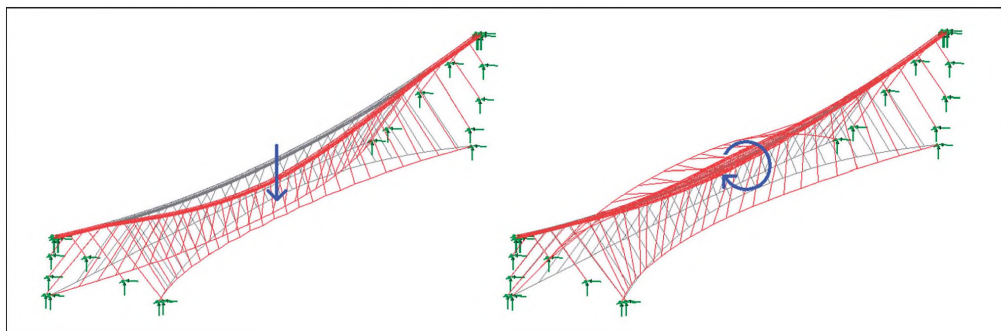
A kötéllhidak geometriailag nemlineáris viselkedésűek, vagyis a merevségük nemcsak az alkalmazott anyagoktól és szelvényméretekéntől függ, hanem a híd aktuális geometriájától is. Minél jobban megfeszítjük a kábeleket, vagyis minél kisebb a belógásuk, annál merevebben viselkedik a szerkezet.

A híd felszerkezetének tervezéséhez egy térbeli, nemlineáris végelelemes rúdmodell készült, amely lépésről lépésre figyelembe vette az építési sorrendet, ezáltal pontosan lekövette a kábelekben létrejövő erőrendszer és a végleges hídalak kialakulásának fázisait. A szerkezet statikai erőrendszere, illetve végleges geometriája egy olyan optimumra lett igazítva, amely kellő oldalirányú és csavaró merevséget biztosít, illetve a kialakuló hosszszelvény a gyalogoskomfort szempontjából még elfogadható marad, azaz nem túl meredek a híd. Érdekes, hogy a korlátozott látogatószám miatt, bár funkcióját tekintve gyalogoshídról beszélünk, nem a gyalogosok adják a mér-

tékadó terhelést, hanem az ónos eső okozta jegesedés (~170 kg/híd folyóméter), illetve az ezzel egyidejűleg fellépő erős szél. Számításaink eredményeként e szélsőséges meteorológiai terhek esetén a hídközépen jelentős, méteres nagyságrendű függőleges elmozdulások és többméteres oldalirányú kilengések adódtak.

Dinamikai sajátosságok, érzékenység

Az ilyen típusú kábelszerkezetek a szélkábelszámítási rendszer kedvező hatása ellenére is jelentősen kisebb csavarómerevséggel bírnak (2. ábra), mint a klasszikus merevgerendás, illetve merevítőtartóval ellátott ferdekábeles vagy függőhidak. Ez markánsan meghatározza a szerkezet dinamikai viselkedését, hiszen a csavaró jellegű rezgésalakok külső hatásokra viszonylag könnyen gerjeszthetők válnak. Az elsődleges, engedélyezési tervi széldinamikai elemzés rámutatott, hogy a hídpálya konstrukciós kialakítása belebegésre érzékenyvé teheti a szerkezetet. Az esetlegesen lejegesedő, azáltal tömörré váló járórács alatt és fölött nyomáskülönbség alakulhat ki, melynek gerjesztő hatására bizonyos kritikus szélesebesség fölött, az egymáshoz viszonylag közel eső függőleges, illetve csavaró rezgésalakok egymásra hangolódásával aerodinamikai instabilitás léphet fel. A szerkezet alacsony csavarómerevségéből adódóan a kezdeti, egyszerűsített számítások szerint ez a kritikus szélesebesség a szabvány szerinti biztonsági szint alatt maradt, ezért kiviteli tervi szinten szükségessé vált egy teljes körű, kísérleteken, numerikus analízisen és kapcsolt modellen alapuló széldinamikai vizsgálat.



2. ábra. A híd első függőleges ($f \sim 0,24$ Hz) és csavaró ($f \sim 0,33$ Hz) rezgésalakja

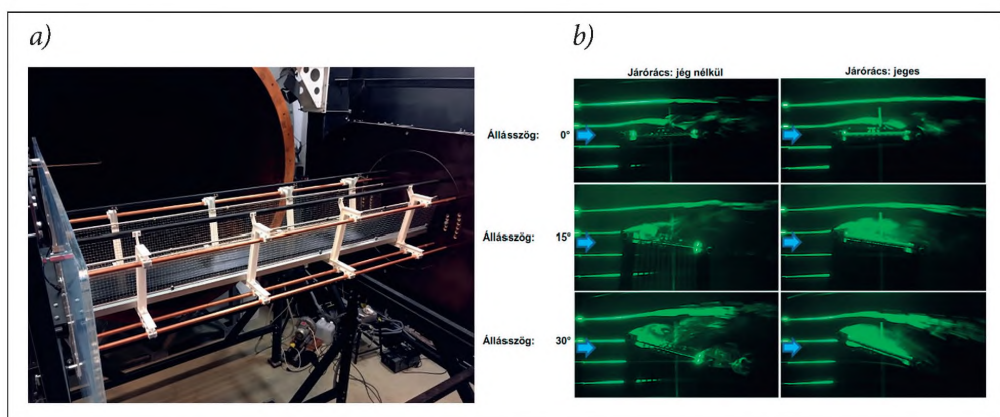
Forrás: MSc Kft.

Szélcsatorna-kísérletek

Statikus szélterhelési vizsgálat

A szerkezetre ható, időben állandónak feltételezett szélterhelésből származó erőket a szerkezet egy 8 méter hosszú szakaszának 1:4 arányban kicsinyített szegmensmodelljén (3.a ábra) végzett kísérlettel határoztuk meg a BME Áramlástan Tanszékén üzemelő nagy, vízszintes áramú, recirkulációs, Göttingen-típusú szélcsatornában.

A mérés elsődleges célja a szerkezet erő- és nyomatéktényezőinek meghatározása volt a különböző megfúvási szögek és jegesedési esetek következtében, különböző szélsébségek esetén kialakuló erőrendszer kis mintán keresztül történő becslésével. A hídszegmensre ható, szélterhelésből származó erőket 10 és 25 m/s közötti szélsébség-tartományban 5 m/s lépésekben, valamint -10° és $+10^\circ$ közötti megfúvási szögtartományban 2° -os lépésekben végeztük el. A szerkezetre ható erők méréséhez erőmérő cellákat használtunk. A tesztek az oldalháló szabad és jegesedés következtében tömörnek feltételezett állapotában is elvégeztük, a járórácst minden esetben tömörnek feltételeztük. A mérési eredmények hitelességének megalapozására az ellenállás-tényező Reynolds-számtól való függetlenségére vonatkozó előzetes méréseket végeztünk.



3. ábra. a) Hídszegmens szélcsatorna modellje, b) a keresztmetszet körüli áramképek

Forrás: BME Áramlástan Tanszék

Széldinamikai vizsgálat

A dinamikus szélterheléses szélcsatornamodell-méréseket megelőzte egy numerikus áramlástan szimulációs elemzés (computational fluid dynamics, CFD). A CFD segítségével azt vizsgáltuk, hogy bejegesedett járórács esetében a hídpályán kialakuló nyomáskülönbségből származó erő-, illetve nyomatékkomponensek milyen mértékben teszik belebégésre hajlamossá a keresztmetszetet. A CFD-modell eredményeinek ismerete nagymértékben segítette az ezt követő szélcsatorna-modellezést. A dinamikus tesztelésre alkalmas hídmodell a valós szerkezet 16 méter hosszú, 1:8 méretarányú kicsinyített szegmensmodellje volt. A statikus modellben alkalmazott merev, erőmérőcellás rögzítéssel szemben a dinamikus szélcsatornatesztek során egy megfelelően választott merevségű hengeres csavarrugós felfüggesztést alkalmaztunk. A modellkészítés során kiemelt figyelmet fordítottunk arra, hogy a függőleges irányú és torziós sajátfrekvenciák aránya a valós szerkezetével azonos legyen, azonban a vizsgálat során a szerkezet függőleges és csavaró irányú karakterisztikáját egyaránt

lineárisnak feltételeztük. Annak érdekében, hogy pusztán a megfűvás hatására lengések alakulhassanak ki, törekedtünk a szerkezet saját belső csillapításának minimalizálására. A statikus modellhez hasonlóan a dinamikus vizsgálat során is vizsgáltuk a hídszerkezet különböző geometriai változatait, a jegesedés következtében tömörre vált járórácsos és oldalhálós eseteket. A szélsősebességet a széldinamikai vizsgálat során 1 és 37 m/s között változtattuk, nyugalmi és gerjesztett állapotból indulva figyelve meg a hídmodell mozgását.

A klasszikus szélcsatorna-vizsgálatok eredményei

Az eredmények alátámasztották az előzetes várakozásokat, vagyis teljesen lejegesedő járórács esetén konstans ~ 15 m/s-os kritikus szélsősebességtől kialakulhat a belebegés (3.b ábra). Azonban a klasszikusnak mondható szélcsatornamodell lineáris jellege miatt a valós szerkezet nagymértékű elmozdulásai következtében fellépő merevség-növekedését, vagyis nemlineáris felkeményedését nem tudtuk figyelembe venni. Emiatt a lengések mért amplitúdói egy határon túl már nem adtak megbízható eredményt. Tehát csak a belebegés bekövetkezésének tényéről lehetett megbízható következtetéseket levonni, az utána kialakuló, ún. posztkritikus állapotról nem. Ezért az elemzés nem állt meg ezen a szinten, hanem kidolgozásra került egy olyan, tudományos szempontból újszerű eljárás, amellyel a posztkritikus állapot vizsgálható.

A belebegési számítások módszere

A belebegés posztkritikus lefutásának vizsgálatát numerikus módszerrel, egy háromdimenziós rúdmodell segítségével hajtottuk végre. A belebegést oly módon modelleztük, hogy egy idő- és elmozdulásfüggő gerjesztő erőt működtettünk a hídszerkezeten, mely a levegőáramlás által keltett gerjesztés hatását a Scanlan-féle belebegési derivatívumok segítségével adja meg (Scanlan–Tomko 1971). A derivatívumok értékei a szélsősebességtől, a szerkezet körüli áramlási viszonyoktól, valamint a szerkezet időbeli pozíciójától és a pozíció időbeli változásától (sebesség, szögsebesség) függenek. A derivatívumok meghatározása a szélcsatorna-kísérletek, illetve a numerikus CFD-szimulációk alapján történt. A numerikus modell jellegéből fakadóan az alkalmazott algoritmus egy időnövekményes eljárás volt, ahol egy adott időlépcsőben definiált teher a megelőző időlépcsőkben kiszámolt elmozdulások és differenciáik alapján lett meghatározva. A növekményi módszer megfelelő működéséhez a Δt időlépés helyes felvétele elengedhetetlen. Ennek érdekében előzetes elemzéseket végeztünk, és megállapítottuk az alkalmazandó időlépcső értékét, mely 0,1 másodpercre adódott. Az alkalmazott eljárás természetéből fakadóan csak akkor várható, hogy belebegés alakul ki, ha kezdeti zavart viszünk a rendszerbe. Ennek pontos nagyságát, időtartamát és típusát is meghatároztuk az előzetes vizsgálataink során. Várakozásaink szerint a híd szélső szakaszán, a közeli terep hatása miatt, a szélsősebesség kisebb lesz, mint a szerkezet közepén. Ennek figyelembevételével a modell eredményei realisabbá

tehetők. Minden egyes pályatartó keretre ható terhelést az adott keretnél feltételezett szélsősebesség és a keresztmetszet mozgásai alapján határoztuk meg.

A dinamikai viselkedést alapvetően befolyásolja a szerkezeti csillapítás értéke. Számításunkban szabványos és szakirodalmi értékek alapján vettük fel ezt a paramétert 0,32%-os értékre (MSZ EN 1991-1-4 2016; Pipinato 2021). A számítás első fázisa-ként a modell beállt a híd építési állapotait, a jégterhet és 0 °C-os szerkezeti hőmérsékletet figyelembe vevő alapállapotába. Ezt követően definiáltuk a kezdeti zavart, melyet már tranziens analízissel oldottunk meg, vagyis a szerkezet teherre bekövetkező rezgésállapotát is figyelembe vettük. Ettől a ponttól kezdve a levegőáramlás által keltett, a megelőző elmozdulási állapotok alapján számított gerjesztő erőket működtettük a szerkezeten, és ezt a terhelést időlépésként frissítve követtük a szerkezet dinamikai válaszát. Minden teherlépcsőben figyelembe vettük a nagy elmozdulások hatását. Az analízist addig futtattuk, amíg a híd mozgásának egyértelmű trendje ki nem rajzolódott.

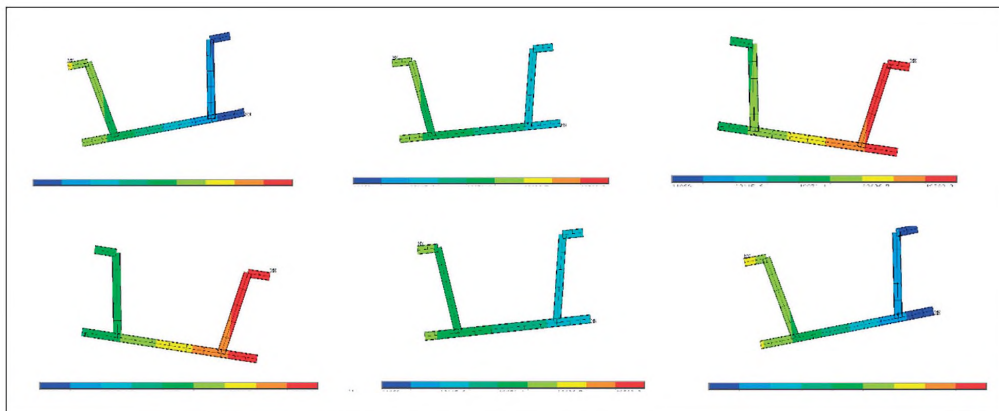
A belebegési számítások eredményei

A bemutatott modellel több konfigurációban végeztünk vizsgálatokat. Először különböző, de a hossz mentén állandó szélsősebességeket alkalmaztunk. Megállapítottuk, hogy 10 m/s-os szélsősebesség esetén az eltolódásban látható kezdeti zavar hamar lecsillapodik, elhal. 15 m/s esetén ~200 s-tól elindul a belebegés jelensége, a híd tengely függőleges rezgése és csavarodása egyszerre következik be. Hozzávetőleg 550 s-nál beáll egy állandósult elmozdulási amplitúdó a híd tengelyében, miközben az elfordulások még növekednek. A mozgás amplitúdója ~60 mm, az elfordulás ~2° (ez a pályatartók szélei ±50 mm elmozdulásának felel meg). 20 m/s esetén hamarabb indul el a belebegés, és ~400 s-tól állandósul a rezgés. Az elmozdulások nagyságrendje a 15 m/s-nál tapasztaltak 3–3,5-szerese. További szélsősebesség-növekedés esetén egyre gyorsabban következik be az instabil állapot, és egyre gyorsabban áll be egy állandósult rezgés. A maximális függőleges elmozdulási amplitúdók nőnek, viszont érdekes módon az elfordulások 8° körül tetőznek.

A 4. ábra mutatja a középső keresztmetszet jellemző elmozdulását. Látható, hogy az eltolódás és az elfordulás azonos frekvenciával következik be, ami tipikusan a belebegés jelenségének jellemzője. A híd hossza mentén változó szélsősebesség-eloszlást két módon vettük figyelembe. Az egyszerűbb esetben a híd szélső negyedeiben 15 m/s-os, míg a középső szakaszon 20 m/s-os, szakaszosan állandó szélsősebességet állítottunk be a modellben. A valósághűbb eset folytonos (parabolikus) szélsősebesség-eloszlást tartalmazott az előbbi két szélsőérték között. Az eredményt összehasonlítva az állandó értékű szélsősebesség esetével azt tapasztaltuk, hogy a viselkedés jellege szakaszonként állandó szélteher esetén a 15 m/s állandó szélsősebességhez van közel, folytonos esetben pedig a 20 m/s-hoz. Ezt a jelenséget magyarázhatja az, hogy a parabolikus eloszláshoz tartozó átlagos szélsősebesség nagyobb, mint a szakaszoshoz tartozó, vagyis a híd nagyobb része inkább a 20 m/s szélsősebességnek megfelelő mozgásokat végez. A moz-

gások jellege mellett azok nagyságáról alapvetően azt állapítottuk meg, hogy az állandó szélesség esetéhez képest csökkent, vagyis az állandó szélesség a biztonság javára tett közelítésként fogható föl.

A híd elmozdulásának frekvenciaspektrumát meghatározva megállapítottuk a belebegés domináns frekvenciáját. Az eredmények alapján ez a frekvencia kismértékben függött az alkalmazott szélességtől, jellemzően 0,6–0,8 Hz körül alakult. A csavaráshoz és a függőleges elmozduláshoz tartozó sajátfrekvenciák belebegés esetén azonosak voltak.



4. ábra. A híd középső keresztmetszetének elmozdult alakja 20 m/s szélesség esetén
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

A belebegés okozta váltakozó előjelű és sokszor ismétlődő elmozdulások szilárdsági és főleg fáradási szempontból is kérdésesek. A fáradási élettartam becslése a kábelekben kialakuló feszültséglengés alapján lehetséges. Ezért minden vizsgált szélesség esetén meghatároztuk a maximális és minimális kábelerőket. A fő tartókábelek esetében 110 kN, míg a szélkábeleknél 80 kN erőlengés adódott. Mivel az ezekből származtatható feszültséglengések a kábelek fáradási osztályához tartozó levágási határ alatt maradtak, megállapítható, hogy egy esetlegesen kialakuló belebegés nem okoz fáradási problémát.

Összefoglalás

A sátoraljaújhelyi 700 méter fesztávolságú gyalogos kötékhíd széldinamikai elemzését és a tervezés fontosabb aspektusait mutattuk be a cikkben. Az elvégzett szabványos, lineáris szélcsatorna-vizsgálatok és CFD-szimulációk eredményei azt mutatták, hogy szélsőséges időjárási körülmények esetében bizonyos kritikus szélesség fölött valóban kialakulhat egy aerodinamikailag instabil állapot. Egy tudományos szinten kuriózumnak mondható, az áramlástan eredményeket a mechanikai numerikus modellel összekapcsoló eljárás segítségével megállapítottuk, hogy nagy jelentősége van a

szélkábelrendszernek köszönhető felkeményedő csavarómerevség figyelembevételének: bár képes elindulni a belebegés, az elmozdulások, illetve kábelerők amplitúdói nem növekednek korlátlanul, hanem egy biztonságos tartományon belül maradnak. Ezt a konklúziót megerősítette a végrehajtott gyalogosdinamikai próbaterhelés is (5. ábra). Az elvégzett széldinamikai vizsgálatok jól szemléltetik, hogy a szerkezet egyedisége szükségessé tette a különböző szakterületek együttműködését, valamint a tudomány mai állásának megfelelő legfejlettebb eszközök, technológiák alkalmazását mind a tervezőasztalnál, mind a kivitelezés során.



5. ábra. A híd gyalogosdinamikai próbaterhelése
Forrás: BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Irodalomjegyzék

- MSZ EN 1991-1-4 (2016). *A tartószerkezeteket érő hatások, 1–4. rész: Általános hatások. Szélhatás*. Pipinato, Alessio, szerk. (2021). *Innovative Bridge Design Handbook – Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Oxford: Elsevier.
- Scanlan, Robert – Tomko, John J. (1971). „Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives”. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 97/6, 1717–1737.
<https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001526>
- Szigeti Zoltán – Gondár Péter (2024). „A sátoraljaújhelyi gyalogos kötéllhíd tervezése”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, 2, 84–95.

A Monostori Duna-híd tervezése és digitálisiker-fejlesztése

Design and Development of the Digital Twin of the Monostori Danube Bridge

Joó Attila László¹ – Mátyássy László²

¹ PhD, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
joo.attila@emk.bme.hu

² vezérigazgató, Pont-TERV Zrt., Budapest

Összefoglalás

A 2020-ban átadott Komárom és Komárno közötti Duna-határhidunk az első olyan hídszerkezetünk Magyarországon, amelyet a kivitelezés során felkészítettünk arra, hogy el tudjuk készíteni valós idejű digitális mását. A cikk összefoglalja a tervezés és a kivitelezés folyamatát, a hidak esetén is alkalmazható digitális iker (vagy digitális másolat) definícióját, valamint a fejlesztésének lépéseit az adott híd esetén.

Abstract

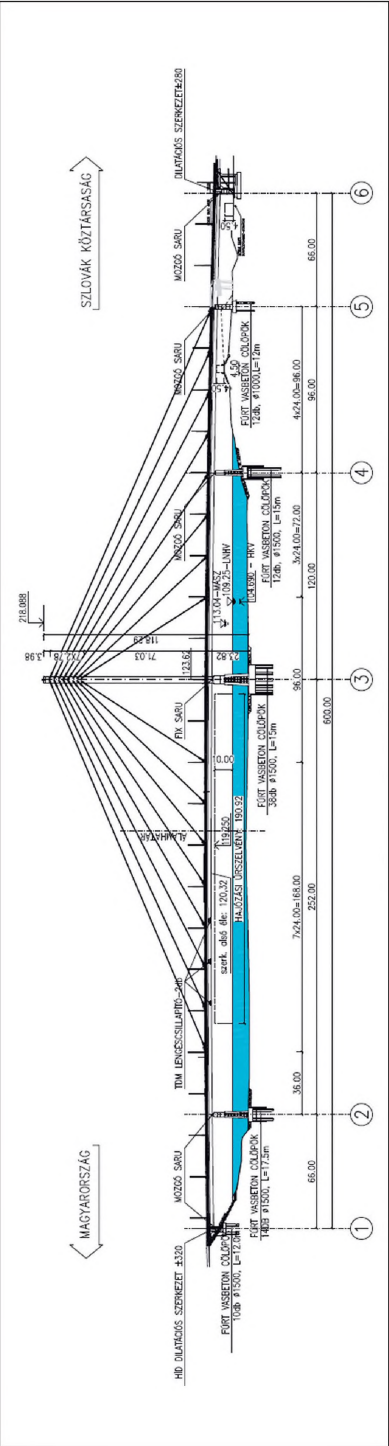
The Danube border bridge between Komárom and Komárno, handed over in 2020, is the first bridge structure in Hungary, which was prepared during construction to be able to have a real-time digital copy. This paper summarizes the design and construction processes, the definition of the digital twin (also known as a digital copy), and the steps of its development for the bridge.

Kulcsszavak: hídtervezés, digitális iker, épületinformációs modellezés (BIM), végelelemes modell (VEM)

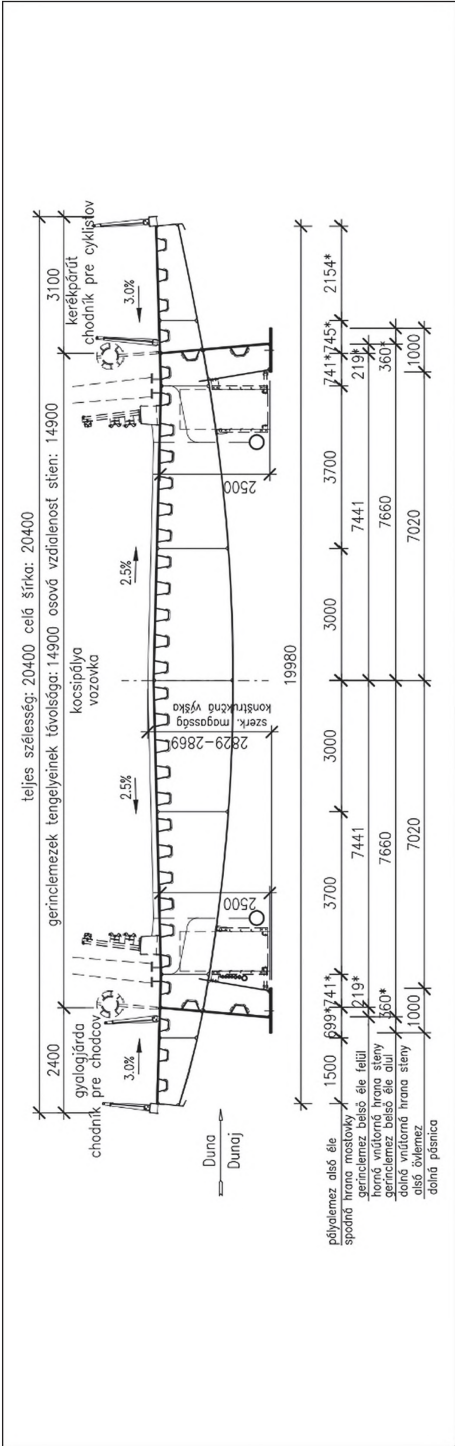
Keywords: bridge design, digital twin, building information modelling (BIM), finite element modelling (FEM)

A Monostori híd tervezése és kivitelezése

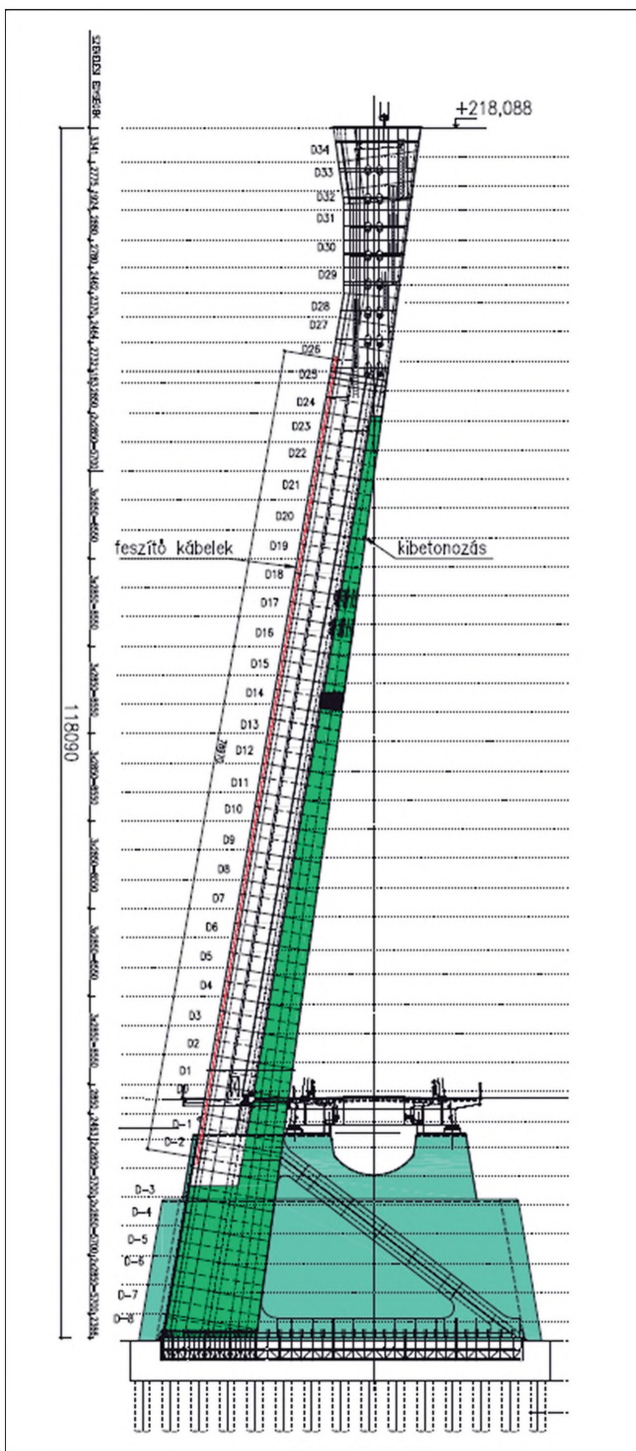
A Monostori híd terveit a Pont-Terv Zrt. és a Dopravoprojekt a.s. közösen készítette. A híd tervezéséről és kivitelezéséről több szakcikk született (Mátyássy et al. 2018; 2019), valamint több fórumon jelentek meg látványtervek és leírások a hídról, de röviden az alábbiakban is bemutatjuk. Az 1. ábrán tüntettük fel a híd oldalnézeti terveit, amelyen látszik az egypilonos, ferdekábeles kialakítás. Ennek különlegessége, hogy a pilon nem a híd hosszirányú szimmetriatengelyében helyezkedik el, hanem külponos, a pályaszerkezet befolyási oldaláról (a Duna folyási irányából) indul, és befelé, a pálya felé dől. A 2. ábra mutatja az ortotrop acélszerkezetű merevítőtartót, melyen a pályalemezt trapéz alakú bordák erősítik a híd hosszitengelyének irányában. Az útpálya két forgalmi sávval rendelkezik, korlátok közötti szélessége 11,5 m, a befolyási oldalon 1,8 m gyalogjárda, a kifolyási oldalon pedig 2,5 m szélességű kerékpárutat vezettek át.



I. ábra. A híd oldalnézeti terve
Forrás: Mátyássy et al. 2018



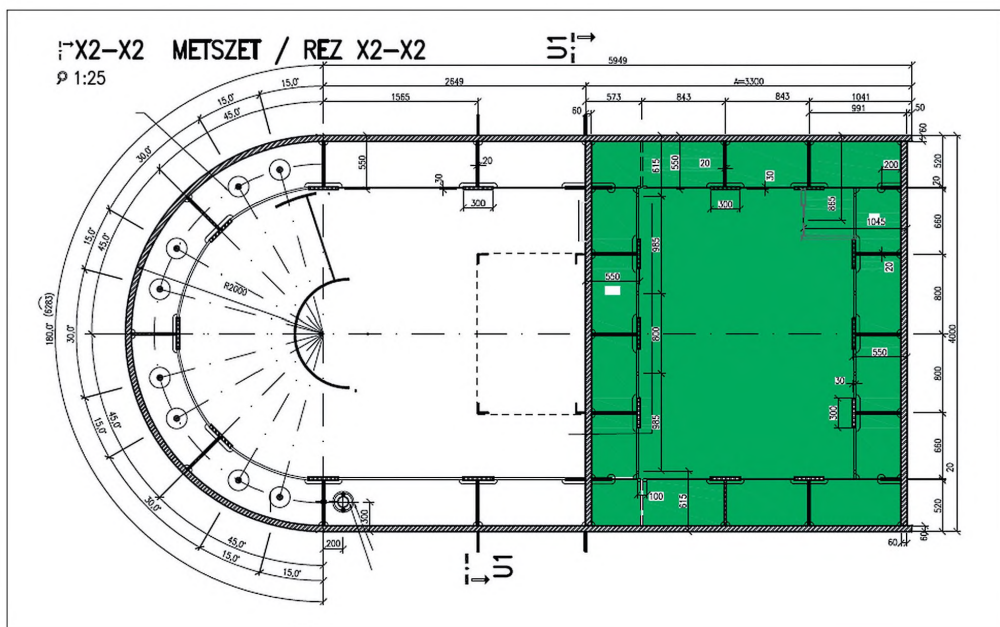
2. ábra. A híd merevítőtartójának általános keresztmetszete
Forrás: Mátyássy et al. 2018



3. ábra. A híd pilonjának terve
 Forrás: Mátyássy et al. 2018

A híd teljes hossza 601,6 m, a legnagyobb nyílása 252 m. A pillér elhelyezkedését a közelben lévő vasúti híd és annak pillére befolyásolták, ugyanis azzal összhangban kellett biztosítani a hajózási útvonalat. A merevítőtartót ferde kábelekkal függesztették a pilonra. Az acélszerkezetű pilon (3. ábra) a mederhíd középső pillérére épült be, ahol a befogást a pillértestbe elhelyezett acélszerkezetű kitámasztó rudak biztosítják.

A pilon keresztmetszete egyedi kialakítású (4. ábra), 70 m magasságig két cellára van osztva. A nyomott oldali cella kibetonozásra kerül, hogy a külpontos nyomóerőt kis alakváltozások mellett tudja levezetni az alapozásra. A pilon másik cellájában lépcső található, amely elvezet a kábelek lehorgonyzási pontjaihoz. A kábelek feszítése ezen felső lehorgonyzási pontoknál történt. A kábelek 43–85 közötti pázmákból állnak, a merevítőtartóban 24 méterenként, a pilonban 2,78 méterenként helyezkednek el.



4. ábra. A híd pilonjának keresztmetszete az alsó szakaszon

Forrás: Mátyássy et al. 2018

A híd gyártása három helyszínen, három cég telephelyén történt: „BANIMEX” Sp. z o.o., SAM – Shipbuilding and Machinery a.s., MCE Slaný s.r.o., a kivitelezését pedig a H-M DUNAHÍD Konzorcium végezte, több kiemelt alvállalkozóval együttműködésben. A kivitelezést a pillérek építése után a kisebb nyílásköz pályaszerkezetének aláállványozott építésével folytatták, párhuzamosan a pilon építésével. A merevítőtartó közúton szállítható elemeit Csepelen szerelték elő, így állt össze egy-egy pályaszerkezeti szegmens, melyeket uszályokon juttattak el a hídhoz. A hosszabbik nyí-

lasköz építése konzolos kinyúlással történt, párhuzamosan a kábelek behelyezésével. A módszer különlegességét és az építés közbeni állapot érzékenységét mutatja, hogy a pályaszerkezetben külön csillapítóelemeket kellett alkalmazni, hogy a széldinamikai hatások ne jelentsenek veszélyt a szerkezet viselkedésére. A híd gyártásának előkészítése, gyártása és szerelése szerencsés módon egybeesett egy közös ipari és egyetemi kutatási projekttel, melynek keretén belül megkezdődhetett a digitális iker fejlesztése (Joó et al. 2022a).

A digitális iker definíciója

A digitális iker fogalma a számítógépi tervezési és méretezési eljárások terjedésével, azok gyakorlati tervezésben történő alkalmazásának megszilárdulása után született meg, amikor felmerült, hogy a numerikus modelleket az alaptervezésnél összetettebb és automatizált eljárások kifejlesztésére is lehetne használni. Az első alkalmazások még nem tervezési, hanem üzemeltetési témához kapcsolódtak. Michael Grieves és John Vickers (2017) a Michigan Universityn a termékéletről ciklus-menedzsment fejlesztésével (product lifecycle management, PLM) foglalkoztak, és egy adott gyártási folyamat virtuális másán tesztelhetők a folyamat változtatásának hatását az adott termék gyártására, tartósságára és életciklusára. A szerzők igazolták a virtuális digitális ikernek nevezett modell alkalmazhatósági lehetőségeit a gyártásra, a hatékonyságra és a terméktámogatásra.

A hidak terén első hazai példánk, a Monostori híd digitális ikerfejlesztése azt a globális célt tűzte ki, hogy egy olyan építőipari prototípus-fejlesztést hajtsunk végre, amely lehetővé teszi a hidak gazdaságosabb és biztonságosabb üzemeltetését. A digitális iker a valós objektumok virtuális másolatai, amelyeket úgy terveztek, hogy valós időben, a lehető legpontosabban kövessék fizikai ikertestvéreiket az azokat érő hatásokkal és az azokra adott válaszokkal együtt.

Amennyiben meg tud valósulni a digitális iker fejlesztése, akkor ez a szerkezetek tervezési és kivitelezési szakaszában is előnyös lehet, hiszen a szerkezetek viselkedésének nyomon követése visszahat azok biztonsági szintjére, és így akár később a szabványokba beépülve gazdaságosabb szerkezetek építhetők. Az üzemeltetés során egyértelmű előnyként jelentkezik a folyamatos állapot- és kockázatelemzés, amely csökkentheti az ütemezett hídfelülvizsgálatok számát, és egyben növeli a lehetséges tönkremenetekkel szembeni biztonsági szintet is. A digitális iker a szerkezet életciklusa végén betekintési lehetőséget nyújt annak teljes élettörténetébe, így elő tudja segíteni az esetleges funkcióváltást, újrahaznosítást is, ami környezetvédelmi és fenntarthatósági célokból is kiemelten fontos.

A Monostori híd digitális ikerének fejlesztését a következő fejezetben mutatjuk be. A szerkezet teljes életciklusának ismeretéhez már a gyártás közben keletkező hatásokat is mérnünk és szimulálnunk kell, erről szól a következő fejezet. Ezután bemutattuk a híd szempontjából legfontosabb hatást, a járműterhelések meghatározásának módját. Amennyiben a hatások már ismertek, akkor az üzemeltetés közbeni szerke-

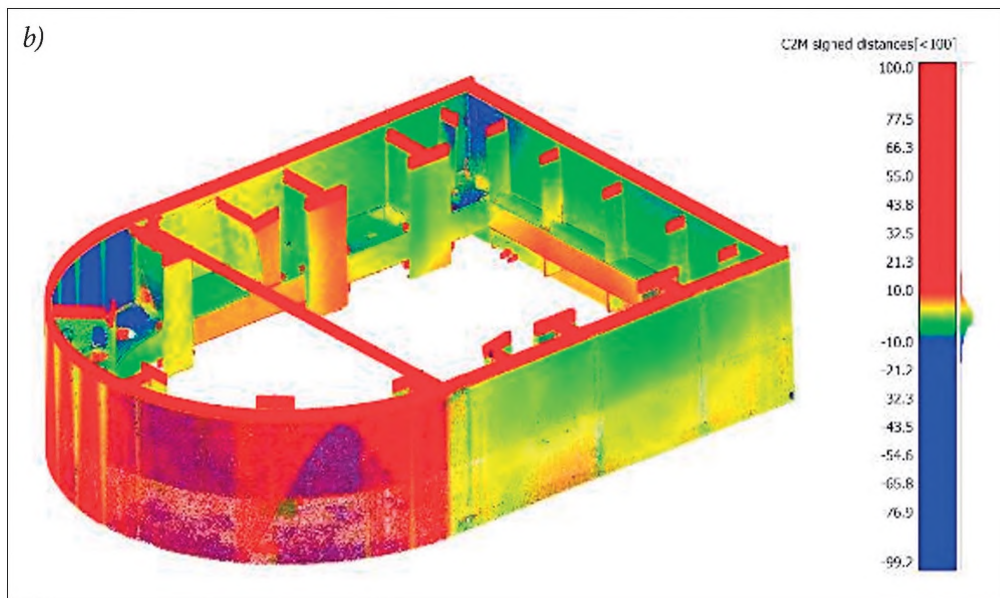
zeti viselkedést valós idejű végelelemes szimulációval tudjuk követni. Végül bemutatjuk azt a digitálisiker-rendszert, amely egy épületinformációs modellbe (BIM-modell, 3D-geometria és a geometriai objektumokhoz rendelt adatok) integrálja a történeti és valós idejű adatokat.

Gyártás közbeni mérések

A teljes életciklus során keletkező hatások tekintetében fontos ismernünk a gyártás és szerelés közben végzett eljárások, elsősorban a hegesztések hatására keletkező maradófeszültségeket és alakváltozásokat is. Ezt a hatást lehet mérni és szimulálni is, ezt mutatja be Somogyi József Árpád és szerzőtársai 2022-es cikke. A geometriai mérésekre mutat példát az 5. ábra, ahol a pilon egy szegmensének gyártás közbeni

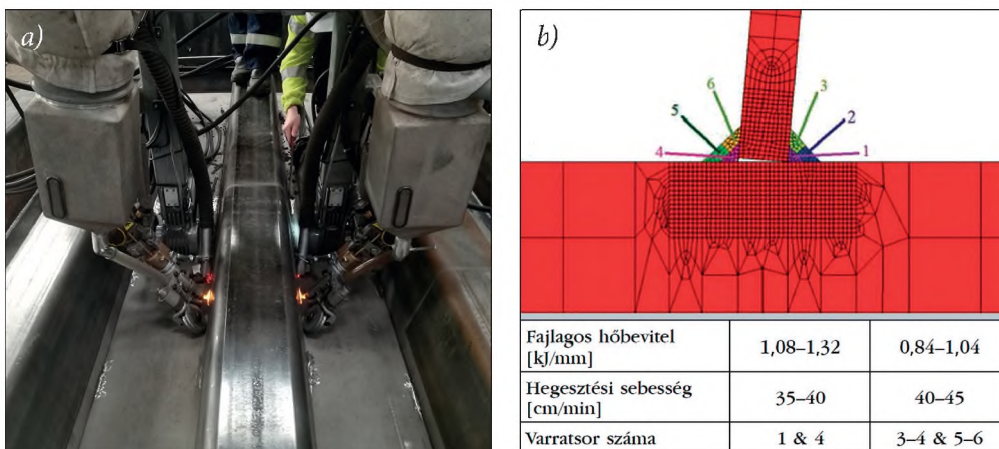


5. ábra. a) A híd pilonszegmensének lézerszkennelése, b) a pontfelhő értékelése
Forrás: Somogyi et al. 2022



lézerszkennelése történik. A lézerszkennelés lehetővé teszi, hogy a szerkezet minden pontjáról kellő pontosságú geometriai információt kapjunk, és azt egy pontfelhőben tároljuk. Az így előállított pontfelhőt össze lehet hasonlítani a szerkezet 3D-s tervezési BIM-modelljével, ami geometriailag pontosnak tekinthető. Az eltéréseket megjelenítve – jelen példában színes térképen – fel lehet tární azokat a részeket, amelyek esetleg nem felelnek meg a gyártás során előírt tűrésnek, és további megmunkálást igényelnek.

A 6.a ábra a gyártás közbeni hegesztési eljárást szemlélteti, amelynek során méréseket végeztünk a hőbevitel, valamint a maradó feszültségek meghatározásának céljából. A méréseken túlmenően a hegesztési eljárást és hatását szimuláltuk is (6.b ábra) egy kapcsolt termodinamikai analízissel, melyről bővebben Kollár Dénes és szerzőtársai (2022) cikkében lehet olvasni. Ezeket a mérési és szimulációs eljárásokat a Monostori híd acélszerkezetének minden típuselemére elvégeztük, így teljes képet kaptunk a híd gyártás és szerelés utáni állapotáról.



6. ábra. a) A pályalemez hegesztése, b) a hegesztéshez használt végeleemes modell részletezettsége
Forrás: Kollár et al. 2022

Üzemeltetés közbeni mérések a terhelés meghatározásához – mesterséges intelligencia alkalmazása

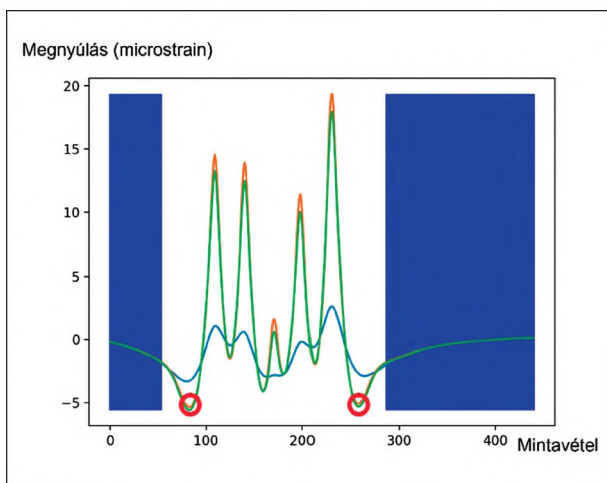
Ha a hosszabb távú hatásokat vizsgáljuk, akkor elengedhetetlenül szükséges, hogy a járműterheléseket a híd teljes életciklusa alatt – lehetőleg valós időben – ismerjük. A járműteher (tengelyterhelés és összsúly) nem egy közvetlenül mérhető adat, így azok meghatározására – bár léteznek a piacon kapható, aszfaltba épített megoldások, azok hátrányai miatt – külön eljárást fejlesztettünk, ezt mutatjuk be a következőkben. A járműterhelés meghatározásához nyúlásmérő bélyegszenzorokat helyeztünk el a pályaszerkezet alatt, olyan helyeken, ahol a jármű kereke közvetlenül fejti ki a hatását.

A Monostori híd esetében az ortotrop pályaalemez trapéz alakú bordáinak aljára helyeztük el a nyúlásmérő bélyegeket (lásd a 2. ábrán a bordákat az útpálya alatt).

A nagyszámú szenzor segítségével egy időben folyamatosan változó feszültség-görbe-halmazt kapunk, melyre a 7. ábra mutat példát. Jól látható, hogy az áthaladó jármű a tengelyek számától és távolságától függően több feszültséglengést okoz a szerkezeten. Az így mért adatok implicit módon nem párosíthatók össze egy-egy tengelysúlyadattal, hiszen egyféle jármű sokféle feszültséglengést tud okozni attól függően, hogy milyen sebességgel megy, és a sávon belül keresztirányban hol helyezkedik el a kerék. Ahhoz, hogy a mérés során rendelkezésre álló sok adatból vissza tudjuk számolni azt az egy lehetséges tengelyterhelést, amely a mért hatást okozta, egy mesterségesintelligencia-alapú mélytanuló algoritmust fejlesztettünk (Szinyéri et al. 2022; 2023; 2024).

Az ilyen algoritmusok esetében kiemelkedően fontos, hogy rendelkezünk egy megfelelő számosságú betanító esettel, azaz jelen esetben sokféle járművel tudjuk megterhelni a hidat, amelyek különböző tengelyszámmal és tengelyterheléssel rendelkeznek, különböző sebességgel haladnak, és a sávon belül különböző pozícióban helyezkednek el. Több ezres-tízezres nagyságrendű valódi mérést általában nem reális végrehajtani a hídon, de numerikus modellek segítségével el tudjuk végezni a nagyszámú szimulációt. A Monostori híd esetében nagy pontosságú, próbaterhelés alapján validált, héj végeselemes modellen végeztük el az algoritmus betanításához szükséges szimulációkat. Az algoritmus eredményeként megkapjuk a hídon áthaladó járművek tengelysúlyát, össztömegét és sebességét is.

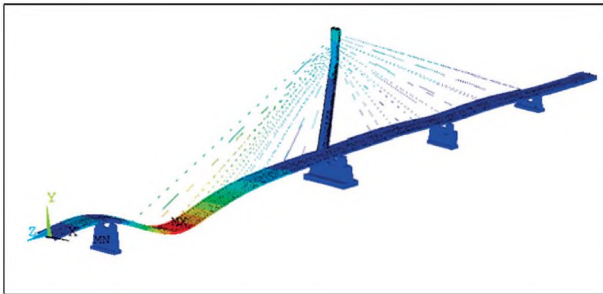
A híd próbaterhelése, majd az üzemeltetése során is végeztünk ellenőrző méréseket, hogy meg tudjuk állapítani, mennyire pontos az általunk fejlesztett algoritmus. A Magyar Közút mérőkocsijának segítségével százas nagyságrendű járműmérés alapján megállapítottuk, hogy az eljárásunk még a Magyar Közút jelenleg használt, aszfaltba épített rendszereinél is pontosabb.



7. ábra. Feszültségek lefolyása az egyes bélyegeken egy áthaladó jármű hatására
Forrás: Szinyéri et al. 2022

Valós idejű végelelemes analízis

A híd erő hatásos ismeretében a következő lépés, hogy valós idejű numerikus szimulációt tudjunk futtatni a híd modelljén, melynek segítségével a híd valamennyi pontjában ismertté válnak az állapotjellemzők. Erre a legalkalmasabb módszer az explicit dinamikus analízis, mely képes a híd egy dinamikai rendszerként kezelni, és az idő függvényében követi a szerkezet viselkedését. Ezt a modellt és a futtatási eredménynek egy pillanatát szemlélteti a 8. ábra. Egy ilyen analízis meglehetősen erőforrás-igényes, gyors számítási kapacitást és nagy tárterületet igényel. A nagy modell miatt hatalmas mennyiségű a számított adat, hiszen a híd tetszőleges pontjában és a vizsgált időszak tetszőleges időpillanatában megkapjuk a szerkezet állapotjellemzőit. Gyakorlati szempontból ez az adathalmaz jelenti a valós idejű digitális ikret.

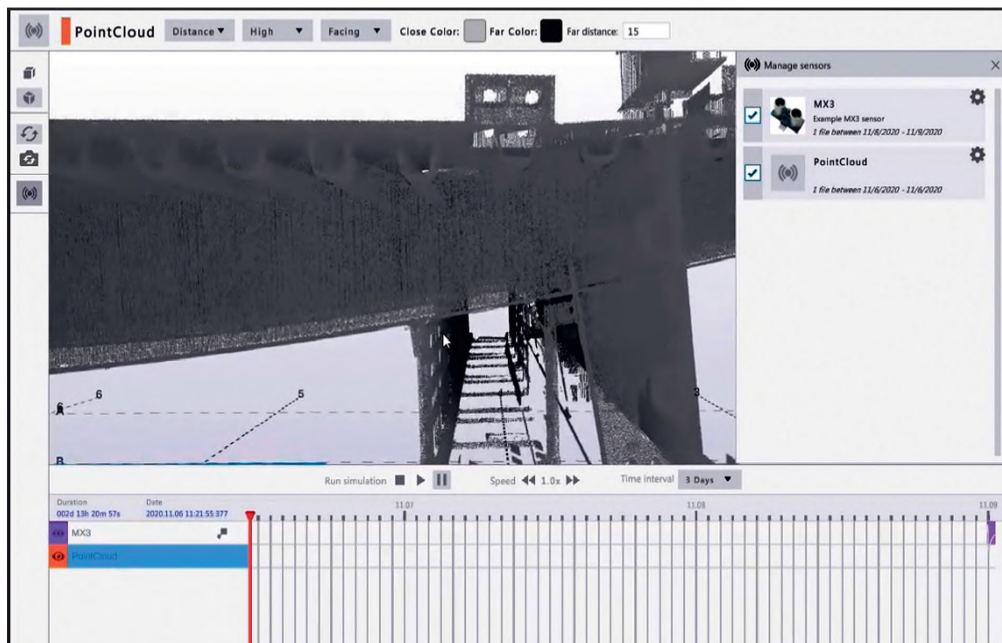


8. ábra. Valós idejű végelelemes szimuláció pillanatnyi lehajlása egy jármű áthaladásakor
Forrás: Joó et al. 2022b

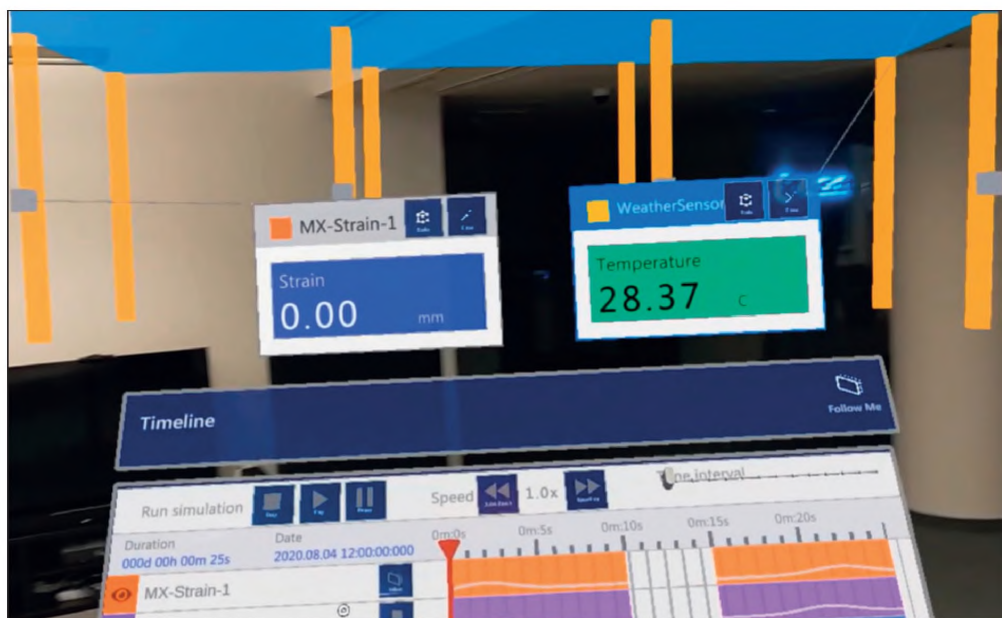
Itt fontos megjegyeznünk, hogy digitális iker koncepciója mennyivel tud többet a már korábban is létező, a szerkezet állapotát megfigyelő (structural health monitoring, SHM) rendszereknél. Az SHM-rendszerek esetében csak a híd bizonyos kiemelt mérési pontjaiban rendelkezünk szenzoradatokkal, és azokból kell következtetést levonnunk a híd állapotára vonatkozóan, míg a digitális ikrek esetében a fent említett módon a szerkezet minden pontjáról van valós idejű információnk. Ez lehetővé teszi, hogy például a fáradási élettartamot az aktuális terhelés függvényében a szerkezet minden pontján meg tudjuk határozni.

A digitális iker adatainak integrálása a BIM-modellbe

A fentiek alapján látható, hogy mind a gyártás, mind a végelelemes szimulációk során nagyon sok adat keletkezik, ráadásul ezek az adatok különböző rendszerekből érkeznek különböző időpillanatban, és a szerkezet különböző pontjaira vonatkoznak. Ezen adatok integrálásának leghatékonyabb módja a már rendelkezésre álló BIM-modell, amely tartalmazza a szerkezet valós geometriáját, és mellé rendelhető egy olyan adatbázis, amely képes időbélyeggel ellátva eltárolni az adatokat. Erre a jelenlegi BIM-alkalmazások általában nem képesek, ezért ezt saját fejlesztéssel oldottuk meg (Kurai et al. 2022).



9. ábra. Pontfelhő vizualizációja a saját fejlesztésű Tekla Structures applikációban
Forrás: Kurai et al. 2022



10. ábra: Az applikáció működése kiterjesztett valóságban HoloLens-en keresztül
Forrás: Kurai et al. 2022

Saját applikációt fejlesztettünk a Tekla Structures szerkezetmodellező szoftverhez, amely képes arra, hogy időbélyeggel ellátott szenzoradatokat, pontfelhőket (9. ábra) és végeselemes szimulációból származó adatokat integráljunk, és ezeket az adatokat meg is jelenítsük. Az ábra alsó része mutatja azt az időszakot, ahol a megfelelő időléptéket és időpillanatot ki lehet választani, a felső része pedig azt, ahogy azon adatokat a meglévő BIM-modellen megjeleníti. Az applikáció képes arra, hogy visszajátsszon egy időtartományt, konkrét adatokat tüntessen fel, vagy ábrán mutassa be az állapotjellemzők változását.

A híd biztonságára vonatkozó mérnöki döntéstámogatás is meg tud valósulni ezen applikáció segítségével (10. ábra), ugyanis a szerkezet egy pontjára nézve rendelkezésre álló addigi feszültségtörténet alapján fáradási élettartamot tud becsülni, így automatizálva az ellenőrzési eljárást. Az ábra a fejlesztett felhasználói felületet egy kiterjesztett valóság (augmented reality, AR) szemüvegen keresztül mutatja, amikor egyszerre látható a valós környezet és a szimulációs megoldás. Ennek alkalmazása azért előnyös, mert a szemüveg helyzete meghatározható a hídszerkezeten belül, és így a digitális iker adatait a valós helyzethez kapcsolódóan lehet megmutatni.

Összefoglaló megállapítások

A cikkben ismertettük egy új Duna-hídra fejlesztett digitális iker prototípusának fejlesztését. Egy híd digitális ikrének fejlesztése már a tervezéskor indul: rendelkezniünk kell a szerkezet 3D konstrukciós modelljével, valamint a hídra telepítendő mérőrendszer is a tengelyterhelés meghatározására alkalmas módon kell megtervezni; a gyártás és szerelés során hegesztésszimulációt, esetlegesen validációs méréseket kell végrehajtani mind a maradó feszültségek, mind pedig a geometria tekintetében, majd az üzemeltetés során valós idejű szimulációs futtatást kell végezni; és mindezen adatokat egy rendszerbe kell tudni integrálni.

A többévtényi kutatómunka eredményeképpen sikerült megalapoznunk az építőmérnöki terület digitális ikreinek fejlesztéséhez szükséges tudásunkat. Ezt a tudást felhasználva a jövőben egyre több szerkezetünkhöz készülhetnek majd digitális ikrek, aminek eredményeképpen költségmegtakarítás érhető el a biztonság szintjének megtartása, sőt emelése mellett.

Irodalomjegyzék

- Grieves, Michael – Vickers, John (2017). „Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems”. In: Kahlen, Franz-Josef – Flumerfelt, Shannon – Alves, Anabela C., szerk. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Joó Attila László et al. (2022a). „Hálózatosodott technológiák alkalmazása acélszerkezetek tervezése, gyártása, szerelése, fenntartása és kapcsolódó szolgáltatások területén. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 2–4.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>

- Joó Attila László et al. (2022b). „Speciális mérési feladatok a Monostori híd próbaterhelésekor. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 47–57.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>
- Kollár Dénes et al. (2022). „Lokális végeelemes modellek alkalmazása a Monostori hídnál felmerülő hegesztésszimulációs feladatoknál. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 5–14.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>
- Kurai András et al. (2022). „Tekla Structures kiterjesztése valós idejű szenzoradat vizualizálással. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 66–72.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>
- Mátyássy László et al. (2018). „Elkezdődött az új Komáromi Duna-híd építése”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, 1, 16–22.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk1801.pdf>
- Mátyássy László et al. (2019). „Az új Komáromi Duna-híd építéstechnológiája I”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, 3, 8–14.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk1903.pdf>
- Somogyi József Árpád et al. (2022). „Monostori híd építésének nyomkövetése. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 28–46.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>
- Szinyéri Bence et al. (2022). „Mélytanulás alapú tengelysúlybecslés nyúlásmérő bélyegek adatai alapján. BOSS 5D rendszerfejlesztés”. *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, különszám, 58–65.
<https://www.magesz.hu/wp-content/acelszerkezetek/aszerk2202kulonszam.pdf>
- Szinyéri, Bence et al. (2023). „A Strain Gauge-based Bridge Weigh-in-Motion System Using Deep Learning”. *Engineering Structures*, 277, 115472.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115472>
- Szinyéri, Bence et al. (2024). „A Deep Learning-Based BWIM System of a Cable-Stayed Bridge”. In: Jensen, Jens Sandager – Frangopol, Dan M. – Schmidt, Jacob Wittrup, szerk. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability. Proceedings of the 12th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 24–28 June 2024, Copenhagen*. Balkema: CRC Press, 1452–1459.
<https://doi.org/10.1201/9781003483755>
<https://tinyurl.com/4t7netrf>

Előregyártott hídgerendacsalád fejlesztése új anyagok és technológiák felhasználásával

Development of a Precast Bridge Girder Family Using New Materials and Technologies

Kovács Tamás¹ – Hartmann Péter² – Szinvai Szabolcs³

¹ PhD, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
kovacs.tamas@emk.bme.hu

² projektvezető, ZÁÉV Építőipart Zrt., Zalaegerszeg
hartmann.peter@zaev.hu

³ PhD-hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest
szinvaiszab@edu.bme.hu

Összefoglalás

A Biztonságtudományi és Technológiai Kompetencia Központ 2021-ben ipari megbízhatóságra irányuló, kiterjedt kutatási együttműködést kezdeményezett az egyetemi szféra és az ipari partnerek között. Ennek keretében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar és a ZÁÉV Építőipari Zrt. új anyagok és technológiák felhasználásával innovatív fejlesztéseket végzett a hídgerenda-előregyártás területén. E fejlesztések a gyártási idő és a költségek csökkenését eredményezik, növelik a termékek erőtani teljesítőképességét, és biztosítják azok megfelelő tartósságát szélsőséges környezeti hatások esetén. Az együttműködés fő eredménye egy új, 0,9 m magas, előregyártott, öntömörödő beton anyagú hídgerendacsalád kifejlesztése és teljes körű piacra vitele volt (TRL9). A hagyományos előfeszítés különböző típusú utófeszítésekkel való kombinálásának erőtani előnyeit és a szálerősítésű polimerek betonvasalásként való alkalmazási lehetőségét prototípus gerendák 1:1 léptékű, törésig tartó terheléses vizsgálatával igazoltuk.

Abstract

In 2021, the Centre of Competence in Security Science and Technology initiated an extensive research collaboration between academia and industrial partners in the field of industrial safety. Within this framework, the Faculty of Civil Engineering of the Budapest University of Technology and Economics and ZÁÉV Construction Co. carried out innovative developments in the field of bridge girder prefabrication using new materials and technologies. These technologies reduce production time and costs, increase the structural performance of the products, and ensure their adequate durability under extreme environmental conditions. The main result of the collaboration was the development and full-scale commercialization of a new family of 0.9 m high precast self-compacting concrete bridge beams (TRL9). The structural benefits of combining traditional pre-tensioning with various types of post-tensioning, and the applicability of fibre-reinforced polymers as embedded reinforcement in concrete, were justified by full-scale failure load tests on prototype beams.

Kulcsszavak: hídgerenda, anyagtudomány, fenntarthatóság, feszítési technológia, szálerősítésű polimer, öntömörödő beton

Keywords: bridge girder, material science, sustainability, tensioning technology, fibre-reinforced polymer, self-compacting concrete

Bevezetés

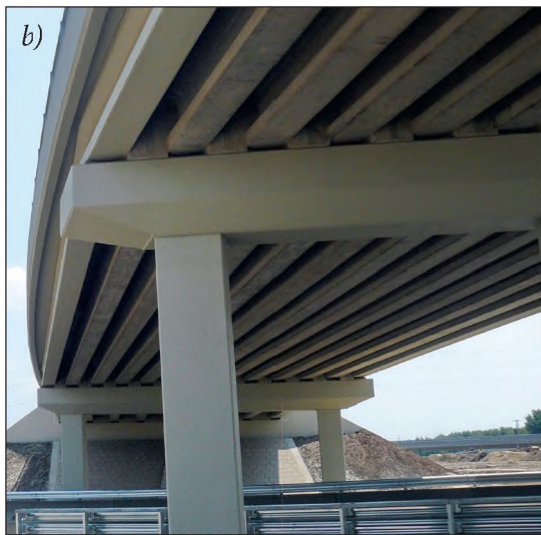
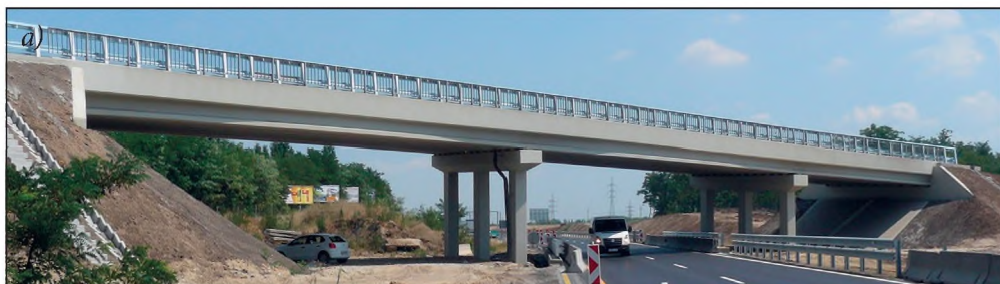
Az egyetemi szféra és a gazdaság együttműködésének fokozása érdekében a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által finanszírozott 2019.1.3.1-KK-2019-00004 jelű (Kompetencia Központ) program keretében 2021-ben Biztonságtudományi és Technológiai Kompetencia Központ alakult a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME). A program célja olyan új, biztonságorientált megközelítésen alapuló, hatékonyságot és biztonságot egyaránt növelő módszerek kidolgozása a meghatározó ipari alkalmazási területeken, melyek az elérni kívánt szakmai és műszaki színvonalon a folyamatok és termékek biztonságának garانتálása mellett jelentős hozzáadott piaci értéket képviselnek.

A projekt egyesíti a BME és az együttműködő ipari partnerek kutatási erőforrásait az olaj- és gázipar, a járműbiztonság, a közlekedésbiztonság és az építőipar területén, beleértve egy MI- (mesterséges intelligencia, artificial intelligence, AI), IoT- (internet of things, dolgok internete), Big Data-technológiákat is magába foglaló információs hálózat kifejlesztését is. A program építőipari ágát a BME Építőmérnöki Kar és a ZÁÉV Építőipari Zrt. (ZÁÉV) együttműködése képviselte, mely a közlekedésbiztonság kapcsán a vasbetonhídgerenda-gyártás területén tűzött ki új anyagok és új technológiák alkalmazásával megvalósuló fejlesztéseket (Kovács et al. 2023).

Az előregyártott vasbetongerendás felszerkezetű hidak jelentősége

Magyarországon az országos közutakat és az önkormányzati utakat is beleértve hozzávetőlegesen 12 500 db 5 méternél nagyobb szerkezeti hosszúságú közúti és vasúti híd található, melyeknek ~78%-a vasbeton anyagú. Ezek közül az előregyártott vasbetongerendás felszerkezetű hidak részaránya ~58%, ami napjainkban az előregyártás térhódításával még tovább növekszik. Ez összesen több mint 5600 db, túlnyomó mértékben közúti hidat jelent, jellemzően 8,0–45,0 m nyíláshosszakkal. Ebből azonnal nyilvánvaló az a volumen, mely perspektívát képez az előregyártott hídgerendák piacán, és felszínre hozza a gyártók közti technológiai versenyt. További fontos körülmény, hogy a munkadíjak napjainkban tapasztalt drasztikus növekedése a vasbetonhidépítésben is egyre inkább az előregyártás irányába tolja el a fenntartott kapacitásokat, ami tovább erősíti e híd típus más típusokkal szembeni dominanciáját (1. ábra).

Az előregyártott vasbeton-hídgerendás felszerkezetű hidak legnagyobb előnye abban rejlik, hogy a felszerkezet alapelemeként működő hídgerendák építési helyszínre szállítása megoldható, ami lehetőséget teremt a gerendák technológiailag ideális, könnyen kontrollálható, időjárástól függetlenített, üzemi környezetben való gyártására. Ez gazdasági értelemben hatékony, műszaki értelemben pedig magas színvonalú gyártást tesz lehetővé. További fontos körülmény, hogy a helyszínen szállított elemek mobil autódaruval, rendkívül rövid idő alatt (hídnyílásonként ~0,5 nap) a végleges beépítési pozícióba helyezhetők, míg az ezt követő helyszíni betonozás minimális zsaluzat felhasználásával végezhető, vagyis a helyszíni munkaigény az összes híd típus közül időben a legrövidebb.

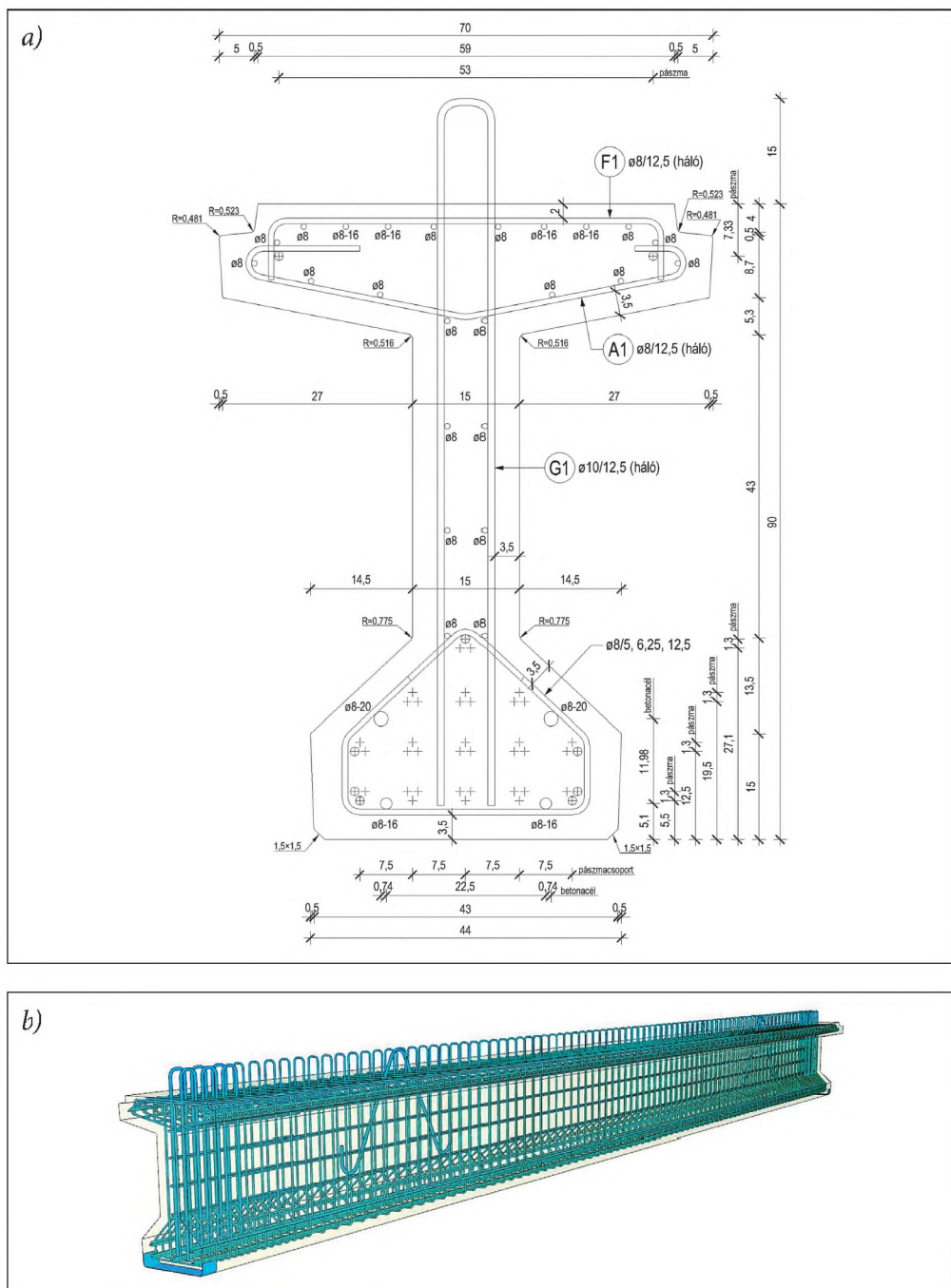


1. ábra. a–b) Jellemző kialakítású
előregyártott hídgerendás felszerkeztű
közúti híd
(M0 ap. 236/B j. híd)
Forrás: Kovács Tamás

Új technológiák a hídgerendagyártásban

A K+F-projekt elsődleges célja az volt, hogy a hagyományos vasbeton-hídgerenda gyártástechnológiáját olyan hazai és nemzetközi viszonylatban is újszerű technológiákkal ötvözzük, melyekkel a termékek teljesítőképessége az előírányzott célterületeken – az igényekkel összhangban – növelhető. Célterületként a gazdaságosságot, az erőtanı teljesítőképességet és a tartósságot jelöltük ki. Ezzel összhangban a fejlesztés a következı fázisokban valósult meg:

- 1. fázis (2021): új, piacképes, hagyományos egyenes vonalú előfeszítéssel ellátott, öntömörödő beton anyagú hídgerendacsalád fejlesztése;
- 2. fázis (2022): különbözı típusú utófeszítéssel kombinált hagyományos, egyenes vonalú, üzemben előfeszített prototípus hídgerendák és prototípus hídfelszerkezet fejlesztése;
- 3. fázis (2023): szálerősítésű polimer- (FRP) vasalást tartalmazó, megnövelt tartósságú prototípus hídgerendák fejlesztése.



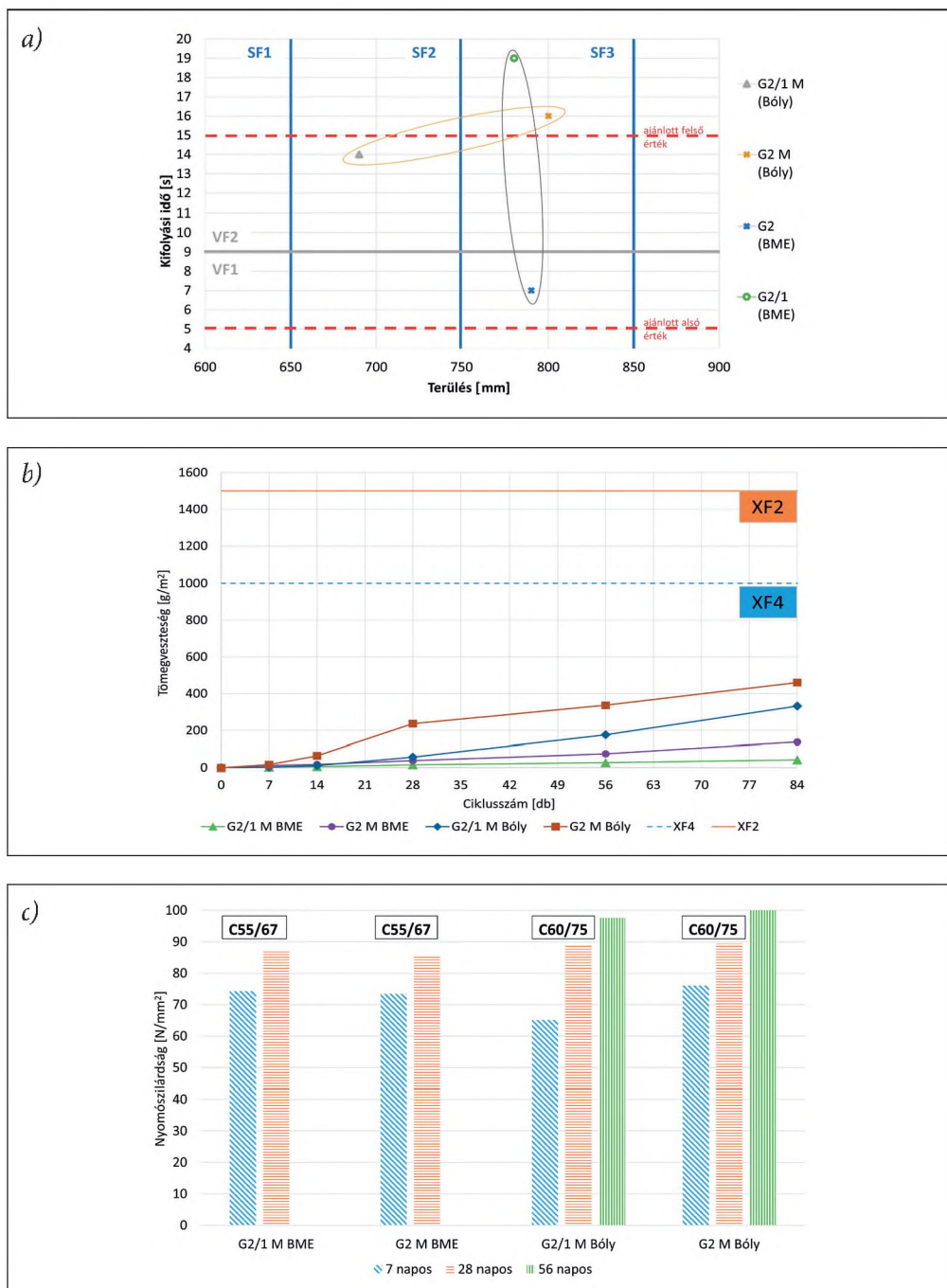
2. ábra. a) A ZBI-90 típusú hídgerendák keresztmetszete,
b) a ZBI-90 típusú hídgerendák 3D-látványterve
Forrás: Kovács Tamás

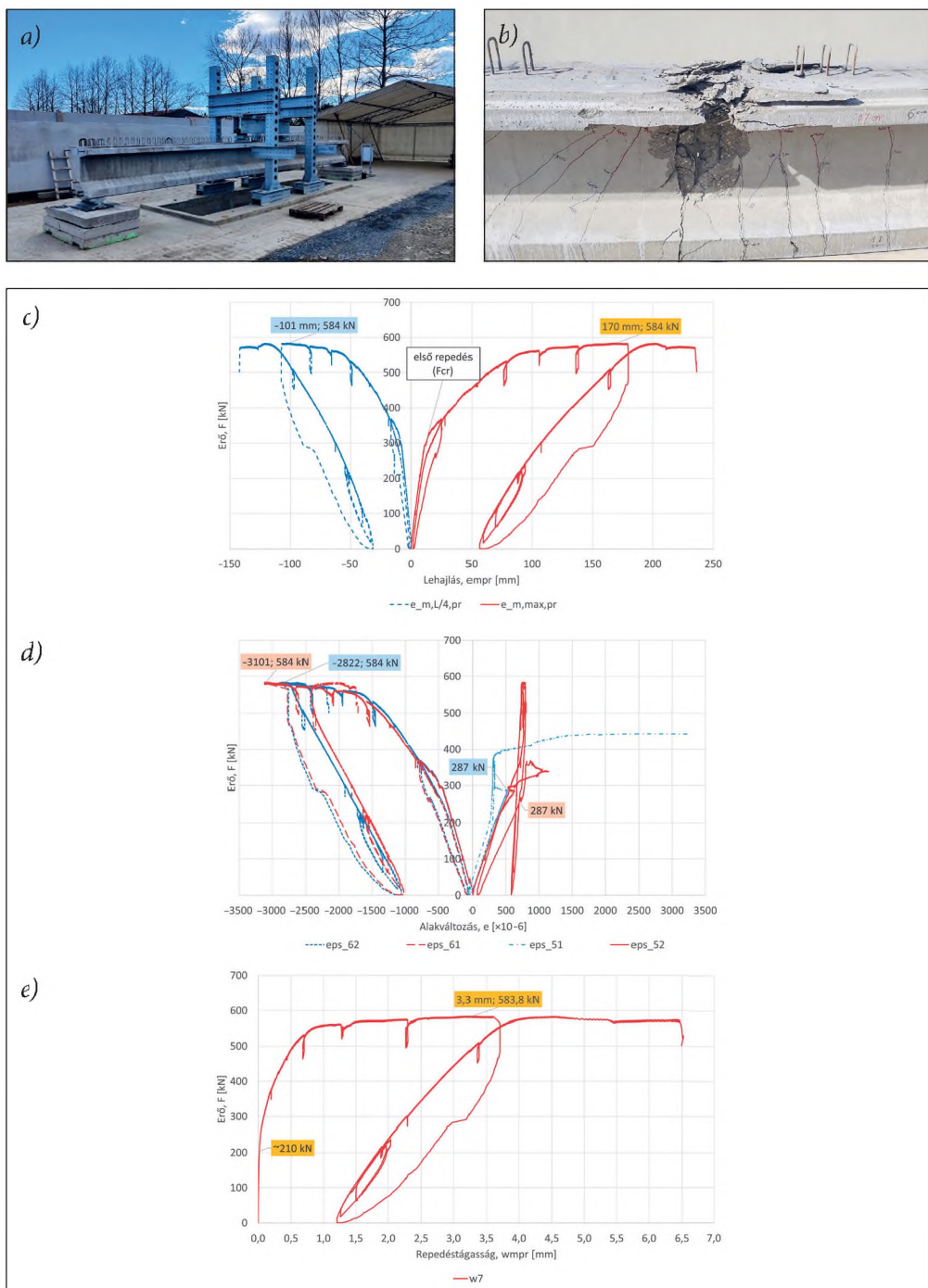
A KK-program technológiai fejlettségi szintet mérő indikátorként (TRL9) tartalmazta az újonnan kifejlesztett hídgerendacsalád teljes körű piacra vitelét, ami az ezzel kapcsolatos kutatási és tervezési feladatokon túlmenően további, a piacra vitelt megalapozó tevékenységek végrehajtását is szükségessé tette. Az 1. fázisban kifejlesztett elemekre építve a 2. és 3. fázis során erőtani és tartóssági szempontból megnövelt teljesítőképességű elemek készültek azzal az elsődleges céllal, hogy demonstrálják az alkalmazott technológiák működőképességét és az elkészült termékek funkcionális alkalmasságát. Ezért a fejlesztések eredménye 1:1 léptékű prototípus gerendák szintjén valósult meg, a piacra vitel a projekt keretében nem volt kitűzött cél, ugyanakkor az 1. fázisban kifejlesztett öntömörödő beton technológia folyamatos továbbfejlesztését szolgálta az, hogy a prototípusok mindegyike öntömörödő betonból készült.

Új, öntömörödő beton anyagú hídgerendacsalád fejlesztése

A kifejlesztett ZBI-90 jelű, 0,9 m magas, üzemben előregyártott, egyenes vonalban előfeszített, öntömörödő beton anyagú hídgerendacsalád elemei (2. ábra) a 8,8–26,8 m hossztartományt fedik le. Az elemek vasalása szokásos acél feszítőpásmákból és betonacélból készül. Erőtani szempontból a gerendacsalád az európai szabvány (Eurocode) megbízhatósági szintjét teljesíti, és összhangban van a vonatkozó hazai szabályozással is. A gerendák új hidakba való betervezésének elősegítése és a tervezők támogatása céljából a gerendacsalád geometriai és gyártástechnológiai adatait, valamint 1,0 m-es méretlépcsőkben minta gyártmányterveket tartalmazó termékkatalógus (tervezési útmutató) készült.

A fenntarthatósági követelmények figyelembevételével, a gyártási idő és a beton bedolgozásához felhasznált energia csökkentése érdekében a szokványos normál testsűrűségű beton helyett nagy teljesítőképességű, öntömörödő beton fejlesztésére került sor. Ilyen betonokat a magasépítésben már évek óta alkalmaznak, de ezek tartóssági követelményei jelentősen elmaradnak a hídépítésben szükségessé, így az ennek megfelelő összetétel kidolgozása jelentette a fejlesztés fő kihívását. Az anyagkutatás során normál testsűrűségű adalékanyagot és egy vagy több kiegészítő anyag (mészkőliszt, bazaltliszt, CEM III cement, metakaolin) kombinációját tartalmazó keverék-összetételt dolgoztunk ki, majd ezeket többszöri laboratóriumi és üzemi próbakeveréssel optimalizáltuk. Az optimalizálás elsősorban a bedolgozáshoz szükséges frissbeton konzisztenciára (3.a ábra) és a tartóssággal összefüggő megszilárdult beton tulajdonságokra (3.b ábra) irányult; az előírányzott nyomószilárdsági osztály C50/60 volt (3.c ábra). Végül – a gazdaságosságot és a kiegészítő anyag beszerezhetőségét is figyelembe véve – egy mészkőliszt (G2) és egy CEM III cement (G2/1) tartalmú keverék bizonyult a legkedvezőbbnek, majd a normál testsűrűségű adalékanyag-beszállító változása miatt ezek keverékeit tovább optimalizálva (G2 M, G2/1 M) alakult ki a két véglegesített betonösszetétel, melyek jártassági vizsgálatára 2023 első negyedévében került sor. Ez igazolja, hogy a kifejlesztett nagy teljesítőképességű öntömörödő betonok kielégítik a hidak százéves előírányzott tervezési élettartama során előforduló,





4. ábra. a-e) A prototípus gerendák terheléses vizsgálata
Forrás: Kovács Tamás

XC4–XD3–XF4(H) környezeti osztályokkal jellemzett legszigorúbb környezeti hatásokra (légtörési korrózió, fagyhatás, jégolvasztó só okozta kloridbehatolás) vonatkozó tartóssági követelményeket. Mivel a kidolgozott összetételben szereplő mennyiségű kiegészítő anyag szerkezeti betonban való alkalmazását az aktuális hazai műszaki előírások mindeddig nem engedélyezték, ezért kezdeményezésünkre a vonatkozó e-ÚT 07.02.11 útügyi műszaki előírás módosítására is sor került e témakörben.

A kifejlesztett gerendák erőtanai megfelelőségét prototípus gerendák terheléses vizsgálatával ellenőriztük. Mindegyik vizsgált kiegészítő anyagot tartalmazó betonkeverékből egy-egy 10,80 m hosszúságú prototípus gerenda készült szokásos üzemi körülmények között. A törésig tartó terhelést a gyártóhelyen e célra kialakított terhelőpadon végeztük. A terhelés során a gerenda jellemző szerkezeti paramétereit (lehajlás, alakváltozás, repedéstágasság) több ponton, a működő teher függvényében, digitális adatgyűjtő berendezéssel mértük és rögzítettük. A várakozásoknak megfelelő hajlítási tönkremenetellel végződő vizsgálatok mért értékei jó egyezést mutattak a vonatkozó pontosított modellen alapuló számítások eredményével (4. ábra).

A betonok jártassági vizsgálatának és a prototípus gerendák terheléses vizsgálatának eredményei alapján az illetékes tanúsító szervezet üzemi gyártásellenőrzés-megfelelőségi tanúsítványokat (CE-engedély) állított ki, melyek rögzítették, hogy a kifejlesztett öntömörödő betonok mint alapanyag és a ZBI-90 hídgerendacsalád mint termék összhangban vannak a vonatkozó európai szabványokkal, és korlátozás nélkül piacra vihetők. Ez alapozta meg a projektben vállalt TRL9-indikátor teljesülését.

Gyakorlati alkalmazás

A kifejlesztett hídgerenda-család első gyakorlati alkalmazására 2023 júniusában került sor az újonnan épülő M44-es gyorsforgalmi út feletti híd kapcsán, melybe 22 db ZBI-90/21,80 típusú gerendát építettek be. A beépítési folyamat jellemző fázisai (gyártóhelyi tárolás, helyszínre szállítás, beemelés) az 5. ábrán láthatók.

A termékcsalád sikerességét mutatja, hogy ezt követően az M44 jelű út további szakaszán, majd a jelenleg is épülő M4-es és M49-es gyorsforgalmi utak hídjaiba ugyanezen gerendacsalád 13,80 és 26,80 m közötti hosszúságú elemeit tervezték be, mintegy 9,5 km összhosszban.

Utófeszítéssel kombinált, előfeszített hídgerendák fejlesztése

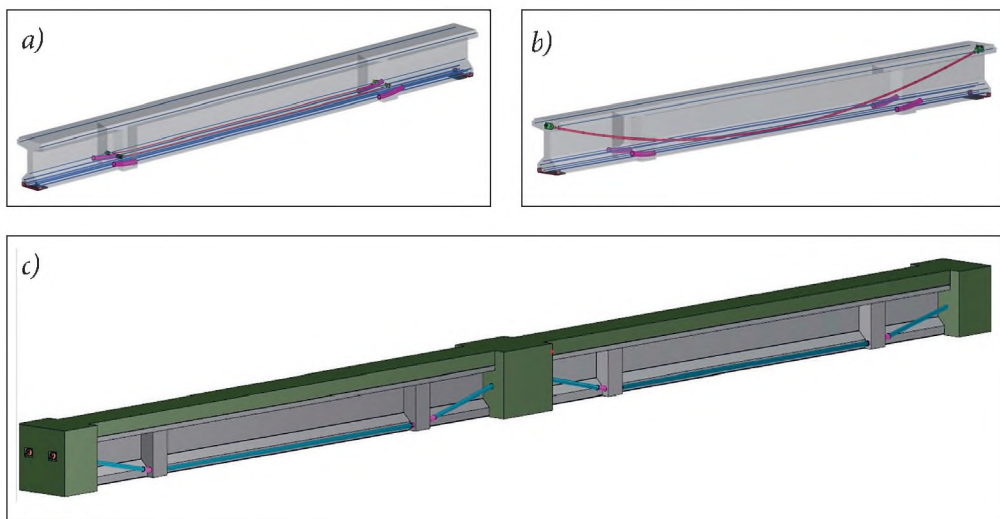
A technológiai fejlesztés a hídgerenda szerkezeti viselkedésének javítása érdekében a hagyományos előfeszítés és az utófeszítés előnyös erőtanai sajátosságait ötvözi. Az építőiparban már meglehetősen régóta, széleskörűen alkalmaznak utófeszítést. Újabban olyan tapadásmentes rendszerek alkalmazása került előtérbe, melyek esetén az acélkorrózióra érzékeny feszítőbetétek a környezettől teljesen elszigetelve működnek. Mivel az előregyártott hídgerendákat egy hídfelszerkezetben monolit pályalemezzel



5. ábra. a-e) ZBI-90/21,80 gerendák beépítése
Forrás: ZÁÉV, Hartmann Péter

teszik együttműködővé, ez technológiai értelemben lehetőséget teremt az utófeszítés építéshelyszíni alkalmazására is.

A kutatás-fejlesztés 2. fázisában az előző projektrészben kifejlesztett típusból két, 10,80 m hosszú hídgerendapárt belső vezetésű utófeszítéssel ellátva gyártottak le. A hagyományos, egyenes vonalú, gyári előfeszítést az első gerendapár esetén egyenes vonalvezetésű, tapadásmentes (6.a ábra), míg a második gerendapár esetén íves vonalvezetésű, tapadásos (6.b ábra) utófeszítéssel kombinálták. Ezután – az előregyártott hídgerendás, folytatólagos hídfelszerkezetek szokásos elrendezését követve – a párt alkotó gerendákat hosszirányban egymás után elhelyezve és egy 20 cm vastagságú monolit vasbeton fejelemmel összekapcsolva egy együttműködő, kétnyílású, folytatólagos prototípus hídfelszerkezet készült. Ezt követően a prototípus szerkezeteket egy külső vezetésű, tapadásmentes rendszerrel utófeszítették (6.c ábra).



6. ábra. a)–b) Prototípus gerendák („iub” és „ib”), c) prototípus szerkezet („eub”)

Forrás: Kovács Tamás

A fejlesztés során a fő kihívást a gyártáskori megfeszítés időpontjának és mértékének, valamint a kétfajta feszítés egymásra és a betonelemre kifejtett hatásának a számszerű meghatározása jelentette, mindezt időben változó módon, a beton korának függvényében. A külső kábelek iránytöréséhez és az „iub” típusú belső kábelek lehorgonyzásához szükséges helyeket a gerendák két oldalán szimmetrikusan kialakított gallérszerű blokkok tervezésével oldottuk meg, ami a meglévő gerendák geometriájának lokális módosítását igényelte. Az ehhez szükséges zsaluzati elemeket egyedileg kellett legyártani, és az 1. fázisban használt meglévő zsaluzatba kiegészítő elemként kellett beintegrálni. Ugyancsak egyedi gyártást igényeltek a prototípus szerkezet gerendavégi monolit blokkjai, melyek nemcsak a szerkezet megtámasztási helyei voltak, hanem a külső kábelek iránytörési és lehorgonyzási helyei is egyben.



7. ábra. a) A prototípus szerkezet terheléses vizsgálata, b–c) a jellemző tönkremeneteli zónák
 Forrás: ZÁÉV (Hartmann Péter), Kovács Tamás

Ez esetben a prototípus szerkezet terheléses vizsgálatával lehetőség nyílt egy 1:1 léptékű hídfelszerkezet modell próbaterhelésére. Ehhez a prototípus szerkezetet közvetlenül a terhelőpad felett építettük meg, úgy pozicionálva, hogy annak egyik nyílása a terhelő berendezés és a szerkezet mozgatása nélkül törésig terhelhető legyen (7. ábra). A terheléses vizsgálatok általános elrendezése, a terhelési program, a mérőrendszer és a mért mennyiségek, valamint az eredmények kiértékelési folyamata az 1. fázisban alkalmazott stratégiát követte a terhelés intenzitásának értelemszerű eltéréssel.

Szálerősítésű polimert (FRP) tartalmazó, megnövelt tartósságú hídgerendák fejlesztése

E projektrészben a nemzetközi és a fenntarthatósági trendeket (Whitmore 2022; National Academies... 2015) követve olyan technológiák tartószerkezeti alkalmazási lehetőségét vizsgáltuk, melyek a várakozások szerint alkalmasak lehetnek a szokásos üzemi körülmények között szélsőséges környezeti hatásoknak kitett beton hídgerendák használati élettartamának a meghosszabbítására. E technológiák és anyagkutatások zöme intenzív fejlesztés alatt van, ezért kidolgozottságuk – akár a felhasznált anyagok tulajdonságainak, akár a szerkezeti viselkedés jellegének eddig feltárt szintje miatt – nem vagy nem minden területen éri el a jelenlegi szabványok által megkövetelt mértéket, így a gyakorlati alkalmazásuk még nem terjedt el, de mindazonáltal aktív kutatási területek.

Az egyik ilyen technológia a beton anyagú szerkezeti elemek tartósságának növelésére irányul azáltal, hogy a hagyományos lágyacél vasalást részben vagy egészben üveg vagy bazalt anyagú szálerősítésű polimer rudakkal (FRP) helyettesíti az acél-korrózió elkerülése érdekében. Mivel önmagában ez a hídgerendák merevségének számottevő csökkenésével járna, ezért ezt – az 1. fázis során fejlesztett prototípus gerendákat alapul véve – hibrid vasalási rendszerként, egy gyárilag korrózióvédett, az acél összetevőket a betonkörnyezettől teljesen elszigetelő, tapadásos utófeszítéssel kombinálva terveztük meg a 3. fázis keretében. E fejlesztés legnagyobb kihívását az jelentette, hogy az FRP-betétek acéltól számottevő mértékben eltérő mechanikai tulajdonságait úgy kell összehangolni az egyéb felhasznált anyagok tulajdonságaival, hogy a hídgerendák szerkezeti viselkedése összhangban maradjon a vonatkozó tervezési követelményekkel. Különösen nehéznek bizonyult annak áthidalása, hogy számos, a piacon beszerezhető FRP-termék minőségtanúsítványa – adattartalmát tekintve – hiányos, vagy a termék egyáltalán nem rendelkezik minőségtanúsítvánnyal. Ezért a projektből kiinduló, annak fenntartási szakaszában zajló kísérleti vizsgálatok egyik fő célkitűzése a szerkezeti viselkedésben központi szerepű mechanikai tulajdonságok kísérleti meghatározása.

A részt vevő szervezetek technológiai modernizációja

A projekt szerves része volt a részt vevő szervezetek technológiai modernizációja. A BME Anyagvizsgáló Laboratóriumába kutatási és oktatási céllal beszerzett új eszközök, valamint a gyártóüzem termelékenységét fokozó számos új gép telepítésén túlmenően az egyik legnagyobb beruházás a kifejlesztett hídgerendacsalád gyártásához szükséges új, hőérlelést lehetővé tevő gőzhálózatral is felszerelt, teljes zsáluzati rendszer beszerzése volt. Ebből egy, a próbagyártást és a prototípus gerendák gyártását lehetővé tevő 60 m hosszú szakasz beszerzése a tárgyi projekt keretében valósult meg, míg a további, folyamatos gyártáshoz szükséges 150 m hosszú szakaszt még a projekt fizikai befejezését megelőzően a ZÁÉV saját forrásból finanszírozta.

A projekt keretében másik beruházként épült meg a gyártóhelyen egy terhelő platform (terhelőpad) a hozzá tartozó energiaellátással és darumegközelítési útvonallal együtt. A terhelőrendszer egy, a terepszint alá süllyesztett, alapozásként is működő betonaknából, egy terhelő acélkeretből és egy 2×1000 kN teherbírású hidraulikus terhelő berendezésből áll, amely alkalmas a gyártóhelyen készülő betonelemek széles körének 1:1 léptékű terheléses vizsgálatára (4. ábra). Ez a nagy kapacitású rendszer alapvetően tudományos kutatási és fejlesztési célú kísérletek végrehajtását támogatja, de alkalmazható egyetemi oktatási és marketing célú bemutatók, illetve egyéb célú terheléses vizsgálatok végrehajtására is. A terhelőpad teljes mértékben kompatibilis a BME Szerkezetvizsgáló Laboratóriumban alkalmazott terhelő- és mérőeszközökkel, és emiatt további, a BME-vel közös kutatási célú együttműködésre ad lehetőséget, elsősorban az ipari háttérű doktoranduszi kutatási programokban.

Köszönetnyilvánítás

A 2019-1.3.1-KK-2019-00004 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2019-1.3.1-KK pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kapcsolódó kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-57 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- Kovács, Tamás et al. (2023). „Novel Developments to Precast Bridge Girder Technology by the BME-ZÁÉV Research Cooperation”. In: *Proceedings of the Creative Construction Conference (2023), Hungary, Keszthely, 20–23 June, 2023*, 130–142.
<https://doi.org/10.3311/CCC2023-017>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2014). *Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design*. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/22441>
- Whitmore, David (2022). „Extending the Service Life of Existing Concrete Structures to Last Beyond 100 Years”. In: *MATEC Web of Conferences*, 364.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202236404025>

TANULMÁNYOK

A globális éghajlatváltozás egészséghatásai Health Effects of Global Climate Change

Márovics Gergely¹ – Girán János²

¹ egyetemi tanársegéd, Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar Orvosi Népegészségtani Intézet, Pécs

² egyetemi adjunktus, Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar Orvosi Népegészségtani Intézet, Pécs

Összefoglalás

A globális éghajlatváltozás súlyos fenyegetést jelent az emberiségre nézve, mivel a Föld átlaghőmérsékletének emelkedése számos mechanizmuson keresztül befolyásolja az egészséget. A szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése, a légszennyezés mértékének súlyosbodása, a vízben és élelmiszerekben terjedő betegségek gyakoriságának növekedése, valamint a vektorok által terjesztett betegségek egyre szélesebb körű földrajzi terjedése mind kockázatokat jelentenek egészségünkre. Ezenkívül az éghajlatváltozás negatívan befolyásolja a mentális egészséget, és súlyosbító tényezője számos krónikus betegségnek. Az éghajlatváltozás hatásainak kezelése és enyhítése többoldalú megközelítést igényel, beleértve az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentését, a közegészségügyi infrastruktúra fejlesztését és a klímaváltozáshoz alkalmazkodó egészségügyi rendszerek előmozdítását. A politikai döntéshozóknak, az egészségügyi szakembereknek, valamint a közösségeknek együtt kell működniük a globális klímaváltozás egészséghatásainak enyhítése, továbbá a jövő nemzedékek védelme érdekében.

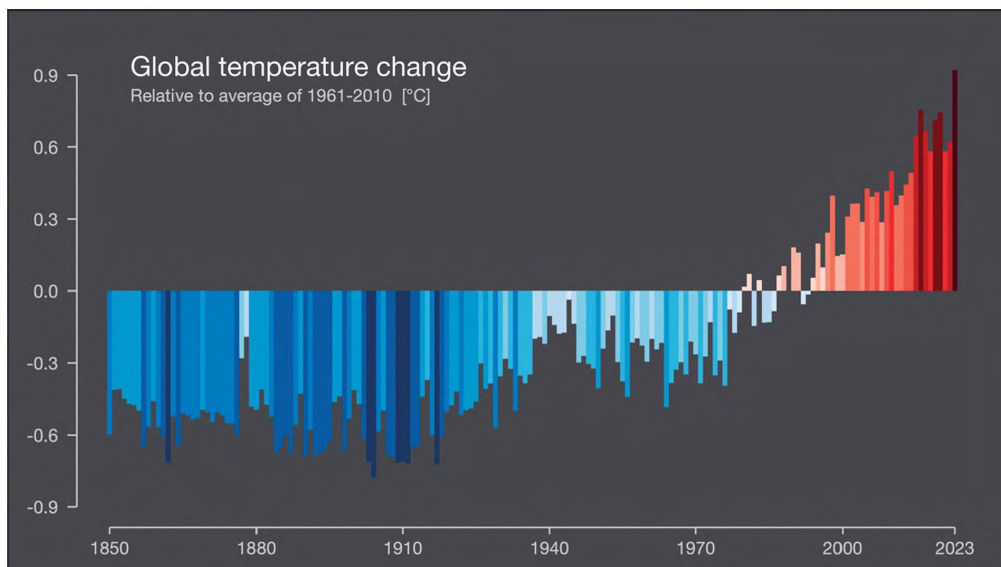
Abstract

Global climate change poses a serious threat to human health. Rising global average temperatures influence health through multiple mechanisms, including more extreme weather events, worsening air pollution, the spread of water- and food-borne diseases, and the expansion of vector-borne diseases. In addition, climate change adversely affects mental health and exacerbates chronic diseases. Addressing the health effects of climate change requires a multifaceted approach, including reducing greenhouse gas emissions, improving public health infrastructure, and promoting climate-resilient healthcare systems. Policymakers, public health professionals, and communities must work together to mitigate the health impact of global climate change and protect public health for future generations.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, közegészségügy, krónikus betegségek, fertőző betegségek, mentális egészség

Keywords: climate change, public health, chronic diseases, infectious diseases, mental health

A globális éghajlatváltozás korunk egyik legnagyobb kihívása, egy olyan sürgető kérdés, amely messzemenő következményekkel jár, különösen az emberi egészségre nézve. Ma már széles körben elismert tény, hogy az éghajlatváltozás és a biológiai sokféleség (biodiverzitás) csökkenése összefügg egymással, valamint hogy mindkettőt egyre



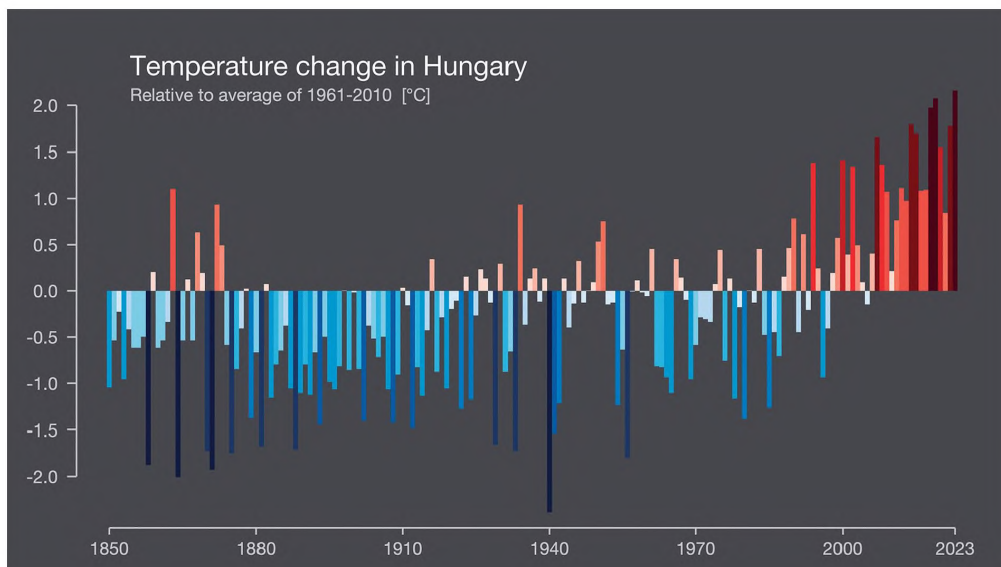
1. ábra. A Föld felmelegedési klímacsíkjai 1850–2023 között
Forrás: Hawkins, URL3

inkább befolyásolja az emberi tevékenység. Az ökoszisztémák és a biodiverzitás kritikus szerepet játszanak a földi életfeltételek megőrzésében, szabályozva annak anyag- és energiaáramlását, valamint a hirtelen és fokozatos változásokra adott reakcióit (URL1). Az Egyesült Nemzetek (ENSZ) Éghajlatváltozási Keretegyezményének (UNFCCC) 1. cikke szerint az éghajlatváltozás „az éghajlat olyan változása, amely közvetlenül vagy közvetve emberi tevékenységnek tulajdonítható, amely megváltoztatja a globális légkör összetételét, és amely kiegészíti a természetes éghajlati változékonyságot” (URL2). Mivel a Föld éghajlata az antropogén tevékenységek következtében tovább melegszik, az ebből eredő környezeti változások jelentős egészségi kockázatokat jelentenek.

A globális felmelegedés jelenségét a globális felszíni középhőmérséklet (global mean surface temperature, GMST) 30 éves átlagban becsült emelkedése jelzi. Ezt a 30 éves időszakot, amelynek középpontjában egy adott év vagy évtized áll, jellemzően az iparosodás előtti szintekhez hasonlítják (The Intergovernmental Panel... 2018). A globális felmelegedés egyik láttató grafikus ábrázolása a felmelegedési klímacsíkok segítségével történik. Az 1. ábra¹ a Föld felmelegedési klímacsíkjait mutatja az 1850–2023 közötti időszakban a hosszú távú átlaghoz (1961–2010) viszonyítva. A 2. ábrán Magyarország felmelegedési klímacsíkjai láthatók.

A múltbeli kibocsátások már elkerülhetetlenné tették a globális hőmérséklet emelkedését és az éghajlat egyéb változásait. Az IPCC (The Intergovernmental Panel

¹ A cikk ábráin látható tizedespontok a nem magyar szoftverek használatából erednek.



2. ábra. Magyarország felmelegedési klímacsíkjai 1850–2023 között
Forrás: Hawkins, URL4

on Climate Change, Éghajlatváltozási Kormányközi Testület) az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos eredmények értékeléséért felelős. Rendszeresen értékeli az éghajlatváltozás tudományos alapjait, hatásait és jövőbeli kockázatait, valamint az alkalmazkodási és enyhítési lehetőségeket. Az IPCC arra a következtetésre jutott, hogy a katasztrofális egészséghatások és az éghajlatváltozással összefüggő több millió halálos eset elkerülése érdekében 1,5 °C-ra kell korlátozni a globális hőmérséklet emelkedését. Ez a szint sem biztonságos: minden további tizedfokos felmelegedés súlyos következményekkel járhat az emberek egészségére nézve (Solomon 2023).

Az Egészségügyi Világszervezet (World Health Organization, WHO) nemzetközi közegészségügyi kérdésekkel foglalkozik, beleértve az éghajlatváltozás egészség-hatásait is. A WHO megállapította, hogy az éghajlatváltozás már most is számtalan módon befolyásolja az emberi egészséget, melyek lehetnek közvetlen és közvetett hatások. A közvetlen egészséghatások az éghajlatváltozással és/vagy az éghajlati változékonysággal kapcsolatos ok-okozati összefüggéseken alapulnak. Ezek közé sorolhatók a szélsőséges időjárási események, például a hőhullámok, viharok és árvizek – egyes régiókban a villámárvizek – okozta halálos esetek és megbetegedések, az élelmiszerellátást biztosító rendszerekre rótt terhek, az állatról emberre terjedő fertőző betegségek (zoonózisok), az élelmiszer, víz és vektorok (például szúnyogok, kullancsok) által terjesztett betegségek gyakoriságának növekedése, valamint a mentális egészségi problémák előfordulása. A WHO becslése szerint 2030 és 2050 között az éghajlatváltozás évente mintegy 250 000 idő előtti halálos esetet okozhat alultápláltság, malária, hasmenés és hőstressz következtében (URL5).

A közvetett egészséghatások a környezeti és társadalmi körülmények változásaiból erednek. Az éghajlatváltozás például hatással lehet az élelmezésbiztonságra. Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Szervezete (Food and Agriculture Organization, FAO) jelentése szerint az éghajlatváltozás a mezőgazdasági termelés megzavarásával, valamint a kártevők és betegségek kockázatának növekedésével veszélyezteti az élelmezésbiztonságot (URL6). A Világbank (World Bank) kiemeli, hogy az éghajlatváltozás vízhiányhoz és a vízminőség csökkenéséhez vezethet, ami növeli a kiszáradás és a vízzel terjedő betegségek, például a hasmenés kockázatát (URL7). Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (Environmental Protection Agency, EPA) szerint az éghajlatváltozás olyan tényezők révén, mint a hőhullámok és forró időszakok, valamint az ezekhez kapcsolódó erdőtüzek és a pangó levegő súlyosbíthatja a légszennyezést, ami hozzájárulhat az asztma kialakulásához és egyéb hasonló légzőszervi megbetegedésekhez (URL8).

Számos krónikus betegség összefügg a változó éghajlattal, ami jelentős hatással van a megbetegedésekre és a halálozásokra egyaránt, és kiemelt terhet ró mind a közegészségügyi rendszerekre, mind pedig a betegellátást biztosító egészségügyi ellátórendszerre. A szív- és érrendszeri betegségeket nagymértékben befolyásolják a hőmérséklet-változások, többek között az egyre gyakoribbá és intenzívebbé váló hőhullámok vagy a szélsőséges hideg időszakok. A rövid távú hőmérséklet-ingadozás halálozásra gyakorolt hatásait leginkább U, V vagy J alakú görbékkel jellemezhetjük. Az optimális hőmérséklet – az a napi középhőmérséklet, amelynél a legalacsonyabb a halálozás – a minimális halálozási hőmérsékletként is ismert, és az éghajlati övezettől, a földrajzi elhelyezkedéstől és a népesség sérülékenységétől függően változhat. A szélsőséges hideg hőmérséklet egészségi állapotra gyakorolt hatásai általában tovább érzékelhetők (akár két hétig), mint a szélsőséges hőség hatásai, amelyek általában két-három napig tartanak (Khraishah et al. 2022).

Bár ez a mintázat világszerte megfigyelhető, a regionális éghajlat, valamint a hideghez és meleghez való kulturális és technológiai alkalmazkodás befolyásolja, hogy mely hőmérsékleten fordul elő a legkevesebb többlethalálozás. A 2019-es „Globális betegségteher” tanulmány (Global Burden of Disease Study, GBD) szerint a nem optimális hőmérséklet világszerte a halálozás egy új kockázati tényezője, amely akár 1,96 millió halálesetért is felelős lehet évente (Roth et al. 2020). A *The Lancet Planetary Health* című, magasan rangsorolt folyóiratban közölt eredmények szerint a hőhullámokat a szív- és érrendszeri betegségek miatti megnövekedett kórházi felvételekkel hozták összefüggésbe (Liu et al. 2022). A megnövekedett kockázat a 2-es típusú cukorbetegségben vagy magas vérnyomásban szenvedő egyének szív- és érrendszeri betegségekkel szembeni nagyobb sebezhetőségének tulajdonítható, ami arra utal, hogy a megváltozott hőmérsékleti expozíció egészséghatásai már most is kimutathatók, és további terhet rónak a népesség sérülékeny csoportjaira (Chen et al. 2017).

Az éghajlatváltozás nemcsak a hőmérsékleti mintázatokat változtatja meg, hanem más környezeti tényezőkre is negatív hatással van, például a légszennyezésre, különösen az erdőtüzek gyakoriságának növekedése révén. A WHO jelentése szerint a

légszennyezés évente mintegy 7 millió idő előtti halálesetért felelős, amelyek jelentős része szív- és érrendszeri betegségekhez kapcsolódik (URL9). Az olyan szennyezők, mint például a kis átmérőjű légszennyező részecskék ($PM_{2,5}$) bizonyítottan növelik a szívroham és az agyvérzés okozta halálozás kockázatát (Khraishah et al. 2023; Brook et al. 2010).

Az éghajlatváltozás súlyosbítja az olyan légzőszervi megbetegedéseket is, mint az asztma és a krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD). Egyértelműnek látszik a kapcsolat a légszennyezésnek való kitettség (főként $PM_{2,5}$ és PM_1) és a légzőszervi megbetegedések, köztük a COPD súlyosbodásának fokozott kockázata között (Chen et al. 2017). A melegebb hőmérséklet és a megnövekedett CO_2 -szint magasabb pollenkoncentrációhoz (URL10), korábban kezdődő és tovább tartó pollenszezonhoz vezethet, ami súlyosbítja az allergiások és az asztmások tüneteit (Anderegg–Abatzoglou–Anderegg 2021).

Az éghajlatváltozás pszichológiai hatásai, köztük a szorongás, a depresszió és a poszttraumás stresszbetegség (PTSD) napjainkban széles körben ismertek. A szakirodalmat vizsgálva megfigyelhető, hogy egyre növekvő számú bizonyíték áll rendelkezésre az éghajlatváltozásnak a kedvezőtlen mentális egészségi állapothoz köthető hatásait illetően, különösen a veszélyeztetett népességcsoportok körében (Charlson et al. 2021; Berry–Bowen–Kjellstrom 2010).

Az éghajlatváltozás a fertőző betegségek terjedését és előfordulását is befolyásolja, ami új kihívások elé állítja a közegészségügyet. A vektorok által terjesztett betegségek, például a malária, a dengue-láz, nyugat-nílusi láz és a Lyme-kór, vektoraiknak köszönhetően rendkívül érzékenyek az éghajlati viszonyokra. A hőmérséklet és a csapadék változása kiterjesztheti például a szúnyogok és a kullancsok földrajzi előhelyét, ami fokozza e betegségek terjedését. A WHO jelentése szerint az éghajlatváltozás valószínűleg növeli a malária földrajzi elterjedését, és 2050-re Afrikában további 60 millió embert tehet ki a betegségnek (URL4). Az emelkedő hőmérséklet és a változó csapadékviz viszonyok befolyásolhatják a különböző kórokozók eloszlását és túlélési esélyeit a vízforrásokban, ami a vízzel terjedő betegségek, például a kolera és a kriptosporidiózis gyakoriságának növekedéséhez vezethet, illetve a magasabb tengerfelszíni hőmérséklet a part menti régiókban a kolerajárványok gyakoribb kitörésével jár együtt (Jutla et al. 2013).

Az éghajlatváltozás az élelmiszer-biztonságot is befolyásolhatja azáltal, hogy hatással van az élelmiszerekkel terjedő kórokozók előfordulására. A magasabb hőmérséklet növelheti az olyan baktériumok, mint a *Salmonella enterica* növekedési ütemét, ami az élelmiszer eredetű megbetegedések gyakoribbá válásához vezethet. Az egyesült államokbeli Betegségellenőrzési és Megelőzési Központ (Centers for Disease Control and Prevention, CDC) kiemeli, hogy a melegebb hőmérséklet elősegítheti a káros baktériumok elszaporodását az élelmiszerekben, növelve ezzel az élelmiszer eredetű betegségek kockázatát (URL9).

A globális éghajlatváltozás tehát számos mechanizmuson keresztül jelenthet veszélyt az emberi egészségre. Ezen hatások kezelése többoldalú megközelítést igényel,

beleértve az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentését, a közegészségügyi infrastruktúra fejlesztését és a Föld klímájának változásával szemben ellenálló egészségügyi rendszerek előmozdítását. Elengedhetetlen, hogy a politikai döntéshozók, az egészségügyi szakemberek és a közösségek együtt dolgozzanak a globális klímaváltozás egészséghatásainak enyhítése és a közegészségügy védelme érdekében a jövő nemzedékek számára. A problémák lehetséges megoldása egyrészt valamilyen elhárítási stratégia kifejlesztése, például az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére irányuló politikák végrehajtása, ezzel párhuzamosan pedig a megújuló energiaforrásokra való fokozatos áttérés, az energiahatékonyság előmozdítása és az erdők megőrzése. Másrészt az egészségügyi ellátórendszerek megerősítése az éghajlattal kapcsolatos egészségproblémákra való jobb reagálás érdekében, a fertőző betegségek felügyeletének és korai előrejelző rendszereinek javítása, valamint a közegészségügyi oktatás és ismeretterjesztés javítása. Végül pedig a kutatás és fejlesztésbe történő инвестиáció a globális klíma változásait indukáló folyamatok és ok-okozati összefüggések jobb megértése érdekében, valamint innovatív megoldások kidolgozása e hatások enyhítésére. Az éghajlatváltozás alapvető okainak kezelésével és a negatív egészséghatásokra való felkészüléssel egészségesebb és ellenállóbb jövőt építhetünk.

Irodalomjegyzék

- Anderegg, William R. L. – Abatzoglou, John T. – Anderegg, Leander (2021). „Anthropogenic Climate Change Is Worsening North American Pollen Seasons”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 118/7.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2013284118>
- Berry, Helen L. – Bowen, Kathryn – Kjellstrom, Tord (2010). „Climate Change and Mental Health: A Causal Pathways Framework”. *International Journal of Public Health*, 55/2, 123–132.
<https://doi.org/10.1007/S00038-009-0112-0>
<https://qualaxia.org/wp-content/uploads/berry-2010-cc-and-mental-health.pdf>
- Brook, Robert D. et al. (2010). „Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease”. *Circulation*, 121/21, 2331–2378.
<https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e1>
- Charlson, Fiona et al. (2021). „Climate Change and Mental Health: A Scoping Review”. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18/9, 4486.
<https://doi.org/10.3390/Ijerp18094486>
- Chen, Gongbo et al. (2017). „Effects of Ambient PM₁ Air Pollution on Daily Emergency Hospital Visits in China: An Epidemiological Study”. *The Lancet Planetary Health*, 1/6.
[https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(17\)30100-6/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(17)30100-6/fulltext)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). „Annex I: Glossary”. In: *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Cambridge: Cambridge University Press, 541–562.
<https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>
- Jutla, Antarpreet et al. (2013). „Environmental Factors Influencing Epidemic Cholera”. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 89/3, 597–607.
<https://doi.org/10.4269/Ajtmh.12-0721> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/pmc3771306/>
- Khraishah, Haitham et al. (2022). „Climate Change and Cardiovascular Disease: Implications for Global Health”. *Nature Reviews Cardiology*, 19/12, 798–812.

- <https://doi.org/10.1038/S41569-022-00720-X>
https://www.researchgate.net/publication/361155051_Climate_change_and_cardiovascular_disease_implications_for_global_health
- Liu, Jingwen et al. (2022). „Heat Exposure and Cardiovascular Health Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis”. *The Lancet Planetary Health*, 26/6.
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00117-6)
- Roth, Gregory A. et al. (2020). „Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990–2019: Update From the GBD 2019 Study”. *Journal of the American College of Cardiology*, 76/25, 2982–3021.
<https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.11.010>
- Solomon, Barry D. (2023). „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)”. In: *Dictionary of Ecological Economics*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 302–302.
<https://doi.org/10.4337/9781788974912.1.50>
- URL1: „World Health Organization & Convention on Biological Diversity (2015). Connecting Global Priorities: Biodiversity and Human Health: A State of Knowledge Review.” World Health Organization IRIS (letöltés: 2025. 01. 26.).
<https://iris.who.int/handle/10665/174012>
- URL2: „United Nations Framework Convention on Climate Change”. UN (letöltés: 2025. 02. 06.).
https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
- URL3: „#ShowYourStripes”. Ed Hawkins (letöltés: 2025. 01. 26.).
<https://showyourstripes.info/c/globe>
- URL4: „#ShowYourStripes”. Ed Hawkins (letöltés: 2025. 01. 26.).
<https://showyourstripes.info/c/europe/hungary/all>
- URL5: „Climate Change”. WHO (2023. okt. 12.).
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- URL6: „Climate Change and Food Security: Risks and Responses”. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2015).
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a4fd8ac5-4582-4a66-91b0-55abf642a400/content>
- URL7: „Health and Climate Change”. *World Bank Group* (2024. nov. 16.).
<https://www.worldbank.org/en/topic/health/brief/health-and-climate-change>
- URL8: „Air Quality and Climate”. *EFA* (2024. máj. 3.).
<https://www.epa.gov/air-quality/air-quality-and-climate>
- URL9: „Home / Newsroom / Fact Sheets / Detail” *WHO* (2024. júl. 11. – 2024. okt. 24.).
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/air-pollution>
- URL10: „About Food Safety”. *CDC* (2024. ápr. 29.).
<https://www.cdc.gov/food-safety/about/index.html>

Középiskolások szerhasználati szokásainak és mentális jóllétének mintázatai Észak-Magyarországon – alkoholfogyasztás

Patterns of Substance Use and Mental Wellbeing of Secondary School Students in Northern Hungary: Alcohol Consumption

Rucska Andrea¹ – Lakatos Csilla²

¹ PhD, főiskolai tanár, Miskolci Egyetem Egészségtudományi Kar, Miskolc
andrea.rucska@uni-miskolc.hu

² PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Egészségtudományi Kar, Miskolc
csilla.lakatos@uni-miskolc.hu

Összefoglalás

A szerzők a keresztmetszeti kvantitatív kutatás során az észak-magyarországi középiskolás diákok egészségkárosító magatartását, ezen belül a legális pszichoaktív szerek (nikotin, alkohol, koffein) használatát vizsgálták. A kutatás a szerhasználati szokások felmérése mellett a mentális állapotjellemzők felmérésére és a szerhasználattal kapcsolatos összefüggések feltárására irányult. A vizsgálatban összesen 1251 válaszadó vett részt (átlagéletkor: 16,4 év; szórás: 1,6), a fiúk aránya a mintában 59,1% volt. A kérdőívben és tanulmányban a szociodemográfiai adatokra vonatkozó kérdések mellett az alkoholfogyasztás mértékét, gyakoriságát, az alkoholfogyasztás motivációját, illetve a mentális állapotjellemzők feltárását célzó kérdések szerepeltek. Az eredmények arra utalnak, hogy az alkoholfogyasztás intenzitása a 16–17 éves korosztályban erős. Az alkoholfogyasztás szempontjából az apa alacsonyabb iskolai végzettsége, a kisebb település, a rosszabb életkörülmények és a rosszabb mentális állapot jelent kiemelt rizikót.

Abstract

In a cross-sectional quantitative study, the authors investigated the health risk behaviour of secondary school students in Northern Hungary, including the use of legal psychoactive substances (nicotine, alcohol, and caffeine). In addition to assessing substance use habits, the research aimed to examine mental health characteristics and explore the correlates of substance use. A total of 1,251 respondents participated in the survey (mean age: 16.4 years; standard deviation: 1.6), with 59.1% of the sample being boys. In addition to questions on socio-demographic data, the questionnaire and survey included questions on the extent and frequency of alcohol consumption, motivation for alcohol consumption, and mental health characteristics. The results suggest that the intensity of alcohol consumption is high in the 16–17 age group. Lower educational level of the father, living in smaller settlements, poorer living conditions, and poorer mental health are the main risk factors for alcohol consumption.

Kulcsszavak: középiskolások, alkoholfogyasztás, depresszió, szorongás

Keywords: secondary school students, alcohol consumption, depression, anxiety

1. Bevezetés

Magyarországon az elmúlt években több olyan reprezentatív vizsgálat is zajlott, amelynek célja a fiatalok pszichoaktív szerhasználati szokásainak felmérése. A HBSC (Health Behavior in School-Aged Children; Németh 2023) nemzetközi kutatássorozat az életmód, a közérzet és egészség összefüggéseinek vizsgálatára irányult 11–15 évesek bevonásával. Az ESPAD-vizsgálat (European School Survey on Alcohol and Other Drugs; Hibell et al. 2009) célja a 15–16 éves fiatalok szerfogyasztási szokásaiban bekövetkezett változások mérése, az országonként eltérő trendek összehasonlítása (ESPAD 2020; Elekes–Domokos 2020). A fiatal korosztály egészségkárosító magatartását feltáró nemzetközi és hazai kutatások arra hívták fel a figyelmet, hogy mind a kémiai, mind pedig a viselkedési addikciók egyre fiatalabb korban jelennek meg (Grezsa et al. 2015).

A miskolci Kábítószerügyi Egyeztető Fórum (KEF) tapasztalatai alapján indokoltta vált az észak-magyarországi régióban a fiatalok szerhasználati szokásainak felmérése. A tanulmányban bemutatott kutatás a miskolci KEF kezdeményezésére a Miskolci Önkormányzat, valamint a Miskolci Szakképzési Centrum támogatásával készült.

2. Szakirodalmi áttekintő

A serdülőkori olyan átmeneti időszak, amely számos fejlődéslélektani kihívással jár, többek között a családtól való függetlenedés, új készségek elsajátítása, a kortársakkal kapcsolatos új szerepek betöltése. Ebben az identitáskereső időszakban megváltozik a társas támogatás rendszere és a társas kapcsolati háló. Bár a kortárshatások nem feltétlenül negatívak, ebben az időszakban megnövekszik az egészségkárosító kockázati magatartások előfordulása (Pikó 2010).

Az alkoholfogyasztás a serdülőkori szerfogyasztás egyik leggyakoribb típusa. A megjelenését befolyásoló tényezők megértése csakis a családi, a kortárscsoport-faktorok és a személyiségjegyek komplex összefüggéseinek feltárásával lehetséges (Grezsa et al. 2015). A társas befolyások között jelentős szerepet kapnak a szociális normák és elvárások, a konkrétabb társas behatások és viselkedési nyomások. A kortárshatások sorában találjuk a szociális motivációkat, a csoportnyomáshoz való alkalmazkodást, ezeket a valahová tartozás élményének szükségessége magyarázza (Hüse–Huszi–Takács 2016). A serdülők esetében a csoportmodell és referenciakeret főleg az életmód, az énkép, az önértékelés és a társas élet területén fejt ki hatását. A csoportnyomás fontos kortárshatás, mely erős szerfogyasztási prediktor is egyben. A szociálisan kevésbé magabiztos és gyengébb kommunikációs készségekkel rendelkező fiatalok számára az alkoholfogyasztás nemegyszer szociális előnyökkel jár, mivel elősegíti a kortársakkal való konformitást (Pikó 2010). A kortárshatások mellett számos vizsgálat irányult az intraperszonális tényezők veszélyeztető és védő hatásmechanizmusainak feltárására (Hittner–Swickert 2006). A mentális betegséggel élő vagy terhelt háttérű fiatalok

esetében személyiségbeli és környezeti rizikók egyaránt fennállnak, az alacsonyabb érzelmi stabilitású fiatalok középkorúként több alkoholt fogyasztanak (Hampson et al. 2006; Lopez-Quintero et al. 2011).

Az alkoholmotivációs elmélet (Cooper 1994) szerint az alkoholhasználat bizonyos szükségletek és funkciók kielégítéséhez járul hozzá. Az alkoholhasználat háttérében a modell tudatos és automatikus folyamatok által meghatározott döntési folyamatot feltételez, melyben egyaránt jelen vannak múltbeli és stabil jellemzők (genetikai vagy biokémiai, személyiségjellemzők, kulturális és környezeti hatások), aktuálisan jelen lévő faktorok (például az alkohol elérhetősége, a társak befolyásoló hatása) és kognitív jellemzők. Ezen hatások összességéeként a személy elvárásokat alakít ki az alkoholfogyasztásból származó pozitív vagy negatív kimenetű hatásokra (valencia dimenziója), az elvárt hatások forrása lehet belső vagy külső (forrás dimenziója) (Horváth 2022; Farkas et al. 2012).

Ezek alapján az italozási motivációk négy kategóriája különböztethető meg. A fokozásos motiváció azt jelzi, hogy valaki azért iszik, hogy jobban érezze magát, azaz a megszokottnál kellemesebb belső élményt keres. A szociális motiváció esetében az alkoholfogyasztás a pozitív élmények keresésére irányul, azaz valaki a társas együttlétek élvezetének fokozása miatt iszik. Mindkét motiváció pozitív irányú, míg az előbbi belső, utóbbi külső forrásból fakad. A megküzdéses motiváció a negatív belső állapotok elkerülésének, kivédésének kísérlete, a konformitás motivációja arra utal, hogy a személy a kellemetlen szociális helyzetek elkerülése miatt iszik. Mindkét motiváció negatív irányú, míg az előbbi belső, utóbbi külső forrásból fakad. Hazai és nemzetközi vizsgálati eredmények arra utalnak, hogy a fokozásos motivációk a kockázatosabb alkoholfogyasztási mintázattal, a megküzdéses motiváció az alkoholhasználatból eredő problémákkal mutat pozitív összefüggést. Míg a fokozásos motiváció a magasabb mértékű élménykereséssel, extraverzióval, impulzivitással, illetve alacsonyabb viselkedéses kontrollal, a megküzdéses motiváció a magasabb neuroticizmussal, depresszív vagy szorongásos tünetek előfordulásával áll összefüggésben (Farkas et al. 2012; Horváth 2022; Németh et al. 2012).

3. A kutatás célja és módszertana

Kutatási célunk volt, hogy megismerjük a Miskolcon tanuló középiskolások alkoholhasználatának mértékét és gyakoriságát. A kutatás célcsoportja a 14. évüket betöltött, középiskolában tanuló fiatalok volt. A minta kiválasztásában törekedtünk a reprezentativitásra, hogy minden iskolatípus minden osztálya megjelenjen a mintában. A kutatás *online* formában történt iskolai óra keretén belül. A jelen tanulmányban bemutatásra kerülő adatokat szociodemográfiai kérdésekkel (nem, életkor, lakóhely típusa, szülők iskolai végzettsége, életkörülmények szubjektív megítélése), az alkoholfogyasztás mértékét, gyakoriságát, az alkoholhasználat motivációját, illetve a mentális állapotjellemzőket az alábbi validált kérdőívekkel vizsgáltuk.

Az „Alkoholhasználat zavarainak szűrőtesztje” (Alcohol Use Disorders Identification Test, AUDIT) a túlzott mértékű alkoholfogyasztás azonosítására és szűrésére szé-

les körben használt kérdőív (Saunders et al. 1993; Gerevich–Bácskai–Rózsa 2006; Horváth et al. 2022). A kérdőív három terület felmérésére irányul: az alkoholfogyasztás mértékét tárja fel, az alkoholfüggőség tüneteit méri, végül az alkoholfogyasztásból származó negatív következményekre utal. A skálán maximum 40 pont érhető el, a mérőeszközön elért magasabb pontszám a káros mértékű alkoholfogyasztás magasabb szintjére utal.

Az „Alkoholfogyasztás motivációi kérdőív” (Drinking Motives Questionnaire, DMQ-R, Cooper 1994; Németh et al. 2012; Horváth 2022) az alkoholmotivációs elmélet alapján kidolgozott 20 tételes mérőeszköz, amely az egyes alkoholhasználati indokok és okok előfordulási gyakoriságának lekérdezésével négy motivációs dimenzió mentén méri az alkoholhasználatot (szociális, fokozásos, megküzdéses és konformitás alszkálák). Az adott alszkálán elért magasabb pontszám az alkoholhasználatot meghatározó motivációs dimenzió előfordulására és erősebb jelenlétére utal, az alszkálákon maximálisan 25 pont érhető el.

A „Depresszió szorongás stressz kérdőív” (Depression Anxiety Stress Scale, DASS) rövidített változata önjellemzéses alapon méri fel a depresszió, a szorongás és a stressz érzelmi állapotának tüneteit. A tüneteket négyfokozatú skálán és a kitöltés előtti egy hét alapján kell megítélnie a kitöltőnek. Az alszkálákon maximálisan 21 pont érhető el (Lovibond–Lovibond 1995; Horváth 2022).

A mérőeszközök a serdülők körében is jól alkalmazhatóak. A kutatás adatelemzéséhez az SPSS 25.0 programot használtuk, a gyakorisági eloszlásokon túl az összefüggéseket khi-négyzet-vizsgálattal és korrelációelemzéssel végeztük. A kutatás kutatás-etikai engedéllyel rendelkezik (engedély száma: BORS-06/2024).

4. Eredmények

4.1. A minta jellemzői

A kérdőívet 1251 középiskolás töltötte ki. A minta átlagéletkora $16,4 \pm 1,6$ év volt, a fiúk a minta 59,1%-át, a lányok 40,9%-át tették ki. A válaszadók demográfiai képét az 1. táblázat tartalmazza.

4.2. Az alkoholfogyasztás elterjedtsége

Először a diákok alkoholfogyasztásának jellemzőit vizsgáltuk: az életük során, az adatfelvételt megelőző évben és az előző hónapban történt fogyasztásra kérdeztünk rá. Vizsgáltuk az előző havi fogyasztás italfajtánkénti gyakoriságát, valamint az utolsó fogyasztási alkalom időpontját és az akkor elfogyasztott italok mennyiségét.

A mintában szereplő középiskolás fiatalok 86,5%-a élete során fogyasztott már alkoholt. Az adatfelvétel előtti 12 hónapban ez az arány 76,8%, az elmúlt egy hónapban az alkoholfogyasztási arány 56,7% volt. A nemek között egyik mutató esetében sincs szignifikáns eltérés ($p = 0,3$) (2. táblázat).

1. táblázat. A minta szociodemográfiai adatai

N = 1251		
Átlagéletkor	16,4 ± 1,6 év	
Nemek aránya	Fiú 59,1%	Lány 40,9%
Szülők iskolai végzettsége	apa	anya
- 8 általános vagy kevesebb	6,3	8,0
- szakmunkásképző, szakiskola	30,5	20,1
- érettségi	24,3	28,8
- befejezetlen főiskola vagy egyetem	4,8	4,6
- főiskolai vagy egyetemi diploma	18,0	28,1
- nem tudom	12,5	9,6
- nem ismerem	3,7	0,7
Lakóhely		
- főváros, megyeszékhely	38,4	
- egyéb város	22,4	
- község	38,3	
- tanya	1,0	
Életkörülmények		
- magasan a legjobbak között van	5,8	
- sokkal jobb az átlagnál	15,8	
- valamivel jobb az átlagnál	29,1	
- átlagos	42,8	
- valamivel rosszabb az átlagnál	4,5	
- sokkal rosszabb az átlagnál	1,2	
- a legrosszabbak között van	0,7	

2. táblázat. Alkoholfogyasztási arányok a nemek viszonylatában

	Fiúk	Lányok
Eddigi élete során fogyasztott alkohol	86,2%	86,9%
Elmúlt egy évben fogyasztott alkohol	77,8%	75,4%
Elmúlt egy hónapban fogyasztott alkohol	55,2%	58,6%

Az adatfelvételt megelőző hónapban a diákok 26,1%-a fogyasztott legalább 1–2 alkalommal alkoholt, havi hat vagy többszöri fogyasztást a tanulók 8,2%-a jelzett (3. táblázat).

3. táblázat. Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkohol alkalmak szerinti bontásban

Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkoholt		Százalék (n = 1251)
1–2	alkalom	26,1
3–5	alkalom	14,6
6–9	alkalom	8,2
10–19	alkalom	5,2
20–39	alkalom	1,4
40 vagy több alkalom		1,2

Korcsoportok vizsgálatakor azt láthatjuk, hogy a 16–17 évesek 43%-a, a 14–15 évesek 39%-a, a 18 év feletti 17,1%-a úgy nyilatkozott, hogy egyáltalán nem fogyaszt alkoholt. Khi-négyzet-próbával vizsgálva az életkor és az alkoholfogyasztás között mindhárom kategóriában szignifikáns összefüggés mutatkozott ($p = 0,001$), a 16–17 éves korosztály alkoholfogyasztása a legintenzívebb (4. táblázat). Nem elhanyagolható a 14–15 éves fiatalok alkalmi alkoholfogyasztása. Az apa iskolai végzettsége, a lakóhely és az anyagi körülmények szignifikánsan függenek össze ($p = 0,000$) a diákok alkoholfogyasztásával. Az alacsonyabb iskolai végzettségű apa, a kisebb településen (kisváros, falu) élő, rosszabb anyagi körülmények között élő diákok alkoholfogyasztása intenzívebb.

4. táblázat. Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkohol alkalmi bontásban életkor szerint

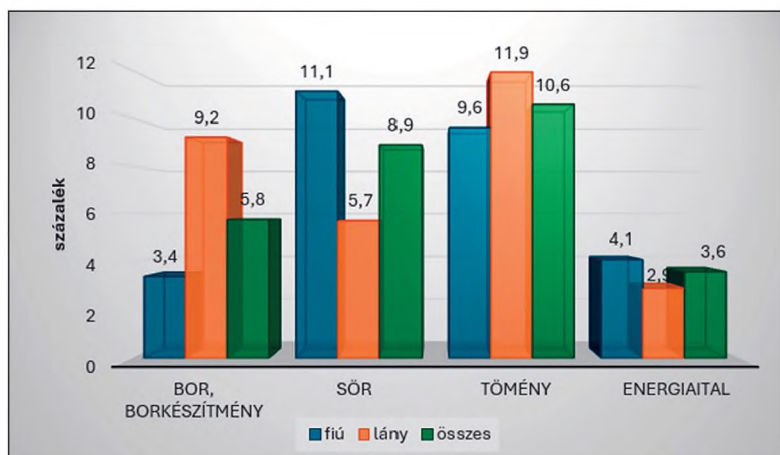
Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkoholt		14–15 év (%)	16–17 év (%)	18 év felett (%)
1–2	alkalom	26,2%	51,4%	22,5%
3–5	alkalom	19,2%	53,3%	27,5%
6–9	alkalom	16,3%	51,0%	32,7%
10–19	alkalom	6,2%	64,6%	29,2%
20–39	alkalom	11,8%	35,3%	52,9%
40 vagy több alkalom		16,7%	50,0%	33,3%
Összes		28,7%	48,8%	22,5%

A nemek viszonylatában vizsgálva az alkoholfogyasztást, jelentős eltéréseket lehet megfigyelni: a fiúk 30,8%-a 14–15 éves volt, 46,4%-a 16–17 éves és 22,8%-a 18 év feletti. A lányok 25,6%-a 14–15 éves, 52,3%-a 16–17 éves és 22,1%-a 18 év feletti. A nemek esetében khi-négyzet-próbával vizsgálva itt szignifikáns különbség mutatkozott ($p = 0,01$), a fiúk nagyobb arányban fogyasztanak alkoholtartalmú italt (5. táblázat). Figyelmet érdemel a 14–15 éves fiúk, a 16–17 éves fiúk és a 18 év feletti lányok alkoholfogyasztása.

5. táblázat. Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkohol alkalmi bontásban életkor viszonylatában

Az elmúlt 30 napban fogyasztott alkoholt		14–15 év (%)		16–17 év (%)		18 év felett (%)	
		Fiú	Lány	Fiú	Lány	Fiú	Lány
1–2	alkalom	30,2	0,0	48,9	21,0	20,9	79,0
3–5	alkalom	20,4	0,0	50,0	17,6	29,6	82,4
6–9	alkalom	14,0	2,4	57,9	17,1	28,1	80,5
10–19	alkalom	3,2	2,9	67,7	5,9	29,0	91,2
20–39	alkalom	7,1	33,3	35,7	0,0	57,1	66,7
40 vagy több alkalom		12,5	0,0	50,0	25,0	37,5	75,0

Az alkoholfogyasztási gyakoriságot italfajtánként is kérdeztük. A nemek között a tömény italok kivételével ($p = 0,7$) szignifikáns különbség tapasztalható ($p = 0,002$) az italfajták kedveltsége esetén (1. ábra).



1. ábra. Hétvégi alkohol- és energiaital-fogyasztás prevalenciája italfajtánként és nemenkénti bontásban (%)

Megfigyelhető, hogy a lányok lényegesen nagyobb arányban fogyasztanak bort és borkészítményeket, égetett szeszes italokat, míg a fiúk a sört preferálják. A hétvégi alkoholfogyasztás intenzitása szignifikáns összefüggést mutat ($p = 0,012$) a család anyagi helyzetével: a jobb anyagi körülmények között élő fiatalok nagyobb arányban fogyasztanak a hétvégén alkoholt. Szintén szignifikáns összefüggés tapasztalható a lakóhely és a hétvégi alkoholfogyasztás között ($p = 0,001$): a falvakban és a kisvárosban élőknel nagyobb arányban tapasztalható fogyasztás. Lerészegedésről a diákok 29,7%-a számolt be, ez leginkább alkalmanként, de 10%-nál havonta, 5%-nál pedig hetente fordul elő. A nemek viszonylatában nem mutatkozott szignifikáns különbség ($p = 0,2$).

Az Alkoholhasználat zavarai szűrőtesztjének (AUDIT) eredménye alapján a diákok alacsony rizikójú vagy absztinens fogyasztói kategóriába tartoznak, viszont a diákok 22,8%-a a veszélyeztetett és 2,5%-a az ártalmas kategóriába tartozott, további 2,4%-nál pedig függőség valószínűsíthető. Szignifikáns összefüggést tapasztaltunk az életkor és az AUDIT-értékek között ($p = 0,0001$), az idősebb, 18 év fölötti diákok értékei a legmagasabbak, az értékek fokozatosan csökkennek az életkorral. A fiatalok többsége szerint a különböző italajtákat könnyen be lehet szerezni (nagyon könnyen 40% feletti válaszok szerint).

Az alkoholmotivációs teszt az egyén alkoholfogyasztással kapcsolatos viselkedését, hozzáállását és motivációját vizsgálja. A teszt négy alskálája egyenként 5–5 tételt tartalmaz (szociális, fokozásos, megküzdéses és konformitás motiváció). Egy alskála maximális értéke 25 pont. Az alkoholmotivációs teszt értékelésénél a szociális motiváció¹ (10,8) volt a legerősebb, majd ezt követte a fokozásos² motiváció (8,4), majd a megküzdéses³ motiváció (7,6). Nemek szerinti bontásban a következő értékeket kaptuk (6. táblázat).

6. táblázat. Alkoholmotiváció nemek szerinti bontásban (átlagpont)

Nem	Alkoholmotiváció				
	Összesített átlagpont	Szociális átlagpont	Fokozásos átlagpont	Megküzdéses átlagpont	Konformitás átlagpont
Fiú	32,6245	10,6789	8,2776	7,1646	6,5034
Lány	34,3535	10,9863	8,6816	8,2910	6,3945

Életkor szerinti bontásban nézve is a szociális motiváció a legerősebb, leginkább a 16 év feletti korcsoportban, majd ezt követi a fokozásos motiváció (7. táblázat).

7. táblázat. Alkoholmotiváció életkor szerinti bontásban (átlagpont)

Életkor	Alkoholmotiváció				
	Összesített átlagpont	Szociális átlagpont	Fokozásos átlagpont	Megküzdéses átlagpont	Konformitás átlagpont
14–15 év	33,1165	9,3900	8,5119	7,0876	8,1269
16–17 év	34,4593	11,2272	8,7805	7,8875	6,5640
18 év felett	35,0476	11,5945	8,8019	7,9723	6,6788

¹ Szociális motiváció: pozitív élménykeresés társas kontextusban.

² Fokozásos motiváció: cél a jobb közérzet elérése, kellemes élményszerzés.

³ Megküzdéses motiváció: cél a negatív mentális állapot (szorongás, feszültség, nyugtalanság) oldása.

Szignifikáns összefüggés ($p = 0,004$) van a lakóhely és a szociális motivációs alkoholfogyasztás között: minél kisebb településen lakik a fiatal, annál magasabb a motivációja. Szintén szignifikáns összefüggés van a konformitációs alkoholfogyasztás és a lakóhely esetében ($p = 0,026$), itt a nagyvárosban élőkénél magasabbak az értékek. Az anyagi körülmények szintén szignifikáns összefüggést mutatnak a szociális ($p = 0,006$), fokozásos ($p = 0,013$) és a megküzdéses ($p = 0,001$) alkoholfogyasztásnál, összességében az átlagosnál rosszabb körülmények között élő fiatalok motivációja erősebb. A gyors lerészegedés leginkább a szociális és a fokozásos motiváció esetében fordul elő.

4.3. A diákok mentális állapotjellemzői

A diákok mentális állapotát a DASS-21 skálával mértük, mely a depresszió szorongás- és stressz-szintjét méri. A diákok többségének mentális állapotjellemző-átlaga megfelelő, de nem elhanyagolható, hogy 24,4%-uk a depresszió valamelyik fokozatát mutatja, 20,2%-uk valamilyen mértékben szorong, illetve 9,2%-uk stressztünetekkel küzd (8. táblázat).

8. táblázat. A diákok mentális állapotjellemzői a DASS-21 skála értékei alapján

Övezetek	Depresszió (%)	Szorongás (%)	Stressz (%)
Normál	75,5	79,8	90,7
Enyhe	10,3	5,2	5,9
Mérsékelt	12,1	10,2	3,3
Súlyos	2,0	3,3	–
Nagyon súlyos	–	1,5	–

A nemek esetében gyenge, de szignifikáns ($p = 0,001$) korreláció mutatkozik a szorongás ($r = 0,24$) és a stressz ($r = 0,27$) esetében, a lányok mentális állapota rosszabb a fiúkénál. A család megélhetési körülményei szignifikáns összefüggést mutatnak a diákok mentális állapotával ($p < 0,000$), tehát az átlagosnál rosszabb anyagi körülmények között élők mentális állapota rosszabb. Az anya iskolai végzettsége szignifikáns összefüggésben van a diákok mentális állapotával ($p = 0,02$): leginkább a szorongás ($p = 0,015$) és a stressz ($p = 0,022$) alszálaival. Az alacsonyabb iskolai végzettségű anyák gyermekei jobban szoronganak, és erősebb stressztüneteket mutatnak.

A rossz mentális állapot minden alszála szignifikáns összefüggést ($p = 0,000$) mutat a problémás alkoholfogyasztással (AUDIT), tehát a rosszabb mentális állapotban lévő diákok alkoholfogyasztása nagyobb mértékű. Az alkoholfogyasztás motivációját vizsgálva a megküzdéses motiváció esetében közepes erősségű szignifikáns ($p = 0,0001$) korreláció tapasztalható a mentális állapot ($r = 0,34$) minden alszála esetén (depresszió $r = 0,3$; szorongás $r = 0,33$; stressz $r = 0,31$).

5. Megbeszélés és konklúzió

Az online adatfelvétellel készült keresztmetszeti kutatásban a Miskolcon tanuló, 14. életévüket betöltött középiskolás diákok egészségkárosító magatartását, ezen belül az alkoholfogyasztás mértékét és gyakoriságát kívántuk felmérni. Az adatfelvétellel 2023-ban került sor ($n = 1251$). A kérdőívben a szociodemográfiai adatokra vonatkozó kérdések mellett az alkoholfogyasztás mértékét, gyakoriságát, az alkoholhasználat motivációját, illetve a mentális állapotjellemzők feltárását célzó kérdések szerepeltek, utóbbiakat standard, validált kérdőívvel mértük.

A mintában szereplő középiskolás fiatalok döntő többsége élete során fogyasztott már alkoholt. Az adatfelvétel előtti elmúlt egy hónapban a minta több mint fele ivott alkoholt. Az alkoholfogyasztás a 16–17 éves korosztály esetében a legintenzívebb, de nem elhanyagolható a 14–15 éves fiatalok alkalmi alkoholfogyasztása sem. A fiatalok többsége szerint a különböző italfajtákat könnyen, több mint kétharmaduk szerint nagyon könnyen be lehet szerezni. A nemek viszonylatában vizsgálva az alkoholfogyasztást, szignifikáns különbség mutatkozott: a fiúk nagyobb arányban fogyasztanak alkoholtartalmú italokat.

A hétfélig alkoholfogyasztás intenzitásának vizsgálatakor azt találtuk, hogy a jobb anyagi körülmények között élő fiatalok és a kisebb településen (falun és kisvárosban) élők nagyobb arányban fogyasztanak a hétféligén alkoholt. Lerészegedésről a diákok közel harmada számolt be. A nemek viszonylatában nem mutatkozott szignifikáns különbség ebben a tekintetben. Míg a lányok leginkább a bort és borkészítményeket, illetve égetett szeszes italokat, addig a fiúk a sört preferálják.

Alkoholfogyasztás szempontjából a mintában szereplő diákok közel negyede a veszélyeztetett, további 2,5%-uk az ártalmas kategóriába tartozik, 2,4%-nál pedig függőség valószínűsíthető. Szignifikáns összefüggés mutatkozott az életkor és az AUDIT-értékek között: az idősebb, 18 év fölötti diákok értékei a legmagasabbak, de az értékek fokozatosan csökkennek az életkorral.

A demográfiai mutatók közül az alacsonyabb iskolai végzettségű apa, a kisebb településen (kisváros, falu) élő, rosszabb anyagi körülmények között élő diákok alkoholfogyasztása intenzívebb.

Az alkoholfogyasztással kapcsolatos motiváció vizsgálata során a szociális motiváció, azaz társas kontextusban megjelenő pozitív élménykeresés mutatkozott a legerősebbnek. Életkor szerinti bontásban nézve a 16 év feletti korcsoportban a szociális motiváció a legerősebb, majd ezt követi a fokozásos motiváció. Szignifikáns összefüggés mutatkozott a lakóhely és a motiváció között: míg a szociális motivációs alkoholfogyasztás a kisebb településen lakó, a konformitásos alkoholfogyasztás a nagyvárosban élőknel jelent meg markánsabban. Az átlagosnál rosszabb körülmények között élő fiatalok körében a szociális, a fokozásos és a megküzdéses motiváció is erőteljesebben volt jelen. Végül a gyors lerészegedés is a leginkább a szociális és a fokozásos motivációval mutatott összefüggést.

A mentális állapotjellemzők tekintetében a mintában szereplő diákok negyede a depresszió valamelyik fokozatát mutatja, egyötödük valamilyen mértékben szorong, közel

együtizedük stressztünetekkel küzd. A lányok mentális állapota rosszabb a fiúkénál. Az átlagosnál rosszabb anyagi körülmények között élők mentális állapota rosszabb. Az alacsonyabb iskolai végzettségű anyák gyermekei jobban szoronganak, és erősebb stressztüneteket mutatnak. Az alkoholhasználat megküzdéses motivációja szignifikáns összefüggést mutat a mentális állapot minden alsóskálájával (depresszió, szorongás, stressz).

Összefoglalva megállapítható, hogy az alkoholfogyasztás vonatkozásában a 16–17 éves korosztály esetében tapasztalható a legintenzívebb fogyasztás, de a szerhasználat a fiúk esetében erősebb. Alkoholfogyasztás szempontjából az apa alacsonyabb iskolai végzettsége, a kisebb település, a rosszabb életkörülmények és a rosszabb mentális állapot jelent kiemelt rizikót.

Az eredmények felhívják az egészségfejlesztés és ezen belül a mentális egészségfejlesztés területén dolgozó szakemberek és a döntéshozók figyelmét a veszélyeztetett csoportokat célzó prevenciós és intervenciós programok szükségességére. Az egyéni szintű ellátáson túl nagy szükség mutatkozik a különböző iskolai, közösségi szinteken megvalósuló, az egészségfejlesztést célzó közösségi akciókra, programokra, amelyek közvetlen és közvetett módon pozitív hatást fejtenek ki a serdülőkorúak egészségmagatartására. Végül indokoltnak tűnik a régió serdülőkorú lakossága legális szerhasználati szokásainak és mentális egészségi állapotának hosszú távú követése.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a Tématerületi Kiválósági Program 2021 – Nemzeti kutatások alprogram keretében, a TKP2021-NKTA-22 azonosítási számú Creative Region III. projekt részeként, az NKFIH támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Cooper, Mary Lynne (1994). „Motivations for Alcohol Use Among Adolescents: Development and Validation of a Four-Factor Model”. *Psychological Assessment*, 6/2, 117–128.
<https://doi.org/10.1037/1040-3590.6.2.117>
<https://tinyurl.com/ys8ejfrf>
- Elekes Zsuzsanna – Domokos Tamás (2020). „Az ESPAD-kutatás módszertana”. In: Elekes Zsuzsanna – Arnold Petra – Bencsik Nóra, szerk. *Iskolások egészségkárosító magatartása 25 év távlatában. A 2019. évi ESPAD kutatás magyarországi eredményei*. Budapest: Budapesti Corvinus Egyetem, MTA-BCE Társadalomepidemiológiai Kutatócsoport, 7–13.
https://unipub.lib.uni-corvinus.hu/9732/1/ESPAD_magyar.pdf
- ESPAD Group (2020). *ESPAD Report 2019: Results from the European School Survey Project on Alcohol and Other Drugs*. Luxembourg: EMCDDA Joint Publications, Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2810/877033>
- Farkas Judit et al. (2012). „Az alkoholfogyasztás és nagyívás (binge drinking) epidemiológiai és motivációs jellemzői: áttekintő tanulmány”. *Psychiatria Hungarica*, 27/5, 335–349.
- Gerevich József – Bácskai Erzsébet – Rózsa Sándor (2006). „A kockázatos alkoholfogyasztás prevalenciája”. *Psychiatria Hungarica*, 21/1, 45–56.

- Greza Ferenc et al. (2015). „Iskolás- és serdülőkori droghasználata: kockázati és védő faktorok egy reprezentatív vizsgálat tükrében”. *Mentálhigiéné és Pszichoszomatika*, 16/4, 297–330.
<https://doi.org/10.1556/0406.16.2015.4.1>
- Hampson, Sarah E. et al. (2006). „Forty Years On: Teachers’ Assessments of Childrens’ Personality Traits Predict Self-Reported Health Behaviors and Outcomes at Midlife”. *Health Psychology*, 25, 57–64.
<https://doi.org/10.1037/0278-6133.25.1.57>
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1363685/>
- Hibell, Björn et al. (2009). *The 2007 ESPAD Report. Substance Use Among Students in 35 European Countries*. Stockholm: CAN.
https://www.researchgate.net/publication/250306267_The_2007_ESPAD_Report_Substance_use_among_students_in_35_European_countrys
- Hittner, James B. – Swickert, Rhonda (2006). „Sensation Seeking and Alcohol Use: A Meta-Analytic Review”. *Addictive Behaviors*, 31, 1383–1401.
<https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2005.11.004>
- Horváth Zsolt (2022). „Az Alkoholfogyasztás Motivációi Kérdőív (Drinking Motives Questionnaire, DMQ)”. In: Horváth Zsolt et al., szerk. *Kérdőíves módszerek a klinikai és egészségpszichológiai kutatásban és gyakorlatban*. Budapest: Medicina Könyvkiadó, 463–467.
- Horváth Zsolt et al. (2022). „Az Alkoholhasználat Zavarainak Szűrőtesztje”. In: Horváth Zsolt et al., szerk. *Kérdőíves módszerek a klinikai és egészségpszichológiai kutatásban és gyakorlatban*. Budapest: Medicina Könyvkiadó, 468–472.
- Hüse Lajos – Huszti Éva – Takács Péter (2016). „A gyermekvédelem peremén. Negatív életesemények hatása a kamaszok és fiatalok egészségkárosító magatartására”. *Metszetek*, 5/4, 80–108.
<http://doi.org/10.18392/metsz/2016/4/5>
- Lopez-Quintero, Catalina et al. (2011). „Probability and Predictors of Transition from First Use to Dependence on Nicotine, Alcohol, Cannabis, and Cocaine: Results of the National Epidemiologic Survey on Alcohol and Related Conditions (NESARC)”. *Drug and Alcohol Dependence*, 115, 120–130.
<https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2010.11.004>
- Lovibond, Peter F. – Lovibond, Sydney Harold (1995). „The Structure of Negative Emotional States: Comparison of the Depression Anxiety Stress Scales (DASS) with the Beck Depression and Anxiety Inventories”. *Behaviour Research and Therapy*, 33/3, 335–343.
[https://doi.org/10.1016/0005-7967\(94\)00075-U](https://doi.org/10.1016/0005-7967(94)00075-U)
- Németh Ágnes, szerk. (2023). *Iskoláskorú gyermekek egészségmagatartása 2022. A WHO-val együttműködésben megvalósuló nemzetközi kutatás. Nemzeti jelentés – legújabb adatok és trendek az elmúlt húsz évben*. Budapest: ELTE, Pedagógiai és Pszichológiai Kar.
https://hbnc.ppk.elte.hu/media/a3/fd/8127578da4d410a66e72f58fe74845e0cdfc9b890255362ba0e95ba4ca51/HBNC_2022_Riport.pdf
- Németh Zsófia et al. (2012). „Az alkoholfogyasztás motivációi módosított kérdőív hosszú és rövid változatának hazai alkalmazása”. *Magyar Pszichológiai Szemle*, 67/4, 673–694.
<https://doi.org/10.1556/MPSzle.67.2012.4.3>
- Pikó Bettina, szerk. (2010). *Védőfaktorok nyomában. A káros szenvedélyek megelőzése és egészségfejlesztés serdülőkorban*. Budapest: L’Harmattan.
- Saunders, John B. et al. (1993). „Development of the Alcohol Use Disorders Identification Test (AUDIT): WHO Collaborative Project on Early Detection of Persons with Harmful Alcohol Consumption – II”. *Addiction*, 88/6, 791–804.
<https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.1993.tb02093.x>

A *Clostridioides difficile*-fertőzés és kezelése

The *Clostridioides difficile* Infection and Its Treatment

Dembrovsky Fanni

PhD-hallgató, dr. med., Pécsi Tudományegyetem Klinikai Központ I. sz. Belgyógyászati Klinika Infektológia Tanszék, Pécs
dembrovsky.fanni@pte.hu

Összefoglalás

Jelen összefoglaló a *Clostridioides difficile*- (CD) fertőzésről, mely az egyik leggyakoribb, egészségügyi ellátással kapcsolatos fertőzés, és annak kezelési módszereiről, kifejezetten a széklettranszplantációról (FMT) íródott. Röviden összefoglalásra kerül a mikrobióta, tekintve, hogy központi szerepet játszik a CD-fertőzésben és az FMT-ben is. A CD-fertőzés tünetei közé tartozik a hasmenés, a hasi fájdalom és a láz. A fertőzés fő oka a normál bélflóra antibiotikumok által okozott felborulása, az egyensúly felbomlása. Az FMT, amely hatékonynak bizonyult a visszatérő CD-fertőzésekben, egészséges donor-széklet mikrobiótájának bevezetését jelenti a fertőzött betegbe, a bélflóra egyensúlyának helyreállítása céljából. A beavatkozás általában biztonságos, ritkán jár enyhe mellékhatásokkal. A kutatások az FMT optimalizálását és annak potenciálját vizsgálják más állapotok, például gyulladásos bélbetegség és cukorbetegség kezelésében. A CD-fertőzés kezelése és az FMT folyamatos kutatási lehetőségeket kínál, ígéretes fejlesztéseket jelentve a különféle betegségekkel kapcsolatos mikrobióta-terápiák területén.

Abstract

This summary discusses the *Clostridioides difficile* infection (CDI), one of the most common healthcare-associated infections, and its treatment methods, specifically fecal microbiota transplantation (FMT). Understanding the microbiota is crucial since it plays a central role in CD infection and FMT. Symptoms of CD infection include diarrhea, abdominal pain, and fever, often occurring due to disruption of the normal gut flora, commonly by antibiotics. FMT, which has been shown to be effective in recurrent CD infections, involves the introduction of healthy donor fecal microbiota to restore the balance of the gut flora. The safety of the procedure is generally good, with mild side effects. Research explores the optimization of FMT and its potential in the treatment of other conditions such as inflammatory bowel disease and diabetes. The treatment of CD infection and FMT present ongoing research opportunities that promise advances in microbiota-related therapies for various diseases.

Kulcsszavak: *Clostridioides difficile*-fertőzés, széklettranszplantáció, fekális mikrobiom-transzplantáció, FMT, mikrobiom, mikrobióta

Keywords: *Clostridioides difficile* infection, fecal microbiota transplantation, FMT, microbiom, microbiota

Bevezetés

Jelen összefoglaló célja a *Clostridioides difficile*- (korábban *Clostridium difficile*) (CD) fertőzés, az egyik leggyakoribb, egészségügyi ellátáshoz köthető fertőzés, és annak kezelési módjai közül a széklettranszplantáció, azaz székletmikrobióta-transzplantáció

(FMT) megismertetése az olvasókkal. Ezeket megelőzően azonban fontos tudomást szerezni a szervezetünkkel szimbiózisban élő mikrobiótáról, melynek a bélflóra is fontos alkotórésze, mely a CD-fertőzés és a széklettranszplantáció kapcsán is központi szerepet játszik.

A mikrobióta

A CD-fertőzés mechanizmusának, valamint a széklettranszplantáció, azaz a székletmikrobióta-transzplantáció megértéséhez fontos előbb megismerkedni a mikrobióta fogalmával, koncepciójával. Az emberi testet nemcsak sejtek alkotják, hanem a működéshez fontos, 10^{14} mikroba él velünk, bennünk szimbiózisban. Ezek a mikroorganizmusok alkotják a mikrobiótát, mely megtalálható a testfelszínen, a nyálkahártyákon mindenütt, azaz a bőrön, a légutakban, a húgyutakban és a bélrendszerben, így végezve a székletben is (Kappéter et al. 2023).

A mikrobiótának rengeteg funkciója van a szervezet zavartalan működéséhez, szerepet játszik az anyagcserében, a hormonok, egyes vitaminok szintézisében, az adott szervrendszerek fejlődésében, működésében. A mikrobióta normál állapotban rendkívül sokszínű, azaz diverz, számtalan különböző fajta mikroorganizmus alkotja (Lozupone et al. 2012; Wang et al. 2015). Ennek a diverzitásnak a felbomlása, csökkenése esetén a mikrobióta egészségfenntartó szerepe csökken, a normál állapotban megtalálható mikroorganizmusok pusztulása, valamint ezzel szemben a kórokozó mikrobák elszaporodása miatt. Ennek okai lehetnek súlyos betegségek és azok kezelése, antibiotikum-terápia, illetve nagy fokú változás a táplálkozásban. Az ezek következtében kialakuló, az imént részletezett változást a mikrobiótában diszbiózisnak nevezzük. Ez a diszbiózis járul hozzá többek között a CD-fertőzés kialakulásához, valamint maga a fertőzés a CD-baktériumok elszaporodásával és a normál bélflóra elnyomásával, pusztításával fokozza ezt az állapotot (Chow et al. 2011; El-Sayed–Aleya–Kamel 2021).

A *Clostridioides difficile*-fertőzés

A *Clostridioides difficile*- (CD) fertőzés az egyik leggyakoribb, az egészségügyi ellátás során szerzett fertőző betegség, melynek jellemző tünetei a hasmenés, hasi fájdalom és láz. A betegség a vastagbél egyes szakaszainak vagy egészének gyulladásával, a bélfal megvastagodásával jár. A magas halálozási ráta (6–30%) különösen az idősebb korosztályt, illetve a kórházban kezelt betegeket érinti. A CD által kiváltott tünetek általában akkor alakulnak ki, amikor a normál bélflóra valamilyen fokú károsodása miatt a baktérium kolonizálni tudja azt. A normál bélflóra károsodásának leggyakoribb okai közé tartozik az antibiotikum-kezelés, a hosszú ideig tartó hospitalizáció, a hasi sebészeti beavatkozás, a gyomorsavcsökkentő gyógyszer szedése és a kemoterápia (Kuijper–Coignard–Tüll 2006; Trubiano et al. 2016).

A magas halálozási ráta mellett a betegek nagy százaléka tapasztalja a CD-tünetek visszatérését, rekurrenciáját is (15–30% az első epizód után, 40% az első rekurrencia

után és 45–65% legalább két korábbi rekurrencia esetén). Fontos kiemelni, hogy a CD-baktérium az emberi bélrendszerben normálisan is előfordulhat a normál, egészséges bélflóra tagjaként, azt anélkül kolonizálja, hogy panaszokat okozna. Az egészséges populáció 5%-a, míg a kórházban kezelték 20%-a, a hosszú távú ellátást nyújtó intézetek (szociális otthonok) lakóinak 50%-a hordozhatja. Ezek a törzsek azonban toxint nem termelnek, ezáltal betegséget nem okoznak, így kezelésre nincs szükség. A CD-baktérium azonban toxintermelésre is képes (A és B toxinokat termel), és ezek tudják a bélfal nyálkahártyájának gyulladását, álhártya képződését, a hasmenéses panaszokat okozni, ezen eseteket már kezelni kell (Vigvári et al. 2014).

A jelenlegi irányelvek alapján az elsővonalbeli kezelés első alkalommal előforduló CD-fertőzésre a metronidazol, a vancomycin vagy a fidaxomicin antibiotikum. Előfordulhat, hogy a kezdeti javulás ellenére a betegek bizonyos részénél a tünetek visszatérése jellemző. Az első rekurrencia a fent említett antibiotikumokkal kezelhető (van Prehn et al. 2021). Többszörös rekurrencia, valamint gyors (fulmináns) lefolyású fertőzés esetén probiotikumok, immunsavó vagy egészséges donortól származó széklettranszplantáció (önállóan vagy antibiotikum-kezeléssel kombinálva) is a lehetséges kezelési opciók közé tartozik. A leghatékonyabb kezelési módszer kiválasztása napjainkban is jelentős kihívást jelent, ami gazdasági terhet is jelent az egészségügyre (Freedberg et al. 2016; Vigvári et al. 2019a). A továbbiakban a széklettranszplantáció mint a CD-fertőzésben is használatos és elfogadott kezelési módozat megismertetése történik.

A széklettranszplantáció

A széklettranszplantáció, azaz a székletmikrobióta-transzplantáció (FMT) az utóbbi évek, évtized kutatásainak köszönhetően ment át hatalmas fejlődésen, és mára a széklettranszplantáció bizonyítottan hatékony kezelési módszer a többszörszörösen visszatérő CD-fertőzésben, hazánkban és számos más országban is. Ez a kezelési mód magas gyógyulási aránnyal jár (70–90% egyszeri kezelés után, 10–18 hetes utánkövetés során, és 100%-ig terjedő a második kezelés után, akár friss, akár fagyasztott, akár fagyasztva szárított transzplantátumot használva) (Youngster et al. 2014). Az FMT során – szemben egyéb mikrobióta-befolyásoló módszerekkel (például probiotikumok) – a donorszéklet egészséges bélflóráját, azaz a teljes bélmikrobiótát, valamint egyéb hasznos összetevőket (bakteriofágok, epesavak stb.) is bejuttatunk a beteg ember bélrendszerébe. Ezzel az élettani, azaz fizioiogiás összetételű transzplantátummal kezelhető a CD-fertőzés következtében kialakult diszbiózis, hiszen a bejuttatott egészséges bélflóra képes lesz elnyomni az elszaporodott, túlsúlyban lévő CD-baktériumokat. Az FMT több módszerrel is kivitelezhető, korábban preferált módszer volt az előkészített transzplantátum vastagbéltükrözés vagy beöntés során való bejuttatása az alsó bélszakaszba, azaz a vastagbélbe, valamint szondán keresztül bejuttatása a gyomorba vagy a patkóbélbe (van Nood et al. 2013; Vigvári et al. 2019b).

Ezeknél kíméletesebb, viszont ugyanannyira hatékony módszer az előkészített minta fagyasztva szárítása, azaz liofilizálása, mely ezt követően a bélrendszerben oldódó

kapszulákba adagolható. Maga a transzplantáció ebben az esetben úgy zajlik, hogy a páciens éhgyomorral, gyomorvédőt és bélmozgást (prokinetikum) segítő gyógyszeres infúziót követően közepes mennyiségű vízzel a kapszulákat lenyeli (általában 10–15 kapszula), majd nagyjából fél órát félig fekvő testhelyzetben tölt. Így biztosított, hogy a kapszulák ne a gyomorban oldódjanak fel, hanem eljussanak a bélbe, s tartalmuk itt szabaduljon fel, itt fejthesse ki hatását (Varga et al. 2021; Halaweish–Boatman–Staley 2022).

Az FMT rövid távú biztonságossága jó, általában enyhe vagy közepes mellékhatások jelentkezésére lehet csak számítani, úgymint hasi diszkomfortérzés, hányinger és puffadás. A potenciálisan előre nem megjósolható hosszú távú hatások, mint a multi-rezisztens baktériumok átvitele, vagy akár a SARS-CoV-2 széklettel való transzmissziója viszont jelenleg is kihívást jelentenek. Fontos kiemelni, hogy a fertőzések esetleges átvitelét megelőzendő, a donorok különböző szűrővizsgálatokon esnek keresztül. Ennek része egy kérdőív, mely során a transzplantációban való részvételt kizáró alapbetegségekre (például immunszuppresszív állapot, rosszindulatú daganatos megbetegedés stb.), a közelmúltban elszenvedett fertőzésekre, antibiotikum-kezelésre derítünk fényt. Ezután mind a donor székletéből, mind a vérből minta kerül kiküldésre mikrobiológiai vizsgálatra, mely során olyan fertőzések kerülnek kizárásra, mint a CD-fertőzés, HIV, hepatitisz A, B, C, E, citomegalovírus, Epstein–Barr-vírus és egyéb más, parazita által okozott megbetegedések (Nagy et al. 2020; Ianiro 2020).

Jelenleg, bár az FMT fő indikációja a CD-asszociált hasmenés kezelése, kutatások és klinikai tapasztalatok is azt mutatják, hogy számos más, diszbiózissal járó, amiatt kialakuló kórképben is hatékony lehet, úgymint gyulladásos bélbetegségek (Inflammatory Bowel Disease, IBD, például Crohn-betegség, fekélyes vastagbélgyulladás [colitis ulcerosa]), cukorbetegség, elhízás, Alzheimer-kór esetében. Ezek közül a gyulladásos bélbetegséggel kapcsolatban van jelentős gyakorlati tapasztalat, hiszen az ezen betegségekben kialakult diszbiózis hajlamosít a CD által okozott hasmenésre, mely a leírtak alapján indikációja a széklettranszplantációnak, így számos esetben tapasztaltuk azt, hogy a CD okozta hasmenés gyógyulása mellett az IBD által okozott tünetek is javultak (Cammarota et al. 2015; Zhang et al. 2022).

A CD-fertőzés kezelése számos jövőbeli kutatási lehetőséget rejt magában, csakúgy mint a széklettranszplantáció témaköre, valamint maga a mikrobióta is. Kutatások zajlanak az FMT optimalizálásáról, az egyes alkotórészek (mikrobák és egyéb anyagok) kiválasztásáról, és ezek külön-külön való felhasználásáról, valamint ahogy korábban is tárgyaltuk, számtalan olyan betegség van, melyek kezelésében a későbbiekben akár elfogadott terápiás módszerként is szerepelhet (Ott et al. 2017; Varga et al. 2023).

Diszkuszió

A *Clostridioides difficile*-fertőzés kezelése és a széklettranszplantáció területén az utóbbi években tett előrelépések rendkívül ígéretesek az egészségügyben. A CD-fertőzés jelentős problémát jelent az egészségügyi ellátás során, különösen a kórházi környezetben, és a bélflóra antibiotikumok által okozott károsodása fokozza ezt a ve-

szélyt. Az FMT hatékony eszköznek bizonyult a visszatérő CD-fertőzések kezelésében, amelyben egészséges donorszéklet mikrobiótáját juttatják be a fertőzött betegekbe. Az eljárás általában biztonságos, de továbbra is magával hordozza a multirezisztens kórokozók átadásának kockázatát, ezáltal akár súlyos fertőzések kialakulását is, így a biztonságosság növelésére további vizsgálatok szükségesek. További kutatások vizsgálják az FMT alkalmazását más állapotokban, mint például gyulladásos bélbetegségben és cukorbetegségben. A CD-fertőzés kezelése és az FMT folyamatos kutatási lehetőségeket kínál, amelyek újabb fejlesztéseket ígérnek a mikrobióta-terápiák terén, javítva ezzel az egészségügyi ellátás hatékonyságát és eredményességét.

Irodalomjegyzék

- Cammarota, Giovanni et al. (2015). „The Involvement of Gut Microbiota in Inflammatory Bowel Disease Pathogenesis: Potential for Therapy”. *Pharmacology & Therapeutics*, 149/May, 191–212.
<https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2014.12.006>
- Chow, Janet – Tang, Haiqing – Mazmanian, Sarkis K. (2011). „Pathobionts of the Gastrointestinal Microbiota and Inflammatory Disease”. *Current Opinion in Immunology*, 23/4, 473–480.
<https://doi.org/10.1016/j.coi.2011.07.010>
<https://sarkis.caltech.edu/documents/5050/1-s2.0-S0952791511000835-main.pdf>
- El-Sayed, Amr – Aleya, Lotfi – Kamel, Mohamed S. (2021). „Microbiota's Role in Health and Diseases”. *Environmental Science and Pollution Research*, 28/4, 36967–36983.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14593-z>
- Freedberg, Daniel E. al. (2016). „Receipt of Antibiotics in Hospitalized Patients and Risk for *Clostridium difficile* Infection in Subsequent Patients Who Occupy the Same Bed”. *JAMA Internal Medicine*, 176/12, 1801–1808.
<https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2016.6193>
- Halaweish, Hossam F. – Boatman, Sonja – Staley, Christopher (2022). „Encapsulated Fecal Microbiota Transplantation: Development, Efficacy, and Clinical Application”. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.826114>
- Ianiro, Gianluca et al. (2020). „Reorganisation of Faecal Microbiota Transplant Services During the COVID-19 Pandemic”. *Gut*, 69/9, 1–9.
<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-321829>
- Kappéter, Ágnes et al. (2023). „Migraine as a Disease Associated with Dysbiosis and Possible Therapy with Fecal Microbiota Transplantation”. *Microorganisms*, 11/8, 2083.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11082083>
- Kuijper, Ed – Coignard, Bruno – Tüll, Peet (2006). Emergence of *Clostridium difficile*-Associated Disease in North America and Europe. *Clinical Microbiology and Infection*, 12/6, 2–18.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2006.01580.x>
- Lozupone, Catherine et al. (2012). „Diversity, Stability and Resilience of the Human Gut Microbiota”. *Nature*, 489/7415, 220–230.
<https://doi.org/10.1038/nature11550>
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3577372/>
- Nagy Gergely György et al. (2020). „A székletmikrobióta-transzplantáció technológiájának és minőségirányítási hátterének újragondolása a SARS-CoV-2 víruspandémia kapcsán”. *Orvosi Hetilap*, 161/44, 1858–1871.
<https://doi.org/10.1556/650.2020.32023>
<https://real.mtak.hu/151330/1/1788-6120-article-p1858.pdf>

- van Nood, Els et al. (2013). „Duodenal Infusion of Donor Feces for Recurrent *Clostridium difficile*”. *The New England Journal of Medicine*, 368/5, 407–415.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa1205037>
- Ott, Stephan J. et al. (2017). „Efficacy of Sterile Fecal Filtrate Transfer for Treating Patients with *Clostridium difficile* Infection”. *Gastroenterology*, 152/4, 799–811.
<https://doi.org/10.1053/j.gastro.2016.11.010>
- van Preen, Joffrey et al. (2021). „European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases: 2021 update on the treatment guidance document for *Clostridioides difficile* infection in adults”. *Clinical Microbiology and Infection*, 27/2.
<https://doi.org/10.1016/j.cmi.2021.09.038>
- Trubiano, Jason A. et al. (2016). „Australasian Society of Infectious Diseases Updated Guidelines for the Management of *Clostridium difficile* Infection in Adults and Children in Australia and New Zealand”. *Internal Medicine Journal*, 46/4, 479–493.
<https://doi.org/10.1111/imj.13027>
- Varga, Adorján et al. (2021). „How to Apply FMT More Effectively, Conveniently and Flexible – A Comparison of FMT Methods”. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.657320>
- Varga, Adorján et al. (2023). „Efficacy of Lyophilised Bacteria-Rich Faecal Sediment and Supernatant with Reduced Bacterial Count for Treating Patients with *Clostridioides Difficile* Infection – A Novel Method for Capsule Faecal Microbiota Transfer”. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, 1041384.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1041384>
- Vigvári Szabolcs et al. (2014). „Clostridium difficile-fertőzések széklettranszplantációval való kezelése során nyert tapasztalataink”. *Orvosi Hetilap*, 155/44, 1758–1762.
<https://doi.org/10.1556/OH.2014.30020>
- Vigvári, Szabolcs et al. (2019a). „Experiences with Fecal Microbiota Transplantation in *Clostridium Difficile* Infections via Upper Gastrointestinal Tract”. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 66/2, 179–188.
<https://doi.org/10.1556/030.65.2018.051>
<https://tinyurl.com/4nbefdw4>
- Vigvári Szabolcs et al. (2019b). „Széklet mikrobiota transzplantáció *Clostridium difficile* fertőzésre nem rokon donoroktól származó liofilizált oltóanyag felhasználásával: 19 beteget érintő esetsorozat”. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, 66/1, 69–78.
<https://doi.org/10.1556/030.64.2017.042>
- Wang, Wei-Lin et al. (2015). „Application of Metagenomics in the Human Gut Microbiome”. *World Journal of Gastroenterology*, 21/3, 803–814.
<https://doi.org/10.3748/wjg.v21.i3.803>
- Youngster, Ilan et al. (2014). „Fecal Microbiota Transplant for Relapsing *Clostridium Difficile* Infection Using a Frozen Inoculum from Unrelated Donors: A Randomized, Open-Label, Controlled Pilot Study”. *Clinical Infectious Diseases*, 58/11, 1515–1522.
<https://doi.org/10.1093/cid/ciu135>
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4017893/>
- Zhang, Shou et al. (2022). „Fecal Microbiota Transplantation Treatment of Autoimmune-Mediated Type 1 Diabetes: A Systematic Review”. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.1075201>

Flerek és koronaanyag-kidobódások keresése gépi tanulással

Machine Learning for the Detection of Solar Flares and Coronal Mass Ejections

Vida Krisztián

PhD, tudományos főmunkatárs

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest
vida.krisztian@csfk.org

Összefoglalás

A kis tömegű, alacsony felszíni hőmérsékletű csillagok a lakható exobolygók keresésének fő célpontjai, azonban a központi csillag nagy energiájú kitörései – a flerek és koronaanyag-kidobódások (CME-k) – fenyegetést jelenthetnek a bolygók lakhatóságára. Röviden összefoglaljuk a csoportunkban az utóbbi években végzett, flerek/CME-k keresésére irányuló, gépi tanulást használó vizsgálatok eredményeit.

Abstract

Low-mass, cool stars are prime targets for the search for habitable exoplanets, however, high-energy eruptions from the host stars—flares and coronal mass ejections (CMEs)—can pose a threat to the habitability of their planets. We will give a short summary of our group's recent work aimed at detecting flares and CMEs using different machine learning algorithms.

Kulcsszavak: nap- és csillagaktivitás, gépi tanulás, űridőjárás

Keywords: solar and stellar activity, machine learning, space weather

Bevezetés

A kis tömegű, alacsony felszíni hőmérsékletű (<4000 K) csillagok – M színképtípusú törpék – a potenciálisan lakható bolygók keresésének kiemelt célpontjai. Az M-törpék a leggyakoribb csillagok galaxisunkban (az összes csillag 80%-át teszik ki), és a jelenlegi becslések szerint ezen csillagok többsége körül legalább egy Föld méretű bolygó kering. Mivel az M-törpék kevésbé fényesek, mint a Nap-szerű csillagok, lakható zónájuk, vagyis az a régió, ahol a bolygók felszínén megfelelő légköri nyomás mellett folyékony víz lehet jelen, sokkal közelebb van a csillaghoz. Ez megkönnyíti a földi-hez hasonló életre alkalmas bolygók kimutatását a csillag nagyobb radiálissebesség-változása és nagyobb fotometriai kontrasztja miatt. Az egyik legismertebb példa a TRAPPIST-1 rendszer, amelyben hét, hozzávetőleg Föld méretű bolygó található, amelyek közül három a csillag lakható zónájában kering (Gillon et al. 2017).

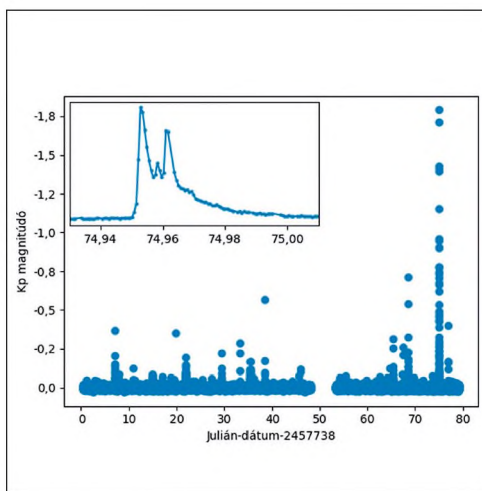
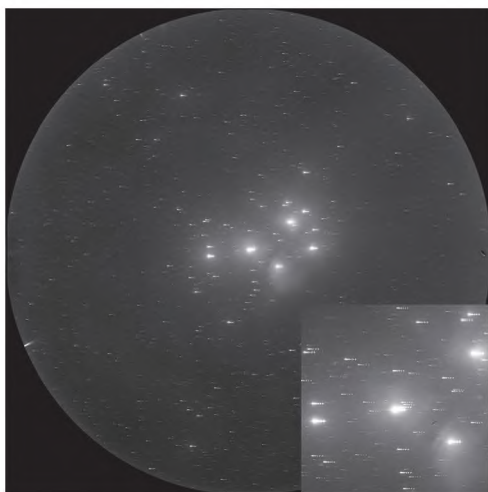
A lakhatóság kérdése azonban összetettebb, nemcsak a bolygónak a csillagtól való távolságától, azaz a bolygóra érkező sugárzás mennyiségétől függ, hanem például a bolygó tulajdonságaitól (mágneses tér, légkör) és a központi csillag tulajdonságaitól is függhet. Ezek közül a központi csillag tulajdonságai az egyetlen olyan tényező, amelyet jelenleg mérésekkel vizsgálni tudunk. Ebből a szempontból az M-törpék környéke kevésbé tűnik barátságos helynek, ezek a csillagok ugyanis a mágneses aktivitásukról is ismertek, és gyakran produkálnak nagy energiájú, tranziens eseményeket. Ezt az ún. csillagaktivitást erős mágneses mezők eredményezik, amelyeket valamilyen dinamóméchanizmus hoz létre és tart fenn a csillag belsejében. Ez a mechanizmus erősen függ a csillag forgási periódusától: a gyorsabban forgó csillagok erősebb mágneses mezőket hoznak létre, így azok aktivitásának szintje magasabb. Ez különböző időskálákon számos jelenség formájában figyelhető meg, amelyek közül a legtöbb a Napunkon is jelen van (például: napfoltok, éves–évszázados aktivitási ciklusok, tranziens események). A felszíni mágneses mező gyors változásai hirtelen energiefelszabadulást és egy-egy helyi régió fényesedését eredményezhetik. Ez a jelenség a fler, amely gyakran koronaanyag-kidobódásokkal (coronal mass ejection, CME) jár, ez utóbbi során a csillag légköréből forró plazma dobódik ki, amely a központi csillag körül keringő bolygók mágneses terével és légkörével kölcsönhatva mágneses viharokat vagy sarki fényt okozhat.

A flerek és a hozzájuk kapcsolódó folyamatok befolyásolják mind a csillagok, mind a körülöttük lévő exobolygók fejlődését: hatásaik komoly kérdéseket vetnek fel a lakhatósággal kapcsolatban, még akkor is, ha a bolygó egyébként a csillag lakható zónájában található. A gyakori nagy energiájú események – flerek és CME-k – erodálhatják a központi csillaghoz közel lévő bolygók légkörét, így hosszú távon lakhatatlanná téve azokat (Khodachenko et al. 2007). A csillagaktivitás életre gyakorolt hatásáról szóló elméletek azonban nem egyértelműek: az M-törpéknél a flerek lehetnek akár az abiogenezishez, vagyis az élet egyszerű szerves vegyületekből történő kialakulásához szükséges UV-sugárzás forrásai (Ranjan–Wordsworth–Sasselov 2017), és lehet, hogy egy bolygó kellően erős mágneses mezője megvédeheti a légkört és a felszíni életet a nagy energiájú sugárzástól (Dartnell et al. 2011; Blackman–Tarduno 2018). Emellett laboratóriumi kísérletek szerint a sugárzásnak ellenálló mikroorganizmusok képesek túlélni az M-törpék aktivitásából származó UV-sugárzást (Abrevaya et al. 2011).

A lakhatóság és az exobolygók légkörének hosszú távú stabilitása különösen fontos, ha az összetett élet kialakulását vizsgáljuk. Jelenleg a legkorábbi életnyomok a Földön körülbelül 500 millió évvel a Föld kialakulása utánra tehetőek (Dodd et al. 2017), de az összetett élet kialakulása sokkal hosszabb időt vett igénybe. Nick Lane és William Martin (2010) szerint az életnek a prokarióta–eukarióta átmeneten való átjutása, azaz a sejtmagot tartalmazó sejtek kialakulása – ami elengedhetetlen az összetett élethez – olyan valószínűtlen, hogy ehhez csillagászati időskálákra, milliárd évekre van szükség.

Flerkeresés klasszikus gépi tanulással

Miért van szükség gépi tanulásra e probléma tanulmányozásánál? Néhány évtizeddel ezelőtt a csillagászatban a fő problémát a mérések hiánya jelentette. Az észleléseket hazánkban és külföldön is főként fotolemezekre készítették több tíz perces expozíciós idővel (1. ábra) – ekkoriban a megválaszolható kérdéskör főleg az volt, hogy vannak-e flercsillagok, illetve fotoelektromos mérésekkel jobb időfelbontással egy-egy csillag flerjeinek energiaeeloszlására lehetett becslést végezni (Gershberg 1972).



1. ábra. Balra: fotolemezes felvétel a Fiastyúk (Plejádok) fiatal nyílthalmazról 1972-ből.

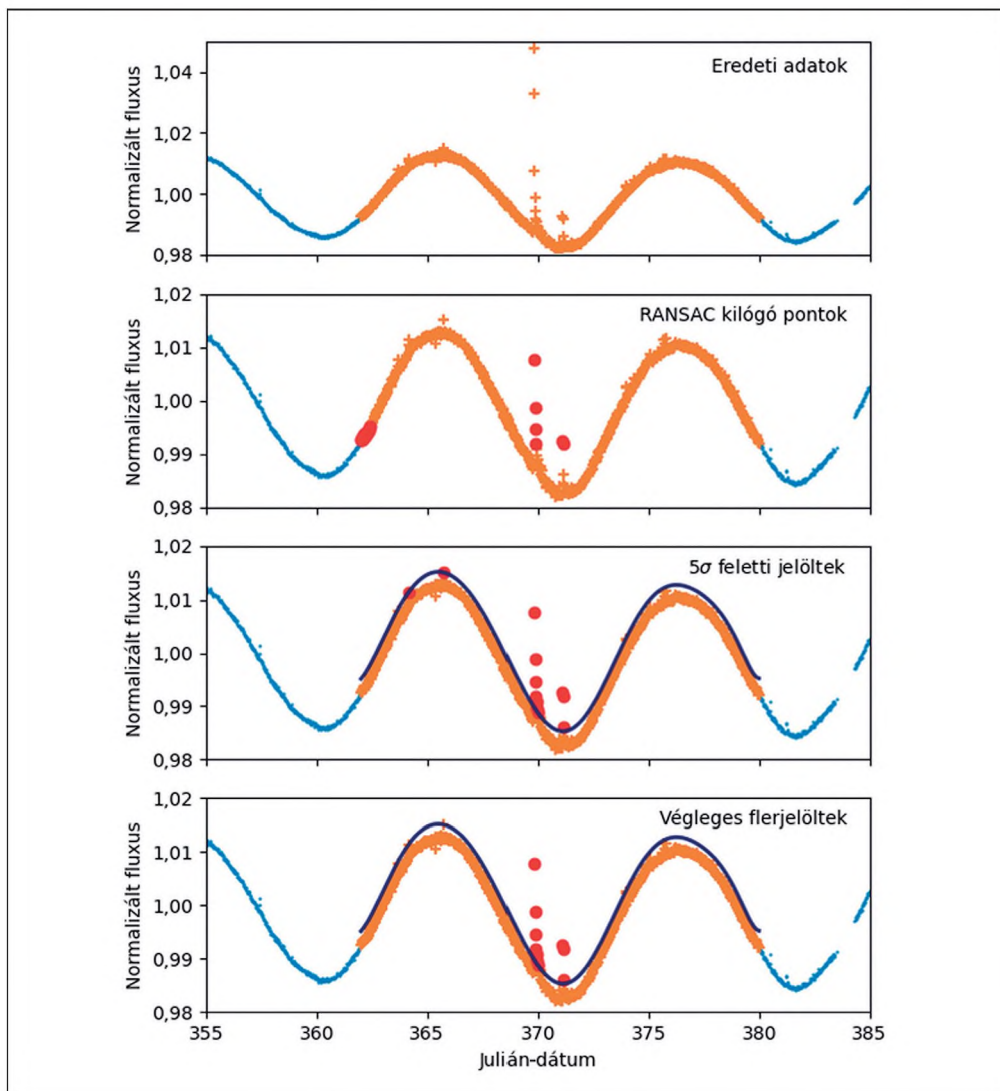
A lemezre egymás után több expozíciót készítettek, a távcsövet kissé elmozdítva, hogy az így készült sorozatképen könnyebben azonosíthatók legyenek a változó fényű csillagok. Jobbra: a TRAPPIST-1 fénygörbéje a Kepler-űrtávcső adataiból. Ezek a mérések többhétnyi (egyes esetekben többéves), nagyjából folytonos, minden korábbinál pontosabb méréseket biztosítanak a kutatóknak.

Megjegyzés: a csillagászatban használt Julián-dátum a Kr. e. 4713. év első napjától eltelt napok számával adja meg az időpontokat

Forrás: fotolemez: <https://schmidt-heritage.konkoly.hu/>, a diagram saját szerkesztés Vida et al. 2017 alapján

Ezzel szemben napjainkban a Kepler és TESS űrobszervatórium mérései nagyságrendekkel pontosabb adatokat szolgáltatnak több százezer csillagról, ráadásul ezek folyamatos, több hét vagy több év hosszúságú fénygörbék, amelyekben nincs időjárás vagy nappalok okozta megszakítás. Ilyen hatalmas mennyiségű adatban manuálisan keresni a flerek nyomait reménytelen vállalkozás, így számos algoritmus készült a probléma automatizálására. Az egyik megoldás ezek közül – a FLATW^{RM} (FLAre deTectiOn With Ransac Method, Vida–Roettenbacher 2018) – egy klasszikus gépi tanulási módszert, a RANSAC-ot (RANDOM Sample Consensus) használja, amely tulajdonképpen egy robusztus illesztési eljárás.

A RANSAC lényege, hogy az adott mérési pontok közül, amelyek helyes, bár zajjal terhelt mérésekből – *inlier* – és kilógó pontokból – *outlier* – állnak, véletlenszerűen kiválasztunk egy almintát, és illesztjük a modellünkkel. Ezután megnézzük, hogy az eredeti mintából mely pontok illenek a modellhez. Ezt a kiválasztást–illesztést többször megismételve azt fogadjuk el végső modellnek, amelyik a legjobban illeszkedik az eredeti adatsorra. A FLATW²RM flerkereső kód ezt az algoritmust használva halad végig a fénygörbéken, és adott hosszúságú illesztési

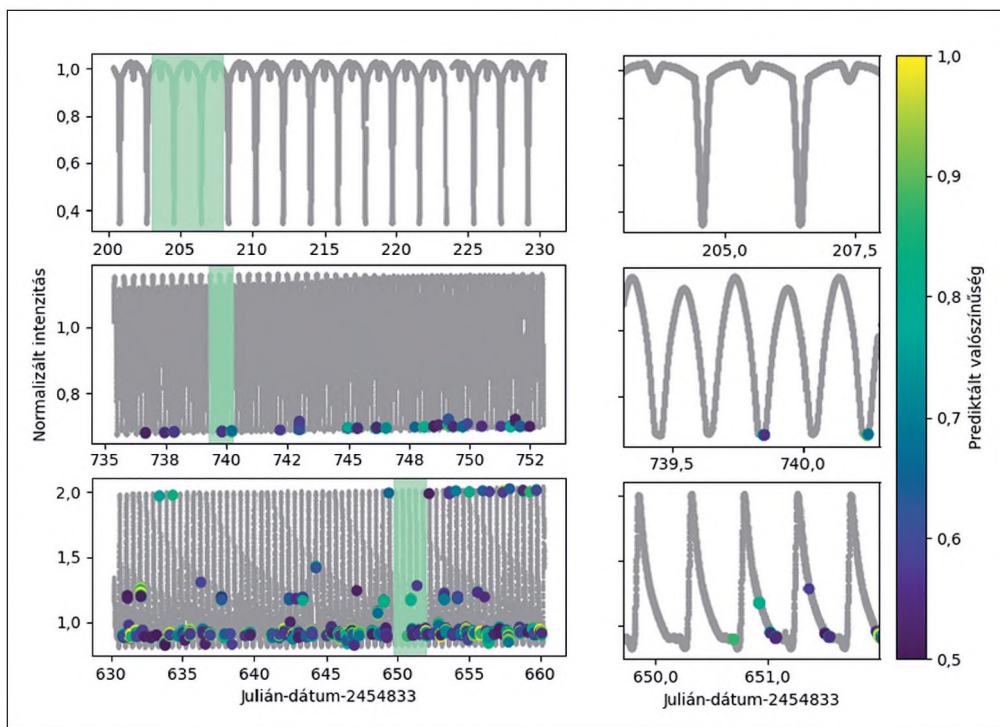


2. ábra. Flerkeresés a FLATW²RM-algoritmussal
Forrás: a szerző saját szerkesztése

ablakokban megpróbálja egy polinommal illeszteni a mérést. Az illesztési ablakot úgy választjuk meg, hogy az ablak a tipikus flerek hosszánál, kb. fél–egy óránál hosszabb legyen, hogy a flerek valóban kilógó pontoknak tűnjenek, de a mérést még jól lehessen egy viszonylag alacsony fokú polinommal illeszteni. Az illesztés után az adott detektálási határ feletti pontok egy-egy szavazatot kapnak, és azokat a pontokat fogadjuk el végleges flerjelöltnek, amelyek kellő számú szavazatot gyűjtöttek – ily módon elkerülhetjük az észlelési ablak szélén a polinomillesztés hibájából származó hamis pozitív pontokat (2. ábra). Ez a kód része lesz az Európai Űrügynökség (ESA) 2026-ban indítandó PLATO űrszondájának mérési adataiban a flereket megjelölő algoritmusnak is.

Flerkeresés neurális hálóval

A hagyományos flerkereső módszerek, így a fent ismertetett FLATW'RM vagy egyéb, például a fénygörbe simításán alapuló eljárások egyik jellemző problémája, hogy hajlamosak más asztrofizikai jelenségeket, például pulzáló csillagok fénygörbéit flerként azonosítani, illetve a különböző fénygörbék más és más paraméterezést igé-



3. ábra. Néhány példa a FLATW'RM2 neurális háló tanításához/teszteléséhez használt „asztrofizikai zajra”, amelyek gyakran megtévesztik a flerkereső algoritmusokat

Forrás: a szerző saját szerkesztése

nyelhetnek. Ezek a problémák mélytanulási módszerekkel orvosolhatók: egy neurális háló, miután megfelelő adatokkal betanították, nem igényel semmilyen kézi beavatkozást vagy paraméterezést, és önállóan képes új adatokkal dolgozni. Ezenkívül bizonyos esetekben az „asztrofizikai zaj” kiszűrhető. Bár az ilyen hálózatok betanítása időigényes – egyetlen iteráció is többórás futási idővel járhat még a legújabb GPU-kon (graphics processing unit, grafikus processzor) is –, az adatok elemzése viszonylag gyors: például az arcfelismerés valós időben elvégezhető akár mobiltelefonokon is. A FLATW’RM2-kódunk fejlesztésekor több neurálisháló-architektúrát kipróbálva arra jutottunk, hogy a leghatékonyabban teljesítő háló egy LSTM- (long short-term memory) rétegekből álló hálózat volt. A Kepler-űrtávcső adatain betanított algoritmus a flerek több mint 80%-át megtalálta, és meg tudta különböztetni a flerkereső algoritmusokat egyébként megtevesztő „asztrofizikai zajt” is (3. ábra). Az algoritmus-sal elemeztük a TESS űrtávcső összes fénygörbáját, mintegy 450 000-et, és a hatalmas mintában kb. 150 000 flert találtunk – ebből kutatócsoportunk az eddigi legrészlete-sebb flerkatalógust fogja előállítani.

Koronaanyag-kidobódások elemzése gépi tanulással

A Napon számos koronaanyag-kidobódást figyelhetünk meg (szinte minden nagyobb fler CME-vel jár), más csillagokon azonban a CME-k megfigyelése kihívást jelent, így csak néhány tucat ilyen esemény ismert. Míg a csillagflerek viszonylag könnyen megfigyelhetők fotometria segítségével, a CME-k mérése nehezebb: leggyakrabban a kidobódott anyag színekében a Doppler-eltolódás hatására keletkezett púp alapján diagnosztizálják azokat a hidrogén Balmer-vonalában. Az eddigi mérések alapján úgy tűnik, hogy a csillagok koronaanyag-kidobódásai ritkábbak, mint ahogyan a Napon megismertek alapján várnánk (Vida et al. 2019; Leitzinger et al. 2020).

A csillagokkal kapcsolatos mágneses jelenségek magyarázatai a szoláris paradigmán alapulnak, azaz feltételezzük, hogy a csillagokon megfigyelt jelenségek hasonlóak a Napéhoz. Ellentétben más csillagokkal, műholdas megfigyelések alapján a Napunk esetében részletesen tudjuk, mikor következnek be CME-k. Vajon a nagy felbontású napspektrumok segíthetnek-e más csillagok CME-inek megértésében? A HARPS-N naptávcsőre (La Palma, Spanyolország) csatolt spektrográf az egyik legpontosabb műszer, amellyel 2015 óta minden derült napon megfigyelik a Napot ötperces időfelbontással. A műszer első éveinek adatai már nyilvánosan elérhetőek – ezeket a SOHO napkutató szonda CME-megfigyeléseivel kombinálva elkezdtünk kifejleszteni egy neurális hálón alapuló eljárást a koronaanyag-kidobódások jobb megértéséhez. Ezzel archív méréseket elemezhetünk, vagy új CME-nyomjelzőket találhatunk.

Eddig az első kísérleteink nem jártak sikerrel, szemmel megvizsgálva a méréseket a spektrumok legjelentősebb változásai a légkör és a földi légkör páratartalmának változásaiból származnak, ráadásul az eddig nyilvánossá tett hároméves mérés a

naptevékenységi ciklus minimuma közelében történt, így viszonylag kevés az elérhető minta. Hogy megvizsgáljuk, kezelhető-e egyáltalán a probléma, a spektrumokba a valódi eseményekkel megegyező sebességű, de 5000-szer nagyobb tömegű CME-k jelét injektáltuk – ezeket a spektrumokat már egy viszonylag egyszerű, kétrétegű Conv1D konvolúciós háló is megtalálta, így talán van remény a probléma megoldására (a 2018 után készült napspektrumok is várhatóan elérhetőek lesznek a közeljövőben). Emellett jelenleg azt is vizsgáljuk, hogy a probléma megoldható-e felügyelet nélküli tanítási módszerekkel, dimenziócsökkentő algoritmusok (például főkomponens-analízis), illetve valamilyen klaszterezési módszer ötvözésével.

Irodalomjegyzék

- Abrevaya, Ximena C. et al. (2011). „Comparative Survival Analysis of *Deinococcus radiodurans* and the *Haloarchaea Natrionalba magadii* and *Halococcus volcanii* Exposed to Vacuum Ultraviolet Irradiation”. *Astrobiology*, 11, 1034.
<https://doi.org/10.1089/ast.2011.0607>
<https://arxiv.org/pdf/1109.6590>
- Blackman, Eric G. – Tarduno, John A. (2018). „Mass, Energy, and Momentum Capture from Stellar Winds by Magnetized and Unmagnetized Planets: Implications for Atmospheric Erosion and Habitability”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 5146.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty2640>
- Dartnell, Lewis R. et al. (2011). „Implications of Cosmic Radiation on the Martian Surface for Microbial Survival and Detection of Fluorescent Biosignatures”. In: *42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 1977.
<https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1977.pdf>
- Dodd, Matt S. et al. (2017). „Evidence for Early Life in Earth’s Oldest Hydrothermal Vent Precipitates”. *Nature*, 543, 60.
<https://doi.org/10.1038/nature21377>
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28252057/>
- Gershberg, Roald Evgenievich (1972). „Some Results of the Cooperative Photometric Observations of the UV Cet-Type Flare Stars in the Years 1967–71”. *Astrophysics and Space Science*, 19, 75.
<https://doi.org/10.1007/BF00643168>
<https://adsabs.harvard.edu/full/1972Ap%26SS..19...75G>
- Gillon, Michaël et al. (2017). „Seven Temperate Terrestrial Planets Around the Nearby Ultracool Dwarf Star TRAPPIST-1”. *Nature*, 542, 456.
<https://doi.org/10.1038/nature21360>
<https://authors.library.caltech.edu/records/0z6y9-k7e09/preview/emss-70968.pdf>
- Khodachenko, Maxim L. et al. (2007). „Coronal Mass Ejection (CME) Activity of Low Mass M Stars as An Important Factor for the Habitability of Terrestrial Exoplanets. I. CME Impact on Expected Magnetospheres of Earth-Like Exoplanets in Close-In Habitable Zones”. *Astrobiology*, 7, 167.
<https://doi.org/10.1089/ast.2006.0127>
<https://tinyurl.com/3w2rxz6s>
- Lane, Nick – Martin, William (2010). „The Energetics of Genome Complexity”. *Nature*, 467, 776.
<https://doi.org/10.1038/nature09486>
<https://tinyurl.com/4c3tdxmm>
- Leitzinger, Martin et al. (2020). „A Census of Coronal Mass Ejections on Solar-like Stars”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493, 4570.
<https://doi.org/10.1093/mnras/staa504>

- Ranjan, Sukrit – Wordsworth, Robin – Sasselov, Dimitar D. (2017). „The Surface UV Environment on Planets Orbiting M Dwarfs: Implications for Prebiotic Chemistry and the Need for Experimental Follow-up”. *The Astrophysical Journal*, 843, 110.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa773e>
- Vida, Krisztián et al. (2017). „Frequent Flaring in the TRAPPIST-1 System—Unsuited for Life?” *The Astrophysical Journal*, 841, 124.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6f05>
- Vida, Krisztián et al. (2019). „The Quest for Stellar Coronal Mass Ejections in Late-Type Stars. I. Investigating Balmer-Line Asymmetries of Single Stars in Virtual Observatory Data”. *Astronomy and Astrophysics*, 623, A49.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834264>
- Vida, Krisztián – Roettenbacher, Rachael M. (2018). „Finding Flares in Kepler Data Using Machine-Learning Tools”. *Astronomy and Astrophysics*, 616, A163.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833194>

TUDÓSPORTRÉ

Barabás Zoltán, az invenciózus növénynevelés vezéregyénisége

Zoltán Barabás, the Pioneer of Inventive Plant Breeding

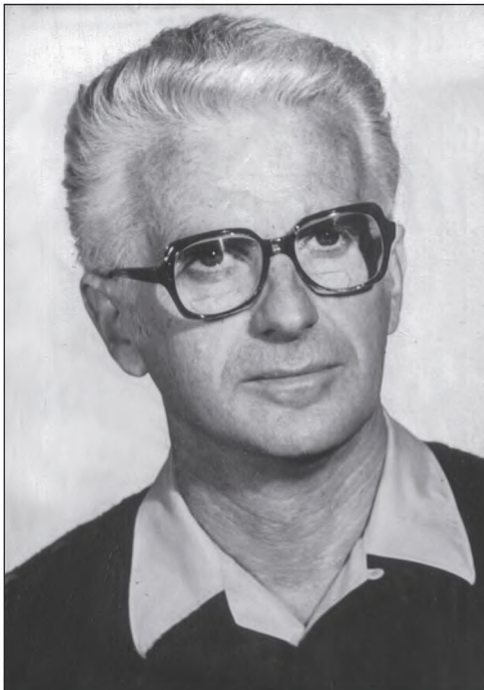
Pauk János

az MTA doktora

Gabonakutató Nonprofit Kft., Szeged

janos.pauk@gabonakutato.hu

Barabás Zoltán akadémikus, az Állami Díj, az Akadémiai Díj és a Fleischmann Rudolf-díj tulajdonosa és a Szegedért Alapítvány (Pro Urbe) tudományos díjazottja, a két világháború között, 1926. február 10-én született Budapesten (1. ábra). Családja Székelykeresztúrról származott. Édesapja orvos volt, apai nagyapja unitárius paptnár. Középiskolai tanulmányait a második világháború alatt Budapesten kezdte el, majd az utolsó két évet Kolozsváron, az unitárius gimnáziumban fejezte be. A ko-



1. ábra. Barabás Zoltán portréja

Forrás: Gabonakutató archívum

lozsvári tanulmányok alapozták meg a költészet, a filozófia és a tudományok iránti szenvedélyes érdeklődését, amely egész életében végigkísérte. 1944-től a budapesti agráregyetemre járt, ahol 1948-ban szerzett diplomát. Kisebb szakmai kitérők után 1951-ben került az MTA martonvásári intézetébe. Itt vette feleségül 1954-ben a biológia–kémia szakos Kárász Ilonát, aki hűséges társa volt három gyermekük felnevelésében, férje szakmai harcaiban és sikereiben (Chikán 2002).

Mindenkinek csak Zoltán volt. Nagydoktorija (1980) után, sőt akadémiakussá választását (1985) követően is megtapasztalhatták, amit technikusának mondott: „Eddig is Zoltán voltam, ezután is az leszek!” Amikor először találkoztunk vele, feleségem megjegyezte, milyen szép neve van! Lehet-e a Barabás név szép? – kérdezte, hiszen Krisztust Barabásra cserélték ki. Lelkileg azonnal nagyon közel kerültünk egymáshoz.

Elképzelései elsőre mind-mind a lehetetlen kategóriát súrolták, de egyéniségéhez ezek a feladatok álltak közel. Alig múlt harminc éves, és már két egyszerűs *Nature*-publikációja volt búza (Barabás 1959), majd cirok (Barabás 1962) témában. Nem akár-milyen kezdet, hiszen az 1960-as évek elején ez még a háttérbe szorítás veszélyét is hordozta, de mint párton kívüli, ezzel sohasem törődött. Martonvásáron Surányi János mellett cirokhonosításba kezdett, és ennél az öntermékenyülő növénynél a világon elsőik között oldották meg a hibridvetőmag-előállítását. A szudánifű és szemescirok hibridjeinek neve Hybar (Hybrid Barabás) rövidítéssel kezdődik.

A szegedi korszak (1969) első évei sem a megszokott módon indultak, nem folytatta a nagy elődök (Beke Ferenc, Lelley János) művét, valami egészen újat álmodott, amikor Szániel Imre, a szegedi intézet igazgatója megbízta a búzaprogram vezetésével. A napóra (center pivot) kórtani vizsgálati módszer (Matuz et al. 1979) zseniális megoldás volt egy betegség terjedésének, intenzitásának monitorozására, a *Theoretical and Applied Genetics*-ben írt cikk született belőle. A hidegkezelés (vernalizáció) módosításának biokémiai megoldása volt a célja a kemovernalizációs kísérleteinek, mellyel gyorsabban lehet üvegházban generációkat felnevelni.

Barabás Zoltán talán legnagyobb alkotása a Szegeden létrehozott búzakutatási és -nemesítési iskola. A rendszeres osztályértekezletek több mint két évtizeden keresztül a képzés, a tanulás és a tanítás alkalmi voltak. A saját kísérletek és a szakirodalmi eredmények ismertetése, ütköztetése, a jövő kísérleteinek tervezése az osztályértekezletek kohójában formálódott. Lazításra nem volt lehetőség, hiszen előadás közben Zoltán személyre szabott villámkérdése bármikor megszakíthatta a pislákoló figyelmet. Rédei György *Genetics* című könyvét még lefordítása előtt fejezetről fejezetre ismertettük és megvitattuk egymás között. A kutatókon kívül a technikusok is részt vettek az értekezleteken, hiszen a kísérletek végzésében az ő munkájuk lényegesen befolyásolta a sikerességet. Ennek az iskolának tagozatai voltak; kórtani, lisztminőségi, biotechnológiai, agrotechnikai és a legfontosabb: a nemesítési. Mindezek alkotórészei voltak a búzanemesítési programnak. Szegeden valószínűleg nemesítő iskola született, hiszen harminc évvel Zoltán halála után is az általa lerakott alapokon nyugszik a nemesítés. Iskolateremtő kiválósága a gödöllői Mezőgazdasági Biotechnológiai

Központ szellemi és gyakorlati megteremtésében is jól látható volt. Alkotó módon látta a tendenciákat, a jövő kutatási irányait.

Tudományos lapot alapítani minden korban nehéz, sok harccal és kevés reménnyel kecsegtető feladat. Zoltán ettől sem riadt vissza. Amikor az 1970-es években hazaérkezett Amerikából, ahol megbizonyosodott arról, hogy a publikált eredmények mennyire fontosak a tudományban, azonnal nekilátott a Cereal Research Communications (CRC) létrehozásának. A szerkesztőbizottságba olyan nemzetközi hírnű tudósokat nyert meg, mint az akkor friss béke-Nobel-díjas nemesítő, Norman Borlaug vagy Gordon Kimber, és még sorolhatnánk. A lap első húsz évében, egészen a haláláig ő volt a főszerkesztője. A ma már több mint ötvenéves szaklap 1,6-os impaktfaktorával (2023) a gabonafélék kutatásának a legelfogadottabb tudományos lapjává vált, mára a Springer-család tagja.

Barabás Zoltán nem csak nemzetközileg tartotta fontosnak a publikálást. Munkatársaival együtt 1987-ben megjelentették *A búzanemesítés kézikönyve* című 537 oldalas művet, amelynek szerkesztője és szerzője is volt. A könyv még ma is alpműnek számít a búzatermesztők körében. A gyakorlat számára a legtöbbet a fajták (cirok, étkezési és tésztárazafajták) jelentették. A fajtanevek mind-mind egy-egy harcot (GK Tiborc, GK Mini Manó), vagy szép sikert (GK Kincső, GK Délibáb, GK Kalász) jelentettek. Hazánkban a növényfajták szabadalmaztatását is (ma oltalom) ő vetette fel és indította el az 1980-as években. Az első hazai szabadalommal védett növényfajta egyik legkedvesebb fajtája a lisztharmanrezisztens GK Kincső volt. A Gabonakutató eddig több mint száz elismert búzafajtát adott a termesztőknek, ennek körülbelül negyede az ő vezető nemesítő nevéhez fűződik.

Utoljára – három héttel a halála (1993. január) előtt – még az intézetben láttam. A búzaosztály folyosójának végén járt, amikor kiléptem mögötte az ajtón. Ő nem fordult vissza, és én bátortalan voltam szólni, pedig még maradtak befejezetlen mondataink.

Irodalomjegyzék

- Barabás, Zoltán (1959). „An Induced Mutant in *Triticum carthlicum* with the Diagnostic Feature of *T. vavilovi*”. *Nature*, 193, 1439.
<https://doi.org/10.1038/1831349a0>
- Barabás, Zoltán (1962). „Observation of a Sex Differentiation in Sorghum”. *Nature*, 195, 257–259.
<https://www.nature.com/articles/195257a0>
- Chikán, Ágnes (2002). *A siker biológiájától a siker lélektanáig*. Budapest: Agroinform Kiadó és Nyomda Kft.
- Matuz, János – Mesterházy, Ákos – Barabás, Zoltán (1979). „The Evolution of Horizontal Resistance of Winter Wheats by the Center Pivot Methods”. *Theoretical and Applied Genetics*, 55, 199–204.

KÖNYVSZEMLE

Oláh Vera – Fried Katalin szerkesztők *Válogatás az Érintő első 7 évéből*

2016-ban Simon Péter (az ELTE TTK Matematikai Intézetének igazgatója és a Bolyai János Matematikai Társulat főtítkára), valamint Stipsicz András akadémikus (2019 óta a Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet igazgatója) arra az elhatározásra jutottak, hogy elindítanak egy matematikai ismeretterjesztéssel foglalkozó online újságot. A vállalkozásukat az motiválhatta, hogy a nagyközönséget megcélzó, ilyen profillal rendelkező újság addig nem létezett. A nagy múltú *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* főleg a középiskolai diáksághoz szól, a *Matematikai Lapok* pedig – amelyet szintén a Bolyai János Matematikai Társulat ad ki – inkább a kutató matematikusok érdeklődésére tarthat számot. A tudományos ismeretterjesztő folyóiratok, mint az *Élet és Tudomány*, a *Magyar Tudomány* vagy a *Természet Világa* ambíciójuk szerint a tudományok teljes spektrumával foglalkoznak, és így matematikai témájú cikkeket csak ritkábban közölnek – bár Staar Gyula főszerkesztősége alatt a *Természet Világa* számos magas színvonalú matematikai tárgyú cikket publikált, és Herczeg János az *Élet és Tudomány* főszerkesztőjeként rendszeresen közölt matematikai feladatokat a „Gondolkodás iskolája” rovatban.

Simon Péter és Stipsicz András megnyerték az ügynek Oláh Verát, a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* korábbi főszerkesztőjét és Besenyei Ádámot, az ELTE docensét. Oláh Vera a folyóirat felelős szerkesztője lett, Besenyei Ádám pedig a harmadik főszerkesztő. Több hónapos előkészület után, 2016 szeptemberében megjelent az *Érintő* első száma.

Talán maguk az alapítók is meglepődtek a vállalkozásuk sikerén. Már a legelső szám rendkívül gazdagra sikerült. A szám Simon Péternek az *Érintő* célkitűzéseit vázoló bevezetésével, illetve a rovatok ismertetésével kezdődik. A „Hírek” rovatban szerepel például az Európai Matematikai Társulat 2016. évi díja, amelyet Varjú Péter nyert el (aki egyébként később elnyerte a Whitehead-díjat is, és jelenleg a University of Cambridge professzora). Az első szám „Tudomány” rovatában találjuk többek között Stipsicz András érdekes cikkét a négydimenziós egzotikus euklideszi terekről, és Szabó Péter Gábor írását a Bolyai-recepció történetéről Japánban, amiből azt is megtudhatjuk, hogy Budapesten később jelent meg Bolyai műve, az *Appendix. A tér abszolút igaz tudománya* magyarul, mint Tokióban angolul. A szám tartalmaz továbbá Erdős Pálról szóló visszaemlékezéseket, könyvismertetéseket, és még számos más matematikai érdekességet.

Az elmúlt években az *Érintő* megtartotta az első számban elért magas színvonalat, és semmit sem veszített a kezdeti lendületéből. Eddig több mint 200 szerző

publikált az *Érintő*ben, és a rovatok száma is megnőtt. Az új rovatok között feltétlenül megemlítendő a „Héttusa” néven futó feladatrovat. Ezt Róka Sándor szerkeszti, aki a matematikai szórakoztató és versenyfeladatok talán legnagyobb szakértője ma Magyarországon. Az általa kitűzött feladatok mindenki számára érthetők és érdekesek. Nehézségi fokukat tekintve pedig mindig vannak közöttük könnyen megoldhatók, de olyanok is, amelyek komoly kihívást jelentenek.

2023-ban felmerült az igény, hogy az *Érintő*ben publikált mintegy 600 cikkből egy válogatás nyomtatott formában is megjelenjen. Így született meg a *Válogatás az Érintő első 7 évéből* című könyv a Bolyai János Matematikai Társulat kiadásában. A kötet néhány bevezető írás után 14 cikket tartalmaz. A könyv összeállítói igyekeztek minél változatosabb témákat kiválasztani. Így a cikkek között megtalálhatjuk a zeneelmélet matematikai alapjait (Székely Péter), a Gödel nemteljességi tételeiről szóló könyv gondolatébresztő ismertetését (Molnár Zoltán Gábor), a járványok terjedésének matematikáját (Knípl Diána), interjút a kvantum-információelmélet magyar szakértőjével (Oláh Vera), a bitcoin matematikai hátterét (Sebestyén Géza), és számos más matematikai érdekesség mellett találhatunk közöttük egy igazi kultúrtörténeti csemegét is. Ferenci Tamás cikkéből megtudjuk, hogy József Attila és Pákozdy Ferenc 1934-ben levelet írtak Beke Manónak, amelyben egy cikloisokról szóló kérdést vetettek fel. A cikk nemcsak a kérdés matematikai hátterét ismerteti, de József Attilának a matematika iránti érdeklődését, sőt, matematikai tehetségét is részletesen tárgyalja, és nagyon sok érdekes információt tartalmaz; azt is megtudhatjuk például, hogy József Attila több éven át ugyanabban a házban lakott, mint Arany Dániel, a *Középiskolai Matematikai Lapok* megalapítója.

Jó szívvel ajánlom az olvasóknak, hogy böngésszék a kiadványt, amely ingyenesen letölthető a Bolyai János Matematikai Társulat honlapjáról vagy az Interkönyv webáruház oldaláról. És olvassák az *Érintőt*, amelynek összes eddigi száma megtalálható a világhálón is.

✱

Oláh Vera – Fried Katalin, szerk. (2023). *Válogatás az Érintő első 7 évéből*. Budapest: Bolyai János Matematikai Társulat, 167 o.

Laczkovich Miklós

a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja
professor emeritus

András Némethi *Normal Surface Singularities*

A szingularitások a matematika és más tudományágak különböző területeinek fontos szereplői. A szingularitáselmélet olyan tereket vizsgál, amelyek szinte mindenhol lokálisan euklideszi tereként viselkednek (úgynevezett sokaságok), kivéve bizonyos strukturálisan rossz pontokban, amelyeket szingularitásoknak nevezünk. A szingularitás lényege, hogy eltér a generikustól, az általánostól, katasztrófhelyzetet teremtve maga körül.

Történelmileg a szingularitások a 17. században jelentek meg az algebrai görbék tanulmányozásánál. Már Isaac Newton észrevette, hogy két görbe metszéspontjainak megszámlálásához bizonyos speciális pontokat többszörösen kell számolni. Ezután rövid időn belül megfogalmazódott a szinguláris pontok értelmezése magasabb dimenziós algebrai sokaságokra is.

A komplex algebrai felületek elmélete és osztályozása már jóval bonyolultabbnak bizonyult az algebrai görbékénél. A sima algebrai felületeknek a Federico Enriques vezette olasz iskola által készített klasszikus osztályozása az 1880-as években kezdődött. Majd az 1960-as években Kunihiko Kodaira japán matematikusnak sikerült egy modern osztályozást teremtenie, amely már az algebrai geometria és topológia új eszközeit használja. Kodaira elmélete kiemelt figyelmet szentel a felület komplex geometriai struktúrájának és a valós értelemben tekintett sima négydimenziós sokaság struktúrájának kapcsolatára. Később Simon Donaldson munkája és a négydimenziós Seiberg–Witten-elmélet adott erős hátszelet ennek az összehasonlítási folyamatnak.

Ugyanebben az időben elkezdődik a komplex szinguláris felületek vizsgálata, amely maga után vonja egy lokális szingularitásra vonatkozó elmélet, a felületszingularitások elméletének megszületését. Ez az elmélet rengeteg érdekes és nehéz kérdésre keresi a választ a geometriai és a topológiai struktúrák szoros kapcsolatának árnyékában. Az egyik legfontosabb módszere a szingularitásokhoz rendelt geometriai és topológiai invariánsokban rejlik, amelyek a megfelelő struktúra különböző tulajdonságait kódolják. A felületszingularitások elmélete rendkívüli fejlődésen ment keresztül az 1970-es évektől. Létrejött egy kölcsönös kapcsolat az alacsony dimenziós topológiával, amely számos kulcsfontosságú eredményt és kutatási programot eredményezett. Különböző monográfiák születtek a témával kapcsolatban, de hiányzott egy olyan kötet, amely az előbb említett kapcsolatra fókuszál.

Ezt a hiányt pótolja Némethi András *Normal Surface Singularities* című monográfiája. Ki lenne képes gondosan és precízen összefoglalni az utóbbi évtizedek felületszingularitásokra vonatkozó geometriai és topológiai elméletének kutatásait? – tették fel valószínűleg a kérdést a Springer Kiadó *Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete. 3. Folge* sorozatának szerkesztői, akik hamar Némethi felkérése mellett döntöttek, hiszen a kutatásokban ő maga is oroszlánrészt vállalt.

A könyv nagy része olyan eredményeket mutat be, amelyek egy jól meghatározott program keretébe tartoznak. Olyan eredményeket tekintünk a program részének, amelyek különböző geometriai struktúrákat, invariánsokat jellemeznek topológiai invariánsokkal. A program alapját Michael Artin amerikai matematikus fektette le az 1960-as években, jellemezve az úgynevezett racionális felületszingularitásokat (olyan felületszingularitások, amelyek az egyik legfontosabb geometriai invariáns, a geometriai génusz szempontjából a legegyszerűbbek). Ezt a jellemzést Henry Laufer az 1970-es évek derekán átdolgozta, majd kiterjesztette az úgynevezett minimális elliptikus (a legegyszerűbb, nem racionális) szingularitások szintjére. Itt Laufer azt az észrevételt fogalmazta meg, hogy bonyolultabb típusok esetén a program folytatása nem lehetséges.

Húsz évvel később Némethi egy új ötletet fogalmazott meg, amelynek alapján egy extra topológiai feltétel lehetővé teszi a program folytatását, és ezen feltétel mellett befejezte az elliptikus szingularitások geometriai génuszának topológiai leírását. Ez az eredmény új kutatási irányok felé vezető kapukat nyitott meg, majd – ahogy maga a szerző is fogalmaz – „a program lépésről lépésre különböző módszerek és konstrukciók széles gyűjteményévé nőtte ki magát, amelyek még általánosabb és átfogóbb projektek létrehozásának alapját képezik a geometriai-topológiai összehasonlítások tekintetében”. A fentiek alapján joggal nevezhetjük ezt a (a könyvben egyébként Artin–Laufer névvel ellátott) programot az Artin–Laufer–Némethi-programnak.

Napjaink kutatási irányzatainak szempontjából az Artin–Laufer–Némethi-program legfontosabb projektje a rácspont kohomológia elmélet. Az elmélet alapjait maga a könyv szerzője fektette le 2005 és 2010 között, majd kollégáival és diákjaival rengeteg eredményt publikáltak, kiemelve az elmélet központi szerepét a felületszingularitások geometriájának és topológiájának kapcsolatában. A rácspont kohomológia a szingularitáselméleti analógja az alacsony dimenziós topológiában közismert és népszerű Heegaard–Floer-homológia elméletének, amelyet szintén magyar matematikusok vezettek be, Szabó Zoltán és Ozsváth Péter személyében. A két elmélet ekvivalenciájának problémáját Némethi-sejtésnek nevezzük. Az utóbbi két évtizedben rengeteg sajátos esetben igazolódott az ekvivalencia, viszont teljes általánosságban csak 2021-ben bizonyította be a sejtést Ian Zemke.

Mindenképpen érdemes megemlítenünk a bevezető részt, amely vitathatatlan érvekkel támasztja alá a monográfia ötletének és születésének értelmét, majd a fejezetekhez írt rövid és tartalmas összefoglalók segítenek eligazodni az olvasónak a terjedelmes mű különböző részeiben.

Ahogy azt a kötet is bizonyítja, a felületszingularitások elmélete, valamint az Artin–Laufer–Némethi-program megérett egy ilyen szintű összefoglalásra, amely a megjelenése óta eltelt két év alatt célközönségének, a szingularitáselméletet vagy annak szerteágazó módszereit érintő témák kutatóinak és az ezen a területen dolgozó doktorandusz hallgatóknak egyaránt nagyon hasznos forrásává, alpművévé vált. Ennek okán a különböző országok fiatal kutatói, doktoranduszai körében a felületszingularitások bibliája nevet érdemelte ki. Mindent összevetve kijelenthetjük, hogy

a kötet, Némethi András közel tízéves tudományőrző munkásságának eredménye, rövid időn belül nemcsak a nemzetközi és a magyar matematika, hanem az egész magyar tudomány egyik ékköve lett.

✱

Némethi, András (2022). *Normal Surface Singularities*. Ergebnisse der Mathematik und ihrer Grenzgebiete. 3. Folge / A Series of Modern Surveys in Mathematics. Springer, 722 o.

László Tamás

egyetemi docens
Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

Balázs Bárány – Károly Simon – Boris Solomyak *Self-similar and Self-affine Sets and Measures*

A fraktál szó a latin 'fractus'-ból származik, amely magyarul: töredezett. Benoît Mandelbrot nevéhez fűződik az elnevezés az 1970-es évekből, amelyet nagy általánosságban különböző skálákon tekintve, önmagukra egyfajta hasonlóságot mutató alakzatok jellemzésére használunk. A természetben számos példa mutatja ezt a tulajdonságot, gondolhatunk itt egy fa lombkoronájára, a tüdő szerkezetére, egy hópehely alakjára vagy éppen a pagodakarfiol külsejére. Bernard Bolzano és Karl Weierstrass sehol sem differenciálható függvényei, illetve Giuseppe Peano térkitöltő görbéje a 19. századból voltak az első példák fraktálokra a matematikában. Ezekre a konstrukciókra azonban sokáig szörnyként tekintett a matematikustársadalom, mígnem a 20. század második felében, elsősorban kaotikus dinamikai rendszerek tanulmányozása során fény derült arra, hogy fraktálok természetes módon jelentkeznek. Ettől fogva kezdődött a fraktálok szisztematikus tanulmányozása, amelynek hatására a fraktálgeometria mára már a matematika külön területévé nőtte ki magát. Alkalmazásai messzemenően túlmutatnak a klasszikus analízisbeli gyökerein. A matematikán belül kapcsolódik például dinamikai rendszerekhez, számelmülethez, valószínűségszámításhoz, de a statisztikus fizikához is, sőt, gyakorlati jelentőséggel is bír a hálózatemlethez, folyadékok keveredésénél vagy éppen képfeldolgozásban. Bárány Balázs, Simon Károly és Solomyak Boris könyve ennek a szerteágazó tudományterületnek egy specifikus aspektusára koncentrálnak, nevezetesen az iterált függvényrendszerekre.

Nagy felismerés volt, hogy az iterálás meglepően egyszerű módszerével könnyen lehet hihetetlen részletes és változatos alakzatokat létrehozni tetszőlegesen széles skálákon. Ezek az iterált függvényrendszerek szolgálnak alapvető modellként fraktálok egy nagyon széles osztályának a szisztematikus tanulmányozásához. Egy iterált függvényrendszer összehúzó leképezéseknek egy kollektója, amelyhez tartozik egy egyértelmű nem üres kompakt halmaz. Ez maga a fraktál vagy ebben a kontextusban attraktornak is nevezik, amelynek az a tulajdonsága, hogy megegyezik a leképezések általi képeinek az uniójával. Ez a tulajdonság biztosítja az önmagára való hasonlóságot, ahogy ránagyítunk. A leképezések típusától függ, hogy a nagyítás során mennyire torzul el a kép. A legegyszerűbb esetben, amikor a leképezések hasonlóságok, nincsen semmilyen torzulás. Ezek az úgynevezett önhasonló rendszerek, míg ha az összehúzás mértéke változhat különböző irányokban, de a leképezések továbbra is lineárisak, akkor önaffin rendszerről beszélhetünk. A könyv, ahogyan a címe is erre utal, pontosan ezzel a két osztállyal foglalkozik nagy részletességgel. Bármely felmerülő kérdést először ezeken az osztályokon szokás megvizsgálni. Látszólagos egyszerűségük ellenére mind a mai napig alapvető kérdések sincsenek teljeskörűen megválaszolva.

Kiváló szemléltető példa erre a dimenzióesésről szóló sejtés, amely részben Simon Károly nevéhez fűződik. Ennek lényege, hogy van egy természetes felső becslés egy

önhasonló halmaz dimenziójára, ami a sejtés szerint a számegegyenesen csak akkor nem egyenlő a halmaz dimenziójával, ha úgynevezett egzakt átfedések vannak jelen. Erre az ártalmatlannak tűnő kérdésre azóta sincs pontos válasz. Különösen az elmúlt két évtizedben rengeteg esetben bizonyították be a sejtés igazságát, ezen eredmények nagy többsége a legrangosabb matematikai folyóiratokban jelent meg, de még nincs kizárva, hogy legyen ellenpélda.

A könyv természetes módon két részre bontható. Az első foglalkozik részletesen önhasonló halmazokkal és rajtuk értelmezett mértékekkel. A szükséges bevezető után kimerítően tárgyalásra kerülnek átfedő rendszerek is, amelyek a sejtés kihívásokkal teli részét adják. Egy sokat vizsgált speciális átfedő rendszert adnak a Bernoulli-konvolúciók, amelyekről Erdős Pál is bizonyított egy fontos tételt, de jelenleg is aktív kutatási terület. A könyv második nagy egysége pedig önaffin rendszerekkel foglalkozik, és erősen támaszkodik az ergodelmélet különböző módszereire. Az önaffin rendszerek dimenziójának meghatározásában vitathatatlan érdemei vannak Bárány Balázsnak is. Ezen rendszerek tanulmányozása szükségszerűen nehezebb, mint az önhasonlóké, itt még több a nyitott kérdés. A könyvnek ezen része is kiváló áttekintést nyújt a terület jelenlegi állásáról.

A könyv tematikájának aktualitását jól mutatja, hogy az American Mathematical Society által gondozott, nagy múltú monográfiasorozatban jelenhetett meg. Mindhárom szerző a terület nemzetközileg elismert szakembere. Mivel a téma jelenleg is aktív és gyorsan fejlődő kutatási terület, ezért inkább egy alapos pillanatfelvételt ad, amely szükségszerűen nem tud minden részletre kitérni. Néhány fontos aspektust tekintve e könyv különbözik más fraktálgeometriával foglalkozó átfogó műtől. Először is ez az első könyv, amely kizárólag önhasonló és önaffin rendszerekkel foglalkozik. Ez különösen fontos, figyelembe véve, hogy ezek a legtöbbet vizsgált iterált függvény-rendszerek. Emiatt sokkal mélyebb részletekbe is belebocsátkoznak a szerzők. Mind ezt úgy, hogy sokszor speciális eseteken keresztül mutatják be egy összetett módszer esszenciáját anélkül, hogy az olvasó elveszne a technikai részletekben. További érték, hogy ezek a módszerek egyetlen helyen elérhetők, és nem szükséges különböző cikkeknek utánajárni gyakran eltérő jelölésekkel. Ez lehetőséget teremt szisztematikusan beletanulni a legmodernebb érvelésekbe. A könyv célközönsége elsősorban a fraktálgeometria iránt érdeklődő matematikus kutatók és hallgatók, akik minden bizonnyal nagy érdeklődéssel fogják forgatni e monográfiát.

★

Bárány, Balázs – Simon, Károly – Solomyak, Boris (2023). *Se,f-similar and Se,f-affine Sets and Measures*. Mathematical Surveys and Monographs, vol. 276. Providence, RI: American Mathematical Society, 451 o.

Kolossváry István

Marie Skłodowska-Curie posztdoktori ösztöndíjas, tudományos munkatárs
HUN-REN Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézet

Hay Diana – Palasik Mária – Schadt Mária szerkesztők
Nők a tudomány fellelgyárában
Kutatói életutak a Magyar Tudományos Akadémián 1949–2021

A tudománytörténet nagy adósságát törleszti a Hay Diana (az MTA KIK Akadémiai Levéltár igazgatója), Palasik Mária (Jean Monnet-professzor, az Állambiztonsági Szolgálatok Történeti Levéltárának nyugalmazott osztályvezetője) és Schadt Mária (a Pécsi Tudományegyetem címzetes egyetemi tanára) szerkesztésében többéves munkával és majd' kilencven szerző részvételével készült nagyszabású összefoglaló mű, amely a *Nők a tudomány fellelgyárában – Kutatói életutak a Magyar Tudományos Akadémián 1949–2021* címmel 2024-ben jelent meg az Akadémiai Kiadó gondozásában. A frappáns cím – amelyet a téma ismert szakértője, Acsády Judit egyik úttörő tanulmányának a címéből (Acsády Judit [2010]. „Nők a magyar tudomány fellelgyárában. Statisztikai áttekintés és narratív elemzés karrieréről”. *Magyar Tudomány*, 171/11, 1390.) kölcsönöztek a szerkesztők – pontosan fejezi ki a kötet célját: az első női akadémikus megválasztása óta akadémikussá lett női tudósok, illetve a „nagydoktori” minősítés bevezetése óta e legmagasabb tudományos címet megszerző női kutatók életútjának bemutatását.

A tudósportrékat négy tanulmány vezeti fel, bemutatva a történeti és intézményi hátteret, a női tudományművelés alakulását, illetve a jelenlegi helyzetet, rendre adatokkal és statisztikákkal megtámogatva. Pukánszky Béla „»Titkos ellenségek közt éli életét« – Nők a felsőoktatásban” című írásában a női művelődés küzdelmes történetét, a középiskolai oktatásban való részvétel lehetőségeinek alakulásától és az egyetemek nők előtti megnyitásától a teljes egyenjogúságig tekinti át. Hugonnai Vilma a női hallgatók előtt tornyosuló nehézségek leküzdésének ikonikus úttörőjeként jelenik meg, akit ugyan Zürichben 1879-ben „orvostudorrá” avattak, ám csak tizenhét éven át tartó kálváriája után – amelynek során nemcsak a magyar érettségit kellett letennie, de orvosgyakorlati szigorlatokat is előírtak számára – 1897-ben, 50 évesen kapta meg magyar orvosi diplomáját. Az egyetemi képzéshez való korlátozott hozzáférésük után végül az 1946-os XXII. törvénycikkkel nyílt meg minden egyetem kapuja a nők előtt.

Kozári Monika „A tudományos minősítés Magyarországon a második világháború és a rendszerváltás között. A minősítési rendszer átalakítása az 1940-es évektől kezdődően” című nagyívű tanulmányában követi nyomon a tudományos minősítés magyarországi – férfiakat és nőket egyaránt érintő – történetének alakulását, beleértve az előrevivő fordulatokat éppúgy, mint a megtorpanásokat és a zsákutcákat. Mint az írásból megtudjuk, előbb az 1848-ban felállított Magyar Tudományos Tanács kapta feladatul a tudományos kutatók új képzési rendszerének központi írá-

nyítását, amelyet a következő évben az Akadémia Hivatala vett át. 1950-ben szovjet mintára vezették be a tudományok kandidátusa fokozatot, amelyet – szintén szovjet mintára és elsősorban a saját káderek támogatására – hároméves aspirantúra keretében is meg lehetett szerezni. A tudományok doktora fokozat 1951-es bevezetésével azután felállították a Tudományos Minősítő Bizottságot (TMB), mely a pártközponttal szorosan együttműködve ideológiailag is szűrte az aspirantúrára jelentkezőket éppúgy, mint a nagydoktori eljárásban részt vevőket. A tudományok doktora fokozat odaítélésére fokozottan odafigyeltek, hiszen a nagydoktorokból kerültek ki a levelező és rendes tagok, akiknek többnyire politikailag megbízható kádereknek kellett lenniük. Az 1983-ban bekövetkezett változásokat – amikor háromfokozatúvá vált a minősítés rendszere (dr. univ., kandidátus, tudományok doktora) – tíz évvel később újabb átalakítások követték, amikor is megszűnt a tudományok kandidátusa fokozat, s helyére az immár az egyetemekhez rendelt PhD-fokozat került, miközben a TMB feladatait az Akadémia Doktori Tanácsa vette át. Ezzel egyetlen tudományos fokozat lett Magyarországon, a PhD, amely fölé az MTA doktora tudományos cím került. Akadémikusok pedig csak az MTA doktori/tudomány(ok) doktori közül voltak választhatók. A 2000-res években egyre tágabb teret kapott a tudományos nyilvánosság kérdése, amelynek jegyében mind a publikációk, mind az MTA doktori eljárás részletei hozzáférhetővé váltak.

Hay Diana „Az akadémiai tagjelölések és tagválasztások rendje” című tanulmányában az alapítástól napjainkig tekinti át az akadémikussá válás folyamatait. „A honni nyelv kimívelésére felállítandó Tudós Társaságról, vagyis a Magyar Academiáról” rendelkező, 1827. évi 11. törvénycikk kihirdetésétől 122 évnek kellett elteltie, amire az első női akadémikust, a történész Andics Erzsébetet a tagjai közé választotta az MTA: 1949-ben levelező tagként, egy évre rá pedig már rendes tagként vette fel soraiba – igaz, elsősorban politikai okokból. Őt követte az 1961-ben szintén politikai okokból beválasztott Radnót Magda orvos, majd 1967-ben a biokémikus Szabolcsi Gertrúd. 1973-ban már négy nőt választottak be egyszerre, köztük a sokadik jelölés után Péter Rózsa matematikust. A rendszerváltásig további öt női tagja lett az Akadémiának (Szikra Katalin, Ancsel Éva, T. Sós Vera, Ormos Mária, Heller Ágnes). Tanulmánya végén Hay Diana a releváns adatokat összegző táblázatban sorolja fel az 1949 és 2019 között megválasztott női akadémikusokat, mutatva a jelölések évét is, illetve megemlítve azokat is, akiket jelöléseik ellenére nem választottak meg.

Schadt Mária, Palasik Mária, Hay Diana és Pótó Zsuzsanna jegyzik a „Nők a kutatói életpályán” című impozáns tanulmányt, amely történelmi dokumentumok, tudományos adatok és a tudományos szakirodalom feldolgozása alapján veszi sorra a tudományos pályán való boldogulás formáit és a szakmai előrejutás nők előtt álló nehézségeit, a jelent a korábbi történelmi korokból, elsősorban a kommunizmus évtizedeiben tapasztalható megtorpanásokból és előrelépésekből levezetve. A szerzők többek között arra a kérdésre keresik a választ, hogy mi magyarázza azt, hogy míg „a nők nagyobb arányban rendelkeznek felsőfokú diplomával, [...] a férfiaknál lényeg-

gesen kevesebben képesek tudományos karriert építeni” (77), s folyamatosan alulreprezentáltak „a tudomány igazi, magas presztízsű pozícióiban” (79). A nők számára miért működik olyan erőteljesen az úgynevezett szívárgó vezeték szindróma, vagyis miért van az, hogy míg a PhD-képzésben még nagyjából azonos létszámban vesznek részt nők, addig egyre kevesebb nő szerez PhD-fokozatot, még kevesebb MTA doktora címet, akadémiai tagságig pedig miért csak alig jut el női tudós? A negyvenoldalas, szerteágazó kérdéseket összekapcsoló, szintetizáló tanulmány konklúzióját röviden összefoglalva elmondható, hogy a szerzők elsősorban a magyarországi tradicionális értékrendszer továbbélésében találják a magyarázatot arra, hogy a diplomás nők karrierépítése jóval lassúbb a férfiakénál. Bár szerepet játszhat a gazdasági-társadalmi átalakulás lassúsága és a nők oktatásba való bekapcsolásának megkésettisége is, minden bizonnyal a máig „érvényes kulturális értékek és normák, a nemekkel szemben megfogalmazott szerepelvárások” (80) tekinthetők a legfőbb oknak. A női kutatók számának a 2010-es években tapasztalt sajnálatos megtorpanását és a 2016-os akadémikusválasztás ismert fiaskóját (amikor is nem választottak be egyetlen női levelező tagot sem) követően pozitív trendek is megjelentek. Ezek között a szerzők elismeréssel szólnak az MTA-nak az elmúlt években a női nagydoktorok és akadémikusok számának növelése érdekében kifejtett számos erőfeszítéséről, a nők számára kidolgozott esélyteremtő keretprogramokról, a jelölések és a választások során a nőket láthatóbbá tevő folyamatokról, valamint az ügyet felkaroló Nők a Kutatói Életpályán Elnöki Bizottság tevékenységéről.

A fenti tág perspektívájú alapozó tanulmányokat a kötet érdemi részét kitevő „Doktorok és akadémikusok az Akadémián – Életutak” című, több mint ezeroldalas portrészorozat követi. Összesen 191 tudós portréját olvashatjuk, melyekben a szerzők a családi háttér és a személyes életút részletei mellett részletesen bemutatják a szakmai eredményeket, a pálya mérföldköveit jelentő felfedezéseket vagy műveket, nem elhallgatva ugyanakkor a nehézségeket és az esetleges megtorpanásokat sem. A szerkesztők fáradhatatlan kutatómunkája, kitartó levéltári és nemegyszer a családtagokat és a személyes ismerősöket is bevonó nyomozói tevékenysége eredményeként képet kapunk a 2021 decembere előtt eltávozott összes női akadémikus és összes női nagydoktor munkásságáról. A pályaképek szerzői között találhatók az egykori közvetlen kollégák és tanítványok éppúgy, mint a távolabbi nézőpontból kiinduló pályatársak és tisztelők, valamint tudománytörténészek. A két vaskos kötetben összegyűjtött, páratlanul gazdag tudománytörténeti anyagban való eligazodást a pályaképek átlátható elrendezése könnyíti meg: a doktorok és akadémikusok kapcsolódó tudományos osztályaik szerint, az osztályokon belül pedig diszciplínáik szerint sorakoznak.

A Hay Diana, Palasik Mária és Schadt Mária nevével fémjelzett nagyszabású vállalkozás az MTA Nők a Kutatói Életpályán Elnöki Bizottság kezdeményezésére az MTA200 Bizottság égisze alatt jelent meg, a Nők a Kutatói Életpályán Elnöki Bizottság által az elmúlt években kiadott két angol nyelvű kötet (Réka M. Cristian – Anna Kérchy, szerk. [2022–2023]. *Pioneer Hungarian Women in Science*

and Education, I–II. Budapest: Akadémiai Kiadó) elindított sorozat harmadik kiadványaként.

✱

Hay Diana – Palasik Mária – Schadt Mária, szerk. (2024). *Nők a tudomány fellegvárában – Kutatói életutak a Magyar Tudományos Akadémián 1949–2021*, 1–2. kötet. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1206 o.

Bollobás Enikő

az MTA levelező tagja, professor emeritus
Eötvös Loránd Tudományegyetem