

fizikai szemle



Földrengések
fizikusszemmel

A spinechó
az iskolában

Lítiumion-akkumulátorok
hazai gyártása

Emlékezés
Boschán Péterre

2023/10

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:
Asbóth János, Bíró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Trócsányi Zoltán, Takács Gábor, Szabó Gábor, Ujvári Sándor

Tervezőszerkesztő:
Horváth Imre

A folyóirat e-mail címe:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük

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

A folyóirat honlapja:
<http://www.fizikaiszemle.hu>



Címlap:

Tájkép a 2016. novemberi, új-zélandi (Kaikoura) M7,8 földrengés után néhány nappal (Németh Károly felvétele)

TARTALOM

Dr. Kovács István János:

Földrengések fizikai szemüvegen keresztül: vagy ami a hírekből kimarad 333
Az idei év tragikus eseményei Törökországban, majd Marokkóban ráirányították a közvélemény figyelmét a földrengésekre. Ebben a tematikus blokkban a földrengésekkel kapcsolatos fizikai kérdéseket tekintjük át. Lehet-e a földrengéseket előrejelezni? Milyen nyomai és következményei lehetnek a földrengéseknek? Hogyan lehet a földrengésekkel kapcsolatos folyamatokat egyszerű rendszereken modellezni?

Szakács Sándor, Kovács István János:

A földrengések prekursoralapú előrejelzése: vágyálom vagy valós lehetőség? 334

Barta Veronika, Berényi Kitti, Buzás Attila, Kiszely Márta, Szabóné André Karolina, Szárnya Csilla: Földrengések nyomai a felsőlégkörben? 338

Berkési Márta, Sprámitz Tamás, Hencz Mátyás, Békési Eszter, Porkoláb Kristóf: A földrengések szerepe a CO₂-gazdag fluidumok szállításában 343

Németh Károly: Okozhatnak-e vulkánkitöréseket a földrengések? 346

Antal Dávid, Gergely Attila, Néda Zoltán: Földrengésmoделl a futószalagon 353

REFLEKTORFÉNYBEN

Péter László: A lítiumion-akkumulátorok hazai gyártásáról – kutatói szemszögből 357
A lítiumion-akkumulátorok feltalálását, elterjedését és szerepét tárgyalja a cikk, kitérve a társadalmi reakciókra a gyártás és felhasználás veszélyeivel kapcsolatban.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Kucsera Robin, Simon Ferenc: A folyamatok megfordíthatatlansága és a spinechó 361
Cikkben az NMR-spinechó fontos és igen érdekes jelenségét járják körül, egyben megmutatják, hogy segítségével a Loschmidt-echo akár egymás után több ezerszer is újra létrehozható.

Hasznosi Tamásné: A jó pap holtig tanul, avagy rövid élménybeszámoló az MNT tanári továbbképzéséről 365

EMLÉKEZÉS BOSCHÁN PÉTERRE

Gelencsér Jenő, Gnädig Péter, Fái György, Tél Tamás, Szapudi István: Emlékek fizikushallgatói generációkat tudományra lelkesítő barátunkról (Patkós András összeállítása) 366

TÁRSULATI DÍJAK

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2023. évi díjazottjai Hátsó, belső borító

J. Kovács István Dr.: Earthquakes through a physical lens: or what's missing from the news. Preface

S. Szakács, J. Kovács István: Precursor-based prediction of earthquakes: wishful thinking or a real possibility?

V. Barta, K. Berényi, A. Buzás, M. Kiszely, K. Szabóné André, Cs. Szárnya: Traces of earthquakes in the upper atmosphere?

M. Berkési, T. Sprámitz, M. Hencz, E. Békési, K. Porkoláb: The role of earthquakes in the transport of CO₂-rich fluids

K. Németh: Can earthquakes cause volcanic eruptions?

D. Antal, A. Gergely, Z. Néda: Earthquake model on the assembly line

L. Péter: On the domestic production of lithium-ion batteries – from a researcher's perspective

R. Kucsera, F. Simon: Irreversibility of processes and spin echo

T. Hasznosi: A good priest learns until death, or a short report on MNT teacher training

J. Gelencsér, P. Gnädig, Gy. Fái, T. Tél, I. Szapudi, A. Patkós: Memories of our friend who inspired generations of physics students to science

The 2023 winners of the Eötvös Loránd Physical Society

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA



FÖLDRENGÉSEK FIZIKAI SZEMÜVEGEN KERESZTÜL: VAGY AMI A HÍREKBŐL KIMARAD



Előszó

A jelen Fizikai Szemle tematikus különszám ötlete lényegében a tragikus és pusztító, több tízezer életet követelő 2023. február eleji törökországi földrengések követően született meg. A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet kollektívája által kezdeményezett „Aktuális földfizika 3. Földfizikai tények és talányok” (<https://www.youtube.com/watch?v=nPNxXGNOVAc>) internetes interaktív műsor kapcsán keresett meg Iglói Ferenc főszerkesztő úr, hogy az ott elhangzottakat érdemes lenne egy tematikus különszám keretei között is közérthetően összefoglalni. A felkérés nagyon megtisztelő volt, már csak azért is, mert olyan témákat mutatunk be, amelyek általában nem szerepelnek a földrengésekről szóló általános tudósításokban. Sőt, célunk éppen az volt, hogy pontosan ilyen típusú témákat mutassunk be, mint például a földrengés-prekursorok, a földrengések légköri „előjelei”, a litoszféra fluidumai és a földrengések közötti kapcsolatok, a földrengések és a vulkanizmus kapcsolata, valamint a földrengések fizikai modellezése. A jelen különszámmal szeretnénk, ha az olvasók magyar nyelven tudnának tájékozódni a szakterület legfontosabb aktuális fejleményeiről a tudomány mai állása szintjén. Rá szeretnénk világítani arra, hogy a földrengéseket megelőző prekursorok azonosítása az adott rengéscsúcsok és mechanizmusok esetében egyáltalán nem tűnik lehetetlen küldetésnek közép- és hosszabb távon a különböző szakterületek közötti széleskörű együttműködéssel és nemzetközi összefogással (**Szakács és Kovács**). Bemutatjuk azt is, hogy az ionoszférában jelentkező, földrengéseket megelőző anomáliák hogyan alakulnak ki a radon gáz felszín közelében mérhető feláramlásának közvetítésével, és milyen ok-okozati összefüggések vannak a Föld-belseji rengéscsúcsok, az atmoszféra és az ionoszféra között a földrengéseket megelőzően, közben és utánuk (**Barta és mtsai**). Beszámolunk arról is, hogy a rideg kőzetburokban, a litoszférában áramló széndioxid-gazdag fluidumok mennyire jelentős szerepet játszanak bolygónk lemeztektonikai folyamataiban és a földrengések kialakulásában (**Berkési és mtsai**). Fontos az is, hogy ezek a fluidumok ugyanakkor hordozó közegei a radonnak, így ezek paramétereinek mérhető változásai potencióális prekursorokként követhetők és kimutathatók bizonyos földrengések esetében megfelelő érzékenységgel szerzőkkel ellátott műszerek segítségével. A különszámban egy részletes, globális példákat felsorakoztató tanulmány keretein belül rávilágítunk arra is, hogy a nagyobb földrengések milyen összefüggésben vannak a vulkáni tevékenységgel, különös tekintettel arra, hogy a földrengések hogyan hatnak a különböző típusú magmák által táplált, kitörésre képes vulkánok magmatározó-rendszerére (**Németh**). A különszámban bemutatjuk azt is, **Antal és mtsai** tanulmánya alapján, hogy viszonylag egyszerű fizikai kísérletek hogyan lehetnek alkalmasak arra, hogy a földrengések erősségére és az utórengek jellemzőire vonatkozó összefüggéseket megértsük és rekonstruáljuk. Az eddig elért kutatási eredmények jó reménnyel kecsegtetnek, hogy a jövőben az eddigieknél pontosabb modelleket tudjunk létrehozni a földrengések okainak, mechanizmusainak és a külső geoszférákra való hatásuk megértése érdekében.

Köszönjük a szerzők mellett Győri Erzsébetnek, Süle Bálintnak és Szabó Csabának a különszámban nyújtott alapos lektori tevékenységüket.

Reméljük, hogy e különszám segítségével az olvasó széles körű betekintést nyerhet a földrengések kevésbé ismert színfalai mögé, és joggal bizakodhat, hogy a rengéseket megelőző földtani jelenségek kimutatása terén is áttörést érhetünk el a belátható jövőben.

2023. augusztus 25., Monor

Tisztelettel

Dr. Kovács István János

vendégszerkesztő

A FÖLDRENGÉSEK PREKURZORALAPÚ ELŐREJELZÉSE: VÁGYÁLOM VAGY VALÓS LEHETŐSÉG?

Szakács Sándor¹, Kovács István János²

¹ Geodinamikai Intézet, Román Akadémia, Bukarest, Románia

² HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron és MTA FI Lendület Pannon LitH₂Oscope kutatócsoport

Bevezető

Valahányszor erős, esetenként anyagi károkat vagy éppen emberáldozatokat is okozó földrengésről ad híreket a média, és a jelenséggel foglalkozó szakemberek a riporterek kereszttüzebe kerülnek, változatlanul feltevődik a földrengések előrejelzése lehetőségének a kérdése. 2023 első felében térségünkben – februárban a dél-Romániai Olténiában, májusban a Bánságban – is fordultak elő ilyen földmozgások amelyek, bár Románia területén okoztak rémületet a lakosság körében, valamint kisebb-nagyobb károkat az épületekben, Magyarországon is érezhetőek voltak. Ezek az események annál is inkább érzékenyen érintették úgy a lakosságot, mint a hatóságokat, mivel az emberek még rendkívül erősen a valamivel korábban bekövetkezett törökországi és szíriai földrengés-katasztrófának a média által részleteiben is bemutatott hatása alatt voltak – a mi térségünkben is. Nem érte tehát váratlanul a szakembereket a közösségi média képviselőinek az ostroma, a megriadt közvélemény drámai módon megnövekedett információigényét kielégítendő. Mások mellett ezen írás szerzői is nyilatkoztak a különböző (tv, rádió, írott) média képviselőinek a megkeresésére, és nem kerülhették el a

földrengés-előrejelzés problematikáját felvető kérdésekre sem a választ. A továbbiakban e válaszok lényegét osztjuk meg olvasóinkkal.

Szkepticizmus és mérsékelt optimizmus a földrengés-előrejelzésben

A napjainkban is uralkodó, mindenekelőtt az *Amerikai Egyesült Államok Földtani Szolgálat* (USGS) álláspontján alapuló szakmai paradigma szerint a földrengések előrejelzése elvben lehetetlen – tekintettel a jelenség non-lineáris és kaotikus voltára – és mint ilyen, egy megoldhatatlan feladat. Ezért kár időt, energiát és pénzt költeni ilyen irányultságú kutatásokra, helyettük a földrengésbiztos építkezésre – ahogy azt a japánok teszik – és a kritikus infrastruktúrák megfelelő védelmére és biztosítására kell összpontosítani a figyelmet – és az erőforrásokat. Bár ez a radikális álláspont egyelőre nem cáfolható, árnyalni lehet és szükséges: 1) a földrengéseket *egyelőre* nem lehet biztonságosan előre jelezni prekursor jelek (azaz *előjelek*) alapján és – főleg 2) valóban nem lehet *minden* szeizmikus szerkezet, földrengésház esetében érvényes, *univerzális* prekursorokat kimutatni: olyanokat amelyek minden esetben bekövetkeznek, és amelyek kimutatásával az előrejelzés kérdése egyetemes megoldást nyerhet. Ezért tehát inkább úgy kellene árnyaltabban fogalmazni, hogy a földrengések determinisztikus prekursor jelek alapján történő előrejelzése jelenleg egy olyan, napjainkban megoldatlan tudományos feladat és kihívás, amely megoldásra vár. És hozzátesszük, a tárgykörben optimisták csoportjával egybehangozva: nem kellene elvileg lehetetlennek minősíteni – legalább azért nem, mert egy ilyen hozzáállás demobilizáló, a kutatásokat ellehetetlenítő magatartásmódot generál a kutatók körében. Ilyen értelemben talán érdemes felidézni, hogy a múlt század elején voltak olyan nagynevű és mérvadó tudósok akik azt bizonygatták, hogy a levegőnél nagyobb sűrűségű mesterséges eszközökkel elvben lehetetlen a repülés...

Szerencsére mindig is voltak és vannak „renitenskedő”, az adott tárgykörben uralkodó paradigmának be nem hódoló kutatók, tudósok, akik az „elvileg megoldhatatlan” kérdéseket tudományos kihívásnak tekintik és új, eredeti elméleti megközelítésben próbálnak utakat nyitni a probléma megoldása irányában, úgy ahogy azt száz évvel ezelőtt a levegőnél súlyosabb tárgyakkal való repülés lehetetlenségének az elvét elvetők is tették. Ez, amennyiben sikeresnek bizonyul, paradigmaváltáshoz vezethet.

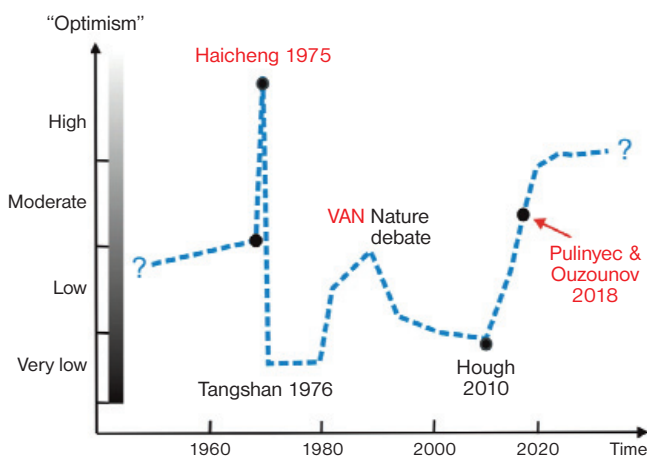


Szakács Sándor geológus, nyugalmazott egyetemi docens, a Román Akadémia bukaresti Geodinamikai Intézetének munkatársa. Fő szakterülete a vulkanológia és a vulkáni területek földtani viszonyainak a kutatása. Számos nemzetközi folyóiratban közölt dolgozatával hozzájárult a Kárpát-medence harmadkori vulkánosságának a jobb megértéséhez. Ugyanakkor a vulkanológia általánosabb, elvi kérdéseivel is foglalkozott. Újabban a földrengések előrejelezhetőségének a problémaköre

foglalkoztatja. Angol és román nyelven közölt dolgozatait Alexandru Szakács, a magyar nyelven közölteket Szakács Sándor néven jegyzi.

Kovács István János a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársa, annak litoszférafizikai csoportjának, valamint az MTA FI Lendület Pannon LitH₂Oscope kutatócsoportjának vezetője. Fő kutatási területe a lemeztektonika és ezen belül az illók szerepe az asztenoszféra-litoszféra rendszer dinamikájában. Kutatási eredményeit 2015-ben az Európai Ásványtani Unió kutatási kiválósági medállal ismerte el, és emellett 2011-ben elnyerte az Európai Geológiai Unió fiatal kutatói kiválósági díját a geokémiai, ásványtani, közettani és vulkanológiai területen. Ezen túlmenően elnyerte a rangos hazai Vendl Mária emlékérmét a Magyarhoni Földtani Társulattól, a Bolyai plakettet, a Pro Scientia aranyérmét, a Junior Prima díjat tudomány kategóriában és az MTA Szádeczky-Kardoss Elemér díját két alkalommal.

A földrengések előrejelzése terén is hasonló helyzettel állunk szemben. A földrengéskutatók túlnyomó zöme – köztük a szeizmológia tudományát hivatásszerűen űző állami intézmények kutatóinak a többsége – az USGS által „hivatalosnak” minősített álláspontot képviselik úgy a mindennapi szakmai gyakorlatuk, mint esetenként, a médiában való megnyilatkozásaik során. Ezzel szemben a témakörben új paradigma után néző kutatók – általában intézményes támogatottság nélkül vagy csak alig támogatottan, sokszor „saját szakállukra” dolgozva – kísérleteznek a földrengés-előrejelzés kockázatos és biztos sikerrel sem kecsegtető talaján. Ennek az uralkodó paradigmával szemembenő hozzáállásnak immár sok évtizedes története van. Ezt foglaljuk röviden össze a következőkben egy, a kérdésben megrajzolható „optimizmusgörbe” utóbbi 50 év során bekövetkezett lefutását és drámai változásait követve. A mellékelt ábrán a hozzáállás-változásokat alapvetően befolyásoló mérföldkő jelentőségű fejlemények is fel vannak tüntetve (1. ábra).



1. ábra. A prekuzor-alapú földrengés-előrejelzéshez való viszonyulás alakulása az utóbbi kb. fél évszázad során

„Optimizmusgörbe” – félévszázados visszatekintés

Az első, a kérdéskörben áttörést ígérő eseményt az 1975-ben bekövetkezett nagy, 7,3-as Richter skála szerinti magnitúdójú *Haicheng földrengés* jelentette, amelyet az akkori kínai kommunista hatóságok életek tízezreit megmentő sikeres előrejelzéseként és a kínai tudománynak a világon első ízben elért hatalmas vívmányaként tekintettek és így is hirdették szerte a világon. Mi is történt valójában? A február 4-én bekövetkezett nagy erejű és pusztító földrengés bekövetkeztekor a térség lakosságát katonai karhatalom igénybevitelével már kitelepítették a hatóságok a hetekkel és napokkal előtte észlelt, egyre fokozódó és sűrűsödő olyan rendkívüli előjelek alapján, mint a földfelszíni deformációk (gyors kiemelkedések), erőteljes kútvízszint-ingadozások, az állatok rendellenes viselkedése (megfagyott kigyók és patkányok tetemei az utakon január végén, „rézsg” patkányok, nyugtalan lovak és tehének, repkedő ré-

cék, este el nem ülő baromfi, stb.), valamint a hivatalos szeizmológusok által kifejezett aggodalmak és tanácsok alapján. A tudósvilág pedig lelkesen tudomásul vette és nem győzte dicsérni, nagy dobra verni ezt az első „siker” földrengéselőrejelzést – és a kommunista Kína előzmények nélküli hatalmas tudományos megvalósítását. Ezáltal az „optimizmusgörbe” az egekbe emelkedett. Csak hogy a csúcson járó optimizmus rövid életűnek bizonyult, és már a következő évben a pokol mélységeinek a szintjére süllyedt, mély pesszimizmusra váltva. 1976. július 28-án ugyanis bekövetkezett egy 7,6-os magnitúdójú földrengés *Tangshan* térségében, óriási pusztítást és több mint 242 000 emberáldozatot követelve. Ezúttal nem jelentkeztek – a Haicheng esetében az előző évben annyira evidens – előjelek. Sajnos a szeizmológusok közössége ezek után nem vonta le azt a legkézenfekvőbb tanulságot az esetből, hogy két földrengés nem egyforma, két földrengéseket kiváltó földtani szerkezet sem egyforma, és ezért a földrengések esetleges előjelei sem egyformák.

Ezek után a prekuzor-alapú földrengés-előrejelzéssel kapcsolatos kutatások csak nagyon lassú tempóban kezdtek újra elindulni. A kutatások egy újabb hulláma mindezekelőtt egy háromtagú görög kutatócsoport nevéhez és az általuk kifejlesztett VAN (a kutatók neveinek a kezdőbetűiből képzett akronima) módszer alkalmazásához és annak szaklapokban közölt sikereihez fűződik. A kutatócsoport szerint a földkéregben terjedő elektromágneses hullámok megfelelő műszerekkel mérhető paramétereiben a földrengést megelőzően olyan változások mutathatók ki, amelyek prekuzoroknak tekinthetők. Egy egész sorozat közölt tudományos dolgozatban mutatták be optimizmusra okot adó eredményeiket és sikeresnek minősített előrejelzéseiket, amelyek felkeltették a szeizmológusok élénk érdeklődését világszerte [1] – olyannyira, hogy a *Nature* folyóirat vitasorozatát kezdeményezett a téma kapcsán az 1990-es évek folyamán a legismertebb szaktekintélyek bevonásával. A *Nature debate on earthquake prediction* cikksorozatnak a legszakavatottabb tudósok véleményén alapuló végkimenetele szerint „a földrengéseket nem lehet előrejelezni”, ahogy az a konklúziókat levonó egyik cikk [2] címében is szerepel. A VAN módszerrel előrejelzett földrengések bekövetkeztének az esélye pedig – statisztikai próbáknak alávetve – nem nagyobb annál, amit egy feldobott érme mutatna. Ezzel az „ítélettel” egyúttal az „optimizmusgörbe” is újra a mélybe süllyedt. Az „elvben lehetetlen” paradigmája végleges győzelmet látszott aratni az USGS egyik jeles és befolyásos szeizmológus szakembere, *Susan Hough* a témát összefoglaló könyvének a megjelenésével, amely egyúttal a földrengés-előrejelzés pesszimizmái bibliájának is tekintetű.

Ezután viszont újabb „renitens” kutatók léptek színre, akik nem nyugodtak bele a pesszimizista vonal végső győzelmébe. És új, paradigmaváltó potenciállal kecsegtető kutatásokba kezdtek. Mielőtt ezeket röviden ismertetnénk, érdemes rávilágítani arra, hogy vajon mi lehet a földrengés-előrejelzés megoldására irányuló korábbi erő-

feszítések sikertelenségének az oka az „elvben lehetetlen” pusztaság elfogadásán túl. Szerintünk ez legalább három okra vezethető vissza: 1) ambíciózus, az előrejelzés szent gráljának megtalálására irányuló egyéni vagy kiscsoportos, egymástól elszigetelten zajló kutatási erőfeszítések és ebből adódóan az interdiszciplináris csapatmunka hiánya, 2) egy átfogó, konceptuálisan megalapozott hosszú távú kutatási stratégia hiánya és 3) nagyszabású nemzetközi multidiszciplináris, megfelelően finanszírozott kutatási program hiánya.

Paradigmaváltás?

Az utóbbi két évtizedben világszerte elért kutatási eredmények tükrében elmondható, hogy optimizmusra okot adó, paradigmaváltó potenciállal rendelkező megközelítések születtek a prekurzor alapú földrengés-előrejelzés kérdéskörében. Egyrészt ígéretes, új paradigmát előrevetítő elméleti munkák láttak napvilágot, amelyek megújuló alapokra helyezhetik a kutatást, másrészt az optimista hozzáállású kutatók új gyakorlati és technikai módszereket dolgoztak ki és kezdtek alkalmazni – felhasználva a műszaki tudományok és az informatika terén kifejlesztett naprakész technológiákat, az űrkutatást is beleértve. A legújabb kutatási hullám elméleti alapját a következő elvek alkotják: 1) a litoszféra-atmoszféra-ionoszféra összekapcsolt rendszerének az elve, 2) a szeizmikus szerkezetek egyediségének és ebből következően azok prekurzor-ujjlenyomata egyediségének az elve és 3) a földfelszín pontjai nem ekvivalens voltának elve a prekurzor jelek észlelése, monitorizálása és kimutatása szempontjából.

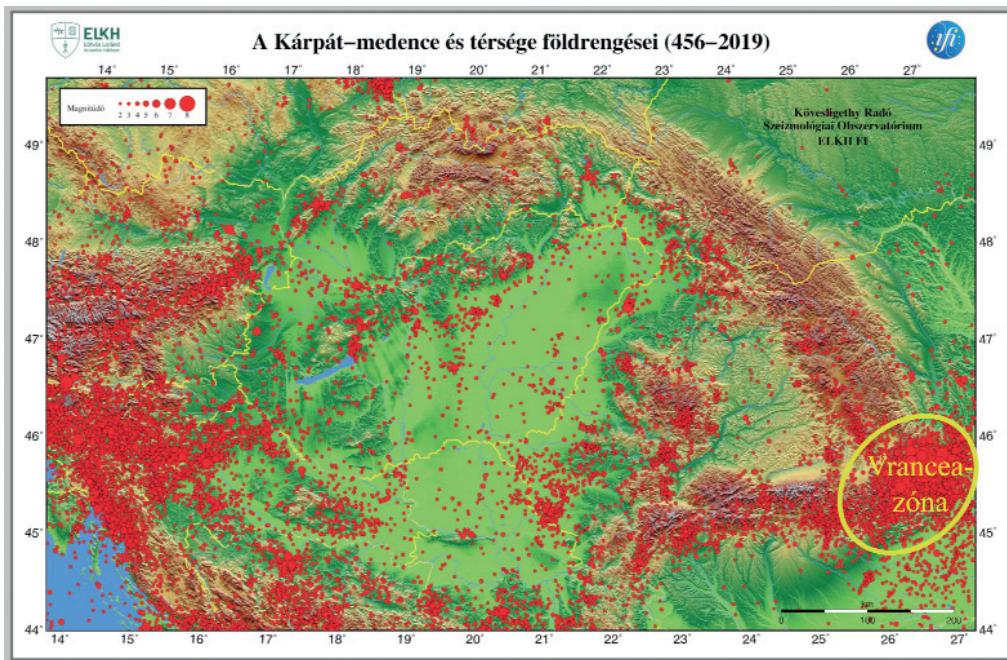
Az, hogy a Föld külső szilárd burka, a litoszféra, a többi geoszférával (a hidroszférával, az atmoszférával, az ionoszférával és a bioszférával) együtt egy olyan egymással összekapcsolt integrált rendszert alkot, amelyben kölcsönhatások és visszacsatolási folyamatok működnek, nem egy új keletű felfedezés, de arra, hogy ez a különben banális megállapítás a földrengés-előrejelzés területén is hasznosítható és kutatási stratégiák alapjául is szolgálhat, csak nemrég jöttek rá a tudósok. Többek között arra, hogy a földkéregben kialakult földrengésgócokban felhalmozódott feszültségek kipattanás előtti felgyorsulása hatást gyakorol nemcsak a környező szilárd kőzetekre és fluidumokra, hanem ez a hatás továbbterjed a földfelszín felé különböző fizikai és kémiai hordozóközegek által, és további hatásokat gerjeszt a felszínnel érintkező geoszférákban, például az atmoszférában. A leghatékonyabb ilyen hordozóközeget a radioaktív, nagy sűrűségű radon gáz képezi, amely a növekvő feszültségek hatására felszabadulhat a kőzetekből és szén-dioxid közvetítésével kerül a felszínre nagyobb mennyiségben. A radon radioaktív bomlása az atmoszféra ionizációjához vezet, amely elősegíti a légnedvesség kicsapódását, ami a maga rendjén a levegő páratartalmának érzékelhető csökkenéséhez és a hőmérséklet emelkedéséhez vezet a megemelkedett radonkiáramlások környezetében. Ez a folyamat megnöveli a lég-

kör vezetőképességét is, amely bizonyos esetekben akár az ionoszférában is anomáliát okozhat a plazmasűrűségben, amely szintén mérhető [3, illetve Barta és mtsai a jelenlegi különszám következő cikkében]. Mindezek a jelenségek a készülő földrengés szűkebb vagy tágabb környezetében mennek végbe és kimutathatók úgy földfelszínen elhelyezett szenzorok, mint műholdak által hordozott készülékek segítségével. Így a prekurzor jelenségek kutatásában két fő irány bontakozott ki, egyrészt távérzékelési módszerek, másrészt földfelszíni megfigyelési módszerek segítségével. Az előbbi területen egy orosz–amerikai kutatópáros (*Szergej Pulinyec és Dimitar Ouzounov*) végzett előjáró és eredményes kutatásokat, az utóbbin több ország kutatói jeleskednek, köztük elsősorban az olaszok, a kínaiak és a japánok. Az utóbbi két évtized során elért jelentős és sokat ígérő elméleti és gyakorlati kutatási eredményeket olyan nagy visszhangot keltő kötetekben tették közzé, mint amilyen a Pulinyec és Ouzounov által szerkesztett, 2018-ban megjelent kötet is [3], amelyek ezáltal lehetővé tették új kutatási stratégiák kidolgozását is. Az említett kötet akár az optimista tábor bibliájaként is értelmezhető. E fejlemények eredményeképpen az „optimizmusgörbe” újra emelkedni kezdett, ahogy azt az ábránk is mutatja.

Mindazonáltal kiderültek a fenti eredmények által megalapozott új kutatási stratégia gyengeségei is, mivel az főleg a távérzékelési megfigyelési módszereket helyezi előtérbe, miközben a földfelszíni megfigyeléseknek csak másodrendű, pótlólagos és megerősítési szerepet szán. E stratégia másik gyenge pontja az, hogy egyetemes érvényességűnek tekinti a kidolgozott, kizárólag a radon hatására épülő szatellites-előjelkimutató módszert, figyelmen kívül hagyva a földrengéses szerkezetek és egyúttal az azokhoz kapcsolódó prekurzor jelek sokféleségét.

És itt jön be a második stratégiai elv, a szeizmikus szerkezetek és azok prekurzor-ujjlenyomata egyediségének az elve, amelyet *Szakács* fogalmazott meg 2021-ben közölt dolgozatában [2]. Ennek az elvnek a kutatási stratégiában való alkalmazása ugyan az előbbinél sokkal szerényebb célokat szolgál, de szerintünk nagyobb sikerrel kecsegtet. Arról van szó, hogy egyetemesen érvényes és kimutatható prekurzor jelek azonosítási kísérlete helyett a kutatások az egyedi és ismert földrengésgócok szintén egyedi és jellemző, saját prekurzor-ujjlenyomatainak a kimutatására kellene irányuljanak minden rendelkezésre álló földfelszínen telepített vagy műholdakon felszerelt technikai eszközök (szenzorok) segítségével.

A harmadik kutatásstratégiai elv a földfelszíni szenzorok telepítési helyének a megválasztására vonatkozik abból a manapság már bizonyított megfontolásból kiindulva, hogy a földfelszín pontjai nem egyenértékűek a Föld belsejéből érkező, különböző típusú (fizikai, kémiai, biológiai) jelek érzékelhetőségének a szempontjából. Pontosabban szólva, a földrengésgócban a kipattanás előtt megszülető bármilyen prekurzor jelhordozó, legyen az fizikai erőter vagy felszínre törő gáz, sokkal nagyobb hatásfokkal (azaz kisebb információenergia-vesztéssel) ter-



2. ábra. A Vrancea-zóna elhelyezkedése a Kárpát-Pannon régió belül sárgával kiemelve. A jelölt területet igen gyakori és erős földrengések jellemzik (www.seismology.hu)

3. ábra. Az 1977. március 4-i, 7,2 magnitúdójú Vrancea földrengés következményei Bukarestben. Korabeli felvétel napilapban (*Agerpres*)

jed bizonyos, jól meghatározott, mint bármilyen más, útvonalak mentén. A prekursor jelhordozó a felszínre kerülhet olyan földtanilag azonosítható, a többiekénél „érzékenyebb” helyeken, pontokon, ahol megfelelően érzékeny műszerekkel a optimális körülmények között (azaz a legnagyobb jel-zaj arány mellett) lehet azt kimutatni, ahogy arra Szakács felhívta a figyelmet 2011-ben közölt dolgozatában [5].

További új és jelentős fejlemény a témakörben a *pargaszoszféra hipotézis* megjelenése [6] az ugyancsak paradigmaváltó potenciállal bíró elképzelések között, amely újszerű és eredeti megvilágításba helyezi azokat a lemeztektonikai folyamatokat, amelyek többek között a földrengések kialakulásáért is felelősek, és amelyekben kimagasló szerep jut a felszínre törő mélységi fluidumoknak (folyadékoknak és gázoknak), amelyek egyúttal földrengéseket megelőző prekursor jelek hordozói is lehetnek.

E három elvre és a pargaszoszféra hipotézisére együttesen alapozva egy hosszú távú de ígéretes kutatási stratégiát lehet kidolgozni, amely egyedi, jól ismert szeizmikus szerkezetek prekursor-ujjlenyomatának a kimutatását célozhatná meg világszerte.

Vrancea - és hogyan tovább?

A romániai *Vrancea* földrengéses szerkezet kiválóan alkalmas erre a célra több megfontolásból is: jól ismert és térben kivételesen jól lehatárolt földrengésfészek, amelyeknek sok évszázadra kiterjedő földrengés-története ismert. Ráadásul Európa egyik geodinamikailag legaktívabb területén (a *keleti Kárpátkanyar zónájában*) található, amely a szeizmikus tevékenységen kívül további, jelenben is mű-

ködő vagy nemrég elhalt földtani folyamat jegeit viseli magán, és ahol a prekursor jelek kutatására alkalmas földtani és logisztikai feltételek adottak (2. és 3. ábra). Ezáltal minden esély megvan arra, hogy nemzetközileg is áttörő eredmények szülessenek itt a jövőben a prekursor jeleken alapuló földrengés-előrejelzés területén. Ehhez viszont az eddigieknél sokkal komolyabb anyagi és személyi erőforrásokra és nagyszabású nemzetközi multidiszciplináris összefogásra és támogatottságra van szükség, ahogy azt a *Topo-Transylvania holland-magyar-román együttműködés keretében* tett jelentős kezdeti lépések példázzák.

A jelen különszám további dolgozatai árnyalják a fent felvázolt helyzetrajzot, és az eddig elért eredményekről is beszámolnak.

Köszönjük az NKFIH NN141596 Topo-Transylvania és az MTA FI Lendület Pannon LitH₂Oscope ösztöndíjak, és az abban résztvevő társkutatók támogatását.

IRODALOM

1. Varotsos, P., Alexopoulos, K., Nomicos, K., and Lazaridou, M. Earthquake prediction and electric signals. *Nature*. 322, 120, 1986
2. Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y., and Mulargia, F. Earthquakes cannot be predicted. *Science*. 275, 5306, 1616, 1996
3. Pulnits, S., Ouzounov, D. The Possibility of Earthquake Forecasting. *Learning from nature*. IOP Publishing, Bristol, UK, 152 p., 2018
4. Szakács A. Precursor-Based Earthquake Prediction Research: Proposal for a Paradigm-Shifting Strategy. *Front. Earth Sci., Geohazards and Georisks*, Volume 8, 2020/ doi.org/10.3389/feart.2020.548398, Open Access, 2021
5. Szakács A. Earthquake prediction using extinct monogenetic volcanoes: A possible new research strategy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 404–411, 2011
6. Kovács I. J., Liptai N., Koptev A., Cloetingh S.A.P.L., Lange T. P., Ma enco L., Szakács A., Radulian M., Berkesi M., Patkó L., Molnár G., Novák A., Wesztergom V., Szabó Cs., Fancsik T. The 'pargasosphere' hypothesis: looking at global plate tectonics from a new perspective. *Global and Planetary Change*, 204(3–4):103547, 2021

FÖLDRENGÉSEK NYOMAI A FELSŐLÉGKÖRBEEN?

Barta Veronika, Berényi Kitti, Buzás Attila, Kiszely Márta, Szabóné André Karolina, Szárnya Csilla
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

Az ionoszféra a földi légkör napsugárzás által részben ionizált tartománya, amely 60–1000 km között helyezkedik el. Az ionoszféra egy dinamikusan változó határreteg a külső plazmakörnyezet és a semleges légkör között, melyet különböző hatások érnek mind felülről, a világűr irányából (elsősorban a naptevékenységhez kapcsolódóan), mind alulról, a semleges légkör irányából (pl. intenzív troposzférikus események: hidegfrontok, zivatarok). Egy aktívan kutatott téma a litoszféra-semleges légkör-ionoszféra közötti csatolás. Ennek részeként célkitűzés a földrengéseket megelőzően detektálható elektronsűrűség-anomáliák keresése az ionoszférában, valamint a földrengéseket követő ionoszférikus irregularitások vizsgálata, illetve monitorozása, ami egy mind elméletileg, mind az észlelések tekintetében jóval megalapozottabb kutatási téma.

Bevezetés

Carl Friedrich Gauss német matematikus és fizikus a Föld mágneses mezejének tanulmányozása során már 1839-ben felvetette, hogy a légkör egy elektromosan vezető régiója sok megfigyelt jelenségre magyarázatot adhat. Az első transzatlanti rádiójel továbbítása és vétele Guglielmo Marconi nevéhez fűződik hatvan évvel később (1901. december 12.): a cornwalli és újfundlandi állomások között, mintegy 3500 kilométeres távon sikerült a Morze-ábécé S betűjét (három vonás) továbbítani. Ettől kezdve a rádiókommunikáció és annak köszönhetően

az ionoszféra felfedezése és vizsgálata rohamos fejlődésnek indult. Az ionoszféra és a benne előforduló anomáliák ismerete a műholdas kommunikáció és navigáció szempontjából is rendkívül fontos, hiszen a földi adóállomás és a műhold között az ionoszférán keresztül terjed a jel. Így az ionoszféra állapotának monitorozása és a benne előforduló irregularitások megfigyelése napról napra fontosabbá válik.

Az ionoszféra monitorozása

Az ionoszféra földbázisú megfigyelése ún. ionosondákkal történik, me-

lyek segítségével az egyes rétegek elektronsűrűségét lehet megfigyelni a magasság függvényében. A mérés során rövid idejű rádióimpulzusokat bocsátunk ki általában 1 és 12 MHz között. Egy adott frekvencián a jel abban a magasságban fog visszaverődni, ahol az ionoszféra sajátfrekvenciája megegyezik a szondázó elektromágneses hullám frekvenciájával. Mérjük az impulzus kibocsátása és a visszaverés között eltelt időtartamot; ez alapján meg tudjuk becsülni, hogy mely magasságban történt a visszaverődés feltételezve, hogy a jel fénysebességgel terjed. Ezt a mechanizmust különböző frekvenciákon megismételve a mérés eredményeként előáll az ún. ionogram (1. ábra) ahol a plazmafrekvenciát láthatjuk a magasság függvényében, ami alapján az (1) képlet segítségével az elektronsűrűség-profil (1. ábra) meghatározható:

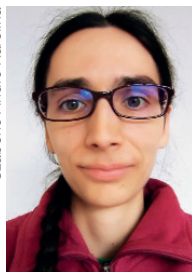
$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m^*}}, \quad (1)$$

ahol ω_{pe} a plazmafrekvencia, n_e az elektronsűrűség, e az elektromos töltés, m^* pedig az elektron tömege.

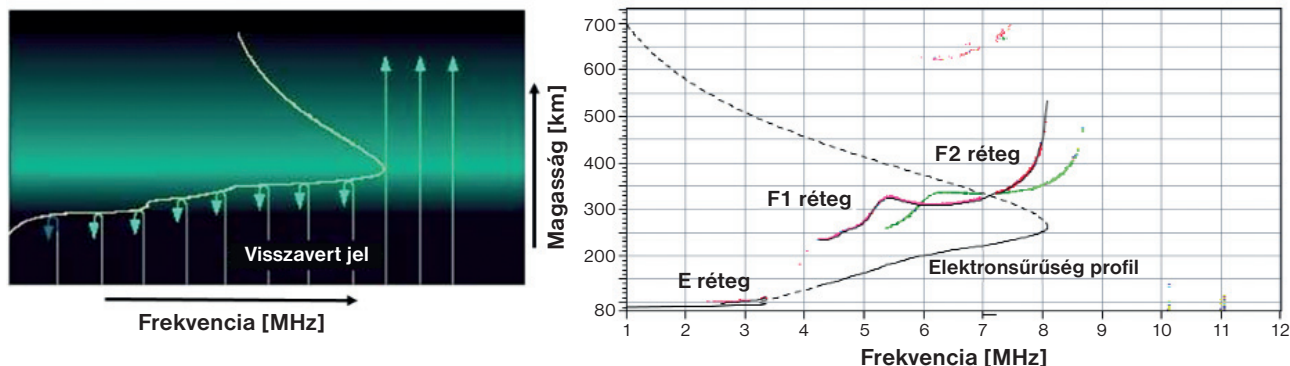
Az ionogramon szépen kirajzolódnak az ionoszféra egyes rétegei, a kisebb elektronsűrűségű E réteg, és fölötte a nagyobb elektronsűrűségű F réteg, amely a nappali órákban szétválhat F1 és F2 rétegre. Mivel az ionoszféra egy diszperzív közeg, a beérkező elektromágneses hullámok szétválhatnak ordinárius és extraordinárius módusra, amelyek külön színekkel (piros és zöld) jelennek meg az ionogramokon (1. ábra). A soproni álló-



Barta Veronika a FI Ionoszféra Kutatócsoportjának vezetője, 2015-ben szerezte meg doktori címét a troposzféra és az ionoszféra közötti csatolási mechanizmusok témájában. Azóta főként az űridőjárás események ionoszférára gyakorolt hatásával foglalkozik, amely témában OTKA posztdoktori és Bolyai János Kutatói Ösztöndíjat is nyert. Emellett részt vesz több kutatásban is, melyek a földrengések és vulkánkitörések ionoszférára gyakorolt hatására fókuszálnak, és több európai kutatócsoport összefogásával valósulnak meg.



A FI Ionoszféra Kutatócsoportja hivatalosan 2023 januárjában alakult. Fő tevékenysége az ionoszférában zajló összetett fizikai folyamatok vizsgálata, így mind a felülről, főként a naptevékenységből fakadó, mind pedig az alsóbb légrétegekből származó hatások tanulmányozása. A csoport január óta részt vesz a HORIZON 2022 program T-FORS (Travelling Ionospheric Disturbances Forecasting System) projektjében, amelyben többek között a földrengéseket követő terjedő ionoszférazavarokat is vizsgálják.



1. ábra. Az ionoszféráról visszaverődő, majd a legnagyobb elektronsűrűséghez tartozó plazmafrekvencia fölött áthaladó hullámok (bal oldalon), a mérés eredménye az ionogram (jobb oldalon)

más egy globális digitális ionoszonda (digiszonda) hálózat tagja, amelyben több mint 120 mérési pontról érhetőek el az adatok általában 5 vagy 15 perces időbeli felbontásban [1].

Térbeli és időbeli felbontás szempontjából a GNSS-mérések (Global Navigation Satellite System – globális navigációs műholdrendszer) jelfeldolgozásából származtatott mennyiségek átütő erejűek voltak az ionoszféra tanulmányozásában. Az amerikai GPS-műholdak (Global Positioning System – globális helymeghatározási rendszer) 20 200 km-es magasságban keringenek, általában a flottából egyszerre 24 műhold érhető el, és két frekvencián sugároznak egyszerre – ezeket L1-nek és L2-nek nevezik, az L1 1575,42 MHz, az L2 1227,60 MHz. A mérések feldolgozása során az ionoszféra azon tulajdonságát lehet felhasználni, hogy ionizált közegben az elektromágneses jelek terjedése frekvenciafüggő, vagyis diszperzív – ez azt jelenti, hogy a különböző frekvenciájú jelek eltérő mértékű jelkésletetést szenvednek el. Adott két pont (jelen esetben adó és vevő) közötti s_i integrálási útvonal mellett az adott f_i frekvenciára vonatkozó φ_i fáziskésés:

$$\varphi_i = s_i - \frac{40,3082 \cdot \text{TEC}_i}{f_i^2},$$

$$40,3082 = \frac{c^2 \cdot r_e}{2\pi},$$

ahol a TEC_i a két pont közötti teljes elektron tartalom (TEC – total electron content). A konstans szorzótényezőben a c a fénysebesség, az r_e elektron sugara.

A két külön frekvenciás mérést kombinálva, egyetlen jel útvonalára vonatkoztatott TEC-érték:

$$\text{TEC} = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{40,3082 \cdot (f_1^2 - f_2^2)}.$$

Egy TEC-egység (TEC Unit röviden TECU) $10^{16} \frac{\text{el}}{\text{m}^2}$ -nek feleltethető meg.

Amennyiben szerte a világban telepített mérőeszközök egyidőben vett GNSS-jelét egységes eljárással dolgozzák fel, úgy globális teljeselektron tartalom (TEC-) térképek származtathatók belőlük.

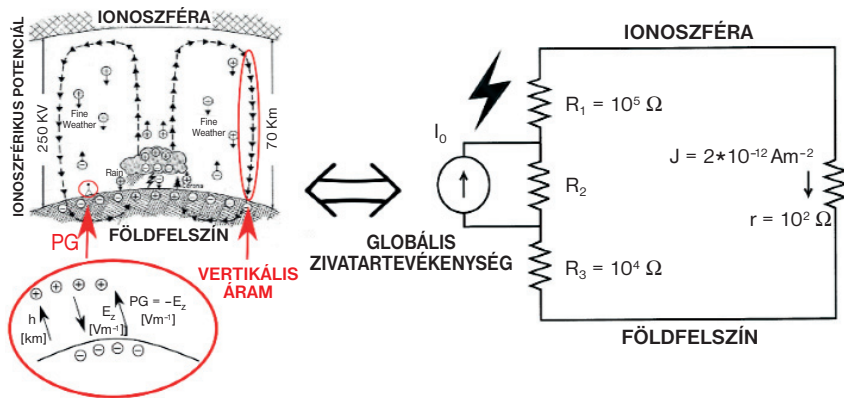
Kapcsolat a földrengések és az ionoszféra között?

A Föld mélyében kipattanó és a felszínen óriási pusztítást okozó földrengések, valamint a 60–1000 km-es magasságban elhelyezkedő ionoszférában zajló folyamatok között első rátekintésre nehéz elképzelni bármiféle kapcsolatot. Mára azonban több mérési bizonyíték is amellet tanúskodik, hogy létezik ilyen fizikai kapcsolat a két jelenségcsoport között, amit litoszféra–semleges légkör–ionoszféra csatolási mechanizmusnak neveznek [2]. Bár a csatolási mechanizmus pontos mibenléte mindmáig vitatott és több eltérő elmélet is létezik a magyarázatára, azonban az egyik legelterjedtebb hipotézis szerint a földrengést közvetlenül megelőző (ún. pre-seizmikus) fázisban (általában néhány nappal a rengés előtt) a földkéregben felhalmozódó feszültség ha-

tására a repedésrendszereken keresztül ionizáló gázok, jelesül radon szabadul fel és jut a troposzféra legalsó, felszínközeli tartományába [2]. Az így a légkörbe jutott radon és az ionoszféra között az ún. globális légköri elektromos áramkör (glek, Global Electric Circuit – GEC) teremti meg a kapcsolatot. A glek a földfelszín és ionoszférát összekötő elektromos áramok rendszere, amelyet a földfelszín és ionoszféra közti mintegy +250 kV potenciálkülönbség tart fenn. Ezen potenciálkülönbség elsődleges forrása a globális zivatar tevékenység, amely mintegy generátorként működik a rendszerben. Az ionoszféra és a földfelszín közötti töltéskülönbséget az ún. szép időjárású (tehát a zivatarok által nem érintett) területeken az ún. (mintegy 2 pAm^{-2} felületi áramsűrűségű) vertikális áram formájában megjelenő töltésáram igyekszik kiegyenlíteni (2. ábra).

A litoszféra–semleges légkör–ionoszféra csatolás elmélete szerint a földrengések előtt a földkéregből felszabaduló radon gáz megnövekedett légköri koncentrációja következtében megnövekszik a felszínközeli rétegek légköri vezetőképessége is, ami csökkenti ezen légrétegek ellenállását. Ezen folyamatokon keresztül végül megnövekszik a pozitív töltéseket szállító vertikális áramerősség, valamint az alsó ionoszféra rétegeinek lokális elektronsűrűsége ((2) képlet) [2].

$$J_c = \frac{V_i}{R_c} = \frac{V_i}{\frac{k}{\sigma_s} + R_{FT}} \quad (2),$$



2. ábra. A GLEK sematikus rajza (bal oldalon) és ekvivalens áramköri képe (jobb oldalon). A bal oldali ábrán a PG rövidítés a felszínközeli vertikális légköri elektromos térerősség ellentettjét, a légköri elektromos potenciálgradienst jelöli (forrás: <http://www.keteu.org/posts/fieldmill.html> és [3])

ahol J_c a vertikális áram (sűrűség), V_i az ionoszférikus potenciál (azaz az ionoszféra és a földfelszín közötti potenciálkülönbség), R_c az ún. oszlopellenállás (az alsó ionoszféra és a földfelszín közötti egységnyi területű légoszlop integrált ellenállása). Utóbbi tag, az oszlopellenállás felbontható két további tagra: a felső, szabad troposzféra és sztratoszféra járulékat tartalmazó tagra (R_{FT} , ez a teljes oszlopellenállás csupán mintegy harmadát teszi ki); valamint az oszlopellenállás integrált értékének több mint kétharmadéért felelős felszínközeli rétegek és az alsó troposzféra járulékat tartalmazó tagra (k/σ_s), ahol k a felszínközeli légréteg skálamagassága és σ_s a felszínközeli réteg vezetőképessége.

Ionoszférikus prekurzorok és az észlelés korlátai

A litoszféra-semleges légkör-ionoszféra csatolási rendszer egy mai napig nyitott kérdése, hogy a globális légköri elektromos áramkörön keresztül a földrengéseket megelőzően az alsó ionoszférában létrejövő kisebb elektronsűrűség-anomáliák hogyan képesek nagymértékű, a teljes elektrontartalomban is kimutatható változásokat okozni. Azonban a szakirodalomban látunk arra példát, hogy más, a légköri vezetőképességet befolyásoló folyamatok (pl. vulkanikus hamufelhő a kitörést követően, vagy saharai porvihar) is képesek a teljes elektrontartalomban jól mérhető változást (3–8 TECU) okozni [4]. A föld-

rengéseket megelőzően mind elektronsűrűség-növekedést, mind elektronsűrűség-csökkenést kimutattak már a szakirodalomban [4]. Azonban ezen anomáliák egyértelmű beazonosítása nagyon nehéz, mert hasonló (8–10 TECU, 20–80%) vagy nagyobb léptékű pozitív és negatív változásokat tudnak okozni a napkitöréseket követő geomágneses viharok is az ionoszféra elektrontartalmában.

A szakirodalom – főként statisztikai vizsgálatok – alapján azonban néhány dolgot már meg lehet állapítani az ionoszférikus prekurzorokról: az anomália bekövetkezésének a valószínűsége nagyobb az intenzívebb ($M > 6,6$) és sekély (fészekmélység < -20 km) rengések esetében és a földrengést megelőző 5 napban [4,6,7]. Illetve ál-

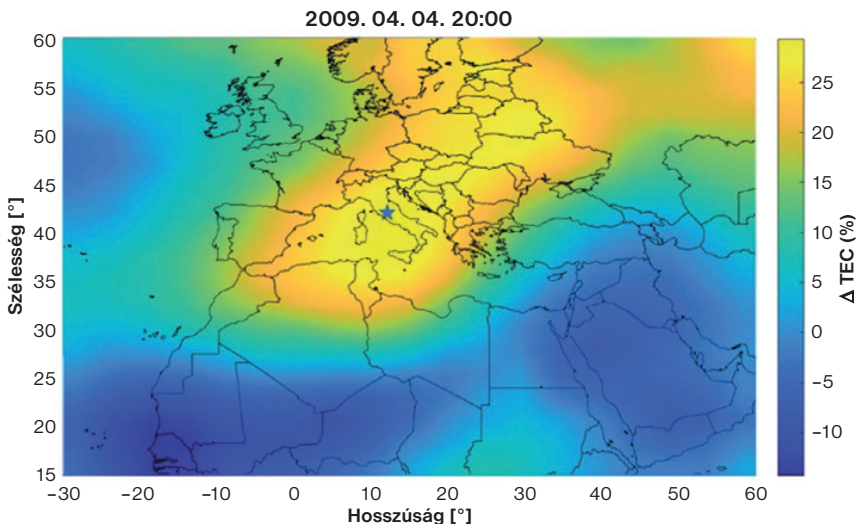
talában az irregularitásokat a rengés epicentrumától egy meghatározott távolságon belül, az ún. előkészítési területen (preparation area) észlelték [4,5,6], amelynek sugara függ a rengés intenzitásától és a következő képlettel adható meg: $R = 10^{0,43M}$ ahol M a földrengés magnitúdóját jelöli. Ezeket a paramétereket figyelembe véve utólag ki lehet mutatni egy-egy nagyobb földrengés esetén nagy valószínűséggel a rengéshez kötődő, azt megelőző anomáliákat, mint például három nagy mexikói [6] vagy a 2009-es l'aquilai (3. ábra [7]) rengés esetében.

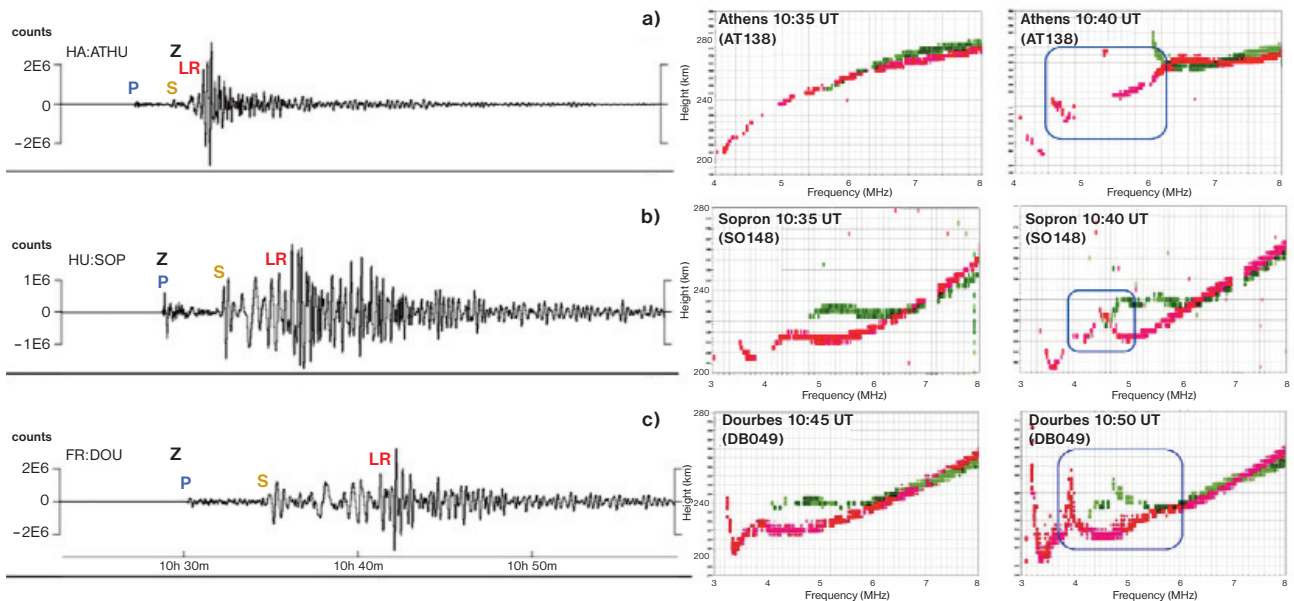
Azonban valós időben egyértelműen beazonosítani a földrengéshez kötődő ionoszférikus változásokat szinte lehetetlen feladatnak tűnik, mivel az ionoszféra egy rendkívül dinamikus, változó közeg, és a földkörüli térségben végbemenő összetett folyamatok hasonló vagy nagyobb léptékű változásokat tudnak eredményezni az elektronsűrűségben.

A földrengéseket követő irregularitások – terjedő ionoszférazavarok

Az ionoszférában megjelenő periodikus tulajdonságokat mutató anomáliákat összefoglaló néven terjedő ionoszférazavarnak (Traveling Ionospheric Disturbances – TID) nevezzük. Ezen irregularitások forrása a semleges légkörben kialakuló és az iono-

3. ábra. A teljes elektrontartalomban észlelt növekedés Európa felett ~30 órával a l'aquilai (M6,3) intenzív földrengés előtt, geomágneses szempontból nyugodt időszakban [6]





4. ábra. Bal oldalon az Athén (a), Sopron (b) és Dourbes (Belgium, c) állomásokon mért szeizmogramok a rengést követő tér- és felületi hullámok (P, S és LR) beérkezésének megjelölésével. A középső oszlopban az Athén, Sopron és Dourbes állomásokon mért ionogramok részletei a rengés hatásának beérkezése előtt, míg a jobb szélső oszlopban ugyanitt mért ionogramok a rengés által keltett hullámszerű anomália megjelölésével (kék négyzettel) [10] alapján

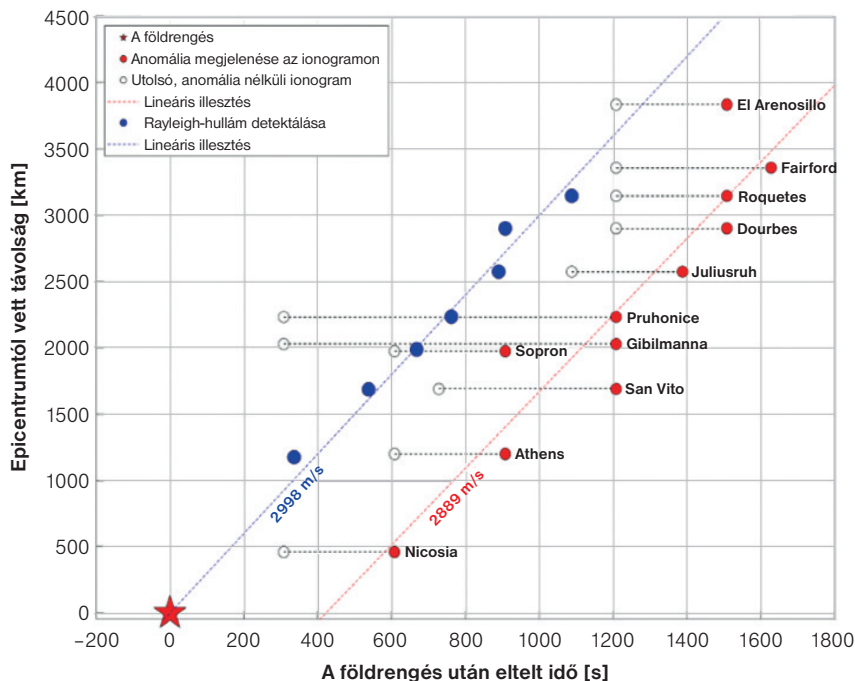
szférán keresztül haladó hullámok (pl. sűrűség-hullám-hanghullám, légköri nehézségi hullámok), melyek tulajdonságai a semleges és az ionizált részecskék ütközésén keresztül adódnak át az ionizált közegnek, s ezáltal mutathatók ki az ionogramokon, vagy a teljes elektrontartalomban. A TID-ek monitorozása és vizsgálata az utóbbi években rendkívül fontossá vált, mert szinte állandó jelenlétük kiszámíthatatlan hibákat tud okozni a precíz (néhány 10 cm-es) helymeghatározásban, amely az önvezető járművek esetében nélkülözhetetlen. A téma fontosságát jelzi, hogy a HORIZON Europe program már két nagy nemzetközi összefogással létrehozott pályázatot is támogatott, amelyek közül az utóbbi (T-FORS, [8]) a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet kutatóinak részvételével valósul meg.

A földrengések során felszabaduló feszültség rugalmas hullámokat kelt, melyek közül a térhullámok (P és S hullám) bolygónk belsejében, míg a felületi hullámok (Rayleigh-, és Love-hullám) nevükhöz híven a felszínen terjednek [9]. Utóbbiak közül a Rayleigh-hullám (LR) terjedése vertikális elmozdulással is jár, amely a talaj fölötti légrétegben akusztikus-nehézségi hullámokat generál, melyek fölfelé

terjedve elérhetik az ionoszférát [10]. Ezek a zavarok várhatóan a Rayleigh-hullámok sebességével (2000–5000 m/s) terjednek vízszintes irányban az ionoszférában 8–10 perces késleltetéssel az LR hullámhoz képest, mert ennyi idő kell, hogy a felszínen létrejött anomália elérje az ionoszféra (200–300 km) magasságát. Mivel a szeizmikus hullámok a talajon nagy távolságokra képesek eljutni, ez a mechanizmus a földrengés epicentrumától nagy távolságra is detektálható zavarokat hozhat létre az ionoszférában. A szakirodalom szerint 6,5 M-nál erősebb rengések képesek anomáliákat okozni az ionoszférában, amelyek mértéke és a rengéshez képesti távolság, ahol még detektálhatóak, függ a rengés erősségétől [10, és az ott leírt referenciák].

A szeizmikus LR hullám által keltett ionoszférázavarra láthatunk egy nagyon szép példát a 2023 február 6-ai (M 7,6, kipattanás ideje: 10:24:52 (UTC)) földrengést követően Európa felett. A 4. ábra bal oldalán az Athén (a), Sopron (b) és Dourbes, Belgium (c) állomásokon mért szeizmogramokat láthatjuk. Az egyes szeizmogramokon egymást követően jelennek meg a P, S és LR hullámok, valamint szépen látszik, hogy az epicentrumtól vett tá-

volság növekedésével a hullámok egyre későbbi időpontban jelennek meg. Az ábra jobb oldalán az athéni, soproni és Dourbes-i ionoszférázavar-állomásokon mért ionogramokat láthatjuk a rengés hatását megelőző időpontban (középső oszlop), majd amikor a rengés által keltett hullámszerű anomália megjelenik az ionogramokon (kék kerettel kiemelve). A közel azonos helyen mért szeizmogramon megjelenő LR hullámok időpontjaival összevetve láthatjuk, hogy kb. 6–10 perccel a hullám áthaladása után jelenik meg a zavar az ionogramokon. Több európai szeizmikus és ionoszférázavar-állomás adatait átnézve elő lehet állítani egy ún. út-idő diagramot (5. ábra), amin a szeizmogramokon megjelenő LR hullámok beérkezési idejét (kékkel), illetve az ionogramokon látható zavarok idejét (pirossal) láthatjuk az epicentrumtól vett távolság függvényében. A beérkezési idők és a távolságok függvényében meg lehet határozni a sebességet, amely elég jó egyezést mutat a két esetben (2998 m/s a Rayleigh hullám sebessége – kék szaggatott vonal, 2889 m/s az ionoszférázavar horizontális terjedési sebessége – piros szaggatott vonal). Így a két vonal közel párhuzamos egymással, ~7 perc eltérés van a kettő



5. ábra. Út-idő diagram. Kékkel a LR hullám beérkezési idejét láthatjuk a távolság függvényében a vizsgált szeizmogramokon. Pirossal az ionoszférazavar ionogramokon történő megjelenésének időpontját láthatjuk a távolság függvényében. Itt fontos megjegyezni, hogy egyes állomások (pl. Athén, Sopron) 5 perces, míg mások (pl. Pruhonice, Csehország) 15 perces időbeli felbontásban szolgáltatnak ionogramot, így csak ekkora pontossággal tudjuk megadni az anomália megjelenési idejét. A távolság-idő párok alapján meg lehet határozni a terjedési sebességeket, amelyeket a kék és piros vonal jelöl [10]

között, ami azt jelenti, hogy ebben az esetben a talaj fölött keltett semlegeslégi hullám ennyi idő alatt érte el az ionoszféra (itt 200–240 km) magasságát. Az eredmények a Journal of Geophysical Research rangos nemzetközi folyóiratnál vannak elbírálás alatt [10].

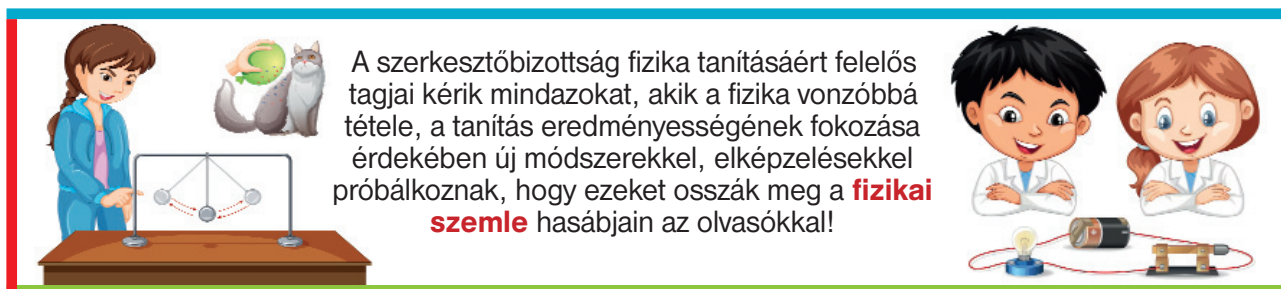
Kitekintés

Európában mind az ionoszondák, mind a GNSS-állomások nagyon sűrűn helyezkednek el a többi kontinenshez képest, illetve más mérési hálózatok (légi elektromos mérések az ionoszféra doppler eltolódását monitorozó hálózat) is megtalálhatóak itt,

ami kivételes lehetőséget biztosít arra, hogy a földrengésekhez kapcsolódó ionoszférikus anomáliákat nagy térbeli és időbeli felbontásban tudjuk megfigyelni és kutatni több mérési módszer összehasonlításával, így számottevő új eredményeket érhetünk el ezen a területen.

IRODALOM

- <https://giro.uml.edu/>
- Harrison, R. G., Aplin, K. L., Rycroft, M. J. (2010). Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(5-6), 376–381.
- Rycroft, M. J., Israelsson, S., and Price, C. (2000). The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(17-18), 1563–1576.
- Pulinets, S., Davidenko, D. (2014). Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit. *Advances in Space Research*, 53(5), 709–723.
- Dobrovolsky, I.R., Zubkov, S.I., Myachkin, V.I., 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pageophysics* 117, 1025–1044.
- Oikonomou, C., Haralambous, H., Pulinets, S.; Khadka, A., Paudel, S. R., Barta, V., Muslim, B., Kourtidis, K., Karagioras, A., Inyurt, S. (2021) Investigation of Pre-Earthquake Ionospheric and Atmospheric Disturbances for Three Large Earthquakes in Mexico. *Geosciences* 2021, 11, 16.
- Pulinets, S., Krankowski, A., Hernandez-Pajares, M., Marra, S., Cherniak, I., Zakharenkova, I., ... and Budnikov, P. (2021). Ionosphere Sounding for Pre-seismic anomalies identification (INSPIRE): Results of the project and Perspectives for the short-term earthquake forecast. *Frontiers in Earth Science*, 9, 131.
- <https://t-fors.eu/>
- <http://www.seismology.hu/index.php/hu/ismeretterjesztes/foeldrengeshullamok>
- Haralambous, H., Guerra, M., Chum, J., Verhulst, T. G., Barta, V., Altadill, D., ... and Zednik, J. (2023). Multi-instrument observations of various ionospheric disturbances caused by the 6 February 2023 Turkey earthquake. *Journal of Geophysical Research - Space Physics*, bírálat alatt



fizikai szemle

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A társulat internetes honlapja: <http://www.elft.hu>, e-postacím: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó: Groma István főtítka, felelős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Horváth Imre. Nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., Felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta (nyáron dupla számmal), az egyes számok ára: 1200.- Ft (a dupla számé 2400.- Ft) + postaköltség.

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

A FÖLDRENGÉSEK SZEREPE A CO₂-GAZDAG FLUIDUMOK SZÁLLÍTÁSÁBAN

Berkesi Márta, Spránitz Tamás, Hencz Mátyás, Békési Eszter, Porkoláb Kristóf
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron és MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatócsoport

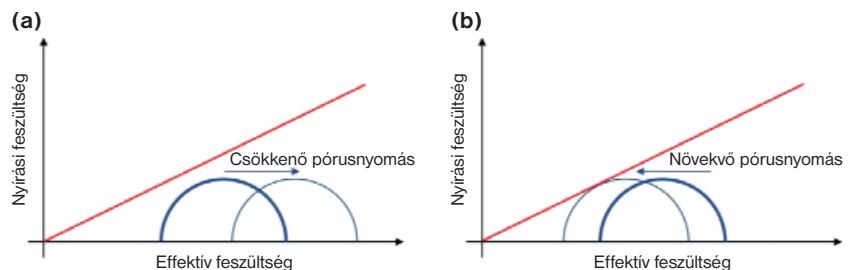
Bevezető

A Föld külső néhány tíz-néhány száz kilométeres rideg kőzetburkát litoszférának nevezzük. A litoszférát alkotó szilárd kőzeteknek még a mélyebb, tehát nagyobb nyomású (~1–3 GPa) és hőmérsékletű (~900–1100 °C) környezetéről – azaz a mélylitoszféráról – is elmondható, hogy a kőzeteket felépítő ásvány szemcsék határain nincs tökéletes illeszkedés. Ennek szükségszerű következménye, hogy a kőzetekben „üreg” (pórustér) alakul ki különböző mérettartományokban: a nanoléptékű diszkontinuitásoktól a szemcsehatár-illeszkedés tökéletlenségéből fakadó térrészhiányokon át („grain boundary misfit”) akár méteres repedésekig. E pórusteret nem a légüres tér, hanem fluidum tölti ki, szétválaszthatatlan egységet alkotva a kőzetekkel. A földtudományokban a fluidumok alatt olyan földtani folyamatból eredő entitásokat értünk, amelyek 1) nem szilárd fázisúak (tehát folyadék, gáz vagy szuperkritikus állapottal jellemezhető), 2) áramolni képesek, és 3) döntő alkotóelemei a szén, oxigén, hidrogén, nitrogén és kén. Egyszerű, mindannyiunk számára ismert molekulákra kell gondolnunk: CO₂, H₂O, N₂, CH₄, CO.

A fluidumok olyan földtani folyamatok kialakulásában és katalizálásában játszanak kulcsszerepet, amelyek kiemelt társadalmi jelentőséggel is bírnak. Fluidumok nélkül nem lennének lemezmozgások, azaz lemeztektonika sem, ami igaz a magmaképződésre és vulkáni tevékenységekre is. Továbbá a litoszféra sekélyebb részein áramló fluidumok számos esetben szállítanak és később kristályosítanak civilizációnk fenntartásához szükséges kritikus elemeket, ásványi anyagokat.

A fentiekhez képest kevésbé széleskörűen vizsgált, fluidum által befolyásolt földi folyamatok lehetnek bizonyos földrengésesemények is. Ennek oka abban keresendő, hogy a fluidumok a kőzetek pórusterében való jelenlétükkel nyomást fejtenek ki a kőzetvázra. A pórustérben a litoszféra mélyebb zónáiból származó, felfelé irányuló fluidummozgás következtében megnövekedhet a pórusnyomás, ezáltal megváltoztatva a kőzet-fluidum rendszer feszültségviszonyait. Ennek extrém esete az, amikor a fluidumok által megnövekedett pórusnyomás kielégíti a Coulomb-féle törési feltételt, amely a kőzetek töréséhez, és így akár földrengések kipattanásához is vezethet. A magyarázat abban keresendő, hogy a fluidumok növekvő nyomása „gyengíti” a kőzeteket (csökkenti az effektív feszültséget), amely a Mohr-Coulomb-diagramon a Mohr-körök balra tolódásában és a Coulomb-féle törési egyenes érintésében, metszésében nyilvánul meg (1. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a fluidumnyomás csökkenése következtében is kialakulhatnak törések, hiszen a kőzetekben uralkodó feszültségek komponenseire a pórusnyomás megváltozása különböző mértékű hatást gyakorol.

1. ábra. Az effektív és a nyírási feszültség diagramjai egy tipizált normális vetőzónában, amelyek egy fluidkivonási, -kitermelési (a), illetve egy fluidinjektálási (b) helyzet feszültségállapotát írják le a Mohr-körökkel (kék) és a Coulomb-féle törési egyenessel (piros). Módosított ábra a [2] alapján



Berkesi Márta



Spránitz Tamás



Hencz Mátyás



Békési Eszter



Porkoláb Kristóf

A szerzők az MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatócsoport tagjai és a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársai, akik geológia-geokémia (Berkesi Márta kutatócsoportvezető és Spránitz Tamás), vulkanológia (Hencz Mátyás), szerkezetföldtan-numerikus modellezés (Porkoláb Kristóf) és geofizika-geotermia (Békési Eszter) szakterületeken dolgoznak. A kutatócsoporton belül a litoszféra-léptékű fluidumáramlás földtani, fizikai és kémiai feltételeit vizsgálják a Balaton-felvidéken.

korolhat, amely akár a Mohr-kör megnövekedését is eredményezheti. A fluidumnyomás-változás következtében kipattanó földrengések szilárd és folyékony nyersanyagok bányászata, ki-termelése (pl. szénhidrogén, geotermikus energia) és tárolása (pl. földgáz, CO₂), valamint ezekhez kapcsolódó injektálási beavatkozások során is előfordulhatnak (ezt hívjuk indukált szeizmicitásnak). Progresszív kutatómunkák már évtizedekkel ezelőtt rámutattak arra, hogy a fluidumok a törésvonalakon belül is jelentős hatással lehetnek a földrengésekre: az effektív normál feszültség csökkentésével a megnövekedett pórnyomás következtében [1].

Esettanulmányok

Az Appennini-félsziget és szigetei (Olaszország) intenzív szeizmicitással jellemezhető régió. 1997-ben Észak-Olaszországban (Umbria-Marche) 5,7–6-os magnitúdójú földrengésekkel egy időben feltehetően a földkéreg mélyebb tározójában elzárt, CO₂-gazdag szuperkritikus fluidum a rengések által keltett töréses zónák mentén tudott több kilométeren át szállítódni, jelezve a fluidumok és a földrengések kölcsönhatásait [3]. Szintén Olaszországban a 2009–2018 közötti közel tízéves időszakban – időbeli nullpontként a tragikusan nagy károkat és emberáldozatokat okozó l’aquilai földrengéssel – a szeizmikus tevékenység folyamatos monitorozásával egy időben a terület felszín alatti vízhálózatán

26 pontból 10 év alatt 270 egyedi oldottszén- és δ¹³C-CO₂-idősoros mérést végeztek [4]. Ez utóbbi izotóp-arányérték a CO₂ eredetére ad információt. A nagyszámú adatsoron alapuló eredmények igazolják – különös tekintettel a nagyobb magnitúdójú (M ≥ 5) földrengések esetén –, hogy a mélylitoszféra-eredetű CO₂-koncentráció növekedése korrelál a szeizmikus szevenciák alakulásával: a mély CO₂ fluxus (jelen tanulmány esetében: az oldott szén-dioxid koncentrációváltozása a felszín alatti vízmintákban) mértéke annál nagyobb, minél nagyobb erejű földrengés előzte meg. A vízminták oldott CO₂-koncentrációja olyan mértékben növekedett a nagy magnitúdójú rengések esetén, amely a szezonális változás és a rengésből fakadó, mélylitoszférás CO₂ eredetétől független paraméterek, azaz porozitás (közszemcsék közötti pórustér mennyisége) és permeabilitás (fluidumvezető-képesség) változása hatásán felüli mértékű. A két tanulmány arra enged következtetni, hogy a mélylitoszférából sekélyebb zónákba áramló CO₂-gazdag fluidum tehát potenciálisan földrengés-előidéző ágens lehet.

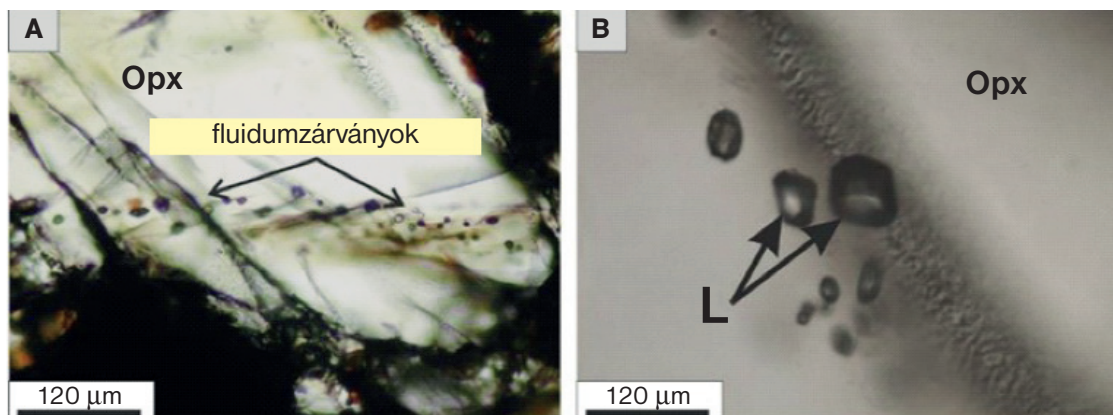
Joggal merül fel a kérdés a fenti tanulmány eredményei alapján, hogy az appennini terület egy általános vagy egyedi, kivételes esetet tár-e fel. A globális megfigyelések ez előbbi sejtetik. Számos más, jelentős magnitúdójú földrengés esetén igazolódott a mély eredetű fluidumok hatása; úgy, mint a 2004-es niigatai (M = 6,8), az északkelet-honsúi rengések esetében

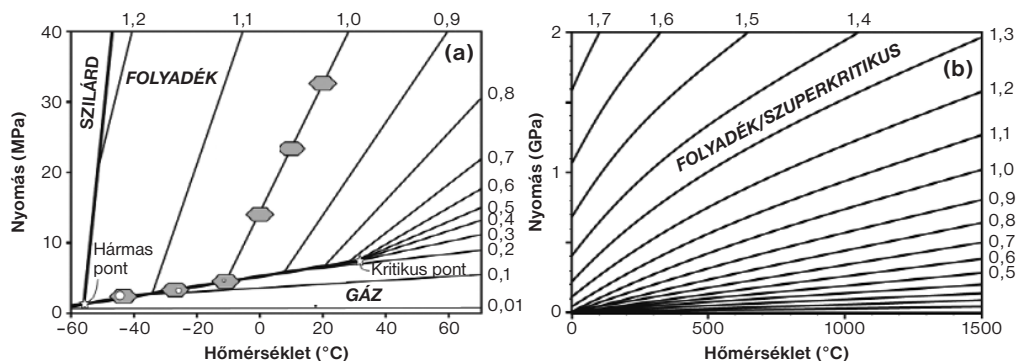
Japánban; továbbá az Afar-medence-beli földrengéssorozatnál. Mindazonáltal mély eredetű fluidum hatásának tekinthető a 2004-es szumátrai földrengés (M = 9,2) utórengéssorozatának jellege is [5 és hivatkozásai]. A köpenyből származó CO₂ játszik szerepet a 2001-es indiai (Bhuj) földrengés (M = 7,9) utórengéssorozatában is [5]. A fenti példák tehát egyértelműsítik, hogy a mélylitoszféra-eredetű fluidumáramlások és akkumulációk, valamint a földrengés-mechanismusok egymással potenciálisan összefüggő folyamatok.

CO₂ a mélylitoszférában

Tanulmányunk megelőző esetei azokra az eseményekre fókuszálnak, amelyek kapcsolatot tártak fel a mélylitoszférás CO₂-gazdag fluidumok és a jelentősebb magnitúdójú földrengésemények között. A δ¹³C-CO₂ és nemesgáz-izotópos eredmények mellett azonban a mélylitoszférát felépítő kőzetek ásványainak kristályosodása során (vagy újrakristályosodásával) csapódott fluidumok közvetlen vizsgálatára is van lehetőség a fluidumzárványok tanulmányozása folyamán (2. ábra). A mélylitoszférás kőzeteket döntően olyan láncsilikátok (az úgynevezett piroxén-sor ásványai) építik fel, amelyek elasztikus tulajdonságaiknak, keménységüknek, sűrűségüknek és egyéb fizikai jellemzőiknek köszönhetően alkalmasak a csapódott fluidumzárványok zárt rendszerű tárolására.

2. ábra. Polarizációs mikroszkópos felvételek mélylitoszféra- (köpeny-) eredetű kőzetben található fluidumzárványokról, ahol a bezáró ásvány enzstatit (Opx - Mg₂Si₂O₆). L - a fluidumzárványt legnagyobb térfogatban kitöltő folyadékfázis. Módosított ábra a [6] alapján





3. ábra. A CO₂ P (nyomás) - T (hőmérséklet) fázisdiagramja (a) kisebb és (b) nagyobb P-T metszetben. Ez utóbbi a mélylitoszféra P-T állapotait tükrözi. A hatszögű alakzatok fluidumzárványok sematikus illusztrációi, az adott P-T metszeten mutatott jellegzetes fázisarányokkal. Ahol a zárványban fehér kör is látható, ott folyadék+gáz a fázisarány, a többi esetben a zárványt folyadék tölti ki. A 0,5-től 1,7-ig jelzett görbék azonos sűrűséggel jellemezhetők (g/cm³). További részletek a szövegben. Módosított ábra a [7] alapján

Ennek következtében a fluidumzárványok csapdázódásukat követően közel állandó anyagmennyiséggel és térfogattal jellemezhetők. A jelen tanulmányban azért van mindennek jelentősége, mert a mélylitoszféra-fluidumok jellemzően 1–2 GPa nyomáson és 850–1100 °C hőmérsékleten csapdázódtak, azonban vizsgálatukra laboratóriumi körülmények között van lehetőség. A fluidumzárványok negatív kristály alakúak, ami a bezáró ásvány és a fluidum közötti felületi feszültség optimális állapotát jelzi, azaz úgynevezett szöveti egyensúlyt mutatnak egymással. Mindezek teszik lehetővé a termodinamikai és fázispológiai megközelítések alkalmazását a zárványokat kitöltő fluidumok fizikai-kémiai tulajdonságainak megismerésére.

A mélylitoszférából származó fluidumzárványok hűtéses-melegítéses kísérletei (mikrotermometria) a fluidum fő kémiai komponense(i)nek megismerését teszik lehetővé a Gibbs-féle fázistörvény alkalmazásával: $F + SZ = K + 2$, ahol F a fázisok számát, SZ a szabadsági fokok (állapotjelzők) számát, K a komponensek számát jelenti. A fázistörvény akkor érvényes, ha a rendszer állapotát a nyomás, a hőmérséklet és a koncentrációk határozzák meg, és fennáll az egyensúly.

A mélylitoszférában csapdázódott fluidumzárványok -100 °C -ra történő hűtését követő lassú melegítés során a gáz + szilárd → folyadék + szilárd + gáz fázisegyüttes-átalakulást látjuk -56,6 (±0,2) °C-on szinte kivétel nélkül a Föld bármely mélylitoszféra-

közetéből. E folyamat a CO₂ P (nyomás) - T (hőmérséklet) fázisdiagramján található nonvariáns pontot (hármaspont, 3. ábra) jelzi, tehát rámutat a fluidum CO₂-gazdag kemizmusára. További melegítés során a folyadék + gáz kétfázisú univariáns görbe mentén láthatunk fázisváltást, ahol a fluidumzárványok -56,6 °C és 30,9 °C (ez utóbbi a CO₂ kritikus hőmérséklete) között folyadék fázisúak lesznek (homogenizációs hőmérséklet). E hőmérsékletek a CO₂ sűrűségéhez tartozó izochorok és az univariáns görbe metszéspontjait jelzik.

A mélylitoszféra-fluidumzárványok a homogenizációs hőmérséklet elérést követő melegítés során folyadék fázisúak, amely összhangban áll nagy nyomású (mélységű) eredetükkel. E fluidumok csapdázódáskori nyomás- és hőmérsékletviszonyait a sűrűségükhez tartozó izochor görbék P-T meredeksége szabja meg (3. ábra), ami jellemzően minimum 1 GPa 1000 °C-on.

Összegezve tehát elmondható, hogy a mélylitoszféra fluidumainak természetes reprezentánsai a fluidumzárványokat kitöltő anyag(ok), amelyek egyértelműen rámutatnak arra, hogy a nagy sűrűségű szuperkritikus CO₂-gazdag folyadékok stabilak a litoszféra alsó szegmensében (40–100 km) akár kontinentális, akár óceáni területről beszélünk. A mélylitoszférát alkotó szilikát és oxid ásványok nem oldják a CO₂-ot, és számottevő reakció sem várható a fluidum és a kőzet között, ami a CO₂-gazdag fluidumok akkumulációjának és áramlásuknak/szállítódásuknak kedvez, elősegítve

ezzel a földrengések kialakulását. Mindezen folyamatok egy-egy pillanatképei a litoszférabeli, vagy akár még nagyobb léptékű fluidum- (pl. széndioxid-) körforgásnak, amely hatással van az emberi életterre is, beleértve a talajt, a földfelszínt és a légkört is.

Köszönetnyilvánítás: A szerzők szeretnék megköszönni Kovács István János vendégszerkesztő felkérését a kézirat elkészítésére. A cikk témájához tartozó kutatást az MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatási projekt támogatta (LP2022-2/2022).

IRODALOM

- Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. Geological Society of America Bulletin, 70, 1959, 115–166.
- Kim S., Hosseini S.A. Study on the ratio of pore-pressure/stress changes during fluid injection and its implications for CO₂ geologic storage. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149, 2017, 138–150.
- Miller S.A., Collettini C., Chiaraluce L., Cocco M., Barchi M., Kaus B.J.P. Aftershocks driven by a high-pressure CO₂ source at depth. Nature, 427, 2004, 724–727.
- Chiodini G., Cardellini C., Di Luccio F., Selva J., Frondini F., Caliro S., Rosiello A., Beddini G., Ventura G. Correlation between tectonic CO₂ Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. Science Advances, 6, 2020, eabc2938.
- Miller S.A. The Role of Fluids in Tectonic and Earthquake Processes. Advances in Geophysics, 54, 2013, 1–46.
- Berkési, M., Guzmics, T., Szabó, Cs., Dubessy, J., Bodnar, R.J., Hidas, K., Ratter, K. The role of CO₂-rich fluids in trace element transport and metasomatism in the lithospheric mantle beneath the Central Pannonian Basin, Hungary, based on fluid inclusions in mantle xenoliths- Earth and Planetary Science Letters, 331-332, 2012, 8–20.
- Stern S.M., Pitzer K.S. An equation of state for carbon dioxide valid from zero to extreme pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 117, 1994, 362–374.

OKOZHATNAK-E VULKÁNKITÖRÉSEKET A FÖLDRENGÉSEK?

Németh Károly^{1,2,3}

¹ HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

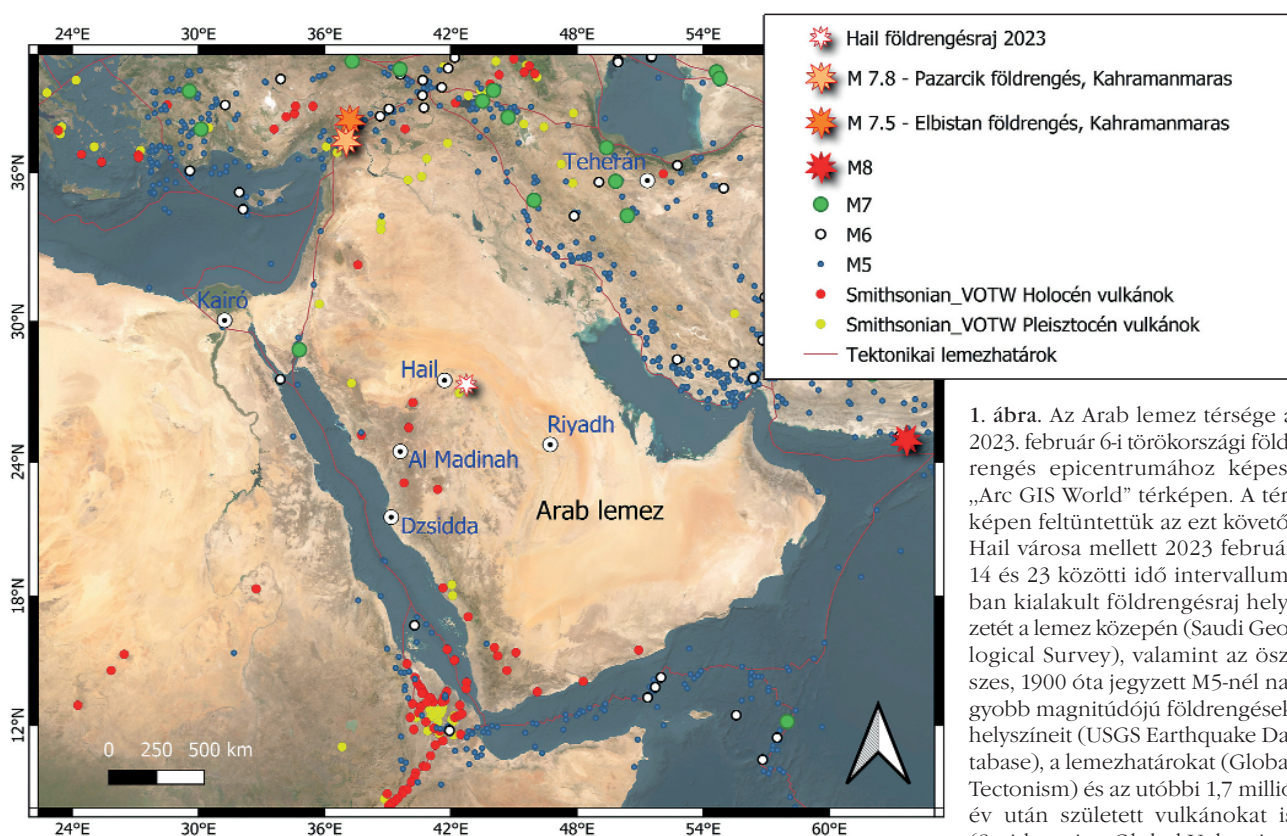
² Saudi Geological Survey, National Program of Earthquakes and Volcanoes, Jeddah, Szaúdi Arábia

³ Massey University, Volcanic Risk Solutions, Palmerston North, Új-Zéland

Bevezető

Mind a közvéleményt, mind a kutatókat régóta foglalkoztató kérdés, hogy lehet-e kapcsolat, és ha igen milyen, a földrengések kipattanása és a vulkanizmus között. Ez a kérdés újra felelevenedett a 2023. február 6-án bekövetkezett, több mint 50 ezer áldozatot követelő, 7,8 magnitúdójú

kelet-törökországi földrengés után (1. ábra). A kérdés nem ok nélküli, hisz a Kelet-Törökországot átszelő Kelet-anatóliai törésvonal mentén lemeztektonikai értelemben véve is igen változatos vulkanizmusról tudunk, amely során az elmúlt egymillió évben több száz vulkánkitörést tartunk számon több tucat vulkáni központból, amelyek e fontos lemezhatárt kijelölő tektonikai vonaltól 1000 km-es távol-



1. ábra. Az Arab lemez térsége a 2023. február 6-i törökországi földrengés epicentrumához képest „Arc GIS World” térképen. A térképen feltüntettük az ezt követő, Hail városa mellett 2023 február 14 és 23 közötti idő intervallumban kialakult földrengésraj helyzetét a lemez közepén (Saudi Geological Survey), valamint az összes, 1900 óta jegyzett M5-nél nagyobb magnitúdójú földrengések helyszíneit (USGS Earthquake Database), a lemezhatárokat (Global Tectonism) és az utóbbi 1,7 millió év után született vulkánokat is (Smithsonian Global Volcanism

Program). Nagyobb városok lila színnel és fehér-fekete körökkel vannak jelölve



Németh Károly a földtudományok professzora (Massey Egyetem, Új-Zéland), a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársa. Emellett a Szaúdi Földtani Szolgálat és az olasz Nemzeti Földfizikai és Vulkanológiai Intézet vulkanológiai szaktanácsadója. Szakterülete a vulkanológia, a monogenetikus vulkanizmus kutatása. A Nemzetközi Vulkanológiai Társaság elnökségi tagja 2011 és 2015 között, annak több tudományos bizottságának, könyvsorozatának alapítója, vezetője. 2022-től a Nemzetközi Üledékföldtani Társaság egyik alelnöke.

ságon belül helyezkednek el. A régió geológiai szolgálatai így teljes készütségbe kerültek, és minden olyan szeizmikus jelenséget fokozott figyelemmel kísérnek, ahol a legenyhébb gyanú is felmerülhet földrengésekkel kapcsolatos vulkán kitörések bekövetkeztére.

A kérdés azonban továbbra is „költői”, hogy ez ilyen formában valós veszélyeztettséget jelent-e. A témában mérvadó és kellő alaposágú kutatások szinte érthetetlen módon igen ritkák. Bár, ha elmélyedünk a probléma összetettségében, ez érthetővé válik. Mindössze az elmúlt évtizedben láthattunk néhány komolyabb, de globálisan

semmi esetre sem általánosítható munkát, amely azt mutatja, hogy létezik kapcsolat a földrengések és a vulkanizmus között, de az teljesen más idő- és térléptékben kezelendő, mint azt elsőre gondolnánk.

A vulkanizmus és a földrengések két látszólag különböző természeti jelenség; ott, ahol együttesen (például közös területen) fordulnak elő, egy kölcsönös visszacsatolási rendszer részei. Nevezetesen: a vulkánosság (szinte?) mindig szeizmicitással jár, vagyis a magma felszínre jutása maga okoz olyan feszültségeket, amelyek földrengésekben oldódnak fel. Az ilyen rengések leginkább a kürtőben „fortyogó” magma által keltett rezonancia, vagy a kürtő fala mentén gyorsabban hűlő, merevebb olvadék és a kürtőfal sűrűlódása révén alakulnak ki. Az ilyen földrengések sajátos frekvenciával, a földrengéshullámok jellegzetes formával jellemezhetők, és ezen szeizmicitás követése a modern vulkanológia egyik legfontosabb vulkánkitörés-előrejelzési technikájának tekinthető [1-3].

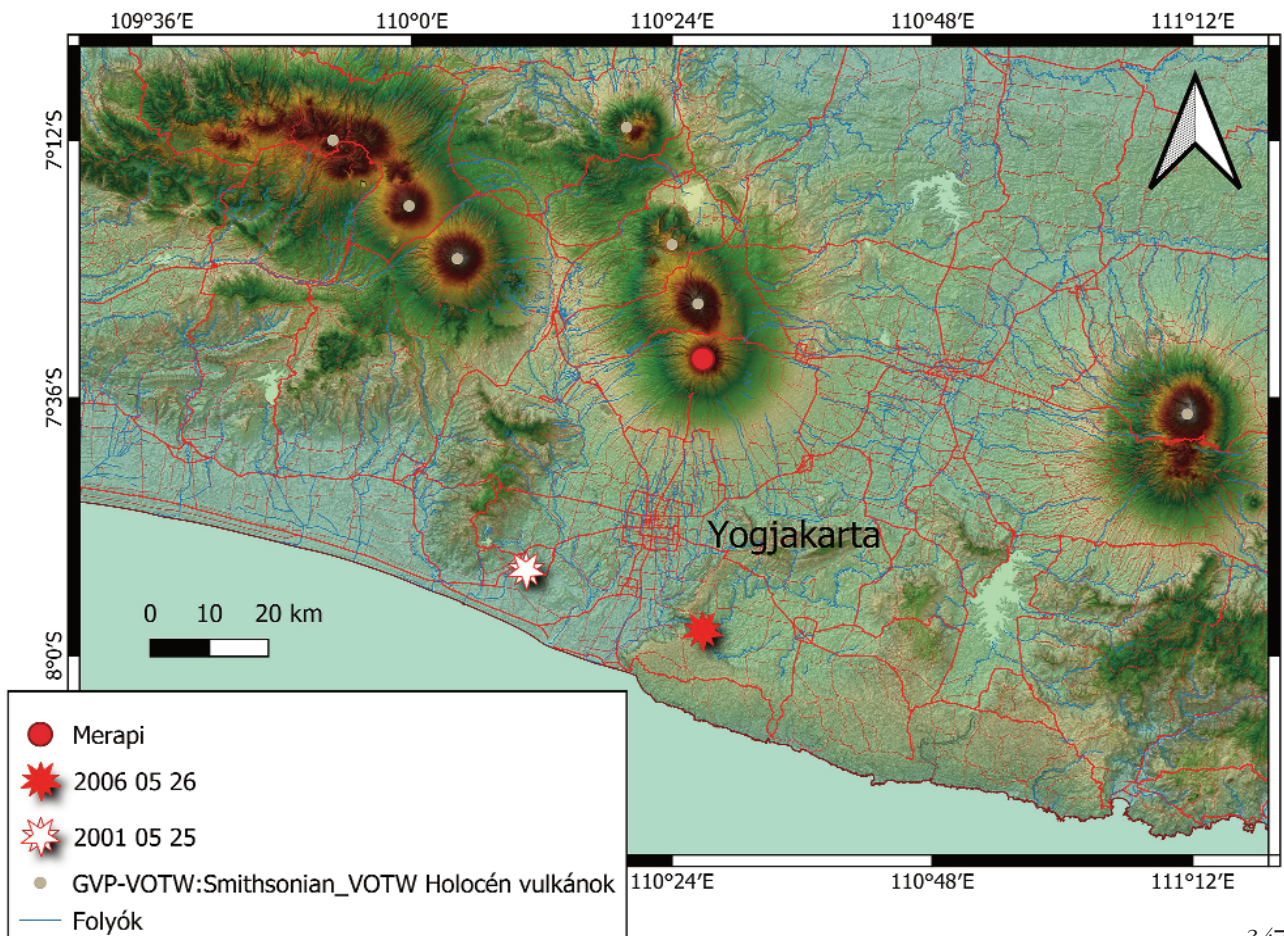
Nem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy vulkánkitörést megelőző kisebb-nagyobb földrengés magának a kitörésnek a kiváltója, okozója vagy éppen fordítva, a magma kitörés előtti mozgása okozza a földrengés(ek)e(t) (lásd az úgynevezett bradiszeizmikus kríziseket a Campi Flegrei vagy a Yellowstone kalderái esetében). Tehát van egy vulkánossággal közvetlenül kapcsolt szeizmicitás.

Azonban van egy kizárólagosan tektonikus eredetű szeizmicitás is, amely vagy a vulkáni területektől távol, a vulkánosságtól függetlenül zajlik (pl. Vrancea Romániában), vagy az aktív vulkáni területeken vagy azok közelében (pl. Taupō vulkáni zóna, Új-Zéland). Ebben az utóbbi esetben beszélhetünk igazán – és erre vannak a dokumentált példák is – arról, hogy a földrengés okoz(ott) kitörést. Ebben a dolgozatban bemutatjuk azon feltételeket, amelyek mellett e kapcsolat lehetséges.

A vulkánok és földrengések mint a földtani örökség részei

A természeti katasztrófák kiemelt szerepet játszanak az emberi társadalmak fejlődésében. Az a tény, hogy a vulkanizmus például kitűnő alapanyagot ad jó minőségű talajok létrejöttéhez, amelyen fejlett mezőgazdaság alakulhat ki, régóta ismert tény. A vulkanizmus mint a természeti katasztrófák „nagy ötösének” az egyike az egyik legváltozatosabb geokulturális eleme az emberi társadalmak korai fejlődésének, aminek hatásait, nyomait mind az emberek mindennapi életében, mind egy-egy társadalom világméretű alakulásában is megfigyelhetünk mind a mai napig [4,5]. Teljesen természetes, hogy az olyan társadalmak, melyek vulkáni területeken fejlődtek, évezredes ta-

2. ábra. Jáva (Indonézia) déli partvidéke Jogjakarta körül SRTM30 digitális terepmodellen. A 2006-os M6,4 erősségű földrengés a Merapi vulkán aktivitását drámaian megnövelte. A terület úthálózata (OpenStreetMap – piros vonalak) jól szemlélteti a vulkánkitörések és földrengések lehetséges katasztrófális hatását a terület lakosságára



pasztaalokkal rendelkeznek a vulkánkitörésekről és arról is, hogy azok milyen kapcsolatban lehetnek a földrengésekkel. Olyan aktív vulkáni területeken, ahol több évezredes emberi kultúrák fejlődtek ki, mint például az indonéziai Jáva szigetén, egészen pontos megfigyelésalapú legendákra, azok művészeti ábrázolásaira bukkanhatunk [6]. A Merapi, a Középső-Jáva területén emelkedő aktív rétegvulkán az egyik olyan fontos helyszín (2. ábra), ahol a mai társadalom életére is hatással vannak a több ezer éves legendák. A Merapi körül élő népcsoportok szinte mindegyikében feltűnik egy-egy hasonló motívum, amely szerint a Merapiban élő természetfeletti szellem és a déli óceán (az Indiai-óceán) úrnője, aki a Merapitól délre eső Parangtritis tenger partjának a közelében él, komoly elenségek. E két természetfeletti erő megbékítésére Yogjakartában, mintegy félúton a vulkán és a tengerpart között, a királyi palotában speciális ceremóniákon biztosítják, hogy a két erő egyensúlyban és békességben létezzen egymás mellett. Nyilván többféleképpen lehet értelmezni a vulkán és a tenger közelségét és a kettő között félúton kialakult kulturális szokások sokféleségét, de azért a geológiai feljegyzések igen egyértelműen azt mutatják, hogy a térségben intenzív ($>M6$) földrengések gyakoriak, és azok után hetekkel, hónapokkal a Merapi gyakran intenzív kitörési sorozatba kezd. Egész pontos dokumentáció van arról, hogy a Merapi aktivitása 2006-ban és 2010-ben is egy-egy jelentős földrengést követően növekedett meg. Hasonló eset korábban is előfordult, például 2001-ben. Mi több, ezekben az esetekben a földrengések valóban a legendákban megnevezett tengerparton történtek. Ez alapvetően azért nem annyira meglepő, mert Jáva déli pereme a szubdukciós fronttól úgy 300 km-re fekszik. Hasonló legendák nyomaira lehet bukanni szinte egész Jáva és Szumátra területén, és szinte minden esetben kimutatható, hogy egy-egy intenzív kitörési ciklust nagy intenzitású földrengések előztek meg. Ez a kapcsolat azért is figyelemre méltó, mert egész Indonéziát tekintve az aktív vulkánok száma jelentős. Indonézia geotektonikai helyzete pedig tipikusan lemezek konvergenciájához, alábukásához kötődik és az egymáshoz közeledő lemezek drámai geológiai erőt szabadítanak fel egy olyan területen, ahol több tíz millió ember van kitéve a vulkánkitörések veszélyeinek. Így ezek a legendák és az azokra épülő geokulturális jelenségek fontos információval szolgálnak arra nézve, hogy minél pontosabban előre tudjuk jelezni, hogy hol és milyen típusú vulkáni katasztrófákra számíthatunk. Főleg az őslakosság körében fontos, hogy egy-egy jelentősen veszélyeztetett (és a 6-nál nagyobb magnitúdójú rengések ide tartoznak), a vulkánok közelében élő közösség tudja mit és mikor kell tenni, ha egy ilyen intenzív rengést élnek át. Ez azért is fontos, mert a jávai vulkánok döntő többsége olyan vulkán, ami alapvetően semleges vagy savanyúbb andezit-dácit összetételű magmával táplált. Ezek a magmák viszkózusok, a felszínre jutva lávadómokat hoznak létre, melyek a kigázosodás során egyensúlyi állapotban lehetnek éveket, majd egy-egy jelentős földrengés változtathatja őket meg úgy, hogy hó-

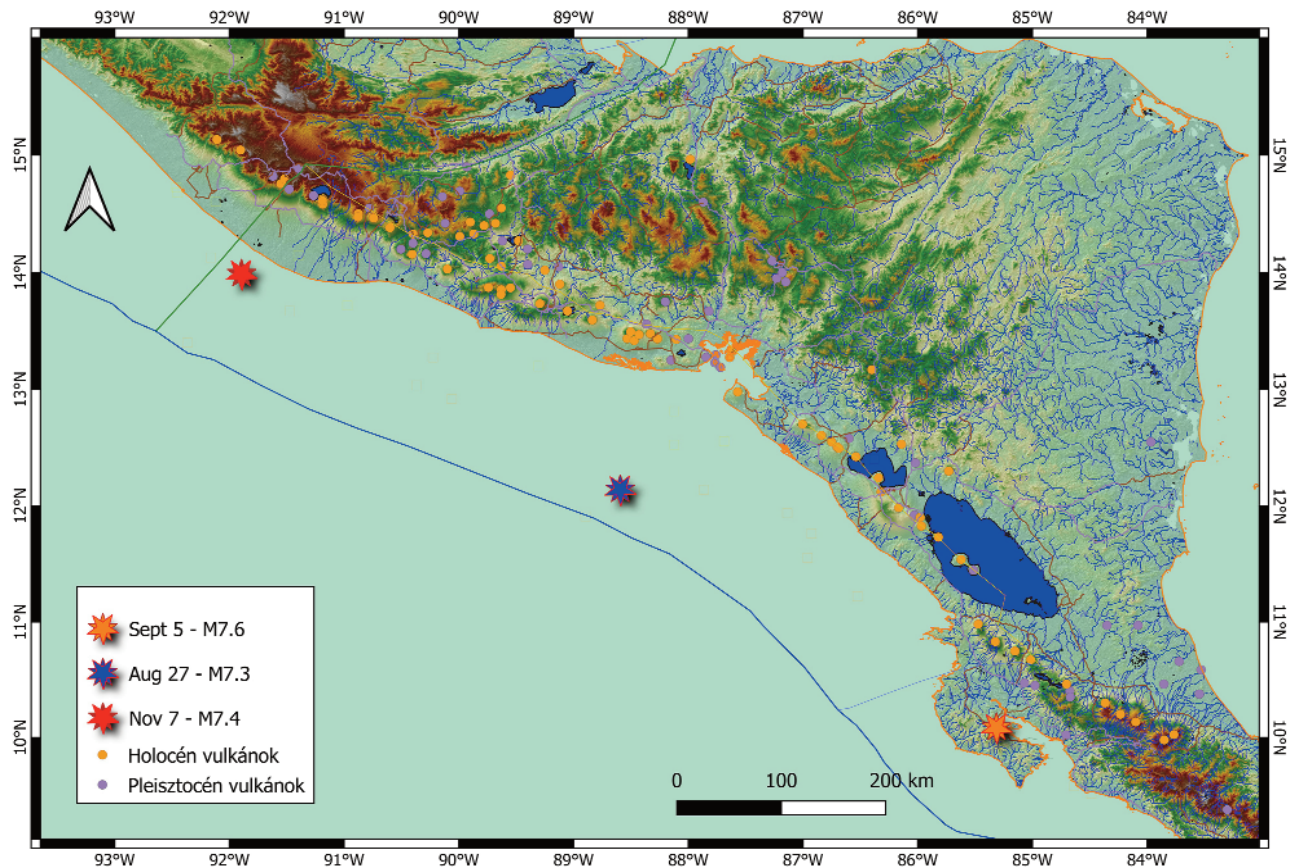
napokkal a rengés után az adott vulkán újabb aktív fázisba léphet.

A 2006-os év a Merapi életében eseménydús volt. Áprilistól október végéig szinte folyamatosan működött. A május 26-án bekövetkezett, a tengerpart közelében 15 km mélységben kipattant földrengést követő 3 hétben a Merapi aktivitása a kitörések számát és intenzitását tekintve is 3 nagyságrenddel megnövekedett. A vulkán csúcán a lávadóm növekedése felgyorsult és folyamatos blokk- és hamuár-aktivitást láthattunk. Június 14-én a vulkán déli lejtője alatt meghúzódó Kaliadem települést pedig egy izzófelhő típusú piroklaszt ár teljesen elpusztította [6]. A földrengés és az általa kiváltott intenzív vulkánkitörés közel egymillió ember kitelepítését eredményezte. Hasonló történetet láthattunk 2001-ben is, csak a 2006-os földrengés epicentruma kissé más helyen volt. A 2010-es esemény érdekes módon kisebb magnitúdójú földrengésekkel hozható kapcsolatba ($<M5$), de a vulkán egy igen explozív fázisba lépett azokat követően. A Merapi példája jól mutatja, hogy a földrengések és vulkanizmus közötti kapcsolat nem teljesen egyértelmű, nagyban függ attól, hogy az adott vulkán éppen egy aktív periódusát éli-e át, illetve attól, hogy maga a vulkán milyen típusú, azaz a földrengéseket okozó tektonikai feszültség és annak levezetése mennyire képes a vulkánban amúgy is éppen folyó geológiai folyamatokat befolyásolni.

A vulkántípusok és földrengések kapcsolata

Többször megfigyelték és dokumentálták, hogy alapvetően olyan helyeken tapasztaljuk a vulkanizmus felerősödését, ahol jelentős intenzitású, tipikusan $M6$ -nál erősebb földrengések következtek be; többnyire konvergens lemezttektonikai helyzetben, mint például a szubdukciós zónákban vagy jelentős méretű kompressziós tektonikai helyzetben lévő területeken, hosszú eltolódásos szerkezeti elemek mentén. Ilyen helyek például Észak-Amerika északnyugati partvidéke, ahol a Juan de Fuca óceáni lemez a kontinenshez éles szögben közeledve, viszonylag lapos szögben bukik Észak-Amerika alá. Ez nem egy folyamatos esemény, hanem hosszú feszültségfelhalmozódási időszakokra és hirtelen bekövetkező, földrengések által kiváltott feszültséglevezetési időszakokra bontható. Ilyen területeken gyakoriak az óriási, akár $M9$ -es erősségű katasztrófális földrengések is. Ezen a területen viszonylag jól dokumentált adatbázis áll a rendelkezésünkre arról, hogy mikor, hol és milyen erősségű földrengések történtek [7]. Mindemellett a terület geológiai szerkezete és fejlődéstörténete, valamint a Cascade-hegységvonulat vulkánjainak a kitöréstörténete is jól ismert. Ezen adatok egybevetéséből jól látszik, hogy egy 1700-ban kipattant $M9$ erősségű megaföldrengést követően a Cascade vulkánjainak kitörései kb. száz éven át többszöröződtek [7]. Hasonló kapcsolatot mutattak ki a közép-amerikai vulkánosorú esetében is [8].

2012-ben három $>M7,3$ szubdukciós földrengés pattant ki Közép-Amerika partjaitól alig 100 km-re (3. ábra).

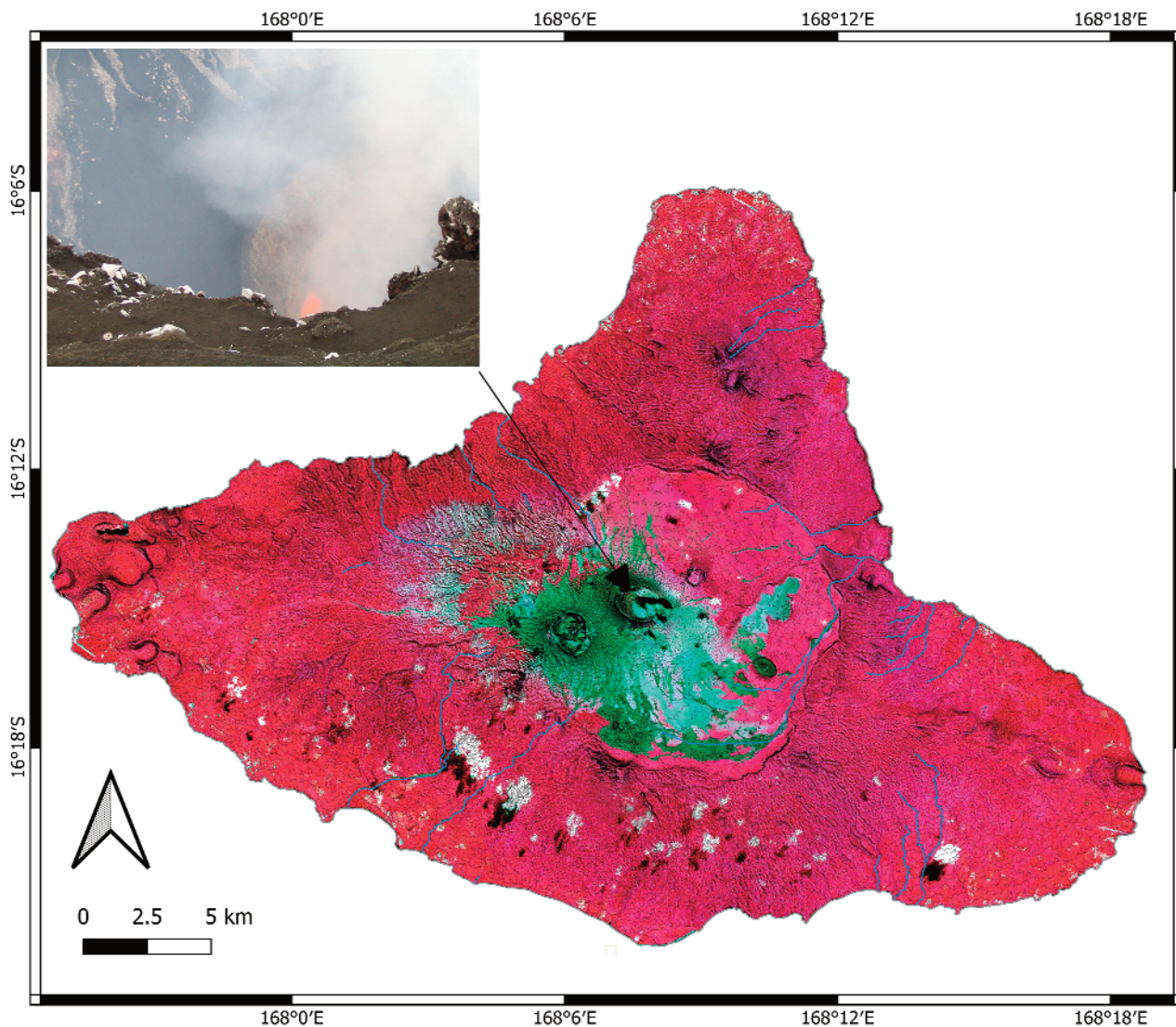


3. ábra. Három M7,3+ földrengés 2012-ben felerősítette a közép-amerikai vulkánok aktivitását [8]. A területen több tucat aktív, és még annál is több pleisztocén vulkán található a szubdukciós fronthoz (kék vonal) alig 200-km-re. A terület az SRTM30 digitális magasságmodellből lett készítve, míg a vulkánok helyzetét a Smithsonian Global Volcanism Database adta

A terület két vulkánja (San Cristóbal és Fuego) 3–8 nappal a földrengések után intenzív kitörésbe kezdett. Ha az összes vulkanizmust vizsgáljuk e három földrengés előtt található összes aktív vulkánra, akkor világosan látható, hogy 2012 után, 2019-ig bezárólag átlagosan 4,9 kitörés volt évente a 2012 előtti, 2000-ig vizsgált periódus átlagosan 1,6 évenkénti kitöréséhez viszonyítva. Ez a kitörések számának megháromszorozódását jelenti. Mivel nyilván ez lehet a „véletlen” dolga is, statisztikai tesztekkel, Monte Carlo szimulációval 10000 szimulációt lejátszva vizsgálták azt, hogy ez a jelentős kitörésfrekvencia-növekedés lehet-e pusztán a véletlen terméke. A statisztikai teszt egyértelműen azt mutatta, hogy ez nem a véletlen műve, azaz volt oksági kapcsolat a három hatalmas földrengés és a megemelkedett vulkáni aktivitás között [8]. Az ezirányú kutatások komolyságát jelzi, hogy számos remek tudományos munka jelent meg a témában az utóbbi években. Egyre nagyobb adatbázisokat egyre komolyabb statisztikai vizsgálatoknak vetnek alá. Egy átfogó statisztikai vizsgálat a meglévő teljes földrengés- (*USGS* – <https://earthquake.usgs.gov/>) és vulkánkitörés- (*Smithsonian* – <https://volcano.si.edu/>) katalógust tekintette át. A munka során egyértelműen kiderült, hogy a földrengések valóban okozhatnak vulkánkitöréseket, amennyiben bizonyos peremfeltételek teljesülnek. Ezek közül kettő kulcsfontosságúnak tűnik: 1) a vulkán kitörésképes állapotban kell legyen (pl. le-

gyen kitörőképes magma valahol a vulkáni felépítményben vagy az alatt viszonylag sekély mélységben), illetve 2) a földrengésnek a vulkánhoz kellő közelségben kell bekövetkeznie adott magnitúdóhoz számítva (pl. az igen nagy, >M7 földrengések képesek távolabbi vulkánokat is kitörésre készíteni, mint a kisebb erősségűek) [9]. Leegyszerűsítve, a földrengésnek vagy nagyerejűnek kell lennie, ha távoli vulkánokra történő hatásukat vizsgáljuk, vagy csak közeli vulkánokra hathatnak, ha kisebb magnitúdójúak. Ez azonban csak egy nagyon leegyszerűsített koncepció, számos kivétellel. A jelenség hátterében az a fizikai tény áll, hogy a földrengések vulkanizmusra gyakorolt hatása az általuk kiváltott feszültség levezetésben keresendő, amely során a földrengés-hullámok dinamikus és statikus feszültséglevezetésének módja a leginkább befolyásoló tényező egy-egy vulkánkitörés kiváltására.

A felszabadult energia a földrengés fészkeből kiindulva terjed mechanikai hullámok formájában a felszín alatti tér minden irányába. A mechanikai energia felszabadulása pedig a felszín alatti kőzettestek folytonosságának hirtelen megszűnésekor (törésekor), vagy a kőzettestek egymáshoz viszonyított elmozdulásakor következik be. Az a tér, amelyben a töréssel vagy elmozdulással együtt járó visszafordíthatatlan folyamat lejátszódik, a földrengés fészke, ezért ennek a helynek a vulkánhoz mért távolsá-



4. ábra. Ambrym (Vanuatu) szigete Sentinel-2 Hamis színes űrfelvételen, ahol jól látható a bazaltvulkán hatalmas kalderája, melyet az elmúlt 2000 év aktivitása vulkáni hamuval és lávafolyásokkal töltött fel (zöld színek). A vulkán nyílt magmás táprendszerrel rendelkezik, ezért gyakran látatavak alakulnak ki a fő kúrtókban (fotó 2005-ből)

gát kell vizsgálnunk. Mi több, ez a hely nem feltétlenül egy pontszerű tér, hanem inkább egy, a földrengést keltő törés mentén található felület. A földrengés hatókörében található kőzettestek, így egy vulkán is, mechanikai feszültségtérben vannak, amire az ebben a térben bekövetkező zavaró tényező (mint amilyen például egy földrengés) hatással lehet. Az adott kőzettestre ható statikus feszültség vagy terhelés időtől nem, csak helytől függ. A dinamikus terhelés vagy feszültség már iránytól is függő, időben változó fizikai tényező. Annak jellege szerint egy földrengés karakterisztikus szeizmikus hullámokat indít el, melyek a vulkánon is áthaladnak, befolyásolva annak terhelési állapotát. A dinamikus feszültség egy átmeneti feszültségtér-változást eredményez, míg a statikus feszültség a földrengés után is megmarad mint maradandó hatás. Így a földrengés epicentrumához közeli területeken a statikus feszültség változása jelentős, míg attól távolodva minimális. A statikus feszültségtér változása általában a

földrengést kiváltó törés hosszának néhányszorosa távolságában jelentős, attól távolodva hatása fokozatosan csökken. A statikus feszültség lehet tágulós, mely dajkók benyomulásához vagy a kúrtó kinyílásához vezethet – elősegítve a magma felszínre jutását. Amennyiben a magma már tartalmaz buborékokat, a nyomáscsökkenés azok gyorsabb felszabadulását, magmafragmentációt és kitörést okozhat. A tágulós feszültségtér horizontális elmozdulásokat is okozhat, elősegítve a hidrotermális rendszer szabadabb működését, a fluidumok mozgási lehetőségének növelésével. Kompressziós feszültségtér kialakításával alapvetően a magma „kipréselését” érhetjük el, vulkánkitöréseket is keltve. Ezek a folyamatok nyilván a földrengés epicentrumához közelebb lehetnek fontosok a vulkánkitörés beindítása szempontjából. A földrengések által kiváltott dinamikus feszültség már sokkal bonyolultabb helyzetet okozhat. A dinamikus feszültség, amit a földrengések okozhatnak, sokkal kisebb mértékben csök-

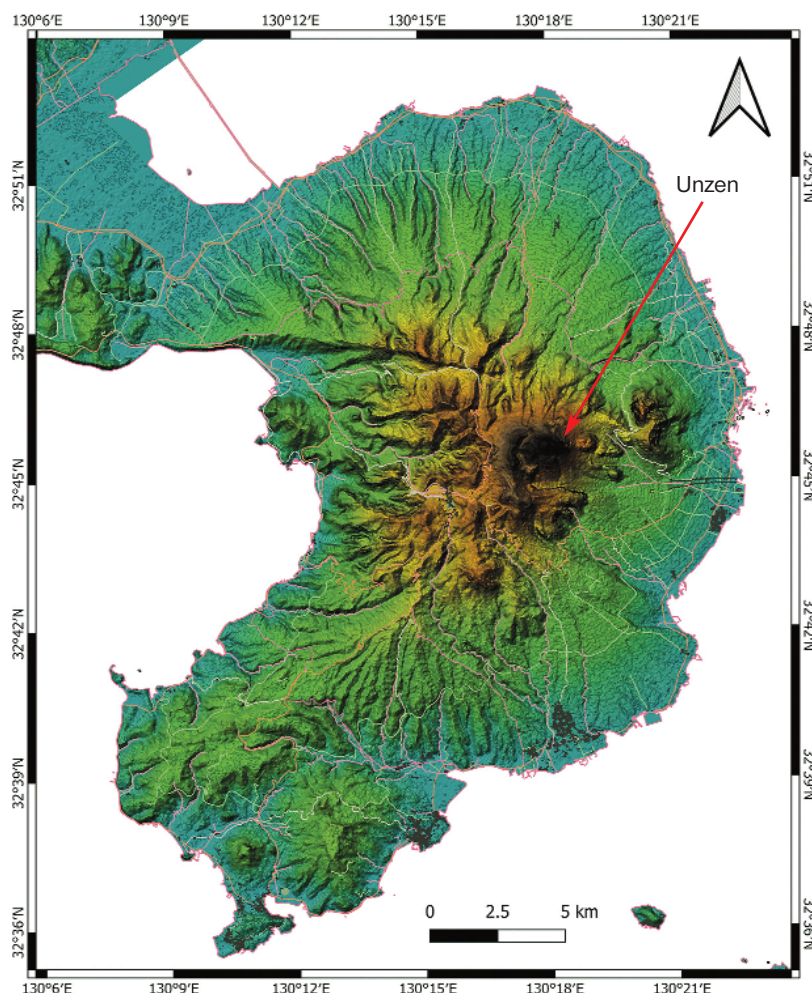
ken a távolsággal, így hatása az epicentrumtól nagyobb távolságban is érvényesül. A dinamikus feszültségtér változás nagy hatással lehet a magmás fluidumok viselkedésére: 1) jelentősen befolyásolja a buborékok képződését és növekedését, 2) túlnyomás alá helyezheti a rendszert, ami a buborékfeláramlást befolyásolhatja, illetve 3) a magmátározókban és a vulkáni kúrtóban képződő kristályok mechanikai töredezésével és azok visszahullásával a magma erőteljes felbuborékosodásához vezethet [10]. A fenti gondolatmenet elvezethet ahhoz a következtetéshez, hogy egy földrengés vulkánkitörést válthat ki.

Nemcsak a földrengésnek kell – magnitúdójához képest – kedvező távolságban lennie a vulkántól, de a vulkánnak is olyan állapotban kell lennie, hogy az kitorrhessen. Így a vulkánok típusa is az egyik meghatározó paraméter. Alapvetően a vulkánok vagy nyílt vagy zárt magmás táprendszerrel rendelkeznek aszerint, hogy azok magmás rendszere nyílt kapcsolatban van-e a külvilággal (pl. lávatavak, vagy a kúrtóban aktívan jelen levő magma formájában) vagy attól elzárt (pl. a magma csak mélyen a kúrtóban, vagy a sekély magmátározókban van e jelen). Mivel a magma viszkozitásától nagyban függ az adott vulkán szerkezete és működésének lehetséges forgatókönyve, a földrengések egész más hatással lehetnek egy nyílt és kis viszkozitású magmával táplált (pl. bazalt) vulkánra, mint amilyen az Ambrym (Vanuatu) (4. ábra), mint egy olyan vulkánra, ami nyílt kúrtójú, de ahol viszkózusabb dácitos, riolitos magmával állunk szemben, mint például az Unzen (Japán) (5. ábra).

tóban, vagy a sekély magmátározókban van e jelen). Mivel a magma viszkozitásától nagyban függ az adott vulkán szerkezete és működésének lehetséges forgatókönyve, a földrengések egész más hatással lehetnek egy nyílt és kis viszkozitású magmával táplált (pl. bazalt) vulkánra, mint amilyen az Ambrym (Vanuatu) (4. ábra), mint egy olyan vulkánra, ami nyílt kúrtójú, de ahol viszkózusabb dácitos, riolitos magmával állunk szemben, mint például az Unzen (Japán) (5. ábra).

A 2023. február 6-ai törökországi földrengés utóélete az Arab-félszigeten

A 2023. február 6-ai 7,8-as magnitúdójú földrengést követően a Közel-Keleten is felmerült annak lehetősége, hogy a földmozgás esetleg vulkáni aktivitást is eredményez. Ezt az aggodalmat felerősítette, hogy az említett földrengést követően egy közepes és kis intenzitású földrengésekből álló raj alakult ki az Arab pajzs peremén Hail városa mellett a 2023. február 14. és 23. közötti időintervallumban



Az Unzen aktív lávadómja nyugatról tekintve



Az Unzen aktív lávadómja keletről tekintve

5. ábra. Az Unzen (Japán) vulkán STRM30 digitális felszínmodellén) egy részben nyílt magmás rendszerű (a jobb oldali képek: 2007), de igen viszkózus dácitos összetételű magmával rendelkező vulkán. Egy ilyen rendszer szeizmikus aktiválódásához jelentős intenzitású és közeli földrengésre van szükség. Az Unzen különösen veszélyes, mert a meredeken növekvő lávadómok már közepes intenzitású rengésektől is instabillá válhatnak kisebb kitorréseket generálva, majd azok összeomlása blokk- és hamuárakat és vulkáni törmelék-lavinákat indíthat el

[11] (1. ábra). A helyi közösségek pánikba estek a hírekben látható riasztó képektől, így a szokásos terepi megfigyelések mellett a Szaúdi Geológiai Szolgálat kiemelt figyelemmel kezdte ezt a földrengésrajt és lehetséges következményeit vizsgálni, többek között a felszín alatti vizek hőmérsékletének a mérésével és tüzetes terepi megfigyelésekkel. Az eredmény, mint várható volt, nem mutatott ki semmiféle közvetlen kapcsolatot a törökországi földrengések és a vizsgált arabiai földrengésraj között. A kutatómunka viszont felvetette azt a kérdést, hogy az a több mint 3000, egymillió évesnél fiatalabb monogenetikus, rövid életű és kis térfogatú vulkán, amely az Arab-félsziget nyugati peremén, a Holt-tenger törésrendszerén át egészen a kelet-anatóliai törésrendszer melletti területig követhető, vajon nem születhetett az Arab-mikrokontinens lemezhatárán bekövetkezett szeizmikus események hatására. A kérdésfelvetés jogos, de megválaszolásához jelenleg messze nincs megfelelő mennyiségű adatunk. Az is igaz, hogy a Vörös-tenger mellett ritkák a nagyon erős földrengések (1. ábra), ráadásul azok epicentrumai jelentős távolságra van az arabiai vulkánoktól. Az viszont tény, hogy a vulkanizmus és tektonizmus kapcsolata igazolt, különösen a Holt-tenger törésrendszere mentén, ahol kis vulkánok sora települt magára a törészónára [12]. Ezek a vulkánok azonban idősebbek, így bármilyen kapcsolat a keletkezésük és a szerkezeti mozgások vagy szeizmicitás között komoly és részletes geológiai térképezést és kutatómunkát igényel, melyek még kezdeti stádiumban vannak.

Hogyan tovább?

Mint ahogy bemutattuk, nemcsak a vulkáni tevékenység maga vált ki szeizmikus mozgásokat, hanem a tektonikus eredetű földrengések is okozhatnak vulkánkitöréseket, de hogy pontosan hogyan, azt még kutatni kell. Az biztos, hogy minél közelebb vagyunk egy földrengés epicentrumához, és minél nagyobb annak a magnitúdója, annál nagyobb az esélye egy közeli vulkán aktivizálódásának, feltéve, ha van mit aktivizálni, azaz van kitörőképes magma a felszín közelében. Úgy tűnik, hogy az eddig kimutatható összefüggésekből megállapítható egy távolság-magnitúdó kritérium, amely szerint joggal feltételezhető, hogy hol és mikor lehetséges, hogy egy adott földrengés vulkánkitörést generáljon a hatókörén belül [9]. Ez az empirikus statisztikai elem fontos része lehet a komplex természeti katasztrófák kezelésének abban az értelemben, hogy bizonyos erősségű és típusú földrengések után hol kell azonnal felkészülni egy lehetséges vulkánkitörésre is [4], és így milyen lépcsőzetes katasztrófamegelőző és

-elhárítási helyzetre is felkészülni. Az, hogy pontosan milyen típusú vulkánkitörésre számíthatunk, alapvetően a vulkán pillanatnyi aktivitási állapotának és a vulkán típusának, illetve az azt tápláló magma kémiai összetételének a függvénye [10]. Mivel mindeddig igen kevés statisztikailag értelmezhető adatot szolgáltató kutatás történt, mindenképp fontos lenne ezen az úton tovább haladni és olyan területek átfogó vizsgálatába kezdeni, mint Japán és a Fülöp-szigetek régiói vagy az Andok vonulata. Nagy lehetőség van a komplex statisztikai vagy gépi tanulási módszerek bevetésére ahhoz, hogy a rendkívül bonyolult földrengésség-vulkánosság kölcsönös visszacsatolási rendszert megértsük.

Köszönetnyilvánítás: Dr Szakács Sándor (Alexandru) alapos bírálata nagyban hozzájárult e kézirat pontosításához, köszönet érte. Dr Kovács István János meghívásáért e Fizikai Szemle-számba külön köszönettel tartozom.

IRODALOM

- McNutt SR. Volcanic seismicity. In *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdson H, Houghton BF, McNutt SR, Rymer H, Stix J, [Eds]; pp. 1015–1033, Academic Press: San Diego, (2000).
- Vyacheslav MZ. *Introduction to Volcanic Seismology*, Third Edition Elsevier: Oxford, (2017).
- Gudmundsson A. *Volcanotectonics: Understanding the Structure, Deformation and Dynamics of Volcanoes*, Cambridge University Press: Cambridge, (2020).
- Fepuleai A, Weber E, Németh K, Muliaina T, Iese V. Eruption styles of Samoan volcanoes represented in tattooing, language and cultural activities of the indigenous people. *Geoheritage* 9, 395–411, (2017) [doi:10.1007/s12371-016-0204-1].
- Cashman KV, Cronin SJ. Welcoming a monster to the world: Myths, oral tradition, and modern societal response to volcanic disasters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 407–418, (2008), [doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.040].
- Troll VR, Deegan FM, Jolis EM, Budd DA, Dahren B, Schwarzkopf LM. Ancient oral tradition describes volcano-earthquake interaction at Merapi volcano, Indonesia. *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography* 97, 137–166 (2015), [doi:10.1111/geoa.12099].
- Hill DP, Pollitz F, Newhall C. Earthquake-volcano interactions. *Physics Today* 55, 41–47, (2002), [doi:10.1063/1.1535006].
- González G, Fujita E, Shibasaki B, Hayashida T, Chiodini G, Lucchi F, Yokoyama I, Németh K, Mora-Amador R, Moya A, et al. Increment in the volcanic unrest and number of eruptions after the 2012 large earthquakes sequence in Central America. *Scientific Reports* 11, 22417, (2021), [doi:10.1038/s41598-021-01725-1].
- Légrand D. Which earthquake can trigger a volcanic eruption? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 432, 107698, (2022), [doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107698].
- Seropian G, Kennedy BM, Walter TR, Ichihara M, Jolly AD. A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nature Communications* 12, 1004, (2021), [doi:10.1038/s41467-021-21166-8].
- Németh K, Hosny A, Ashor M, Abdulhafez K, Hablil T, Alsowaigh A, Moqem F. Report on the site visit to the epicenter region of the Ash Shinan swarm east in Hail City on February 14–23 2023. *Saudi Geological Survey Data-File Report*, SGS-DF-2023, 1–8 (2023).
- Segev A, Schattner U. Why does volcanism associated with the Dead Sea fault occur only along its crossing with the Irbid rift and Harrat Ash-Shaam volcanic field? *Tectonophysics* 848, 229718, (2023), [doi:10.1016/j.tecto.2023.229718].

fizikaiszemle.hu

A honlapon megtalálhatja új és régebbi lapszámainkat, valamint sokféle mellékletet is!

FÖLDRENGÉSMODELL A FUTÓSZALAGON

Antal Dávid, Gergely Attila, Néda Zoltán

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Kolozsvár, Románia

A földrengések nagyságeloszlásának modellezésére a legáltalánosabban használt modellcsalád a Burridge–Knopff-típusú rugó-tömb rendszer [1]. A modellt leginkább számítógépes szimulációkkal vizsgálják, és nagyon kevés olyan próbálkozás van, ahol ezt kísérletileg is megvalósítják, illetve ezen kísérleti eredményeket hasonlítják össze a valós földrengések statisztikai adataival. Célunk itt egy olyan könnyen megépíthető berendezés bemutatása, amely segítségével a modell aránylag egyszerűen tanulmányozható, és tanulságos kísérleti eredményeket szolgáltat. A továbbiakban röviden összefoglaljuk azon univerzális jellegű törvényeket, amelyek a földrengések statisztikájának a leírására szolgálnak. Bemutatjuk a Burridge–Knopff-modellt, ennek kísérleti megvalósítását és a modell által szolgáltatott valós földrengésekkel analóg eredményeket.

A földrengések statisztikai jellegű univerzális törvényszerűségei

A két legismertebb empirikusan megállapított statisztikai törvényszerűség a földrengésekre a Gutenberg–Richter,

illetve az Omori-törvény. A Gutenberg–Richter-törvény [2, 3] egy nagyon általános skálátörvény a földrengések gyakoriságára az általuk felszabadított energia függvényében. Az eredeti megfogalmazás alapján azon események N száma, amelyeknek magnitúdója nagyobb mint egy M érték, exponenciálisan csökken

$$N(M) = N_0 10^{-bM},$$

ahol N_0 és b két konstans. Figyelembe véve, hogy a fenti összefüggésben szereplő M magnitúdó logaritmikusan függ a földrengés során felszabadított E mechanikai energiától, könnyen belátható (lásd például [4]), hogy egy E energiájú földrengés előfordulási valószínűség-sűrűsége, $\rho(E)$ hatványfüggvény szerint csökkenő függvény lesz:

$$\rho(E) \sim E^{-\gamma}.$$

Ezen Pareto-típusú eloszlás skálázási exponensére $\gamma = 1,6$ körüli univerzális értéket mérünk néhány aktív és jól ismert földrengésszóna esetén (pl. Japán, Dél Kalifornia, a romániai Vrancea vidéke) [4].

Az Omori-törvény [5] az utóregések statisztikáját írja le. Ennek értelmében egy nagy földrengést követő utóregések megjelenési rátája $n(t)$ (másképpen fogalmazva az időegységenként bekövetkező utóregések száma) hatványfüggvényyszerűen csökken a kezdeti földrengéstől eltelt idő függvényében. A hatványfüggvény p exponense a $0,7-1,5$ intervallumba esik, c meg egy konstans jelöl, amelynek értéke változik a földrengésszónákkal:

$$n(t) \sim (c+t)^{-p}.$$

Az Omori-törvény a földrengések klaszterezettségére utal, és ekkor a skálafüggetlen hatványfüggvényeszerű lecsengés értelmében nem értelmezhető egy karakterisztikus lecsengési idő.

Egy további, kevésbé ismert törvényszerűséget kapunk, ha vizsgáljuk egy bizonyos E_c küszöbenergia feletti földrengések között eltelt időintervallumok (visszatérési idők), $p(t)$ eloszlását. Egy adott földrengésszóna és egy adott küszöbenergia esetén, ha ezen t visszatérési időket a $\langle t \rangle$ átlaghoz viszonyítjuk ($\tau = \frac{t}{\langle t \rangle}$), ezek eloszlására gamma eloszlást kapunk, amelynek a paraméterei már nem függenek az E_c küszöbenergia értékétől (lásd például [4])

$$\rho(\tau) \sim \tau^{\alpha-1} e^{-\alpha\tau},$$

ahol általában $\alpha < 1$.

Az egydimenziós Burridge–Knopff-modell

Az egydimenziós (1D) Burridge–Knopff-földrengésmo- dell két egymással súrlódó tektonikus lap csúszó-tapadó dinamikáját modellezi egy rugó-tömb lánc segítségével. A modell alapelemei az 1. ábrán vannak szemléltetve. A sár-



Antal Dávid a Babeş–Bolyai Tudományegyetem 2. éves hallgatója fizika-informatika szakon. Tanulmányait a 2021–2022-es tanévben kezdte. Tanulmányai mellett kutatásokat végez a földrengésmo- dellek tanulmányozásában és ezek kísérleti megvalósításában.

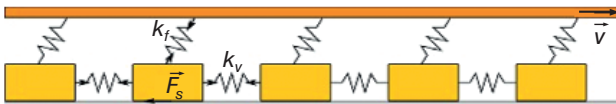


Gergely Attila a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika Karának másodéves PhD-hallgatója. Kutatási területe a különböző fizikai rendszerekben tapasztalható oszcillációs és kollektív viselkedések vizsgálata kísérleti, numerikus és elméleti módszerekkel.



Néda Zoltán a Babeş–Bolyai Tudományegyetem elméletifizika-professzora, az egyetem doktori iskoláinak az igazgatója, az MTA külső tagja. Kedvelt kutatási témái a spontán szinkronizáció, a rugó-tömb modellek, az evolúciós egyenletek, a dinamikai rendszerek, illetve a gazdasági fizikai és ökológiai problémák statisztikus fizikai modellezése.

gával jelölt, rugókkal összekötött tömbök az alattuk levő vízszintes lapon csúszhatnak. A tömbök rugókkal egy másik, narancssárgával jelölt, vízszintes rúdhoz is csatlakoznak. Ezen rúd konstans \vec{v} sebességgel mozog vízszintes irányban, és a rugókon keresztül magával ragadja az alsó síkon levő tömböket. A tömböknek a síkon való csúszását a tömbök és a sík között ható F_s súrlódási erő fékezi, ugyanakkor a tömbök közé helyezett rugók a tömbök kollektív mozgását illetve ellenállását hivatottak elősegíteni. A rúd mozgása a tömbök csúszó-tapadó típusú dinamikáját fogja eredményezni, ahol a tömbök korrelált megcsúszásai lavinák formájában történnek. A tömböknek a síkhoz viszonyított elmozdulásai a rendszer mozgási energiájának a növekedését eredményezik, amely a súrlódási erőkön keresztül disszipálódik.



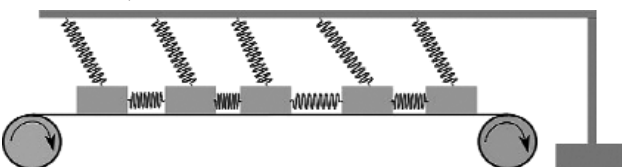
1. ábra. Az egydimenziós Burridge-Knopoff-típusú rugó-tömb modell elemei

A felső rúd, illetve a síklap, amelyen a tömbök találhatók, a két egymáshoz viszonyítva mozgó tektonikus lapot jelképezi, a tömbök és a modell a két tektonikus lap közötti mechanikai kölcsönhatásokat (rugalmas alakváltozásokat), illetve a lapok közötti súrlódási erőt hivatott modellezni. A tömbök kollektív, lavinaszerű megcsúszásai és az ehhez tartozó energiadisszipációk a földrengéseket szolgáltatják, és ezeknek az energiáit modellezzük. A modellnek létezik egy realiztikusabb, kétdimenziós változata is [6], ahol a tömböket négyzettrács-topológiában helyezük az alsó síkra, és a legközelebbi szomszédokat rugókkal kötjük össze. Minden tömb rugóval egy felső vízszintes síklaphoz is kapcsolódik, ez a síklap meg az alsó laphoz viszonyítva ismét \vec{v} sebességgel mozog.

Az 1D Burridge-Knopoff-modell kísérleti megvalósítása

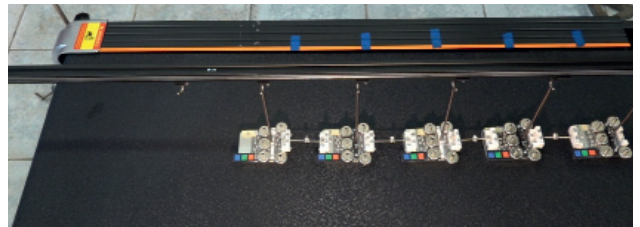
Tömbökből és kétirányú (összenyomható-nyújtható) rugókból egy Burridge-Knopoff-típusú egydimenziós lánc készíthető, amelyet egy futószalagra helyezünk a 2. ábrán látható módon. A lánc tömbjeit egyirányú (csak nyújtható) rugókkal egy vízszintes, földhöz rögzített rúdhoz kötjük. Az így elkészített rendszerben megtartjuk a rúd és a sík konstans relatív mozgását.

2. ábra. Futószalagra helyezett 1D Burridge-Knopoff-modell szemantik ábrája



A tömböket fémdobozokból készítettük. A rugókat 3D-nyomatott elemekkel és csavarokkal rögzítettük a fémdobozokhoz úgy, hogy a rendszerben a testek száma modulárisan bővíthető legyen. Rögzített platformként egy alumíniumrudat használtunk, amelyre a testeket rugókon keresztül kapcsoltuk. Ahhoz, hogy a futószalagot megfelelően kis sebességekkel tudjuk vezérelni (ez a tapadócsúszó viselkedés megjelenéséhez szükséges), egy Arduino-alapú vezérlőegységet építettünk. A futószalagra maximálisan hat testből álló rugó-tömb rendszert tudunk felrakni.

A rendszer dinamikai kiértékeléséhez digitalizálni kell a testek időbeli helyzetét. A rendszer mozgását videófelvételek segítségével elemeztük. A testek azonosításához színes matricákat használtunk, amelyek helyzetét egy általunk írt Python-program állapította meg. A kísérleti berendezés felülről készített fényképe a 3. ábrán látható.



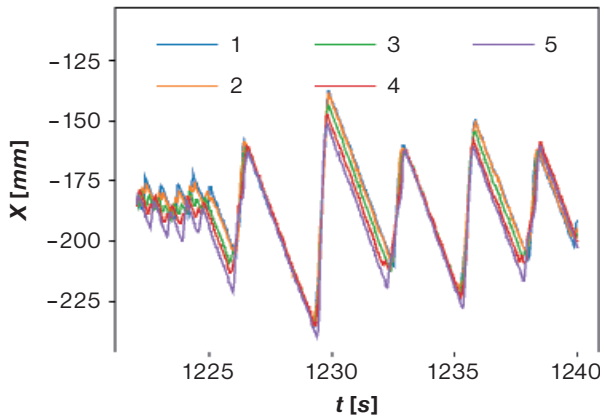
3. ábra. Futószalagra helyezett 1D Burridge-Knopoff-modell kísérleti megvalósításának a fényképe

Néhány videófelvételt a rendszer időbeli dinamikájáról a YouTube-on nyomon követhet az érdeklődő olvasó [7]. Megjegyzendő, hogy egy ehhez hasonló modellt már tanulmányoztunk a komplex dinamikus rendszerek szempontjából, és ennek a rendszernek a kaotikus viselkedését a Fizikai Szemle hasábjain is tárgyaltuk [8]. A jelen kísérleti berendezésünk ennek a kísérletnek a továbbfejlesztett változata.

Adatgyűjtés és feldolgozás

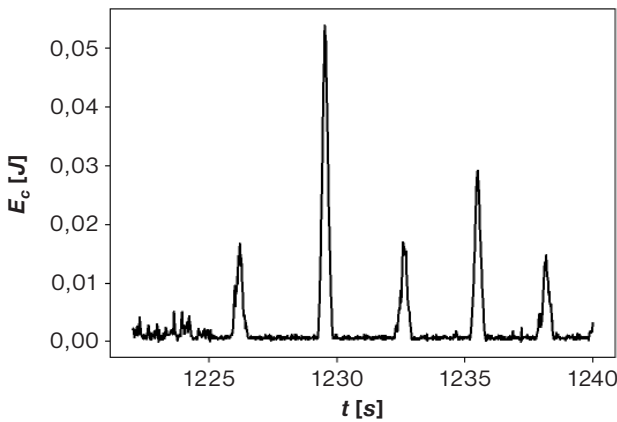
Minden egyes kísérletről egy 29 perces teljes HD minőségű és 50 fps (képkocka per másodperc) sebességű videó készült. A videó első 20–40 másodpercében a futószalag állt, erre a képfeldolgozó algoritmus kalibrálásához és a zaj kiszűréséhez volt szükség. A felvételek alapján minden képkockára kiszámítottuk a tömbök távolságát az egyensúlyi helyzetüktől. Egy öt tömbből álló rendszer esetén például a 4. ábrán látható idősorokat kaptuk.

Ezen idősorok numerikus deriváltjait képezve megkapjuk a tömbök sebességét, ebből pedig kiszámítható a testek kinetikus energiája. A 4. ábrán szemléltetett kitéréseknek megfelelő kinetikus energiák idősora a 5. ábrán látható. Annak érdekében, hogy a különböző kísérleti paramétertartományokban jellemezhesük az így generált „földrengések” statisztikáját, szükségünk van egy jól alkalmazható földrengés-definícióra. Kísérleti modellünkben a „földrengést” és ennek energiáját a rendszer összes kinetikus energiája alapján értelmeztük. Földrengéseknek

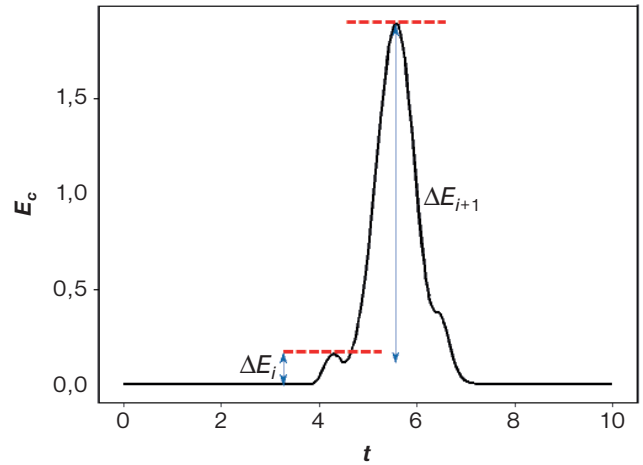


4. ábra. Adatelemzés. Az öt tömbből álló Burrridge-Knopoff- (BK-) rendszer esetén a tömbök egyensúlyi állapothoz viszonyított kitérései az idő függvényében

azt az eseményt tekintjük, amely során a rendszert alkotó testek összes kinetikus energiája egy adott értéknél hosszabb ideig monoton növekszik. A földrengéshez tartozó energiát úgy definiáltuk, mint a végső és kezdeti kinetikus energiák különbségét ezen monoton növekvő szakaszon. Ezt a földrengés-definíciót szemlélteti a 6. ábra, ahol két egymást követő „földrengés” látható, egy kisebb és egy nagyobb energiájú. Az ábrán a földrengések energiáit ΔE_i illetve ΔE_{i+1} -gyel jelöltük.



5. ábra. Adatelemzés. A 4. ábrán lévő idősorokon szemléltetett kitéréseknek megfelelő összes kinetikus energia időfüggése



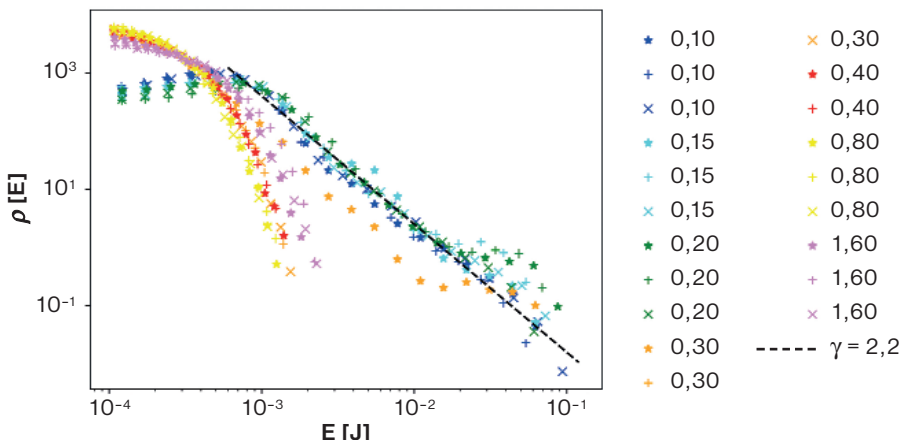
6. ábra. Szemléltető ábra a földrengésekhez tartozó energia kiszámítására az összes kinetikus energia idősorából. Az időtengelyen és az energiatengelyen az értékeknek nincs valós fizikai dimenziójuk

Kísérleti eredmények

Az itt tárgyalt kísérletekhez 5 testet használtunk, amelyek mindegyikének a tömege hozzávetőlegesen 350 g volt. A testeket összekötő rugók rugóállandója $k_p = 110$ N/m, a testek és az alumíniumrúd közti rugók rugóállandója pedig $k_f = 16$ N/m. A kísérletek során a futószalag sebességének a földrengés-statisztikára gyakorolt hatását vizsgáltuk a $v = 0,1-3,2$ km/h sebességintervallumban. Célunk a modellben megfigyelt „földrengések”-re reprodukálni a valós földrengésekre ismertett statisztikai törvényszerűségeket. Mivel aránylag kis méretű Burrridge-Knopoff rugó-tömb rendszert sikerült a futószalagra építeni, megelégszünk azzal, ha ezen törvényszerűségekre utaló viselkedési trendeket kapunk.

A futószalag sebességének függvényében két minőséileg különböző dinamika figyelhető meg. Kis sebességek esetén, egészen a $v = 0,3$ km/h értékig a keresett tapadó-csúszó típusú [9] dinamika dominál. Ezen sebességérték felett folytonos csúszás, illetve egy erre rátevődő kis amplitúdójú rezgés jellemző [10].

A kapott idősorokra alkalmazva a bevezetett földrengés-definíciót az észlelt „földrengések” energiáinak való-

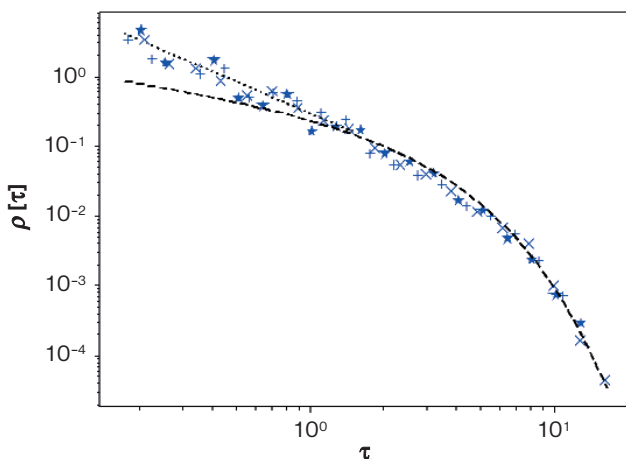


7. ábra. A Burrridge-Knopoff-modell kísérleti megvalósításával kapott eredmények a Gutenberg-Richter-törvény érvényességére. Az ábrán a kísérletileg kapott „földrengés”-energiák eloszlásának sűrűségfüggvénye látható különböző futószalag-sebességekre. A feltüntetett futószalagsebesség-értékek km/h-ban vannak megadva. Kis sebességek esetén megfigyelhető a várt skálafüggetlen, hatványfüggvényszerű lecsengés. Szaggatott vonallal jelöljük a $\gamma = 2,2$ -es exponensű hatványfüggvény viselkedését

színűség-sűrűsége a 7. ábrán látható. Logaritmikus tengelyeket használva, az ábrán több futószalag-sebesség esetén kapott mérési eredmény látható. A különböző sebességek különböző színekkel vannak bemutatva, az azonos sebességhez tartozó mérési eredményekre különböző szimbólumokat használtunk. Megfigyelhető, hogy a futószalag kis sebességtartományában a földrengések méreteloszlása az energia függvényében hatványfüggvényszerű lecsengést mutat, ahol a hatványfüggvény kitevője $\gamma \approx 2,2$. Ezen paramétertartományban az 1D Burrridge–Knopoff-modell visszaigazolja a földrengésekre ismert Gutenberg–Richter-törvényt. Mivel egydimenziós rugó-tömb láncot használunk a valóságos kétdimenziós megcsúszási probléma modellezésére, nem is várható a skálázási exponensek jobb egyezése. A 7. ábrán az is látható, hogy kis és nagy futószalag-sebességek esetén a lavinagyságokra jellemző eloszlások sűrűségfüggvénye jól elkülönül egymástól.

Felhasználva a kísérletileg kapott idősorokat, meghatározható a visszatérési idők eloszlása is. A számunkra releváns energiatarományt tekintve, a visszatérési idők statisztikájához az $E_c = 10^{-2}J$ küszöbenergia-értéket tekintettük. Meghatároztuk tehát azon események közti időintervallumok nagyságeloszlását, amelyek energiája nagyobb, mint az E_c küszöbérték. Az így kapott eloszlás sűrűségfüggvénye a 8. ábrán van bemutatva három olyan mérésre ahol $v = 0,1$ km/h. Az ábrán látható, hogy a kapott eloszlás jól közelíthető egy $\alpha = 0,48$ paraméteres gamma eloszlással. Akárcsak a valós földrengések esetén, a $\tau < 1$ időintervallumok határesetében eltérést tapasztalunk a gamma eloszlástól, és egy hatványfüggvény szerinti csökkenő trend tapasztalható. Ezen tartományban érvényes az Omori-törvény, és a hatványfüggvény szerinti csökkenés a nagy lavinákat kísérő „utórengéseknek” tulajdonítható.

8. ábra. Az 1D Burrridge–Knopoff-modellben kísérletileg mért „földrengések” visszatérési idejének eloszlása logaritmikus tengelyeken, az $E_c = 10^{-2}J$ küszöb energia esetén. A három kísérleti eredmény a $v = 0,1$ km/h futószalag sebességekre különböző szimbólumokkal van jelölve. Szagatott vonallal ábrázoljuk az $\alpha = 0,48$ -hoz tartozó gamma eloszlás alakját, és pontozott vonal jelöli a $\tau^{-1.5}$ hatványfüggvényt



Következtetések

Az 1D Burrridge–Knopoff-modell futószalagon történő kísérleti megvalósítását mutattuk be. Mivel a földrengések szempontjából releváns lavinyszerű viselkedést csak kis futószalag-sebességekre tapasztaljuk, lényeges a futószalag vezérlőrendszerét úgy megváltoztatni, hogy ilyen kis sebességekre működjön. Célunk az volt, hogy ezen modell kísérleti megvalósításával szemléltessük a földrengésekre jellemző statisztikai törvényszerűségeket. Érdekes módon már egy kis elemszámú rendszer is képes reprodukálni a valós földrengésekre jellemző statisztikai törvényszerűségeket. A futószalagon generált „földrengések” lavinyszerű, kollektív viselkedést mutatnak kis futószalag ($v \leq 0,3$ km/h) sebességek esetén. Ezen kísérleti „földrengések” méreteloszlására visszakaptuk a Gutenberg–Richter-törvényt egy olyan ($\gamma = 2,2$) hatványkitevővel, ami eltér a valós földrengésekre számított ($\gamma = 1,6$) értéktől. Az eltérést annak tulajdonítottuk, hogy a valós kétdimenziós feladatot egydimenziós rugó-tömb láncsal modelleztük, megváltoztatva ezáltal a feladat dimenzionalitását. A visszatérési idők eloszlásaira, a valós földrengésekhez hasonlóan gamma eloszlást kapunk a kis futószalag-sebességek esetén. Ugyanakkor ezen statisztika keretében a kis visszatérési időkre az Omori-törvényre utaló hatványfüggvényszerű viselkedést is tapasztalunk. A kísérleti eredményeink jó összhangban vannak az 1D Burrridge–Knopoff-modellre kapott számítógépes szimulációs eredményekkel is [4]. Tekinthejtük akár úgy is, hogy ezen kísérleti megvalósítás egy újabb lépést jelent a Burrridge–Knopoff-modell alkalmazhatóságának a validációjához.

IRODALOM

1. R. Burrridge és L. Knopoff. Model and theoretical seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, 57(3), June 1967, 341–371.
2. B. Gutenberg és C. F. Richter. Frequency of earthquakes in California*. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), October 1944, 185–188.
3. B. Gutenberg and C. F. Richter. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 46(2), April 1956, 105–145.
4. A. Kuki, S. Lipcsei, I. Gere, F. Járjai-Szabó, A. Gergely, D. Ugi, P. D. Ispánovity, Z. Dankházi, I. Groma és Z. Neda. Statistical analogies between earthquakes, micro-quakes in metals and avalanches in the 1D Burrridge–Knopoff model. Geofizika, 40(1), June 2023, 1–27.
5. T. Utsu. A statistical study on the occurrence of aftershocks. Geophysical magazine, 30, 1961, 521–605.
6. Z. Olami, H. J. S. Feder és K. Christensen. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. Physical Review Letters, 68(8), February 1992, 1244–1247.
7. A. Gergely. BK rendszer videó bemutatása. https://www.youtube.com/watch?v=3aayKm_uZ1E&list=PLamJmxTYiR_1siN11ohu3QefKgQRwvY, 2023. [Online; használat 14-Június-2023].
8. B. Sándor, Z. Neda, F. Járjai-Szabó és T. Tél. Káosz a futószalagon. Fizikai szemle, 2, 2014, 40–45.
9. A. Gergely. Tapadó-csúszó dinamika. https://www.youtube.com/watch?v=jdMruuSJPR4&ab_channel=AttilaGergely, 2023. [Online; használat 02-Június-2023].
10. A. Gergely. Folytonos csúszás. https://www.youtube.com/watch?v=yW11P1fnSfg&ab_channel=AttilaGergely, 2023. [Online; használat 02-Június-2023].

A LÍTIUMION-AKKUMULÁTOROK HAZAI GYÁRTÁSÁRÓL – KUTATÓI SZEMSZÖGBŐL

Péter László

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

Jelen cikkben a Fizikai Szemle főszerkesztőjének kérésére megpróbálok megvilágítani néhány összefüggést a lítiumion-akkumulátorok feltalálása, elterjedése és szerepe kapcsán, kitérve az olykor viharos társadalmi reakciókra a gyártás és felhasználás veszélyeivel kapcsolatban. Noha egyetlen rövid írásban nem lehet elmondani a „teljes igazságot”, és kívülálló kutatóként ennek ismeretét nem is tulajdoníthatom a magaménak, igyekszem a nyilvánosan elérhető adatok alapján kutatóhoz illő széleskörű és elfogulatlan elemzést adni.

A lítiumion-akkumulátorok sikerének titka

Az elektromos energia tárolása kémiai formában az emberiségnek az elektromos jelenségek mibenlétének tisztázása óta létező törekvése. Nagyon sok elterjedt akkumulátortípus jellemzője, hogy negatív elektródja egy viszonylag könnyen oxidálható fém, vagy más szóval: olyan fém, amelynek a részvételével felépülő Me^{z+}/Me redoxirendszer standardpotenciálja nagy negatív érték. A pozitív elektródot legtöbbször egy változó vegyértékű fém erősen oxidált formája képezi. A fenti jellemzőknek egyaránt megfelel a klasszikus Leclanché-elem (primer akkumulátor, cellareakció: $Zn + 2MnO_2 + 2NH_4Cl \rightleftharpoons Zn(NH_3)_2Cl_2 + 2MnOOH$), az Edison-féle vas–nikkel akkumulátor ($Fe + 2NiOOH + 2H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$), az 1980-as években nagyon elterjedt nikkel–kadmium akkumulátor ($Cd + 2NiOOH + 2H_2O \rightleftharpoons Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$), a cink–ezüst elem ($Zn + Ag_2O + H_2O \rightleftharpoons Zn(OH)_2 + Ag$; a pozitív elektródon Ag_2O is képződik részleges kisütéskor/töltéskor), de akár még az ólomakkumulátor is ($Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$); a reakcióegyenletekben mindig a negatív elektród komponense áll elől, és balról jobbra olvasva az egyenletet a kisütés folyamatát látjuk. A negatív elektródot képező fémek esetén gyakori probléma, hogy újra-

töltéskor nem a gyárilag előállított elektródmorfológia áll helyre, hanem dendrites fémnövekedés történik. Az ennek eredményeként létrejövő fémtüskék a pozitív elektródig növe rövidzárt okoznak, az akkumulátor emiatt pedig tönkre megy. A fenti akkumulátorok mindkét elektródját több szilárd fázis képezi részlegesen kisütött állapotban, azaz: a töltés-kisütés folyamatát új fázis létrejötte kíséri (gócképződés).

A lítiumion-akkumulátorok lényeges előnye, hogy a lítium nagyon kis sűrűségű, kis atomtömegű (az egységnyi tömegű lítiumból kinyert elektromosság 15,4-szeres tömegű ezüstből volna kinyerhető) és a gyakorlatban alkalmazott más fémekhez képest igen könnyen oxidálható. Ezért a lítiumion-akkumulátorok mind töltés-, mind energiasűrűségben nagy előrelépést jelentettek a korábbi akkumulátorokhoz képest. A cellafeszültség 3,5 V körüli érték, ami lehetővé teszi félvezető eszközök vezérlését egycellás áramforrással, szemben a kisebb feszültségű áramforrásokkal, amelyekből több sorba kötött cella szükséges. A negatív elektród nem tartalmaz fém lítiumot, mivel a töltéskor keletkező lítiumatomokat egy grafityszerű szénréteg fogadja be. A pozitív elektródon legtöbbször egy Li_xMeO_2 általános összetétellel jellemezhető oxid az elektroaktív anyag, ahol Me: Co, Ni, Mn vagy ezek megfelelő arányú elegye, x pedig a feltöltés fokától függően rendre kb. 0,5 és 1 közötti érték. Mindkét elektród olyan anyagi rendszerekből áll, hogy a lítiumion-felvétel és -leadás lényegében folyamatosan, fázisképződés nélkül megy végbe, ami nagyban hozzájárul a sokszori újratölthetőséghez. A lítiumion-akkumulátorok egyes részegységeinek kifejlesztéséért ítéltek oda három kulcsszerepet játszó kutatónak a 2019-es kémiai Nobel-díjat, aminek nyomán a felfedezések háttéréről több magyar nyelvű szakmai összefoglaló is született [1,2].

A lítiumion-akkumulátorok szerkezete, működése és a gyártási folyamata

A lítiumion-akkumulátorok számos komponenst vagy al-egységet tartalmaznak. Ilyenek például az elektródok elektroaktív anyagai (amelyek ténylegesen részt vesznek a töltéstárolásban lítiumion-felvétel és -leadás révén), az elektródok mechanikai stabilitását szolgáló kötőanyagok, az elektroaktív szemcsék között diszpergált vezető részecskék, az elektródok fémes hozzávezetései, az elektródokat elválasztó fóliák, az elektródok közötti elektrolitoldat oldószere, az ebben oldott lítiumsó és a cella opti-



Péter László végzettsége szerint kémia–fizika szakos középiskolai tanár, 2013 óta az MTA doktora, 2018-tól az MTA Elektrokémiai Munkabizottság elnöke. Pályája kezdetén maga is foglalkozott lítiumion-akkumulátorok kutatásával. Jelenlegi kutatási területe az elektrokémiai fémleválasztás és a fizikai-kémiai anyagtudomány.

mális működését biztosító segédanyagok sora, valamint a külső tokozás.

Foglalkozunk először a negatív elektróddal! Ez egy grafitzemcséket és kötőanyagot tartalmazó réteg réz áramvezetőre felhordva. Meglepő, de a megfelelő minőségű grafit ugyanúgy szűkösen elérhető, mint a lítiumion-akkumulátorok sok más nyersanyaga. A grafit hatszögesen elrendeződő szénatomokból álló, ún. grafén rétegei közé tud bejutni a lítiumatom, ezt a folyamatot hívjuk interkalációnak. Az akkumulátor feltöltésekor végbemenő folyamat a teljes feltöltéskor kialakuló fázissal számolva: $6C + Li^+ + e^- = LiC_6$.

Ilyenkor tehát fém lítium nem keletkezik – igaz, a grafitban interkalált lítium ugyanúgy gyűlékony, mint a fém lítium maga. A grafit lítiumfelvétele természetesen térfogatnövekedéssel jár, részben ezért is van szükség viszonylag rugalmas kötőanyagra. Ez egy fluorozott szénhidrogén (polivinilidén-fluorid, PVDF). Ezt az anyagot N-metil-2-pirrolidonban oldva és az oldatban a grafitzemcséket szuszpendálva hordják fel az áramvezető fémfóliára, és az oldószer elpárologtatása után hőkezeléssel alakul ki a megfelelően kompakt réteg. Az oldószert természetesen vissza kell nyerni a hőkezelés után, amit a gazdasági okok mellett az is szükségessé tesz, hogy potenciálisan karcinogén anyagról van szó!

A pozitív elektród elektroaktív anyaga, a megfelelő fémoxid mellett ugyancsak jelen van a kompakt réteg kialakításához szükséges kötőanyag, de a megfelelő elektronvezetés érdekében grafit adalékanyagra is szükség van. Az elektródok fizikai elválasztása miatt szeparátor fólia szükséges, amelynek a megfelelő ionvezetés érdekében porózusnak kell lennie.

A két elektroaktív réteg közötti elektrolitoldat szerves karbonátokból mint oldószerekből és jellemzően lítiumhexafluorofoszfátból ($LiPF_6$) mint elektrolitból áll. Emellett számos, ipari titokként védett adalékanyag kerülhet be az elektrolitoldatba, amelyek szabályozzák az elektródfolyamatokat. Ezek veszélyességét megfelelő információk hiányában nehéz felbecsülni. A lítiumion-akkumulátorok összeállításakor lényegében egy teljesen kisütött állapotú cellát kapunk, aminek egyes funkcionális komponensei az első töltés során alakulnak ki. Ezek között a legfontosabb a negatív elektródon létrejövő szilárd elektrolitréteg (solid electrolyte interface, SEI). Ennek pontos összetétele és működési mechanizmusa máig a lítiumion-akkumulátorok legtalányosabb és részleteiben legkevésbé feltárt része. A lényeges pont az, hogy olyan, lítiumion-transzportra képes réteg jön létre az oldószerekből és a megfelelő adalékanyagokból, amely azután megvédi az oldószert a további redukciótól a negatív elektródon.

A lítiumion-akkumulátorok összeállításakor fokozottan ügyelni kell a vízpáráról lényegében mentes környezetre, mivel mind a negatív elektród, mind az elektrolit vízre érzékeny. A szénben interkalált lítium bomlásakor lítiumhidroxid mellett hidrogéngáz is keletkezhet, ami a negatív elektród tönkremenetele mellett a nyomásnövekedés veszélyével jár. Az $LiPF_6$ vezető só víz jelenlétében pedig hid-

rogén-fluoridot képez, ami korrozív és a környezetet is súlyosan veszélyezteti. Ezért a lítiumion-cellák gyártása nagyon jól ellenőrzött, oxigén- és vízpáramentes légtérben kell, hogy történjen. Laboratóriumi kísérletek során a vízpára- és oxigéntartalom jellemzően néhány milliomod rész (ppm) koncentrációban lehet jelen. Ipari körülmények között sokszor jellemző a maradék vízgőztartalom a kondenzáció hőmérsékletével (harmatpont); ez az akkumulátor gyártási folyamatban -50 °C körüli kell, hogy legyen.

A nagy energiaigényű gyártási folyamatok közül a pozitív elektródok fémoxidjainak előállítását kell elsőként említeni (közel 1000 °C hőmérséklet!), de ahogy a fentiekből látható, az összeszerelés is igen energiaigényes folyamat. Az elektródok hőkezelése kapcsán ez magától értetődik, de a megfelelő vízmentes környezet és az ezt szolgáló gázcirkulációs rendszerek fenntartása is ugyanúgy energiát emészt fel. Ezzel együtt jár a hűtési igény, aminek vizsont a vízszükséglete óriási.

A lítiumion-akkumulátorokkal kapcsolatos potenciális környezeti károk

A környezeti károk között elsőként kell említeni a fém komponensek érceinek bányászatát (még akkor is, ha ez egyáltalán nem hazai probléma). Minden bányászati folyamat a környezet számottevő átalakításával jár, beleértve a vízháztartás megváltozását és akár a részleges elsivatagosodást is (lásd például: [3]). Nehezíti a helyzetet, hogy a lítiumion-akkumulátorok alapanyagainak bányászata olyan kevésbé fejlett régiókban zajlik, ahol a környezetvédelmi szabályok önmagukban sem jelentenek kellő garanciát a természeti értékek megóvására, de még a meglévő rendelkezések betartása is nehézkes a megfelelő politikai akarat hiánya és a korrupció miatt. Sőt, a gyermekmunka felhasználása is elterjedt, különösen az afrikai kobaltlelőhelyeken.

A környezeti károknak az akkumulátorcella-gyártással kapcsolatos része a leginkább közismert, lévén ez kapja a legtöbb figyelmet a sajtótól (ami persze azért van, mert a hazai lakosság számára ezek a veszélyek a leginkább kézzelfoghatóak). Itt a felhasznált vegyszerek elszivárgásával, kiömlésével, párologásával, a levegőbe és a talajvízbe történő eljutásával kapcsolatos károkat kell említeni.

Az akkumulátorok használatát, különösen pedig az elektromos járművek üzemeltetését előszeretettel szokták a „zöld energia” fogalmával kapcsolatba hozni. E ponton le kell szögezni, hogy egy elektromos jármű üzemeltetése valóban emissziómentes az üzemeltetés helyén és idején – a teljes mérleghez azonban a gyártás, a megsemmisítés és a működtetéshez szükséges energia másutt való megtermelésének hatásait egyaránt figyelembe kell venni. Nem is beszélve arról, hogy balesetek bekövetkezésekor a kár nagy lehet: a hagyományos (pl. vizet használó) oltási technológiák egy lítiumion-akkumulátoros járműben keletkező tűz esetén nem alkalmazhatók, mert a negatív elektród anyaga maga is reagál vízzel. Tűz esetén mégis a hűtés az első lépés, mert a negatív elektród égése ha-

talmas hőtermeléssel jár, ami viszont a pozitív elektród oxidjának (Li_xMeO_2) bomlásához vezet, utóbbi folyamat pedig a tüzet tápláló oxigén képződésével jár. Míg egy egycellás kisméretű eszköznel az öngyulladás veszélye szinte nulla, egy tűző napon tárolt elektromos jármű felmelegedése már lehet az öngyulladás szempontjából kritikus mértékű.

Más komponensek is képeznek káros anyagokat vízzel reagálva, de ezek nem a tűzbiztonság miatt veszélyesek, hanem későbbi környezeti hatásai révén. A fluortartalmú szénhidrogének atmoszférába jutása pont ugyanolyan módon okozhat ózonlebomlást a felső légkörben, mint a korábban hűtőrendszerekben alkalmazott, de használatból már kivont halogénezett szénhidrogének.

A megsemmisítés és újrafelhasználás a lítiumion-akkumulátorokkal kapcsolatos környezettudatos magatartás része – lehetne. A mai újrafelhasználási technológiák azonban korántsem tartottak lépést a gyártás fejlődésével. Ez azért különösen problémás, mert az Európai Unió szabályai szerint az üzemidő lejártával a biztonságos megsemmisítésre azt az országot kötelezik, ahol a gyártás történt. A hirtelen felfuttatott volumenű gyártással a megsemmisítést és újrafelhasználást célzó ipartelepítés nem tartott lépést (ahogy az ezzel kapcsolatos technológia sem igazán). Míg egy atomerőmű létesítésekor el kell kezdeni a tartalékképzést a végső leszerelés költségeinek biztosítására, ma a lítiumion-akkumulátorok gyártásának bővítésére olyan módon áramlik az állami támogatás, hogy a később fellépő – és elkerülhetetlen – kötelezettségekre egyáltalán nincs figyelemmel. Mindemellett az sem világos, ki lesz a költségviselő, amikor a megsemmisítésre sor kerül. A megsemmisítés kapcsán szót kell ejteni arról, hogy mit is semmisítünk meg valójában. Egy elektromos busz akkumulátorpakkja 176 cellából áll, amelyben az egyedi cellák nem cserélhetők, de egyetlenegy cella rövidzárja is elég ok az egész modul cseréjére. Így egy 0,5 %-ot alig meghaladó hiba a teljes cellaköteg megsemmisítéséhez vezet.

Fontos azt is látni, hogy miként tekint az átlagember a lítiumion-akkumulátorokra. A közvélemény ezekhez nem társít olyan veszélyfaktorokat, amiket egy ólomakkumulátorhoz például igen (annak sav- és nehézfém-tartalma miatt). Utóbbi is veszélyes persze, de ennek visszagyűjtése jobban megoldott. Egy hordozható elektronikus eszközről (például egy feltölthető villanyborotváról) sokszor nem is tudjuk, hogy milyen beépített feszültségforrást tartalmaz. Az ilyen eszközök sora kerülhet úgy a kommunális hulladékba, hogy utána hosszú távon szennyezni fogja a környezetét. Megoldást jelenthet az áramforrások ellátása egyedi azonosítóval, ennek révén biztosítva a teljes élet-tartam-követést, de ez a megoldás még gyerekcipőben jár.

A hazai akkumulátorgyártás – társadalmi tükörben [4]

A lítiumion-akkumulátorok egyes részegységeinek gyártása rendre az adott profilra specializált, különálló üzemekben zajlik. A különféle részegységek hazai gyártásá-

ról az online sajtóban található egy friss és térképes illusztrációval ellátott összefoglaló [5]. Az akkumulátorok gyártásáról több részletes online összefoglaló is elérhető (pl. [6]). Az alábbi elemzés csak kifejezetten az akkumulátorok összeszerelésével kapcsolatos üzemekre vonatkozik (noha a katódgyárak és a megsemmisítő üzemek is sok veszélyforrást rejtenek, akár csak az alapanyagok tárolása és szállítása).

A hazánkba telepített akkumulátorgyárak üzemépületeinek felépítéséhez a tulajdonosok jellemzően saját országukhoz kötődő vállalkozásokat keresnek, de legjobb esetben is a kormány által kedvezményezett cégekkel szerződnek. A gyártósorok teljes mértékben külföldi eredetűek. Disztribútorként dolgozó ismerőseim szerint még az olyan vizsgálati berendezéseket is a gyár részeként hozzák Magyarországra, amelyekre a hazai forgalmazónak egyébként kizárólagos hazai eladási jogosultsága volna, kizárva ezzel a hazai vállalkozót a telepítés hasznából. Semmiféle – akár a termék minőségét magát, akár a gyártási folyamatot érintő – fejlesztés, innováció vagy hozzáadott értéket nyújtó hazai tudás integrálása nem történik meg. Ebből a szempontból hiába is tituláljuk a folyamatot „magas technológiai tartalmú” gyártási eljárásnak, ennek nincs hazai tudásbővítéshez vezető tovagyűrtő hozadéka. Az akkumulátorgyár e tekintetben nem más, mint bármilyen más profilú összeszerelő üzem. A hazai kutatóhá-lózat sem részesül a gyárak telepítése révén semmilyen megrendelésből, és végképp nem jut szóhoz a fejlesztésben. Különösen igaz ez akkor, ha még a gyártósorokat üzemeltető személyzet is jórészt külföldi, ami egyre inkább tipikussá válik ezekben az üzemekben.

A lítiumion-akkumulátort gyártó üzemek az alapanyagok származási helyét tekintve szinte teljes mértékben importált alapanyagokból dolgoznak. Hazánkban nem található meg sem az elektroaktív anyagok fémkomponenseinek, sem az elektródhordozó fóliák fémeinek ércei. A gyártási folyamat energiaszükségletének fedezete is kérdéses, csakúgy, mint a gyárak vízszükségletének biztosítása. Különösen kedvezőtlen, hogy gyártás vízszükségletét több helyen nem felszíni vizekből, hanem ivóvíz minőségű vizet nyújtó, mélyfúrású kutakból próbálják meg fedezni, csökkentve az amúgy is szűkülő felszín alatti vízbázisokat.

A gyár tulajdonosának nemzeti hovatartozásától függetlenül a telepítés lényege a gazdasági előny, és a megtermelt haszon előbb-utóbb a tényleges tulajdonoshoz vándorol, miközben a gyár telepítéséhez a magyar állam sokfajta kedvezményt nyújt (ráadásul hatalmasat). A gyárak létesítése jellemzően zöldmezős módon, gyakran értékes és nem pótolható termőföld feláldozása árán történik. Ez önmagában is veszteség, még akkor is, ha biztosak lehetünk abban, hogy nincs semmiféle további járulékos károkozás. A tapasztalatok azonban nem azt jelzik, hogy az üzemek biztonságosan működneek. Üzemen belüli biztonsági incidensek sora kapott az utóbbi időben sajtónyilvánosságot, és a kisebb balesetek között nagy lehet a látens hányad is. Jellemző, hogy az akkumulátorfeldolgo-

zás során történt balesetek, köztük a nemrég két halál-ese- tet követelő tragédia sem szokványos sajtóhírként lett is- mert, hanem oknyomozó újságírói tényfeltárás révén [7]. Innen tudjuk azt is, hogy az áldozatok magyarul nem be- szélő, vendégmunkásként dolgozó külföldi állampolgár- ok voltak (részben emiatt lehet, hogy az incidenst nem kí- sérte közfelháborodás). Külföldi munkást foglalkoztató külföldi tulajdonú üzemenél még az is kérdéses, hogy mely ország törvényei vonatkoznak a munkaszerződésre, így a hazai szabályozás esetleg nem is irányadó, a hazai érdek- védelmi szervezetek pedig ilyen viszonyrendszerben nem jutnak szóhoz.

Ugyancsak számottevő az üzemen kívüli hatások sora, így például a zaj, pára, vagy a súlyosan szennyező vegyü- letetek megjelenése a talajvízben és a kutakban. Tipikus környezetkárosító magatartás a hulladékok szabálytalan tárolása vagy kifejezetten veszélyes hulladékok ártalmatlan- lannak minősítése. A biztonsági szabályok megsértésével kapcsolatos bírságok azonban közismerten olyan csekély összegűek mind az üzemek létesítéséhez adott támogatá- sokhoz, mind a jövedelmezőséghez mérten, hogy sem- milyen visszatartó erőt nem jelentenek, így nem töltik be azon céljukat, hogy a szabályszegő magatartás megszűn- jön.

Az akkumulátorgyárak társadalmi fogadtatása igen ve- gyes, de többnyire élesen elutasító. A tiltakozásokról szóló híradásokat számba sem érdemes venni, a lista olyan gyorsan bővül. Ennek egyértelmű oka az átláthatatlan el- lenőrzési rendszer, az erőltetett állami szerepvállalás és a helyi érdekek szélsőségesen agresszív kiszorítása min- denféle döntési folyamatból. Az akkumulátorgyár-telepíté- si láz a részvételi demokrácia látványos kudarca: a ter- vezés fázisában a közmeghallgatásokat már személyes részvétel nélkül is meg lehet tartani, a telepítésre szánt te- rületek kikerülhetnek a helyhatóságok ellenőrzése alól, így a működéssel járó iparüzési adótól az önkormányzat- ok szintén eleshetnek. Az előzetes kontroll lehetősége már az üzemek telepítésekor elvész a helyi közösségek számára, és az üzem működése során fellépő környezeti károk világos felmérésében sem jut szerep egyetlen olyan szerveződésnek sem, amely nem közvetlenül érdekelt a beruházásban. Ez nagyfokú bizalmatlanságot szül, ami el- keseredett reakciókba torkollik.

Érdemes emlékeztetni rá, hogy 2000-ben a Sanyo cég dorogi akkumulátorgyárának építése során nem volt a maival összemérhető állami szerepvállalás a beruházás mögött, és nem is kísérte lakossági felháborodás az üzem létesítését, amely 2008-ig működött ismert biztonsági in- cidens nélkül. Jelentős különbség, hogy ez a gyár mobil- telefonokhoz gyártott akkumulátorokat (sokkal kisebb teljesítmény). A gyár készen kapta az alapanyagokat, ame- lyeket két zárt rendszerű gyártósor dolgozott fel. Az auto- matizált gyártósorok nem igényeltek sok munkaerőt, az üzem létesítése mégis nagymértékben csökkentette az ak- kori munkanélküliséget, főleg a csomagolóban történő foglalkoztatás által. Itt a létesítésnek tehát legalább a mun- kaerőpiaci feltételei megvoltak, akárcsak az üzem saját

vállalásai a magyar társadalom felé (a csomagolás is auto- matizálható lett volna, de az üzem vállalta a többletmun- kaerő foglalkoztatását).

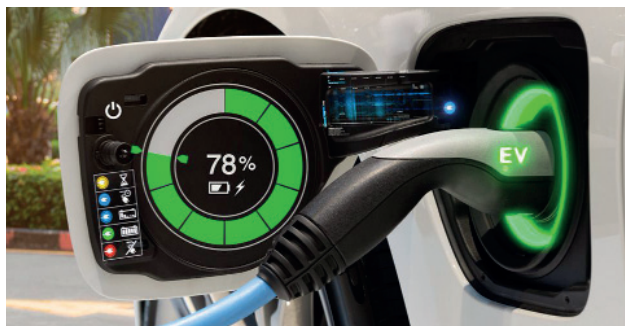
Van-e végső mérleg?

A lítiumion-akkumulátorok mára a hordozható elektroni- kai eszközök és az elektromos járművek üzemeltetésének alapvető és nélkülözhetetlen részévé váltak. A helyes út emiatt nem az akkumulátorok száműzése, hanem ezek megfelelő tudatossággal történő előállítás, alkalmazása és újrafelhasználása. Ebben a társadalomnak a szabályo- zási folyamatok biztosítása révén ugyanúgy megvan a sze- repe, mint az egyénnek a maga környezettudatos maga- tartásával. Magyarországot tekintve az akkumulátorgyárak tömeges, túlzott telepítése egyaránt jelent környezeti és gazdaságszerkezeti kockázatot. Előbbihez a víz- és ener- giafelhasználás ugyanúgy hozzájárul, mint a károsanyag- kibocsátás, míg az utóbbi egy fejlettebb energiatárolási mód vagy eszköz piacképessé válása esetén járhat fájdal- mas következményekkel. Az erőltetett akkumulátorgyár- tást ugyan az autóipar érdekeivel szokták indokolni, de a monolit ipari szerkezet önmagában is mindig kockázati tényezőt jelent.

Magyar emberként érdemes emlékezni arra a legendá- ra, hogy őseink milyen módon hódították el a Kárpát-me- dendét a morva hercegtől. A fehér ló táplálásához szüksé- ges tiszta földből, fűből és vízből ugyanis nincs másik. A rossz stratégiai döntésekkel és az ezeket kísérő elégtelen szabályozással viszont épp ezektől foszthatjuk meg ma- gunkat.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Inzelt György: Kémiai Nobel-díj 2019-ben a lítiumion-akkumulátorok kifejlesztéséért. *Magyar Kémikusok Lapja* **75** (2020) 49–51 (https://www.mkl.mke.org.hu/images/Nobel-dijak/2019_Kemiai_Nobel-dij.pdf)
- [2] Péter László: A 2019-es kémiai Nobel-díj háttéréről és a díjazottakról. *Magyar Tudomány* **181** (2020) 101–106 (https://mersh.hu/hivatkozas/matud_f33304/#matud_f33304)
- [3] National Geographic (magyar kiadás), 2019. 2. szám, 48–63.
- [4] Éltes Andrea: Akkumulátorgyártás Magyarországon. ELKH Közga- zdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont, Világgazdasági Inté- zet, *Műhelytanulmányok* **147** (2023) 1–69. (<https://vgi.krtk.hu/publikacio/elteo-a-akkumulatorgyartas-magyarorszagon/>)
- [5] <https://24.hu/fn/gazdasag/2023/07/19/elektromos-akkumulatorgyartas-kina-szijas-peter-catl/>
- [6] <https://villanyautosok.hu/2023/03/02/igy-keszul-a-litium-ion-akkumulator>
- [7] <https://atlatso.hu/orszagszerte/2023/07/28/nem-egy-hanem-ket-ember-halalat-okozta-egy-geprobbanas-a-szigetszentmiklosi-akku-feldolgozoban/>



A FOLYAMATOK MEGFORDÍTHATATLANSÁGA ÉS A SPINECHÓ

Kucsera Robin¹, Simon Ferenc^{1,2}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

Bevezetés

Ismert, hogy a hőtán második főtételének hétköznapiakban is megfigyelt jelenségei (pl. a melegebb test lehül, miközben a hidegebb felmelegszik kölcsönhatásuk során) szorosan összefüggenek a folyamatok megfordíthatatlanságával, irreverzibilitásával. Egy korábbi cikkben (Fizikai Szemle 2022/10) bemutattuk, hogy bizonyos érdekes körülményeket teremtve létrehozhatunk olyan folyamatokat, melyek *látszólag* sértik a hőtán második főtételét. Erre egy példát is konstruáltunk, az ún. lamináris áramlásban előállítható Loschmidt-echót, amikor is a rendszerben eredetileg jelenlévő, majd elvesző koherenciát vissza is tudjuk állítani. A jelenség hátterében az áll, hogy a koherencia eltűnése nem spontán folyamatok eredménye, hanem külső erő hatására következik be, azaz nem történt irreverzibilis információvesztés. Ezért hozható vissza a koherencia, és a második főtétel természetesen nem sérül.

Történetileg az első Loschmidt-echót ún. magmágneses rezonancia (*nuclear magnetic resonance*, NMR) kísérletekben állította elő Erwin L. Hahn 1950-ben [E. L. Hahn 1950]. A maga korában a felfedezés annyira meglepő volt Hahn számára is, hogy hosszú ideig nem merete publikálni, félve attól, hogy köznevetség tárgya lesz, ha egy, a második főtételt sértő megfigyelést publikál. A berendezését szétszedte, újra összerakta, folyton arra gyanakodva, hogy a megfigyelt echó csak egy kísérletes műtermék. Végül elméletileg is meg tudta mutatni, hogy a spinechó jelensége levezethető az NMR alapegyenleteiből. Mára minden NMR-berendezés, a mágneses rezonanciás képalkotáson (*magnetic resonance imaging*, MRI) alapuló orvosi diagnosztikai berendezés is kihasználja a spinechó jelenségét, igen gyakran akár több ezer echót is megmérve. A jelenség így segítségünkre van új gyógyszerek elkészítésében, betegségek diagnosztizálásában, új anyagok

kutatásában, de akár kvantumtechnológiai alkalmazásokban is. Az NMR-spinechóhoz hasonló sémák segítenek pl. a neutronspektroszkópiában az energiafelbontás növelésében a magyar vonatkozású, Mezei Ferenc által felfedezett neutronspin-echó módszerének segítségével [Mezei 1979], amiről a Fizikai Szemle is beszámolt (Fizikai Szemle 1975/8 és Fizikai Szemle 2020/1). Cikkünkben az NMR-spinechó fontos és igen érdekes jelenségét járjuk körül, egyben megmutatjuk, hogy a segítségével a Loschmidt-echó akár egymás után több ezerszer is újra létrehozható. Munkánkban egy közönséges anyagot, csapvizet vizsgálunk, és megmutatjuk, hogy a hidrogén ¹H izotópjában (prócium) található protonok magspinjének koherenciája akár több másodperc elteltével is megmarad.

Az NMR alapjai

A mágneses rezonancia abból indul ki, hogy mágneses térbe (B_0) helyezve egy nemnulla magspinnel rendelkező rendszerben eredő mágnesezettség jön létre, még ha ez nem túl jelentős is. Az egyik legismertebb példa a víz, ahol a protonok $I = 1/2$ magspinje miatt kapjuk az eredő M mágnesezettséget. Egyensúlyi állapotban M párhuzamos a mágneses térrel. Azonban az egyensúlyi irányból kitérítve M a külső B_0 tér körül precessziót végez, ez az ún. Larmor-precesszió jelensége. Az általunk használt 7 tesla mágneses indukciójú szupravezető mágnesben a precesszió frekvenciája kb. 300 MHz. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a vízmintát mágnesekercsbe helyezük – amelynek a tengelye a B_0 irányára merőleges síkban van – a tekercsben indukált feszültséget kapunk. A mágnesezettség B_0 irányából történő kitérítését szintén mágneses térrel végezzük: amennyiben alkalmazunk egy kisebb, B_1 mágneses teret, akkor ekörül az M elkezd elfordulni. Azonban a Larmor-precesszió is azonnal elindul, ezért a B_1 hatása

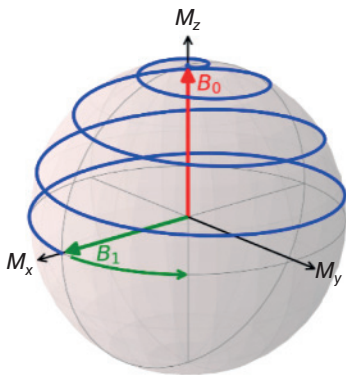


Kucsera Robin a BME-n elsőéves fizikus MSc hallgató. Érdeklődési köre az anyagtudomány és spektrometria. A Spin-spektroszkópia csoport tagjaként a gyémánt rácshibáit vizsgálja NMR-spektroszkópiai módszerekkel.



Simon Ferenc fizikus, egyetemi tanár, a BME TTK dékánhelyettese. Érdeklődési területei: szilárdtest-spektroszkópia, a spintronika, kvantuminformáció-elmélet és a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: az itineráns elektronok mágnesesrezonancia-jelének felfedezése új fémekben, a spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása, spinnel nyomjelzett szén nanocsövek előállítása és triplétt optikai állapotok felfedezése nanocsövekben. ERC- és Lendület-pályázatok vezetője.

csak akkor lesz jelentős, ha az iránya a Larmor-precessziót követve a B_0 -ra merőleges síkban elfordul. Ennek következményeként az M a B_1 alkalmazása során az egyensúlyi állapotából kiindulva egy, az 1-es ábrán bemutatott spirálpályán mozog.



1. ábra. A Larmor-precessziót követő B_1 mágneses tér hatására az M mágneszettségre folyamatos forgatónyomtékk hat, ami így egy spirálpályán fog mozogni

Érdekes módon, ez a B_1 mágneses tér ugyanazzal a szolenoiddal létrehozható, mint amivel az indukált feszültséget detektáljuk. Ez azért lehetséges, mert bár a szolenoidban folyó váltakozó áram egy irány mentén szinuszos mágneses teret eredményez, ez azonban felbontható két egymással szemben forgó mágneses térre, amelyek közül az egyik éppen a Larmor-precesszió irányába forog, és amennyiben a forgás frekvenciája a Larmor-frekvenciával megegyezik, éppen a kívánt hatást hozza létre. A rezonancia kifejezés arra utal, hogy a B_1 forgó mágneses tér forgási frekvenciájának rezonanciában kell lennie a Larmor-frekvenciával.

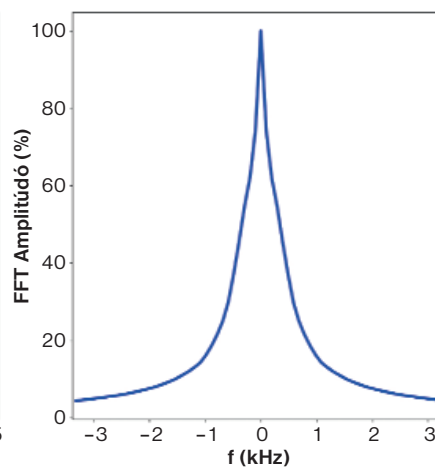
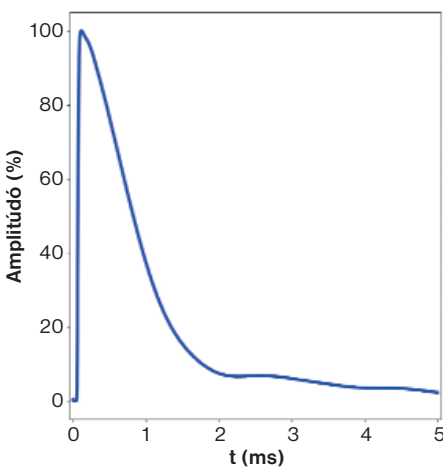
A B_1 mágneses teret megfelelő ideig alkalmazva, a mágneszettséget az egyensúlyi irányhoz képest merőleges irányba fordíthatjuk el, az ilyen impulzust nevezzük 90° -os impulzusnak. Az impulzus kikapcsolása után a mágneszettség a B_0 irányához képest merőleges síkban precesszál és hoz létre egy indukált feszültséget. Látszik, hogy célszerű egy olyan koordinárendszerrel választani a leírásban, amelyik a Larmor-frekvenciával precesszáló mágneszettséggel együtt forog. Ebben a forgó koordinárendszerben felvehetjük az X és Y irányokat, melyek kiválasztása attól függ, hogy a forgó B_1 teret milyen időpillanatban indítjuk.

A spinechó

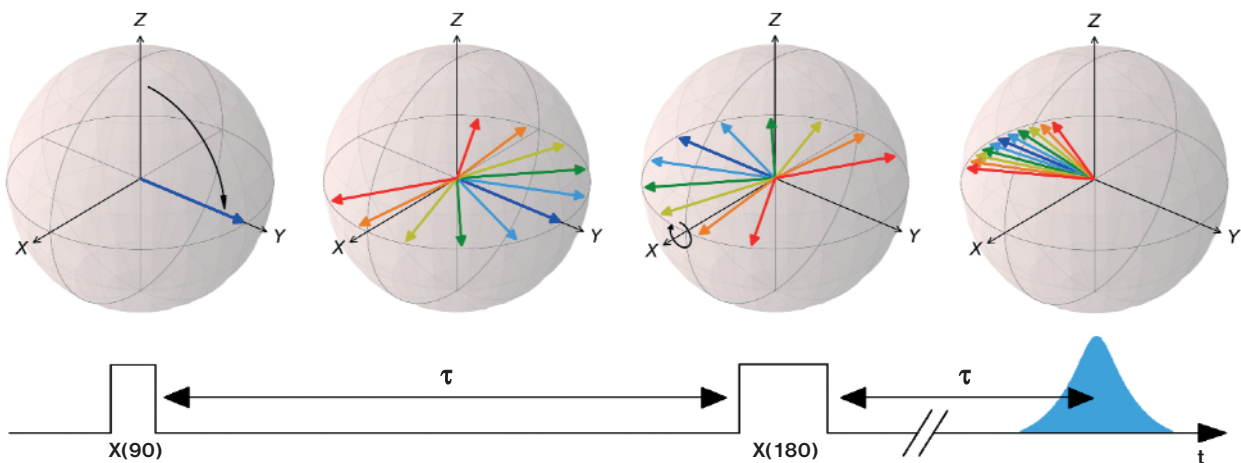
A B_0 -ra merőleges síkban precesszáló mágneszettség nagyon gyorsan elvész, ennek az esetek nagy részében a B_0 külső tér inhomogenitása az oka. Az inhomogenitás azt eredményezi, hogy a magspinek különböző sebességgel precesszálnak, ezért a forgó koordinárendszerből szemlélve azt találjuk, hogy az M gyorsan eltűnik. Az indukált feszültség burkolóját is mutatjuk a 2. ábrán. Fourier-transzformációval megkaphatjuk az időtartománybeli burkoló jelekből a jel spektrumát. Az inhomogenitás nagyságát is érdemes megvizsgálni: egy szokásos szupravezető mágnes inhomogenitása néhány ezrelék, azaz egy 1 cm^3 -es mintában 7 T-s tér mellett a tér az átlagtól $7 \mu\text{T-t}$ térhet el. Egy kifejezetten NMR céljára gyártott nagyhomogenitású mágnesre ez az érték tipikusan 10 ppm (parts per million), tehát az eltérés $70 \mu\text{T}$, ezt két lépésben szokás tovább javítani segédtekerccsekkel: az első fajta segédtekerccs szintén szupravezető, tehát az első beállítást követően nem igényel további állítást (1 ppm -es szint). A BME-n használt rendszerünkben 2012 óta folyamatosan jelen van mind a 7 T-s tér, és a segédtekerccsek tere is. A szupravezetők tulajdonsága miatt ebbe csak kriogén folyadékot (cseppfolyós nitrogén és hélium) kell rendszeresen tölteni, de más formában nem kell gondoskodni a mágneses tér fenntartásáról. A tér eltűnésének időállandója a méréseink szerint százezer év nagyságrendjébe esik. További, szobahőmérsékleten lévő segédtekerccsekkel az inhomogenitás tovább csökkenthető. A mi rendszerünk esetében 3 ppb -s szint érhető el (parts per billion), azaz a 300 MHz -es Larmor-frekvencia esetén a megfigyelt jelek szélessége levihető 1 Hz -re.

A további diszkusszióban azonban maradjunk az 1 ppm -es inhomogenitásnál: ez azt jelenti, hogy a spinek precessziójának sebessége az átlagos Larmor-frekvenciától 300 Hz -nyire térhet el. Ez azt eredményezi, hogy kb. 3 ms alatt a spinek közös forgása megszűnik, a megfigyelt jel 0-vá válik.

Erwin Hahn azt találta, hogy amennyiben ezt a transziens jelet követően egy adott idő elteltével alkalmazott egy második impulzust, akkor újra megfigyelte az NMR-jelet. Amint a bevezetőben említettük, ez azért volt várat-



2. ábra. Az indukált feszültség gyorsan csökken a B_0 inhomogenitása miatt, ami miatt frekvenciatérben egy széles jelet kapunk. Az ábrán az NMR-detektáló tekerccsben indukált feszültség burkolóját és ennek Fourier transzformáltját mutatjuk



3. ábra. Az X-Y síkba lefordított spinek elkezdnek szétfolyni, ami a jel nullára csökkenéséért felel. Egy újabb forgatás után viszont újra összeállnak, és detektálható egy NMR-jel

lan, mert a természetben hozzászoktunk, hogy egy spontán folyamatban eltűnő, szétszóródó fizikai mennyiség soha nem tér vissza. Ere példa egy pohár vízbe cseppentett tinta, vagy a pohárban hagyott víz, ami elpárolog. Vagy akár egy melegebb test, ami a környezet hőmérsékletére lehűl. Természetesen a fentiek alapján pontosan értjük, hogy ebben az esetben a spinek közös irányának és így az NMR jelnek az elvesztése nem spontán folyamat eredménye, hanem külső hatások következménye.

Mégis, hogy ezt szemléltessük, bemutatjuk a spinechó felfedezését követő népszerűsítő gondolatmenetet [Hahn 1953]. Képzeld el a lehető legigazságosabb futóversenyt, ami abból áll, hogy a futók indulása után eltelik adott idő, amikor is a bíró jelére mindegyik futó a korábbival azonos sebességgel *visszafelé* kezd el futni a pályáján. Az eredeti eltelt idővel megegyező idő után mindegyik futó egyszerre fog a célba érni. Amennyiben a futók közös mozgását vizsgáljuk, azt találjuk, hogy a rajtjelet követően nem lesznek fázisban, viszont a visszafelé futást követően újra azonos fázisban egyszerre futnak majd át a célvonalon (3. ábra).

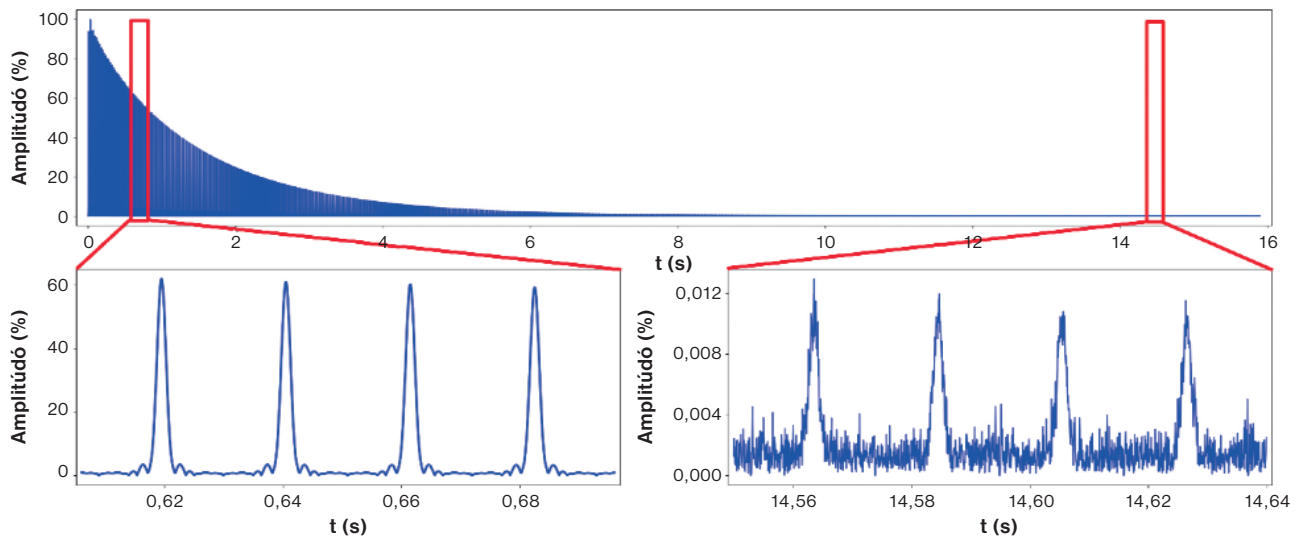
Az NMR-módszerben ezt úgy érhetjük el, hogy az első, X irányban alkalmazott 90 fokos impulzust (jelöljük $X(90)$ -nel) követően az Y irányban áll a mágnesezettség a forgó koordináta-rendszerben. Itt természetesen azonnal elkezdődik a jel csökkenése, hiszen mindegyik spin más és más sebességgel precesszál. Adott idő elteltével alkalmazunk egy $X(180)$ fokos impulzust, amint azt a 3. ábra mutatja. Ennek az a következménye, hogy azok a spinek, amelyek gyorsabban precesszálnak, mint a többiek, a forgatás után a pályájukon hátrébb kerülnek. Ezért a két impulzus között eltelt idővel megegyező nagyságú időt várva mindegyik spin újra azonos precessziós fázisba kerül, így előáll a spinechó jelensége: a spinek újra együtt állnak a $-Y$ irányban. Erről egyébként a Wikipédián találhatóunk egy szép animációt [Wikipedia].

Vegyük észre, hogy a spinechó jelensége nem sérti a hőtan második főtételét, hiszen az eredeti fázisvesztés sem spontán folyamat eredménye, hanem úgy mond a

rendszerbe beépített inhomogenitásé, ezért minden spin pontosan *tudja*, hogy számára mekkora is a lokális mágneses tér, ennek megfelelően mekkora a precessziós frekvenciája. Ezért az NMR-jel lecsengésére azt mondjuk, hogy ez egy információvesztés nélküli fázisvesztéses folyamat (angolul *dephasing*). Mivel nincs információvesztés, az entrópia sem változik. Létezik természetesen valódi információvesztéses dekoherenciafolyamat is, a víz NMR-jében ez leginkább a vízmolekulák diffúziója miatt következik be: ekkor a vízmolekulák egy másik lokális mágneses térű helyzetbe jutnak. Ez az ún. T_2 dekoherenciaidő (nevezik spin-spin relaxációs időnek is). Olyan ez, mintha a futók a visszafutáskor *elfelejtenek* az eredeti sebességüket, vagy éppenséggel két futó összebeszélne és felcserélnék a sebességüket, így átverve az igazságos futóverseny szabályait. Az NMR módszerben fontos szerepet játszik még a T_1 relaxációs idő (nevezik spin-rács relaxációs időnek is), amely azt adja meg, hogy a kitérített mágnesezettség mennyi idő alatt nő vissza a termikus egyensúlyi értékéhez a Z tengely mentén. Általában T_1 sokkal hosszabb, mint a T_2 idő, azonban vannak esetek, pl. egy nem viszkózus folyadék, ahol a két idő közel azonos nagyságú.

A spinechó bemutatott sémáján látszik az is, hogy az első spinechót követően egy további 180 fokos impulzussal egy újabb spinechó hozható létre. Azonban egy látszólag apró, mégis fontos módosítás, hogy jobb a következő impulzust $X(-180)$ fokos forgatással elvégezni, mert amennyiben az impulzus nem tökéletesen 180 fokos (ami egyébként technikailag nem is kivitelezhető), úgy a fázis hibája folyamatosan összeadódna. Viszont az alternálón kiadott $X(180)$ - $X(-180)$ impulzusok sorozata már fázis-hibára korrigált spinechók sorozatát eredményezi.

Feltehető a kérdés, hogy vajon hány-szor is figyelhetjük meg a spinechót, azaz a Loschmidt-echót. Esetünkben az NMR-jel gyors lecsengési ideje ~ 1 ms (az ún. T_2^* idő), viszont a vizsgált csapvízben a memóriavesztéses dekoherenciaidő (az ún. T_2 idő) kb. 1,5 s, tehát akár ezer echót is megfigyelhetünk, amint azt a 4. ábra is mutatja. Ennél több echót is megfigyelhetnénk, amennyiben szándékosan el-



4. ábra. Az echót generáló impulzusokat ismételve többször visszanyerhető az NMR-jel, több másodperc után is kivehető az eredeti jel. Ezeknek az echóknak a burkolója már az irreverzibilis információvesztést jellemzi

rontjuk a mágnesünk inhomogenitását, ezáltal tovább csökkentve a T_2^* időt. Esetünkben az igazi korlát instrumentális természetű volt: a 15 másodperces kísérletben a berendezésnek 1,5 millió pontot kellett felvennie, ami már elérte a digitalizáló kártya memóriájának határát (szokásos NMR-kísérletben ritkán mérünk 10 000 pontnál többet). A mérésekhez egy Tecmag Redstone típusú NMR-konzolt használtunk.

A 4. ábrán bemutatott spinechó kísérletsorozatban az az egyik megdöbbentő tény, hogy a protonspinek mint kvantummechanikai objektumok koherens forgását elő tudjuk állítani újra és újra ezerszer, miközben a kísérlet 15 másodperces időtartama alatt összesen kb. 5 milliárd forgást végeznek. Azt mondhatjuk tehát, hogy a Loschmidt-echót igen sokszor egymás után létre tudjuk hozni, ami jól rámutat az irreverzibilis és reverzibilis folyamatok közötti különbségre, egyben a hőtán második főtételével kapcsolatos megértésünket és tudásunkat gazdagítja.

Kapcsolat a neutrons spin-echóval

Az NMR-spinechót bemutatva, a magyar vonatkozású neutron spin-echót (NSE) is könnyebben leírhatjuk. Részletesebb tárgyalást találhatunk korábbi Fizikai Szemle-cikkekben (Fizikai Szemle 1975/8 és Fizikai Szemle 2020/1). A neutronsórás módszerekben a bejövő és szórt neutronnalábok közötti energiaváltozást (rugalmatlan szórást) vizsgálják, miáltal az anyagokban lévő atomi rezgési és mágneses kollektív gerjesztési módusokról szereznek információt. Az NSE módszerben a bejövő neutronok sebességeloszlása (azaz energiabizonytalansága) adja az

energiafelbontás korlátait. Az NSE módszerben a mintával történő kölcsönhatást megelőzően egy ún. preparációs mágneses teret alkalmaznak (egy preparációs zónában), amiben a különböző sebességű neutronok más és más időt töltenek el, ennek megfelelően a spinek irányának Larmor-precesszió miatti elfordulása is sebességfüggő lesz. Azaz, a spinek irányába lesz a sebességük *belekdolva*. Az anyaggal történő kölcsönhatást követően egy ún. visszafordító (vagy flipper) mágneses téren haladnak át a neutronok, amelynek következtében a spinjeik újra egy irányba fognak állni, azaz kialakul a neutrons spin-echó. A módszer lényege, hogy a mintával való kölcsönhatás lesz az egyedüli oka annak, ha az NSE amplitúdója csökken. Ebben az értelemben ez olyan mintha az NMR-ben a T_2 idő mérésén keresztül vizsgálnánk az anyag tulajdonságait.

Köszönetnyilvánítás: A cikk szerzői köszönetet mondanak Dr. Kriza Györgynek az értékes kritikái észrevételeiért és a neutrons spin-echó részletesebb tárgyalására tett javaslatért. A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K137852, TKP2021-EGA-02, és TKP2021-NVA-02, és a V4-Japán programok (2019-2.1.7-ERA-NET-2021-00028) által, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében.

HIVATKOZÁSOK

- [Hahn 1950] E. L. Hahn: *Spin echoes*, Physical Review **80**, 580 (1950).
- [Mezei 1979] F. Mezei: "Neutron Spin Echo and Polarized Neutrons" in Neutron Inelastic Scattering 1977, (IAEA, Vienna, 1978), p. 125.
- [Hahn 1953] E. L. Hahn, "Free nuclear induction" Physics Today **6**, 4 (1950).
- [Wikipedia] https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_echo

A JÓ PAP HOLTIG TANUL, AVAGY RÖVID ÉLMÉNY- BESZÁMOLÓ AZ MNT TANÁRI TOVÁBBKÉPZÉSÉRŐL

Az általános iskolai fizika tanítása a klasszikus fizikára épül. Én mégis, általános iskolai fizika tanárként nagy örömmel mondtam igent Radnóti Katalin hívására a Magyar Nukleáris Társaság fizikatanárok számára szervezett 30 órás akkreditált tanártovábbképzésre.

Egyrészt érdekelt a téma, hiszen ez a terület kissé kiesik a mindennapi tanítási gyakorlatomból. Régen volt már az, amikor én a modern fizikában elmélyültem. Másrészt pedig szerettem volna ötleteket kapni, hogy mégis hogyan lehet az általam tanított korosztály számára azokat az információkat eljuttatni, ami segíti őket pl. az atomenergiáról alkotott helyes kép kialakításához.

Ez sajnos úgy látom, hogy egyre nagyobb felelőssége lesz az általános iskolai fizikatanároknak, hiszen a diákok jelentős része a középiskolában nem találkozik tisztán fizikaórával.

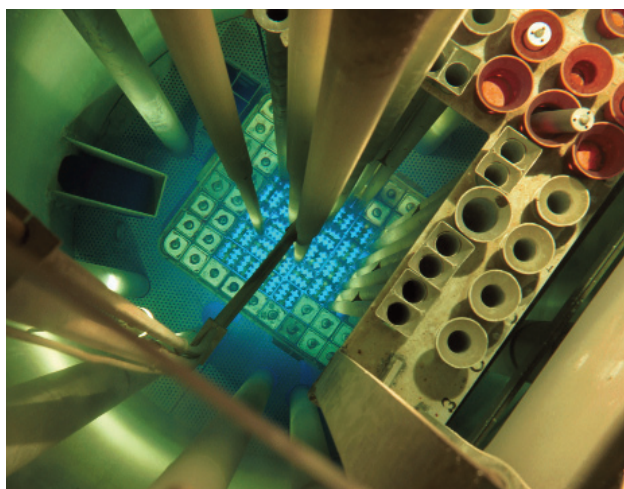
A továbbképzés szervezése nagyon profi és korszerű volt. A 30 óra négy alkalomra oszlott el. Ebből három egy-egy szombati napon online, a Zoom-on tartott előadás formájában, a negyedik pedig jelenléti oktatásban valósult meg. Vagyis a koronavírus-járvány alatt kényszerűségből megismert technikát remekül alkalmazták a szervezők. Lehetővé tették így, hogy mindenki az otthonából, az ország bármely részéből tudjon csatlakozni az előadásokhoz. Az összes előadás anyaga, videófelvétele és további kiegészítések is felkerültek a hálózatra, melyeket a továbbképzés résztvevői letölthetnek maguknak.

A témák nagyon változatosak voltak. A bevezető előadások a nukleáris technika történetéről szóltak. Számomra ez máris olyan téma volt, ami egy felső tagozatos gyerek számára is figyelemfelkeltő, érdekes, ugyanakkor könnyen emészthető. Vagyis továbbadható. Majd a sugárzás mérése került terítékre. Ez az előadás azért volt izgalmas, mert itt már a mélyebb fizikai ismeretek is felszínre kerültek. Ezt követően a jelenlegi hazai kutatási lehetőségekről és a nukleáris energia felhasználásáról, általában az energetikáról tudhattunk meg többet. Ezek az előadások szintén sok olyan területet érintettek, amelyeket az általános iskolában is meg lehet, sőt, meg kell osztani a gyerekekkel. Gondolok például arra, hogy miért olyan fontos a villamosenergia előállítását a felhasználásával minél precízebben összehangolni. És ennek megkönnyítéséhez mennyire fontos, hogy Paks II. már flexibilis erőmű legyen. Különlegesség volt, hogy a hazai nukleáris felügyelet, az OAH (Országos Atomenergia Hivatal) tevékenységéből is ízelítőt kaptunk. Nem is gondoltam még át így soha, hogy mennyire szervezetten működik hazánkban minden, ami az atomenergiára épülő technológiával kapcsolatos tevékenység. Beleértve ennek a biztonsági hátterét is.

A harmadik Zoom-os nap témája a Szilárd Leó Országos Fizikaverseny volt. Sorra kerültek a több mint húsz éves verseny legérdekesebb feladatai és szimulációs prog-

ramjai. A szimulációk egy része is jól használható az általános iskolai fizika oktatása során. A feladatok egy része pedig szakkör keretein belül bemutatható az érdeklődő tanulóknak.

A jelenléti napot a Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében rendezték meg. A csapat itt két részre oszlott. Én abba a csoportba kerültem, amelyik először egy mérési gyakorlaton vett részt. Nagyon izgalmas volt a nukleáris méréstechnika jellegzetességeibe betekintést nyerni. Ötletet meríteni, hogy milyen egyszerű anyagokkal milyen izgalmas mérést lehet végezni. Persze nagyon precízen végiggondolt ismeretekkel felvértezve és a mérés hibáját is jól átgondoltan felállítva. A mérést követően cseréltünk a társaság másik felével, és a működő tanreaktort látogattuk meg. Én nem kerülök túl gyakran egy atomreaktor közelébe, így ezt vártam a leginkább. És nem csalódtam! A reaktorblokk felett állva a Cserenkov-sugárzásban gyönyörködni fantasztikus élmény volt! Megismerhettük a reaktor működését, alkotóelemeit, fontosabb biztonsági berendezéseit, biztonsági protokolljait. Szimuláltak nekünk egy kényszerleállást is. Hiszen a húsvéti szünetre amúgy is le kellett állítani a tanreaktort.



BME-Oktatóreaktor Cserenkov-sugárzásáról készült kép

Nos, ha valaki most bánkódna, hogy ő nem vett részt ezen az érdekes, izgalmas négy napon, vagy, hogy milyen szívesen tapasztalná meg mindezt személyesen, van egy jó hírem: az MNT azt ígérte, hogy a képzést évente megtartják. Mindenkit arra biztatok, hogy igyekezzen nem lemaradni erről a lehetőségről. Elvégre egy jó tanár is holtig tanul, pláne, ha érdeklő is a téma. Szóval mindenkinek ajánlom, kedves kollégák, hogy vegyenek részt ezen az egyedülálló képzésen!

Budapest, 2023. április 16.

Hasznosi Tamásné

EMLÉKEK FIZIKUSHALLGATÓI GENERÁCIÓKAT TUDOMÁNYRA LELKESÍTŐ BARÁTUNKRÓL

Amikor **Boschán Péter (1938–2023)** halálának híre ment, az egykori fizikus egyetemi hallgatók az 1971-ben végzett Gnädig Pétertől az 1990-ben diplomát szerzett Szapudi Istvánig mind fontosnak érezték, hogy tiszteletüknek szeretettel teljes emlékezéssel adjanak kifejezést. Ritka az a fizikus, aki nemcsak meg tudja akadályozni a középiskolai tehetséggondozásból lelkesen egyetemre lépő hallgatók között gyakori kiábrándulást, de képes az egyetemi szintű ismeretek szigorúbb rendjében is a korábbi lelkesedést fokozó szellemi kalandokat kínálni. „Péter bácsi” (Boschán Pétert így emlegették harmincéves korától) a fizikai jelenségek széles körét átfogó kíváncsiságát és ismereteit személyre szabott ösztökéléssel úgy adta tovább, hogy egykori legjobb hallgatói és fiatal kollégái pályájukat meghatározó élményként tartják ma is számon a vele töltött időszakot.

Nemzetközi színvonalon művelte az elméleti magfizikát. Magyarországon egyike volt a magfizikai kölcsönhatások számítógépes vizsgálata úttörő művelőinek. Az ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoportjában, majd az Elméleti Fizikai Intézetben dolgozott tudományos főmunkatársként, majd egyetemi docensként. Ötvenéves elmúlt, amikor habilitált Németországban, a Münsteri Egyetemen. Asztrofizikai csoportot alapított, és az egyetem első asztrofizikaprofesszorának nevezték ki. Témaváltásaival az elméleti fizikai kutatás fókuszterületeinek változását követte.

Az alább következő emlékezések azt bizonyítják, hogy tiszteletet érdemlő kutatási eredményeinek hatását messze meghaladta mentori közreműködése diákjainak és fiatal kollégáinak sikeres pályakezdésében. Péter bácsi a magyar fizika nagy tanáregyéniségei közé tartozott. Elődeitől, Mikolától, Vermestől és társaiktól pusztán az különbözteti meg, hogy kora élvonalbeli kutatási kérdéseivel összefonódó oktatói munkásságát a felsőoktatásban fejtette ki.

Az 1970-80-as években törekvő tanár-diák közösséget szervezett az Elméleti Fizikai Tanszék körül

Gnädig Péter: „Számomra Boschán Péter volt a tanár”

Boschán Péterrel (akit mindenki Péter bácsinak szólított) II. éves fizikus hallgatóként ismerkedtem meg, 1967-ben. Ő vezette a két féléves „Elméleti mechanika” előadás gyakorlatait. Nem sokkal azelőtt tért haza egy franciaországi egyetemen töltött kiküldetéséből, és tele volt lelkesedéssel, az „új idők új dalaival”. Meggyőződése volt, hogy az elméleti fizikának szerves része a komoly feladatmegol-

dási készség. Ennek szellemében (önkéntes) pontversenyt hirdetett, ahol hetente nehéz, nehezebb és még sokkal nehezebb feladatokat tűzött ki nekünk. (A példákat igen nívós francia és angol példatárakból az erre vállalkozó hallgatók fordították.) Bizony, minden esténk és hétvégénk „ráment” a mechanikafeladatokon való töprengésre. Gyakran a probléma megoldhatatlanul nehéznek bizonyult, ilyenkor kétségbeesetten kértünk segítséget tőle. „A francia diákok ilyenkor nem nyafognak, hanem összeszorított fogakkal újra és újra nekiveselkednek. Ti is vagytok olyan okosak, mint ők!” – mondta. És ez hatott, az esetek jelentős részében sikerült, célhoz értünk. Ehhez az is ösztönzést adott, hogy a pontverseny elővasainak kirándulás-látogatás volt a jutalma az akkor frissen megnyílt pszichológiai obszervatóriumba. (Évekkel később bevallotta, hogy ő nem tudta volna megoldani azokat a feladatokat.)

A pontverseny mellett természetesen évközi dolgozatokat is írtunk. Ezek eredményét a tanszék hirdetőtáblájára tűzte ki. (Akkoriban még megengedett volt.) A jegyek csökkenő sorrendben sorakoztak, 5-östől az 1-esig, sőt még nullás is volt. A listát egy furcsa minősítés zárta: –273.

Egy alkalommal az átlagos eredmény igen gyatra volt. Valaki (diák vagy kolléga, ki tudja) egy, az akkori központi pártlapból származó újságkivágást ragasztott a lista tetejére: *Mi fájt Péter bácsinak?* (Az újságcikk eredetileg Veres Péterről, a közkedvelt író-politikusról szólt.) A jegyekkel kapcsolatban ezt mondta: Lehet, hogy igazságtalan vagyok, de nem rosszindulatú. Ha valaki reklamálni akar jobb jegyért, ugyanannyiszor tegye meg a rosszabb jegy irányában is. Egyszer egy diák (talán viccből) azt kérte, hogy az elégséges jegyét rontsa le elégtelenre. Az 1-es jegy nem alkudozás tárgya, azt ki kell érdemelni! – volt a válasz.

1967 decemberében elhunyt a tantárgy 83 éves, köztisztelőben álló előadója, aki érdekes, de nem túl pergő ritmusú órákat tartott. (három hónap alatt sorra került Newton I. törvénye és előkészítette a II. törvényt, viszont megtanultuk a gótbetűs ABC-t, mert minden képletben az szerepelt.) Boschán Péter átvette az előadást, és fiatalos lendülettel a tavasi félév végére behozta a lemaradást. A folyadékok mechanikájában a Landau-Lifsic: Hidrodinamikát követte (amit egyébként később a Rugalmasságtan kötetével együtt ő fordított oroszról). Az első két fejezetet (Ideális folyadékok és a Sűrűlő folyadékok) vetjük át, természetesen kihagyásokkal. Az utolsó óra végén felírta a táblára a további 14 (!) fejezet címét. Sokkoló hatása volt ennek túlzott önbizalmunkra.

Utánozhatatlan, igazi svejki humora volt. Mindenről és mindenkiről volt egy „ismertem egy embert...” kezdetű vi-

dám története. Tudjátok - mesélte, - én egy csepeli általános iskolába jártam. Volt egy osztálytársam, akit mindig csak délután, a tanárban lehetett feleltetni, mert az órán rendszeresen kitört a botrány, úgy röhögött az egész osztály. Az osztálytársam neve: Hoffmann (Hofi) Géza.

Nagyon jó nyelvérzéke volt. Több évet töltött az 1960-as években a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézetben. Szóval az úgy volt - mesélte -, hogy egy év után az orosz kollégáim megértették, amit én mondtam. A második év végén már én is megértettem, amit ők beszéltek, a harmadik év után pedig azt, hogy közben mit gondolnak.

Tél Tamás: „Péter bácsi szakdolgozat előtti éveim meghatározó tanáregyénisége”

Úgy adódott, hogy tanulmányaim során az elméleti fizika több fejezetének is Péter lett a gyakorlatvezetője. Minden órájából a fizika iránti lelkesedés sugárzott, és az is, hogy a megértésért meg kell küzdenünk.

Utólag lehet csak értékelni azt a fizikai érzéket, mellyel a kettős inga mozgásának numerikus szimulálását adta feladatként 1972 táján. A mozgásegyenlet benne van a Landau I-ben, de ott egy szót sem írnak a mozgás lefolyásáról. Megértettük, hogy érdemes megismerkedni a numerikus módszerekkel. A Várba jártunk az MTA nagy CDC-3300-as gépéhez, melyen ő is dolgozott, s melyhez számunkra is hozzáférést biztosított. A gépet lyukkártyákkal lehetett programozni, s bizony megszenvedtük, amíg az első tényleg lefutó néhány sorig eljutottunk. A nyomtatott számoszlopként megkapott eredményeket milliméterpapíron ábráztuk, hogy lássuk, az ingák két végpontja hogyan mozog a síkban. Emlékszem, amikor elkészült, az fogalmazódott meg bennem, hogy „nahát”. Persze, a numerikus pontosság miatt nem követhettük a mozgást hosszan, de már, amit a kezdeti szakaszából láttunk, az sem hasonlított semmilyen ismert görbére vagy annak darabjára. Utólag mondhatjuk, káoszra utaló jelet láttunk. Az első cikk, melyben a káosz szó a ma használt tudományos értelemben előfordul, 1975-ben jelent meg! Péter bácsinak köszönhetően megértettük, hogy a nemlineáris mozgásegyenletek alakjából rendszerint nem lehet következtetni a mozgás lefolyására, ami ma is a káoszelmélet egyik központi állítása.

Gelencsér Jenő: „Tudott kérdezni!”

1975-től 1980-ig jártam az ELTE-re matematika-fizika tanári szakra. Ő tanította az elméleti fizikát. A fél évfolyamot tanította, kb. 40-50-en voltunk.

Maratoni levezetés után elövelt a zsebéből egy kis cetlit, hogy a végeredmény helyes-e. Stimmel mondta. Persze fejből is tudta, hogy jó, de általános derűtséget keltve oldotta a feszültséget bennünk.

Egy gyalázatosra sikerült évfolyamdolgozat után két tálcátűrös süteménnyel jelent meg. Ez volt az engesztelő ajándék a következő szavak kíséretében: a feleségem nem vállalta el a sütését.

Egy elm. fiz.-szigorlaton egy kis időre kiment. A másik két vizsgáztató tovább kérdezett. A három kérdés megfogott. Visszaérve átfogalmazta a kérdéseket, nem volt benne semmi segítség, rávezetés. Mind a hármat tudtam. Levonta a tanulást: nem tudtok kérdezni!

Fái György: „Péter bácsit leginkább a nukleonok közötti kölcsönhatás és a magszerkezet foglalkoztatta”

Boschán Péter jó egy évtizeden át volt közeli munkatársam az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékének magfizika-csoportjában. Ez egy kis csoport volt: Németh Judit, Boschán Péter, meg én, a kezdő. Szakdolgozat-vezetőm, Németh Judit mellett nagyon sokat tanultam Pétertől, nemcsak fizikában, hanem az oktatás terén és emberi magatartásban is.

A kutatásban Péter bácsit, mint az 1970-es évek sok magfizikusát, leginkább a nukleonok (protonok és neutronok) közötti kölcsönhatás és a magszerkezet foglalkoztatta. Ugyanebben az időben a számítástechnika elérte azt a fokot, hogy a nukleonok közötti kölcsönhatás ismeretében numerikus módszerekkel meg tudtuk határozni néhány fontos (gömbszimmetriával rendelkező) atommag alapállapotú kötési energiáját és egyéb tulajdonságait. Az irodalomban sok mezoncserére alapozott kölcsönhatás áll rendelkezésre. A cél az volt, hogy megtaláljuk a magszerkezet mérési adataival leginkább egyező eredményeket adó, „legjobb” kölcsönhatást. Ma tudható, hogy az alapvető erős kölcsönhatás nem a nukleonok között, hanem a nukleonokat alkotó kvarkok-gluonok szintjén működik (kvantum-színdinamika, QCD), így mindez ma már archaikusan túlhaladottnak tűnhet. De a hetvenes évek korszaklеме szerint a sikeres potenciál megtalálása a magfizika alap-problémájának megoldását ígérte.

A numerikus számításokhoz a kor legnagyobb teljesítményű számítógépeire volt szükség. Juditnak és Péternek elsősorban francia és német kapcsolatai voltak a szükséges, ám Magyarországon nem elérhető nagy gépekhez. Ez gyakori utazások és intenzív nemzetközi együttműködések gondját és kiváltságát jelentette. Judittal sok élvonalbeli fizikust elhoztak Budapestre vagy a balatoni konferenciákra és szemináriumokra. Ezek a kapcsolatok sokat segítettek nekem és más fiataloknak is a nemzetközi kutatási élvonal felé vezető úton.

Bár a hetvenes évek végére sikerült olyan térelméletileg megalapozott nukleon-nukleon kölcsönhatási modelleket kifejlesztetni (pl. az ún. Bonn- vagy a Párizs-potenciál), amelyek már „sokkal többet tudtak”, mint tíz évvel korábbi őseik, de ezek is nyitva hagytak olyan kérdéseket, mint a háromtest-kölcsönhatások vagy a relativisztikus effektusok szerepe. Péter figyelme (meg az én figyelmem is) egy időre olyan magszerkezeti kérdések felé fordult, ahol az összetevők impulzusmomentumainak csatolása fontos szerepet játszik (pl. zárt héj + néhány nukleon). Ez a csoportelmélet felé vitt el bennünket, és sok időt töltöttünk csatolási és átcsatolási együttműködések megértésével és kiszámításával.

Kutatómunkájával párhuzamban, sőt, azt megelőző prioritással Péter folytatta szenvedélyes oktatói munkáját. Szervezője és fordítója volt a Landau-Lifsic tankönyvsorozat magyar kiadásának. Motorja volt az 1980-as évtized elején az akkori fiatal oktatók összefogásával elkészült Elméleti Fizikai Példatár összeállításának. Abban az egykor általa kitűzött feladatok sokasága köszönt vissza.

Pályám során sok egyetemi oktatóval találkoztam, de talán senki sem fordult olyan nyitottsággal, gonddal, segítőkészséggel, és humorral hallgatói és fiatal kollégái felé, ahogyan Péter tette. Mély személyes barátságunkon az sem változtatott, hogy az utóbbi években, évtizedekben megszire sodort bennünket a sors.

A hazai fizikához való ragaszkodása végigkísérte münsteri éveit

Gnädig Péter: „Münsterben a KöMaL feladataiból válogatta a szakköri foglalkozások anyagát”

A rendszerváltozást nem sokkal megelőzően a Münsteri Egyetem Elméleti Fizikai Intézetében az asztrofizika professzoraként indított új kutatási irányt. Emellett a város körzetében működő középiskolák diákjainak vezetett feladatmegoldó szakkört, minthogy nem volt elégedett az ottani „tehetség gondozással”. A KöMaL feladataiból válogatta a szakköri foglalkozások anyagát, mert a magyarországi tehetségfejlesztő tevékenységet jobbnak ítélte. Hozott is három tehetséges német diákot a KöMaL nyári fizikáborába, akik a csapatverseny során szomorúan állapították meg, hogy a magyar társaik többsége jóval képzetesebb náluk.

Tél Tamás: „Egykori tanítványként, kislánya lehetett a tanítványom”

1990-ben vendégkutatóként Jülichben dolgoztam, Péterék akkortájt költöztek Münsterbe. Ott ismerkedtünk meg akkor egyéves, harmadik kislányával, Julival. 18 évvel később, Juli fizikus alapszakos tanulmányait az ELTE-n kezdte meg. Julit Péter, a magyar közoktatás színvonalát a németországi fölött értékelve, már korábban hazaküldte és középiskolai tanulmányait a Városmajori Gimnáziumban fejezte be.

Péter aztán 2010-ben váratlanul azt kérdezte: elvállalnám-e Juli szakdolgozat-vezetését a Kármán Környezeti Áramlások Laborral kapcsolatos témában. Számomra ez különös megtiszteltetés volt, hiszen egykori tanítványként kislánya lehetett a tanítványom. Ugyanakkor nagy felelősség is volt, így Vincze Miklós társ-témavezetésével kezdtük a munkát. A választott téma a kétrétegű folyadékok áramlásával lett kapcsolatos. A felül ritkább (édes) alul sűrűbb (sós) víz a fjordokat jellemzi például. Köztudott, hogy az enyhe felszíni hullámzáshoz a a sűrűségeket elválasztó belső felület erős hullámzása társul. Azt kérdeztük, mi történik, ha az alsó rétegben két közel azonos magasságú akadály (a fjord példájában két természetes kőgát) van jelen különböző távolságokban. A közösen végzett kí-

sérleteken kívül szimuláltuk is az áramlást egy parciális differenciálegyenleteket megoldó programmal. Mindkét megközelítésben azt találtuk, hogy az akadályok bizonyos távolsága esetén rezonancia alakul ki, melynek során a belső hullámok olyan nagy amplitúdójúvá válnak, hogy már nemlineáris hullámoknak tekintendők. Ennek kapcsán ismerkedtünk meg a furcsa nevű cnoidális hullámokkal, melyek itt jó közelítéssel megvalósulnak. Ezek az eredmények végül egy Physics of Fluids-cikkben jelentek meg.

Egy másik hosszú tudományos kapcsolatot is köszönhetek Péter bácsinak. Egy alkalommal, amikor éppen Drezdában voltam (Komplex Rendszerek Max Planck Intézete), kérdezte, hogy küldhetne-e hozzám egy jó diákot Münsterből, kutatási gyakorlatra. Mondtam: igen, s a fiú nemsokára megjelent. Egy jó órás beszélgetés elég volt arra, hogy megfogalmazzunk egy tervet. Ekkor kérdeztem, mikor folytatjuk és hol. A válasz az volt, ő már kivett Drezdában egy szobát, és ugyanarra a két hétre, ameddig én is még ott leszek. Kapott egy helyet is az intézetben, és e két hét alatt első cikkünk lényegében el is készült. Anton Daitche-val utána sokat dolgoztunk együtt. Fő témánk a kis, de véges méretű (szennyező) részecskék sodródása lett, melynek elméleti érdekessége, hogy a viszkozitási erő hatása felhalmozódik, s egy csak végtelen idő után lecsengő memóriatagban jelenik meg. Ennek numerikus kezelése sem egyszerű, ezért gyakran elhanyagolják, de kimutattuk, hogy ez rendszerint nem jogos. Még talán most is együtt dolgoznánk, ha Anton nem határozza el, hogy az alap kutatás helyett az ipari fizikusságot választja. A diákévek mellett, a Julival és Antonnal töltött idő feledhetetlen ajándékot jelentenek számomra Péter bácsitól.

Szapudi István: „Péter bácsinak a fizika a szórakozás legmagasabb foka volt”

Az 1990-es évtized elején Szalay Sándor keze alatt kezdő PhD-hallgatóként dolgoztam az első komolyabb projektemen a Johns Hopkins Egyetemen. Akkor és ott nem tudatosodott bennem, hogy Péter bácsi látogatása Baltimore-ban számára is meghatározó volt. Ebben az időszakban költözött el Magyarországról, és egyéni sorsához hasonló, 180 fokos radikális fordulattal a következő évtizedben kozmológiai témákban publikált.

Az első benyomásom az volt, hogy Péter bácsi számára a fizika elsősorban a szórakozás legmagasabb foka. Bármilyen témáról hajlandó volt ötletelni, beszélgetni. Rengeteg időt töltöttünk a táblánál, zöldfülűként rengeteget tanultam tőle, és minden percét élveztem. Például, Péter bácsi nagymestere volt a Monte-Carlo szimuláció technikájának, és szabályos mesterkurzust adott róla, amikor szóba került. Azóta is rá emlékezve mosolyodok el, ha az „importance sampling”-re terelődik a szó.

És persze néha elakadtunk, vagy elfáradtunk, de olyankor rögtön előjöttek a híres viccek és történetek. Bármilyen, akár negatív dolog történt, ő azt utólag viccesen el tudta mesélni, legyen a téma a körömgomba (nem viccelek!), a pap, akitől megkérdezte „most te tényleg hiszel?”,

vagy amikor homokot szórt a német bevándorlási bürokrácia olajozott fogaskerekei közé azzal, hogy nevét átírta „Boschän”-ra (umlaut!).

Mindennek a végeredménye az lett, hogy első referált cikkemen Péter bácsi társszerzőm lett. A galaxisok Gauss-eloszláson túlmutató viselkedését karakterizáltuk a statisztikus és a részecskefizika által inspirált módszerekkel. A Monte-Carlo szimuláció és a Feynman-diagramok módszereit ötvözve még írtunk egy ráadáscikket is. Ha rövid volt is, számomra örökre értékes marad a közös munka és feledhetetlen az együtt töltött idő.

Zárszó

Péter szerette és ismerte a verseket. Több évtizedes külföldi tartózkodás után is kívülről tudta Arany János versének, a *Nagyidai cigányoknak* fizikusok számára is megfontolandó sorait a várat ostromló labancok sárba temetett húsz ágyújáról:

„Kettős úton halad az emberi élet,
Egyik a gyakorlat, másik az elmélet,
S minthogy az elmélet most ezuttal sáros,
Hadd lám, a gyakorlat merre viszen már most.”

Gelencsér Jenő (fizikatanár, Kaposvár), **Gnädig Péter** (e. docens, ELTE), **Fái György** (e. tanár, Kent State University), **Tél Tamás** (e. tanár, ELTE) és **Szapudi István** (e. tanár, University of Hawaii) emlékezéseiből összeállította **Patkós András** (e. tanár, ELTE)



1962. augusztus. A nemzetközi Balaton Kupa tájfutó verseny céljában Salát Péter geofizikus jobbján Boschán Péter (Friedrich Vilmos vegyész tájfutó gyűjteményéből)

TÁRSULATI DÍJAK

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT 2023. ÉVI DÍJAZOTTJAI

DÍJ	DÍJAZOTT
Bozóky László	Bujtás Tibor
Budó Ágoston	Rácz Péter
Detre László	Molnár László
Gyulai Zoltán	Révész Ádám
Jánossy Lajos	Újvári Balázs
Szigeti György	Csík Attila

DÍJ	DÍJAZOTT
ELFT érem	Lendvai János
Eötvös Plakett	Kádár György
Prométheusz díj	Molnár Milán
Fizikai Szemle Nívódíj (tanulmány)	Cserti József, Dávid Gyula
Fizikai Szemle Nívódíj (tanítás)	Raffai Péter, Molnár András

Gratulálunk!

The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2023

www.nobelprize.org
III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach



Katalin Karikó



Drew Weissman

“for their discoveries concerning nucleoside base modifications that enabled the development of effective mRNA vaccines against COVID-19”

THE NOBEL ASSEMBLY AT KAROLINSKA INSTITUTET

The Nobel Prize in Physics 2023

www.nobelprize.org
III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach



Pierre Agostini



Ferenc Krausz



Anne L'Huillier

“for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter”

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES