

A TORZIÓS INGÁK JELENTŐSÉGE EÖTVÖS LORÁND SZÜLETÉSE UTÁN 175 ÉVVEL

THE SIGNIFICANCE OF THE TORSION BALANCE 175 YEARS AFTER THE BIRTH OF LORÁND EÖTVÖS

Völgyesi Lajos¹, Szondy György², Tóth Gyula³, Fenyvesi Edit⁴, Kovács Péter⁵, Kiss Bálint⁶,
Égető Csaba⁷, Barnaföldi Gergely Gábor⁸, Lévai Péter⁹, Ván Péter¹⁰

¹az MTA levelező tagja, geofizikus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest
volgyesi.lajos@emk.bme.hu

²doktorandusz, villamosmérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest

³a műszaki tudomány kandidátusa, geodéta, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest

⁴PhD, fizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

⁵PhD, geofizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

⁶PhD, villamosmérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék, Budapest

⁷PhD, geodéta, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest

⁸PhD, fizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

⁹az MTA rendes tagja, fizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

¹⁰az MTA doktora, fizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest

ÖSSZEFOGLALÁS

Eötvös Loránd nevéhez a fizika történetében számos nagy felfedezés kötődik, igazi hírnevét, elismertségét azonban zseniális találmánya, a róla elnevezett torziós inga hozta meg. Híres műszerének első példányát, a horizontális variométert 1890-ben építette meg, amelyet élete során folyamatosan fejlesztett tovább. Röviden áttekintjük, hogy 175 évvel Eötvös Loránd születése után és több mint 130 évvel az első torziós ingája elkészítését követően mi a jelenlegi szerepe és jelentősége az Eötvös-ingának. Magyarországon most három tudományterületen használjuk a torziós ingát. A fizikai geodéziában az ingával mérhető görbületi gradienseket a Föld elméleti alakja, a geoid finomszerkezetének meghatározására használjuk, a fizikában Eötvösék mérési pontosságát közel két nagyságrenddel felülmúlva a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságát igazoló ekvivalenciaelv újramérését végezzük, legújabbban pedig felmerült a lehetsége bizonyos földrengések torziós ingával történő előrejelezhetőségének.

ABSTRACT

Loránd Eötvös's name is associated with many great discoveries in the history of physics, but his real fame and recognition came from his ingenious invention, the torsion pendulum named after him. He built the first example of his famous instrument, the horizontal variometer, in 1890 and continued to improve it throughout his life. We will briefly review the role and significance of the Eötvös torsion balance today, 175 years after Eötvös was born and more than 130 years after he built his first torsion balance. In Hungary, we currently use the torsion balance in three scientific fields. In physical geodesy, curvature gradients measured by the torsion balance are used to determine the fine structure of the geoid (the theoretical shape of the Earth); in physics, we are re-measuring the equivalence principle, which proves the identity of gravitational and inertial mass, by almost two orders of magnitude beyond the accuracy of Eötvös's original measurement; and most recently we have raised the possibility of predicting certain earthquakes with the torsion balance.

Kulcsszavak: Eötvös Loránd, torziós inga, geoid, ekvivalenciaelv, földrengések előrejelzése

Keywords: Loránd (Roland) Eötvös, torsion balance, geoid, equivalence principle, earthquake prediction

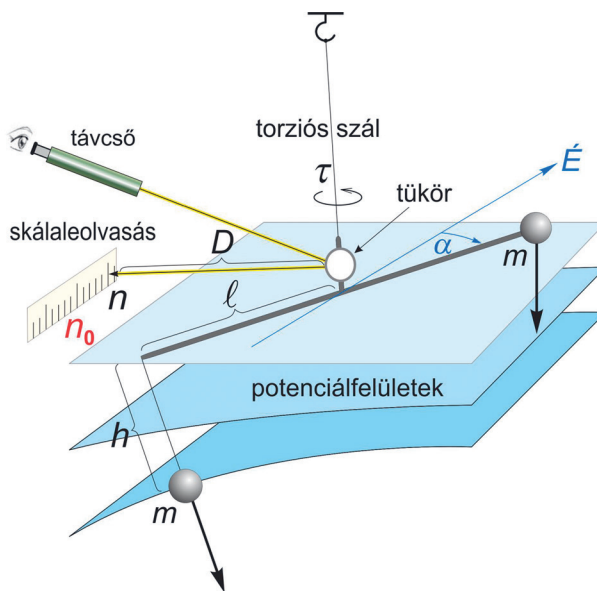
EÖTVÖS TORZIÓS INGÁI

Eötvös Loránd 1886-ban kezdett gravitációs kutatásokkal foglalkozni. Kísérleteihez először egy Coulomb- (Cavendish-) féle torziós ingát készített 1890-ben, amelynek fő szerkezeti eleme vékony szárra függesztett vízszintes ingakar volt, a két végén elhelyezkedő azonos nagyságú tömegekkel. Ezzel az ún. *görbületi variométerrel* a testekre ható tömegvonzási (gravitációs) és a Föld forgásából származó centrifugális erő eredője, a nehézségi erőtér potenciálfelületeinek alakját tudta meghatározni.

Ugyancsak 1890-ben készítette el a következő műszerét, a *horizontális variométert*. Ebben Eötvös óriási ötlete az volt, hogy a 0,02–0,03 mm átmérőjű rugalmas wolfram- vagy platinaszálon függő vízszintes ingarúdról az egyik tömeget levette, és az *I. ábrán* látható módon, vékony szálon h távolsággal mélyebbre függesztette fel. Ezzel a változtatással nemcsak a szintfelületek görbületi viszonyait tudta meghatározni, hanem arról is információt kapott, hogy a szintfelületek mennyire nem párhuzamosak egymással. Ez az apró változtatás tette alkalmassá a horizontális variométerét a geofizikai alkalmazásokra, az ásványi nyersanyagok kutatására.

A torziós ingára egyrészt a nehézségi erőtér térbeli változásából származó forgatónyomaték, másrészt, ezzel ellentétes értelemben a felfüggesztő szál csavarási nyomatéka hat. Egyensúly esetén a két ellentétes irányú forgatónyomaték egyenlő

egymással. Ez teszi lehetővé a nehézségi erőtér forgatónyomatékának összehasonlítását a felfüggesztő szál csavarási nyomatékával, és így a nehézségi erő térbeli változását jellemző mennyiségek (a *görbületi* és a *horizontális gradiensek*) meghatározását. Eötvös további nagy ötlete az volt, hogy ugyanazon ingaházon belül egymással párhuzamosan, de ellentétes irányítással két ingaszerkezetet helyezt el. Ezzel felére csökkentette a mérési időt, ugyanakkor növelni tudta a mérési pontosságot. Az első kettős inga, az ún. *kettős nagyeszköz* 1902-ben készült el, és ez lett a kiinduló típusa az összes ezután gyártott és technikailag továbbfejlesztett terepi műszernek. A kettős nagyeszközből három példány készült, és ezzel végezte Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságára vonatkozó ekvivalenciaméréseket (Völgyesi et al., 2018).



1. ábra. A horizontális variométer működési alapelve (Völgyesi Lajos szerkesztése)

Az 1920-as évektől jelentősen megnőtt a kőolaj- és földgázkutatással kapcsolatos geofizikai vizsgálatok igénye, ezért újabb terepi mérésekre alkalmas ingatípusokat készítettek. Az erre a célra kifejlesztett két legfontosabb műszer az Eötvös–Rybár-féle Auterbal (Automatic Eötvös–Rybár Balance) inga, illetve az Eötvös–Pekár-féle G-2 típusjelzésű torziós inga (2. ábra). Az Auterbal-ingák esetében az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legfontosabb fejlesztési cél a műszer automatikus forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt. Az Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengés-



2. ábra. Az Eötvös–Rybár- (Auterbal-) inga (háttul) és az Eötvös–Pekár- (G-2) inga (elöl) (fotó: Völgyesi Lajos)

idő csökkentése mellett a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezte a fő hangsúlyt, ezért megmaradt a manuális forgatás és a pontosabb és megbízhatóbb vizuális leolvasás mellett. A két típusból összesen mintegy 125 példányt készítettek Magyarországon, amelyeket a világ harminc különböző országában alkalmaztak, elsősorban szénhidrogén-lelőhelyek felkutatása céljából (Szabó, 1999).

Az 1950-es években az Eötvös által alapított és halála után a nevét is viselő Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) munkatársai további terepi műszert is fejlesztettek. Ebből, az E-54 típusjelű ingából 109 darabot készítettek, amelyeket kettő kivételével exportáltak (Szabó, 1999).

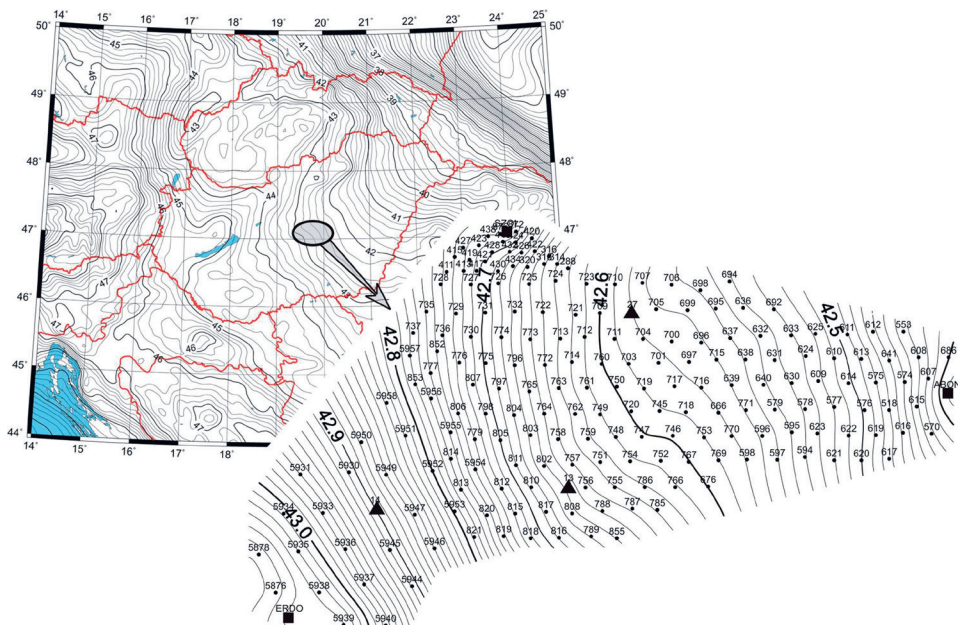
TEREPI MÉRÉSEK ÉS EZEK FIZIKAI GEODÉZIAI HASZNOSÍTÁSA

Eötvös Loránd munkatársaival közösen, az első tényleges terepi ingamérést a horizontális variométerrel a Celldömölkhez közeli Ság-hegy mellett végezte 1891-ben. Eredményeit a Ság-hegy akkor még szabályos csonka kúp alakú tömegének gravitációs hatását kiszámítva ellenőrizte. Eötvös következő nevezetes méréseit a Balatoni-ingájával végezte 1901 és 1903 téli hónapjaiban, összesen negyven állomáson, a Balaton jegén. A balatoni vizsgálatoknak az volt a jelentőségük, hogy nem kellett a felszíni topográfiai tömegek zavaró hatása miatt korrekciókat számolni, és a mérési eredményekből közvetlenül lehetett következtetni a felszín alatt eltakart tömegek elrendeződésére.

A nehézségi erőtér valamely kiválasztott szintfelülete szerkezetének részletes meghatározásával Magyarországon (és a világon is) először a 20. század első évtizedében tudományos célokból Eötvös Loránd foglalkozott. Arad vidékén a torziós ingával végzett mérések felhasználásával (Bíró et al., 2013) Arad korabeli ingaállomásának vonatkozási pontján átmenő szintfelületnek az ugyanezen pontban a szintfelületet érintő Bessel-ellipszoidhoz viszonyított eltéréseit szerkesztették meg 2 cm-es értékközű izovonalakkal. Ehhez a területen torziós ingával felmért 188 állomás nehézségi gradiens adatait, a függővonal-elhajlásra csillagászati-geodéziai mérésekből hét állomásra nyert É–D-irányú összetevőt, és 2 állomásra meghatározott K–Ny-irányú összetevőt vették alapul.

Eötvös 1919-ben bekövetkezett haláláig 1420 ponton határozták meg a nehézségi erőter gradienseit és potenciálfelületének görbületi jellemzőit. A méréseket, ahol a topográfia megengedte, általában szabályos hálózatban végezték, kezdetben 3-4, majd 2, illetve 1 km-es állomástávolsággal. Az 1920-as évek kezdetétől a torziós ingák egyre nagyobb szerepet játszottak a kőolajkutatásban. Ezeket a méréseket kizárólag gazdaságossági szempontok vezették, így kezdetben főleg utak mentén mérték, majd, ahol a mérési eredmények kedvező földtani szerkezetet jeleztek, ott áttértek a hálózatos mérésekre. Magyarországon az utolsó nyersanyagkutató terepi Eötvös-inga-mérésre 1967-ben került sor. Az 1901–1967 közötti időszakban a Magyar–Amerikai Olajipari Rt. (MAORT), az ELGI és az Országos Kőolaj és Gázipari Tröszt (OKGT) összesen mintegy 60 000 állomáson végzett torziósinga-méréseket sík és enyhén dombvidéki területeken. Mivel ezek a mérések elsősorban ásványi nyersanyagok kutatására szolgáltak, ezért általában csak a nehézségi erő W_{zx} és W_{zy} horizontális gradienseit dolgozták fel, a fizikai geodézia szempontjából fontosabb W_{Δ} és W_{xy} görbületi gradiensek többnyire felolgozatlanul maradtak.

A görbületi gradiensek felhasználásával függővonal-elhajlások számíthatók, amely eljárást már Eötvös Loránd kidolgozta. A megfelelő pontsűrűséggel ismert függővonal-elhajlásokból pedig a csillagászati szintezés módszerét alkalmazva



3. ábra. A geoid finomszerkezete Cegléd környékén Eötvös-ingával végzett mérések felhasználásával (Völgyesi, 1995, 2015, 2019)

a geoid finomszerkezete határozható meg. Erre vonatkozóan kísérleti számításokat végeztünk a Cegléd környéki teszterületen, ahol 206 Eötvös-inga-mérési pont, három asztrogeodéziai és három asztrogravimetriai pont állt rendelkezésre. Az ellenőrző pontokban adódó eltérések alapján számított fél szögmásodperc körüli középhiba azt igazolta, hogy a módszerrel a függővonal-elhajlás ζ és η összetevőire nagyobb összefüggő területre is elfogadható pontosságú értékek számíthatók. A függővonal-elhajlás ezen értékeit felhasználva meghatároztuk a vizsgált területre a részletes geoidképet is, amely a geocentrikus elhelyezését EGG97 geoid 1 cm izovonalközű finomítása (Völgyesi, 1995, 2001, 2015, 2019). A 3. ábrán ez a finomított geoidkép látható. A legújabb magyarországi geoidmegoldások már figyelembe veszik az Eötvös-inga-mérések adatait is.

2007 és 2009 között felújított és modernizált Eötvös-ingákkal és graviméterekkel átfogó terepi méréseket is végeztünk a Csepel-sziget déli részén, részben a korábbi ingamérések linearitásvizsgálata, részben a teljes Eötvös-tenzor előállítására és vizsgálatára céljából (Csapó et al., 2009).

AZ EÖTVÖS-KÍSÉRLET ÚJRAMÉRÉSE

Eötvös Loránd munkatársaival, Pekár Dezsővel és Fekete Jenővel 1906-tól mérősorozatot végeztek (EPF-mérések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan (Eötvös et al., 1922). A súlyos és a tehetetlen tömeg azonossága Einstein általános relativitáselméletének (gravitációelméletének) kiinduló alapja. 1986-ban Ephraim Fischbach és társai az EPF mérési eredményekben olyan szisztematikus anyagfüggést véltek felfedezni, amelyet végül kísérletileg nem tudtak igazolni, ugyanakkor az eltérések okára máig sem találtak magyarázatot. Mi viszont az egykori mérések leírásait tanulmányozva lehetséges magyarázatot találtunk a méréseket terhelő szabályos hibaforrásra (Tóth, 2019), ami indokoltá tette az eredeti ekvivalenciakísérlet megismétlését a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált, jobb feltételek mellett.

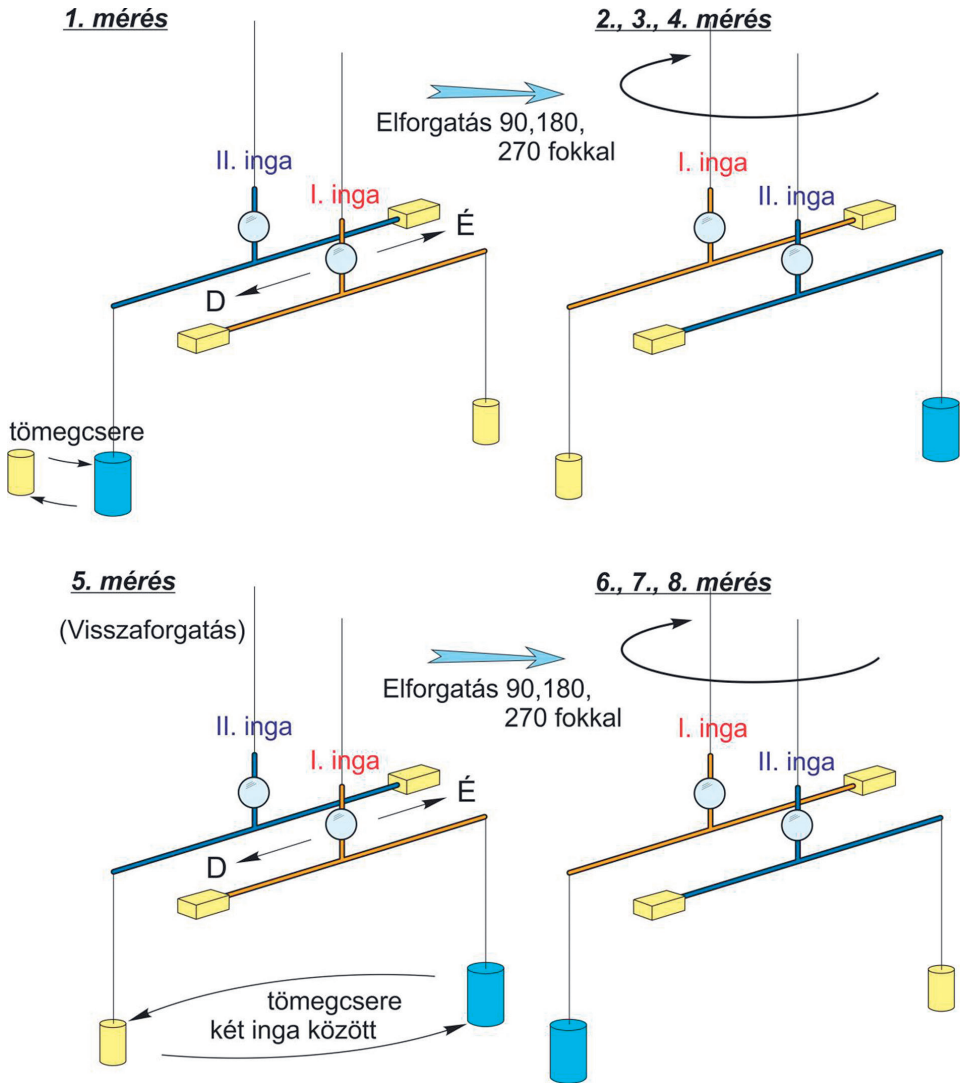
A súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozó EPF-mérések során Eötvös feltételezte, hogy a különböző tömegekre ható forgási centrifugális erő független az anyagi minőségtől, viszont a tömegvonzási (gravitációs) erő függhet tőle. Gondolatban helyezzünk valamely földfelszíni pontba különböző anyagokat (például aranyat és alumíniumot). A két különböző testnek legyen szigorúan azonos a tömege. A feltételezés szerint mindkét testre a Föld tengely körüli forgásából adódóan azonos centrifugális tehetetlenségi erő hat, viszont a Föld a két különböző testre más gravitációs erőt fejt ki. Ekkor a gravitációs és a centrifugális erő eredője – a nehézségi erő – is a különböző anyagokra különböző lesz. Az Eötvös-kísérlet fő kérdése az, hogy az inga karjáról lelógatott tömeget kicserélve a felső tömegtől eltérő másik anyagból készített tömegré, a felső és az alsó testre

ható feltételezett különböző erők miatt tapasztalható-e az inga karjának kis elfordulása.

Eötvös és munkatársai a tömegcserés mérési eljárásra három különböző módszert dolgoztak ki. Mi a 4. ábrán látható tömegcserés mérési stratégiát követjük a méréseink során, mivel a lehető legtöbb zavaró hibaforrást ezzel lehet kiküszöbölni (Völgyesi et al., 2018). A mérés első lépésében a II. inga lelógatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű alumíniumra és az É–D irányba ($\alpha = 0^\circ$ azimutba) állított ingaszerkezeten leolvassuk az ingák nyugalmi helyzetét. A 2., 3. és 4. lépésben $\alpha = 90^\circ$, 180° és 270° azimutba elfordítva a teljes ingaszerkezetet szintén leolvassuk az ingakarok nyugalmi helyzetét. Az 5. lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 0^\circ$ azimutba, kicseréljük egymással az I. és a II. ingarúdról lelógatott tömegeket, és így is leolvassuk a nyugalmi állapotban az ingakarok helyzetét. Végül a 6., 7. és 8. lépésben az ingakarokon felcserélt tömegekkel elfordítjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 90^\circ$, 180° és 270° fokos azimutba, és így is leolvassuk az I. és a II. ingakar valamennyi nyugalmi helyzetét.

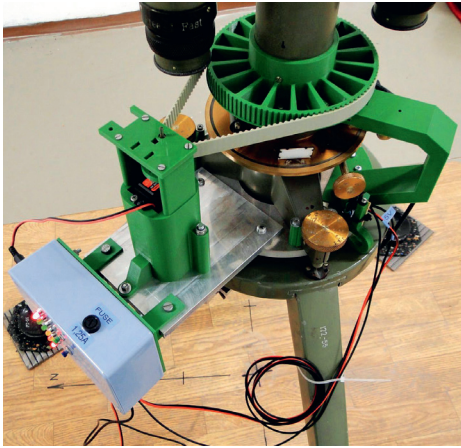
A fellelhető és mérőképesse tehető műszerek közül jelenleg egyedül az Eötvös–Pekár-inga alkalmas az itt leírt mérési stratégia szerinti mérések elvégzésére. A műszer egyetlen példányával a soproni HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet jogelődje, az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézete rendelkezett. Mivel az inga közel ötven évig pihent az intézet raktárában, mérésre az akkori állapotában alkalmatlannak bizonyult. A műszer jelentős felújításra szorult, főként az alumínium alkatrészek korróziója, a csapágyak szorulása, a libellák letapadása és más hasonló problémák miatt.

Az EPF-mérések rendkívüli precizitást igényelnek, és hosszú ideig, több éven keresztül tarthatnak. A mérések során a hibaforrások csökkentése és a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölése céljából számítógépes távvezérléssel kellett megoldani a mérési folyamat teljes automatizálását. Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából a vizuális leolvasás helyett nagy érzékenyséű és sebességű CCD-érzékelőket alkalmaztunk, a skálák megvilágítására pedig erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) használtunk. Az új, automatikus leolvasást alkalmazva nagyjából két nagyságrenddel sikerült megnövelnünk Eötvösék egyébként is rendkívüli leolvasási pontosságát. A mérési folyamat teljes automatizálásának másik fontos eleme az ingák különböző mérési azimutokba állítása távvezérelt forgatással. A forgató mechanikának fontos követelményeket kellett kielégítenie. A forgatások közötti, mérendő nyugalmi helyzetet nem zavarhatják a forgatómotor és a hozzá kapcsolódó szerkezetek által okozott permanens mágneses zavarok. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga tetszőleges azimutba forgatása szögmásodperc pontossággal, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül, a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, körültekintően definiált sebességprofil követve történjen. A forgatás során a megfelelően lassú, egyenletes indulás és fokozatos megállás



4. ábra. Az EPF mérési stratégia Eötvösék 3. tömegcserés módszere szerint (Völgyesi et al., 2018)

az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt (Völgyesi et al., 2018, 2021, 2023). Az inga különböző mérési azimutokba történő automatikus forgatásához speciális szerkezetet építettünk, a mágneses hatások kiküszöbölése miatt az alkatrészeket 3D-nyomtatással készítettük (5. ábra). A távvezérelt forgatás legfontosabb eleme az inga tengelyére rögzített, kör alakú, pozíciómeghatározásra és mozgásvezérlésre használt



5. ábra. Távvezérelhető forgató mechanika az Eötvös–Pekár-ingán
az Eötvös–Pekár-ingán
(fotó: Völgyesi Lajos)

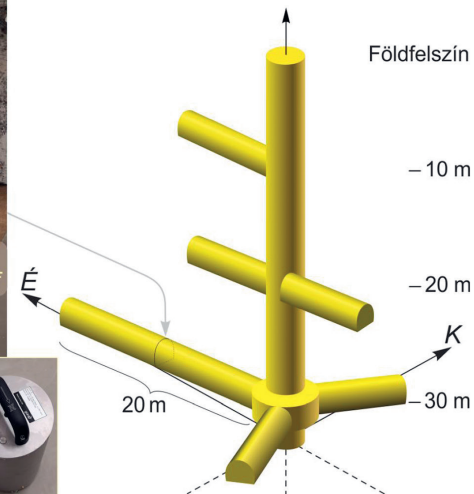
Renishaw-kódgyűrű, amely abszolút skálával van ellátva, és a hozzá tartozó optikai olvasófej segítségével az inga pozíciója (azimutja) szögmásodperc pontossággal állítható be és olvasható ki. Ez is jelentős előrelépés, mivel az eredeti Eötvös-kísérletek során az azimutmeghatározás pontossága mindössze néhány tized fok lehetett (Völgyesi et al., 2018, 2021, 2023).

A felújított és továbbfejlesztett Eötvös–Pekár-ingával jelenleg is folyó méréseket 2019-ben kezdtük el a 6. ábrán látható helyszínen, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában. Méréseink várhatóan még hosszú ide-

ig tartanak, részben attól függően, hogy hány további anyagpárra végezzük el a vizsgálatokat. Eddig arany-réz és arany-alumínium anyagpárokkal próbálkoztunk, ezekkel egyelőre nem tapasztaltuk az ekvivalenciaelv sérülését.



6. ábra. EPF-mérés Eötvös–Pekár-ingával a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában, 30 méteres mélységben
(Völgyesi et al., 2023)



FÖLDRENGÉSEK VIZSGÁLATA EÖTVÖS-INGÁKKAL

Miután az Eötvös-ingák átalakításával közel két nagyságrenddel sikerült megnövelnünk a leolvasási pontosságot, számos olyan, a méréseket zavaró hatás megjelent, amelyek korábban nem voltak észlelhetők, így látszólag nem zavarták a méréseket. A legjelentősebb változást az hozta, hogy míg korábban a méréseket a hosszú csillapodási idő letelte után az észlelő személy egyetlen közvetlen skálaleolvasással végezte, most magát a csillapodási görbét rögzítjük elektronikusan. Így egyrészt kiküszöbölhető lett az észlelő személy tömegének zavaró gravitációs hatása, másrészt, az egyetlen esetleges skálaleolvasás helyett másodpercenként több leolvasással magát a csillapodási görbét rögzítjük, és ennek alapján határozzuk meg az elméleti csillapodási helyzetet.

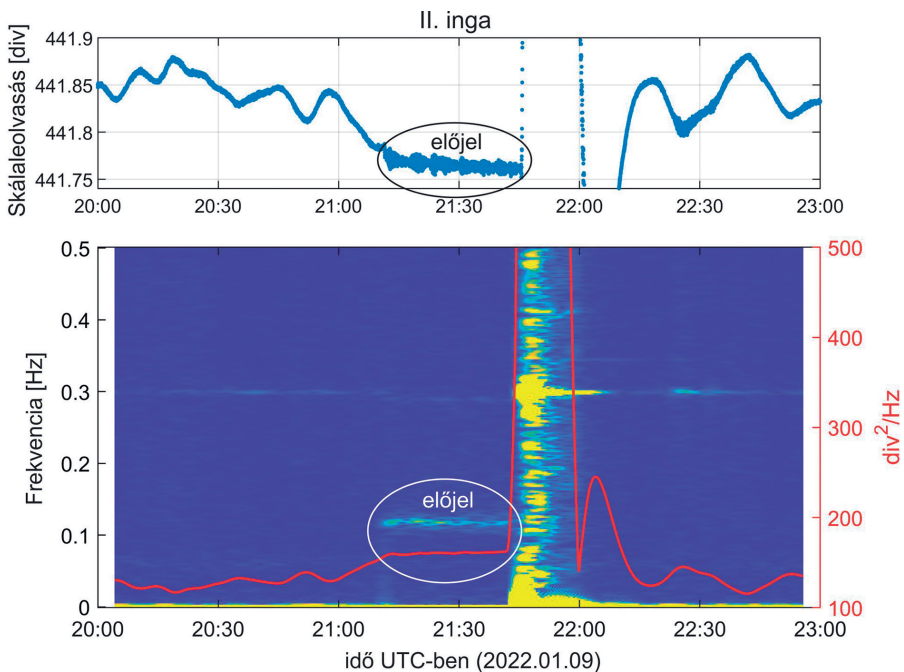
Az új, jóval pontosabb leolvasási technika alkalmazásával azt tapasztaljuk, hogy a torziós ingák a csillapodási idő letelte után sem lesznek soha tartósan nyugodt, mozdulatlan egyensúlyi helyzetben, hanem furcsa bonyolult rezgéseket végeznek (Völgyesi et al., 2023). Ennek több különböző oka lehet (hőmérséklet-, légnomás-, páratartalom-változások, mikroszeizmikus talajnyugtalanág, infrahangok, a torziós szálakban lejátszódó szilárdtest-fizikai változások, csavarási mikroszakadások, newtoni zaj stb.), amelyek azonosítása, szétválasztása és hatásuk kompenzálása kutatásaink egyik legnagyobb kihívása.

A jelentősen megnövelt leolvasási pontosság mellett a méréseinkben megjelentek a különböző földrengések által okozott zavaró hullámok is, amelyeket természetesen az EPF-méréseink szempontjából mérési zajként kellett kezelnünk. Jelentős fordulat következett be, amikor a 2022. január 9-i görögországi florinai földrengés kipattanása előtt fél órával olyan eddig ismeretlen furcsa előjelet rögzítettünk az ingával, amelyet egyetlen szeizmológiai obszervatórium műszerei sem jeleztek, és a torziós ingánk közvetlen szomszédságában működő Güralp 3T szeizmográf regisztrátumain sem volt látható (Völgyesi et al., 2022). A megfigyelés felvetette annak a gyanúját, hogy lehetnek olyan földrengések, amelyek előre jelezhetők torziós ingával, ezért ezt követően a vizsgálatainkat kiterjesztettük a földrengések vizsgálatára is.

Az inga működését befolyásoló zajokat, ezek mértékét és időbeli változását, valamint környezeti változókkal való kapcsolatát az ingajelek dinamikus spektrumai alapján folyamatosan elemezzük. Ilyen vizsgálat eredménye látható a szóban forgó görögországi földrengés idején a 7. ábrán. Az ábra felső részén a Pekár II.-inga 2022. 01. 09. 20:00 és 23:00 UTC közötti időszakra rögzített idősorát mutatjuk, míg az ábra alsó részén a *spektrogram* látható 512 s hosszú, 500 s időtartamon átlapolt Hanning-típusú analizáló ablak használatával számolva (Völgyesi et al., 2023). A spektrogramon kb. 0,3 Hz körüli frekvencián folyamatos periodikus jel látszik, amely az inga sajátrezgéséhez kapcsolódik. Az inga csillapodásához köthető, illetve a környezeti paraméterekkel összefüggő válto-

zások általában hosszú periódusúak, tehát a spektrogramok alsó tartományában vizsgálhatók. Ezzel szemben a közelben és/vagy nagy magnitúdóval kipattanó földrengések az ingákat széles frekvenciatartományban (0–0,5 Hz) gerjeszthetik, ezért a spektrogramokon a rengéshullámok beérkezési időpontjában függőleges gerjesztési zóna jelenik meg (lásd 21:45 UTC körül a 7. ábra spektrogramján). Tapasztalatunk szerint azonban a távoli és/vagy kis magnitúdójú földrengések is érzékelhetők, mert ilyenkor az inga sajátrezgésének amplitúdója megnő, és ez a sajátfrekvenciához kapcsolható frekvencián energianövekedésként jelentkezik a spektrumokon. Ez alapján egy automatikus földrengés-detektáló algoritmust fejlesztettünk, amely jelzi, ha a két egymással szembefordított inga, sajátfrekvencián mért rezgésének amplitúdója bizonyos időtartamon belül egyszerre halad meg egy előre beállított szintet. Az algoritmus segítségével 2022 kezdetétől közel 2200 földrengést detektáltunk, amelyek eredetét az USGS (United States Geological Survey) földrengés-katalógus bejegyzéseivel azonosítottunk (Völgyesi et al., 2023).

Mindez újabb fontos irányt adott az Eötvös-ingával végzett kutatásainkban. Ezért az utóbbi időkből további három Auterbal-ingát újítottunk fel, amelyekkel



7. ábra. A Pekár II.-inga 2022. 01. 09. 20:00 és 23:00 UTC közötti időszakra vonatkozó idősora (fent) és spektrogramja (lent), bekeretezéssel kiemelve az előjeleket (Völgyesi Lajos szerkesztése)

elsősorban a földrengéseket és az ezeket megelőző esetleges előjelek tanulmányozását tervezzük, és arra próbálunk választ keresni, hogy torziós ingákkal valóban lehetséges-e bizonyos földrengések előrejelzése. A 8. ábrán látható felújított és átalakított műszerek már tesztüzemmódban működnek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének gravitációs laboratóriumában.



8. ábra. Auterbal-ingák a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének gravitációs laboratóriumában
(fotó: Völgyesi Lajos)

Megállapíthatjuk tehát, hogy Eötvös Loránd születése után 175 évvel ma is óriási jelentősége van az életművének, a felfedezéseinek, az általa megalkotott zseniális műszereknek. Érdeemes elgondolkodni azon, milyen eredményeket érhetett volna el akkor, ha neki is a rendelkezésére álltak volna azok a modern technikai és tudományos eszközök és ismeretek, amelyekkel mi már rendelkezünk, és mindennapi rutinnal használunk.

IRODALOM

- Biró Péter – Ádám József – Völgyesi Lajos et al. (2013): *A felsőgeodézia elmélete és gyakorlata. Egyetemi tankönyv és kézikönyv*. Budapest: HM Zrínyi Térképészeti és Kommunikációs Szolgáltató Nonprofit Kft. Kiadó, ISBN 9789632572482, <https://edu.epito.bme.hu/local/coursepublicity/mod/resource/view.php?id=9635>
- Csapó Géza – Égető Csaba – Laky Sándor et al. (2009): Test Measurements by Eötvös-Torsion Balance and Gravimeters. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 53, 2, 75–80. http://www.agt.bme.hu/volgyesi/gravity/pp_egu_becs.pdf
- Eötvös Roland v. [Loránd] – Pekár Desiderius [Dezső] – Fekete Eugen [Jenő] (1922): Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen der Physik*, 373, 9, 11–66. http://real.mtak.hu/94133/1/300_430_68.pdf
- Szabó Zoltán (1999): Az Eötvös-inga históriája. *Magyar Geofizika*, 40, 1, 26–38. https://epa.oszk.hu/03400/03436/00164/pdf/EPA03436_magyar_geofizika_1999_01_026-038.pdf
- Tóth Gyula (2019): Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciamérések szabályos hibája. *Fizikai Szemle*, 69, 5, 155–158. http://real-j.mtak.hu/12758/15/FizSzem-2019_05.pdf
- Ván Péter – Pszota Máté (2023): Ekvivalenciaelvek és gravitációelméletek. *Fizikai Szemle*, LXXIII, 12, 405–415.
- Völgyesi Lajos (1995): Test Interpolation of Deflection of the Vertical in Hungary Based on Gravity Gradients. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 39, 1, 37–75. <https://pp.bme.hu/ci/article/view/3765/2870>
- Völgyesi Lajos (2001): Local Geoid Determinations Based on Gravity Gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 36, 2, 153–162. DOI: 10.1556/AGeod.36.2001.2.3, <http://volgyesi.hotserver.hu/gravity/actgeful.pdf>
- Völgyesi Lajos (2015): Renaissance of the Torsion Balance Measurements in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59, 4, 459–464, DOI: 10.3311/Ppci.7990, <https://pp.bme.hu/ci/article/download/7990/6908/>
- Völgyesi Lajos (2019): Eötvös Loránd munkásságának geodéziai jelentősége. *Geodézia és Kartográfia*, 71, 5, 4–13. DOI: 10.30921/GK.71.2019.5.1, <https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/44576/GK.2019.5.1-DOI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Völgyesi Lajos – Szondy György – Tóth Gyula et al. (2018): Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére. *Magyar Geofizika*, 59, 4, 165–179. http://real.mtak.hu/105468/1/165_MaGeof-59-2018-4-web.pdf
- Völgyesi Lajos – Szondy György – Tóth Gyula et al. (2023): Eötvös-ingák felújítása és továbbfejlesztése, jel-zaj viszonyaik elemzése. *Fizikai Szemle*, LXXIII, 12, 416–422. https://fizikaiszemle.elft.hu/uploads/2023/12/volgyesil-et-al_10_06_01_1702371961.1596.pdf
- Völgyesi Lajos – Tóth Gyula – Szondy György et al. (2021): Jelenlegi Eötvös-inga felújítások, fejlesztések és mérések. *Geomatikai Közlemények*, XXIV. 1, 129–139. http://geomatika.ggki.hu/kozlemenyek/public/files/homepage/GK_XXIV_1_honlap.pdf
- Völgyesi Lajos – Tóth Gyula – Szondy György et al. (2022): Report on a Pre-Earthquake Signal Detection by Enhanced Eötvös Torsion Balance. *arXiv* 2202.09607. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2202/2202.09607.pdf>