

Meskó Attila

Az Eötvös-inga

Eötvös Loránd mintegy negyven éven át foglalkozott a gravitációs potenciáltér kis lokális változásainak tanulmányozásával. Először a Coulomb-féle torziós ingát használta a potenciál bizonyos deriváltjainak meghatározására, melyekből számítani tudta a potenciált leíró felület görbületét. Eötvös igen érzékenyvé tette a műszert speciálisan kezelt platinaszál használatával és azzal, hogy az ingát védő burkolatokkal vette körül. Később egy új műszert konstruált, melyben a súlyokat különböző magasságokban helyezte el és ezzel lehetővé tette a gravitációs tér horizontális gradienseinek meghatározását is. A módszer az 1920-as évektől kezdve forradalmasította az olajipart és Eötvös-inga néven vált ismertté az egész világon. A modern gyakorlati geofizika akkor született, amikor a feltérképezett gradiensekből a felszín alatti geológiai szerkezetet találták meg. Az antiklinális és a sódóm típusú szerkezetekhez ugyanis olajmezők kapcsolódhatnak. Az Eötvös-inga alkalmazásának produktív szerkezetek százait és több milliárd hordó olajat köszönhetünk.

Eötvös Lorándot a tudománytörténet a legkiválóbb fizikusok között tartja számon. A súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciájának nagy pontosságú igazolása az általános relativitáselmélet egyik legfontosabb kísérleti bizonyítéka. A századforduló körüli években végzett mérésre, mely 1/200 000 000 pontossággal kimutatta, hogy a tömegvonzás független az anyagi minőségtől a nemzetközi szakirodalom ma is mint *Eötvös-kísérletre* hivatkozik. A nehézségi erőter gradienseinek nemzetközi egysége az *Eötvös* (10^{-9} gal/cm). Ugyancsak az ő nevét viseli az a hatás, mely a Földhöz képest mozgó testek súlyváltozását írja le: ez az *Eötvös-hatás*. De a legtöbben — talán gyakorlati haszna, az olajkutatásban betöltött több évtizedes nélkülözhetetlen szerepe miatt — az *Eötvös-ingát* ismerik.

1991-ben ünnepeltük a Sághegyen végzett ingamérések centenáriumát. A kísérleti mérések, majd a Balaton jegén 1901 és 1903 telén végzett észlelések bi-

zonyították, hogy a torziós inga a laboratórium rendezett világából a természetbe kilépve is alkalmas a nehézségi erőtér kis helyi változásainak szinte hihetetlen pontosságú meghatározására. Néhány évvel később, 1916-ban, az Egbell környéki mérések már a gázmező pontosabb körülhatárolását segítették, majd az I. világháborút követően a műszer megkezdte diadalútját. Európa, Ázsia, Észak- és Dél-Amerika kutatási területein csaknem két évtizeden át az olajkutatás versenytárs nélküli eszköze volt. Egyedül a Mexikói öbölben az 1930-as évek közepéig 35—40 Eötvös-ingás mérőcsoport dolgozott és legalább 80 termelőmezőt fedezett fel, összesen több mint 1 milliárd hordó készlettel (*Bell és Hansen, 1998*). A könnyebben kezelhető, egyszerűbb korrekciókat igénylő graviméterek csak az évtized vége felé kezdték felváltani az Eötvös-ingákat bár pontosságuk még jóval kisebb volt, mint az ingával megvalósítható 1 Eötvös. Nem magyar szerzők, amerikaiak állapították meg, hogy a gyakorlati geofizika akkor született, amikor 1924-ben az Amerada cég Eötvös-inga mérésekkel kimutatta a Nash Dome szerkezetet.

Erről a korszakról és Eötvös Loránd úttörő szerepéről kívánunk most vázlatos áttekintést adni, születése 150. évfordulóján tisztelegve az alkotó tudós emléke előtt.

A nehézségi erő

A nehézségi erő vizsgálata több évszázados múltra tekint vissza. Newton a 17. században fedezte fel az általános tömegvonzás törvényét. Ennek lényege: egy m tömegű ponttól r távolságban lévő egységnyi tömegre ható erő $G \cdot m/r^2$. A képletben G a gravitációs állandó, melynek értéke a kötelezően használt SI egységben $6,67 \cdot 10^{-11}$. Mivel G kicsiny, számottevő erőtér csak igen nagy tömegek körül alakul ki. Ez a G pontos meghatározását is nehézé teszi. Nem meglepő, hogy G a legkisebb pontossággal ismert valamennyi univerzális állandó közül. A negyedik tizedes már bizonytalan.

A Föld tömege elég nagy, köznapi tapasztalat, hogy vonzásának hatására az alá nem támasztott tömegek gyorsulva esnek. Már Galilei is végzett kísérleteket annak tisztázására, függ-e a gyorsulás a leejtett testek anyagától. Az általa elérhető megfigyelési pontosság határain belül nem talált eltérést. Később igen pontos mérések — elsőként Eötvös vizsgálatai — tisztázták, hogy a súlyos (a vonzerő kialakításában szereplő) tömeg és a tehetetlen (az erő hatására kialakuló gyorsulást meghatározó) tömeg azonos. Egészen precízen fogalmazva: ha van is eltérés, ez csak rendkívül kis érték, bármelyik tömeg kétszázmilliomod része lehet. Természetesen minden gyakorlati célú megfontolásban, számításban jogosult a két tömeget azonosnak tekinteni. A két tömeg ekvivalenciájának mélyreható elméleti jelentőségével *Nagy Károly* cikke foglalkozik e számban.

Mivel az egységnyi tömegre ható erő számértéke megegyezik az általa ugyanezen tömegen létrehozott gyorsulás számértékével, a geofizikában a gravitációs mérési eredményeket gyorsuláségségekben adják meg. Az 1 cm/s^2 gyorsulást Galilei tiszteletére galnak nevezik. A földtani kutatásban azonban ez kényelmetlenül nagy érték, emiatt ezredrészét, a milligalt (rövidítve: mgal) használják. A jelenleg elérhető mérési pontosság a mgal század, különös gonddal végzett speciális mérések esetén

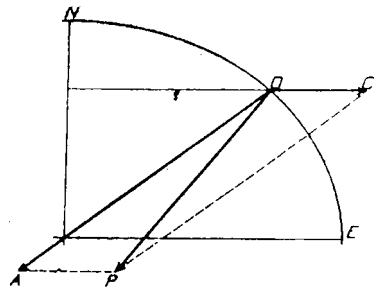
ezred része. Közismert, hogy a gyorsulás a Föld felszínén közelítőleg 10 m/s^2 , azaz 1000 gal. A rutinszerűen biztosítandó mérési pontosság — század milligal — a teljes érték százmilliomod része, azaz annál 8 nagyságrenddel kisebb. Ezt nem lehet elérni, ha a teljes mennyiséget próbálnánk mérni. Szerencsére a teljes Földet figyelembe véve a bárhol mérhető legnagyobb és legkisebb érték különbsége kevesebb, mint 7 gal. Ennél a mérési pontosság már kevesebb, mint 6 nagyságrenddel kisebb. A gyakorlati kutatás még szerényebb igényű. Rendszerint néhány-szor 100 vagy 1000 km^2 nagyságú területeket vizsgálunk. A változás ekkora területen nem haladja meg a 0,1 gal-t, azaz 100 mgalt. A mérendő mennyiség, a nehézségi erőtér változása ebben az esetben a kívánt pontosságot „csak” 4 nagyságrenddel haladja meg, és ezzel a pontosság megvalósítása elérhető közelségbe kerül. Már most megjegyezzük, hogy a pontosságot a korrekciók elvégzése is befolyásolja. Pontos mérésekhez pontos korrekciókra van szükség.

Végeznek természetesen a teljes gyorsulás meghatározására is méréseket, de ezek az ún. abszolút gyorsulás mérések hosszadalmasak, különleges eszközöket igényelnek és azokat a nyersanyagkutatásban nem lehet használni.

A leeső test vagy a műszer a nehézségi erőt érzi, melynek csak egyik — bár döntően nagyobb része — a tömegvonzásból eredő rész. A másik összetevő a Föld forgásából adódó centrifugális erő. Ez az egyenlítőn éppen ellentétes irányú a tömegvonzással. Itt a legnagyobb is, mert az egyenlítő van a legtávolabb a forgástengelytől. A sarkoknál, melyek lényegében a forgástengelyre esnek, a centrifugális erő zérus, itt tisztán a vonzerő érvényesül.

Ha a Föld gyorsabban forogna, világossá válna, hogy más a tömegvonzás és más a nehézségi erő iránya (1. ábra). A tömegvonzás iránya a Föld középpontja felé mutat, a nehézségi erő a tömegvonzás és a forgásból adódó centrifugális erő eredője, és a két vektor a Föld különböző pontjain különböző szöget zár be egymással. A két vektor — a tömegvonzás vektora és az eredő — azonos irányú az egyenlítőn, bár nagyságuk kissé különböző és azonos a sarkokon, mert itt nincs centrifugális erőből eredő járulék, azaz a tömegvonzás és nehézségi erő pontosan azonos. A két vektor szöge a Föld összes többi pontján zérustól különböző, például a 45° -os szélességen közelítőleg 5,9 ívmásodperc. A függőön a nehézségi erő irányába áll be. Egy másik „függőleges” irány is megállapítható csillagászati úton — lényegében a Föld forgástengelye irányának meghatározásával. A két függőleges irány különbsége az ún.

függővonal-elhajlás. Ennek jelenleg rendkívül kis értéke miatt nincsen gyakorlati jelentősége. Gyorsan forgó Földön azonban már az építményeken is látszana — hiszen a falakat az „egyik függőleges”, a nehézségi erő irányában kellene építeni ahhoz, hogy stabilan álljanak, azaz Magyarországon enyhén észak felé dőljenek.



1. ábra

A nehézségi erő vektora (OP) a tömegvonzás (OA) és a centrifugális erő vektorának (OC) összege. Eötvös eredeti ábrája (Eötvös, 1908, 2. ábra)

Más kérdés, hogy ettől senki nem lenne meglepődve, mint ahogy most is természetesen vesszük, hogy a hegyoldalban épült házak falai nem a hegyoldalra, hanem a vízszintes irányra merőlegesek.

A Föld lapultságát is a forgás okozza. Bár a lapultság értéke mindössze $1/300$, az Egyenlítő pontjai így is mintegy 21 kilométerrel vannak távolabb a tömegközépponttól, mint a sarkok. A tömegvonzással ellentétes irányú centrifugális erő mellett ez is hozzájárul ahhoz, hogy az Egyenlítőn a nehézségi erő kisebb legyen, mint a sarkokon.

Természetesen a tengerszint feletti magasság is befolyásolja a gyorsulást, a Föld középpontjától távolodva értéke csökken. Ez a hatás könnyen kiszámítható és kilométerenként $0,3086$ gal értéknek adódik. A legmélyebb tengeri árokban és a legmagasabb hegycsúcson mért értékek között pusztán a Föld középpontjától mért különböző távolságuk valamivel több, mint 5 gal különbséget okozna. Valójában a ténylegesen mért értékeket befolyásolja a környező anyagok — a hegycsúcs alatti, hegyet alkotó kőzetek, illetve a tengerfenék kőzetei és a tengervíz vonzása is. A felülről becsült különbség arra azonban alkalmas, hogy érzékeltesse a teljes értéknél mennyivel kisebb a magasságkülönbség okozta, maximálisan mintegy $0,5\%$ -nyi változás.

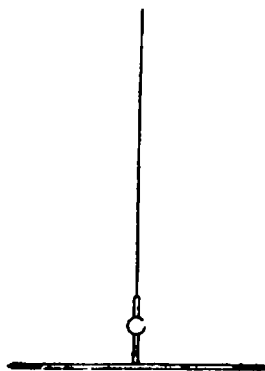
Nagyjából ekkora változás van az Egyenlítő és a sarkok között is. A forgási ellipszoiddal jól közelíthető alakú, forgó Földön az egyenlítői (átlagos) gyorsulás $978,049$ gal, míg a sarki gyorsulás ennél mintegy 5 gallyal nagyobb: $983,221$ gal. (A teljes Földre számított átlag: $979,8$ gal. A Budapesten mért érték közel van az átlaghoz: $980,8$ gal.) A valódi Föld valódi felszínén mérve, ahol a gyorsulást a különböző földrajzi szélesség és különböző tengerszint feletti magasság mellett még a mérési pont alatti kőzetrétegek sűrűségének az átlagtól való eltérése is befolyásolja, így alakul ki végül a tapasztalt 7 gal különbség. Ez az érzékelhetőség határa alatt van. Még akkor sem éreznénk a különbséget, ha sikerülne rövid idő alatt a legnagyobb gyorsulású helyről a legkisebb gyorsulású helyre eljutni.

Más volna a helyzet, ha a Föld sokkal gyorsabban forogna. Például tízszer sebesebb forgás — $2,4$ óra időtartamú nap — pusztán a centrifugális erő növekedése miatt mintegy harmadával csökkentené a gyorsulás értékét az egyenlítőn. Ezt még kisebbé tenné a forgás hatására kialakuló, a jelenleginél nagyobb lapultság. Ekkor mindenkinek köznapi tapasztalata volna, hogy kicsit könnyebb az Egyenlítő közelében és kicsit nehezebbé válik, ha sarokhoz közelebbi helyre utazik el.

A nehézségi erő mérése

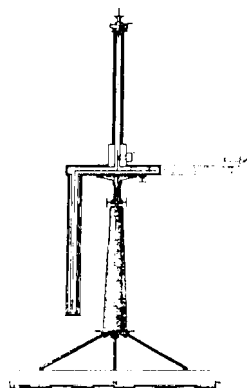
A nehézségi gyorsulást a 19. század végéig ingák lengésidejéből határozták meg. Ezek természetesen abszolút mérések voltak, ebből eredően nem lehettek elég pontosak sem. Még kevésbé voltak alkalmasak praktikus földtani feladatok megoldására. Eötvös az 1880-as évektől kezdve a relatív mérésekkel foglalkozott. A *Coulomb-féle csavarási vagy torziós ingát* igyekezett tökéletesíteni. Ez egy vékony torziós szárra függesztett vízszintes ingarúd, két végén azonos nagyságú tömegekkel (2. ábra). A csavarási inga szerkezeténél fogva vízszintes erők mérésére alkalmas. Erre használta *Coulomb*, aki mágneses és elektromos erőtérrel határozott meg vele és később *Cavendish* is, aki viszonylag nagy tömegek vonzó hatását mérte.

Eötvös jelentősen növelte az eszköz stabilitását és érzékenységét. Gondosan kiküszöbölt minden zavaró hatást. Először kettős, majd hármas falú fémszekrénybe zárta az ingát, hogy azt mind a külső mágneses és elektromos terek, mind az egyenlőtlen felmelegedés és a légáramlatok elől elzárja. Különösen sokat kísérle-



2. ábra

A Coulomb-féle csavarási inga: torziós szára függesztett vízszintes rúd két végén azonos tömeggel. Eötvös ezt az eszközt nevezte görbületi variométernek (Eötvös, 1906, nyomán)



3. ábra

A nehézségi erő horizontális változásának mérése alkalmasá tett torziós inga: az egyik tömeg alacsonyabban helyezkedik el. Eötvös ezt az eszközt nevezte horizontális variométernek (Eötvös, 1906, nyomán)

tezett a legalkalmasabb torziószál megtalálásával. Az érzékenység növelése érdekében az addigiaknál hosszabb és vékonyabb szálakat használt. A legjobbnak talált platinaszálakat hosszú idejű hőkezeléssel és húzással a lehetőség szerint feszültségmentessé tette és a szálak közül előzetes mérésorozattal választotta ki a legjobbakat. A kis elfordulások pontos meghatározását azzal segítette, hogy az ingarúdra tükröt erősített és az arról visszavert fénysugár helyét a műszerhez erősített skálán távcsővel olvasta le.

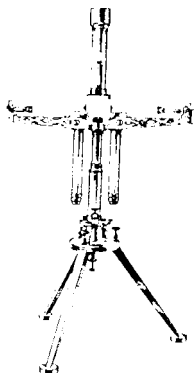
A változatlan alakú, de minden addiginál érzékenyebb és stabilabb Coulomb-féle csavarási vagy torziós ingáját Eötvös *görbületi variométernek* nevezte. A név oka az, hogy a vele végzett mérésekből a nehézségi erő potenciáljának néhány olyan deriváltját lehet meghatározni, melyekből levezethető a potenciál szintfelületének görbülete.

Bár a görbületekből vagy az Eötvös által R-rel jelölt horizontális irányítóképességből — mely adott pontban mérhető legkisebb és legnagyobb görbület különbségével összefüggő mennyiség — következtetni lehet a mélybeli sűrűségviszonyokra, de a potenciál z és x , illetve z és y szerinti deriváltjai, az úgynevezett a horizontális gradiensek sokkal áttekinthetőbb, könnyebben értelmezhető képet adnak. A horizontális gradiensek mérésére azonban a Coulomb-mérleg nem alkalmas. Eötvös zseniális módosítása az volt, hogy az ingarúd egyik végéhez csatolt tömeget néhány deciméterrel mélyebben függesztette fel. Az eszközt szerényen *horizontális variométernek* nevezte el, az Eötvös-inga név csak később terjedt el. Az alapjában igen egyszerű, de döntő jelentőségű módosítás révén az inga különböző egyensúlyi helyzeteiből a görbületek mellett levezethetővé vált a nehézségi erőter horizontális irányú megváltozása, az erőter horizontális gradiense. A műszer felépítésének elvét a 3. ábra mutatja.

Az ingarúd két végén elhelyezett tömegekre a földi nehézségi erőter vízszintes irányú összetevői hatnak. Az erők különbsége vízszintes forgatónyomatékot ad és ez elcsavarja a torziós szálat. Több lengés után egyensúlyi helyzet alakul ki,

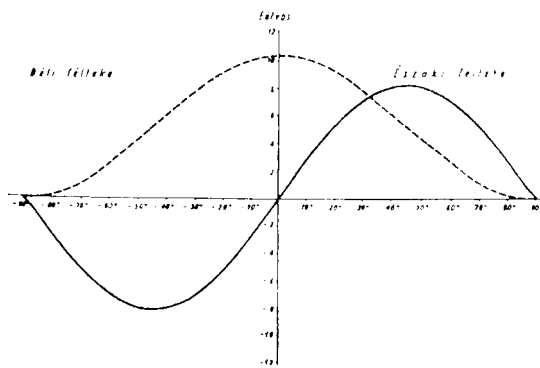
melyben az erőter változásából eredő forgatónyomaték a felfüggesztő szál torziós nyomatékával lesz egyenlő. Mivel több ismeretlen mennyiség is van, a műszer szekrényét és vele együtt az ingarudat különböző irányokba kell beállítani és minden helyzetben megvárni, amíg az inga eléri az egyensúlyi helyzetet. Eötvös öt különböző helyzetben, úgynevezett azimutban mért. A leolvasásokból számítással megkaphatók a nehézségi erőter különböző deriváltjai és az ezekből alkotott görbület és gradiens. A mérések gyorsítására később Eötvös két azonos, egymással szembefordított ingát használt, melyeket közös burkolatban helyeztet el. Így az észlelések számát három különböző azimut beállításra csökkenthette, mert egy beállításban a két inga két eredményt adott. A kettős inga képét mutatja a 4. ábra, melyen az eszközt már burkolataival, állványával együtt látjuk.

A potenciál leírására elfogadott ún. nemzetközi formula csak a földrajzi szélességet tartalmazza, kifejezve azt, hogy a hosszúság szerinti változás — bár létezik, de — sokkal kisebb és szabálytalanabb, mint a lapultság és centrifugális erő miatt kialakuló szélesség szerinti változás. Az R elméleti értéke is csak a szélességtől függ, legnagyobb az egyenlítőn, ahol valamivel több mint 10 Eötvös és zérussá válik mindkét póluson. Az 5. ábra az R és a horizontális gradiens elméleti értékét mutatja mint a szélesség függvényét.



4. ábra

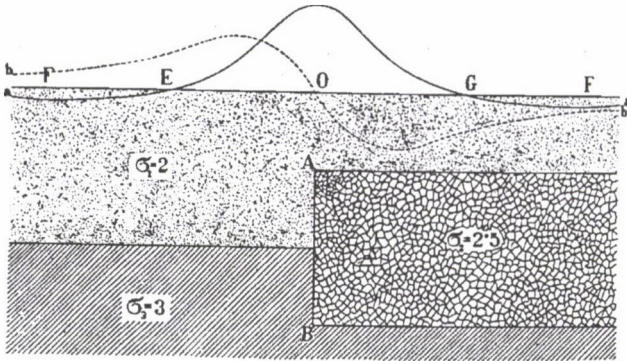
Az Eötvös-inga, ahogyan a nagyközönség ismeri: A közös burkolatban két, egymástól független inga működik



5. ábra

A görbületi eltérés és a horizontális gradiens elméleti értéke a szélesség függvényében

Eötvös különböző sűrűségű rétegekből felépített egyszerű modellek segítségével mutatta meg, hogy a görbület és gradiens alkalmas a mélybeli sűrűségeloszlás, vagy ha úgy tetszik, a különböző geológiai rétegek helyzetének kimutatására. Egyik eredeti példáját idézzük a 6. ábrán. Az ábra síkjára merőleges irányban végtelennek feltételezett modell három különböző sűrűségű, vízszintes rétegből áll. Ezek közül az alsó, a $\sigma = 3 \text{ gcm}^{-3}$ sűrűségű ún. félvégtelen réteg. A folytonos görbe a gradiens, a szaggatottan rajzolt a görbület lefutását mutatja be a szelvény mentén, a felszínen. Az egyszerű modell a sok szempontból fontos geológiai alakulat, az ún. vető modellje. Az ábra egyben azt is illusztrálja, hogy a gradiens a vető felett a legnagyobb.



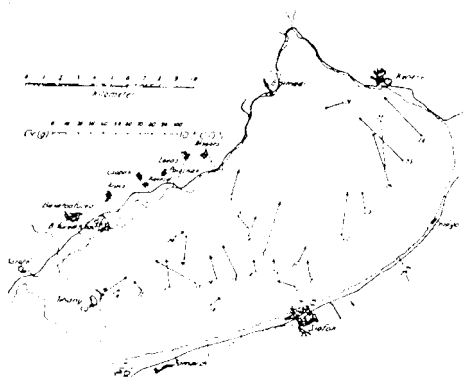
Gradiens és görbület menete vető felett. Eötvös eredeti ábrája (Eötvös, 1906, 18. ábra)

Kísérleti mérések az Eötvös-ingával

Eötvös ingaméréseiről és a mérésekből levezetett görbület és gradiens számításáról és értelmezéséről több alkalommal beszámolt mind a Magyar Tudományos Akadémián, mind nemzetközi fórumokon. 1900-ban a párizsi fizikai kongresszuson is tartott előadást és a párizsi világkiállításon bemutatta az ingát, mely nagydíjat nyert. A legátfogóbb, részletes ismertetés a Nemzetközi Földmérési Szövetség XV., Budapesten tartott konferenciáján hangzott el (Eötvös, 1906). A konferencia résztvevői az Egyetem Fizikai Intézetében megtekintették a műszereket, majd a helyszínen is tanulmányozták az Arad környéki méréseket. A siker olyan mértékű volt, hogy a konferencia — Sir George Howard Darwin (Charles Darwin fia) javaslatára — külön határozatot fogalmazott meg a vizsgálatok kiterjesztésének fontosságáról.

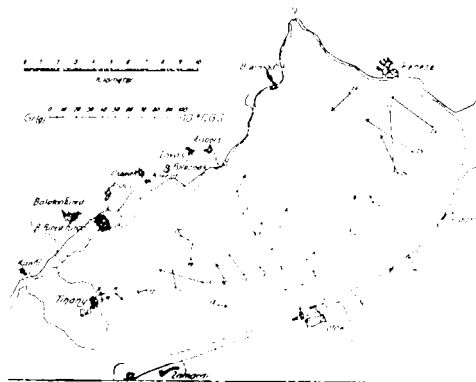
Az 1906. évi előadás több mérési sorozatról számolt be. Érdeemes ezeket idézni: 1901-ben a Balaton jegén 33 állomásponton, 1902-ben a Fruska Gorától északra 20 állomáson, 1903-ban újra a Balatonon 12 ponton és a Fruska Gorától Szabadkáiig 19, majd Arad mellett 19 ponton, 1904-ben a Fruska Gora területén 70 ponton, 1906-ban Aradtól Versecen át Oravicáig és Versectől Alibunár irányában haladva összesen 75 ponton mértek.

A pontok kis száma Eötvös gondossága mellett azt is mutatja, hogy egy-egy mérés igen hosszú ideig tartott. Meg kellett várni, amíg az inga a beállított azimutban egyensúlyi helyzetbe került, majd a leolvasás után az új azimutban újra várakozni kellett. Eötvös az inga megkettőzésével ötről háromra csökkentette a szükséges beállítások számát, majd a csillapítás növelésével rövidítette az egyensúly eléréséhez szükséges időt. Mindig megmaradt azonban a korrekciók elvégzéséhez szükséges mérések és számítások többlet időigénye. A korrekciók elvégzéséhez általában 8 irányban határozták meg — pontos geodéziai mérésekkel — a terep magasságát az ingától 10–12 különböző távolságban. Bevált a következő (méterben kifejezett) távolságsorozat: 0,6, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 70 és 100.



7. ábra

A Balaton északi medencéjében mért gradiensek a környezet hatásának korrigálása nélkül (Eötvös, 1908, 19. ábra)



8. ábra

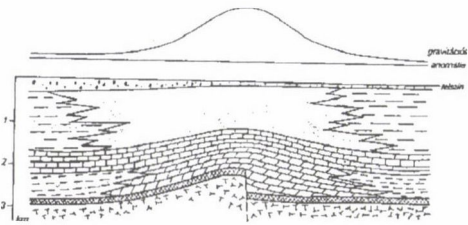
A Balaton északi medencéjében mért gradiensek a környezet hatásának korrigálása után (Eötvös, 1908, 24. ábra). Felhívjuk a figyelmet a Tihanyi hegy, illetve a déli part közelébe eső pontokon az értékek jelentős változására

A mérésekből különböző egyszerű alakzatokkal közelítve a valódi, fizikai felszínt, a környezet hatása számítható (becsülhető) volt és a számított értékkel a mérésből levezetett értékeket korrigálni lehetett. A távolabbi, 100 méteren túli környezet hatását topográfiai térképekből kiolvasott magasságadatok alapján számították. Ugyancsak el kellett távolítani az elméleti értéket, bár ez volt a legegyszerűbb, hiszen a mérési területen a földrajzi szélesség olyan keveset változik, hogy elegendő egyszer számítani és ugyanazt az értéket minden mért értékből levonni. A közeli és távolabbi környezet hatásának meghatározásához különböző diagramokat, görbeseregeket szerkesztettek, de a geodéziai méréseket mindenképpen el kellett végezni. A műszer rendkívüli érzékenysége miatt főleg sík terepen használható. Nem véletlen, hogy az első hosszabb sorozatot Eötvös a Balaton jegén, a parttól kellő távolságban mérte, hiszen a jég felszíne valóban közel vízszintes sík.

A Balaton északi részén a csupán az elméleti értékkel korrigált gradienseket a 7. ábrán, a teljes korrekció után kapott mennyiségeket a 8. ábrán mutatjuk be, az eredeti közlemény alapján (Eötvös, 1908). Utóbbiakat Eötvös a felszín alatti sűrűség-rendellenességek (mai szóhasználattal a homogén sűrűségeloszlástól való eltérés) hatásának tulajdonította. A skála mindkét ábrán a bal felső sarokban látható. A korrekció szükségessége világosan kitűnik a Tihanyi félsziget közelében elhelyezett 9., 10., 11. és 12. mérési pontokon. De még a déli part közelébe eső pontokon: az 1., 2. és 18. mérési pontban is jelentősen változtatja a gradiens értékét a környezet domborzatának hatása. Az eredményeket értelmezve Eötvös megállapította: a mérések alapján a „víz és a fenék homokja alatt egy Kenesétől majdnem Tihanyig elhúzódó tömeg-fölhalmozódást, mondjuk egy hegygerincet” fedezett fel (elnöki beszéd a Magyar Tudományos Akadémia közülésén 1901. május 12-én).

Az Eötvös-inga gyakorlati hasznosítása az olaj- és gázkutatásban

A horizontális gradiensek ismeretében számítható a nehézségi gyorsulás változása. Abszolút értékekre földtani feladatok megoldásában nincs is szükségünk, elegendő tudnunk, hogy a területen egy tetszőleges vonatkoztatási pontbeli értékhez képest más pontokban mennyivel nagyobb vagy kisebb a nehézségi erőter értéke. A vonatkoztatási pontbeli értéktől való eltéréseket hagyományosan Δg -vel jelöljük, belőlük úgynevezett *anomália-térképet* szerkeszthetünk. Rendszerint az azonos Δg értékeket összekötve, szintvonalakkal ábrázoljuk a változásokat. Ez könnyen áttekinthető, szemléletes, mert mindannyian megszoktuk és „értjük” a domborzati térképeket. A pozitív gravitációs anomália ebben az ábrázolásmódban hegy, a negatív anomália völgy szintvonalas képének felel meg. Ha ilyen típusú Δg térképet kívánunk készíteni, természetesen elég sok pontban kell ismernünk a horizontális gradiensek értékét is.



9. ábra

Antiklinális szerkezet (felboltozódás) felett kialakuló gravitációs anomália: a felboltozódás miatt a nagyobb sűrűségű rétegek közelebb kerülnek a felszínhez, és ez pozitív gravitációs anomáliát okoz

Antiklinális szerkezet (felboltozódás) felett kialakuló gravitációs anomália: a felboltozódás miatt a nagyobb sűrűségű rétegek közelebb kerülnek a felszínhez, és ez pozitív gravitációs anomáliát okoz

tációs mérések jelentőségét. Természetesen a gravitációs mérésekből is csak következtetni tudunk az antiklinális helyére, alakjára — hiszen nem magát az alakzatot látjuk, csak gravitációs terét érzékeljük az összes többi sűrűség-inhomogenitás által is módosított gravitációs térben. De már ez is óriási segítség. A 9. ábra alsó részén negatív gravitációs anomáliára mutatunk példát, érzékeltetve, hogy ez völgy — geológiai szakkifejezéssel élve: *szinklinális* alakzat — felett alakul ki.

A gradiensek a növekedés irányába mutatnak, emiatt az antiklinális szerkezet a már ezek a csúcsa felé mutató nyilak alapján felismerhető. A szinklinális pedig a legmélyebb ponttól kifelé mutató gradiensek alapján található meg. Amikor még — az eredeti egyszeres ingával — hosszú időbe telt egy-egy gradiens meghatározása, nem mindig szerkesztettek gravitációs-anomália-térképet.

Eötvös valószínűleg hosszabb ideig mérlegelte a torziós inga alkalmazhatóságát a nyersanyagkutatásban. Már a mérési területek kiválasztása is sejteti, hogy szokásos higgadt, minden eshetőséget számba vevő, a lehetséges hibaforrásokat felderítő és kiküszöbölésüket vagy csökkentésüket minden eszközzel végrehajtó munkamódszerével ezt készítette elő. Tisztában volt

A Δg térképekből következtetni tudunk különböző sűrűségű geológiai rétegek helyzetére. Ahol a nagyobb sűrűségű rétegek közelebb kerülnek a felszínhez, a környezetnél nagyobb Δg értéket tapasztalunk, a térképen pozitív anomália alakul ki (9. ábra). Az anomália a geofizikus szóhasználatban eltérően a köznapitól csak a szabályostól való eltérést jelent. A geológusok a felboltozódást *antiklinálisnak* nevezik és elég régóta tudják, hogy kedvező esetben az antiklinálisban kőolaj vagy földgáz halmozódhat fel. Sokszor az antiklinális olyan mélységben van, hogy közvetlen, felszíni megfigyelésekből nem lehet jelenlétét megállapítani. Ez adja a gravi-

a terepi munka nehézségeivel, különösen a megfelelő korrekciók elvégzésének fontosságával. A korrekciók még a balatoni méréseknél is — ahol pedig az állomás 100 méteres közvetlen környezetének hatása a nagyjából vízszintes jégfelület miatt elhanyagolható és csak az ún. térképi hatást kellett figyelembe venni — jelentősen befolyásolta a végeredményt. A további évek szárazföldi mérései is egy-egy próbának tekinthetők. Végül a Földmérők XVII. Hamburgi Nemzetközi Konferenciáján, 1912-ben elérkezettnek látta az időt arra, hogy a megfogalmazza a gyakorlati alkalmazás elveit. Eötvös német nyelvű előadásából szabad fordításban idézve:

„A hasznosítható energia új forrásainak kutatása a legújabb időkben több gyakorlati szakember érdeklődését fordította az éghető földgáz felé. Magyarországon például az Alföldön egyes fúrásokból kiáramló gázt már több mint két évtizede használják világításra és motorok üzemeltetésére. A legutóbbi három évben pedig, az erdélyi gazdag gázforrások feltárása után, az éghető gázok előfordulásának tisztázása gazdaságilag is igen jelentős kérdéssé vált. Egyetlen, az erdélyi Kis-Sármás mellett kialakított 302 méter mélységű fúrásból másodpercenként 10,55 m³, vagyis egy nap közel egymillió köbméter kémiaiilag csaknem tiszta metángázt nyertek.

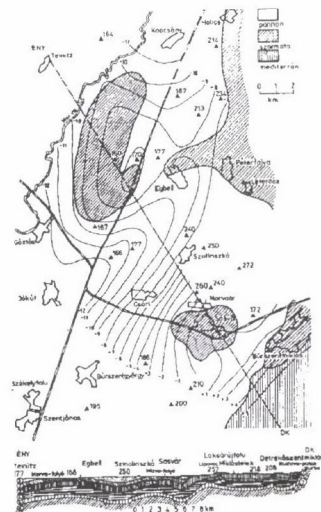
Hol kell ilyen gáz megtalálása érdekében fúrni? A geológusok megegyeznek abban, hogy a gázt tartalmazó területen a legeredményesebb, legtöbb gázt szolgáltató fúrások a gázokat tartalmazó és azokat lefedő rétegek antiklinálisai közvetlen közelében képezhetők ki. Emellett szólnak az Amerikában, Oklahomában szerzett tapasztalatok, de az erdélyi megfigyelések is, már amennyire a rétegek elhelyezkedését és tulajdonságait a (felszínen végzett) geológiai kutatások meg tudták ismerni.

De az ilyen geológiai ismertetőjelek teljesen hiányoznak a nagy magyar síkság, az Alföld homokkal és üledékekkel fedett területein. Aki tehát ott vagy hasonló területeken gázt tartalmazó szinklinálisokat keres, nem mellőzheti a torziósinga-méréseket. Hogy milyen sikerrel, azt a jövő fogja megmondani.”

Ma már tudjuk, hogy a siker elsőpró volt, az Eötvös-inga segítségével több milliárd köbméter gázt és több százmillió tonna olajat találtak meg. Ezt azonban az alkotó nem érthette meg. A zseniális felfedezés sem neki magának, sem szeretett hazájának anyagi hasznot nem hozott.

Élete utolsó éveiben még részt vett a világon az első kimondottan szénhidrogén-kutatás célú terepi mérésben. Erre 1916-ban Morvamezőn, Egbell (ma: Gbely, Szlovákia) környékén került sor. Eötvös ekkor 68 éves volt, de a kutatócsoportot maga vezette. A geológus szakértő Böckh Hugó volt. Baráti együttműködésük máig tanulságos példa arra, hogy a földtani kutatás akkor eredményes, ha minden érintett tudományterület egyenrangú partnerként vesz részt a munkában. A területen gáz- és olajnyomokat már találtak. A kérdés az volt: hol kellene új fúrásokat mélyíteni.

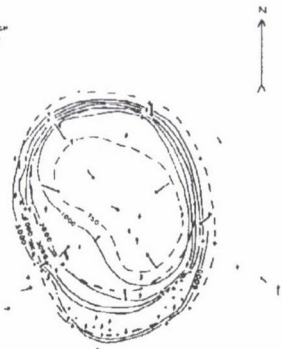
A horizontális gradiensek alapján szerkesztett gravitációsanomália-térképet a 10. ábra mutatja be lényegében az eredeti közlemény alapján, minimális módosításokkal. Az ábra alján látható egy ÉNy—DK irányú földtani szelvény, melynek nyomvonalát a térképen eredményvonal (pont-vonal váltakozása) jelöli.



10. ábra

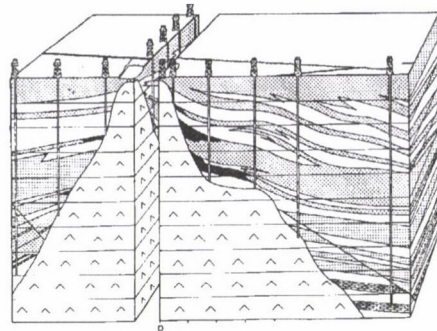
Az Egbell környéki mérésekből szerkesztett gravitációsanomália-térkép (felül) és földtani szelvény a térképen megjelölt nyomvonal mentén (Renner, 1953, 2. és 3. ábrája nyomán)

1 WELL INTO SALT
 2 WELL STOPPED IN CAP-ROCK
 3 BORE-HOLE NOT INTO SALT
 OR CAP-ROCK
 4 PRODUCTIVE OIL-WELL
 (EÖTVÖS UNITS)
 5000 FEET
 1000 METERS
 6 WELLS



11. ábra

A Nash dóm, az első szénhidrogén-mező az Egyesült Államokban, melyet Eötvös-inga-mérések alapján találtak meg (Barton, 1929 nyomán)



12. ábra

A sódóm környezetében a megemelt záró rétegek alatt olaj halmozódhat fel.

A gradiensek alapján szerkesztett térképen Egbelltől nyugatra gravitációs maximum van, megerősítve a geológusok feltételezését a felboltozódásról. A később itt lemélyített fúrások közül több produktívnak bizonyult. Az egbelli boltozattól délkeletre, Sasvár környékén Eötvös egy érdekes részletre figyelt fel. A gravitációs anomáliatér szintvonalai itt nem záródnak, de az egyenletes csökkenésre jellemző párhuzamos lefutás helyett kiöblösödés alakul ki. Az egyenletes csökkenést a Kis-Kárpátokat alkotó és a síkság alatt folytatódó, fokozatosan mélyebbre kerülő, nagyobb sűrűségű kőzetrétegek okozhatják. Ha ezt a nagy területet érintő, emiatt regionálisnak nevezhető hatást kivonjuk, a kiöblösödés helyett Sasvárnál is záródó gravitációs maximum alakul ki. Ezt pedig az itt is meglévő antiklinális hatásának tulajdoníthatjuk. A gondolat helyesnek bizonyult, a Sasvár környéki másodlagos, úgynevezett *reziduál* maximumra is eredményes fúrásokat telepítettek.

Az egbelli mérés a modern geofizikai kutatás minden lényeges elemét tartalmazta. A geológiai ismeretek, illetve modell alapján telepített gravitációs — és a most nem tárgyalt, de szintén elvégzett mágneses — méréseket, azok gondos feldolgozását és értelmezését. Fontos lépés volt a regionális hatás felismerése és eltávolítása.

A nemzetközi olajvállalatok is felfigyeltek a műszerre, az angolperzsa vállalat volt az első, mely több Eötvös-ingát vett és az Egyesült Államok importját csak az I. világháború akadályozta meg (Bell és Hansen, 1998). Az új eszközre égető szükség volt, mert az antiklinálisok felszíni geológiai térképezése, a felszíni olajszivárgások felderítése már nem volt elegendő a mélyebben fekvő szénhidrogénmezők kutatásához. 1922-ben a Shell és az Amerada olajvállalatok szereztek be ingákat, 1924-ben az Amerada felfedezte a Nash Dome szerkezetet és ezzel megszületett az Egyesült Államok geofizikai kutató ipara.

A mérés eredményét a 11. ábra mutatja be. A horizontális gradiensek a sódóm középpontja felé mutatva csaknem teljesen szabályos, kör alakú szerkezetet rajzolnak ki. Átmérője mintegy másfél kilométer, mélysége 200 méter körüli. A gradiensek nagyobb sűrűségű fedőközetre utalnak és jól kirajzolják a szerkezet szélét.

A sódóm igen érdekes szerkezet. A kőso sűrűsége kisebb környezeténél, emiatt az eredetileg vízszintesen lerakódó sórétegekből évmilliók alatt vastkos, oszlopszerű kiemelkedések alakulnak ki és mozognak lassan felfelé. A kőso nem porózus, nem eresztí át az olajat vagy gázt. Enyhén vagy durvábban megemeli azokat a rétegeket, amelyeken áttör. Ha ezek között is van záró réteg, a vándorló, lassan felfelé mozgó szénhidrogén a sódóm környezetében mintegy csapdába kerül, felhalmozódik. Ezt a kialakult helyzetet érzékelteti a 12. ábra, mely egy tömörszelvényben

mutatja be a sódóm környezetében kialakuló viszonyokat. A só felfelé haladva nagyobb sűrűségű kőzetanyagot is közelebb emelhet a felszínhez. Ha ennek hatása nagyobb, mint a só kisebb sűrűségéből adódó negatív anomália, a gradiensek a középpont felé mutatnak. Ez a helyzet a Nash dóm esetén.

Gyakrabban fordul elő, hogy a só kisebb sűrűsége a döntő összetevő a gravitációs anomália kialakításában. Ezt a klasszikus esetet mutatja be utolsó ábránk, mely egyben Európa egyik első sikeres kutatását illusztrálja. A Hänigsen melletti sódómot 1917-ben fedezték fel Eötvös-ingás mérésekkel (13. ábra). Valamennyi gradiens a kisebb sűrűségű sódómtól kifelé mutat. Utóbbi határát a szaggatott vonal jelzi. A sóréteg nyugati oldalán a vonalkázással jelölt területeken olajat találtak.

Az Eötvös-inga nem magát a nyersanyagot (olajat vagy gázt) mutatja ki, hanem a felhalmozódásának lehetőségét megteremtő geológiai szerkezetre, a potenciális lelőhelyre hívja fel a figyelmet. Az antiklinálisok vagy a sódóмок megtalálásának lehetősége még így is óriási nyereség volt és az eszközt, az Eötvös-ingát rendkívül népszerűvé tette. Megjegyezzük, hogy a gyakorlati geofizika, vagy ezen belül a gravitációs kutatás azóta is csak a potenciális lelőhely megtalálására vállalkozik, a közvetlen olaj- vagy gázkutatás nagyon kevés és speciális földtani adottságú helyen volt sikeres.

A nemzetközi szakirodalomból származó példák sorát még sokáig folytathatnánk. A folyóiratok mellett valamennyi, az 1920 és 1960 között megjelent szénhidrogén- (olaj- és gáz-) kutatással foglalkozó monográfia és tankönyv is adott egy vagy több példát sikeres Eötvös-inga-mérésre. Az elmúlt évtizedekben új, gyorsabb műszereket, gravimétereket konstruáltak, melyekkel a gyorsulás változás közvetlenül mérhető. Elmaradnak a horizontális gradiensekre támaszkodó számítások, a műszer kevésbé érzékeny a környezet sűrűségkülönbségeire. Pontosabb, gyorsabb helymeghatározást lehet végezni, sűrűbben tudunk mérni, a kézi számításokat, térképszerkesztéseket elvégzi a számítógép. Az elvek, alap gondolatok azonban ma is azok, amiket Eötvös kidolgozott és szívós munkával megvalósított. Biztosan állíthatjuk, hogy munkássága jelentősen meggyorsította a gyakorlati geofizika fejlődését, eredményessé tette a mélységi olaj- és gázkutatást. Példaként szolgálhat Eötvös dolgozatainak kristálytisztá fogalmazása, logikus felépítése. Magyarzatai részletesek és közérthetők, nincsen szüksége arra, hogy bármit eltitkoljon, többet vagy mást mondjon, mint amit évek alatt végiggondolt, megmért és ellenőrzött. Megmarad követendő példaként az évtizedeken át végzett szívós elméleti és kísérletező tudományos munka, mely az új gondolatától először stabil kísérleti eszközhöz, majd rendkívüli eredményességű és az egész emberiségnek nagy hasznot hozó kutató műszerhez és mérési módszerhez vezetett.



13. ábra.

A Hänigsen melletti sódóm (határát szaggatott vonal jelöli), melyet Eötvös-inga-mérésekből levezetett gradiensek segítségével fedeztek fel. A sódómtól nyugatra eső olajmezőket vonalkázás emeli ki. (Schweydar, 1918 nyomán)

IRODALOM:

- Barton, D., C. 1929: The Eötvös torsion balance method of mapping geologic structures, Geophys. Prospecting Bell, R.E. és R. O. Hansen, 1998: The rise and fall of early oil field technology: The torsion balance gradiometer, The Leading Edge, 17: 81–83
- Egyed, L., 1955: Geofizikai Alapismeretek, Tankönyvkiadó
- Eötvös, R., 1890: Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen, Math. und Naturw. Ber. aus Ungarn, 8: 65–68
- Eötvös, R., 1896: Untersuchungen über Gravitation und Erdmagnetismus, Ann. d. Phys. u. Chem. Neue Folge, 59: 354–400
- Eötvös, R., 1900: Étude sur les surfaces de niveau et la variation de la pesanteur et de la force magnétique, Rapports présentés au Congr. International de Physique, Paris 1900. Tome III: 371–393
- Eötvös, R., 1906: Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflächen mit Hilfe der Drehwaage, Verhandl. der XV. Konferenz der Internat. Erdmessung in Budapest, Band I., 337–395
- Eötvös, R., 1908: Die Niveauflächen und die Gradienten der Schwerkraft an Balatonsee in: Resultate der wissenschaftlichen Erforschung des Balatonsees. Band I, Teil I, Geophysikalischer Anhang, Budapest Wien
- Eötvös, R., 1909: Bericht über geodätische Arbeiten in Ungarn besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage, Verhandl. der XVI. Konferenz der Internat. Erdmessung in Cambridge—London, Band I., 319–350
- Eötvös, R., 1912: Über Arbeiten mit der Drehwaage ausgeführt im Auftrage der kön. ungarische Regierung in den Jahren 1908–1911, Verhandl. der XVII. Konferenz der Internat. Erdmessung in Hamburg, Band I., 427–438
- Eötvös, R., 1919: Experimenteller Nachweis der Schwereänderung, die ein auf normal geformter Erdoberfläche in östlicher oder westlicher Richtung bewegter Körper durch diese Bewegung erleidet, Annalen der Physik, 59: 743–752
- Környei E. (szerkesztő), 1964: Eötvös Loránd a tudós és művelődéspolitikus írásaiából, Gondolat Kiadó
- Meskó A., 1988: Bevezetés a geofizikába, Egyetemi tankönyv
- Meskó A., 1991: Eötvös Loránd és a gyakorlati geofizika születése, Természet Világa, 533. o.
- Meskó A., 1994: Rugalmas hullámok a Földben, Akadémiai Kiadó
- Novobátzky K., 1964: Eötvös Loránd szellemi arcképe, In: Környei E. (szerk.): Eötvös Loránd a tudós és művelődéspolitikus írásaiából, 17–22, Gondolat Kiadó
- Renner J., 1953: Die geophysikalischen Forschungen von Eötvös im Dienste der praktischen Erdöl- und Gasschürfung, in: Selényi P.: Roland Eötvös' gesammelte Arbeiten, Nachtrag II., 379–384
- Renner J., 1963: The Eötvös experiment, Annales Univ. Bud. Sectio Geologica, 9–18 Renner J., 1953: Die geophysikalische Forschungen von Eötvös im Dienste der praktischen Erdöl- und Gasschürfung, In: P. Selényi (szerkesztő): Eötvös Loránd gesammelte Arbeiten, 379–384, Akadémiai Kiadó, Budapest
- Schweydar W., 1918: Die Bedeutung der Drehwaage von Eötvös für die geologische Forschung nebst Mittheilung der Ergebnisse einiger Messungen, Zeitschrift für praktische Geologie
- Selényi P. (szerkesztő), 1953: Roland Eötvös' gesammelte Arbeiten, 384, Akadémiai Kiadó, Budapest

A tudomány művelése mellett Akadémiánknak nem kevésbé fontos feladata arról gondoskodni, hogy az irodalom legkülönbözőbb ágait a magyar talajon is felvirágoztassa. Mondhatjuk, hogy Akadémiánk a magyar nemzet első kiadója; mint ilyen, nem kél versenyre a magánkiadókkal, majdnem kivétel nélkül csak rossz kiadói üzletekbe bocsátkozik, s a kiadó-e mű megítélésével nem azt kérdezi, kelendő lesz-e, hanem azt, jó-e és szükséges-e irodalmunkban? Félreismeri azért az Akadémia hivatását az, ki kiadói tevékenységét annak jövedelmezősége után ítéli meg. Regényeket, verseket, iskolai könyveket nem vesz fel kiadványai sorába, mivel azok kiadót úgyis találnak, de áldozatokat hoz olyan tudományos munkák kiadására, melyeknek megjelenése támogatása nélkül nálunk lehető nem volna.

Elnöki székfoglaló beszéd az MTA közülésén (1889. június 24.)