

Tanulmányok

A GRAVITÁCIÓS KÖLCSÖNHATÁS SPECIÁLIS ESETE: AZ ÁRAPÁLYJELENSÉG

A SPECIAL CASE OF GRAVITATIONAL INTERACTION: THE TIDAL PHENOMENON

Varga Péter

az MTA doktora, geofizikus
varga@seismology.hu

„...a legcsodálatosabb, nem szeizmikus jellegű
jelenség mégis a Földnek tengerjárászerű mozgása.”
(Kövesligethy Radó, 1914)

ÖSSZEFOGLALÁS

Az árapályjelenség sokkal általánosabb, mint általában feltételezik, hiszen fellép minden nem pontszerű test gravitációs kölcsönhatása esetében. A tanulmány bemutatja, hogyan fejlődtek e jelenség megismerésével kapcsolatos ismereteink az ókortól a jelenkorig, milyen szerepet játszik az árapály kutatása bolygónk belsejének megismerésében. Az árapály-megfigyelő műszerek ismertetése után néhány példa szerepel arra vonatkozóan, hogy milyen szerepet játszott a tengerek árapálya a történelemben.

ABSTRACT

The tidal phenomenon is much more general than it is usually assumed, since it occurs in all gravitational interactions between non-point-like bodies. This paper shows how our knowledge of this phenomenon has evolved from ancient to modern times, describes the role of tidal research in understanding the interior of our planet and gives a description of the instruments for tidal observations. Finally, a few examples illustrate the role of ocean tides in human history.

Kulcsszavak: árapályhullámok, földárapály, tengeri árapály, árapály-megfigyelő műszerek, árapály és történelem

Keywords: tidal waves, earth tides, sea tides, tide monitoring instruments, tides and history

BEVEZETÉS

Az angol *tide* és a német *gezeiten* szavak jelentése árapály, és mindkettő az *idő* szóval mutat rokonságot. A német nyelvben a szó a 11. században jelent meg. Az angol *tide* eredete a német megfelelőjével együtt a *tid* ónémet szóból ered, amely a *végtelen* jelentésű *a-dili* szanszkrit szóval hozható kapcsolatba. E szavakkal mutat rokonságot a svéd *tidvattnet* és a norvég *tidevannet* is. Érdekes az orosz прилив (*priliv*) értelmezése: hozzátöltés. Az oroszral rokon a cseh *prílív*, a szlovák *priliv*, a lengyel *plyw*, a bolgár прилива, a szerb плима, a horvát *plima*. A francia *marée*, a spanyol *marea*, a portugál *maré*, a román *maree* szavak a latin *mare* szón keresztül a tengerre utalnak.

A magyar *dagály* szó 1784-ben szerepel Baróti Szabó Dávid Kassán kiadott *Kisded szó-tárában*: „Dagály: harag, gyomoroskodás, fel-fortyanás. Dagályosság. Víznek dagállya, dagadása”. A magyar nyelv történeti-etimológiai szótára szerint a dagály jelentése (többek között): „A tengervíz emelkedése”. A dagály származékszó, az önállóan nem élő finnugor *dag* alapszóból -ály névszóképzővel jött létre vagy a *dagályos* melléknévből elvonással. Az apály szó a szintén finnugor *ap* alapszóból ered. Első említése Heltai Gáspár *Krónika a magyarok viselt dolgairól* című művéből ismert 1575-ből. Az ellentétes értelmű dagály és apály szavakat összefogó árapály szó viszonylag nem régi, és jelentése a *Magyar Értelmező Kiszótár* szerint: „A tengernek a Hold és a Nap tömegvonzása szerint váltakozó áradása és apadása”. Külföldi lexikonokban és értelmező szótárakban hasonló meghatározásokkal találkozhatunk, esetleg azzal a kiegészítéssel, hogy az árapályhatás érinti a légkört (légkör árapály) és a szilárd Földet is (földárapály). Az árapály fogalma valójában az itt említetteknel sokkal általánosabb.

Természetesen a Holdon, a bolygókon és azok holdjain is fellép az árapály jelensége. Sőt, a csillagok, csillagrendszerek tagjai egymással gravitációs kölcsönhatásban lévén, ugyancsak árapályt keltenek egymáson, és ez fontos szerepet kap fejlődéstörténetükben. Tehát a természet egy nagyon elterjedt jelenségével van dolgunk. Általános meghatározásra törekedve megállapíthatjuk, hogy az árapályhatás minden inhomogén gravitációs térben lévő, nem pontszerű test esetében jelen van. Az árapály a test egy adott pontjára és a tömegközéppontjára ható gravitációs erő különbsége. Tehát az árapály a gravitációs kölcsönhatás egyik esete.

A földi árapályhullámok periódusuk alapján három fő csoportba sorolhatók:

- hosszú periódusú hullámok ($\geq 7,11$ nap);
- egész napos hullámok (1,22–0,89 nap);
- félnapos hullámok (0,56–0,48 nap);
- egyharmad napos hullámok (0,36–0,33 nap).

AZ ÓKORTÓL NEWTONIG

Legrégibb emlékünk az emberiség és a tengerek árapályának kapcsolatáról az i. e. 2450 körüli időből származik. Az indiai Ahmedabad környékén a bronzkori Harappa-civilizáció idejéből egy hajódokk romjai találhatók. Ez egy nagy medence, szűk ajtókkal lezárható kijáratral a tenger felé. Az ajtót dagálykor nyitották, és a hajók be tudtak jutni a medencébe, majd az ajtót apálykor bezárva a hajók szárazra kerültek. A hindu vallás szent hagyományát képező iratok, a Puránák (i. e. 4. század) szerint az árapályt a Hold kelti a tengervíz felmelegítve, s a kiterjedő víztömeg okozza az árapályt. Érdekes, hogy ez az elképzelés megjelenik a 13. századi mohamedán forrásokban is, amelyek elsősorban *Zakaria al-Kvazvini* (*Zakariya al-Qazwini*) (1203–1283) perzsa matematikus, fizikus és csillagász nevéhez köthetők. Az ősi kínai elképzelés szerint a tengerek szintje rendszeres árapály okozta változásainak oka a Föld belsejéből származik: a víz a Föld vére, a Földnek mint egy élőlénynek szabályos pulzusa van, és a vízszintváltozások a földbelsőben végbemenő nyomásváltozásokkal kapcsolatosak.

Bár a tudomány fejlődésében meghatározó az ókori görög és római tudósok szerepe, ez a megállapítás kevésbé igaz az árapályával kapcsolatos tudás gyarapodására. Ennek oka mindenekelőtt az, hogy az ókori görög-római világ a Földközi-tengerhez kötődik, ahol az árapály okozta hatás nem jelentős. Hogy a Földközi-tenger menti népeknek korlátozott ismeretei voltak a jelenségről, egyik bizonyítéka az I. században élt római történetíró, *Quintus Curtius Rufus* leírása a Nagy Sándor (i. e. 356 – i. e. 323) flottáját az Indus deltájában ért pusztító természeti csapásról: az ottani dagály nagy rombolást végzett a hajók között, mivel ilyen hatásra a flotta parancsnoka nem volt felkészülve. Ugyanebben az időben *Pütheász* (i. e. 380 k. – i. e. 310) görög felfedező és utazó Massziliából (ma Marseille) indulva a görög hajósok közül vállalkozó útítársaival együtt talán elsőként hajózott ki a Földközi-tengerről az Atlanti-óceánra, ahol állítólag a Hebridákig eljutott. A korabeli hajósok szokása szerint az első Atlanti-óceáni napjuk végén éjszakára hajóikat a partra vontatták. Másnap reggel döbbenet tapasztalták, hogy a tenger otthagya őket a szárazon, és a víztükör a messzi távolba került tőlük. Ez a jelenség félelmetes és váratlan volt a görög utazók számára. A jelenséget vizsgálva Pütheász felismerte, hogy az árapály okozója a Hold. Ő írta le elsőként a napi kétszeri árapályváltozás mellett a félhavi árapályváltozást is, és megállapította, hogy az árapály amplitúdója összefügg a Hold fázisaival.

Az i. e. 2. században, Babilóniában élt heliocentrikus szemléletű görög csillagász, *Szeleukosz*, a vörös-tengeri árapály megfigyelése alapján megállapította, hogy a napi két árapálycsúcson nem egyenlő, ha a Hold az egyenlítőtől távol tartózkodik. A földrajztudomány megalapítójának méltán tekintett *Sztrabón* (i. e. 64 – i. sz. 21) *Geographika* című művében maradt fenn *Poszeidóniusz* (i. e. 135 – i. e. 51) munkája, amely összefoglalta a kornak az árapályra vonatkozó tudását

és a mai Spanyolország atlanti partvidékén Gadesnél (ma Cádiz) végzett saját megfigyeléseit. Munkájában foglalkozik az árapály napi, havi és éves periódusú változásainak ismertetésével. Ugyancsak Sztrabónnál található megemlékezés *Polübioszról* (i. e. 208 k. – i. e. 125 k.), akitől az első (a 19. század közepéig az egyetlen) leírás származik a földárapályról: „...a ghadeirai Héraklész-tempomban van egy iható vizű forrás, amelynek vizéhez néhány lépcső vezet le, s itt az árapállyal éppen ellenkező tümemény észlelhető, amennyiben a vize a dagály alkalmával kiapad, az apály alkalmával pedig újból felbuzog. Ennek okát a mélységből a föld felszínére törő légáramlásban látja, melyet a tenger áradásai alkalmával a hullám eláraszt, s így elzárja szokásos kivezető útját, visszafordulva tehát befelé elzárja a forrás útjait, s így a víz elapadását okozza, ismét fölszabadulva azonban egyenesen tör előre, s a forrás ereit fölszabadítja...” (Strabón, 1977).

A földközi-tengeri árapály, annak ellenére, hogy amplitúdója nem számottevő, a tengeri szűkületekben erős árapályáramlásokat kelt. Így feljegyezték, hogy *Arisztotelészt* meglepettette a görög szárazföld és az azzal párhuzamosan hosszan húzódó Euboea (ma Evia) sziget közti csatornában periodikusan változó irányú áramlás. Az idősebbik *Plinius* (23–79) *Naturalis historia* című munkájában számos árapályra vonatkozó megfigyelés található. Megállapítja például, hogy a tavaszi és őszi nap-éj egyenlőség idején az árapály nagyobb, mint a nyári és téli napforduló idején, leírja a holdfázisok és az árapály jellege közötti összefüggést.

A középkorban csak kevés új ismeretre tettek szert az árapállyal kapcsolatban. A nagy tudású angol szerzetes, *Beda Venerabilis* (673 k. – 735) felfedezte, hogy az óceáni árapály fázisa kikötőnként változó. A hajózást elősegíteni hivatott első árapálytáblázatok a 11–15. században jelentek meg Angliában, Németországban, Franciaországban és Kínában. *Guillaume Brousson* breton térképész 1546-ban megjelent *Almanachja* már hasznos információkat tartalmazott a francia, angol és breton tengerészek részére az árapályáramlások irányáról, és segítségével számítani lehetett az árapály okozta szintváltozásokra.

Az árapály kutatását, ha áttételesen is, jelentősen befolyásolta a Naprendszerrel alkotott kép *Nikolausz Kopernikusz* (1473–1543) által végzett forradalmi átalakítása. A halála évében megjelent főműve, *Az égi pályák forgásáról* (*De revolutionibus orbium coelestium*), bár több évtized késéssel, olyan tudósok tevékenységére jelentett döntő hatást, mint *Galileo Galilei* (1564–1642), *Johannes Kepler* (1571–1630) és *René Descartes* (1596–1650).

A kopernikuszi nézetek elterjesztésében *Galilei* itáliai előfutára *Paolo Scarpini* (1552–1623) volt. Tanulmányozta Kopernikusz nézeteit, és érveket gyűjtött azok alátámasztására. Már 1592-ben, Galileit megelőzve Kopernikusz támogatója lett. Elképzeléseiből Galilei sokat vett át, és a heliocentrikus világmépítő támogatója is az ő nyomán lett. A Jupiter négy holdjának és a Vénusz fázisvál-

tozásainak felfedezése ebben a hitében megerősítette, és nézeteit egyre határozottabban hirdette. A számára hozott 1616. évi pápai rendeletet, hogy a kopernikuszi elméletet ne valóságként, hanem csupán matematikai elméletként kezelje, Galilei nem fogadta el. Az egyház vezetése felszólította, hogy amíg nem áll rendelkezésére döntő bizonyíték, tartózkodjon nézetei publikálásától. Galilei ezt a döntő bizonyítékot az árapály jelenségében vélte felismerni. Annyira döntő érvnek hitte az árapállal kapcsolatos elképzelése bizonyító erejét, hogy nagy művét eredetileg *Discorso del flusso e refluxo del mare* (Beszélgetés a dagályról és az apályról) címmel tervezte megjelentetni, és az 1632-ben megjelent mű címe csak később lett *Dialogo: sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico, e copernicano* (Párbeszéd: a két legnagyobb világrendszeréről, a ptolemaiosziról és a kopernikusziról). Ez a mű több napig tartó beszélgetések formájában íródott. A három beszélgető egyike a szerző, a másik kettő a pártatlan, illetve az arisztotelészi nézeteket valló személy. Az árapállal mint a mű csattanójával a negyedik napon foglalkoznak a résztvevők. A kopernikuszi nézetek alátámasztására szánt elképzelés szerint az árapályt a Föld két mozgása, a tengely körüli forgás és a Nap körüli keringés együttesen okozza. Attól eltekintve, hogy ez az elmélet hibásnak bizonyult, azt is meg kell jegyezni, hogy Galilei korában még nem állt rendelkezésre megfelelő bizonyíték a heliocentrikus rendszer helyességének alátámasztására.

Johannes Kepler, aki a heliocentrikus rendszer híve volt, és erre alapozva alkotta meg a bolygómozgás törvényeit, nem írt árapály témájú munkát. Ennek ellenére több tény utal arra, hogy az árapály jelensége érdekelte, és közel állt annak helyes értelmezéséhez. Galilei, aki figyelemmel kísérte Kepler tevékenységét, a *Dialogo* negyedik napi beszélgetése során gúnyolódva említi Keplert, mert az az árapályjelenséget a Hold hatásának tulajdonította. Kepler horoszkópjában említi, hogy már tübingeni egyetemi éve során foglalkoztatta ez a jelenség. Kepler közel került a gravitáció fogalmának felismeréséhez is. Az *Astronomia novában* (1609) ennek megfelelően jegyzi meg, hogy „a víz azon helyek felé mozog, ahol a Hold zenitben áll”. A holdutazással kapcsolatos, 1634-ben, tehát halála után megjelent regényében, a *Somniumban* így ír: „Amikor az utazás első része véget ér, mert a test kikerül a Föld mágneses vonzóköréből, a Holdéba ér, [...] ezen a ponton a Hold és a Föld mágneses ereje egyformán vonzza a testet.” A regény egy későbbi részében pedig az olvasható, hogy a Föld és a Nap együttes vonzása a Holdon tavaszi áradásokat, dagályokat okoz.

Galilei kortársa, René Descartes nézeteit a *Les principes de la philosophie* című, 1644-ben megjelent munkájában fejtette ki, többek között az árapályról is. Szerinte nincs vákuum, a világmindenséget anyag tölti ki, és ennek örvénylései a mozgás forrásai. A központi örvény középpontjában a Nap található, és forgása az örvénylés előidézője. Ez az örvény mozgatja pályájukon a bolygókat, ezek maguk is másodlagos örvények forrásai. Így a Holdat a Föld örvénye mozgatja.

De valamiért a Hold a Föld örvényénél lassabban mozog, ez akadályt teremt, és zavarja az anyag szimmetrikus áramlását. Ez nyomáskülönbséget kelt az óceánok felületén, létrehozva az árapályt. Örvényelméletének anomáliáival magyarázza a napi kétszeri árapálycsúcsokat, a kéthetes árapályhullámot és az árapállyal kapcsolatos más jelenségeket.

AZ ÁRAPÁLYHULLÁMOK KORAI VIZSGÁLATA

Isaac Newton (1642–1727) 1687-ben megjelent munkája, a *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* átformálta az emberiség felfogását az univerzumról és ezen belül az árapályjelenségről is. Az árapállyal kapcsolatos legfontosabb megállapításai a *Principiá*ban a következők:

1. Az egyik gravitációs hatással bíró testnek a másakra gyakorolt hatása következtében annak átellenes (antipodális) pontjain egyforma árapálypúpok jönnek létre.
2. Az árapálypúpot a Hold és a Nap keltik, és ez utóbbi hatása a Holdénak fele.
3. A Hold és a Nap a földi árapálypúpot önállóan keltik.
4. A Hold és a Nap gravitációs hatása következtében a tengerek egy ellipszoid alakját veszik fel, amelynek nagytengelye a keltő égitest irányába mutat.
5. A Föld forgása következtében a felszínén lévő pontok a maximális és a minimális vízmagasság helyén egyaránt áthaladnak, ami magyarázza az árapály időbeli változását.

A *Principia* magyarázatot szolgáltat a fél és egész hónapos árapályhullámok létrejöttére, leírja az árapályhatás szélességfüggését. Röviden szólva, Newton megalkotja a statikus árapály elméletét. Méltán állapítja meg művének árapállyal foglalkozó, forradalmian új részéről, hogy „így megmagyaráztam a Hold és a tengerek mozgásait”.

Newton árapályelméletében két, elsősorban a tengeri árapállyal kapcsolatos tisztázatlan kérdés maradt:

- az a feltételezése, hogy az árapály okozta vízszintváltozásokat az árapályerő függőleges komponense kelti, a későbbi kutatások fényében nem bizonyult helytállóknak;
- bizonytalan maradt, hogyan reagál a víz a változó vertikális árapályerőkre.

A 18. században a párizsi Académie royale des sciences számos projektet támogatott a francia kikötőkben fellépő árapály pontos megfigyelése és előjelzése érdekében. Ezenkívül nagy fontossággal bírt az a pályázat, amelyet 1738-ban írt ki a tenger dagálya és apálya témában. A beérkezett és 1740-ben díjazott pályázatok közül három járult hozzá lényegesen az árapály megismeréséhez.

Colin Maclaurin (1698–1746) skót matematikus pályázatában először ismerte fel a Föld forgása következtében fellépő, ma Coriolis-erőnek nevezett eltérítő erő szerepét, amely később nagy szerepet kapott Pierre-Simon de Laplace árapályelméletében.

Leonhard Euler (1707–1783) svájci matematikus és fizikus dolgozatának legfontosabb eredménye annak bizonyítása volt, hogy a horizontális, és nem a vertikális erőhatás határozza meg az árapály keltette mozgást.

A nyertesek közül *Daniel Bernoulli* (1700–1782) svájci orvos, fizikus és matematikus pályázatának volt legnagyobb hatása a fejlődésre. Módszerének lényege az volt, hogy a Hold és a Nap csillagászati forrásokból ismert mozgása alapján számította a kombinált statikus árapályt, és eredményeit a megfigyelt árapálygörbékhez illesztette. Vizsgálatai alapján először vált lehetővé az árapály számítása és előrejelzése csillagászati adatok segítségével. Newtonnak a Nap és a Hold keltette árapály arányára vonatkozó adatát felülbíráva egy, a ma elfogadott értékhez hasonlókat kapott (0,40, a ma elfogadott hányados 0,47). Ezt az adatot és számításait felhasználva egy sor kikötőre sikerült az árapály előrejelzésére vonatkozó táblázatokat készítenie.

Pierre-Simon de Laplace (1749–1827) francia matematikus, csillagász, fizikus szerepe az árapályelmélet fejlesztésében csak Newtonéhoz hasonlítható. Laplace megalkotta azokat a dinamikus egyenleteket, amelyek meghatározzák az óceán válaszát az árapálykeltő erők hatására. Elődei az óceán statikus válaszát feltételezték az árapálykeltő erők hatására. Laplace elméletének kidolgozásakor elsősorban Euler hidrodinamikai egyenleteit alkalmazta a Föld esetére. Elődeihez hasonlóan az óceánt az egész Földet beborító, változó mélységű, összenyomhatatlan folyadékkréteggént modellezte. Azzal a feltételezéssel élt, hogy a Föld sugarához képest az óceánok mélysége kicsiny. Ebből következik, hogy a nagy léptékű folyadékmozgások közel vízszintesek kell hogy legyenek. Modelljében Maclaurinhoz hasonlóan figyelembe vette a Föld forgása következtében fellépő eltérítő erőt. 1782-ben publikálta a szférikus harmonikusokkal kapcsolatos elméletét, amelyek árapálya foglalkozó kutatásaiban döntő szerephez jutottak. Ennek alapján adódott az árapály-potenciál egyenlete, amelyet használva jutott el egyik meghatározó fontosságú eredményéhez: felismerte, hogy ez a potenciál háromféle oszcillációt gerjeszt. Közülük az első nem függ a felszíni pont földrajzi hosszúságától, csak a keltő tömeg zonális eloszlású pályaelemei okozzák a változásokat. Ezen zonális, hosszú periódusú hullámok nem függenek az óceánok mélységétől. A második hullámtípus közel egész napos periódusú. Az amplitúdók eloszlása tesszerális, és függenek az óceánok mélységétől, és eltűnnek állandó mélység esetén. A harmadik hullámtípus a félnapos, ez szektorális eloszlású, és az ilyen hullámok eltűnnek végtelen mélységű óceánt feltételezve.

Laplace munkája tehát Newtonéra épült, de az árapályerő helyett ő az árapály-potenciált használta, bevezette a szférikus harmonikusokat, és megalkotta az árapály dinamikus elméletét, az óceáni vizek dinamikáját leíró, máig használt

egyenleteit. Kimutatta az árapályváltozások három fő típusát: a hosszú, az egész napos és a félnapos hullámokat.

Az árapály jelenségének kutatása a 19. század közepétől két ágon folytatódott. Ekkortól, egyrészt, a Laplace-egyenletben szereplő három árapályhullám-típus részletes vizsgálatára került sor, másrészt, az akkor születőben lévő geofizika igényeinek megfelelő műszeres és további elméleti, a tengeri mellett a szilárd Föld árapályával kapcsolatos kutatásokra is.

Az árapály akkorra már meglévő mareográfokkal megfigyelt idősorainak harmonikus analízisét, sorfejtését *Lord Kelvin (William Thomson)* (1824–1907) kezdeményezte 1868-ban. Munkájában Laplace ún. fiktív égitestekének elgondolására támaszkodott. A fiktív égitestek (fiktív Nap, fiktív Hold) az egyenlítő síkjában állandó szögsebességgel mozognak pályájukon. Ezt a megkezdett munkát *George Howard Darwin* (1845–1912), a híres biológus, *Charles Darwin* (1809–1882) fia folytatta. Tekintettel arra, hogy a 19. században még nem állt rendelkezésre megfelelően részletes modell a Hold mozgásáról, Darwin 1883-ban készült sorfejtése csak a nagyobb árapályhullámokra terjedt ki. Ennek ellenére, az ő munkája volt az első árapály-sorfejtés, amelyre a későbbiekben támaszkodhattak. A nagyobb árapályhullámok esetében ma is az általa használt betűjelöléseket használják, amelyek 1, 2, 3 indexei az egész, a fél- és egyharmad napi hullámokat jelölik (a hosszú periódusú zonális hullámokat betű jelöli az alsó indexben). A legnagyobb árapályhullámok (és periódusaik): K_1 (23,93 óra), O_1 (25,82 óra), M_2 (15,42 óra), S_2 (12,00 óra), N_2 (12,66 óra).

Az első részletes, már modernnek tekinthető sorfejtését *Arthur T. Doodson* (1890–1968) csak 1921-ben közölte. Ez a sorfejtés ötven évig volt az árapályval kapcsolatos kutatások nélkülözhetetlen eszköze. Az 1970-es évektől több árapály-sorfejtés jelent meg (*1. táblázat*), ezekben az elemi hullámok száma és azok pontossága is jelentősen nőtt.

1. táblázat. Árapálypotenciál-sorfejtések katalógusai

Szerző	Év	Elemi hullámok száma
A. T. Doodson	1921	378
D. E. Cartwright, R. J. Tayler	1971	505
F. J. Bullesfeld	1985	656
Y. Tamura	1987	1 200
Qinwen Xi	1987	3 070
T. Hartmann, H.-G. Wenzel	1995	12 935
F. Roosbeek	1995	6 499
S. M. Kudrjavcev	2004	27 000

AZ ÁRAPÁLYKUTATÁS SZEREPE A GEOFIZIKA LÉTREJÖTTÉBEN

A geofizika kifejezést *Julius Fröbel* (1805–1893) német geográfus egy 1834-ben írt munkájában használta először (természetesen németül: *geophysik*) azokra a Földdel kapcsolatos, addigra már meglévő ismeretekre, amelyeket nem tudott besorolni sem a földrajz, sem az akkor már formálódó földtan és geodézia tárgykörébe. A geofizika mint önálló tudomány azonban csak az 1880-as években kezdett kialakulni. Ekkor jelentek meg az első geofizikai intézmények, könyvek és folyóiratok. Ebben az időben a Föld fizikájával kapcsolatban négy kérdés foglalkoztatta a szakembereket:

- a Föld kora,
- a Föld belsejének hőmérséklete,
- a Föld átlagos sűrűsége és a sűrűség mélység szerinti eloszlása,
- a Föld átlagos nyírási modulusának kérdése.

Ezek közül az utóbbi kutatásában játszott jelentős szerepet az árapály. Fröbelrel egy időben és vele hasonló értelemben, Angliában *William Hopkins* (1793–1866) a fizikai geológia (physical geology) kifejezést használta. Hopkins kutatásainak tárgya a Föld forgástengelyének precessziója és nutációja volt. Abban az időben a geológusok úgy vélték, hogy a Föld belseje cseppfolyós egy 100 kilométernél vékonyabb szilárd külső kéreggel. Hopkins matematikai alapokon nyugvó vizsgálata azonban megmutatta, hogy a kéreg vastagsága legalább 1200–1600 km. Tanítványai közül számos hírneves tudós került ki: Lord Kelvin, *James C. Maxwell* (1831–1879), *George G. Stokes* (1819–1903), *Francis Galton* (1822–1911). Hopkins munkásságát folytatva Lord Kelvin 1862-ben egy, a Royal Society részére írt tanulmányban kimutatta, hogy a szilárd Föld a Hold és a Nap árapálykeltő hatása alatt deformálódik, és ez a rugalmas deformáció alkalmas a bolygó átlagos nyírási modulusának meghatározására. Az általa kapott egyenlet elvi lehetőséget biztosított a Föld átlagos nyírási modulusának meghatározására:

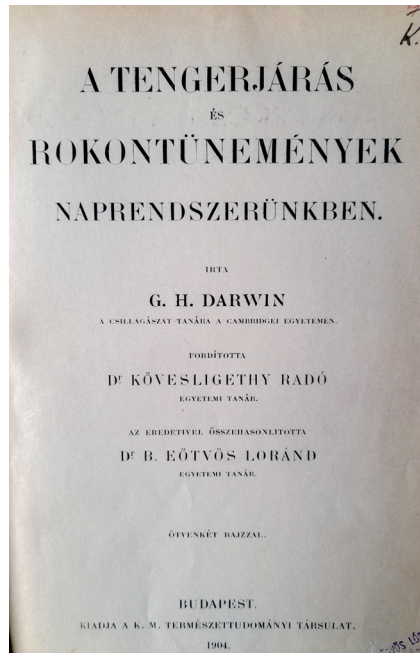
$$h = 2,5 \times H[1 + (19\mu / 2ga)].$$

Ebben az egyenletben H a merev Földre érvényes és csillagászati adatokból számítható árapály-amplitúdó, míg h a megfigyelté. A Föld átlagos nyírási modulusa μ , g , ρ és a pedig a gravitációs gyorsulás, a Föld átlagsűrűsége, illetve sugara, ez utóbbiak a 19. század közepén már ismert mennyiségek voltak. h meghatározására Lord Kelvin két módszert javasolt. Az egyik a hosszú periódusú zonális árapály keltette tengerszintváltozások megfigyelésére épült. A zonális árapály megfigyelt h/H relatív amplitúdói Darwin 1882-ben közölt adatai szerint $0,675 \pm 0,084$ és $0,680 \pm 0,387$ a fél és az egész hónapos hullámok esetében, míg Wilhelm Schweydar (1877–1959) 1916-ban $0,626 \pm 0,043$ és $0,605 \pm 0,102$ értéket határozott meg.

A kapott eredményekből az következett, hogy a Föld rugalmas test ($h \neq H$), és átlagos nyírási modulusa az acéléhoz hasonló. Az árapály mareográfok által rögzített idősorai mellett közvetlen műszeres árapály-megfigyelésekre is szükség volt, mert a zonális árapály nem tekinthető teljesen statikusnak, és amplitúdóját torzítja az árapályhullám által képviselt víztömeg földfelszint deformáló hatása is.

A Föld árapályának közvetlen műszeres megfigyelésére elsőként Darwin és testvére tettek kísérletet Cambridge-ben egy kettős felfüggesztésű vertikális ingával 1880 és 1882 között. Egy függőleges felfüggesztésű inga esetében annak elmozdulásait ezred ívmásodperc pontossággal kellett volna mérni, amit a 19. század végi mérés technika nem tett lehetővé. Kétlem, hogy valaha is el lehet különíteni az árapálykeltő erők hatását a sokféle zavartól – jelentette ki George Darwin 1898-ban.

Ernst von Rebeur-Paschwitz (1861–1895) 1888-ban elkészült műszere jelentős szerepet játszott a szeizmológia történetében, de a földárapály megfigyelése terén nem volt eléggé sikeres. Ennek oka elsősorban a két forgási pontra támaszkodó inga (ún. kertkapu-inga) nem megfelelő érzékenysége és stabilitása volt. Rebeur-Paschwitz érdeme viszont, hogy először használt horizontális ingát a Föld megfigyelésére, ami elvileg képes volt ezred ívmásodpercnyi jelek detektálására, és ugyancsak úttörő volt abban is, hogy műszerét fotoregisztráló egységhez kapcsolta.

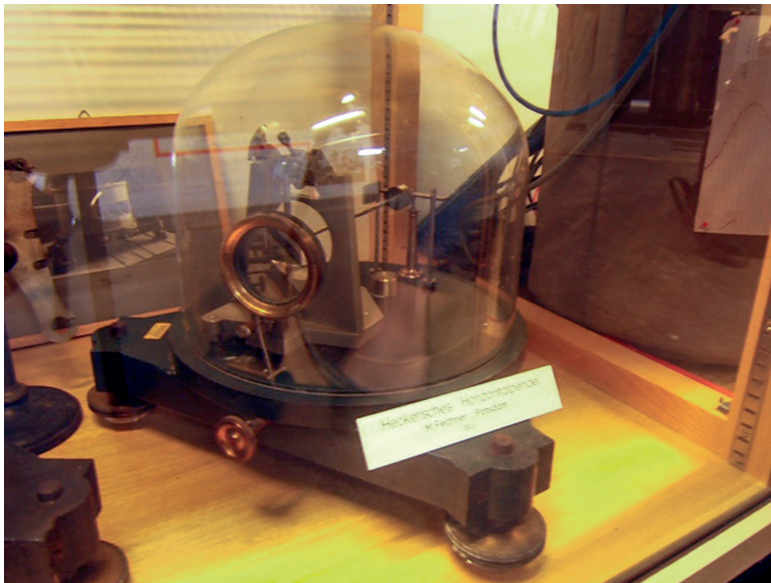


1. ábra. G. H. Darwin *A tengerjárás és rokontünemények naprendszerünkben*
K. M. Természettudományi Társulat, 1904

Az árapálykutatásban a 19. század végéig elért eredmények látványos összegzését adja George Darwin népszerűsítő könyve. A *Tides and Kindred Phenomena in the Solar System* magyarul is megjelent *A tengerjárás és rokontünemények naprendszerünkben* címmel a Királyi Magyar Természettudományi Társulat kiadásában, 1904-ben. A magyar kiadás érdekessége, hogy fordítója *Kövesligethy Radó* volt, míg „az eredetivel összehasonlította *Eötvös Loránd*” (1. ábra).

A 20. SZÁZAD ELSŐ FELÉNEK FEJLEMÉNYEI

A földárapály megfigyelésére alkalmas első jó minőségű horizontális ingát *Oskar E. A. Hecker* (1864–1938) készítette (2. ábra). Csökkentette a műszer légnyomásműködését és a kertkapu-inga alátámasztási pontjaiban az ingamozgás miatt jelentkező kopások hatását. Ezek a fejlesztések lehetővé tették az árapály okozta felszindölések ezred ívmásodperc pontosságú megfigyelését (1 ívmásodperc 1 cm látószöge 20,6 km távolságból). Méréseit 1902 és 1914 között elsősorban Potsdamban (Telegrafenberg) végezte egy 26 méter mélyen lévő galériában. Az első világháború előtt *Wilhelm Schweydar* (1877–1959) is végzett megfigyeléseket Potsdamban horizontális ingával. Műszerében a *Friedrich Zöllner* (1834–1882) által 1869-ben leírt nagyobb regisztrálási pontosságú, szálfelfüggesztésű horizontális ingát használta.



2. ábra. Hecker horizontális ingája
(Universitat Karlsruhe Geodatisches Institut muszergyujtemenye, a szerző felvetele)

Oroszországban a Rebeur-Paschwitztól kapott műszerrel *Ivan Jegorovics Kortazzi* (1872–1903), a Nyikolajevi Tengerészeti Obszervatórium igazgatója 1892-től végzett árapály-megfigyeléseket. Honfitársa, *Alekszander Jakovlevics Orlov* (1880–1954) 1909-től Jurjevben (ma Tartu), majd 1912-től a szibériai Tomszkban folytatott megfigyeléseket, az általa készített műszerben már a Zöllner-féle fel-függesztést használva. Ez utóbbi helyen többéves regisztrálási sorozatot készített.

Albert A. Michelson (1852–1931) Nobel-díjas fizikus, a Chicagói Egyetem professzora 1913-ban munkatársával, *Henry G. Gale*-l (1874–1942) egy K–Ny irányú, 150 méter hosszú vízszintes cső két végén figyelték meg a földárapály okozta döléseket, majd hamarosan egy É–D irányú, hasonlóan hosszú berendezést is építettek. A mérési eredmény: $\gamma \approx 0,7$ ($\gamma_{É-D} = 0,52$; $\gamma_{K-Ny} = 0,71$) (γ a megfigyelt és a számított árapály-amplitúdók hányadosa). Heckernek és Schweydarnak is feltűnt, hogy eltérőek a K–Ny és É–D irányban mért amplitúdóarányok, amit a tengeri árapály hatásának tulajdonítottak. Mind Michelson és Gale, mind Hecker mérési eredményeiből az adódott, hogy a Föld nyírás modulusa 176 GPa, ami körülbelül kétszerese az acélénak. Ilyen módon Lord Kelvin elméleti feltételezése igazolódott, megválaszolva a Föld átlagos nyírás modulusának kérdését. Itt kell megjegyezni, hogy valószínűleg Schweydar volt az első, aki a dőlésmérések mellett a földárapály keltette gravitációs változásokat is megfigyelte (1914).

A 20. század elején a földárapály elmélete tovább fejlődött két olyan paraméter bevezetése által, amelyek a szilárd Föld felszínének árapály keltette radiális irányú elmozdulását és gravitációs potenciáljának változását jellemezték (Love, 1909). Ezek a *Love*-számok, szokásos jelölésük h és k . E két *Love*-számhoz *Sida Tosi* (angol átírásban *Toshi Shida*) (1912) egy harmadikat csatolt a horizontális elmozdulások jellemzésére. A *Sida*-szám szokásos jelölése l .

Homogén folyékony gömb esetében $h = 1$, $k = 0,6$, $l = 0,3$. Abszolút merev homogén gömb esetében mindhárom szám nullával egyenlő. Homogén gömb esetében, amelynek sűrűsége, sugara és nyírás modulusa ρ , r , μ :

$$h = \frac{5f}{2f+1}; \quad k = \frac{3f}{2f+1}; \quad l = \frac{3f}{2(2f+1)},$$

ahol

$$f = \frac{g\rho r}{19\mu},$$

és g a gravitációs gyorsulás a Föld felszínén. Innen adódik rugalmas Föld esetére, hogy $k = 0,6$, $h = 2l$.

A szilárd Föld árapályával szemben, ahol a Newton által kidolgozott statikus árapályelmélet érvényesül, és az egyes hullámok amplitúdóinak aránya jó köze-

lítéssel olyan, amint azt az égi mechanika alapján elméletileg meghatározták, a tengerek árapályában a Laplace által kidolgozott dinamikus elmélet érvényesül, azaz a vízrészecskék árapály keltette mozgását függőleges és vízszintes irányú hullámmozgásként vizsgálva. Laplace differenciálegyenleteinek numerikus megoldása a mareográfok által megfigyelt idősorok harmonikus analízisének eredményeiből indul ki, és igen összetett feladat. Rengeteg körülményre kell figyelemmel lenni (a medence formája, a fenék morfológiája, a szilárd Föld árapálya, vertikális sűrűséginhomogenitások, hol és hogyan disszipálódik az energia stb.). Az árapályhullámok v terjedési sebessége közelítőleg $v = \sqrt[2]{g \times D}$, ahol D az óceán mélysége.

A partközeli területeken a 20. század elején már ismertek voltak azok a helyek, ahol az árapály amplitúdója a legnagyobb. Bolygónkon a legnagyobb árapály-szintkülönbséget Kanada Atlanti-óceáni partvidékén, a Fundy-öbölben lehet megfigyelni, ott ennek értéke eléri a 18 métert, sőt mértek már 21,6 métert is. Nagyon magas árapály figyelhető meg a Baffin-tenger Frobishen-öblében (15,6 m), az Ohotszki-tenger Penzin-öblében (13,4 m), a La Manche-csatornában Saint Malónál (13 m), a Fehér-tenger egyik öblében (12,9 m), a Severn folyó torkolatában, Bristolnál (13 m). A nyílt óceánokon viszont az árapály magassága nem haladja meg az egy métert. A tengeri árapály pontos térképezését nehezítik az ún. sekély vízi árapályhullámok, amelyek a luniszoláris hatás következtében létrejövő hullámok egymásra torlódása következtében keletkeznek a selfeken (nevük az őket kiváltó hullámok nevéből adódik, például M_4 , M_6 , MS_4). E hullámok amplitúdója helyenként számottevő, például az európai selfeken az M_4 hullám amplitúdója elérheti az 50 cm-t. Az 1900-as évek elején az óceánok az árapály szempontjából nem voltak egyformán ismertek. Az Atlanti-óceán északi részén volt a legjobb a helyzet, míg a Csendes-óceán déli része gyakorlatilag ismeretlen terület volt.

Az óceáni árapály modelleken történő vizsgálata megmutatta, hogy a tengeri árapály térképei erősen függenek a disszipáció értelmezésétől, a parti határfeltételek megfogalmazásától, és mind nagyon érzékenyek a helyi hatásokra, amelyek a kontinentális talapzatból a mély tengerekbe való átmenet topográfiájától, a szigetek eloszlásából származnak. A perturbációk helyileg nagy szerephez juthatnak az árapály alakításában. Ez a körülmény a 19. század utolsó évtizedeiben a tengeri hajózást természetesen hátrányosan érintette. Kelvintől származik az az elképzelés, hogy a helyi árapály előrejelzése céljából analog berendezéseket használjanak.

A tengeri árapályt bemutató térképek, az ún. *kotidális* (vagy cotidális) térképek, az egyforma amplitúdójú pontokat összekötő izovonalakat, valamint az egyforma fázisú helyeket ábrázoló vonalakat tartalmazzák. Az ilyen térképek készítése az oceanográfia egyik legfontosabb, egyszersmind egyik legösszetettebb feladata. A tengerek árapályát bemutató térképek első vázlatát *William Whewell* (1794–1866) készítette az 1830-as években. A későbbiekben a térképek már kü-

lön-külön készültek az egyes árapályhullámokra. Az első ilyen térképsorozat szerzője *Rollin A. Harris* (1863–1918) volt. Térképei 1897 és 1907 között jelentek meg. Korábban az ilyen térképek szerkesztéséhez kizárólag a tengerpartokon és a szigeteken felállított mareográfok által regisztrált idősorok harmonikus analízisének eredményei szolgáltak alapul. Ezekből kiindulva Laplace hidrodinamikai egyenleteinek megoldásával kapták a kotidális térképeket. Ezek számítása során számos szempontot kellett figyelembe venni, mindenekelőtt az óceán medencéjének domborzatát, partvonalának geometriáját, a tengeráramlatok területi elhelyezkedését. Nyilvánvaló, hogy az ilyen térképek a nyílt óceánok árapályáról csak hozzávetőleges információt szolgáltattak.

A légköri árapály légnyomásváltozások formájában jelentkezik. A földfelszín közelében a félnapos hullám jelenik meg a leghatározottabban. Amplitúdója a földrajzi szélesség koszinuszának köbével arányos. Ennek megfelelően amplitúdója az Egyenlítőnél a legnagyobb (hozzávetőleg 1,25 hPa). Megfigyelését nehezíti, hogy periódusa nagyon közeli az atmoszféra saját rezgéséhez, továbbá, hogy a légkörben még egy hasonló kényszerperiódus is jelen van, a hőmérséklet közel 24 órás változása.

A két világháború között és utána az 1950-es évekig tartó időszakban az árapálykutatás fejlődése nem volt látványos. Ennek okai részben, hogy még hiányoztak a Föld belső szerkezetére vonatkozó modellek és a földárapály-kutatás továbbfejlődéséhez szükséges műszerek.

A földárapály megfigyeléseinek értelmezéséhez szükséges első földszerkezet-modellt, amely figyelembe veszi a szeizmológiai megfigyelésekből meghatározott sebességadatokat, *Erskine D. Williamson* (1886–1923) és *Leason H. Adams* (1887–1869) készítették 1923-ban. 1936-ban *Inge Lehmann* (1888–1993) szeizmogramok vizsgálata alapján kimutatta a Föld szilárd belső magját. *Keith Edward Bullen* (1906–1976) modelljei (1940, 1950) már nagyjából hasonlóak mai elképzelésünkhöz. 1926-ban *Harold Jeffreys* (1891–1989) szeizmológiai és földárapály-megfigyelési eredmények alapján arra a következtetésre jutott, hogy a külső mag esetleg cseppfolyós.

A két világháború között a földárapállyal kapcsolatos kutatásokat a Nemzetközi Geodéziai Szövetség (International Association of Geodesy, IAG) összegezte. Az egyes konferenciák részére *Walter D. Lambert* (1879–1968) által készített beszámolók értékes tudománytörténeti adatokat tartalmaznak az ezen a területen elért eredményekről.

Pierre Tardi (1897–1972), az IAG főtitkára 1956-ban az időben változó geofizikai folyamatok vizsgálatával foglalkozó munkacsoport létrehozását kezdeményezte. Ennek tagjai Lambert mellett, *Jurij (Yuri) D. Boulanger* (1911–1997) és *Paul Melchior* (1925–2004) lettek. A munkacsoport tevékenysége és az 1957. július 1. és 1958. december 31. között rendezett *Nemzetközi Geofizikai Év* hatására a földárapály-kutatás sokkal szervezettebbé vált.

A NEMZETKÖZI GEOFIZIKAI ÉV UTÁNI IDŐSZAK

A földárapálllyal foglalkozó tevékenység a Nemzetközi Geofizikai Év XIII. munkacsoportján belül folyt. A Commission pour l'étude des Marées Terrestres 1956-ban megkezdte a *Bulletin d'Information des Marées Terrestres* (BIM) kiadvány rendszeres megjelentetését. Az IAG főtitkárának kezdeményezésére megalakult a Permanent Commission for Earth Tides, és létrejött az International Centre for Earth Tides (ICET) a tevékenység irányítása és az adatfeldolgozás elősegítése érdekében. Az ICET, amelynek 2007-ig az Observatoire royal de Belgique (ROB) biztosította a működési feltételeket, 1958-ban kezdte meg tevékenységét Paul Melchior vezetésével.

Bár a rugalmas Föld, illetve a cseppfolyós maggal bíró Föld deformációját leíró elméletek már korábbról ismertek voltak, a földárapály okozta deformációk elméleti úton történő számításához szükség volt azokra a földmodellekre, amelyeket Bullen 1940-től kezdődően *Beno Gutenberg* (1889–1960) és *Jeffreys* sebességmodelljeire alapozva megalkotott. Ezekre támaszkodva lényeges lépést tett *Takeucsi Nozomu* (angol átírásban *Nozomu Takeuchi*) (1950) amikor egy radiálisan inhomogén, cseppfolyós maggal bíró Föld árapály okozta deformációját leíró elméletét megalkotta. Ő és követői egyaránt olyan differenciálegyenlet-rendszerekre támaszkodva alkották meg elméleteiket, amelyek a rugalmasságtanra és a Poisson-egyenletre épültek. *Mihail Szergejevics Mologyenszkij* (angol átírásban *Mikhail Sergeevich Molodensky*) (1909–1991) 16 különböző földmodellt vizsgált annak érdekében, hogy tisztázza, milyen mértékben függ a rugalmas Föld árapály-deformációja a bolygó belső szerkezetétől (1953). 1980-ban *Mologyenszkij* és *Marianna Vasziljevna Kramer* megmutatták, hogy a gravitációs földárapály-megfigyelések eredményeit a köpenyben feltételezett jelentős laterális inhomogenitások csak kismértékben befolyásolják. *John M. Wahr* (1951–2015) elméleti modellszámítása kimutatta, hogy ugyanezen megfigyelések eredményeinek, ha kismértékben is, de függeniük kell a földrajzi szélességtől a Föld lapultsága következtében (1981).

Sydney Samuel Hough (1870–1923), *Fjodor Alekszejevics Szludszkij* (angol átírásban *Feodor Sludsky*) (1841–1897) és *Henri Poincaré* (1854–1912) munkáiból már korábban ismert volt, hogy ha a Föld magja cseppfolyós és lapult, akkor inerciatengelye a nap hosszához közeli periódusú elliptikus mozgást végez a forgástengely körül. Maga a periódus függ a Föld szerkezetétől. Ennek a nutációs mozgásnak az amplitúdója kicsi, és hosszú ideig az a vélemény uralkodott, hogy kimutatására nincsen mód. Pedig az inerciatengely e mozgásának kimutatása nagyon fontos, mert döntő bizonyítékkal szolgál a mag cseppfolyós jellegére vonatkozóan. *Raimundo Oliveira Vicente* (1924–2015) és *Jeffreys* (1957), valamint *Mologyenszkij* és *Kramer* (1961) elméleti úton kapott eredményei megmutatták, hogy ez a jelenség a földárapály-megfigyelések alapján műszeres mérésekkel kimutatható.

Az árapálykutatás megfigyelésére kifejlesztett graviméterek az 1950-es évek elején jelentek meg. Ebben az időszakban – 1957 – *Robert Lecolazet* (1910–1990) Strasbourgban és *Rudolf Brein* (1970) Frankfurtban végzett graviméteres árapály-megfigyelései emelkedtek ki pontosságukkal. Mindkét esetben egy sorozatgyártású asztalikus (nem lineáris) műszer továbbfejlesztett változatával történtek a mérések. A Nemzetközi Geofizikai Év alatt és után az 1980-as évek közepéig az árapály-megfigyelésre alkalmas legelterjedtebb műszerek az Askania Werke AG által gyártott GS jelűek voltak. Elterjedésük lényeges oka volt, hogy rugórendszerük miatt lineárisak voltak. Megalkotásuk, hasonlóan az Askania cég másik két híres műszeréhez, a tengeri graviméterhez és a fűrőlyukdőlés-mérőhöz, *Anton Graf*, a Münchener Műegyetem professzorának nevéhez kötődik. Az Askania GS-15 jelű modelljével alapos felügyelet mellett végzett sokéves mérési sorozatok eredményeinek megbízhatósága nem marad el napjaink modernebb műszereitől.

Lucien LaCoste (1908–1995) 1932-ben megépített műszerében fantáziát látott egyetemi főnöke, *Arnold Romberg* (1882–1974), akinek javaslatára az 1940-es években közös vállalatot hoztak létre terepi graviméterek gyártására. E műszerek egyik továbbfejlesztett változata lett a LaCoste–Romberg ET-graviméter, amelyet előbb mechanikus, később elektronikus visszacsatoló egységgel láttak el. Ez az egység lehetővé tette, hogy a műszerkaron lévő tömeg működése közben ne mozduljon ki nyugalmi helyzetéből, és így a graviméterek alkalmassá váltak időben változó gravitációs jelenségek regisztrálására, 1 mikrogalos változásokig. Az új LaCoste–Romberg ET-graviméterek az 1950-es évek közepén készültek el.

A szupravezető gravimétert (SG) *William A. Prothero, Jr.* és *John Morton Goodkind* (1968) vezették be Protherónak a műszer részletes leírását tartalmazó doktori értekezése alapján. Az SG új lehetőségeket biztosított a geofizikai műszerzettségben. Prothero és Goodkind (1972) publikáltak először egy szupravezető graviméterrel regisztrált négy hónapos földárapály-adatsort, amelyből sikeresen zárták ki az óceáni árapály és a légnyomás hatását.

A földárapály horizontális összetevőinek megfigyelésére szolgáló horizontális ingáknak számos változata jelent meg a Nemzetközi Geofizikai Év idején vagy röviddel utána. A földárapály vízszintes összetevőjének megfigyelésére szolgáló műszerek egyik csoportját jelentik a hosszú bázisú vízszintmegfigyelő eszközök. Ezek elvileg a luniszoláris hatás megfigyelése mellett alkalmasak lehetnek annál hosszabb változások megfigyelésére is. Az előzőekben már említettük, hogy az akkor már Nobel-díjas Albert A. Michelson érdeklődni kezdett a földárapály megfigyelése iránt, és 1913 augusztusától munkatársával, Gale-lel közösen kísérletekbe kezdett. Hasonló kísérleteket folytatott Norvégiában 1934-től *Johannes Egedal* (1891–1965) és *Jonas Ekman Fjelstadt* (1894–1985) (1937). Eszközeik előnye, hogy nem érzékenyek a rövid periódusú zajokra.

A szeizmológia céljaira merült fel a ma földárapály megfigyelésére is szolgáló és e területen strainmétereknek (extenzométereknek) nevezett műszerek iránti igény. Ezeknek három alapvető típusa terjedt el. Széles és lineárisnak tekinthető átviteli tulajdonságuk miatt egyaránt alkalmasak a hosszú periódusú földrengéshullámok, az árapály, továbbá a több évig tartó lokális és regionális tektonikai folyamatok megfigyelésére is. Ehhez járul még jelenleg más geodéziai eszközzel el nem érhető 10^{-9} – 10^{-11} relatív pontosságuk. Az első hatékony működésre képes strainméter *Victor Hugo Benioff* (1899–1968) építette 1930 előtt. 25 méter hosszú műszerében eredetileg kerámia-, később kvarccsöveket használt. A rúdextenzométerek mellett a huzal-extenzométerek is használatba kerültek, és a földárapály-deformációs tenzor összetevőit is ilyen műszerek segítségével határozták meg először. Az 1970-es évek elején jelentek meg a lézer strainméterek. Az 1970-es évek közepén már több mint 120 extenzométer-állomás működött világszerte.

A Nemzetközi Geofizikai Év után jelentősen megnőtt a nyílt óceánokon telepített megfigyelőeszközök alapján meghatározott óceáni árapály-paraméterek száma. Így lehetővé vált, hogy elkészüljenek az óceánok globális árapálytérképei. Közülük ebben az időszakban elsősorban *Wilfried Zahel* (1970), valamint *Konstantin Trifonovics Bogdanov* (1926–2013) és *V. A. Magarik* (1967) térképei bizonyultak megbízhatónak. Mindkét esetben az öt legnagyobb árapályhullám (O_1 , K_1 , M_2 , S_2 , N_2) térképei készültek el. 1980-ban látott napvilágot *Ernst Walter Schwiderski* (1924–2010) térképsorozata a kilenc legjelentősebb hullám esetére (M_f , Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 , K_2), amelyek az 1990-es évek közepéig-végéig standard modelleknek számítottak. Az 1980-as évek második felétől a nagy pontosságú műholdas magasságmérések (Geosat, ERS-1, Topex-Poseidon) lehetővé tették a tengeri árapálytérképek pontosságának további növelését. Az árapály okozta tengerszintváltozások a nyílt óceáni térségekben közel centiméteres pontossággal megismerhetők lettek.

AZ ÁRAPÁLY A TÖRTÉNELEMBE IS BELESZŐL

Az árapály megismerésének története nem lehet teljes az árapály történelmi eseményekre gyakorolt hatásának rövid ismertetése nélkül. Már említettük, hogy az ókori görögök által kevéssé ismert tengeri árapály miként zilálta szét *Nagy Sándor* flottáját az Indus deltájában. *Julius Caesar* (i. e. 100 – i. e. 44) feljegyzéseiben a gall háborúról a következők olvashatók a rómaiak első sikertelen britaniai partraszállási kísérletéről: „véletlenül éppen aznap éjszakára esett holdtölte, amely az óceánon a legnagyobb dagályokat idézi elő. A mieink erről mit sem tudtak. A hullámok egészen elborították a szárazföldre kihúzott hadihajókat... Számos hajó szétroncsolódott... Nem csoda, hogy a hadsereg körében nagy fe-

jeltenség lett úrrá: más hajók, amiken visszautazhattak volna, [ti. Galliába] nem álltak rendelkezésükre.” (Cesar, 1964)

Sok évszázaddal később, 1588 nyarán II. Fülöp spanyol király Nagy Armadájának vereségében is szerepet játszott az árapály, nevezetesen az, hogy az országot védő angolok jól, a támadó spanyolok pedig alig ismerték az Atlanti-óceán és különösen a La Manche-csatorna árapályviszonyait. A bajok már az induláskor kezdődtek, amikor a *Medina Sidonia* herceg parancsnoksága alatt álló flotta az árapályáramlások miatt két napig nem tudott kifutni a Tejo torkolatából. Amikor a spanyolok már Angliához értek, a Plymouth-fokon éppen tekepartiban részt vevő *Francis Drake* az ellenséges flottát megpillantva állítólag azt mondta, hogy „bőven van még időnk befejezni a játszmát, a spanyolokat utána is megverhetjük”. Valóban volt bőven idejük az angoloknak. Késő délután lehetett, teljes volt az apály, és a hajókat ilyenkor a kikötői sekély víz nem engedte kifutni a tengerre. És ezt követően, a kezdődő dagály ellenében sem volt erre mód. A dagály és az apály később is fontos meghatározó eleme maradt mindkét flotta mozgási lehetőségeinek. A Nagy Armada vereségével végződő gravelines-i csata alatt spanyol feljegyzések szerint az apály, majd később a dagály egyes hajókat öt mérföldre is elsodort keletre vagy nyugatra.

A második világháború során, 1940-ben Franciaország legyőzése után a németek a Seelöve-tervet dolgozták ki Nagy-Britannia lerohanására. A terv a német flotta és légiereő együttes támadására épült. Azonban a német flotta parancsnoka, *Erich J. A. Raeder* nagyadmirális attól tartott, hogy a német nem tud megfelelően ellenállni a brit flottának, de a csatornában uralkodó „ármányos” árapályviszonyok is aggasztották. Így csak a Hermann Göring parancsnoksága alatt álló légiereő lendült támadásba, és szenvedett vereséget az angoloktól.

A normandiai partraszállást is befolyásolták az árapályviszonyok. A szövetséges expedíciós erők főparancsnoksága a meteorológusokkal és a tengerészeti szakemberekkel történt egyeztetés után arra a következtetésre jutott, hogy a partraszállás feltételeit biztosító dagályra 1944. június 5–7. között vagy több mint három héttel később, június 27–29. között lehet számítani. A magas dagályra több okból is szüksége volt a szövetségeseknek. Egyrészt, a dagály idején a partra szálló katonák a német állásokhoz közelebb értek partot, másrészt, a németek által kihelyezett akadályok felett át tudtak haladni a partra szállító hajók (3. ábra). A német parancsnokság is a nagy árapályával jellemezhető napokat tartotta a szövetségesek partraszállása valószínű időpontjának. Hogy a part megközelítését nehezítsék, az általuk veszélyeztetettnek tartott partszakaszokra olyan akadályokat telepítettek, amelyeket a dagály ekkor éppen csak ellep, és így azok megrongálják a felettük elhaladó hajókat.

Az akadályok jelentette veszélyt a másik fél felismerte. *Bernard Montgomery* brit tábornagy emlékirataiban írja: „Az idő tájt, június 1. körül [ti. 1944. június 1. körül, V. P.] aggódva tanulmányoztuk az időjárás-előrejelzéseket. Június ele-

jén csak négy nap volt alkalmas az Overlordra.” A németek által a tengerpartra telepített műszaki akadályokkal apály idején kellett megbirkózni, amikor nem voltak víz alatt. Az ezt követően érkező, első partra szálló egységeknek viszont háromórás dagályra volt szükségük, hogy ne sártengeren keresztülgázolva kelljen partot érniük. A fentiek alapján a rohamra legkedvezőbb időpontok június 4-én 5:30, 5-én 6:10, 6-án 6:35, 7-én 7:15 voltak. Természetesen a szövetséges parancsnokságnak más szempontokat is figyelembe kellett vennie. Ahhoz, hogy a haditengerészet és a légierő bombázó tevékenysége érvényesülni tudjon, már legalább a hajnali szürkület világosságára volt szükség. Ezt is figyelembe véve a választás előbb június 5-re, végül június 6-ra esett.



3. ábra. Rommel, a német csapatok parancsnoka megszemléli a tengerpartra telepített akadályokat (Bundesarchiv Bild 1011-719-0243-33/Jesse/CC-BY-SA 3.0)

Az árapály szerepet kapott az 1950–1953 között vívott koreai háborúban is. Ennek első szakaszában az Egyesült Államok ENSZ-haderők keretén belül harcoló egységei a kelet-koreai Inshon városánál hajtottak végre partraszállást. Ott rendkívül magas a dagály és az apály közti szintkülönbség (kb. 10 m). Csak két elképzelhető dátum adódott 1950 őszén a partraszállás végrehajtására: szeptember 15–17. vagy október 11. Ekkor volt csak háromórás lehetőség arra, hogy a nagy csapatszállító hajók a part közelébe juthassanak az egyébként mocsaras partsza-

kaszon. A partraszálló erőknek ennyi időt engedélyezett az árapály. A sikeresen végrehajtott akció lehetővé tette az ENSZ-erők előretörését északi irányba a kínai–koreai határ térségébe.

AZ ÁRAPÁLY MINT MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁS

A tengeri árapály energiájának felhasználására a 11. században történt először kísérlet. Az első árapály hajtotta malom a velencei lagúnában létesült 1044-ben, majd valamivel később Dover kikötőjében épült hasonló (1066–1086). A következő században több ilyen malom létesült a La Manche-csatorna mindkét oldalán, valamint Cornwallban. A 13. és a 16. század között összesen huszonöt malomról van megbízható adat. Németországban az első árapály hajtotta malom 1220-ban létesült. 1326-ban készült el a kelet-angliai St. Albans apátság híres órája, amely az idő mellett az égitestek mozgását és az árapály pillanatnyi helyzetét is mutatta.

A tengeri árapály energiájának első modern felhasználása Franciaországban történt, ahol 1966-ban La Roche városánál a La Manche partján üzembe helyezték a világ első árapályerőművét. Az 500 MW teljesítményű erőmű építési költsége húsz év alatt térült meg. Azóta mintegy húsz ilyen erőmű létesült a világ legkülönbözőbb részein. Közülük a legnagyobb, a Dél-Koreában 2009-ben átadott, 1320 MW teljesítményű. Összehasonlításként: a Paksi Atomerőmű kimenő teljesítménye a 2010-es évek közepén 2000 MW volt. Az erőművek egy tengeröblöt vagy tölcserörtorkolatot keresztező gátak, amelyekbe két irányban működni képes turbinákat szerelnek be. Összevetve a többi tiszta energiafajtával (szél- és napenergia), az árapály-energia előnye, hogy időbeli lefolyása kiszámíthatóbb és egyenletes, folyamatos üzemelést biztosít. Hátránya a magas építési költség és az, hogy a gát és a beleépített turbinák károsítják a környezet élővilágát.

IRODALOM

- Cesar, J (1964): *A gall háború*. (ford. Boronkay I.) Budapest: Európa
- Cholnoky J. (1932): *A Föld megismerésének története*. Budapest: Singer és Wolfner Irodalmi Intézet
- Galilei, G. (1983): *Párbeszéd a két legnagyobb világregszerről, a ptolemaiosziról és a kopernikusziról*. (bevezető és jegyzetek: Bréda F., ford. M. Zemplén J.) Bukarest: Kriterion Könyvkiadó
- Koestler, A. (1996): *Alvajárók*. (ford. Makovecz B.) Budapest: Európa Kiadó
- Love, A. E. H. (1909): The Yielding of the Earth to Disturbing Forces. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*. 82, 551, 73–88. DOI: 10.1098/rspa.1909.0008, <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1909.0008>

- Melchior, P. (1983): *The Tides of the Planet Earth*. Pergamon Press
- Michelson, A. A. – Gale, H. G. (1919): The Rigidity of the Earth. *Astrophysical Journal*, 50, 330–345.
- Mologyenszkij, M. Sz. – Молоденский, М. С. – Крамер, М. В. (1961): Земные приливы и нутация земли. Москва: Академии наук СССР; angol hivatkozásokban: Molodensky, M S. – Kramer, M. V. (1961): Earth Tides and the Nutation of the Earth. Moscow: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR
- Prothero, Jr., W. A. – Goodkind, J. M. (1968): A Superconducting Gravimeter. *Review of Scientific Instruments*, 39, 9, 1257–1262. DOI: 10.1063/1.1683645, https://www.researchgate.net/publication/224490308_A_Superconducting_Gravimeter
- Strabón (1977): *Geógraphika*. (ford. Földy J.) Budapest: Gondolat Kiadó