fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXXVIII. évfolyam 1. szám 1988. január

AZ EÖTVÖS-FÉLE "SARKI TASZÍTÓERŐ A WEGENERI KONTINENSVÁNDORLÁSI ELMÉLET TÜKRÉBEN

HORVÁTH GÁBOR
ELTE, Alacsony Hőmérsékletű Fizikai Tanszék

különlenyomat

31 – 35

HU ISSN 0015 – 3257

AZ EÖTVÖS-FÉLE "SARKI TASZÍTÓERŐ" A WEGENERI KONTINENSVÁNDORLÁSI ELMÉLET TÜKRÉBEN

Horváth Gábor
ELTE, Alacsony hőmérsékletű
Fizikai Tanszék

Bevezetés

Eötvös Loránd neve napjaink fizikájában újra divatba jött. Gravitációs mérései a legújabb elméleti fizikai kutatások alapján, az ún. "ötödik erő" kapcsán megint reflektorfénybe kerültek [1, 2, 3]. Mindez az eötvösi életmű mélységeit bizonyítja. Eötvös munkássága éppúgy alapvető az általános relativitáselmélet alapfeltevésének kísérleti alátámasztásában, mint a Föld alakjának meghatározásában; s az "ötödik erő" körül forrongó viták és az azok közben felbukkanó Eötvös-citátumok mutatják, hogy Eötvös Lorándnak még a mai fizikus nemzedék számára is van mondanivalója.

Jelenleg nehéz lenne megjósolni, hogy mennyiben igazolják vagy cáfolják ténylegesen az eötvösi gravitációs mérések az ötödik kölcsönhatás elméletét. Lehet, hogy a tervezett, sokkal pontosabb s az "ötödik erő" létének bizonyítására vagy elvetésére kiélezett gravitációs kísérletek eredményei tudománytörténeti kuriózummá változtatják a ma egyelőre még egyedüli forrásként emlegetett idevonatkozó eötvösi eredményeket. Sokan vitatják, valóban helyes-e az Eötvöstől és munkatársaitól származó adatok Fischbach-féle interpretációja az "ötödik erő" kapcsán. Ha azonban igazolódna ezen újabb típusú kölcsönhatás léte, akkor Eötvös idevonatkozó eredményei roppant nagy jelentőségre tennének szert még a nagyfokú bizonytalanság ellenére is.

Az eötvösi életműben volt egy epizód, amely majdnem hasonlóan forradalmi alátámasztását, megerősítését nyújthatta volna egy korszakalkotó földtudományi elméletnek. Az Eötvös-féle "sarki taszítóerőről" van szó, amely, ha mai tudásunk szerint helytelenül is, de a maga korában egyedüli módon megmagyarázhatta volna a wegeneri kontinensvándorlás mozgatóerejét, s ezzel jelentősen elfogadhatóbbá, kevésbé támadhatóvá tehette volna Alfred Wegener híres elméletét.

A szóban forgó eötvösi eredmények hasonló tudománytörténeti szerepe miatt elevenítjük fel jelen cikkben az Eötvös-féle "sarki taszítóerőt", s vizsgáljuk meg potenciális hatását kora földtudományi elméleteire. Tesszük ezt az előzőekben megindokolt aktualitáson túlmenően azért is, mert Eötvös ilyenirányú munkássága kevésbé közismert.

1. A Wegener-féle "Westdrift", mint a kontinensek szétsodródásának mozgatórugója

Alfred Wegener, mikor elegendő bizonyítékot vélt kezében kontinensvándorlási elméletéhez, 1912 elején a Frankfurt am Main-i Geológiai Kongresszuson kifejtette nézeteit "A világrészek keletkezéséről" [4]. Az új elméletet igen mereven, elutasítóan fogadták a földtudományi szakkörök. Ebben szerepet játszott az is, hogy Wegener meteorológus, s nem geológus volt, így egy ideig a szakmai féltékenység volt a meghatározó tényező az elmélettel kapcsolatban. Wegener végül úgy is halt meg, hogy nem mondhatta elméletét elismertnek.

Wegener egyik legnagyobb, megoldatlan problémája volt, hogy a kontinensek vándorlását, "szétúszását" nem tudta semmilyen természeti erőhöz sem kötni. Erről az oldalról érték a legsúlyosabb támadások. Wegenernek tehát szüksége lett volna egy olyan mechanizmusra, mely a kontinensek sódródását eredményezi, magyarázza.

Wegener még úgy képzelte el elméletében a kontinensvándorlást, mintha a kontinensek valamely

sűrűbb anyag felszínén úsznának. Ezt a sűrűbb anyagot a mélyben gondolta. Ma már tudjuk, hogy nem egészen így történik a sódródás, hanem a kontinensek az óceánokkal, a litoszféralemezekkel mozognak együtt az asztenoszférikus mélyáramlások következményeként.

Eötvös Loránd Wegenertől függetlenül, a wegeneri elmélethez hasonló meggondolásokkal feltételezte a kontinentális tömbök nagyarányú elmozdulásainak lehetőségét, s elméletileg kimutatta, hogy bizonyos körülmények között a kontinenseknek a sarkok felől az egyenlítő irányába kell elmozdulniuk. Eötvös erre az elméletére az 1912-es földmérésügyi kongresszuson tért vissza, mikor is rámutatott arra, hogy egy ideális kontinensnek a magasabb földrajzi szélességek felől az egyenlítő irányába kellene mozognia [5].

Ez 1913-ban annál is érdekfeszítőbb megállapítás, mivel Wegenernek éppen ekkor nagy szüksége volt egy olyan elméletre, mely magyarázni képes a kontinensvándorlás okát. Wegener ennek ellenére nem használta fel a Köppen által "sarki taszítóerőnek" nevezett mechanizmust [8] (ennek okát felderíteni a tudománytörténészek feladata). Ő egy másik erőt tételezett fel, melynek hatására a kontinensek nyugat felé sodródnak. Wegener ezt az erőt, ill. az e hatására bekövetkező nyugati irányba való sodródást "Westdrift"-nek nevezte el. Később rámutatunk, mennyire szoros a kapcsolat az eötvösi "sarki taszítóerő" és a wegeneri "Westdrift" között.

Eötvös maga ezt írta az általa felfedezett erőről [6]: "A függővonal a meridiánsíkban egy oly görbe vonal, amelyik homorú oldalát a pólus felé fordítja. Az úszó test súlypontja magasabban van, mint a kiszorított folyadéktömeg súlypontja. Ebből következik, hogy az úszó test két olyan, különböző irányba ható erő hatásának van alávetve, amelyek eredője a pólustól az egyenlítő felé mutat. A kontinenseknél tehát egy hajlamosságnak kellene mutatkoznia arra, hogy azok az egyenlítő felé mozogjanak, amely mozgás azután a szélességnek egy olyan szekuláris változását idézné elő, mint amilyet a pulkovói Csillagvizsgáló Intézetre vonatkozóan gyanítanak."

M. Milanković számításai szerint a súlyegységre jutó sarki taszítóerő maximális értéke [7]:

$$S_{max} = \frac{z_o}{R} \cdot \frac{g_p - g_e}{g_p + g_e}, \qquad (1)$$

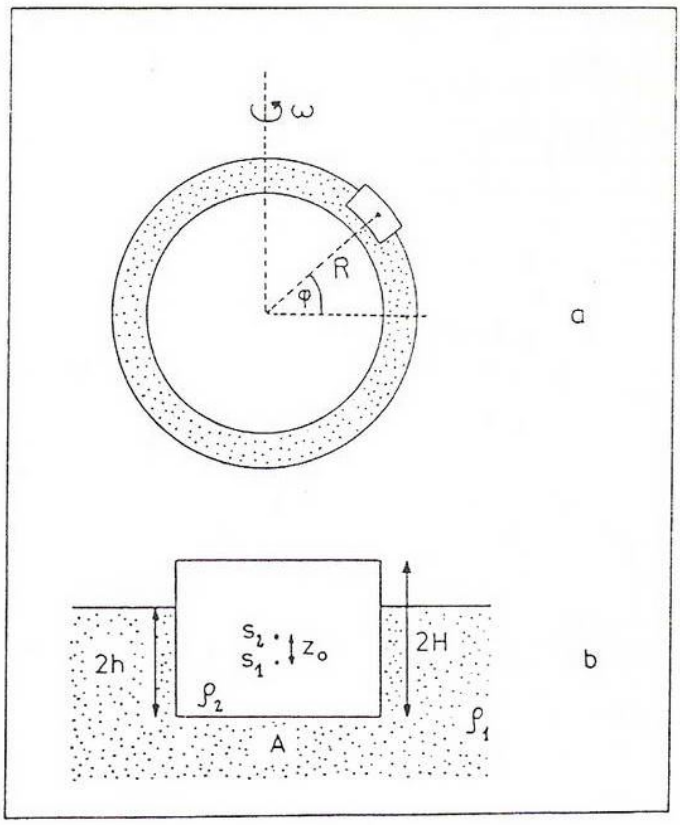
ahol z_o a kontinentális tábla súlypontjának függőleges távolsága a kontinens által kiszorított földköpenyanyag súlypontjától, g_e, ill. g_p az egyenlítőn, ill. a pólusokon a gravitációs gyorsulás, R a Föld sugara. Milanković szerint [7]:

$$z_o = 2{,}5 \text{ km},$$
$$R = 6371 \text{ km},$$
$$g_e = 9{,}78046 \text{ ms}^{-2},$$
$$g_p = 9{,}83232 \text{ ms}^{-2}.$$

Így (1) szerint $S_{max} = 1/241000$, azaz a sarki taszítóerő a nehézségi erőhöz képest rendkívül kicsi. A továbbiakban meghatározzuk a sarki taszítóerő kifejezését, s a kapott kifejezés alapján következtetéseket vonunk le arra vonatkozólag, hogy eredményezheti-e ezen erő a kontinensek szétsodródását valamint a hegységek gyűrődéses keletkezését. Rámutatunk ezen túlmenően arra is, hogy miként következik az eötvösi sarki taszítóerőből a wegeneri Westdrift.

2. *Az Eötvös-féle sarki taszítóerő*

Tételezzünk fel egy olyan bolygómodellt, melynek külső részét valamilyen ρ_1 sűrűségű folyékony (legalábbis a lassú folyamatok szempontjából folyadékként viselkedő) anyag alkotja. Ebben a folyadékszerű burokban ússzon egy ρ_2 ($<\rho_1$) sűrűségű, a bolygó méretéhez képest nem túl nagy kiterjedésű szilárd, hasáb alakú anyagdarab (kontinentális tömb modellje) az 1/a ábra szerinti módon.



1. ábra a) Gömb alakú, ω szögsebességgel forgó bolygómodell (felszínén ρ_1 sűrűségű folyadékszerű képlékeny burokkal) az Eötvös-féle sarki taszítóerő számításához. A modellkontinens kis kiterjedésű a bolygó méretéhez képest.
b) A modellkontinens izosztatikus egyensúlyban

A bolygó ω szögsebességgel forogjon tengelye körül, a forgás miatti alaktorzulástól eltekintünk ($\omega \ll 1$). Vizsgáljuk a kontinensmodellre a felszínnel párhuzamosan ható erőket a bolygóhoz rögzített koordinátarendszerben. A kontinentális tömbre ható

eredő erő a felszínnel párhuzamosan nyilván a centrifugális erő felszíni komponensének és a folyadék által kifejtett erőnek a különbsége lesz. Előbbi az egyenlítő felé, utóbbi a pólus irányába mutat. A környező folyadék kifejtette erő egyenlő a kiszorított folyadékra ható centrifugális erő felszínnel párhuzamos komponensével. Így a sarki taszítóerő:

$$F = m \cdot (a_c - a_c') \sin \phi, \qquad (2)$$

ahol

$$m = 2AH\,\rho_2 = 2\,Ah\,\rho_1 \qquad (3)$$

a kontinens tömege (lásd az 1/b ábrát), ϕ a súlypontjának földrajzi szélessége, a_c a rá ható a_c' pedig a kiszorított folyadékra ható centrifugális gyorsulás. A kontinens függőleges irányban egyensúlyban van (izosztázia), ezt fejezi ki (3). A kontinens s_2 súlypontjában a centrifugális gyorsulás

$$a_c = (R - h + z_o)\,\omega^2 \cdot \cos \phi. \qquad (4)$$

A kiszorított folyadéktömeg s_1 tömegközéppontjában a centrifugális gyorsulás

$$a_c' = (R - h)\,\omega^2 \cdot \cos \phi. \qquad (5)$$

(2), (4) és (5) felhasználásával:

$$F = \frac{1}{2} m\,\omega^2 \cdot z_o \cdot \sin(2\phi). \qquad (6)$$

Modellünk szerint a nehézségi gyorsulás földrajzi szélességtől való függése

$$g(\phi) = g_p - (g_p - g_e) \cdot \cos^2 \phi. \qquad (7)$$

Így a súlyegységre eső sarki taszítóerő

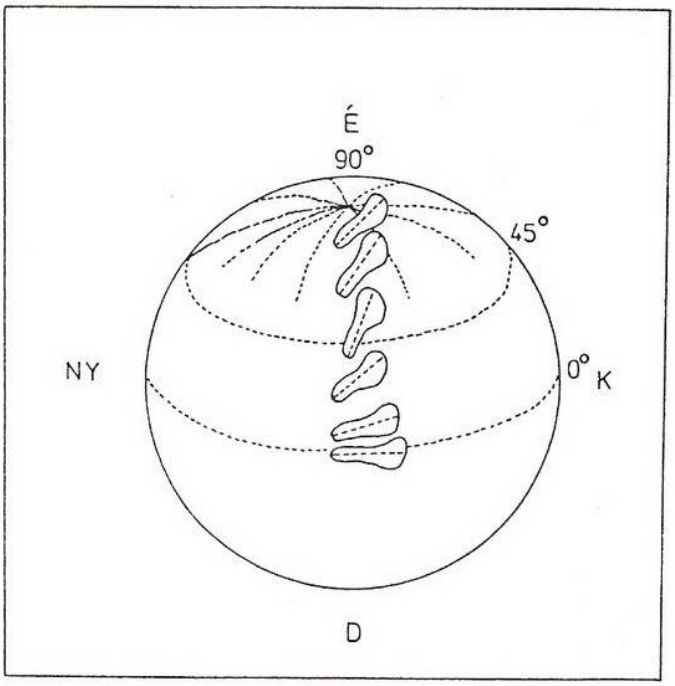
$$S(\phi) = \frac{F}{mg(\phi)} = \frac{z_o \cdot (g_p - g_e)}{2R} \cdot \frac{\sin(2\phi)}{g_p - (g_p - g_e) \cdot \cos^2 \phi}. \qquad (8)$$

$S(\phi)$-nek a $0 \leqslant \phi \leqslant \pi/2$ tartományban maximuma van a

$$\phi^* = \arccos \sqrt{\frac{g_p}{g_p + g_e}} \qquad (9)$$

helyen. Ha $g_p \approx g_e$ közelítéssel élünk, akkor $\phi^* \approx \pi/4$, s ekkor $S_{max} \approx \frac{z_o}{R} \cdot \frac{g_p - g_e}{g_p + g_e}$, azaz visszakapjuk a Milanković-féle eredményt. Arra jutottunk tehát, hogy a sarki taszítóerőnek maximuma van $\phi = \pi/4$-nél, mert $\sin(2\phi)$-vel arányos, az egyenlítőn és a pólusokon zérussá válik; s mindig az egyenlítő irányába mutat. Utóbbiból következik, hogy modellkontinensünk a sarkokon labilis, az egyenlítőn pedig stabil egyensúlyi helyzetben van.

Eddig feltételeztük, hogy kontinensmodellünk kis terjedésű a bolygó méretéhez képest. Ha most figyelembe vesszük kiterjedését is, akkor egy elnyúlt, hosszúkás kontinens esetében érdekes eredményre juthatunk: amint a sarki taszítóerő hatására egy hosszúkás kontinens lassan az egyenlítő felé sodródik hossztengelyének iránya állandóan változik. Mivel a sarki taszítőerőnek $\pi/4$-nél van maximuma, ezért $\pi/2 \leqslant \phi \leqslant \pi/4$ földrajzi szélességtartományban a kontinens tengelye É–D-i irányba tendál, mivel a nagyobb földrajzi szélességű részeire kisebb taszítóerő hat, mint a kisebb földrajzi szélességeken levőkre, így egy olyan forgatónyomaték lép fel, mely a kontinenst az említett irányba forgatja be. A $0 \leqslant \phi \leqslant \pi/4$ szögtartományban a helyzet éppen fordított. Ekkor az elnyúlt kontinensre oly eredő forgatónyomaték hat, amely azt K–Ny-i irányba igyekszik beállítani (lásd a 2. ábrát).



2. ábra Az eötvösi sarki taszítóerő hatására egy a pólusról az egyenlítő felé sodródó elnyúlt modellkontinens hossztengelye a fellépő eredő forgatónyomaték miatt így áll be

3. Amit az Eötvös-féle sarki taszítóerő magyarázhatott volna

Helyezzük az eötvösi sarki taszítóerőt a valóságba, s vizsgáljuk meg, hogy egy wegenerista geofizikus mit tudott volna megmagyarázni felhasználásával (gondolatmenetünk során felhasználunk olyan adatokat is, amelyeket egy korabeli tudós nem ismerhetett).

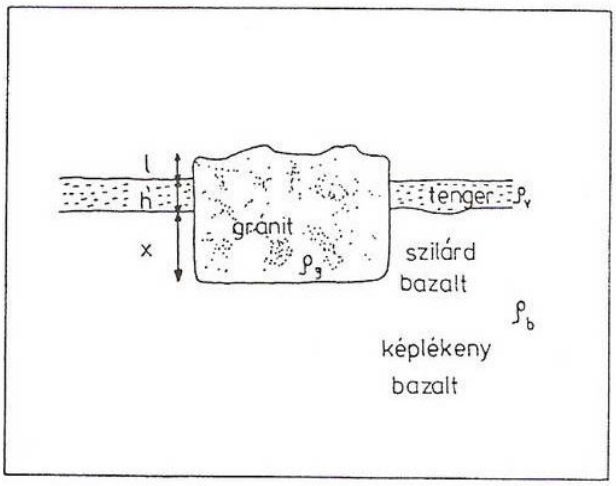
Mai tudásunk szerint a kontinensek tengerszint feletti átlagos magassága 1 km, a tengerek átlagos mélysége 4 km, s a kontinensek túlnyomó részét (legalábbis a felső rétegben) szinte kizárólag gránit al-

kotja. Az izosztázia-elmélet értelmében a kontinensek, az egyes rögök, hegységek az Archimedes-törvénynek engedelmeskedve viselkednek a nagyobb sűrűségű, képlékeny, viszkózus bazaltban "úszva". Az izosztázia-elmélet szerint a 3. ábra alapján kontinensmodellünkre felírható Archimedes törvénye:

$$(x + h' + l) \cdot \rho_g = x\,\rho_b + h' \cdot \rho_v, \qquad (10)$$

ahol a ρ_g, ill. ρ_b a gránit, ill. a bazalt, ρ_v pedig a (tenger) víz sűrűsége, x a kontinens magasságának tengerszint feletti átlagos magassága. (3) és (10) alapján felírhatjuk kontinensmodellünkre a (6) szerinti sarki taszítóerő részletesebb kifejezését:

$$F = \frac{1}{2}\omega^2 \cdot \sin(2\phi) \cdot A(x+h'+l)\rho_g \left[\frac{h'+l}{2} - \frac{h' \cdot (x+h') \cdot \rho_v}{2(h' \cdot \rho_v + x \cdot \rho_b)} \right] \qquad (11)$$



3. ábra A sarki taszítóerő részletesebb számításához

Vegyünk egy kis kiterjedésű kontinenst, s vizsgáljuk mozgását az idő függvényében: Kontinensmodellünk az egyenlítő irányába fog mozogni lassan úgy, hogy közben a rá ható sarki taszítóerő egyensúlyt tart a bazaltbeli súrlódási közegellenállási erővel. Utóbbit a kis sodródási sebesség miatt a sebességgel arányosnak tételezzük fel:

$$F_s = kqv\eta = F = Ac \cdot \sin(2\phi), \qquad (12)$$

ahol q a kontinensmodell bazaltbeli homlokfelülete, k az áramlástani alaki tényezője, η pedig a viszkozitási együtthatóval kapcsolatos paraméter. (12)-ből a kontinensmodell sebessége a földrajzi szélesség függvényében:

$$v(\phi) = \frac{Ac \cdot \sin(2\phi)}{kq\eta} = -R\,\frac{d\phi}{dt}, \qquad (13)$$

ahol a c paramétert (11)-ből leolvashatjuk. Integrálva (13)-at megkapjuk a sodródó kontinensmodellünk földrajzi szélességét az idő függvényében:

$$\mathrm{tg}\phi(t) = \mathrm{tg}\phi_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = \frac{Rkq\eta}{2cA}, \qquad (14)$$

ahol ϕ_0 a kontinens kezdeti földrajzi szélessége. A (14)-beli τ az a karakterisztikus idő, amely alatt a kontinensmodell megközelíti az egyenlítőt.

Ezek után határozzuk meg a sarki taszítóerő munkavégző képességét, ami fontos szerepet játszik az esetleges egymásra torlódó kontinensek gyűrődéses hegységképzésében: A sarki taszítóerő kontinensmodellünkön végzett munkája amíg a kontinens a pólustól az egyenlítőre sodródik:

$$W = -AcR \int_{\pi/2}^{0} \sin(2\phi)\,d\phi = cRA. \qquad (15)$$

Tekintsünk el egyelőre attól, hogy a (15) szerinti munka súrlódási disszipációs hővé alakul, s tételezzük fel, hogy teljes egészében hegység felgyűrésre fordítódik. A Föld legnagyobb hegységrendszere a Himalája, Tibet, melynek területe $\sim 10^{13}$ m^2, átlagos magassága $\sim 4.5 \cdot 10^3$ m a tengerszinthez viszonyítva. Ezen hegységrendszer potenciális energiája $E \approx 3 \cdot 10^{24}$ Nm. Ahhoz, hogy meghatározhassuk, mekkora felületű kontinens lenne képes ekkora hegységrendszert felgyűrni modellünkben, meg kell adnunk az eddig nem részletezett paraméterek numerikus értékeit. A Földre vonatkozó adatok a következők:

$$\rho_g = 2{,}65 \cdot 10^3\ \mathrm{kgm^{-3}}, \quad \rho_b = 3{,}00 \cdot 10^3\ \mathrm{kgm^{-3}},$$
$$\rho_v = 1{,}00 \cdot 10^3\ \mathrm{kgm^{-3}},$$
$$l = 10^3\ \mathrm{m}, \quad h' = 4 \cdot 10^3\mathrm{m},$$
$$x = 26 \cdot 10^3\ \mathrm{m}, \quad R = 6{,}371 \cdot 10^6\ \mathrm{m},$$
$$\omega = 7{,}269 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{s^{-1}}.$$

Ezen numerikus adatok felhasználásával, (15) alapján azt kapjuk, hogy $\sim 10 \cdot 10^{14}$ m^2 felületűnek kell lennie azon kontinensmodellnek, mely a pólustól az egyenlítőig sodródva a sarki taszítóerő hatására egy Himalája nagyságrendű hegységrendszert gyűr fel abban az esetben, mikor eltekintünk modellkontinensünk bazaltsúrlódásától. Tájékoztató adatként közöljük, hogy egy átalgos kontinens területe $\sim 10^{14}$ m^2.

Nyilvánvalóak ezen modell hiányosságai a hegységképzést illetően. Egyrészt túl nagy területű kontinenseknek kellene torlódni egymáson (a súrlódási veszteség miatt az előbb kiszámolt területnél jóval nagyobbra lenne tényelegesen szükség), másrészt túl nagy utat kellene megtenniük a kontinenseknek a hegységképzéshez (ezt az utat még csak növeli, hogy modellünk szerint a többi kontinens is sodródik, ezért jóval kevesebb energia fordítódhat hegység-felgyűrésre, mintha egy rögzült kontinensnek torlódna egy mozgó). Éppen ezért arra a következtetésre jutunk, hogy a sarki taszítóerő túlon túl kicsi ahhoz, hogy vele magyarázhatnánk a gyűrődéses hegységképződést. (A sarki taszítóerőt mi csak kis kiterjedésű

modellkontinensre vezettük le, legutóbb pedig nagy kiterjedésű kontinensre alkalmaztuk a munkavégzés számításakor. Éppen ezért legfeljebb csak becslésnek tekinthetők a kihozott eredmények.)

A (13) kifejezés szerint az egyenlítő felé való sodródási sebesség A/q-val arányos, így a nagyobb kontinensek gyorsabban sodródnak el a sarkoktól, mint a kisebbek, ami É—D irányban differenciálódáshoz vezet. A 2m ($v \times \omega$) nagyságú Coriolis-erő viszont mindkét féltekén egy nyugati irányú driftet is eredményez. Mivel $F_{Coriolis} \sim m \cdot v(\phi) \sim A^2/q$, ezért a nagyobb kontinensek nagyobb sebességgel sodródnak nyugatra, mint a kisebbek, tehát nyugati irányban is fellép a kontinensek egymástól való szeparációja nagyságuktól függően.

Összességében a következőt mondhatjuk: Az Eötvös-féle sarki taszítóerővel és az általa keltett Coriolis-erővel jól magyarázható a kontinentális táblák vándorlása, az őskontinens szétsodródása mind É—D-i, mind pedig K—Ny-i irányban; ugyanakkor a gyűrődéses hegységkeletkezési mechanizmus hajtóereje már nem.

Érthetetlen, hogy Wegener miért nem használta fel elméletéhez az azzal egyidőben jelentkező eötvösi sarki taszítóerőt, hiszen nagy szükség lett volna rá. Látható ezek után, hogy az eötvösi sarki taszítóerővel kapcsolatos elmélet a kor színvonalán méltó alkotója lehetett volna a wegeneri kontinensvándorlási elméletnek, hiszen Eötvös is Wegenerhez hasonlóan a kontinensvándorlás "úszó jégtábla"-modellje mellett tört pálcát. Bizonyosan kedvezőbb lehetett volna a wegeneri elmélet fogadtatása, ha beépíti az eötvösi gondolatokat abba.

Ma már tudjuk, hogy az Eötvös-féle sarki taszítóerőnek csak tudománytörténeti jelentősége van, hiszen a kontinensek nem magukban, hanem a litoszféra tagjaként mozognak a sarki taszítóerőnél jóval hatékonyabb és erősebb mozgatóerőt biztosító asztenoszférikus mélyáramlások hatására. A litoszféralemezek teljesen lefedik a Föld felszínét, így különálló kontinentális tábla egyenlítő felé való sodródása önmagában lehetetlen. Az eötvösi elméletnek manapság a földtudományokban nincs jelentősége, de ez nem von le semmit korábbi nagyszerűségéből. Szép próbálkozás volt a táblatektonikai elmélet mozgatórugójának korai magyarázatai között.

IRODALOM

[1] E. Fischbach, D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, S. H. Aronson: Phys. Rev. Lett, *56*, 3 (1986)

[2] Király Péter: Új fejlemények az Eötvös-kísérlet körül, Fizikai Szemle, *36*, 365 (1986)

[3] Vecsernyés Péter: Megjegyzések az "ötödik erő"-ről, Fizikai Szemle, *37*, 71 (1987)

[4] A. Wegener: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, Braunschweig, 1915

[5] R. v. Eötvös: Verh. d. 17. Allg. Konf. d. Intern. Erdmessung, I. Teil, 1913

[6] Rédey, I.: A sarki taszítóerő, Geodéziai Közlöny, *18.* évf., 4. füzet, 160. o. (1942)

[7] M. Milankovitch: Säkulare Polverlagerungen, Berlin, 1933

[8] W. Köppen: Ursachen und Wirkungen der Kontinentenverschiebungen und Polwanderungen, Peterm Mitt. 1921