

A Coriolis-erő hatása folyókra és a Baer-törvény. Történeti áttekintés

BALLA ZOLTÁN

Magyar Állami Földtani Intézet, 1143 Budapest, Stefánia út 14., balla@mafi.hu



Tárgyszavak: Baer-törvény, Coriolis-erő, eltérítő hatás, földforgás, folyóaszimmetria, folyóvándorlás, partalámosás, tudomány-történet

Összefoglalás

A Coriolis-erő a Föld tengely körüli forgásának hatására lép fel, és a Föld felszínén tehetetlenségi mozgást végző tárgyakat az északi félgömbön jobbra, a délin balra téríti el. A Baer-törvény azt mondja, hogy a Föld tengely körüli forgása a délkör menti folyókat az északi félgömbön jobbra, a délin balra téríti el, s szélességi kör mentén ez a hatás nem érvényesül. A kettő rokonsága a közös okban (földforgás) és okozatban (eltérítési irány), különbsége a tehetetlenségi mozgás irányának megítélésében van: Baer szerint ez az irány meghatározó jelentőségű (az eltérítés délkör mentén maximális, szélességi kör mentén nulla), a Coriolis-erőből következően azonban az iránynak nincs jelentősége.

A nyilvánvaló rokonság következtében a mozgásiránnyal kapcsolatos alapvető eltérést gyakran figyelmen kívül hagyták, és a kettőt egy évszázadon át sokan azonosnak vélték. Ezért elemeztük a Baer-törvény keletkezését és a kérdéssel kapcsolatban kb. ugyanakkor lefolytatott vitát, és a következőket állapítottuk meg:

1. A párizsi akadémián 1859-ben lefolytatott vitában nyilvánvalóvá vált, hogy a fizika és a matematika szempontjából a Baer-törvény hibásan tételezi fel azt, hogy az eltérítés függ a mozgásiránytól.

2. Baer a törvényét Európa számára ismertté tevő cikkének első részében fogalmazta meg és indokolta, míg a párizsi vita hatására a harmadik részben jelentősen módosította, nem tagadva immáron a szélességi kör menti mozgások eltérítését, csupán úgy véelve, hogy az eltérítés erősebb a délkörök menti mozgásnál.

A Baer-törvényre hivatkozni a továbbiakban tehát kezdettől fogva anakronizmus volt.

A földforgás folyókra gyakorolt hatását illetően a vélemények rendkívül megoszlanak, a teljes egyetértéstől a teljes elvetésig. Ezért megvizsgáltuk azt a tényanyagot, amelyet bizonyításra és cáfolásra használnak. Azt találtuk, hogy – elsősorban orosz kutatók munkája nyomán – a folyók aszimmetriája igen nagy területen a Coriolis-erő hatását bizonyítja, míg az ellenvetések lényegileg két irányban vetődtek fel. Egyrészt matematikai számításokkal az eltérítő erő abszolút értékére igen kis számokat kaptak, másrészt a tényleges eltérítéseket más módon igyekeztek magyarázni. A bőséges szakirodalom áttekintésével megállapítottuk, hogy mindazok a matematikai számítások, amelyek a Coriolis-erő hatását nem önmagában vizsgálták, hanem valamilyen egyéb hatással vetették össze, azt igazolták, hogy a földforgás hatása nem hanyagolható el. Az alternatív magyarázatokról kimutattuk, hogy azok mindig csak konkrét esetekre lehetnek érvényesek, de a regionális folyóaszimmetria-térképezés adataiból következő globális hatást nem magyarázzák.



Bevezetés

Nyugat-Szibériában, ahol hatalmas folyók (Ob, Jenyiszaj és mellékfolyóik) tartanak É felé, már a XVIII. század utazói felfigyeltek arra, hogy a jobb part rendszeresen magasabb és meredekebb, mint a bal. Szlovcov (SLOVTSOV 1827) elsőként vetette fel a kérdést, hogy ez a jelenség visszavezethető-e a Föld tengely körüli forgására, és úgy vélte, bizonyítékot más folyók tanulmányozásával lehetne szerezni. Műve Európa számára évtizedekig ismeretlen maradt. Oroszországban is nehezen hozzáférhető, ezért az orosz kutatók is főleg BERG (1949, pp. 306–315) munkájára hivatkoznak. Az 1850-es években Baer észtországi születésű, orosz állampolgárságú német kutató hívta fel a figyelmet (Szlovcov munkájának ismeretében) arra, hogy a Föld forgása következtében az É-ra vagy D-re tartó folyók az északi félgömbön jobbra, a délin balra térülnek el. Első tanulmányait (BAER 1856a, b, c¹, 1857, 1858) orosz nyelven írta meg, s azok ugyanúgy kevésbé ismertek, mint Szlovcov munkái. Nézetének fontos eleme volt, hogy az eltérítő hatás a délkör menti folyókat érinti, a szélességi kör mentieket nem.

A Párizsi Tudományos Akadémia 1859. október 31-i ülésén azonban BABINET (1859a) — PERROT (1859) kísérlete² által inspirálva és Foucault felfogására³ támaszkodva — olyan nézetet fejtett ki (a nagy szibériai folyók, a Nílus, továbbá egy sor európai folyó — köztük a Duna — példáján), hogy az eltérítő hatás a folyók irányától független.

Az 1859. november 7-i ülésen BERTRAND (1859a) elmondta, hogy a délkör menti folyók eltérítése még érthető, de a szélességi körök mentieké jóval kevésbé. Emellett matematikai képlet alapján úgy vélte, a hatás túl gyenge ahhoz, hogy folyókat térítsen el. BABINET (1859b) hangsúlyozta, hogy az erő mozgásiránytól független, s azaz védte álláspontját, hogy kiszámított egy konkrét értéket.

Az 1859. november 14-i ülésen BERTRAND (1859b) bővebben ismertette álláspontját, válaszul BABINET (1859c) részletes matematikai levezetést adott a folyókat eltérítő erőre. Ezután DELAUNEY (1859) felhívta a figyelmet arra, hogy az eltérítő erőt Coriolis fogalmazta meg pontosan, megadta a — Babinet-ével azonos — képletet, s csatlakozott Bertrand véleményéhez arról, hogy az erő túl kicsi ahhoz, hogy folyókat térítsen el. Delauney-nek válaszolva BERTRAND (1859c) megjegyezte, hogy nem kíván a Coriolis-erőről vitatkozni. Azt tartja fontosnak, hogy hatása a folyókra elhanyagolhatóan gyenge.

Az 1859. november 21-i ülésen BABINET (1859d) részletesen ismertette Foucault és Perrot kísérleteinek következményeit, s matematikailag levezette, hogy a földforgás hatása független a test mozgásirányától. A négyhetes vitában utolsóként COMBES (1859) nyilvánított véleményét, aki ugyan nem kívánt Coriolis teorémájáról nyilatkozni, de

a folyókat illetően Bertrand és Delaunay álláspontját támogatta.

Így tehát a párizsi vitában Babinet felfogását arról, hogy a földforgás következtében fellépő eltérítő erő a mozgásiránytól független, végül is nem ingatták meg, de azt a véleményét, hogy a földforgás folyókat téríthet el, nem támogatták. Megjegyezzük, hogy Babinet ezzel kapcsolatos érvelését, amely konkrét folyókon végzett konkrét megfigyelésekre alapult, figyelmen kívül hagyták.

A vita résztvevői Baer nevet nem említették (bár feltehetően nem volt számukra idegen), s nem világos, ismerték-e a nézeteit (1864. évi önéletrajzában Baer — BERG 1949, pp. 306–315 szerint — azt írja, hogy igen). Mindenesetre a vitában Bertrand lényegileg Baer nézetét képviselte. Baer a következő évben (BAER 1860) németül foglalta össze orosz nyelvű cikkeinek tartalmát és bővítette ki azt reflexiójával az előző évi párizsi vitára.

Munkája (BAER 1860) három részből állt, amelyek a Szent-Pétervári Császári Tudományos Akadémia Közlönyének ugyanazon kötetében, egymástól elszakítva, de azonos címmel jelentek meg. Az első rész (1–49. hasáb) Baer eredeti felfogását ismertette, a második (218–250. hasáb) a Baer rendelkezésére álló útleírások és térképek alapján Európa, Ázsia, Észak-Afrika, Észak- és Dél-Amerika folyóit tekintette át, kimutatta, hogy szinte mindenütt a jobb part magasabb és meredekebb (az északi félgömbön; a délin a bal). Ez a két rész főleg a korábbi orosz nyelvű publikációk (leginkább BAER 1857 és 1858) szövegéből áll. A harmadik részben (352–382. hasáb) — bevallottan a párizsi vita hatására — Baer elfogadta, hogy az eltérítő erő a szélességi körök mentén is hat, de úgy gondolta, hogy a hatás a délkörök mentén erősebb.

Cikkének címe alapján a továbbiakban (ismereteim szerint elsőként SUESS 1863) eredeti felfogását — amely szerint a K–Ny-i irányú folyók nem térülnek el a földforgás hatására — Baer-törvénynek nevezték. E törvénynek a mozgásirányt illető megszorítását azonban Baer ugyanannak a német nyelvű tanulmányának a harmadik részében lényegileg feladta, amelynek első részében azt kifejtette. Eddig a harmadik részig azonban az olvasók döntő többsége nem jutott el (nem beszélve a csak hivatkozóról), nyilván ezért tárgyalja a „Baer-törvényt” még száz év múltán is eredeti megfogalmazásában pl. TÖRY (1952), SCHMIDT (1957), PÉCSI (1959), BULLA (1964), LOYDA, PODRACKÝ (1979) vagy BRÁZDIL, MÁCA (1982).

A Baer-törvényt a XX. században gyakran vezették vissza a Coriolis-erőre. Ennek a visszavezetésnek két változata volt. Az egyik szerint a Baer-törvény lényegileg ugyanazt eredményezi, mint a Coriolis-erő, vagyis mozgásiránytól független. Ezen az állásponton — amely minden bizonnyal a Baer-törvény nem kellő ismeretén alapult — volt pl. EINSTEIN (1926), QURAIŠHY (1943), MACDONALD (1952), GABRIEL et al. (1957), GERENCŠUK (GERENCHUK 1960), ZEMCOV (ZEMTSOV 1973), MATSCHINSKI (1966) vagy GÁBRIS et al. (1998). A másik felfogást — amely viszont a Coriolis-erő nem kellő értéséről tanúskodik, mert azt mozgásiránytól függőnek véli — vallotta magáénak pl. SCHMIDT (1957), az

¹ Cikk az Asztrahanyiszkie Gubernszkie Vedomosztyi 1856. október 5-i számában, nem sikerült megszerezni. BERG (1949) ismerteti.

² Foucault jól ismert ingája a földforgás eltérítő hatását mutatja

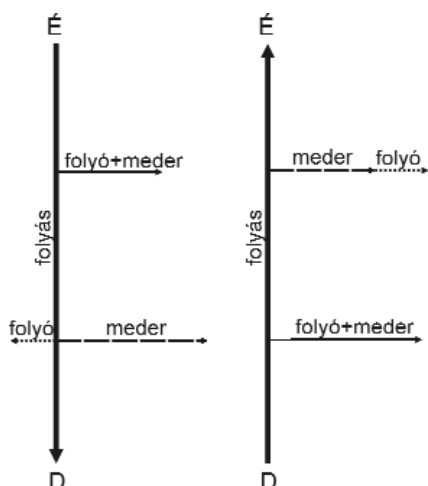
³ Egy nagyméretű kör alakú edényben lévő víz a központi lefolyóhoz tartva jobbra tekeredő spirális mozgással folyik, ami a Föld forgásának újabb bizonyítéka, s egyúttal a földforgás hatását igazolja mozgó folyadékokra

Új Magyar Lexikon (1959: Baer [p. 218] és Coriolis-erő [p. 468]), a Bolshaya Sovetskaya Enciklopediya (1971: Bera zakon [p. 568], 1973: Koriolisza szila [p. 561]), LOYDA, PODRACKÝ (1979) vagy BRÁZDIL, MÁCA (1982).

A BAER (1860) munkája utáni időkből ismereteim szerint MÜÜRSEPP (1996) — a jelek szerint visszhangtalan — tanulmánya az egyetlen, amely feltárta és elemezte a Coriolis-erő (Baer nem így nevezi, csak egyszerűen „képletről” ír) és a tulajdonképeni (eredeti) Baer-törvény közötti különbséget és a kettő viszonyát. E tanulmány szerzője sem említi azonban, hogy a „Baer-törvényt” Baer de facto már 1860-ban feladta, s a történetet egyébként sem teljesen pontosan ismerteti. Egyebek között ez késztetett arra, hogy ezt a cikket megírjam, annál is inkább, mert tapasztalatom szerint a kettőt kollégáim jelentős része is keveri. S ha már egyszer hozzákezek, nem akarok szó nélkül elmenni a Coriolis-erő és a folyók viszonyát illető meglehetősen változatos nézetek mellett sem.

A Coriolis-erő és a Baer-törvény összevetése

A Baer-törvénynek csak szóbeli magyarázatát ismerem, grafikus ábrázolásával nem találkoztam. A Baer-törvény a következő: a közel délkör menti folyóknak az északi félgömbön a jobb, a délin a bal partja magasabb és meredekebb. Ennek az a magyarázata, hogy délkör mentén a folyó különböző kerületi forgássebességű területeket szel át, de a tehetlenség következtében igyekszik megtartani eredeti sebességét. Az északi félgömbön D-ről É felé haladva a kerületi forgássebesség csökken, míg É-ről D felé haladva nő. Az É felé tartó folyó tehát nagyobb, a D felé tartó pedig kisebb sebességét igyekszik megtartani. Mivel a Föld forgása Ny-ról K-re irányul, az É felé tartó folyó ebbe, a D felé tartó pedig ezzel ellentétes irányba, vagyis mindkét esetben jobbra igyekszik

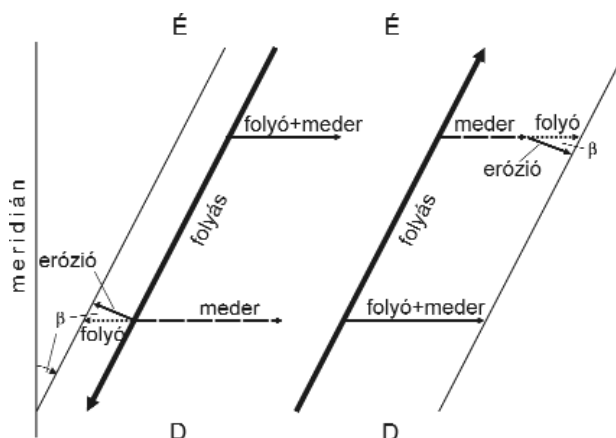


1. ábra. A Baer-törvény délkör menti folyón

Északi félgömb. Mozgásirányok és -sebességek a forgó Földön külső szemlélő számára: meder+folyó = a meder és a folyó együttes mozgásiránya és sebessége a kiindulási pontban, meder = a szilárd földhöz rögzített meder tényleges mozgásiránya és sebessége az új pontban, folyó = a folyóvíz virtuális tehetlenségi mozgásiránya és sebessége az új pont felé irányuló mozgás során

kitérni (1. ábra). Könnyű belátni, hogy a déli félgömbön a kitérés ezzel ellentétes, azaz balra irányul.

Abban az esetben, ha a folyó iránya eltér a délkörtől, az eltérítő hatás — amely a fentiekkel összhangban a folyásirányra merőleges — kisebb lesz (2. ábra). Annál kisebb, minél nagyobb az irányeltérés a délkörtől. Szélességi körön ez a hatás megszűnik.



2. ábra. A Baer-törvény ferde helyzetű folyón

Északi félgömb. erózió = a folyóvíz tehetlenségi mozgásának a part felé irányuló összetevője, β = a folyásirány délkörrel bezárt szöge (azimutja). Magyarázat az 1. ábra alatt

Mindezt rajzok nélkül is annyira egyszerű volt elképzelni és belátni, hogy amikor az ugyancsak a Föld forgásával kapcsolatos Coriolis-erő kérdése egyre gyakrabban merült fel a folyók irányeltéréseivel kapcsolatban, nem kevesen automatikusan kiterjesztették az eltérítés függését a mozgás irányától magára a Coriolis-erőre is (1. följebb). Ez azonban alapvető fizikai tévedés: a Coriolis-erő nem függ a mozgás irányától! Ez világosan következik az erőt a Föld felszínének bármely pontján leíró képletből, amelyben a mozgásirány nem szerepel:

$$F_c = 2m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \text{ és } a_c = 2v \cdot \omega \cdot \sin\varphi ,$$

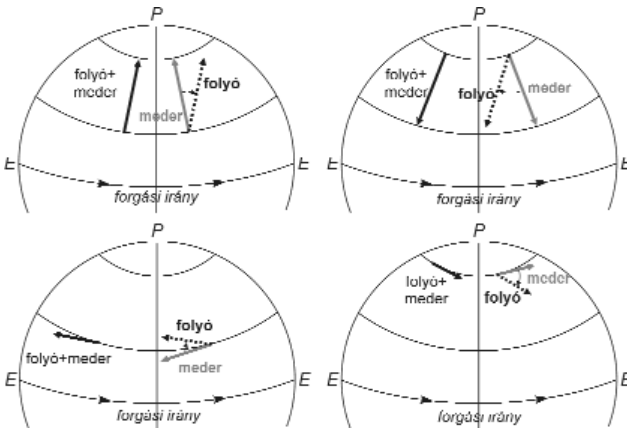
ahol F_c = a Coriolis-erő (adott pontban vízszintes összetevője), a_c = a Coriolis-gyorsulás (adott pontban vízszintes összetevője), m = a mozgó test tömege, v = a mozgó test (vízszintes) lineáris sebessége az adott pontban, ω = a földforgás szögsebessége az adott pontban, φ = az adott pont földrajzi szélessége. Mind a Coriolis-erő, mind a Coriolis-gyorsulás (vízszintes síkban) merőleges a mozgásirányra.

Egy dolog azonban a fizika és a matematika, és egészen más dolog a „józan ész”. A kettő nincs mindig összhangban egymással, de a fizikai törvények „megszokhatók”. Így pl. ma már nemigen jelent problémát, hogy felfogjuk: a Föld forog a Nap körül, és nem fordítva, bár mindennapi tapasztalatunk ennek ellentmondani látszik. Mivel azonban még kisiskolás korunkban különböző módszerekkel meggyőztek arról, hogy ez így van, és nem másképp, bármiféle külön matematikai–csillagászati levezetés nélkül is hiszünk benne.

A Coriolis-erőről mindez nem mondható el. Finoman szólva még nem állt be az a helyzet, hogy hatásában —

különösen a mozgásiránytól való függetlenségében! — ne kételkedjünk. S a fizikusok saját maguk vallják be (pl. PERSSON 2005), hogy valóban nem tettek eleget annak érdekében, hogy ez az állapot megszűnjön.

Ezért aztán — merő kényszerűségből — szükségét látom némi külön eszmefuttatásnak. Azt hiszem, nem kell különösképpen erőlködnünk, hogy belássuk: délkör menti folyók esetében (3. ábra, a) a helyzet hasonló a Baer-törvény által definiálthoz. A szélességi kör menti folyókat illetően (3. ábra, b) viszont megállapíthatjuk, miben áll a Baer-törvény magyarázatának hibája: nem veszi figyelembe, hogy a szélességi körök görbülete következtében az azokat követő folyók mozgásuk közben ugyancsak eltérnek az eredeti irányuktól, mégpedig ugyanúgy jobbra az északi és balra a déli félgömbön, mint a délkör menti folyók. Más szóval a Baer-törvény magyarázata a Föld görbületét csak a délkörök síkjában veszi figyelembe, a szélességi köröket viszont úgy kezeli, mintha azok végtelenbe tartó egyenesek lennének. A Baer-törvény magyarázatának tehát az az alapvető hibája, hogy nincs tekintettel arra, hogy a szélességi körök *körök*, és nem egyenesek.



3. ábra. A Coriolis-erő hatása délkör vagy szélességi kör menti folyóra Északi félgömb. forgási irány = a Föld forgásiránya, az egyéb jeleket l. az 1. ábra alatt. P = pólus, E = egyenlítő

Innen pedig joggal vetődik fel két kérdés:

1. Délkör menti folyók esetében a Baer-törvény mennyiségileg korrekten magyarázatot ad-e az eltéréstésre, más szóval, ugyanazt az eredményt hozza-e, mint a Coriolis-féle képlet?

2. Igaz-e, hogy a délkör menti folyók gyakrabban, illetve erősebben térülnek-e el, mint a szélességi kör mentiek?

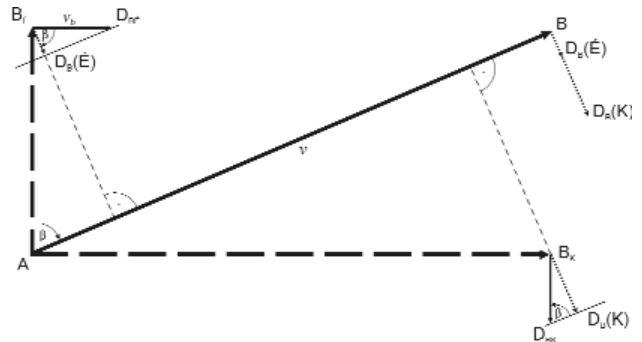
Az első kérdés tisztán matematikai, az alábbiakban ezt tárgyaljuk. A második kérdés már átvezet ahhoz az elvi kérdéshez, hat-e egyáltalán a Coriolis-erő a folyókra, amelyet a következő fejezetben tárgyalunk.

A délkör menti mozgást a ferde mozgás Babinet által levezetett eltéréstéséből (4. ábra) határozhatjuk meg. Itt

$$AB_{\dot{E}} = AB \cdot \cos\beta = v \cdot \cos\beta,$$

$$B_{\dot{E}}D_{B\dot{E}} = AB_{\dot{E}} \cdot \sin\varphi = v \cdot \cos\beta \cdot \sin\varphi,$$

$$B_{\dot{E}}D_B(\dot{E}) = B_{\dot{E}}D_{B\dot{E}} \cdot \cos\beta = v \cdot \cos\beta \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta,$$



4. ábra. Ferde mozgás eltéréstésének vázlata BABINET (1859d) leírása nyomán

$v = AB$ = mozgásebesség, β = a folyásirány délkörrel bezárt szöge (azimutja), $AB_{\dot{E}}$ = a sebesség \dot{E} -i összetevője, AB_K = a sebesség K -i összetevője, $B_{\dot{E}}D_{B\dot{E}}$ = az \dot{E} -i összetevő eltéréstése, B_KD_{BK} = a K -i összetevő eltéréstése, $B_{\dot{E}}D_B(\dot{E})$ = az \dot{E} -i összetevő eltéréstése az AB irányra merőlegesen (= v_b = a Baer-törvényből adódó eltéréstési sebesség), $B_KD_B(K)$ = a K -i összetevő eltéréstése az AB irányra merőlegesen

$$B_{\dot{E}}D_B(\dot{E}) = B_{\dot{E}}D_{B\dot{E}} \cdot \cos\beta = v \cdot \cos\beta \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta.$$

Mivel

$$B_{\dot{E}}D_{B\dot{E}} = v_b,$$

és

$$a = 2v/t,$$

továbbá

$$a_b = 2v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta = a_c \cdot \cos^2\beta$$

és

$$F_b = 2m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta = F_c \cdot \cos^2\beta,$$

ahol a_b = a Baer-törvény szerinti gyorsulás, F_b = az ezt a gyorsulást létrehozó erő, β = a folyásirány azimutja, a többi ugyanaz, mint a Coriolis-erő és -gyorsulás esetében.

A fentiek mellett

$$AB_K = AB \cdot \sin\beta = v \cdot \sin\beta,$$

$$B_KD_{BK} = AB_K \cdot \omega \cdot \sin\varphi = v \cdot \sin\beta \cdot \omega \cdot \sin\varphi$$

és

$$B_KD_B(K) = B_KD_{BK} \cdot \sin\beta = v \cdot \sin\beta \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin^2\beta,$$

mivel pedig az \dot{E} -i és a K -i összetevő eltéréstése az AB irányra merőlegesen a teljes eltéréstést adja, és

$$B_{\dot{E}}D_B(\dot{E}) + B_KD_B(K) = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta + v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin^2\beta = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot (\cos^2\beta + \sin^2\beta) = v \cdot \omega \cdot \sin\varphi,$$

azt kapjuk, hogy a mozgásirány nem hat az eltéréstítő erő nagyságára.

A Baer-féle gyorsulás általános képlete tehát a következő:

$$a_b = 2v \cdot \omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos^2\beta.$$

Délkör menti mozgásra ($\cos 0^\circ = 1$) tehát a Baer-törvény számszerűleg a Coriolis-erő vízszintes összetevőjének értékét adja, attól eltérő irányra azonban egy olyan értéket, amelybe belép a folyásirány azimutja (β , l. 2. ábra). Látható, hogy a módosító együttható $\cos^2\beta$, alkalmazása hibás értéket eredményez (szélességi kör mentén $\cos 90^\circ = 0$, tehát $a_b = 0$).

Nézetek a Coriolis-erő folyókra gyakorolt hatásáról

A Coriolis-erő nem csak folyókra hat. Általában úgy vélik, hogy a Coriolis-erőnek jelentős szerepe van a légköri és óceáni áramlatok keletkezésében s egy sor gyakorlati jelenségben (ágyútűz, kalapácsvetés, vonatkisiklások stb.). Az, hogy itt a folyókkal foglalkozom, nem jelenti azt, hogy erre szűkíteném a Coriolis-erő hatását. Mindössze a tárgyalásnak adok keretet.

A Coriolis-erő forgó testeken lép föl, és téríti el az azokon tehetetlenségi erő hatására mozgó más testeket. Tudnunk kell, hogy ez a mozgás látszólagos: a forgó test álló környezetéből nézve a tehetetlenségi mozgás egyenes, elhajlítás csak a forgó testen lévő megfigyelő számára létezik. Ebből következően a Coriolis-erő a forgó Földön minden tehetetlenségi erő hatására mozgó testre hat. E testek Földön kívüli megfigyelő számára egyenes vonalúnak tűnő mozgását a földi megfigyelő görbültnek észleli.

A Coriolis-erő a Föld felszínén két komponensre bontható: egy helyi vízszintesre (amely a Föld érintő síkjába esik) és egy helyi függőlegesre (amely az előbbire merőleges). A vízszintes komponens a Foucault-inga mutatja és méri, a függőleges komponens az Eötvös-hatás, amely szintén mérhető. Ebből következően a Coriolis-erőnek nemcsak létezése tagadhatatlan, hanem az azt leíró képlet helyessége sem vonható kétségbe. (Visszafelé: a Foucault-inga és az Eötvös-hatás egyaránt a Föld forgását bizonyítja.) Gondoljuk meg: ha a Coriolis-erő (vízszintes síkban) irányfüggő lenne, a Foucault-inga attól függően fordulna (vagy nem fordulna) el, hogy milyen irányú kezdeti lökést kap. A kísérletek azonban azt mutatják, hogy a Foucault-inga — a kezdeti lökés irányától teljesen függetlenül — addig forog (akár körbe-körbe), amíg le nem áll.

A folyókkal kapcsolatban tehát a Coriolis-erőnek nem a létezése, hanem hatásának mértéke lehet kérdéses. A problémát nagyon sok oldalról vizsgálták, így lehetőségem nyílik némi osztályozásra. Úgy gondolom, hogy három aspektust célszerű elemeznünk. Az elsőt empirikusnak nevezem, idesorolom mindazokat a vizsgálatokat, amelyek a folyók irányeltérítési gyakorlatosságának meghatározását célozták. Ezt helyezem első helyre, mert ez foglalkozik azzal, ahonnan a probléma történetileg eredt, valamint minden tudomány alapjával — a tényekkel. A másodikat matematikainak nevezem. Ide sorolom mindazokat a megfontolásokat és számításokat, amelyek a folyókra ható Coriolis-erő nagyságát próbálták megbecsülni, s ebből vontak le következtetéseket. A harmadikba sorolom az alternatívák elemzését.

Természetesen e három aspektus egy-egy munkában ritkán jelentkezik egymagában, vagyis a kérdéssel foglalkozó munkák nem sorolhatók be egyik vagy másik kategóriába. Az aspektusok megkülönböztetése mégis hasznos, mert segít megérteni, mely nézetek fakadnak egyszerűen ismerethiányból, s melyek azok, amelyek a végkövetkeztetésekhez figyelembe vehetők.

Az empirikus alapról

Az empirikus alap lerakását már Baer megkezdte, amikor végigvette a Föld folyóinak nagy részére vonatkozó ismereteket (hozzá képest Babinet elég kevés adatra támaszkodott). Mai szemmel nézve munkája rendkívül nagy eredmény volt egy olyan korban, amikor sok területről még térkép sem állt rendelkezésre, s csak útleírásokból lehetett következtetéseket levonni.

Azóta Eurázsia nagy térségein keletkeztek mennyiségi adatok. Voszkreszenszkij (VOSKRESENSKIY 1947) és Gerencsuk (GERENCHUK 1960) az Orosz-síkságon, Zemcov (ZEMTSOV 1973) a Nyugat-Szibériai-síkságon, Zsukovszkij (ZHUKOVSKIY 1970) pedig Kelet-Szibéria É-i felén térképezte a folyók aszimmetriáját, és ennek alapján arra következtetésre jutott, hogy a jobbos aszimmetria mindenütt erős túlsúlyban van. Számot csak Voszkreszenszkij (VOSKRESENSKIY 1947) és Zemcov (ZEMTSOV 1973) közölt. Az első szerint az aszimmetriát mutató völgyek több mint 90%-án jobbos aszimmetria figyelhető meg. A második szerint az összes folyószakasz 70-75%-án figyelhető meg jobbos aszimmetria. Hasonló jellegű, hatalmas területekre kiterjedő aszimmetriatérképezésről a világ más tájain nem tudok, de a közölt anyagok többé-kevésbé összefüggően fedik le szárazulatok legalább 10%-át⁴, vagyis meglehetősen reprezentatívak.

A vizsgálatok nyomán azt a következtetést vonták le, hogy a jobbos aszimmetria túlsúlya a Coriolis-erő hatását tükrözi, míg a balos (vagy folyás mentén, esetleg folyók között változó) aszimmetria helyi okokra, zömmel tektonikus kibillenésekre vezethető vissza. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a jobbos aszimmetria sem tudható be mindenütt kizárólag a Coriolis-erő hatásának, hanem sokhelyütt tektonikus kibillenések vezetnek ugyanarra az eredményre, vagyis a kétféle hatás egymást erősítheti.

A nyugat-szibériai adatból nem világos, mekkora volt az aszimmetriát nem mutató völgyek hányada, de nyilvánvalóan nullánál nagyobb volt. Talán nem követünk el hibát, ha 50-50%-os megoszlást tételezünk fel a balos aszimmetriát és az aszimmetriát nem mutató völgyek között. Ebben az esetben balos aszimmetria az összes folyóvölgy 12-15%-án érvényesülne, az aszimmetriát mutató völgyek között pedig a jobbosok hányada 83-85% lenne, ami közel áll az európai oroszországi adathoz.

Ha abból indulunk ki, hogy az aszimmetriát mutató völgyek 85-90%-a jobbos, a maradék 10-15%-ra tételezhetünk fel más — elsősorban tektonikus — eredetet. Mivel nagy területet nézve a tektonikus hatásokat véletlenszerűnek kell tekintenünk a folyókhoz képest, ugyanekkor hányadban (10-15%) kell feltételeznünk tektonikus erő hatását a jobbos aszimmetriájú völgyekben is. Ebből pedig az következik, hogy az összes aszimmetrikus völgy 70-80%-ában a Coriolis-erő hatása tisztán érvényesül. Akár azt is mondhatjuk, hogy egy aszimmetrikus folyóvölgyben ekkora a globális tapasztalati valószínűsége a Coriolis-erő önálló érvényesülésének.

⁴ Ha figyelembe vesszük, hogy a szárazulatok hatalmas területein (sivatagok és jégmezők) egyáltalán nincsenek folyók, sokkal nagyobb hányadot kapunk.

Ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy a Coriolis-erő hatása egy-egy folyó konkrét szakaszára ilyen típusú vizsgálatokkal nem bizonyítható. Az empirikus módszer tehát csak statisztikai alátámasztást ad, de nem alkalmas egyedi esetek elbírálására.

A matematikai számításokról

A matematikai számítások arra irányultak, hogy meghatározzák a folyókra ható Coriolis-erő (vízszintes összetevőjének) nagyságát.

Ilyen számításokat már az 1859. évi párizsi vita résztvevői is végeztek (Bertrand 1859a, Babinet 1859b, d, Combes 1859), s nagyon kis értéket kaptak. Mivel a későbbi ilyen típusú számítások nem hoztak lényegi változást, csak kettőt közlök.

A ZÖPPRITZ (1882) által közölt képlet szerint egy 1 km széles és 1 m/s sebességű folyó jobb partjánál az 50° szélességi körön a Coriolis-erő hatására 1 cm-rel lesz magasabb a vízszint, mint a balnál (Zöppritz úgy gondolta, hogy ezt a hatást már néhány fűcsomó is kompenzálja).

Csaknem száz évvel később LOYDA, PODRACKÝ (1979) a hatóerő nagyságát különböző szélességekre és vízsebességekre számította ki. Azt kapta, hogy az eltérítő erő pl. 50° és 1 m/s esetén 110 mN (mN = milli-Newton — 1N = 0,102 kp = 1 kg·m/s², 110 mN = 110 g·m/s²).

Ezek, illetve hasonló számítások alapján egy sor kutató csatlakozott BERTRAND (1859a), DELAUNEY (1859) és COMBES (1859) véleményéhez arról, hogy a Coriolis-erő túl gyenge ahhoz, hogy folyókat térítsen el (l. pl. GÁBRIS et al. 1998). Az ilyen típusú értékeléseknek azonban az a közös hibájuk, hogy szubjektív ítéletet közölnek: deklarálják, hogy az erő „túl kicsi”, de lényegileg nem indokolják, miért gondolják ezt.

A fenti számítások „abszolútnak” minősíthetők, mivel eredményük egyrészt nyílegyenesen következik a Coriolis-hatás képletéből, másrészt önmagában áll — nincs semmivel érdemben összevetve. Igaz, mindkét említett számításnál megjegyzik, hogy a kapott hatás jóval gyengébb, mint a szél, ez azonban nem meggyőző érvelés (a szél hatását a következő részben érintjük): a mállásra pl. hat a nap sugárzása és hője, a légkör víz- és szénadtartalma s egy sor más tényező, de ha egyikről kimutatjuk, hogy gyengébb a többinél, abból még nem következik, hogy negligálhatjuk is. Igaza lehet Gerencsuknak (GERENCHUK 1960) és Müürseppnek (MYURSEPP 1976), aki szerint, ha nincs gátja, hosszú idő alatt kis erő is létrehozhat jelentős hatást.

Nézzük azoknak a számításoknak az eredményét, amelyek a Coriolis-hatást más hatásokkal vetették össze mennyiségileg, ezeket nevezhetjük „relatív”-nak. Ilyen típusú számításokat számos kutató folytatott le, közülük itt csak néhányat említünk. EAKIN (1910) a Mississippin Columbusnál (é. sz. 33° 30') a Coriolis-erőből származó potenciális oldalirányú hatásra jobb kanyaron 18%-kal nagyobb értéket kapott, mint a balon. Laksa és Hudyakov (LAKSHA, HUDYAKOV 1968) hasonló nyugat-sibériai vizsgálatok során

arra jutott, hogy a jobb és bal kanyar felé irányuló gyorsulás aránya a Tarán⁵ (é. sz. 57°) árvíznél 1,52, kisvíznél 1,42, a Vaszjuganon⁶ (é. sz. 57–59°) 1,74 és 1,63. Vagyis a jobb partok felé irányuló gyorsulás (erő) durván másfélszer akkora, mint a bal partok felé irányulóé. A két becslés közötti különbség összhangban van az eltérő szélességekkel: $\sin 33^\circ = 0,54$, $\sin 58^\circ = 0,85$, $0,85/0,54 = 1,56$, és $(1,42 \div 1,74)/1,18 = 1,20 \div 1,47$.

Sancer (SHANTZER 1951) a Coriolis-erő hatását a gravitációs erő folyásirányú komponensével (l. még VOSKRESENSKIY 1947) és a kanyarokon fellépő centrifugális erővel vetette össze (l. táblázat). Maga Sancer azt emelte ki, hogy árvíznél a Coriolis-erő hatása kb. a 3/4-e a kisvízi gravitációs erőnek, s hogy a centrifugális és a Coriolis-erő nagysága összevethető. Azt, hogy a kanyarok külső oldalán a centrifugális erő hatására állandó alámosás van, senki sem tagadja. Nem lehetne tehát tagadni azt sem, hogy az alámosásban jelentős szerepe van a Coriolis-erőnek is!

1. táblázat. A Volga folyó vízére Kazanyánál (é. sz. 55° 50') ható erők összevetése SHANTZER (1951, pp. 199–200) adatai alapján

Erő	Gyorsulás [10 ⁻³ m/s ²]		Folyási sebesség [m/s]		Folyás menti esésszög	
	kisvíz	árvíz	kisvíz		kisvíz	árvíz
Coriolis-	3,6	36,2				
Gravitációs*	49	6686	0,3	3	10"	1°
Centrifugális, R = 2 km	4,5	450	0,3	3		
Centrifugális, R = 8 km	1,125	112,5	0,3	3		

* = folyás menti komponens, R = a kanyar sugara

Ugyancsak „relatív” számítást végzett MATSCHINSKI (1966), aki speciális algoritmust dolgozott ki a folyókanyarok szimmetriájának elemzésére. A Szajna és a Tiberisz kanyarulatainak elemzésével kimutatta, hogy azok 15-17 (Szajna), illetve 8-10%-kal (Tiberisz) térnek el a szimmetrikus esettől, tehát képződésükbe a Coriolis-erő is belejátszott.

Láthatjuk, hogy míg az „abszolút” számítási eredmények értékelése teljesen szubjektív, addig a „relatív” matematikai számítások a Coriolis-erő kézzelfogható hatására mutatnak a folyók eltérítését meghatározó aszimmetrikus alámosásban.

Az alternatív magyarázatokról

Az alternatív magyarázatok sokfélék lehetnek (ilyenek azonban az 1859. évi párizsi vitán még nem merültek fel — l. följebb). E magyarázatok egy része elfogadta Baer első érvelését (BAER 1856a, b), mely szerint a jelenség annyira általános, hogy egységes magyarázatot igényel, más részük nem.

⁵ Az Irtis 806 km hosszú jobb oldali, közel K-Ny-i irányú mellékfolyója.

⁶ Az Ob 1062 km hosszú bal oldali, felső folyásán D-É-i, az alsón Ny-K-i irányú mellékfolyója.

STEFANOVIĆ von VILOVO (1881) az egyenlőtlen mállást és koptatást, az uralkodó szélirányt és az ezzel kapcsolatos homokfúvást nevezte meg az aszimmetrikus alámosást előidéző tényezőként. Konkrétan a Duna és Tisza magyarországi szakaszain az általa 0,47 (Duna), illetve 0,31 m/év-esre (Tisza) becsült oldalazást a szerinte árvizek idején uralkodó DK-i széljárással magyarázta. Érvelésében az egyenlőtlen mállás és koptatás olyannyira nyilvánvalóan helyi tényező, hogy általános érvénye semmiképpen nem fogadható el, a homokfúvások pedig a szél másodlagos hatásával kapcsolatosak. Így tehát marad a szél. Felfogásában a jelek szerint nem volt szükség egységes, általános magyarázatra.

ZÖPPRITZ (1882) az É-ra tartó szibériai folyók K-re tolódását a szerinte uralkodó Ny-i széljárással, a D felé tartó Volga Ny-ra tolódását pedig (nem részletezett) földtani okokkal magyarázta. KÖPPEN (1890a), támogatva ZÖPPRITZ (1882) véleményét a nyugat-szibériai folyókkal kapcsolatban, úgy vélte, hogy Dél-Oroszországban a hideg, viharos időszakokban az uralkodó szél K-i, ezért a D-re tartó folyók jobbpartja meredek. Érvelését kortársainak egy része elfogadta (l. pl. KÖPPEN 1890b áttekintésében), más része nem. Mindkét kutató úgy vélte, Baernek igaza volt abban, hogy egységes magyarázatra van szükség, csak éppen más magyarázatot tartott szükségesnek. Köppen (1890a) még azt is megemlítette, hogy az uralkodó szélirányt a földforgás határozza meg, amely így hat a folyókra is, bár nem közvetlenül.

A későbbiekben azonban (l. pl. NEMÉNYI 1952 összesítését) a szél már nem kapott érdembeli szerepet az érvelésekben — nyilvánvalóan meggyőződtek arról, hogy a tényleges széljárás már az említett esetekben is eltér a feltételezettől, s globális magyarázattal nem szolgál.

Felvetődött a kitétség is, mint magyarázat, azonban csak helyi esetekre (l. pl. BRYAN, MASON 1932, VOSKRESENSKIY 1947, LAKSHA, HUDYAKOV 1968, GÁBRIS 2007), mert a völgyoldalok lejtését befolyásoló folyamatok mértéke függ számos klimatikus hatástól, amelyek nagy területeken érvényesülnek, de éghajlati övenként különböző eredményre vezetnek.

A legelterjedtebbnek hosszú időn keresztül a tektonikai magyarázatok bizonyultak, ezek azonban — alternatívaként — nyilvánvalóan azoknak a kutatóknak a nézeteit tükrözték, akik nem fogadták el Baer véleményét (l. följebb) arról, hogy egységes magyarázatra van szükség. A tektonikai magyarázatok főleg törések hatását hangsúlyozták, aminek két változata volt: az egyik meglehetősen annak konstataciójával, hogy a folyók törések mentén folynak, s egy-egy ilyen törés mentén az egyik part magasabbra emelkedett a másikonál. A másik változat szélesebb körben szemlélte a jelenséget, s a törés menti elmozdulásokat igyekezett rendszerbe foglalni azzal, hogy jelentős területre tételezte fel a törések közé zárt blokkok egyforma kibillenését (l. pl. GERENCHUK 1960, LAKSHA, HUDYAKOV 1968, ZHUKOVSKIY 1970, ZEMTSOV 1973). Ezzel bizonyos regionalitást vittek az aszimmetria magyarázatába, de természetesen globálisan érvényes magyarázatra így sem juthattak (a példaként említett

szerzők erre nem is törekedtek, mert elismerték a Coriolis-erő domináns hatását).

Azok a tektonikus magyarázatok tehát, amelyek a Coriolis-erő alternatíváját kívánták bemutatni, lényegileg nem ismerték el, hogy az É-i félgömbön a jobb (a D-in pedig a bal) partok alámosása annyira általános jelenség, hogy globális magyarázatot igényel (BAER 1856a, b, 1860, ZÖPPRITZ 1882, KÖPPEN 1890a). Tették ezt anélkül, hogy egyáltalán kritizálták volna az általánosságot. Márpedig nyilvánvaló, hogy egy-egy félgömb méretében bármilyen tektonikus jelenség közel azonos gyakorisággal eredményezhet jobb vagy bal oldali alámosást, semmiképpen nem vezethet valamelyik erős túlsúlyára.

Következtetés

Az empirikus alap és a „relatív” matematikai számítások ismeretében az alternatív magyarázatok nem cáfolhatják a Coriolis-erő hatását a folyókra. Azt viszont senki nem állítja, hogy más erők nem hatnak, s azt sem, hogy hatásuk esetenként nem lehet nagyobb, mint a Coriolis-erőé. Ezért bár a Coriolis-erő hatása folyókra kétségtelen, egyáltalán nem kizárólagos.

Összefoglalás

A Coriolis-erő hatása a folyókra mind statisztikai vizsgálatok, mind matematikai számítások fényében kétségtelen tény. A Baer-törvény eredeti megfogalmazásában viszont téves, mert a földforgás hatásáról azt állítja, hogy irányfüggő, ami ellentmond pl. a közismert Foucault-ingakísérletnek. Ezért ideje felhagyni a hivatkozásokkal, annál is inkább, mert a szerző de facto azonnal visszavonta „törvényét”.

Az Orosz- és a Nyugat-szibériai-síkság egészén lefolytatott folyóaszimmetria-térképezés során kapott adatok szerint a folyók 40-50%-ának aszimmetriájáért kizárólagosan vagy igen nagy mértékben a Coriolis-erő felelős, a többiben tektonikus kibillenések hatása is (!) bizonyítható vagy feltételezhető. Az esetek 85-90%-ában az aszimmetria olyan irányú, mint az a Coriolis-erő hatásából következne (ennek kb. hatodában a kétféle — a tektonikus és a Coriolis-erő egyazon irányba hat). Ebből következően mindazon esetekben, amikor az aszimmetria megfelel a Coriolis-erő irányának, számolni kell a Coriolis-erővel (is), s a kb. minden hatodik esetben fellépő ellentétes aszimmetriát nem lehet a Coriolis-erő hatásának cáfolatára használni. Egy-egy völgy aszimmetriája 70-80%-os valószínűséggel a Coriolis-erő hatására jön létre!

Tudomásul kell vennünk, hogy a folyók aszimmetriája főleg kétféle hatásra lép fel: tektonikus kibillenések és a Coriolis-erő következtében. Összességében a Coriolis-erő hatása jóval gyakrabban erősebb a tektonikus kibillenéseknél, mint gyengébb. A kétféle erő hathat azonos és ellentétes irányban egyaránt. A tényleges aszimmetria a kétféle erő irányától és egymáshoz viszonyított nagy-

ságától függ, amit a konkrét esetekben vizsgálni lehet és szükséges.

Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönetemet fejezem ki az Országos Földtani Szakkönyvtár (Magyar Állami Földtani Intézet) munkatársainak, akiknek közreműködése nélkül nehezen boldogultam volna a szakirodalom felkutatásában, valamint Vla-

gyimir Utyenkovnak (Oroszországi Állami Földtani Egyetem, Moszkva), az ő segítségével az orosz nyelvű szakirodalom nagy része elérhetően maradt volna számomra.

Köszönettel tartozom továbbá Tél Tamás professzor úrnak (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék), aki jelentős segítséget nyújtott ahhoz, hogy megértsem a Coriolis-erő hatását a Föld gömbfelületén, valamint Gábris Gyula professzor úrnak (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természetföldrajzi Tanszék), akinek észrevételei jelentős inspirációt adtak vizsgálataimhoz.