

## HONNAN FÚJ A SZÉL

avagy okosabb-e egy ötödikes, mint Sylvester Stallone?

Gróf Andrea

Karinthy Frigyes Gimnázium, Budapest

„Minden másképpen van.”

Karinthy Frigyes

## Katasztrófális filmek

Egy középiskolás már mindenképpen okosabb. Ez az írás néhány példa segítségével azt mutatja meg, miként lehetséges a matematikai tárgyalást nagy mértékben leegyszerűsítve, de a lényegét mégis megőrizve magyarázatot adni számos olyan meglepő jelenségre, amelyet a Föld forgása okoz. A forgó Földön ugyanis valóban minden másképpen van. Mivel kevés hétköznapi tapasztalatra hagyatkozhatunk, a középiskolások fantáziáját éppúgy megragadják ezek a jelenségek, mint a filmforgatókönyv-írókét.

A filmirodalomban – környezetfizikai szempontból – a katasztrófafilmek kínálják a legtöbb csemegézni valót. Ennek ékes példája a *Holnapután* című film, amely gazdag tárháza a valós tények által ihletett, tudományosan hangzó sületlenségeknek.

Mivel most a Föld forgásával kapcsolatos jelenségek iskolai feldolgozásának szükségességét szeretném alátámasztani, egyetlen apró jelenetet említek példa gyanánt. Ebben tévémondó ismerteti a katasztrófa közeledtére utaló aggasztó jeleket. Mialatt elmondja, hogy trópusi hurrikánra emlékeztető hatalmas vihar alakult ki Kanadában, a háta mögött levő képen az óra járásának megfelelő irányban örvénylő felhőrendszer látható (nem is hurrikánhoz hasonlít, inkább a déli félteke mérsékelt övi ciklonjának felhőzete lehet, de efölött most nagyvonalúan szemet hunyunk).

A képet figyelmesen szemlélve még a középiskolások is tudnák, hogy rossz, hiszen ha egyáltalán létezik

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én elhangzott előadás alapján készült.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tanterv- és Pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Gróf Andrea 1991-ben szerzett matematika-fizika tanári diplomát az ELTE-n. Azóta a budapesti két tanítási nyelvű Karinthy Frigyes Gimnáziumban tanítja mindkét tárgyat angol nyelven. Az ELTE fizikatanári doktori programjának végzés előtt álló hallgatójaként azzal foglalkozik, hogy miként lehet a hagyományosan a földrajz tantárgy keretében tárgyalt jelenségek fizikai hátterét a középiskolai oktatásban bemutatni.

hetne Kanada fölött hurrikán, az biztosan nem a látott irányba csavarodna, hanem fordítva, mert az északi féltekén van. A tanulók általában jól emlékeznek földrajzóráról arra, hogy melyik féltekén merre forognak az alacsony nyomású légköri képződmények.

Ezért is szedi olyan könnyen áldozatait a lefolyó legendája. Fontos szerepe van például a *Szupercella* (*Escape Plan*) című filmben. A „Szupercella” itt nem hatalmas viharra utal, hanem szuperbiztonságos börtönre, ahol a fogvatartottak még azt sem tudják, melyik táján vannak a világnak. A főhős (*Sylvester Stallone*) megfigyeli a WC-ben örvénylő víz mozgását, ebből állapítja meg, hogy valahol az északi féltekén.

A *Simpson család Bart kontra Ausztrália* című epizódjában is a lefolyók viselkedéséből kerekedik diplomáciai bonyodalom. Ez azért különösen meglepő, mert nem véletlenül fedezhet fel a figyelmes néző rengeteg intellektuális humort ebben a rajzfilmsorozatban, főként, ha nem idegen tőle a matematika. A szerzőgárdában ugyanis szinte mindenkinek van tudományos fokozata matematikából vagy természettudományból (vagy mindkettőből). És még ők is... A történetben a nem épp észkombáján Bart Simpson nem akarja elfogadni, hogy északon mindig az óramutatóval ellentétesen örvénylik a lefolyó, mire húga, a szuperokos ötödikes Lisa figyelmezteti, legjobban, ha egyszerűen kipróbálja. Vagyis megfogalmazza, hogy elméletünk helyességének próbája a kísérlet! A szerzőknek azonban olyannyira kétségük sincs a kísérlet eredményét illetően, hogy ők maguk sem ellenőrzik, mi pedig azt láthatjuk, hogy a kísérletet elvégezve a lefolyók következetesen különböző irányban örvénylenek a két féltekén.

Lefolyó-ügyben a mélypontot talán az *X-akták Kéz, amely sebez* című epizódja jelenti. Ebben még a rosszat is rosszul tudják, és okkult körítésekkel kísérve kijelentik, hogy az óra járásával ellentétesen forgó lefolyó a déli féltekére jellemző.

A lista messze nem teljes, de ahhoz talán elég ennyi, hogy tudatosítsuk, milyen tömegben ömlik a komolytalan tudomány a gyerekekre. Ők pedig meglepő részletességgel emlékeznek mindenre, amire nem kellene. (Amikor például fizikaórán először hallják a „fluxus” szót, azonnal előhozakodnak a fluxuskondenzátorral, pedig nem is éltek még, amikor a *Vissza a jövőbe* című film készült.)

Sok tennivaló vár tehát ránk, tanárookra: a mi feladatunk, hogy segítsünk tanítványainknak mindebben eligazodni. Kitől tudják meg, ha nem tőlünk, hogy honnan fúj a szél?

## A szél iránya

A tanulók helyesen tudják földrajzból, hogy a levegő mozgását légnyomáskülönbségek idézik elő, és a légnyomás eloszlása szabja meg a levegőáramlásokat. Az interneten könnyen található nyomástérképeket (1. ábra). Bár földrajzórán már szerepeltek izobárok, a gyerekeket először meg kell tanítanunk látni egy ilyen térképen, hiszen az absztrakt mezőfogalom még távol áll tőlük. Ha már valamelyest értik, megkérdezhetjük őket, milyen irányban fúj a szél Budapesten. Pontosabban, hogy milyen irányban fúj Budapest fölött nagy magasságban, amire ez az ábra is vonatkozik.

Az ábra Magyarország régiójában északnyugat-délkelet irányú vonalakat mutat, és balra lent vannak a nagyobb számok, jobbra fent pedig a kisebbek. Ezért hétköznapi intuíciónk alapján, amelyre a legtöbb földrajzkönyv leegyszerűsítő tárgyalása is ráerősít, többnyire azt válaszolják, hogy a szél a magasabb nyomás felől az alacsonyabb felé, vagyis délnyugatról északkelet felé fúj.

Csakhogy az összefüggés nem ilyen egyszerű: a hétköznapi intuíció hétköznapi tapasztalatokból táplálkozik, így nem számolhat a Coriolis-erővel.

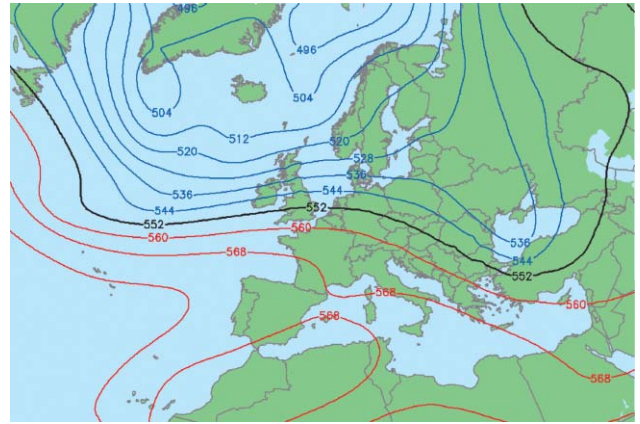
A Coriolis-erő több-kevesebb sikerrel elmagyarázható [2], a *Fizikai Szemle* is nem egy ízben foglalkozott már tanításának lehetőségeivel [3–6], ennek a részleteire ezért most nem térek ki. Ha rendelkezésre áll a Coriolis-erő, akkor még a szélesség nagyságát is ki tudjuk számolni a gyerekekkel. Nehézséget itt főként az jelent, hogy a jelenségek egzakt tárgyalásához kicsi a középiskolai matematikai eszköztár, hiszen a tanulókat nyilván nem lehet parciális differenciálegyenletekkel terhelni.

Tanárként feladatunk tehát többek között az, hogy amennyire lehet, a lényeg megőrzése mellett leegyszerűsítsük a problémát, és a gyerekek számára is emészthető matematikai megfontolásokkal úgy kapjunk helyes eredményt, hogy közben ne mondjunk valótlan. Most is arra törekszem, hogy ne nyújtózkodjak túl a középiskolai matematikán.

Ha feltesszük, hogy a levegő nem most kelt útra, hanem már beállt a stacionárius állapot, akkor (mivel nagy magasságban a viszkozitásból adódó fékezőerő elhanyagolható) a Coriolis-erő egyensúlyt tart a nyomáskülönbségből eredő, a nyomáscsökkenés irányába mutató erővel.

(Egyensúlyról természetesen csak akkor beszélhetünk, ha azt is feltesszük, hogy a levegő nem kanyarodik nagyon. Nem nyilvánvaló, hogy mit is jelent a „nagyon”: ha a lefolyó ügyét kívánjuk tisztázni, akkor épp azt kell megmutatnunk, hogy ott bizony, nagyon kanyarodik a víz. Ennek érdekében fontos nemcsak paraméteresen, hanem konkrét számértékekkel is kiszámolni az eredményeket, a gyerekek számára csak így válik világossá, hogy mi fontos és mit lehet elhanyagolni.)

Ha kicsiny  $\Delta x$  távolságon a nyomáskülönbség  $\Delta p$ , akkor két, rá merőleges  $A$  felület közötti  $V$  térfogatban levő levegőre ható erő



1. ábra. Nyomástérkép részlete, a számok 10 m egységekben értendők [1].

$$F_p = -A \Delta p = -A \Delta x \frac{\Delta p}{\Delta x} = -V \frac{\Delta p}{\Delta x}. \quad (1)$$

Egyensúly esetén ez egyenlő nagyságú és ellentétes irányú a Coriolis-erővel:

$$V \frac{\Delta p}{\Delta x} = 2 m v \Omega \sin \varphi,$$

ahol  $\Omega$  a Föld forgási szögsebessége,  $\varphi$  pedig a földrajzi szélesség. Innen a szélesség

$$v = \frac{1}{2 \rho \Omega \sin \varphi} \frac{\Delta p}{\Delta x}.$$

A Coriolis-erő oldalirányban hat, a mozgás tehát a nyomáscsökkenés irányára merőlegesen történik, vagyis éppen az izobárfelületek mentén.

## A nyomásfelületek domborzata

A szél irányáról nemcsak azért volt fontos említést tenni, mert a gyerekeknek már ez is meglepő, hiszen – *Karintyval* szólva – egy újszülöttnek minden vicc új. Csak kicsit kell mélyebben tanulmányoznunk a légnyomás eloszlását, és meg tudunk magyarázni további érdekes dolgokat is, amelyek már biztosan nem szerepeltek földrajzórán. (Sőt, matematika-fizika szakos tanárjelöltként én annak idején egyetemen sem tanultam róluk.)

Térjünk vissza a nyomástérképekhez. Ha közelebbről megvizsgáljuk az interneten fellelhető térképeket, láthatjuk, hogy izobártérképeket csak a talajszinten szoktak rajzolni. A magasabb légrétegek nyomásviszonyait ábrázoló térképeken ehelyett az azonos nyomású felületek magasságának eloszlását adják meg. Az izobárfelületek szintvonalait a meteorológusok izohipszáknak nevezik [7]. Az 1. ábra is ilyen izohipszátérkép: a vonalak nem azonos magasságban egyenlő nyomásintervallumonként vannak feltüntetve, hanem az adott nyomású felületre vonatkozóan egyenlő magasságonként. Ezen az ábrán például az 500 hPa értékhez tartozó magasságok görbéi láthatók. A vonalakra úgy lehet gondolni, hogy szintvonalas domborzati térképet készítettünk

arról a felületről, amely felett a levegőnek pontosan a fele található.

Ekkor a nyomáskülönbségből eredő (1) erő okozta gyorsulás

$$\begin{aligned} \frac{F_p}{m} &= -\frac{V}{m} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta z} \frac{\Delta z}{\Delta x} = \\ &= -\frac{1}{\rho} (-\rho g) \frac{\Delta z}{\Delta x} = g \frac{\Delta z}{\Delta x}, \end{aligned}$$

ahol  $z$  magasságot jelöl. Ebből már látszik, hogy miért jobb  $\Delta p/\Delta x$  helyett  $\Delta p/\Delta z$  és  $\Delta z/\Delta x$  szorzatát írni: a hidrosztatikából emlékszünk arra, hogy adott helyen a nyomásnak a magassággal való csökkenése az ottani sűrűséggel arányos, amely helyről helyre más lehet, ezzel a módszerrel viszont ki tudjuk küszöbölni a sűrűséget a számolásból.  $\Delta z$  leolvasható a görbékről,  $\Delta x$  lemérhető a térképről, rajtuk kívül csak  $g$ -re van szükségünk. A nyomásfelület meredekségéből kiszámolt vízszintes gyorsulást a Coriolis-gyorsulással egyenlővé téve kapjuk a sebességet:

$$v = \frac{1}{2\Omega \sin\varphi} \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{2\Omega \sin\varphi} g \frac{\Delta z}{\Delta x}. \quad (2)$$

## Amikor a vízszint sem vízszintes

Hasonló megfontolást a vizekre is alkalmazhatunk. A tengereken létezik egy természetadta kézzelfogható izobárfelület is: a vízfelszín maga, ahol légköri nyomás uralkodik. Az eddigiek alapján ez azt jelenti, hogy az erőegyensúlyban levő áramló vízhez döntött felület tartozik.

A gyerekek is ismerik a Golf-áramlást. Az egyszerűség végett tekintsük azt a szakaszát, ahol észak felé halad Florida partjainál,  $\hat{E}30^\circ$  földrajzi szélességen. Az áramlat szélessége körülbelül 100 m, sebessége 1 m/s nagyságrendű. Ezekből az adatokból nagyságrendileg tudjuk becsülni a tengerfelszín döntöttségének mértékét, ha a felszín meredekségét (2)-ből kifejezzük a sebességgel:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta z}{\Delta x} &= \frac{2\Omega \sin\varphi v}{g} = \\ &= \frac{2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 1}{10} = 7,3 \cdot 10^{-6} \approx 10^{-5}. \end{aligned}$$

Az eredmény 100 km-enként körülbelül 1 méter emelkedést jelent nyugatról kelet felé, ami jó egyezést mutat a műholdas mérésekből ismert értékekkel.

## Fantom-akadályok

Ha egy folyadékban (akár a levegőben, akár a vízben) a sűrűség állandónak tekinthető, vagyis nem változik a magassággal, akkor a felszín bármelyik pontjában a függőleges mentén felfelé haladva ugyanolyan ütem-

ben csökken a nyomás, a nyomásfelületek ezért párhuzamosak, mindenhol ugyanannyira lejtnek. Ebből az következik, hogy a függőleges mentén a vízszintes irányú sebesség is végig ugyanannyi.

(Ha nem akarunk a nyomásfelületek szintvonalaira áttérni, úgy is fogalmazhatunk, hogy kicsivel nagyobb magasságban pontosan ugyanoda kell rajzolni a térképre az izobárokat, csak éppen mindegyikre pontosan ugyanannyival kisebb nyomást kell ráírni. A nyomás megváltozása egységnyi vízszintes távolságon ugyanannyi, mint lejjebb, ezért – mivel a sűrűség is ugyanannyi, mint lejjebb – a vízszintes sebesség is ugyanannyi kell, hogy legyen.)

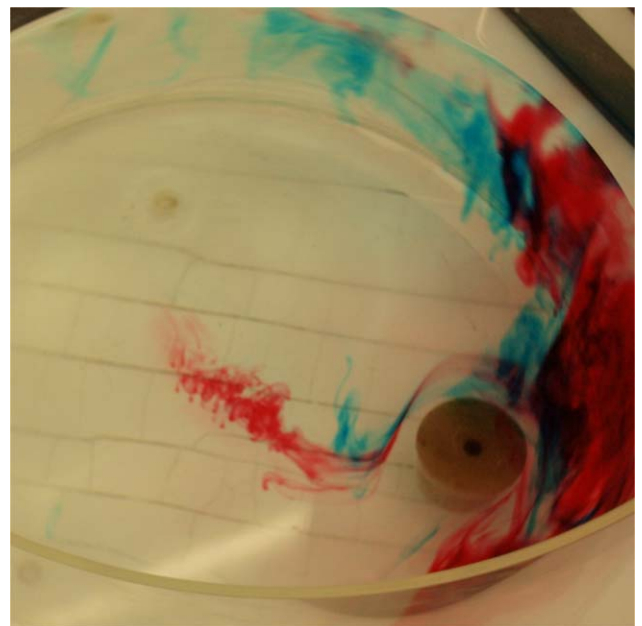
Ne felejtjük el, hogy homogén folyadékról van szó, amely elég gyorsan forog ahhoz, hogy a Coriolis-erő meghatározó legyen!

A forgatott homogén folyadéknak ezt a meglepő, oszlopos szerkezetet – azaz függőleges eltolásra való invarianciát – mutató viselkedését, az ELTE Környezeti Áramlások Kármán Laboratóriumában kézzelfogható módon be is mutatják az érdeklődő iskolásoknak. Egyszerű eszközökkel számos légköri és óceáni jelenséget tudnak a laborasztalon modellezni, még a klímaváltozást is [8], a kutatómunka mellett azonban a Kármán Laboratórium ismeretterjesztő tevékenységet is folytat, amelyet jó lenne, ha több fizikatanár megismerne és hasznosítana.

Az egyik demonstrációs kísérletben [9] forgatott kádban levő vízbe egy kevés festéket fecskendeznek. Álló tartályban ugyanez a befecskendezett festék háromdimenziós turbulenciát mutató felhő formájában gomolyogna. A forgatott tartályban viszont minden másképpen van, a festék függőleges felületek mentén terjed szét, függőnyszerű alakzatot formázva (2. ábra).

Az áramlás kétdimenzióssá válásának legérdekesebb következményét pedig akkor figyelhetjük meg,

2. ábra. Homogén, forgatott folyadékban kialakuló áramlás demonstrációja a Kármán Laboratóriumában.





3. ábra. Kármán-féle örvényút Guadalupe szigete felett [12].

ha a tartály fenekére akadályt helyezünk. Ez látható a 2. ábra képen is. Noha az akadály sokkal kisebb a vízmélységnél, a festékfüggönyök mégsem csak ott kerülnek meg, ahol beleütköznek, vagyis alul, hanem fölül is, ahol már nincsen semmi akadály. Az akadály fölül nem folyik a festék, inkább az egész fantom-oszlopot megkerüli.

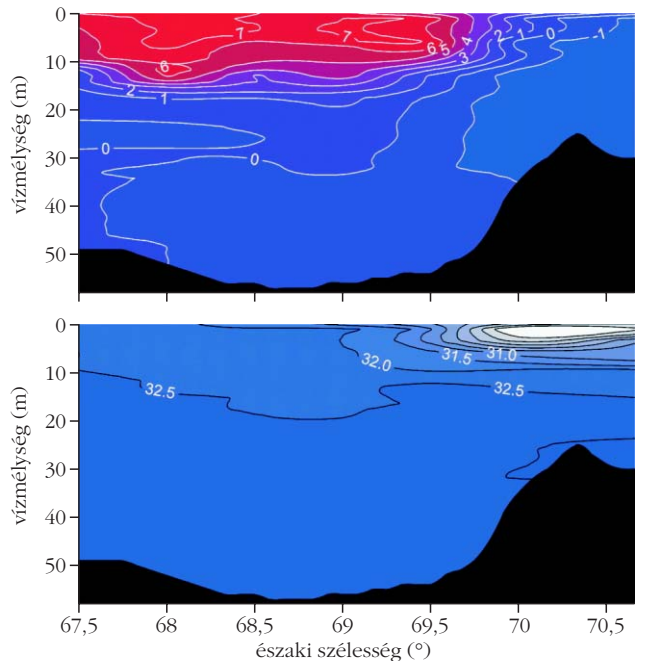
A természetben is meg lehet figyelni [10] mind a függőyszerű viselkedést, mind az akadály fölött nyugalomban maradó folyadékoszlopot, a Taylor-oszlopot. A sarki fényt ionizált gázok bocsátják ki a magaslégtérben. Ha a sűrűség homogénnek tekinthető, az egymás fölötti gázrészecskének azonosan kell mozogniuk, ezért függőyszerűen oszlanak el (mint például a [11] videón, vagy lásd e szám címlapját).

A 3. ábrán a Csendes-óceánban, Mexikó vonalában található Guadalupe szigete látszik. A felhők sokkal magasabban vannak, mint a sziget, mégis mutatják, hogy a szél kikerüli a szigetet, és az áramlás két-dimenziós szerkezete szépen kirajzolja a jól ismert Kármán-féle örvényutat.

Befejezésül álljon itt egy tengeri példa. A Czukcs-tenger a Bering-szorostól északra terül el Szibéria és Alaszka partjai között, északi természetes határa a kontinentális self pereme. Az egész egy nagyjából sík plató körülbelül 50 m mélyen, amelyből körülbelül 20 méterre kiemelkedik a Herald-zátony (4. ábra, felül) [13]. Nyáron a Czukcs-tenger jégtakarója felolvad, főként a Bering-szoros felől érkező, melegebb vizet szállító áramlat hatására. Kutatók azt vizsgálták, hogyan változik a jégtakaró határa az idővel [14, 15].

Három egymást követő év mérései közel azonos eredményre vezettek, a jégtakaró visszahúzódása tehát rendszeresen ugyanúgy zajlik. Sőt, már 19. századi bálnavadászhajók naplójában is szerepel a megfigyelés, hogy a Herald-zátony mindkét oldalán előrenyúlik egy-egy meleg nyelv, a zátonyt mintegy megkerülve. Két oldalt, sőt a zátonyon túl is felolvadt már a jég, miközben a zátony feletti vízoszlop még sokáig hideg és jégfedte marad.

Nem az a meglepő, hogy a zátonyba mint akadályba ütközve a melegebb víz némileg irányt változtat, az az érdekes, hogy a zátony teteje fölül sem folyik a meleg víz (4. ábra, középen). A zátony melletti vizek



4. ábra. A Czukcs-tenger [13] a Herald-zátonnyal (felül), a tengervíz hőmérséklete (középen) és sótartalma (alul) a vízmélység és az északi szélesség függvényében a nyugati hosszúság 170°-a mentén, a zátony közelében [15].

hőmérsékleti profilja csaknem függőleges frontot jelez, és ugyanilyen markáns frontra utalnak a sótartalom-mérések is. A zátony fölött még mindig meglévő jégtakaró alatt van a kisebb sótartalmú, hidegebb, régi víz, távolabb pedig a sósabb, újonnan érkezett, melegebb víz (4. ábra, alul).

Mérések szerint a Czukcs-tenger vize gyakorlatilag homogén sűrűségű, a rendszer minden egyéb paraméterének értéke is megfelelő az oszlopos természetű áramlás kialakulásához, tehát minden bizonnyal itt is Taylor-oszlop létrejöttének lehetünk tanúi.

## Összefoglalás

A légkör és a tengerek fizikai folyamatait napjainkban intenzív tudományos érdeklődés övezi. A környezetfizikai tartalmak a jelenlegi középiskolai oktatásban döntően a földrajz tantárgy keretébe tartoznak. Ott azonban a fizikai háttér nem kap elég hangsúlyt, és többnyire nem is fogalmazódik meg pontosan. A Föld forgásával kapcsolatos jelenségek kapcsán is megmutatkozik tehát: a fizikaoktatásra hárul a feladat, hogy felkeltse a tudományos magyarázat igényét, és meg is adja a magyarázatot.

### Irodalom

1. weatheronline.co.uk
2. A. Gróf: Carousels to Coriolis. What did you learn in geography? In: *Teaching Physics Innovately*. Konferenciakiadvány, szerk: A. Király, T. Tél, ELTE, Budapest 2015., 119., [parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php](http://parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php)
3. Tél T.: A Coriolis-erő és a modern környezetfizika: a lefolyótól a ciklonokig *Fizikai Szemle* 56/8 (2006) 263.
4. Hraskó P.: Elmélkedés a Coriolis- és a centrifugális erőről. *Fizikai Szemle* 63/5 (2013) 168.
5. Szeidemann Á.: Fizika és földrajz határán – Tanítható-e a Coriolis-erő? *Fizikai Szemle* 63/10 (2013) 352.
6. Woynarovich F.: A földfelszín forgása egy általános pontban. *Fizikai Szemle* 64/6 (2014) 203.
7. [meted.ucar.edu](http://meted.ucar.edu);
8. M. Vincze: Modelling climate change in the laboratory. In: *Teaching Physics Innovately*. Konferenciakiadvány, szerk: A. Király, T. Tél, ELTE, Budapest 2015., 107. o. [parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php](http://parrise.elte.hu/tpi-15/proceedings.php)
9. Gyüre B., Jánosi I., Szabó K. G., Tél T.: Környezeti áramlások. Szemelvények a Kármán Laboratórium kísérleteiből, 2. rész: Kísérletek forgatott folyadékokkal. *Légkör* 51/2 (2006) 6.
10. Jánosi I., Tél T.: *Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába*. ELTE, TTK, Fizikai Intézet, Budapest 2011.
11. [www.youtube.com/watch?v=1DXHE4kt3Fw](http://www.youtube.com/watch?v=1DXHE4kt3Fw)
12. [earthobservatory.nasa.gov](http://earthobservatory.nasa.gov)
13. <http://ak.audubon.org/conservation/arctic-marine-synthesis-atlas-chukchi-and-beaufort-seas>
14. S. Martin, R. Drucker: The effect of possible Taylor columns on the summer ice retreat in the Chukchi Sea. *Journal of Geophysical Research* 102/C5 (1997) 473.
15. J. Zhao, J. Shu, M. Jin, C. Li, Y. Jiao, Y. Lu: Water mass structure Chukchi Sea during ice melting period in the Summer of 1999. *Advances in Earth Science* 25/2 (2010) 154.