

A GLOBÁLIS LÉGKÖR ÉS A VILÁGÓCEÁN MOZGÁSAI

Práger Tamás

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
e-mail: prager.t@met.hu

A földi légkörhöz hasonlóan a világoceán is *geofizikai folyadék* (*geophysical fluid*), és mint ilyen, minden időpontban és minden méretskálán állandóan mozog. A légkör és az óceán a földi éghajlati rendszer mozgó közegei. A mozgások összessége mindkét közeg esetében – mint minden gáznál és folyadéknál – *rendezetlen*, vagy csak *(nano)mikrofizikai értelemben rendezett* és *makroskálán rendezett* mozgások együttesére bontható fel. A rendezetlen (vagy nanoskálán rendezett) mozgások (hőmozgás, diffúzió) esetében a levegő- vagy vízmolekulák, vagy néhány száz molekulából álló clusterok (a víz ilyen, kb. 200 molekulából álló clusterokból áll) pályája különböző és véletlenszerű. A mikrofizikai skálán rendezett mozgások (pl. fázisátmenetek) esetében sokkal több (10^{10} – 10^{18}) molekula mozog együtt (pl. kondenzálódik, vagy beépül a jég kristályrácsába, stb.), de a rendezettség az emberi szemmel látható skálán még mindig nem jelenik meg: nem látunk mozgást. Intuitíven *mozgásról* mindkét kontinuum esetében akkor kezdünk beszélni, amikor annak rendezettsége már olyan skálájú, hogy azt érzékelni tudjuk. Ez a turbulencia néhány cm-es méretskálája, ahol legalább molnyi nagyságrendű ($\sim 6 \cdot 10^{23}$) molekula mozog együtt, a levegőben enyhe szélvullatokat, a víz felszínén enyhe hullámfodrozódást előidézve. Ezt a legalább molnyi tömegű anyagot nevezzük az elméleti leírások során *légréssznek*, ill. *vízrésznek*. Meg kell jegyeznünk, hogy egy mol víz ~ 18 g, amíg 1 mol levegő ~ 28 g, de a folyékony víz és a levegő közötti mintegy 10^3 -szoros sűrűségkülönbség miatt (ez a földi viszonyokra jellemző) a folyékony víz 1 molnyi tömege

$$V = m / \rho = 18 \text{ g} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = 0,018 \text{ m}^3 = 18 \text{ l}, (\rho_{\text{w}} = 10^3 \text{ kg/m}^3),$$

térfogatú, amíg a levegő 1 molnyi tömege normál állapotban

$$V = m / \rho = 28 \text{ g} / 1,293 \text{ m}^3/\text{kg} = 2,12 \text{ m}^3 = 2120 \text{ l}, (\rho_{\text{air}} = 1,293 \text{ kg/m}^3).$$

A fentiek alapján a víz esetében már a deciméteres (dm) nagyságrendű mozgások is rendezettnek tekinthetők, míg a dekaméteres (dkm) mérettartomány feletti mozgások már egyik közeg esetében sem teljesen rendezetlenek¹, hanem méretskálánként különböző, de *rendezett geometriával és kinematikával* rendelkező, meghatározott dinamikájú mozgások. A *meghatározott dinamika* azt jelenti, hogy ismertek a ható erők, valamint azok egymáshoz és a mozgásban fellépő gyorsulásokhoz viszonyított nagyságrendje: a mozgásra felírható a Newton 2. törvényét tükröző *mozgásegyenlet*. A m-es mérettartomány feletti mozgásokat egységesen mindkét közegben *rendezett* mozgásoknak nevezzük.

A *rendezett* mozgások mindkét közegben méret szerinti osztályokba, nagyságrendi hierarchiába rendezhetők, s mindkét közegben egyformán alkalmazható a *hasonlósági elmélet*, ennek alapján elvégezhető az egyes méretosztályokba tartozó mozgások

¹ A „klasszikus” meteorológia-fogalmat elfogadó kutatók számára talán szokatlannak tűnik az ilyen kis léptékű mozgások „rendezett”-nek nyilvánítása, de gondoljunk például az épületek körül kialakuló áramlásokra, melyek napjainkban már tervezhetők.

nagyságrendi analízise: észlelt és mért *geometriai és kinematikai* sajátosságaik alapján az őket kormányzó erőviszonyokra, azaz a *dinamikájukra* való következtetés.

Az előzőekben tárgyalt fizikai és termodinamikai sajátosságok miatt² – a légkörhöz hasonlóan – az óceánban sem választhatók el az áramlástan és a hőtani folyamatok: az óceán esetében is az egymással kölcsönhatásban lévő hidrodinamikai és termodinamikai folyamatok elmélete építhető fel, amit az *óceán hidro-termodinamikájának* (v. termo-hidrodinamikájának) nevezünk. Ennek megfelelően mind a légkör, mind az óceán rendezett mozgásaiban általában együttesen jelennek meg az áramlások és hőtani folyamatok, tehát ezek minden mérettartományban általában *hidro-termodinamikai képződmények, vagy mozgásrendszerek*.

A (gyakorlatibb, vagy elméletibb megközelítésű elnevezéssel) *képződmény*, vagy *mozgásrendszer* mindig egy meghatározott méret és időskálájú *önszervező* (tehát saját geometriáját, kinematikáját és termodinamikáját kialakító) és *kvázi-zárt* (tehát a környezetétől elkülönülő, a környezettel a saját belső kölcsönhatásainál viszonylag gyengébb kapcsolatban álló) fizikai rendszert jelent mindkét társtudományban.

A fentiekben elmondottak ellenére a légkör és az óceán dinamikája között számos jelentős különbség van. Melyek ezek közül a legfontosabbak?

- A **légkörben** fellépő – s a meteorológusokat tudományos szempontból érdeklő – mozgásokat döntő részben *belső dinamikai instabilitások* hozzák létre, míg az **óceánban** számos – az oceanológusokat igencsak érdeklő – mozgásforma (pl. a szél keltette hullámozgás vagy a tengerjárás: az ár-ápoly) kialakulása egyértelműen *külső kényszerhatásokra* vezethető vissza.
- A **légkörben** zajló mozgások döntő része – a levegő gáz halmazállapotából következő inherens³ (és jelentékeny mértékű) összenyomhatósága miatt – kapcsolt hidro-termodinamikai folyamatok együttese, azaz hidro-termodinamikai rendszer. A rendezett mozgás-skálán *nagyon kevés* olyan légköri folyamat van, amely *kizárólag áramlási*, tehát benne a levegő összenyomhatatlan közegként viselkedik. A hőközlés, ill. hőelvonás során a gázokra jellemző térfogati munka miatt természetes körülmények között a légkörben *szinte egyáltalán nincsenek tisztán hőtani* folyamatok (a 0,3 mm vastagságú felszínközeli diffúzív alréteget kivéve). Az **óceánban** ezzel szemben – a víz folyékony halmazállapotából következő inherens összenyomhatatlansága (azaz igen kismértékű összenyomhatósága) miatt – számos olyan mozgás van, amely tisztán áramlási jellegű, és – a víznek a levegőnél 3 nagyságrenddel nagyobb sűrűsége miatt – jelentős szerepük van a tisztán hőtani folyamatoknak is, mint pl. a diffúzív hővezetés, stb.
- Valójában a **légkör** a vele kölcsönhatásban levő felszíni alrendszerek által a legjobban befolyásolt éghajlati alrendszer, hiszen még a légköri mozgások fő hajtóereje, a Nap sugárzó energiája is nagyrészt a felszín közvetítésével jut el a légkörbe. A felszínt alkotó alrendszerek: a kontinensek, az óceánok, a krioszféra és a bioszféra egyaránt a

² Ha az óceán édesvízű volna, akkor a víz összenyomhatatlansága miatt lényegében szétválasztható lenne a kétdimenziós (ρ , T) fázisterű hőtani és a p nyomás által (is) kormányzott áramlástan folyamatok osztálya. Az édesvízű tavakban ez gyakorlatilag meg is tehető. A tengervíz változó sótartalma és ennek a sűrűséget jelentősen befolyásoló hatása miatt viszont az óceánra – a légkörhöz hasonlóan – csak háromdimenziós (ρ , S , T), vagy – a nagy mélységet is figyelembe véve – négydimenziós (ρ , S , T , p) fázisterű (pszeudo-) termodinamika építhető fel, s ez nem függetleníthető az áramlástan folyamatoktól.

³ Lényegéből fakadó, elválaszthatatlan részét képező.

légköri folyamatokat jelentősen befolyásoló tényező. Az általuk kifejtett hatások egyaránt lehetnek mechanikai kényszerek (érdesség, domborzat), termikus kényszerek (fűtés, ill. hűtés szenzibilis és latens hőcsere útján), valamint a légköri vízzel kapcsolatos kényszerek: víztartalom-növelés (nedvesítés), vagy -csökkentés (kiszáritás). A légkör – mint gyors közeg – a hatások „szállítója” az éghajlati rendszerben⁴. Ez azonban nem tűnik fel első látásra, mert a légkör a földi alrendszerek közt legnagyobb önszervező képessége folytán mintegy „elrejtí” mozgásrendszereinek eredetét: igen markáns légköri képződmények jönnek létre igen rövid idő alatt minden méretskálán, melyekről első pillantásra nem is gondolnánk, hogy voltaképpen a lassú rendszerek hatása váltja ki őket. Pl. trópusi ciklonok nem keletkeznek felmelegedett tengerfelszín nélkül, éghajlati anticiklonok (hónapokig fennálló magasnyomású képződmények) nem keletkeznek erősen lehűlt, hóval borított kontinens-felszín nélkül, mediterrán ciklonok nem keletkeznek az Alpok domborzati (orografikus) kényszere nélkül stb.

- A köztudatban – s a közelmúltig a tudományos gondolkodásban – viszont a fent mondottakkal ellentétben az volt, ill. ma is az az általános vélemény, hogy az **óceánt a légkörnél** nagyobb mértékben befolyásolják a kölcsönható földi alrendszerek, elsősorban a szárazföldek és a légkör. A szárazföldeket azért gondoljuk nyilvánvaló befolyásoló tényezőnek, mert meghatározzák az óceánok és a tengerek alakját, geometriáját, s így áramlási viszonyait is. Az utóbbi gondolatot az óceán légköri kormányzásáról a tenger szél által keltett hullámozgása sugallja, amely szerves része a tengerről alkotott képünknek. E látszat ellenére a valóságban az óceánnak – amely globális skálán teljes mélységében sem vastagabb réteg, mint a légkör⁵, csak a felső 100 m-es keveredési rétegében zajlanak jelentős kölcsönhatások a többi felszíni alrendszerrel, amíg mélyebb zónája a közvetlen kölcsönhatások elől elszigetelt (intakt), kizárólag belső hatások mozgatják⁶.

A fenti alapvető különbségek hatására az óceánban kifejlődő mozgásrendszerek *megjelenési formája, geometriája* meglehetősen eltér a légköri megfelelőiktől, pedig *dinamikájuk* nem is különbözik túlságosan, hiszen mindkét esetben ugyanazok, vagy majdnem ugyanazok a ható erők.

Az óceán mozgásrendszereinek, akárcsak a légköri mozgásrendszereknek inherens tulajdonsága a *nem-linearitás (non-linearity)*, azaz a kaotikus jelleg, s a vele járó korlátozott előrejelezhetőség. Tudjuk, hogy a „nem-lineáris mozgás” kifejezés tulajdonképpen egy metafora⁷: a mozgást leíró differenciál-egyenletek nem-lineáris tulajdonságának (azaz annak, hogy a mozgást meghatározó függvények és deriváltjaik szorzatait is tartalmazza, elsősorban az advekciót leíró tagokban) az átvitele magára a

⁴ A légkör a földi környezeti közegek „Merkur”-ja, a gyors üzenetvivő, aki nem véletlenül volt a szelek istene a görög mitológiában.

⁵ A Föld sugarához képest mindkét közeg igen sekély „burkot” alkot, áramlásaik a Föld mélyebb rétegeiben, a köpenyben és a magban zajló áramlásokhoz képest kétdimenziósak: $H_{\text{atm}} \sim H_{\text{óc}} \sim 10^{-3} H_{\text{Föld}}$.

⁶ A világoceán tényleg a földi környezeti közegek „Neptun”-ja, a víz(felszín) alatt rejtőzködő, ritkán megmutatkozó kiismerhetetlen óriás, aki a tenger istene volt a görög mitológiában.

⁷ Az ókorban metaforának nevezték azt a szófordulatot, amikor valaki egy hasonlatot használt egy általa meg nem nevezett dolog nevének nevezése helyett, azért, mert (1) az egyik dolog hasonlít a másikra, vagy (2) nem létezik megfelelő szó az említett dologra (nyelvi, szókincsbeli hiányosság esete).

„... [a metafora] helyénvalónak látszik, ha a szóban forgó dologra külön kifejezés, így e szóképet a megvilágítás, nem üres szójáték céljára alkalmazzuk” (Cicero, 228)

„Névátvitelnek azt nevezem [...] amikor a hasonlóság alapján átvisszük valamely szó jelentését egy másikra, vagy díszítő célzattal, vagy a nyelv fogyatékosága miatt.” (Cicero, 231)

mozgásra. A nem lineáris mozgások tehát – általában – azok a mozgások, melyekben nincs meg az egyszerű alapmozgások: egyenes vonalú mozgás, körmozgás, rezgőmozgás, (lineáris) hullámmozgás stb. lineáris, vagy periodikus változékonysága. Változékonyságuk, a pályák változása bonyolultabb, kiszámíthatatlanabb, mint az előbb felsorolt „lineáris mozgásoké”.

Ugyanakkor mind az óceánban, mind pedig a légkörben számos olyan mozgás van, amely közel lineáris, vagy közel periodikus. Ha egy laikus embert megkérdezzük, hogy szerinte mi a légkör jellemző mozgása, 99%-ban biztosak lehetünk, hogy azt válaszolja: „a szél”, vagyis a lineáris légáramlás. Ha ugyanezt a kérdést a tengerrel kapcsolatban tesszük fel neki, akkor pedig 99%-os biztonsággal azt a választ kapjuk: „a hullámozgás”. A valóságban mind az áramlások, mind pedig a hullámok mindkét közegnek egyformán jellemző alap-mozgásformái. Sőt, ennél még több is igaz: nevezetesen a következő állítások tehetők:

A földi légkör és az óceán minden mozgása dinamikailag közel áll egy egyenes vonalú, vagy egy hullámmozgáshoz, aminek az az oka, hogy a nem-lineáris advekciónak és disszipációnak hatása nem képes teljesen megváltoztatni, ill. „kitörölni a mozgásból” a lineárisan kifejezhető ható erők által létrehozott egyenes vonalú, vagy hullámmozgás jellemzőket. Ezért a lineáris mozgások dinamikai analízise minőségileg (kvalitatíve) átvihető a nem-lineáris mozgásokra is, tehát voltaképpen az összes rendezett mozgásra.

Ez a kijelentés azért bír nagy gyakorlati jelentőséggel, mert a matematika klasszikus megoldási módszerei (Fourier-módszer, Green-függvényes módszer stb.) – csekély kivétellel – csak a lineáris differenciálegyenletekre alkalmazhatók, míg a nem-lineáris differenciálegyenletekre nem. Ezért korábban azt mondtuk, hogy ezek az egyenletek nem oldhatók meg. Ma – a matematika fejlődését tükröző korszerűbb szóhasználattal – azt mondjuk, hogy ezeknek az egyenleteknek nem létezik analitikus függvényekkel leírható zárt alakú megoldásuk.⁸ A klasszikus értelemben vett dinamikai analízis elvégzése pedig ilyen megoldásokat, s azok előállítását igényli.

Ezért, – amellett, hogy számos nem klasszikus értelemben vett dinamikai analízis látott már napvilágot a nem-lineáris megoldásokkal kapcsolatban – mégis a mai napig az az alapvető eljárás, hogy egy nem-lineáris rendszer dinamikai analízisét a lineáris megoldásokra szorítkozva végzik el, majd az eredményeket – mindenképpen heurisztikus elemeket is tartalmazó logikával átvizsgálva a teljes megoldás-halmazra. A lineáris megoldások részhalmazának előállítását szolgáló módszerek neve *linearizáció*, amely a rendszert leíró differenciálegyenleteken elvégzett olyan átalakítást jelent, melynek eredményeként a nem-lineáris egyenletekből lineárisakat nyerünk, a fizikai tartalom megőrzésével. A fizikai tartalom megőrzése (vagy fizikai konzisztencia) azt jelenti, hogy a linearizált egyenletek megoldásainak benne kell lennie (speciális, lineáris megoldásként) az eredeti, nem-lineáris egyenletek megoldás-halmazában, azaz nem mondhatnak ellent a nem-lineáris egyenletek által leírt fizikai törvényeknek.

⁸ Ez a kijelentés azt jelenti, hogy a jövőben is kizárható ilyen megoldást adó módszerek kifejlesztése. Az ún. analitikus függvények (amelyek az általánosan használt polinom-, hatvány-, trigonometrikus, stb. függvényeket jelentik) ugyanis olyan tulajdonságúak (pl. végtelen sokszor differenciálhatók, tehát Taylor-sorba fejthetők stb.), amelyekkel a nem-lineáris egyenletek megoldásai nyilvánvalóan nem rendelkeznek. Ezzel szemben az utóbbi függvényeknek olyan, mára többé-kevésbé jól ismert tulajdonságaik vannak, mint a bifurkációk, különös attraktorok, fraktáldimenzió stb., melyeket egyetlen analitikus függvénysem tud felmutatni. A természettudományok szempontjából a lényeg az, hogy ezen megoldások klasszikus értelemben vett dinamikai analízise nem végezhető el.

A földi légkörben kialakuló hullámmozgások első áttekintő (az alapvető mozgásformák mindegyikére kiterjedő, de távolról sem teljes) dinamikai analizését már az 1950-es években elvégezték. Ez, és az azóta elvégzett számtalan hasonló vizsgálat lehetőséget ad arra, hogy hozzávetőleges képet kapjunk a légkörben fellépő hullámmozgások alapvető típusairól, s azok fő dinamikai jellemzőiről. Az eredményeket az 1980-as évekre az óceán hullámmozgásaira is átvitték, tehát ma a légkör és az óceán lineáris, és egyes nem-lineáris hullámairól körülbelül azonos mélységű tudással rendelkezünk. A linearizációs módszerek közül a nem-lineáris valóságot legjobban közelítőnek, és ezért a legszélesebb körben alkalmazottnak az ún. *kis perturbációk módszere* bizonyult. Ezzel a módszerrel új, túrhető pontossággal leírható bármely nem-lineáris képződmény fejlődésének korai szakasza, amikor még az advekcio és a disszipáció hatása kicsi.

Eszerint mind a légkörben, mind pedig az óceánban a következő táblázatban megadott alapvetően különböző fizikai természetű hullámmozgások lépnek fel, ill. alkotják a nem-lineáris mozgások alapját:

Hullámfajta	Kormányzó erő	Hullámtípus	Fázissebesség
3D hanghullámok	nyomási gradiens erő	longitudinális	340 m/s, illetve 1450–1500 m/s
3D gravitációs hullámok	gravitációs erő	általános	10–80 m/s
2D felületi gravitációs hullámok	gravitációs erő, felületi erők	általános, kvázi transzverzális	200–300 m/s
2D inerciális hullámok	a földforgás eltérítő ereje (Coriolis-erő)	kvázi-kétdimenziós körhullámok	10–30 m/s
2D Kelvin-hullámok	a földforgás eltérítő ereje (Coriolis-erő)	kvázi-kétdimenziós síkhullámok	2–3m/s
2D Rossby-hullámok	a földforgás differenciális (változó) eltérítő ereje	kvázi-kétdimenziós, kvázi-transzverzális	10–15 m/s
árapály hullámok	differenciális (változó) gravitációs erőtér	kvázi-kétdimenziós, kvázi-transzverzális	200–300 m/s

A táblázathoz a következő megjegyzéseket lehet fűzni:

1. A hanghullámokat sem a meteorológiában, sem pedig az oceanológiában általában nem vizsgálják a többi hullám-mozgással együtt mozgásként, ill. dinamikai folyamatként, mivel: (a) keletkezésüket másodlagos folyamatoknak köszönhetik (hullám-morajlás, mennydörgés) (b) energiájuk a többi hullámfajtnál lényegesen kisebb, és (c) nem nagyon lépnek kölcsönhatásba a többi hullámfajttal és nem-lineáris folyamatokká sem fejlődnek át. Az akusztika tehát egyik tudományterületen sem képezi szerves részét a dinamikának.

2. A légkörben és az óceánban egyaránt a nagytérségű mozgások kialakításában kitüntetett szerepük van az inerciális, a külső és a belső gravitációs hullámoknak, ill. az azokból kifejlődött nem-lineáris mozgásformáknak, amelyek egymással (lineáris és nem-lineáris) kölcsönhatásba lépve alakítják ki a különböző bonyolult mozgásrendszereket. Ezek a folyamatok azonban jelentősen különböznek a légkörben és az óceánban.

A következő táblázatban a fent felsorolt hullámmozgás-típusok szerepét és az általuk létrehozott (belőlük kifejlődött) nem-lineáris képződményeket tekintjük át a két közegben (hanghullámok nélkül):

Hullámfajta	Megjelenési forma (manifesztáció)		Jelentőség	
	Óceán	Légkör	Óceán	Légkör
3D gravitációs hullámok	konvekció (só-ujjak) és ventilláció (vízsüllyedés-emelkedés)	konvekció (termikék, konvektív felhők, zivatarok, konvektív rendszerek), szubtrópusi és trópusi ciklonok hő-utánpótlása	közepes	kiemelt
2D felületi gravitációs hullámok	szél keltette hullámok, vízlengés (seiche), viharhullámok (storm surge), tsunami	orografikus hullámok, frontális hullámok, tropopauza hullámok	kiemelt	nagy
2D inerciális hullámok	óceáni medencék tengeráramlatai	trópusi ciklonok	nagy	nagy
2D Kelvin-hullámok	trópusi óceán évszakos viselkedése	trópusi légkör évszakos viselkedése	közepes	közepes
2D Rossby-hullámok	stacionárius örvénygyűrűk	mérsékelt övi ciklonok és anticiklonok	közepes	kiemelt
Árapály hullámok	tengerjárás (árapály jelenség)	légköri árapály	nagy	kicsi

Előadásunkban, a fenti elméleti dedukcióra támaszkodva – lezárva a fenti, alapvetően dinamikai szemléletű okfejtést, ám felhasználva annak eredményeit – elsősorban jelenségtani szempontból tekintjük át az óceán mozgásrendszerét, a légköri mozgásrendszerekkel való összehasonlításban.