

Sekély tavak szél keltette áramlásai

Kaotikus elkeveredéshez vezető tér- és időstruktúrák

A Balatonról készült űrfelvételen (1. ábra) az infravörös tartományban meglehetősen összetett mintázat figyelhető meg, ami a tóvíz egyenlőtlen zavarosságából következik. Mi rendezi a zavaros és az átlátszóbb vizeket ilyen szálas, kacsos mintázatba?

Az űrfelvételen világosan megjelenő területek magas lebegtetett üledéktartalomra utalnak. Noha a Balatonba ömlő patakok a felhőszakadások során lökésszerű üledékforrást jelentenek, és hosszabb távon a tó feltöltődéséhez vezetnek, a zavarosság ideiglenes, nagytérségi megjelenéséért nem a vízfolyások pontbeli ho-



1. ábra. A Balaton zavarossága infravörösben a Landsat űrfelvételén, viharos időszakban

zama, hanem elsősorban a tófenékről felkeveredő üledék a felelős. Jól tudjuk, hogy csak kellően erős turbulencia és azt kísérő vízmozgás- és nyomáslüktetés képes az iszap- és homokszemcséket elragadni a mederfelszínről és olyan mértékben fölkeverni, hogy a zavarosságot a vízfelszín közelében is meg lehessen figyelni. Szembetűnő, hogy az űrfelvételen a déli part mentén zavarosabb a víz. Mivel a felvétel novemberben, ÉNy-i viharos időszakot követően készült, így kizárhatjuk a strandolók hatását: a turbulencia keletkezését a hullámmozgás és áramláson keresztül a szél közvetett hatásához kell kötnünk. A víztestbe felkeveredett üledéket aztán a tó áramlásai továbbviszik, és elkeverik a szomszédos vízterekkel. Ahogyan látni fogjuk, a Balatonhoz hasonló sekély tavakban a vízszintes forgó, kerengő áramlások, a vízszínelendülés és a vízlengés együttes hatásával magyarázható a tóléptékű szálas struktúrák kialakulása. Megjegyezzük, hogy cikkünk – Zsugyel Márton és szerzőtársai ugyanezen számban a folyami elkeveredési jelenségekről írt cikkével ellentétben – elsősorban nem az elkeveredés részletes kaoszelméleti elemzésével, hanem sekély tavak szél keltette áramlásaiban a kaotikus elkeveredéshez vezető tér- és időstruktúrákkal foglalkozik.

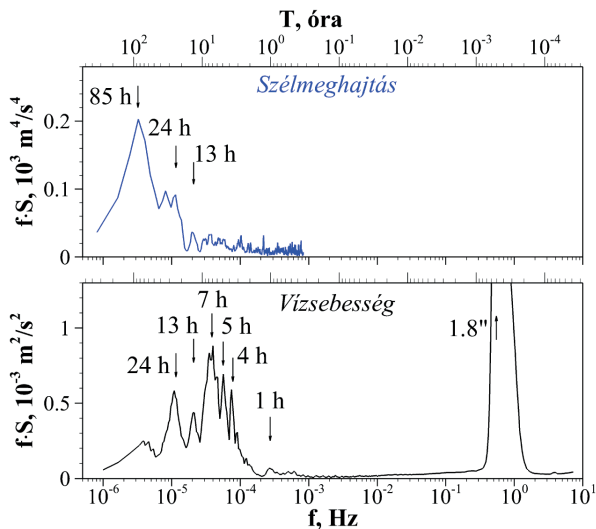
Szél keltette vízmozgások széles palettája

A tavi vízmozgás széles tér- és időbeli spektrumot ölel fel, és sokrétű kapcsolatban van a széllel. A vízmozgás legfinomabb skáláin találjuk a vízmolekulák hőmozgását. A részecskék véletlenszerű, de mikroszkopikus pályán bolyonganak, így az ebből fakadó molekuláris diffúzió nagyobb térléptékben nem kever el hatékonyan. A skála másik végén pedig az öböl- és tóléptékű vízmozgások helyezkednek el, amelyekben már erősen érvényesül a gerjesztő szél változékonysága. E két szélső lépték közötti spektrumot folyamatosan kitöltik a vízmozgás különböző összetevői. Ahogy a finomabbtól a nagyobb méretekig haladunk, úgy érvényesül fokozatosan a nehézségi erőter, és ezekben a sekély vizekben úgy válik a mindenirányú, háromdimenziós mozgás egyre inkább vízszintessé [1].

Második nagy tavunkat, a Fertőt véve példaként, az ottani szél- és áramlásméréseink feldolgozásával szemléltethető, hogy egy sekély tóban hogyan oszlik meg a tó mozgási energiája a különböző időskálájú mozgásai között. A Püspök-sziget keleti oldalán, az északi és déli medencét összekötő szűkületben akusztikus anemométerrel és szintén akusztikus áramlásmérő műszerekkel több héten át, nagy időfelbontással rögzítettük a sebességvektorok idősorait. Az idősorokat az 1/8 másodperctől a 11 napig terjedő periódusidejű, sok ezer periodikus összetevőre bontottuk fel. Az ún. energiaspektrumon ezeknek a sebesség-összetevőknek a mozgási energiáját jelenítjük meg a frekvencia és a periódusidő függvényében (2. ábra). Az alsó keret a vízsebesség, a felső pedig a négyzetes szélesebesség spektrumát mutatja. (Miért emeljük négyzetre a szélesebességet? Azért, mert a turbulens áramlással körüláramlott járművek légellenállásához hasonlóan a tófelszínre ható szél-csúsztatófeszültség és ezen keresztül a légtérből a víztestbe való mozgásmennyiség-bevitel a szélesebességnek közelítően a második hatványával arányos.) A vízszintes tengelyek logaritmikusak, így a szomszédos beosztásaik között tízszeres a viszony. Ahhoz, hogy a görbék alatti terület a logaritmikus beosztás ellenére is érzékeltesse a teljes energiát, a 2. ábrán az ún. varianciamegtartó energiaspektrumokat szerkesztettük meg, amelyek az energiasűrűség és a frekvencia szorzatát ábrázolják.

Az alsó görbe lomhán változó, azaz alacsony frekvenciájú végén kiemelkedik a 24 órás periódusidejű ingadozás, amely a szárazföld, a Fertő víz borította nádas és a nyílt tó egyenlőtlen fölmelegedéséhez köthető ebben a kora nyári mérési időszakban. Tudvalevő, hogy ez a hőmérséklet-különbség idézi elő a vízi sportolók által kedvelt, szabályos napi ismétlődésű termikus szeleket, valamint a tó és a nádas közötti vízszintes sűrűségi áramlásokat. A szélmeghajtás energiaspektrumában történetesen nem jelenik meg ilyen nyomatékosan a napi széljárás.

A szél hatására öböl méretű vízszintes köröző áramlások rendszere fejlődik ki. Állandósult szél esetén a forgó víztest széllel együtt haladó ága jellemzően a sekélyebb vagy a szélnek jobban kitett tórészekre esik, a visszatérő áramlás pedig a mélyebb vagy



2. ábra. Fertő-tavi áramlás (alsó keret) és szélmeghajtás (felső keret) energiájának varianciamegtartó eloszlása a frekvencia (alsó tengelyek) és a periódusidő (felső tengelyek) szerint

szélvédettebb területeken alakul ki. Erre a vízszintes, teljes mélységre kiterjedő áramképre ráakódik egy függőleges síkban átforduló, szállítószalagszerű áramlás is, amely a felszínhez közel a széllal együtt halad és a szél alatti parton alábukik. Sekély tavakban a vízben oldott tápanyagok, a lebegő iszapszemcsék nagy távolságot a vízszintes forgókkal képesek megtenni, míg az átforduló áramlások gyengébbek, a mélység mentén sebességegyenlőtlenséget létrehozva elsősorban diszperziós hatásúak. A szél változásaihoz igazodva a tó vízszintes áramképe is átrendeződik, de ezt a tehetetlensége folytán késleltetéssel és csillapítva teszi, aminek eredményeképpen a forgóknak folyamatosan változó, bonyolult mintázata jön létre. A Fertőben a forgók tehetetlenségét óránál hosszabb időléptékekkel jellemezhetjük, ami fölött a mozgási energiájuk spektruma szorosan tükrözi a szélmeghajtását. Valóban, jól megfigyelhető ez az energiasűrűség csúcsainak egybeesésén a 4 órás és az ennél hosszabb periódusidőknél. Sekély tavak időléptékű köröző áramlásainak időbeli kifejlődéséről, a vízszintes és függőleges síkú forgók viszonyáról bővebben olvasható pl. a [2] hivatkozásban.

Jóllehet alacsonyabb energiasűrűséggel, de a szélesebb frekvenciasáv miatt mégis nagyobb összenergiával jelenik meg a vízsebesség 7–8 órás periódusú összetevője. Ez a mozgás azzal függ össze, hogy tartósabb szél hatására az eredetileg vízszintes vízfelszín kilendül, és ezzel együtt a víztömeg súlypontja elmozdul a szél irányába, a szél elálltával pedig fokozatosan visszatér az eredeti nyugalmi helyzetébe. A műszerünkkel a Fertőt két nagy medencére tagoló szűkületben mértük az ábrán feldolgozott áramlási sebességet, így tehát el is várhattuk, hogy a spektrumban érzékenyen kimutatható a vízfelszín szél okozta kilendülése, amelyet a szűkület korlátozott vízszállító képessége ráadásul el is nyújt időben.

Ha megerősödik, gyengül, vagy akár csak irányt változtat a szél, az egy új egyensúly irányába téríti ki a víztömeget, miközben az előző egyensúly periodikus csillapodással tűnik el belőlük. Így a heves szélváltozások hatására olyan periodikus állóhullámok keletkeznek, amelyek az ellentétes tópartok között, többé-kevésbé a 3. l. tengelyében oda-vissza verődnek. Ezt hívjuk vízlengésnek [3]. Általában az adatainkban az egy csomópontú vízlengés jelenik meg leghangszúlyosabban, mert a több csomópontú ún. felharmonikusok gyorsabban csillapodnak, és hamar elvesznek a többi hullám „zajában”. A vízlengés periódusidejét egyszerűen meg tudjuk becsülni. Az egy csomóponttal lengő vízfelszín hullámhossza a tó (szélirányban vett) hosszának kétszeresét teszi ki, és mi-

vel ez több nagyságrenddel nagyobb a h vízmélységnél, ezért a felszíni hullám terjedési sebessége a tengeri szökőáraknak köszönhetően sokak által ismert $(gh)^{1/2}$ összefüggéssel közelíthető, ahol g a nehézségi gyorsulás. Ha a Fertő átlagos vízmélységét $h = 1,1$ m-rel vesszük föl, akkor a hullám sebességére $(9,8 \cdot 1,1)^{1/2} = 3,3$ m/s adódik. A nagyobb, északi tómedence hossza ~ 24 km, a két medence együttes hossza pedig ~ 30 km, az ezekhez tartozó hosszirányú vízlengés tehát 48, ill. 60 km-es hullámhosszal jellemezhető. Ezeket osztva az előbb becsült terjedési sebességgel megkapjuk a periódusidőt, azaz 4, ill. 5 órát. Ha visszatekintünk a 2. ábrára, akkor ezek a csúcsok jól elkülöníthetők a spektrumon. A gyakori É-ÉNy-i és D-DK-i szélirányok mellett a tó keresztirányban, 5–7,5 km-es szélességben leng, az ehhez tartozó 50–75 perces csúcs is megjelenik a spektrumban, de jóval alacsonyabb energiataralommal.

Mélyebb tavakban (mint például a Mondsee vagy a Bodeni-tó) és tározókban a mi sekély tavainkhoz képest az a fő különbség, hogy a szeles időszakokban is megmarad a hőmérsékleti rétegződés, és a vízfelszín mozgása mellett a felső kisebb, és az alsó nagyobb sűrűségű vízrétegeket elválasztó belső határfelület is képes lengésbe kerülni. Így a sekély Fertőben vagy a Balatonban ennek az ún. belső tölengésnek nem várjuk a megnyilvánulását, és zárt, nem nagy medencejellegűk miatt az árapályjelenségnek sem.

A fenti, strukturált vízmozgások folyamatosan energiát szolgáltatnak a finomabb léptékű vízmozgásoknak, és ez az energiaátvitel a frekvenciával fokozatosan csökkenő energiasűrűséggel jellemezhető. A hazai tavainkon a 0,5–1 Hz közötti frekvenciasávban azonban megjelenik a hullámozás energiacúcsa, mégpedig igen jelentős energiataralommal. A 2. ábrán ennek az energiataralomnak a súlypontja az 1,8 másodperces periódusidőnél található. (Mivel a lassabb mozgásösszetevőkhöz igazítottuk a függőleges tengely felső határát, így az $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s² energiacúcs nyilvánul ki ábrán.) A vízlengéssel szemben a hullámozás nem áll, hanem haladó hullám, ugyanis a hullámgerinc (ahogy a hullám völgy is) meghatározott irányban terjed. A hullámozó vízfelszín alakját a terjedés irányában harmonikus függvényvel is közelíthetjük. A hullámozás hatására a felszín alatti vízrészecskék is mozgásba jönnek: közel zárt, ellipszis alakú pályát írnak le. A felszíntől lefelé haladva zsugorodnak a pályák, és csak a sekély tórésteken éri említésre méltó hullámhatás a mederfelszínt. A valós hullámozás ennél persze összetettebb, mivel különböző frekvenciájú és irányú harmonikus összetevőből áll, és ezek együttesen, véletlenszerű fázisban halmozódva alakítják a víz mozgását. A periodikus hullámozás azonban nem képes a tóléptékű elkeverésre, holott a mozgásienergia-tartalma a nagyobb áramlási struktúrákéhoz mérhető. A Balatonban mellesleg azért alkalmas a zavarosság ezeknek a struktúráknak a megjelenítésére, mert az üledék felkeveredése a hullámozásnak kitett parti sávra korlátozódik, és ezáltal követhető a csóvák behatolása a mélyebb, tehát átlátszóbb tórésekbe.

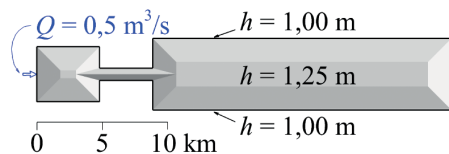
Számítógéppel modellezett elkeveredési mintázat egy tagolt tóban

A következőkben számítógépes szimulációt hívunk segítségül ahhoz, hogy a szél okozta, nagyobb léptékű tavi elkeveredés tér- és időbeli részleteit egyszerre vizsgálhassuk – erre ugyanis a pontbeli terepi mérések és a távoli, pillanatokat megörökítő távérzékelési eljárások nem adnak lehetőséget. Leegyszerűsítjük a modellezési feladatot, de csak annyira, hogy a valós tavakban meghatározó vízmozgások hasonló módon létrejöhessenek a mesterseges tavunkban is, amelyet a Fertő ihletett.

A modelltavat két téglalap alakú medence alkotja (3. ábra): a nyugati mérete $\sim 4 \times 5$ km, a keletié $\sim 5 \times 23$ km, és ezeket egy ~ 1 km széles és ~ 4 km hosszú szűkület köti össze. A part mentén a nyugalmi vízmélység 1 m, a medencék és a csatorna közepén a meder fokozatosan 1,25 m-re mélyül. Azt várjuk a szűkülettől,

hogy összetetté teszi a vízlengés és a vízszín-kilendülés időbeli dinamikáját, hasonlóan a Fertő, a Balaton vagy a Tisza-tó meder-tagoltságához. A tavat a Fertő partján mért szél-időssorral hajtjuk meg, így elérjük, hogy a légköri külső gerjesztésnek valós energiaspektruma legyen. Azt is figyelembe vesszük, hogy a szél felőli parttól távolodva a tófelszín fölött a gerjesztés fokozatosan megerősödik, a szélmeghajtást ennek megfelelően vízszintes síkban is egyenlőtlené tesszük [4].

Az elkeveredést nem a viharok során felkeveredő iszappal, hanem a tó nyugati medencéjébe kis hozammal, folyamatosan beeresztett jelzőanyaggal érzékeltetjük. Mellesleg a numerikus szimuláció egyik előnye a terepi mérésekkel szemben, hogy nem jelent problémát olyan jelzőanyag alkalmazása, amely garantáltan nem ülepedik ki, nem bomlik le, és nincs káros hatással a természetes környezetre. Több hónapos időszak vízáramlásait és jelzőanyag-mozgását modellezzük a tavat sűrű rácshálóval lefedő számítási eljárással. Az egyszerűség érdekében minden számított áramlási jellemző mélységátlagolt, azaz a modellünk nem veszi figyelembe a mélység menti eloszlás egyenlőtlenégeit. Lássuk,



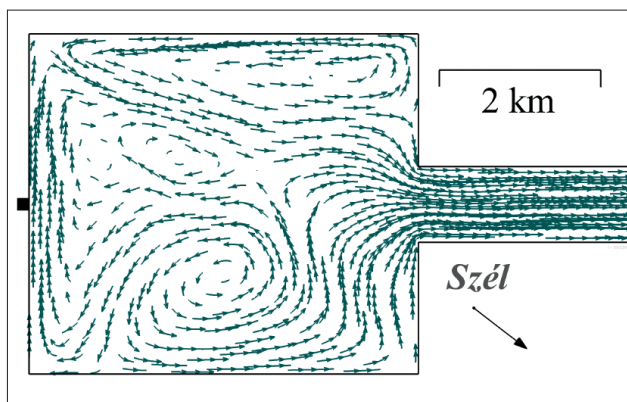
3. ábra. A modellő helyszínrajzi vázlata a mélységeloszlás (h) és a beeresztés helyének (Q) érzékeltetésével

hogyan elég-e a balatoni zavarosságban megfigyelt szálás mintázat reprodukálásához!

Egy jellemző áramkép (4. ábra) áramlási vonalainak serege azokat a rövid pályákat mutatja, amelyeket a véletlenszerűen kiosztott jelzőpontok 3 óra alatt bejárnának akkor, ha ebben a pillanatnyi állapotában rögzítenénk a sebességmezőt. A vonalakon az áramlás irányát is jelöltük. A kisebb tómedencében az adott pillanatban három forgó ismerhető fel, amelyek fogaskerekéhez hasonlóan a szomszédjaikkal ellentétes irányban forognak. Habár a szél energiájának csak a töredéke jelenik meg az általa keltett tavi áramlásokban, ez is tetemes távolságra és maradandóan képes vízszintesen elmozdítani a víztömegeket. Ezen az áramképen természetesen nemcsak a forgók jelennek meg, hanem azoktól szétválaszthatatlanul a kilendüléshez és a vízlengéshez köthető **sc-beség**komponensek hatása is.

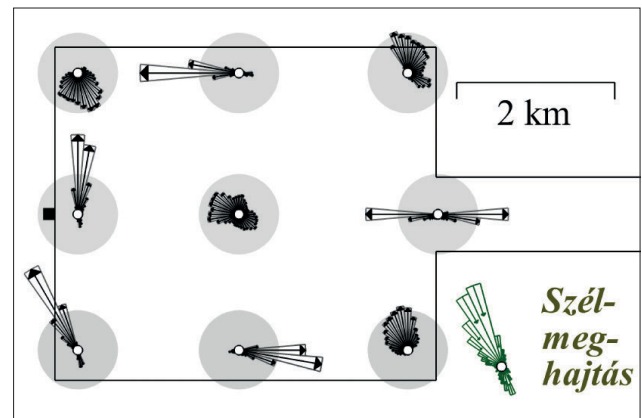
Mielőtt a jelzőanyag elkeveredésére rátérünk, nézzük meg, hogy egy adott, száznapos időszak alatt milyen eloszlást mutat az áramlás! A medence kilenc pontjában megszerkesztettük az áramlás

4. ábra. Pillanatnyi áramkép ÉNy-i szél hatására a modellő nyugati medencéjében



irányának gyakorisági kördiagramját (5. ábra). Ezeket a kördiagramokon a kört egyenletesen 36 körcikkre osztottuk fel, és az egyes körcikkeket azzal arányos sugárral rajzoljuk meg, hogy milyen gyakorisággal haladt az áramlás az adott irányban a szimuláció során. A gyakoriságokat a sebességgel súlyozzuk, ennél fogva azokat az irányokat emeljük ki, amelyekben gyakran és egyúttal nagy sebességgel áramlott a víz az adott pontban. A szélmeghajtás jobb alsó sarokban látható kördiagramjával (ami mellesleg nem más, mint a szélesebb négyzetével súlyozott szélrózsa) összevetve megállapítható, hogy a tavi áramlások iránya a szél irányától függetlenül alakul, és meglehetősen változékony a vizsgált medencén belül. Az kézenfekvő, hogy egy meredek tópart tereli az áramlást, de a tó alakja, mederdomborzata a parttól távolabb is erőteljesen befolyásolja az áramlás irányát. Azt várjuk, hogy a medencének a vízlengés és a kilendülés uralta bizonyos részein az ellentétes áramlási irányok azonos gyakorisággal szerepeljenek. Az olyan pontokban pedig, amelyeken gyakran halad át a vízszintes forgók peremzónája, a gyakorisági ábra legyen aszimmetrikus.

Látjuk, hogy a szűkület szájában a vízlengés és a kilendülés a meghatározó, vízszintes forgók megerősödéséhez nem elég széles a szűkület. Az áramlást itt részben közvetlenül kelti a szél: a két medence felszínének kimozdulása vízszintkülönbséget idéz elő a szűkület két végében, ami áramlást kényszerít ki az alacsonyabb vízszint felé, akár csak a folyókban. A vízlengés periodikus, a víz-

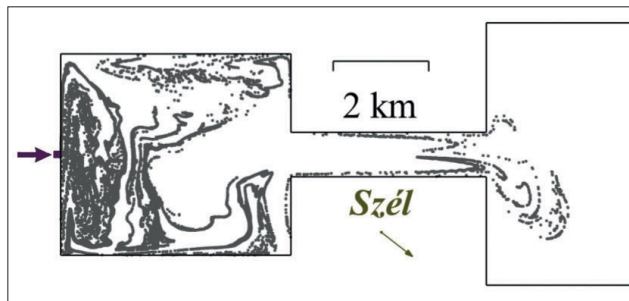


5. ábra. Jellemző tavi pontok szél keltette áramlásainak és a szélmeghajtás iránygyakoriságának megoszlása, a sebesség szerint súlyozva

szín kilendülése pedig aperiodikus, de közös bennük az, hogy egy egyensúlyi állapot körül ingadoznak, és így nem eredményeznek tartós áthelyeződést.

A szűkülettől távolabbi pontokban viszont a forgók határozzák meg az áramlás irányát. Utólag igazoltuk, hogy a 4. ábrán látott sebességmező valóban jellemzőnek mondható, hiszen mind a kilenc pontban éppen a leggyakoribbnak talált irányba tart az áramlás. Elsősorban az É-ÉNy-i, másodsorban a D-DK-i irány felől érkeznek az erős szelek, és ez az egyenlőtlen gyakoriság az oka annak, hogy a forgók iránya nem követi a medence szimmetriáját. A szélmeghajtás és a vízmélység változó területi eloszlása (pontosabban az azokból eredő, egységnyi víztömegre jutó csavarónyomaték) olyan forgókat kényszerít ki a két leggyakoribb, egymással ellentétes széliránynál, amelyek a partok mentén történetesen azonos irányúak.

Rátérve immár az elkeveredésre: a jelzőanyagot a nyugati part felezőpontjában eresztjük a tóba. Megtehetnénk, hogy a folytonos jelzőanyag-csóva koncentrációjának változását modellezzük az áramlási mező rácshálóján, de ez gazdaságtalanul finom térfelbontást igényelne ahhoz, hogy vékony sáv mintázatok egyáltalán megjeleníthetők legyenek rajta. Ehelyett az ilyen elkeveredési vizsgálatok szokásos eljárását követjük: a csóvát véges



6. ábra. A jelzőanyag a 23. napon megjelenik a keleti medencében

számú tömegponttal közelítjük, és ezeknek a pontoknak a rácshálón már meghatározott áramlási mezőn való sodródását írjuk le.

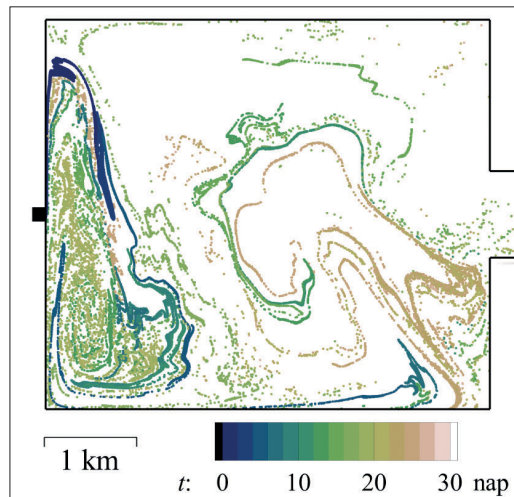
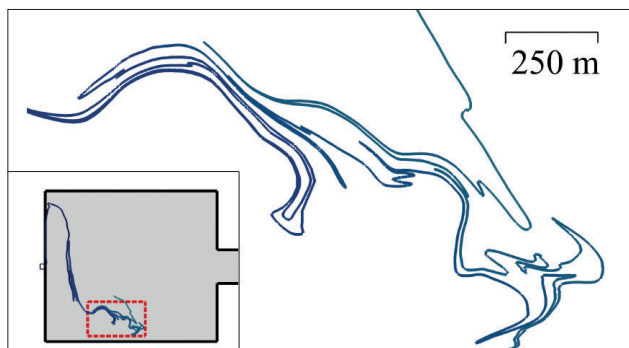
Az ímént tapasztaltuk, hogy az áramlás többnyire észak felé fogja sodorni a csóvát, eleinte a parttal párhuzamosan. Ez így is lesz, és mivel ott az áramlás egy medenceléptékű forgó része, később a jelzőanyagot eljuttatja a déli parthoz is (6. ábra). Mivel a forgók szerkezete folyamatosan változik, a jelzőanyaggal a medence jelentős részét beterítik. A szűkületben a jelzőanyag a vízszin kilendülés (és kisebb mértékben a vízlengés) keltette áramlásokkal sodródva „dugattyúmozgást” végez.

Erős és tartós szél esetén a jelzőanyag átkerülhet a túlsó, keleti tómedencébe (éppen ez a pillanat látszik a 6. ábrán), de csak kis esélye van arra, hogy ott is marad, mert a felszín visszalendülése végül mintegy visszazippantja a szűkületbe. A keleti medencében forgók is vannak, azok viszont nem fordulnak meg a visszalendülés alatt. Ha elég sokáig tart a kilendült állapot, akkor ezek a forgók képesek a szűkületről messze elszállítani a jelzőanyagot és így az tartósan átkerül a keleti medencébe.

Kiseb mértékben egy további, aszimmetrikus jelenség is hozzájárul a medencék közti vízcserehez. A szűkületen való átáramlás ugyanis úgy lép be a medencébe, hogy nem terebélyesedik ki azonnal a medence teljes szélességére, hanem vízugsárgként leválik a szűkület sarkairól, és a sarkok mögött kétoldalt vízszintes forgókat kelt. Később, amikor visszalendül a tó és megfordul az áramlás, akkor a szűkületnek ugyanazon az oldalán már tölcészerűen egyben maradvá, a partvonalat követve szűkül össze a sebességmező. Azért okoz mindez túléptékű vízcserét, mert olyan víztömegek is bekerülnek így a szűkületbe, amelyek nem épp előtte jöttek át rajta.

A legfontosabb megállapítás mégis az, hogy a 6. ábrán megmutatkozik a balatoni zavarosságmezőben talált szálas-kacsos struktúra. Ha kinagyítjuk a csóva mintegy 1,5 km-es részletét, akkor az szemmel láthatóan egy fraktál, azaz a görbe részletei különböző léptékben is hasonlóságot mutatnak egymással (7. ábra). (A fraktálokról l. Gruiz Márton keretezett írását.) A csóva cikk-

7. ábra. Az áramlás által sodort és összehajtogatott csóva részlete a 61. órában



8. ábra. A jelzőanyag tóbeli tartózkodási idejének megoszlása a nyugati medencében, a 28. napon

cakkos, kacsos hajtogatását a vízlengéshez köthetjük, a nagyobb irányváltozást pedig elsősorban a forgók deformáló hatásához. Rövid időközrel beeresztett két jelzőrészecske eleinte egymáshoz közel halad az áramlásban, hiszen alig van köztük különbség a sebességmezőben. Hirtelen eltávolodnak azonban, ha éppen két külön forgóba kerülnek bele, amelyek pl. a partnak együtt futó ágaik szétválását mutató ún. torlópont elérése után az egyiket jobbra, a másikat balra sodorják tovább. A 4. ábrán a partok mentén több ilyen torlópontot, illetve az áramkép belsejében nulla **se-bességű**, stagnációs pontot azonosíthatunk, amelyeknek a helye és a száma is változik időben, így a jelzőanyag-részecskék sokaságára igaz, hogy előbb vagy utóbb elérnek egy ilyen pontot. Az eredetileg közeli részecskéknek a fokozott, exponenciális távolodása a kaotikus elkeveredés egyik jellegzetessége, a jelzőanyag mintázata pedig gyakorlatilag az instabil sokaságot rajzolja ki. Az instabil sokaságról l. Zsugyel Márton és szerzőtársai keretezett **írását**, míg a sekély tavak kaotikus elkeveredésének elemzési eszközeiről pl. az [5] vagy [6] hivatkozásokat.

A kaotikus elkeveredés túléptékben képes hatékonyan elkeverni a jelzőanyagot a tó vizével. A 8. ábrán szembevetendő, ahogy a feltekerődő jelzőanyagszálak közé bekelelődik a tó eredeti vize (ami fehérrel jelenik meg az ábrán). Ezen a részleten a csóva tömegpontjait aszerint színeztük, hogy mennyivel korábban kerültek a tóba, így arra is fény derül, hogy két, éppen szomszédos jelzőrészecske tartózkodási ideje között jelentős eltérés lehet.

Az elkeveredés káoszjellegéből az is következik, hogy a kezdeti állapotra és a jövőbeli körülményekre olyannyira érzékeny a csóva deformálódása, hogy a későbbi alakját nagy időelönnnyel fokozottan nehéz pontosan előrejelezni. ❄

IRODALOM

- [1] D. M. Imboden (1998): The motion of lake waters. In: *Lakes Handbook*. Szerk.: P. O'Sullivan – C. Reynolds. Blackwell Science. 115–152.
- [2] G. Curto, J. Józsa, E. Napoli, T. Krámer, G. Lipari (2006): Large scale circulations in shallow lakes. In: *Vorticity and turbulence effects in fluid structure interactions*. Advances in Fluid Mechanics, 45. Szerk.: M. Brocchini – F. Trivellato. Wessex Institute of Technology Press, Southampton. 83–104.
- [3] Vincze M., Kozma P. (2007): Tölgések a Balatonon, a fjordokban és a laboratóriumban, *Természet Világa* 138, 547–549.
- [4] J. Józsa, B. Milics, E. Napoli (2007): Numerical simulation of internal boundary-layer development and comparison with atmospheric data. *Boundary-Layer Meteorology* 123, 159–175.
- [5] M. Pattantyús-Ábrahám, T. Tél, T. Krámer, J. Józsa (2008): Mixing properties of a shallow basin due to wind-induced chaotic flow. *Advances in Water Resources* 31, 525–534.
- [6] Pattantyús-Ábrahám M., Tél T., Krámer T., Józsa J. (2008): A kaotikus advekción vizsgálata sekély tavakban a klímaváltozás figyelembevételével, *Hidrologiai Közlemény* 88, 40–46.