

A tavi légkör-víz határfelület cserefolyamatainak vizsgálata

Lükő Gabriella

Doktorandusz, Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, BME-VVT

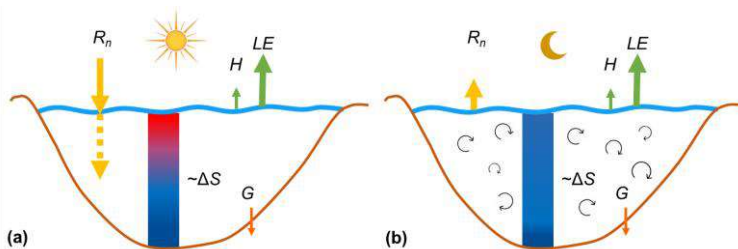
1. Bevezetés

A tavi hidro- és termodinamikai változásokat a lokális meteorológiai folyamatok alakítják a légkör-tó határfelület cserefolyamatain keresztül. Ezen összetett cserefolyamatok a tavi és meteorológiai modellek fontos peremfeltételei, azonban mind a mérésük, mind az elméleti meghatározásuk rendkívül bonyolult, jelentős kihívásokat okoz, ezért a téma nemzetközi szinten is a mikrometeorológiai és limnológiai kutatások előterébe került.

Az ELKH-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoportja és BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke több évtizede foglalkozik hazai nagy tavaink fizikai és ökológiai folyamatainak feltárásával, mérésével és modellezésével. Ennek keretei között a Balatonon 20 éve üzemeltetnek egy vízminőségi monitoring állomást a part közelében, 2018 óta pedig egy nyíltvízi hidrometeorológiai állomást is.

Tavaink ökoszisztémája, fizikai-kémiai állapota rendkívül érzékenyen reagál a klimatikus változásokra, valamint az egyre jelentősebb antropogén hatásokra. A változások kimenetele bizonytalan, ezek feltárása tudományos vizsgálatot igényel. A klímaváltozás miatt átalakuló meteorológiai folyamatok következtében megváltozik például a tó vízjárása, illetve keveredési és hőmérsékleti viszonyai. Az egyes folyamatok szoros interakcióban vannak, amelynek komplexitását a pozitív és negatív visszacsatolások eredményezik. A tavak hidrometeorológiai állapotát alakító fizikai folyamatok részletes feltárását nagyban segítik a teljes víztestre kiterjedő, mérésekkel igazolt numerikus modellek. Az áramlási és hőmérsékleti dinamikát pontosan szimuláló tavi modell segítségével többek közt a különböző transzportfolyamatok is számíthatók, úgymint az üledékmozgás. Illetve eredményei alapján becsülhető, hogy a tó mely részei válhatnak oxigénszegénnyé és ezáltal vannak kitéve algavirágzásnak. Azonban a különböző modellek csak akkor tudnak megbízható eredménnyel szolgálni, ha a meghajtásukhoz szükséges peremfeltételeket (vagyis meteorológiai meghajtó folyamatokat) kellő pontossággal meg tudjuk határozni.

Doktori kutatásomban a tavi légkör-víz határfelületen történő turbulens impulzuscsere, érzékelhető és párolgási hőcsere vizsgálatával foglalkozom. A cserefolyamatok részletes elemzéséhez ún. örvény-kovariancia (eddy-covariance - EC) mérések alapján vezettem le új összefüggéseket. Az impulzusáram meghatározására korábban az oceanográfiai irodalomból ismert összefüggéseket alkalmazták, melyek azonban tavi körülményekre nem érvényesek. Ennek oka, hogy tavi környezetre jellemző rövid meghajtási hosszak, kis vízmélységek és a kialakuló még fejletlen, fiatal hullámok miatt várhatóan növekszik a vízfelszín ellenállása. Továbbá, tavak modellezésekor, a hőcsere-folyamatokat leíró összefüggések paramétereinek becslése során elengedhetetlen a különböző mérési módszerek megközelítésekből eredő hibák számszerűsítése. Ehhez jó támpontot nyújt a tó energiamérlege (energy balance - EB) és annak zárási hibája. Tavi vízoszlop esetén a teljes elérhető energia a sugárzásból, a víztestben tárolt hőből, valamint a mederhőáramból tevődik össze. Ezek együttesen egyensúlyban vannak a vízfelszínen történő hőcserével az EB zárása esetén (1. ábra). Az eddigi legpontosabb hőcsere-mérés az EC eljárás, azonban ismert problémája, hogy a légkörben kifejlődő nagyobb léptékű örvényeket nem tudja kimérni, ennek következtében a légkör-víz hőcserét alulbecsli, mely jelentős zárási hibát eredményez (Foken, 2008). Az EC mérés módszertanából adódó EB zárását tavi környezetben még nem vizsgálták a szakirodalomban, ugyanakkor tavi hőmérsékletek modellezéséhez elengedhetetlen.

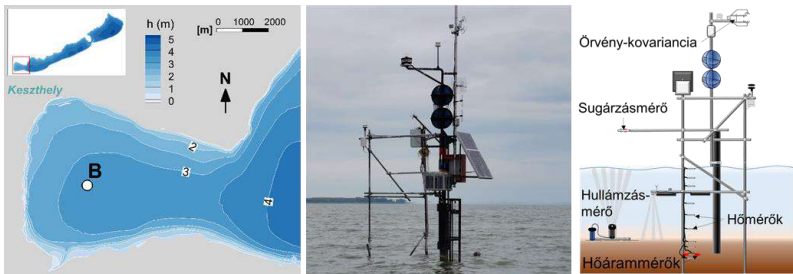


1. ábra: Tavi víz hőmérsékletek és energiamérleg komponensek alakulása egy tipikus nyári napon (a) nappal és (b) éjjel.

2. Módszerek

A szakirodalomban számos elméleti módszer került kidolgozásra a víz-levegő határfelületen zajló turbulens hő- és impulzuscsere számítására, többek között például i) a profil alapú fluxus-gradiens módszer, amely a Monin-Obukhov hasonlósági elméleten (Monin-Obukhov Similarity Theory - MOST) alapszik, ii) az energiaháztartási

mérlegben alapuló eljárás, valamint iii) a vízháztartási mérleg alapján történő párolgási hő becslés (Li et al. 2016, Xiao et al. 2013, Xing et al. 2012). Kutatásaim során, a mérési adatok alapján fluxus számító paraméterezéseket vezettem le vagy finomítottam tavi környezetre az említett módszerekkel. Ennek érdekében hidrometeorológiai és hullámmérési méréseket végeztünk 2019-ben öt hónapon keresztül a Balaton Keszthelyi-medencéjének közepén (2. ábra).



2. ábra: Hidrometeorológiai állomás elhelyezkedése, fotója és műszerezettsége.

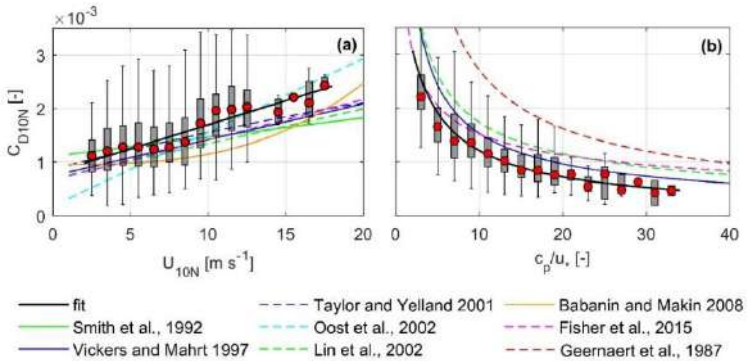
Az örvény-kovariancia műszer nagy frekvencián, közvetlenül mérte a szelet, hőmérsékletet és nedvességtartalmat, amelyből a vizsgálatok középpontjában álló érzékelhető- (H) és párolgási hőáramok (LE), illetve az impulzusáram közvetlenül számíthatók. Ezekon kívül az energiamérleg vizsgálatához mértük továbbá a hosszú- és rövidhullámú sugárzásból adódó nettó sugárzási hőt (R_n), a mélységmenti vízhőmérsékleteket a vízben tárolt hő (ΔS) számításához, valamint a mederhőáramot (G). Az energiamegmaradás szerint az elérhető energia ($R_n + \Delta S + G$) egyensúlyban kell, hogy legyen a vízfelszínen történő cserefolyamatokkal ($H + LE$). Az energiamérleg zárását a két oldal arányával, azaz az ún. Energy Balance Ratio (EBR) mutatóval fejezhetjük ki. Az EB egyenlőtlensége esetén maradéktagot definiálunk, amelyet a zárás eléréséhez szétosztjuk az ún. Bowen-arány ($Bo = H/LE$) szerint, és így kapjuk meg a EB-korrigált hőcsereket. A hőcserebecslés másik módszeréhez szükséges a Balaton vízmérlegének (WB) ismerete, melynek mérését a Vízügyi Igazgatóság végzi havi léptékben évtizedek óta. A vízmérleg egyenlet felírásával, a rögzített adatok alapján a tó párolgása számítható: $E_{WB} = \Delta V - P - I + W + O$, a víztérfogat megváltozás (ΔV), csapadék (P), hozzáfolyás (I) és vízkivétel (W), a szabályozott kifolyás (O) segítségével.

Az EC, az EB és WB-vel mért és számított cserefolyamatok felhasználásával a fluxusgradiens eljárás szerint ún. ellenállási (C_D) és átviteli tényezőket (C_H, C_q) határozhatunk meg oly módon, hogy azok közvetlenül becsülhetők legyenek egyszerű rutin időjárási adatok (szélsebesség, hőmérséklet, nedvességtartalom) ismeretében. A

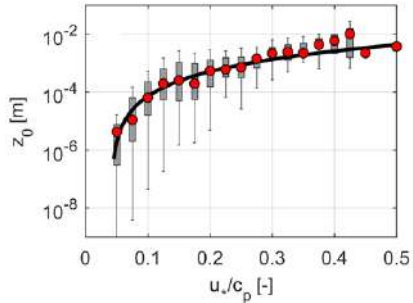
tényezők magukba foglalják a vízfelszín aerodinamikai érdességét jellemző érdességi magasságait (z_0 , z_{0H} , z_{0q}) is, és a légköri rétegzettségtől függő stabilitási függvényeket a MOST szerint.

3. Eredmények

Az örvény-kovariancia mérések és hullámmászadatok segítségével vizsgáltam a Monin-Obukhov hasonlósági elmélet szerinti turbulens cserefolyamatok paraméterezését a légkör-víz határfelületen. Az adatokat szigorú minőségellenőrzési szűrés alá vettem, hogy a mérés és a MOST elmélet alapfeltevéseinek eleget tegyenek. A szűrt adatok segítségével impulzuscsere-becslő összefüggéseket vezettem le. A EC mérések igazolták a hipotézist, miszerint a szakirodalomban fellelhető paraméterezések nem megfelelők balatoni környezetben, ahol a kialakuló hullámok nagyon fiatalok. Míg az ellenállási tényezők a szélesebbesség függvényében növekedtek, addig a hullámkor függvényében csökkentek az irodalmi görbékhez képest (3. ábra). Az aerodinamikai érdességi magasság és a hullámkor között erős kapcsolatot találtam (4. ábra). A Keszthelyi-medence eltérő részein végzett mérések alapján igazoltuk, hogy az új összefüggéssel az impulzusáram térbeli változékonysága is figyelembe vehető. Az újonnan levezetett különböző részletességű összefüggésekkel elvégeztem az impulzuscsere becslését, amelyek pontosságát magas determinációs együtthatók jellemezték akár egyszerű, becsült hullámmászással is.

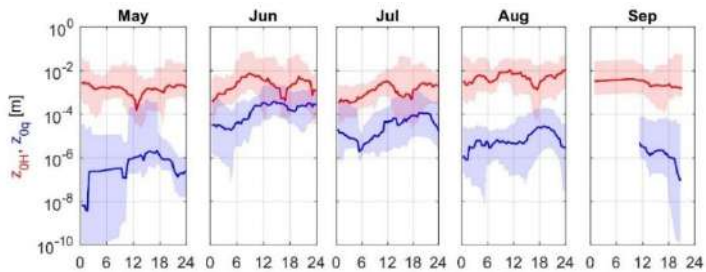


3. ábra: Az ellenállási tényező (a) a szélesebbesség és (b) a hullámkor függvényében az irodalmi összefüggésekkel.

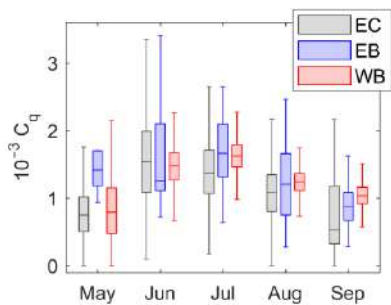


4. ábra: Az érdességi magasság az inverz hullámkor függvényében.

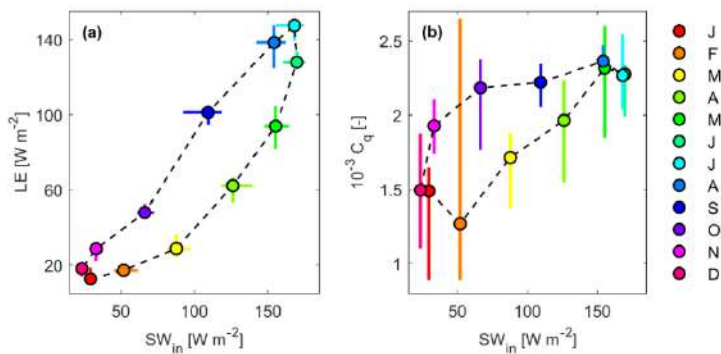
Az EB komponensek és a turbulens hőáramok együttes mérése alátámasztotta a feltételezett számottevő EB zárási hibát sekély tavi környezetre. Az EB-t különböző időléptékekben vizsgáltam, néhány órától egészen havi léptékig. Azt tapasztaltuk, hogy nagyobb időléptékben valamelyest javítható az EB zárása, és legalább napi léptékben javasolt az alkalmazása; azonban még havi léptékben is akár 25%-kal alulbecsültek az EC méréseken alapuló turbulens áramok az elérhető energiamentiséghez képest. Emellett a zárási hiba szezonálisan változik, nyáron a legnagyobb. A hőcserékre vonatkozóan is levezettem az átviteli tényezőket az EC mérések alapján, azonban nagy szórást tapasztaltam, és a különböző meteorológiai változók függvényében is legfeljebb konstans értékkel tudtam jellemezni azokat. A meghatározott konstansok magasabbak, és az arányuk is jelentősen eltér más tavakon mért értékekhez képest. A hőcserék átviteli tényezőinek irodalomban is tapasztalt nagy szórása és az energiámérleg zárás szezonális változása miatt megvizsgáltam a hőcserékre vonatkozó érdességi magasságokat, amelyek a MOST kulcs paraméterei. Míg az érzékelhető hőcserénél közel állandó ($z_{0H} \sim 10^{-3}$ m), addig a párolgáshónél jelentős szezonális változékonyságot tapasztaltam, amelyek akár két nagyságrendet is változnak ($z_{0q} \sim 10^{-6}$ - 10^{-4} m) a vizsgált öt hónapos időszak során (5. ábra). Ebből kifolyólag a párolgási hőáramot jellemző átviteli tényező hasonló szezonális változást mutatott (6. ábra). Havi léptékben a párolgáshő becsülhető volt az előbbi módszerektől teljesen független vízmérleg számítás segítségével. Az elérhető tíz év hosszú vízmérleg adatok alátámasztották a teljes éven belüli változékonyságot, ahol akár két és fél-szerese is lehet a nyári a téli átviteli tényezőnek (7. ábra).



5. ábra: A hőcserék érdességi magasságainak havi és napi menetgörbéi.



6. ábra: A párolgáshő átviteli tényezőjének szezonális változékonysága EC, EB és WB alapján.



7. ábra: A párolgáshő (a) és az átviteli tényezőjének (b) kapcsolata a rövidhullámú sugárzással.

Más tavakon jellemzően konstansként veszik figyelembe a tényezőket és a szezonális viselkedésüket nem vizsgálják. Ahogy vártuk, a hőcsere EC alapú meghatározása alulbecsli azt, így az EB zárás esetén magasabb átviteli tényezőket kaptunk. A vízmérlegből kapott párolgási átviteli tényezők az EC és EB eredmények között helyezkedtek el. Az elvégzett korrelációanalízis azt mutatta, hogy a sugárzási hő a fő meghajtó folyamata a párolgási hő átviteli tényező szezonális változásainak nagyobb (heti és havi) időskálákon. A párolgási hőcsere és tényezőjének a rövidhullámú sugárzással való összevetése során jól kirajzolódó, az éves ciklusra jellemző hisztérezis jellegű kapcsolatot találtunk a tízéves időszakra (7. ábra). A változó átviteli tényezővel történő párolgási hőcsere becslésnél jelentős pontosság-növekedést tapasztaltunk a konstans érték alkalmazásához képest.

4. Összefoglalás

Az új összefüggésekkel egyszerű rutin időjárási adatok alapján pontosabban becsülhető az impulzus- és hőcsere meghajtási hossz-limitált tavi környezetben, így hazai nagy tavainkon is. Összefüggéseink figyelembe veszik a hullámzást, az energiamérleg zárását és a párolgás szezonálisát. Alkalmazásukkal mind a meteorológiai, mind a tavi hidrodinamikai modellek pontosíthatók, hiszen ezáltal pontosabb peremfeltételeket biztosíthatunk számukra. Mindezen eredmények elengedhetetlenek egy megbízható balatoni tavi előrejelző-rendszerhez, amely segítségével a tó hidro- és termodinamikai folyamatai előre jelezhetőek, ezáltal többek között az algaprodukcióhoz szükséges állapotok kialakulásának esélye, vagy a már bekövetkezett algásodás térbeli és időbeli alakulása is becsülhető. Egy ilyen modellel egyúttal a klímaváltozás hatása is vizsgálható.

5. Köszönetnyilvánítás

A kutatás a K134559 kódszámú OTKA és a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-II-BME-32 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

6. Irodalom

Babanin, A. V., Makin, V. K. (2008): Effects of wind trend and gustiness on the sea drag: Lake George study, *Journal of Geophysical Research* 113, C02015. DOI: 10.1029/2007JC004233

- Fisher, A. W., Sanford, L. P., Suttles, S. E. (2015), Wind Stress Dynamics in Chesapeake Bay: Spatiotemporal Variability and Wave Dependence in a Fetch-Limited Environment, *Journal of Physical Oceanography* 45(10), 2679-2696. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0004.1
- Foken, T. (2008): The Energy Balance Closure Problem: An Overview, *Ecological Applications* 18(6), 1351–1367. DOI: 10.1890/06-0922.1
- Geernaert, G. L., Larsen, S. E., Hansen, F. (1987): Measurements of the Wind Stress, Heat Flux, and Turbulence Intensity during Storm Conditions over the North Sea, *Journal of Geophysical Research*, 92(C12), 127-139. DOI: 10.1029/JC092iC12p13127
- Li, Z., Lyu, S., Zhao, L., Wen, L., Ao, Y., Wang, S. (2016): Turbulent Transfer Coefficient and Roughness Length in a High-Altitude Lake, Tibetan Plateau, *Theoretical and Applied Climatology* 124(3–4):723–35. DOI: 10.1007/s00704-015-1440-z
- Lin, W., Sanford, L. P., Suttles, S. E., Valigura, R. (2002): Drag coefficients with fetch-limited wind waves, *Journal of Physical Oceanography*, 32(11), 3058-3074. DOI: 10.1007/s00343-009-9137-8
- Oost, W. A., Komen, G. J., Jacobs, C. M. J., Van Oort, C. (2002): New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during AS-GAMAGE, *Boundary-Layer Meteorology* 103(3), 409–438. DOI: 10.1023/A:1014913624535
- Smith, S. D., Anderson, R. J., Oost, W. A., Kraan, C., Maat, N., De Cosmo, J., Katsaros, K. B., Davidson, K. L., Bumke, K., Hasse, L., Chadwick, H. M. (1992): Wind Stress and Drag Coefficients, *Boundary-Layer Meteorology* 60, 109-142. DOI: 10.1007/BF00122064
- Taylor, P. K., & Yelland, M. J. (2001): The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *Journal of Physical Oceanography* 31(2), 572-590. DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<0572:TDOSSR>2.0.CO;2
- Vickers, D., & Mahrt, L. (1997): Fetch Limited Drag Coefficients, *Boundary-Layer Meteorology* 85(1), 53-79. DOI: 10.1023/A:1000472623187
- Xiao, W., Liu, S., Wang, W., Yang, D., Xu, J., Cao, C., Li, H., Lee, H. (2013): Transfer Coefficients of Momentum, Heat and Water Vapour in the Atmospheric Surface Layer of a Large Freshwater Lake, *Boundary-Layer Meteorology* 148(3):479–94. DOI: 10.18307/2012.0617
- Xing, Z., Fong, D. A., Tan, K. M., Lo E.Y.-M., Monismith, S. G. (2012): Water and heat budgets of a shallow tropical reservoir, *Water Resources Research* 48, W06532. DOI: 10.1029/2011WR011314