

A Balaton 3D hidro- és termodinamikai modelljének továbbfejlesztése

Lükő Gabriella¹, Torma Péter²

¹ Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (e-mail: luko.gabriella@emk.bme.hu)

² Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. (e-mail: torma.peter@emk.bme.hu)
HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport, 6720 Szeged, Dóm tér 9.

DOI: 10.59258/hk.15658



Kivonat

Célunk egy olyan igazolt hidro- és termodinamikai modell felállítása a Balatonra, amely részletes transzport vizsgálatokra és a későbbiekben akár az áramlások és hőmérsékleti viszonyok előrejelzésre is alkalmas lehet. Sekély tavakban széles időben a hullámzás által befolyásolt felszíni és a fenéközeli határretek átfedhetik egymást, ennek következtében összetett áramlási és keveredési viszonyok alakulnak ki. Ezzel szemben, szélcsendes időben gyenge hőmérsékleti rétegződés jön létre, amely jellemzően éjszaka felszakad, napi ciklust eredményezve. A numerikus szimulációkhoz az FVCOM modellt alkalmaztuk, valamint áramlás- és hőmérsékletméréseket végeztünk egy nyílt vízi helyszínen, valamint a hőmérsékleteket egy partmenti helyen is rögzítettük a Keszthelyi-medencében. A modellt térben változó szélmezővel hajtjuk meg, annak érdekében, hogy figyelembe vehessük a belső határretek fejlődés és mezoskálájú változékonyság hatását a vízfelszínen ható szél-csúsztatófeszültségre. Előbbi a szélesség meghajtási hossz menti növekedését eredményezi. Megmutatjuk, hogy az inhomogén szélmeghajtás elengedhetetlen mind a tó különböző pontjain mért vízszint-kilendülések, mind a Keszthelyi-medence nyílt vizén jelentkező áramlási irányok pontos modellezéséhez. Az áramlás mellett a hőmérsékleti szerkezet megbízható szimulációja érdekében érzékenységvizsgálatot végeztünk a modell paramétereire, beleértve a léghő-víz közötti hőcseré paramétereit, a fénykioltási együtthatót és a turbulenciamodell háttérkeveredési együtthatóját. Összehasonlítjuk a Keszthelyi-medence közepén a modellezett és mért áramlásokat, hőmérsékleteket és annak rétegződését, utóbbit a potenciálisenergia-anomália mutatójával. A többcélú kalibráció nagy számú szimulációt igényel, hogy lefedjük a széles paraméterteret és egy optimális paraméterkombinációt találjunk.

Kulcsszavak

Balaton, numerikus modellezés, sekély tavi hidrodinamika, szélmeghajtás, 3D hidro- és termodinamikai modell.

Development of a 3D hydro- and thermodynamical model of Lake Balaton

Abstract

We aim to set up a well-validated hydro- and thermodynamic model for the large and shallow Lake Balaton, which can be used for analyzing transport processes, and later also for forecasting. In shallow lakes, wave-affected surface and bottom boundary layers can overlap during windy periods, resulting in complex flow and mixing conditions. In contrast, a weak thermal stratification can develop during calm periods, which typically breaks up during nighttime, resulting in a diurnal cycle. We applied the FVCOM model for numerical simulations and carried out current and temperature measurements at an offshore location and temperatures were recorded at onshore as well in the Keszthely basin. We force the model with a spatially varying wind field to incorporate the effect of internal boundary layer development over the water surface and the mesoscale variability. The former leads to an increasing wind stress along the fetch. We show that inhomogeneous wind forcing is essential to model water level fluctuations accurately around the lake and improve current directions in the middle of the Keszthely-basin. To reliably simulate the thermal structure besides currents, a sensitivity analysis is performed for model parameters, including air-water heat exchange parameters, light extinction coefficient, and the background mixing coefficient of the turbulence model. We compare modeled and observed currents, temperatures, and thermal structures using the potential energy anomaly for the latter one in the middle of the Keszthely-basin. The multi-objective calibration requires a large number of simulations covering a wide parameter space to find an optimal parameter set.

Keywords

Lake Balaton, numerical modelling, shallow lake hydrodynamics, wind forcing, 3D hydro- and thermodynamical model.

BEVEZETÉS

A különböző tavi hidrodinamikai modellek használata egyre elterjedtebb és számos alkalmazási területtel rendelkezik. A transzportfolyamatok rövid- és hosszútávú előrejelzése mellett fontos szerephez jutnak hatásvizsgálatok során, például kikötőfejlesztéseknél, mederkostrások tervezésénél, algavirágzások vagy szennyezések terjedésvizsgálatok. Számos további modellrendszer alapját, avagy első lépését képezik, nemcsak a hordaléktranszport, hanem az ökológiai, valamint hidrobiológiai elemek körfolyamatainak vizsgálatában is. Utóbbira jó példa

lehet a Zala vize által szállított tápanyagok vagy éppen oldott oxigénben szegény víztömegek elkeveredése.

Az elmúlt évtizedekben jelentős tavi modellfejlesztések történtek hazai viszonylatban is. A 90-es években a nagy és sekély Balaton Keszthelyi- és Szigligeti-medencéjének több pontján, de javarészt egy mélységben történtek áramlásmérések, amelyek alapján kétdimenziós (2D) modelleket fejlesztettek és igazoltak (Józsa 2001). Ezek a vizsgálatok arra engedtek következtetni, hogy a szél hatása kulcsfontosságú, ugyanakkor ezidőben nem állt rendelkezésre kellő információ a tó feletti szélviszo-

nyok térbeli alakulásáról megfelelő mérőhálózat hiányában. Későbbi tanulmányokban kimutatták, hogy a szélmező nemcsak mezoskálájú változékonysággal bír, hanem mikroskálán is változik a tófelszínnek a szárazföldhöz képesti jelentősen alacsonyabb ellenállása miatt, amely határreteg-fejlesztéshez és meghajtási hossz menti szélsőbesség növekedéshez vezet (Krámer 2006, Józsa és társai 2007). E folyamat számottevően befolyásolja a tó szél keltette áramlási viszonyait, többek közt a cirkulációk irányát (Józsa 2014, Torma és Krámer 2017).

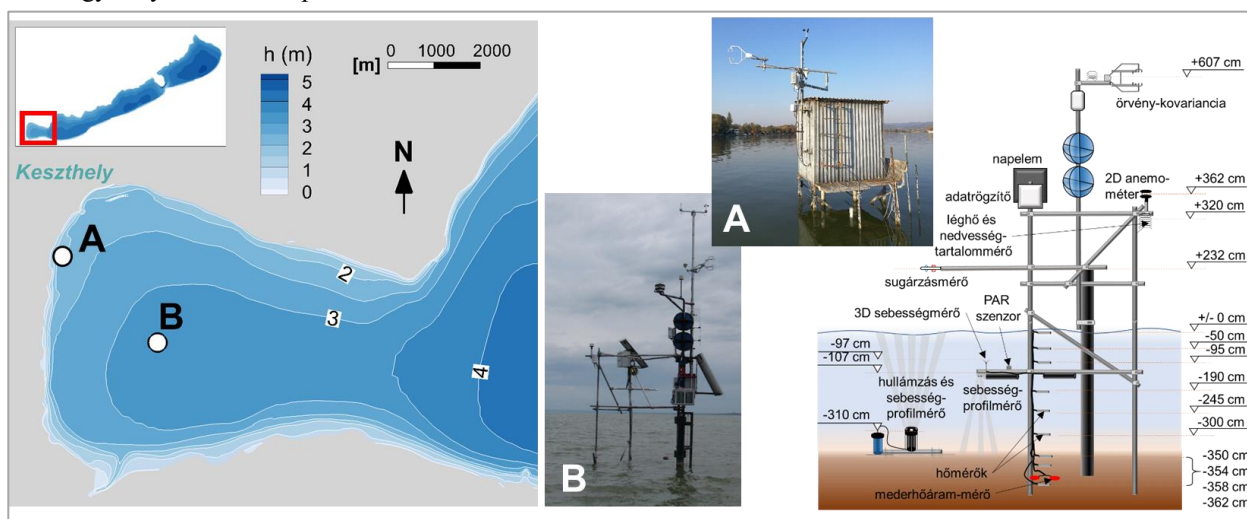
A szintén sekély Okeechobee és Taihu tavakon azt tapasztalták, hogy az áramlási és hőmérsékleti viszonyok pontos leírásához nem elég a mélységátlagolt 2D, hanem térbeli, háromdimenziós (3D) leírás szükséges (Kang-Ren és Zhen-Gang 2005, Zhao és társai 2012, Zhao és társai 2018). Torma (2016) doktori értekezésében erősítette ezt meg, miszerint számos esetben 3D modell alkalmazása szükséges, mint a Balaton esetén is, viszont vizsgálatait során csak a vízszintingadozásokra és a 90-es évekbeli pontbeli áramlási adatokra tudott támaszkodni. Hosszú idejű, teljes mélységmenti áramlási profilmérések csak 2019-ben történtek először a Balatonon. Ekkor azonban már számos szélmérőállomás is üzemelt a tó körül, amelyen keresztül vizsgálni és modellezni lehetett a vízmozgást keltő térben változó szélmezőt. A Balaton felszíne közel 600 km², ugyanakkor átlagos mélysége csupán 3,2 m. Emiatt a tó polimiktikus és napi ciklusú gyenge hőmérsékleti rétegzettség jellemzi. Ez azt jelenti, hogy a nyári időszakban nappal akár 5 °C-os hőmérsékletkülönbség alakul ki függőleges értelemben, amely rétegzettség az éjszaka során felszakad, vagyis függőlegesen a tó átkeveredik.

Célunk egy olyan 3D hidro- és termodinamikai modell felállítása a Balatonra, amely alkalmas a klímaváltozás hatásainak vizsgálatára, valamint a későbbiekben akár rövidtávú előrejelzésre is. Tanulmányunkban az FVCOM numerikus modellt alkalmazzuk a SWAN hullámmozgásmóddel együttműködve összekapcsolva a tavi áramlási és

hőmérsékleti viszonyok szimulálására, melyhez megkísérlünk megfelelő szélmeghajtást és modellparaméterezést találni. A kalibráció során összevetjük a szimulált és mért áramlási és hőmérsékleti profilokat a Keszthelyi-medence esetében, amelyek alapján javaslatot teszünk az egyes paraméterek Balaton nyílt vizére alkalmazható értéktartományára.

TEREPI MÉRÉSEK

A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéke 2019-ben öt hónapon keresztül üzemeltetett a Balaton Keszthelyi-medencéje közepén egy nagyfrekvenciájú hullámmozgás- és áramlásmérővel kiegészített meteorológiai mérőállomást (1. ábra). A légköri oldalon 10 Hz frekvencián működött egy örvény-kovariancia műszeregyüttes (Campbell CSAT3 szónikus anemométer és Campbell EC150 nyílt utas CO₂/H₂O gázanalizátor), amely a turbulens (impulzus, szenzibilis és látens) áramok mérésére szolgált (Lükő és társai 2022a). Ez rutin meteorológiai mérésekkel volt kiegészítve, úgymint szél, léghőmérséklet és relatív nedvességtartalom. A víz hőmérsékletének rögzítése Campbell T107 típusú szenzorokkal történt a vízoszlop mentén átlagosan 50 cm-enként. Emellett a beérkező és kimenő hosszú- és rövidhullámú sugárzásokat Kipp & Zonen CNR4 típusú sugármérő segítségével is rögzítettük. A hullámmozgási viszonyokat egy Nortek Signature1000 típusú ADCP-vel mértük 4 Hz frekvencián, amely a mederfenéken volt elhelyezve és felfelé nézve követte a vízfelszín mozgását. A 3D áramlási viszonyokat Nortek Aquadopp Profiler ADCP-vel mértük a mélység mentén 8 Hz-es időbeli felbontással, amely ~1,1 m mélyen volt elhelyezve és lefelé nézett. Emellett egy Nortek Vector pontbeli 3D áramlásmérőt is elhelyeztünk az Aquadopp felett, kb. 1 m mélyen a vízfelszín alatt, amely 4 Hz-en mért. A nyílt vízi, B jelű állomás méréseivel egyidőben Keszthely közelében a parttól kb. 50 m-re is végzett hidrometeorológiai méréseket az ELKH-BME Vízgazdálkodási Kutatócsoportja. Ezen az A jelű állomáson többek között a vízhőmérséklet profilját mérték.



1. ábra. A mérőállomások elhelyezkedése a Balaton Keszthelyi-medencéjében (balra), a két állomás fotója (középen), és a nyílt vízi B jelű állomás műszerezettsége (jobbra)

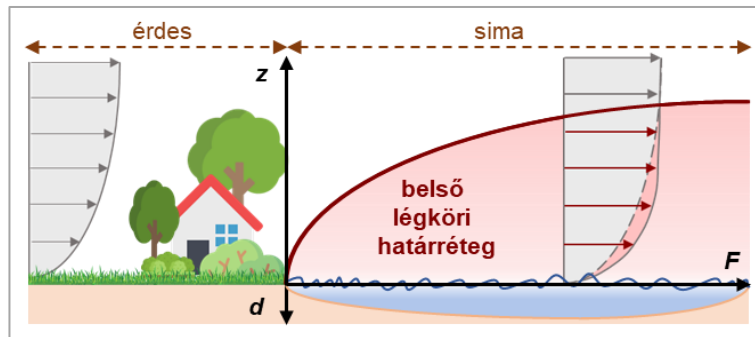
Figure 1. Location of measurement stations in the Keszthely-basin of Lake Balaton (on the left), the photo of the two stations (in the middle) and the instrumentation of the B offshore station (on the right)

HIDRODINAMIKAI MODELLRENDSZER

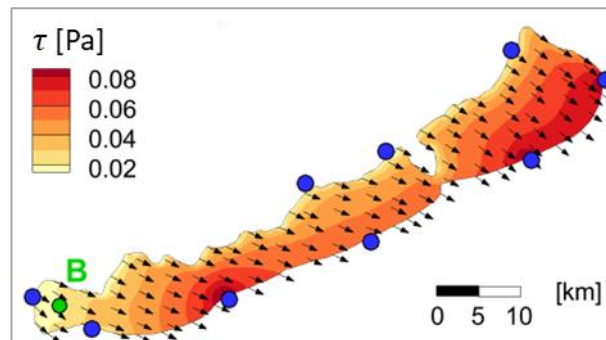
Szélmező számítása

A tó feletti szélmező térbeli inhomogenitása jelentős mértékben érthető el. Egyrészt a tó nagy kiterjedése és hosszúság alakja miatt a szél iránya és nagysága egyaránt igen változékony lehet, másrészt a szárazföld és a vízfelszín aerodinamikai ellenállásának különbsége belső légköri határréteg (internal boundary layer – IBL) fejlődéshez vezet (Józsa és társai 2007). Érdes felületről egy sima felületre érkeznek a légmozgások, ami miatt a szélesség és szél-csúsztatófeszültség a meghajtási hossz mentén megnövekszik (2. ábra). Az IBL hatását a szél felőli és a szél alatti szemközti parton történő egyidejű mérések is igazolták a szélirány vonalában (Torma és Krámer 2017, Lükő és társai 2021). A tó körül 10 szélmérő állomás adatait használtuk fel a komplex, nemcsak időben, hanem térben is változó szélmezőnek a számítására, amely során figye-

lembe vettük az IBL fejlődés hatását egy egyszerű fél-analitikus modellel. Az egyes állomások alapján külön meghatározott szélmezőket térben az inverz távolság módszerével interpoláltuk. A klasszikus lineáris interpoláció helyett az inverz-távolság módszert a szélmérő állomások egyenlőtlen elhelyezkedése és a tó elnyújtott alakja miatt alkalmaztuk. A szélmodell részletes leírása Torma és Krámer (2017) közleményében érhető el, ahol bemutatásra kerül a szélmező számítása és a szél-csúsztatófeszültség transzformációja, amely lényegében a szélességgel négyzetesen arányos. A 3. ábrán egy ilyen interpolált mező látható egyetlen időpillanatban, ahol megfigyelhető a szél-csúsztatófeszültség nagyságának térbeli inhomogenitása az IBL hatására, míg ebben az esetben a szélirányok ugyanakkor kis változékonyságot mutattak. Az eredmények ismertetése során a szélmeghajtás pontosságát a vízlejtés és az áramlási mintázatok alapján vizsgáljuk.



2. ábra. A belső légköri határréteg-fejlődés sematikus rajza
Figure 2. Schematic figure of the internal boundary layer development



3. ábra. Térben interpolált szél-csúsztatófeszültség mező egy reprezentatív ÉÉNy-i vihar során a partmenti szélmérő (kék) és a nyílt vízi B jelű (zöld) állomásokkal együtt
Figure 3. The spatially interpolated wind stress field during a representative NNW windstorm together with the wind measurement stations along the shoreline (with blue) and the offshore B station (with green)

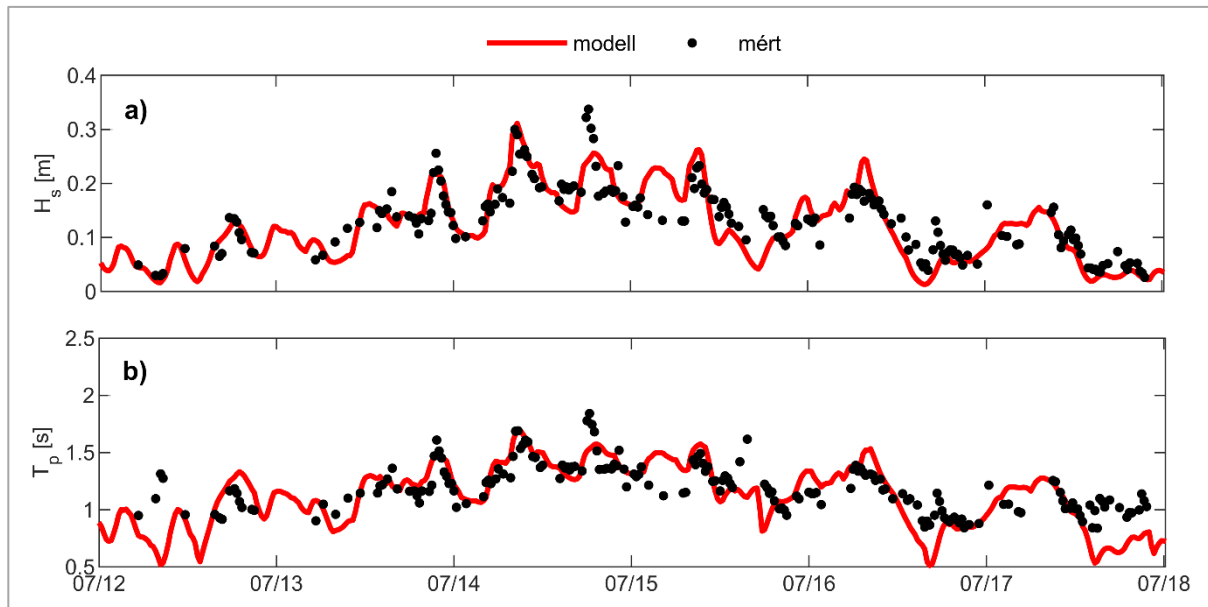
Hullámzásmodell

A hullámzás és az áramlás számos módon kölcsönhatásban van egymással, amelyek eredményeként azok különböző mértékben kölcsönösen módosulnak (Niu és Xia 2017). A hullámzás az áramlást alapvetően két folyamaton keresztül alakítja. Egyrészt, ha a hullámzás hatása eléri a mederfeneket, akkor az ott ható hullámzás keltette fenék-csúsztató feszültségen keresztül megnövekszik a mederellenállás, másrészt pedig impulzust ad át az áramlásnak az úgynevezett radiációs feszültségeken keresztül (Mellor 2008, Warner és társai 2008). A kölcsönhatások elsősorban az áramlásokat módosíthatják, míg számottevően kisebb mértékben hatnak vissza a

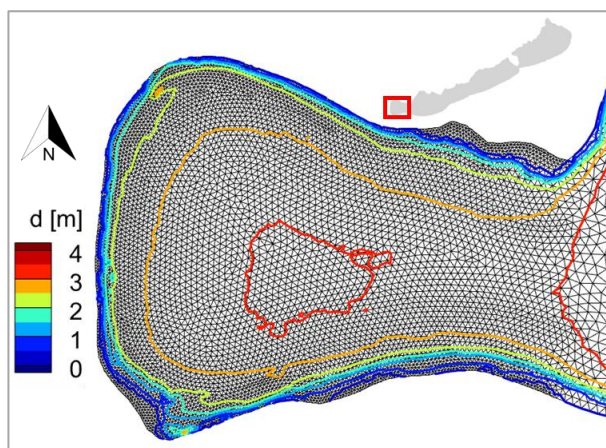
hullámzásra, különösen tavi környezetben. A kölcsönhatások figyelembevételére egy hullámzásmodellt állítottunk fel és egy irányban összekapcsoltuk a később bemutatott áramlási modellel. Más szóval, a hullámzásmodell eredménye az áramlási modell bemeneti adata, ugyanakkor az áramlási modell már nem hat vissza a hullámzásmodellre. Így a két modellt nem szükséges egyidejűleg futtatni és az összekapcsolást interaktív módon kialakítani (Qi és társai 2009). Az alkalmazott modellt a SWAN (Simulating Waves Nearshore), amely egy fizikai alapú numerikus modell a hullámzás szimulációjára, amelyet az óceáni part menti környezet mellett tavak esetén is gyakran használnak (Holthuisen, 2007, Homo-

ródi és társai 2012, Kocsis és társai 2022). A Keszthelyi-medencében a B állomáson mért hullámzásadatok segítségével nyílt vízre kalibráltuk a Balaton SWAN modelljét (4. ábra). A modell bemenő adata a szélesebbesség és szélirány volt, eredményként pedig a szignifikáns hullámmagasságot, a hullámzás irányát, periódusidőt, hullámhosszt és a fenéközeli sebességet használtuk fel az

egyirányú összekapcsoláshoz. A SWAN a számításokat egy strukturálatlan háromszöghálón oldja meg, amely megegyezik az áramlástan szimuláció során használttal. Az alkalmazott számítási háló a mélységekkel együtt az 5. ábrán látható a Keszthelyi-medence térségére közelítve, ahol a part közelében 50 m, nyílt vízben 100 m a háló felbontása.



4. ábra. Mért és modellezett (a) szignifikáns hullámmagasság és (b) hullám periódusidő idősorok a nyíltvízi B jelű állomáson
Figure 4. Timeseries of measured and modeled (a) significant wave height and (b) wave period at the offshore B station



5. ábra. A Balaton Keszthelyi-medencéjének a számítási hálója a mélységet jelölő szintvonalakkal
Figure 5. Computational mesh with the depth contours in the Keszthely-basin of Lake Balaton

Hidro- és termodinamikai modell

Az FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) modellt Chen és társai (2003) fejlesztették elsősorban óceáni hidro- és termodinamikai folyamatok numerikus szimulációira, azonban rendszeresen alkalmazzák tavi környezetben (Anderson és társai 2010). A modell hidrosztatikus, az összenyomhatatlan folyadékok folytonossági, a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes, a hőmérséklet transzport- és a sűrűségi állapotot leíró egyenleteit oldja meg explicit véges-térfogat módszerrel. A Reynolds-féle átlagolásból eredő tagok számítását vízszintes értelemben a Smagorinsky-féle, míg függőleges értelemben a két egyenletes Mellor-Yamada 2.5-ös turbulencia modellekkel számítjuk (Chen és társai 2003).

Ezen egyenletek együttesét oldjuk meg a megfelelő peremfeltételek megadásával, azaz a tó felszínén történő turbulens impulzus- és hőcserékkel, amely utóbbiakat az FVCOM a hőfluxus almoduljában számítja. A bemenő adatok a szélesebbesség, a hosszú- és rövidhullámú sugárzás, a léghőmérséklet és a nedvességtartalom. A modell fő eredményei az áramlási sebességkomponensek és a vízhőmérséklet. A számításokat ugyanazon a strukturálatlan háromszöghálón oldjuk meg horizontálisan, mint amelyet bemutattunk a SWAN hullámzásmodell esetén. Vertikálisan standard σ -koordináta transzformációt alkalmazunk, tehát minden pontban az adott mélységet adott számú (jelenleg 8) rétegre osztjuk, úgy, hogy a felszín és a mederfenék közelében sűrítjük azokat. Ennek

eredménye, hogy egy adott helyen a vízszlopot egymáson elhelyezkedő háromszög alapú hasábokkal fedjük le (Torma 2016).

A pontosan megadott peremfeltétel, a szélmeghajtás mellett elengedhetetlen a modell kalibrálása, ami az FVCOM 4.1 verziójának eredeti beállításaihoz képest történtek. Érzékenységvizsgálatot végeztünk a modell legfontosabb paramétereire, amelyek i) a meder érdességi magassága, ii) a háttérkeveredési együttható, iii) a légkör-tó közti hőcserék érdességi magasságai és iv) a fénykioltási együttható voltak. A háttérkeveredési együttható a turbulencia modell által számított turbulens diffúziós együttható minimális értékére ad feltételt, amely széles határok közt mozoghat a környezettől függően. A fénykioltási együttható pedig a rövidhullámú sugárzás mélység mentén történő elnyelődését adja meg. A meder érdességi magassága nem mutatott érdemi hatást az áramlási sebességekre, annak három nagyságrenddel való változtatása esetén sem. A turbulenciamodellel háttérkeveredési együtthatójára ugyanakkor igen érzékeny volt a modell, hasonlóan, mint a hőcserék érdességi magasságaira és a fénykioltási együtthatóra, amelyeket később az eredményeknél részletesen ismertettünk.

A modell pontosságának értékelésekor a számított eredményeket a mért áramlási profilokkal, valamint a sebesség nagyságával [m/s] és irányával [°], továbbá a hőmérsékletprofilokat a mélységátlagolt hőmérséklettel (T_{avg} [°C]) és a rétegzettség erősségét jellemző potenciálisenergia-anomáliával (ϕ [J/m³]) vetjük össze (Wiles és társai 2006):

$$\phi = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 (\bar{\rho} - \rho(z)) g z dz \quad (1)$$

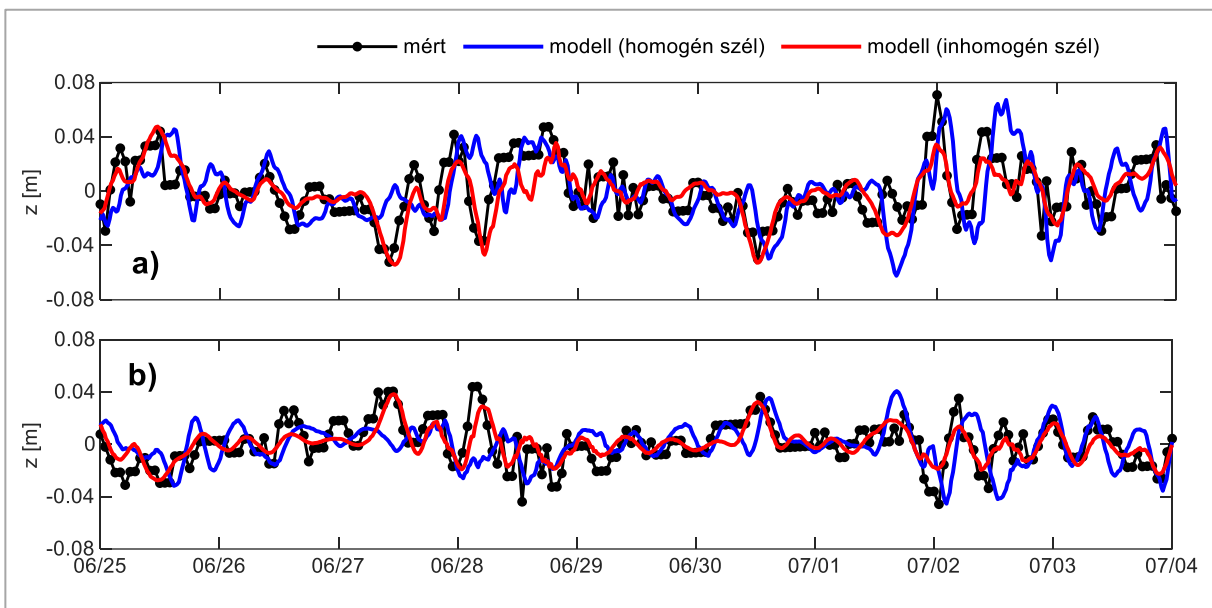
ahol d [m] a vízmélység, ρ [kg/m³] a vízsűrűség, illetve $\bar{\rho}$ annak mélység menti átlaga. A ϕ azt mutatja meg, hogy

mennyi energiára van szükség egységnyi térfogaton ahhoz, hogy a vízszlop teljesen átkeveredjen.

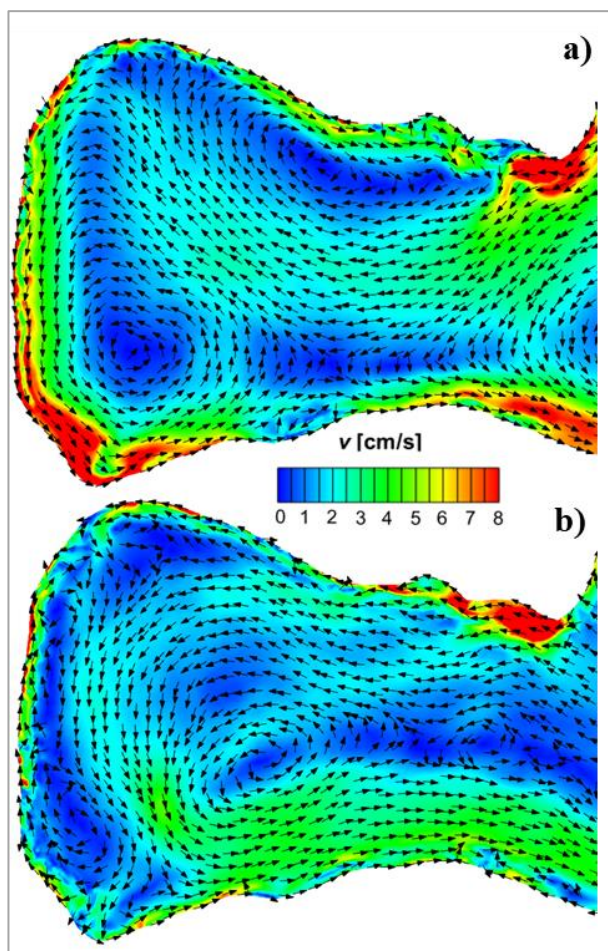
EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

Szélmeghajtás hatása

Először a szélmeghajtás hatását vizsgáltuk a vízlevegésen keresztül. A 6. ábrán a nyugati és a keleti medencében, Keszthelyen (a) és Siófokon (b) mért vízszintekkel vetjük össze a modellezett eredményeinket. Az ábrákon feketével jelöltük a mért vízszinteket, kék színnel az egyszerű homogén széllel, pirossal pedig az interpolált inhomogén széllel meghajtott modell eredményeit ábrázoltuk. Adatok hiányában és az egyszerűség érdekében, gyakran alkalmaznak térben konstans vagy homogén szél- és szélcsúsztató-feszültségmezőt (Laval és társai 2003) tavak hasonló jellegű vizsgálatok. Esetünkben a homogén széllel történő vizsgálathoz a nyílt vízi B állomás szélidősorát terjesztettük ki az egész tóra, azt feltételezve, hogy az a Keszthelyi-medencére reprezentatív, hiszen annak súlypontjában található. Jól látható a 6. ábrán, hogy a homogén szél esetén fázishibák adódtak a vízlevegésben. A jelenség különösen szembeeső a június 27-28-i, illetve a július 1-2-i időszakoknál, amikor a mért és modellezett vízszint-ingadozások ellentétes fázisban vannak. Utóbbi esetben a modell a vízlevegés amplitúdóját felül is becsüli. Ezek a fázishibák szinte teljes mértékben eltűntek az inhomogén szél alkalmazásával. Míg július 2-án a modell valamelyest kisebb lengést adott eredményül, azonban június 27-28-án jól közelíti a mért értékeket. Az amplitúdók tekintetében pontosabb egyezést nem tudunk elérni a vízfelszín ellenállását leíró Charnock-féle összefüggés együtthatójának (α) további kalibrálásával sem. Mindazonáltal az elfogadott együttható megegyezett a nyílt vízi B állomáson mért örvény-kovariancia adatokból levezetett értékkel, amely $\alpha = 0,042$ -re adódott (Lükő és társai 2022a).



6. ábra. Mért és modellezett vízszint-ingadozás idősorok 2019.06.25. és 2019.07.04. között (a) Keszthely és (b) Siófok közelében
Figure 6. Timeseries of measured and modeled water level fluctuations between 25.06.2019. and 04.07.2019. near (a) Keszthely and (b) Siófok

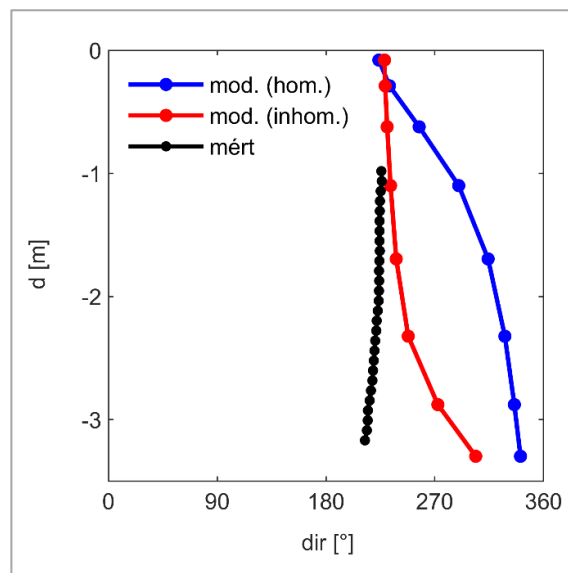


7. ábra. Modellezett mélység-átlagolt áramlási sebességmezők a Keszthely-medencében (a) homogén és (b) inhomogén szélmeghajtás esetén a vihar során idő-átlagolva 2019.07.15. 00:00 és 04:00 között

Figure 7. Modelled depth-averaged velocity field in the Keszthely-basin in case of (a) homogeneous and (b) inhomogeneous wind forcing during the storm time-averaged between 15.07.2019. 00:00 and 04:00

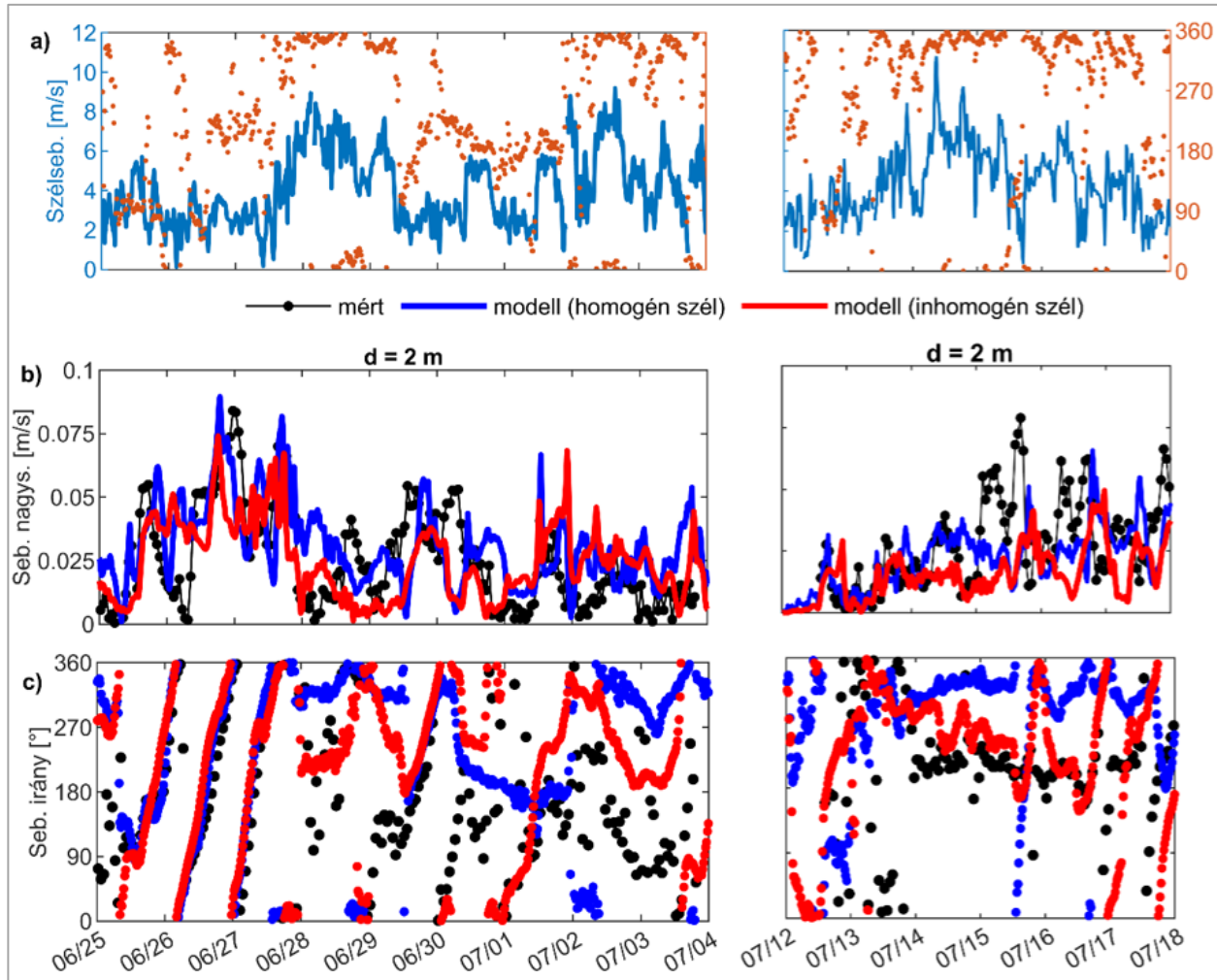
Abban az esetben, ha a vízszint-kilendülések nem teljesen pontosak (különösen fázishibák esetén), akkor az áramlási mintázatok sem modellezhetők jól a tóban, mivel az áramlási irányokat és nagyságokat nagymértékben a vízlengés dominálja (Ji és Jin 2006). A 7. ábrán a mélységátlagolt áramlási mezőket mutatjuk be egy ÉÉNY-i szélvihar esetén. A modellezett áramlási viszo-

nyok teljesen különbözőek a két szélmező esetén. A nagyléptékű áramlási mintázatok teljesen átalakultak a szélmező inhomogenitásának hatására. Ez természetesen különbségeket okoz a nyílt vízi B állomás közelében szimulált áramlási profilokban is, ahogy azt a 8. ábra mutatja. A felszín közelében a sebességek ugyanazon irányba haladnak a szélllel mindkét szélmeghajtás esetén, de az áramlási mintázatok megváltozása miatt a víz az ellenkező irányba halad a mélyebb rétegekben homogén szél esetén. Az inhomogén szélmeghajtással eredményül kapott áramlási profil jóval közelebb került a mért profilhoz. Ennek részletes elemzésére szél és áramlási idősorokat mutatunk be a 9. ábrán a nyílt vízi B állomáson 2 méteres vízmélységben. Hasonlóan a vízlengésekhez, a modellezett áramlási irányok pontossága javult. Ez a július 14-15. közötti vihar esetén igen szembevetendő, amikor az áramlási irányok több, mint 90°-kal pontosabbak lettek. Ezenkívül többször (pl. július 1. és 17-18.) előfordulnak folyamatos átfordulások az áramlási irányokban, amelyeket ugyan kis fáziskéséssel, de le tudott követni a modell a pontosabb szélmeghajtás hatására.



8. ábra. Mért és modellezett mélységmenti áramlási irány profilk a nyílt vízi B jelű állomáson a vihar során idő-átlagolva 2019.07.15. 00:00 és 04:00 között

Figure 8. Measured and modelled velocity direction profiles along the depth at the offshore B location during the storm time-averaged between 15.07.2019. 00:00 and 04:00

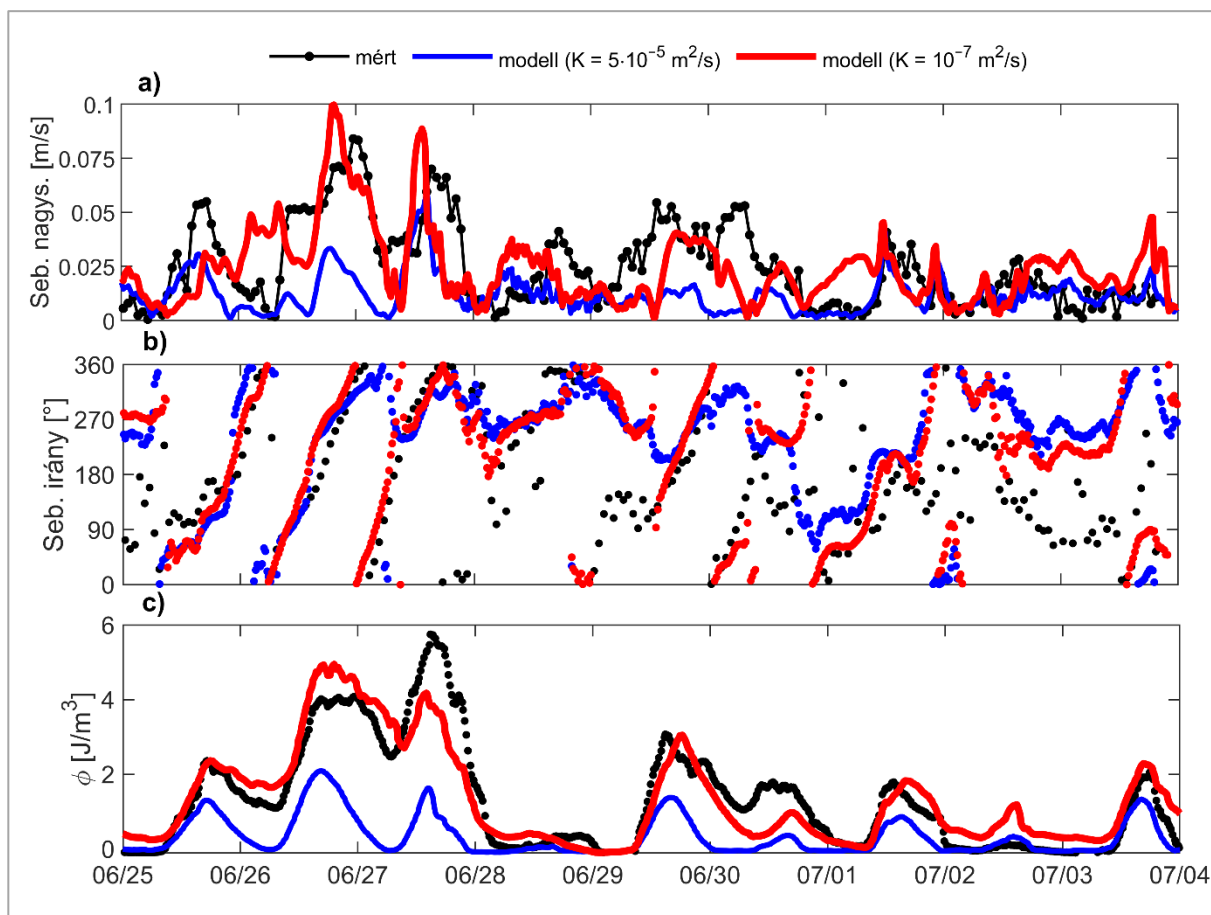


9. ábra. Mért (a) szélesség, mért és modellezett (b) áramlási sebesség nagyság és (c) irány idősorok 2019.06.25. és 2019.07.04., illetve 2019.07.12 és 2019.07.18. között homogén (kék) és inhomogén (piros) szélmeghajtás esetén a nyílt vízi B jelű állomáson
 Figure 9. Timeseries of measured (a) wind speed and direction, measured and modelled (b) velocity magnitude and (c) velocity direction between 25.06.2019. and 04.07.2019., and between 12.07.2019. and 18.07.2019. using homogeneous (blue) and inhomogeneous (red) wind forcing at the offshore B location

Háttérkeveredési együttható hatása

A megfelelő szélmeghajtás megtalálása után a modellparaméterek kalibrációja és finomítása következett. Először a turbulenciamodellel függőleges háttérkeveredési együtthatójának (K) a hatását mutatjuk be. A Balaton esetében ez egy különösen fontos paraméternek bizonyult, amely különösen meglepő, hiszen a szakirodalomban legtöbbször valamilyen alapbeállítás szerint veszik fel az együttható értékét $K = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ nagyságrendben (Durski és társai 2004, Dong és társai 2020). A háttérkeveredési együtthatóra a várttal ellentétben érzékenyek voltak az áramlási nagyságok, ami a turbulens kinetikus energia disszipációjával magyarázható. A 10a-b. ábrán a mért és modellezett áramlási idősorokat mutatjuk be a nyílt vízi B állomáson, két háttérkeveredési együttható alkalmazásával. Láthatjuk,

hogy a kézzel jelölt $K = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ együttható esetén a 2 méteres vízmélységben a sebességnagyságok mindvégig alacsonyabbak a mért értékeknél, míg a pirossal jelölt kisebb $K = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ keveredési együttható esetén a sebességek a mért értékekkel jól egyeznek. Emellett az áramlási irányok is kismértékben javultak a kisebb keveredési együttható esetén (június 27., 29., július 1.) A 10c. ábrán azt láthatjuk, hogy a hőmérsékleti szerkezet, vagyis a rétegzettség helyes reprodukálása hasonlóan alacsony együtthatót kíván meg. Összességében azt mondhatjuk el, hogy $K = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ lehet az a maximális nagyságrend a háttérkeveredési együttható esetén, amellyel jól vissza tudja adni a modell a Balaton függőleges hőmérséklet és áramlási profiljait a tó sekély jellegéből adódóan. Ennél kisebb értékek esetén viszont már nem tapasztaltunk jelentős változást sem az áramlási, sem a hőmérsékleti struktúrákban.

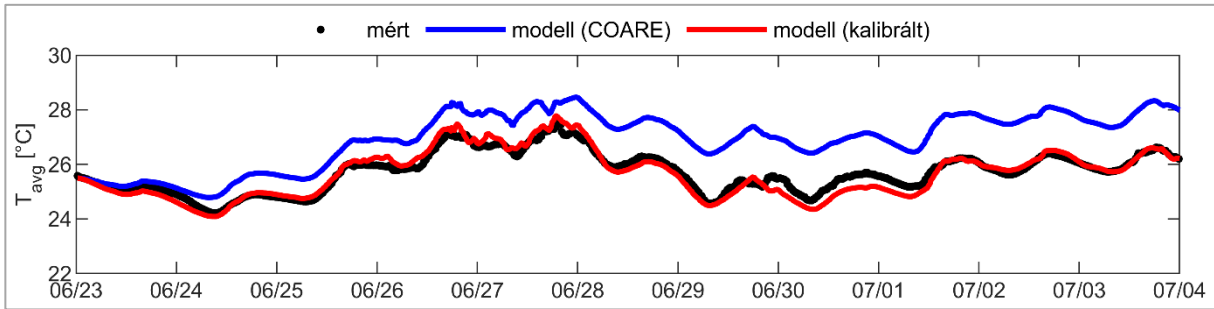


10. ábra. Mért és modellezett (a) áramlási sebesség nagyság és (b) irány, valamint (c) a rétegzettséget mutató potenciálisenergia-anomália idősorok 2019.06.25. és 2019.07.04. között különböző háttérkeveredési együtthatók esetén a nyílt vízi B jelű állomáson
 Figure 10. Measured and modeled (a) velocity magnitude, (b) velocity direction, and (c) potential energy anomaly (representing stratification) timeseries between 25.06.2019. and 04.07.2019. using different background mixing coefficients at the offshore B location

Turbulens hőcserék érdességi magasságainak hatása

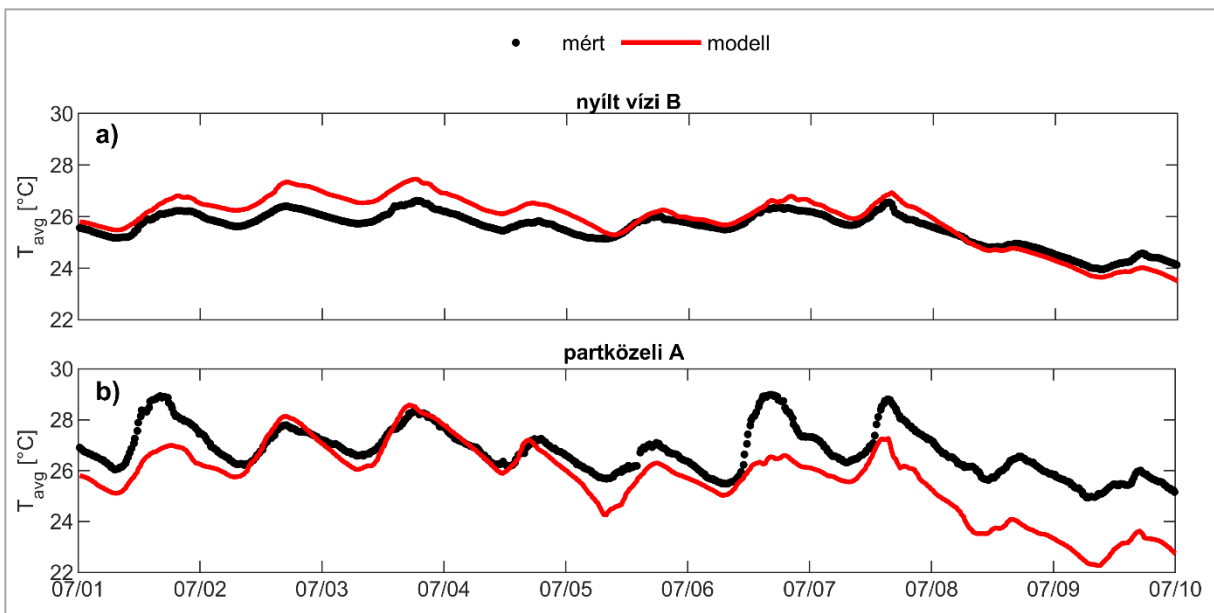
Az FVCOM jelenleg is az egyik legelterjedtebb COARE algoritmust használja a légkör-víz határfelület fluxusainak modellezésére (Fairall és társai 2003). A 11. ábra idősorán láthatjuk, hogy a COARE alkalmazása jelentős hibákat eredményezett a mélységátlagolt hőmérsékletekben, más szóval gyenge az energiamérleg zárása. A COARE azonos értékeket használ az érzékelhető és a látens hőáramok érdességi magasságaira, ezzel szemben a saját balatoni örvény-kovariancia méréseink azt mutatták, hogy a két érdességi magasság nagyságrendekkel eltér egymástól (Lükő és társai 2022a). A 11. ábrán azt láthatjuk, hogy a COARE jelentősen alulbecsüli a hőcseréket, ennek következtében a mélységátlagolt hőmérsékleteket felülbecsüli. Az érdességi magasság értékek kalibrálásával viszont a vízhőmérséklet már pontosabban modellezhető. Azt tapasztaltuk, hogy a tó hőmérsékleti rétegződésére a hőcsere nincs nagy hatással. A rétegzettséget elsősorban a rövidhullámú napsugárzás befolyásolja, mivel az hatol be a vízoszlopba, míg a két említett hőáram a felszínen hat.

Jelenleg a modellünkben kizárólag térben és időben állandó érdességi magasságot tudunk alkalmazni. Ha megnézünk egy másik időszakot, ugyanazokkal az előző időszakra kalibrált érdességi magasság értékekkel, valamelyest rosszabb eredményt kaptunk a modellel (12a. ábra). Ennek okára ismét a balatoni örvény-kovariancia mérési eredményeink nyújtanak magyarázatot. Az EC mérésekből levezetett érzékelhető és látens hőcsere érdességi együtthatók nem csak nagyságrendben különböznek egymástól, hanem a párolgásra vonatkozó érdességi magasság jelentős, néhány nagyságrendbeli szezonális változékonyságot mutatott (Lükő és társai 2022b). A fentiek alapján célszerű lesz a későbbiekben különböző paramétereket alkalmazni akár hónapról hónapra változtatva azok értékét. A partközeli A állomásnál – kb. 50 méterre a parttól – azt láthatjuk (12b. ábra), hogy az alkalmazott érdességi magasságok már kevésbé megfelelőek. Feltételezhetjük, hogy ezeknek a paramétereknek térbeli változékonysága is lehet, például a hullámzás függvényében, amelyet jelenleg nem tudtunk figyelembe venni. Mindazonáltal a hőmérsékletek napi ciklusának amplitúdói jól szimulálhatók a partközeli állomáson. Jelen tanulmányban a célunk az volt, hogy nyílt vízi körülményekre jó becslést tudjunk adni a modellel.



11. ábra. Mért és modellezett mélységátlagolt hőmérséklet idősorok a COARE algoritmussal (kék) és a kalibrált hőcsere érdességi magasságok alkalmazásával (piros) 2019.06.23. és 2019.07.04 között.

Figure 11. Timeseries of measured and modeled depth-averaged temperatures using the COARE algorithm (blue) and the calibrated heat flux roughness lengths (red) between 23.06.2019. and 04.07.2019.



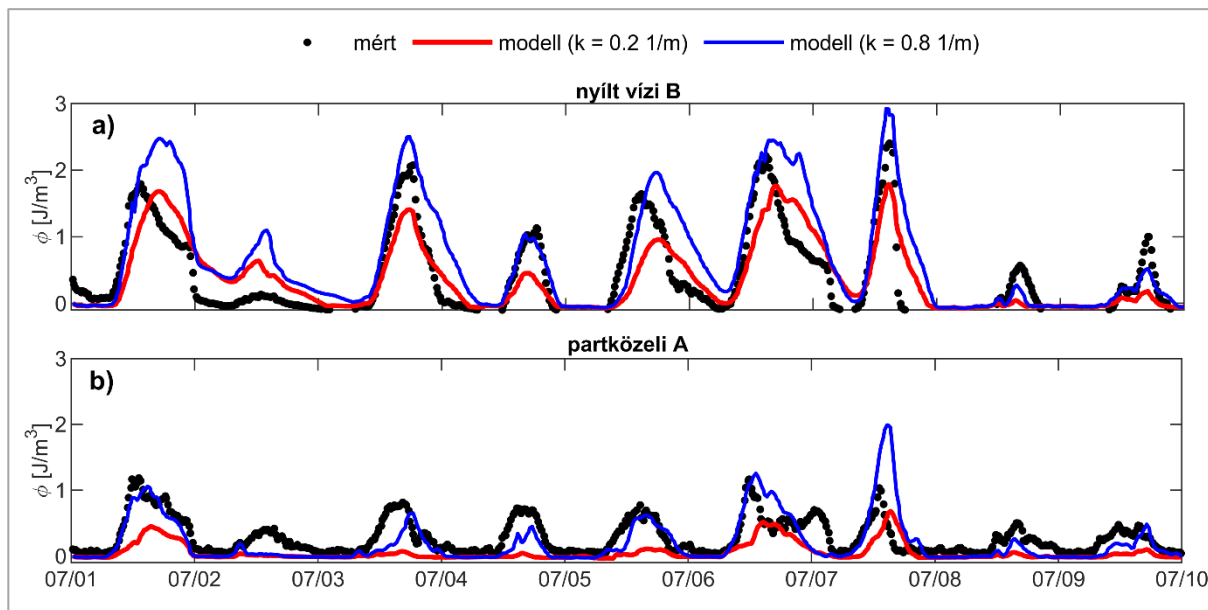
12. ábra. Mért és modellezett mélységátlagolt hőmérséklet idősorok a kalibrált hőcsere érdességi magasságok alkalmazásával 2019.07.01. és 2019.07.10. között (a) partközeli A jelű és (b) nyílt vízi B jelű állomáson

Figure 12. Timeseries of measured and modelled depth-averaged temperature using the calibrated heat flux roughness lengths between 01.07.2019 and 10.07.2019. at the (a) offshore B and (b) onshore A locations

Fénykioltási együttható hatása

Végül a fénykioltási együttható (k) hatását mutatjuk be, amelynek hasonlóan fontos szerepe van a rétegzettség kialakulásánál, mint a háttérkeveredési együtthatónak. A hőcsere érdességi magasságokhoz hasonlóan a fénykioltási együttható is térben és időben egyaránt állandóként vehető figyelembe a modellben. Ez a feltételezés sokszor erős közelítés, mert a fénykioltás a vízoszlop lebegőanyag-tartalmától függ. Nyílt vízen és partközeli zónában sokszor jelentős az eltérés a lebegésben lévő üledék-, illetve fitoplankton-koncentrációban a felkeveredésért felelős hullámozás és az ökológiai folyamatok térbeli változékonysága miatt. A 13. ábrán a modellezett hőmérsékleteket láthatjuk mindkét állomás-

nál a két szélső érték, $k = 0,2$ és $k = 0,8$ 1/m együttható esetén. Jól látható, hogy a hőmérsékleti rétegzettséget jól vissza tudja adni a modell, ha ezen két érték közé vesszük fel az együtthatót. A két helyszínt megvizsgálva ezen együttható esetén is különbségeket tapasztaltunk, a legjobb egyezést part mentén $k = 0,4$ 1/m, nyílt vízre $k = 0,6$ 1/m fénykioltási együtthatóval kaptuk. Ez összhangban áll azzal a jelenséggel, hogy a part mentén a kisebb mélységnek köszönhetően nagyobb felkeveredés és erőteljesebb fénykioltás történik. Illetve megjegyezzük, hogy bár a 12. ábrán mutatott rosszabb egyezés az átlagos hőmérsékletben fennáll a part menti sekély zónában, azonban itt a hőmérséklet ingadozása mellett a rétegződés erősségét is jól szimulálja a modell.



13. ábra. Mért és modellezett potenciálisenergia-anomália idősorok két különböző fénykioltási együttható alkalmazásával 2019.07.01. és 2019.07.10. között (a) partközeli A jelű és (b) nyílt vízi B jelű állomáson

Figure 13. Timeseries of measured and modelled potential energy anomaly applying two different light attenuation coefficients between 01.07.2019 and 10.07.2019. at the (a) offshore B and (b) onshore A locations

KONKLÚZIÓK

Összefoglalva az eddigi eredményeinket, megbízható egyezést kaptunk a modellel a Balaton Keszthelyi-medencéjében a nyílt víz áramlási és hőmérsékleti szerkezetére. Megkerestük azokat a legfontosabb paramétereket, amelyek az áramlásokat és hőmérsékleteket befolyásolhatják. Ezeknek részletes, széles skálájú érzékenységvizsgálatát végeztük el annak érdekében, hogy megtaláljuk a megfelelő paraméterkombinációt, amelyet a 14. ábrán foglaltuk össze. Az ábrán a jelölő nagysága a paraméter érzékenységét mutatja, ahol pedig nincs jelölő azt nem találtuk érzékenynek a vizsgálat során. Többek között azt kaptuk eredményül, hogy a fénykioltási együttható és a háttérkeveredési együttható is hatással van a hőmérsékleti szerkezetre. Így, ha találunk egy optimális paraméterkombinációt a rétegzettség szempontjából, az előfordulhat, hogy nem lesz megfelelő az áramlások tekintetében, mivel arra a szélmeghajtás térbeli változékonysága és a vízfelszín érdességi magasságát megadó Charnock-együttható is hatással van. Tehát többlépéses iterációra van szükség a kalibráció során. A nyílt víz hőmérsékletének alakulása mellett, a gyenge napi ciklusú rétegződést jól tudjuk szimulálni mind nyílt vízi, mind part menti körülmények között. Az áramlások helyes leképezéséhez elengedhetetlen a szélmeghajtás időbeli változása mellett annak térbeli változékonysága is. Azt figyeltük meg, hogy ha a modellezett vízszintkilendülések jó egyezést mutatnak a mérési eredményekkel, akkor az áramlási sebességek és irányok is kellően pontosak, mivel a vízlengésnek domináns szerepe van az áramlási struktúra jellegében. Összességében elmondható, hogy a Keszthelyi-medencére vonatkozóan a nyílt vízi mérések alapján sikerült megtalálnunk az optimális paraméterezést. A szélmeghajtásnál a belső légköri határreteg fejlődés figyelembevétele szükséges. A kalibrált háttérkeveredési együttható $K = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, szenzibilis és látens hőcserére vonatkozó érdességi magasságok

$z_{0H} = 10^{-2} \text{ m}$ és $z_{0q} = 10^{-3} \text{ m}$, és fénykioltási együttható $k = 0,4 \text{ 1/m}$. További célzott pl. partközeli áramlásmérésekkel érdemes lehet pontosítani és kiterjeszteni a modellt a jövőben.

	Vízszintkilendülés	Áramlási sebesség	Áramlási irány	Közép-hőmérséklet	Rétegzettség
Szélmeghajtás	●	●	●		
Háttérkeveredési együttható		●	●	●	●
Hőcsere érdességi magasságok				●	●
Fénykioltási együttható				●	●

14. ábra. A kalibrációs paraméterek és a vizsgált változók közötti kapcsolat erősségének összefoglaló táblázata
Megjegyzés: Minél nagyobb a jelölő, annál nagyobb hatással van a paraméter az adott változóra

Figure 14. Summary table about relationship between the calibration parameters and the analysed variables/processes

Note: The larger the circle is the larger the effect of the parameter to the given variable

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A mérési program a 120551 és 138176 számú OTKA kutatási együttműködés keretében zajlott. A közlemény az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-23-3-II-BME-193 és ÚNKP-23-5-BME-454 Új Nemzeti Kiválóság Program pályázatainak támogatásával készült. A bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg. A jelen közleményben megjelenő kutatások az ITM NKFIÁ által nyújtott TKP2022 IKA támogatásából, az NKFIH által kibocsátott támogatói

okirat alapján valósultak meg (projektazonosító: TKP2022 BME-IKA-VIZ). A második szerző a kutatást az MTA Bolyai János Ösztöndíj (00906/23) támogatásával végezte.

IRODALOMJEGYZÉK

- Anderson, E., Schwab, D.J., Gregory, A.L. (2010).* Real-Time Hydraulic and Hydrodynamic Model of the St. Clair River, Lake St. Clair, Detroit River System. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(8). pp. 507-517. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000203)
- Chen, C., Liu, H., Beardsley, R.C. (2003).* An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20(1). pp. 159-186. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2)
- Dong, F., Mi, C., Hupfer, M., Lindenschmidt, K-E., Peng, W., Liu, X., Rinke, K. (2020).* Assessing vertical diffusion in a stratified lake using a three-dimensional hydrodynamic model. *Hydrological Processes* 34. pp. 1131-1143. <https://doi.org/10.1002/hyp.13653>
- Durski, S.M., Glenn, S.M., Haidvogel, D.B. (2004).* Vertical mixing schemes in the coastal ocean: Comparison of the level 2.5 Mellor-Yamada scheme with an enhanced version of the K profile parameterization. *Journal of Geophysical Research* 109. C01015. <https://doi.org/10.1029/2002JC001702>
- Fairall, C.W., Bradley, E.F., Hare, J.E., Grachev, A.A., Edson, J.B. (2003).* Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate* 16(4). pp. 571-591. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
- Holthuisen, L.H. (2007).* Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
- Homoródi K., Józsa J., Krámer T., Ciraolo, G., Nasello, C. (2012).* Identifying wave and turbulence components in wind-driven shallow basins. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 56(1). pp. 87-95. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2012-1.10>
- Ji, Z.G., Jin, K.R. (2006).* Gyres and seiches in a large and shallow lake. *Journal of Great Lakes Research* 32(4). pp. 764-775. [https://doi.org/10.3394/0380-1330\(2006\)32\[764:GASIAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[764:GASIAL]2.0.CO;2)
- Józsa J. (2001).* Sekély tavak cirkulációs áramlásai. MTA Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Józsa J. (2014).* On the internal boundary layer related wind stress curl and its role in generating shallow lake circulations. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62(1). pp. 16-23. <https://doi.org/10.2478/johh-2014-0004>
- Józsa J., Milici, B., Napoli, E. (2007).* Numerical simulation of internal boundary-layer development and comparison with atmospheric data. *Boundary-Layer Meteorology* 123. pp. 159-175. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9134-9>
- Kang-Ren., J., Zhen-Gang, J. (2005).* Application and Validation of Three-Dimensional Model in a Shallow Lake. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 131(5). pp. 213-225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:5\(213\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:5(213))
- Kocsis M., Szatmári G., Kassai P., Kovács G., Tóth J., Krámer T., Torma P., Homoródi K., Pomogyi P., Szeglet P., Csermák K., Makó A. (2022).* Soluble phosphorus content of Lake Balaton sediments. *Journal of Maps* 18(2). pp. 142-150. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.2004943>
- Krámer T. (2006).* Solution-adaptive 2D modelling of wind-induced lake circulation. Ph.D. Értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Laval, B., Imberger, J., Hodges, B.R., Stocker, R. (2003).* Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *Limnology and Oceanography* 48(3). pp. 983-994. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.0983>
- Lükő G., Torma P., Weidinger T. (2022b).* Intra-seasonal and intra-annual variation of the latent heat flux transfer coefficient for a freshwater lake. *Atmosphere* 13. 352. <https://doi.org/10.3390/atmos13020352>
- Lükő G., Torma P., Krámer T., Weidinger T. (2022a).* Air-lake momentum and heat exchange in very young waves using energy and water budget closure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127. e2021JD036099. <https://doi.org/10.1029/2021JD036099>
- Lükő G., Torma P., Weidinger T., Krámer T., Vecenaj, Z., Grisogono, B., Lázár I. (2021).* Internal boundary layer development over lake surface in case of very young waves. EMS Annual Meeting Abstracts. <https://doi.org/10.5194/ems2021-155>
- Mellor, G.L. (2008).* The Depth-Dependent Current and Wave Interaction Equations: A Revision. *Journal of Physical Oceanography*, 38(11). pp. 2587-2596. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3971.1>
- Niu, Q., Xia, M. (2017).* The role of wave-current interaction in Lake Erie's seasonal and episodic dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122. pp. 7291-7311. <https://doi.org/10.1002/2017JC012934>
- Qi, J., Chen, C., Beardsley, R.C., Perrie, W., Cowles, G.W., Lai, Z. (2009).* An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): Implementation, validations and applications. *Ocean Modelling* 28(1-3). pp. 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.01.007>
- Torma P., Krámer T. (2017).* Wind Shear Stress Interpolation over Lake Surface from Routine Weather Data Considering the IBL Development. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 61(1). pp. 14-26. <https://doi.org/10.3311/PPci.9542>

Torma P. (2016). Modelling wind-driven shallow lake hydrodynamics and thermal structure. Doktori értekezés Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C.K., Arango, H G. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences* 34(10). pp. 1284-1306. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.012>

Wiles, P.J., van Duren, L.A., Häse, C., Larsen, J., Simpson, J.H. (2006). Stratification and mixing in the Limfjorden in relation to mussel culture. *Journal of Ma-*

rine Systems 60(1-2). pp. 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.09.009>

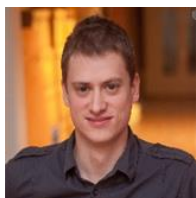
Zhao, Q., Ren, J., Wang, J.X.L. (2018). Temporal and spatial characteristics of potential energy anomaly in Lake Taihu. *Environmental Science and Pollution Research* 25. pp. 24316-24325. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2204-y>

Zhao, Q., Sun, J., Zhu, G. (2012). Simulation and Exploration of the Mechanisms Underlying the Spatiotemporal Distribution of Surface Mixed Layer Depth in a Large Shallow Lake. *Advances in Atmospheric Sciences* 29(6). pp. 1360-1373. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-1262-1>

A SZERZŐK



LÜKŐ GABRIELLA 2020-ban szerzett MSc oklevelet, jelenleg negyedéves PhD hallgató a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén. A 2023/24-es tanévben a Colorado School of Mines (USA) Fulbright hallgatói ösztöndíjas vendégkutatója. Doktori kutatása a tavi léghő-víz határfelület turbulens folyamatainak vizsgálatára fókuszál. 2021 óta tagja az MHT-nek.



TORMA PÉTER 2011-ben szerzett építőmérnök MSc oklevelet, majd 2016-ban PhD fokozatot. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén dolgozik 2011 óta, 2019-től, mint egyetemi docens. Fulbright ösztöndíjasként a UW-Madison (USA) vendégkutatója volt a 2017/18-as tanévben. Kutatási területe a fizikai limnológia, a hidrometeorológia, különös tekintettel a víz-levegő határfelület turbulens cserefolyamatainak örvénykovariancia elvű mérésére, a tavak hőháztartása, valamint a numerikus hidrodinamikai modellezésére. 2023 óta tagja az MHT-nek.



Hattyúlábon (Doroszlai Dénes képe)