

Az ELCOM tómodell adaptálása sekély tavakra*

SZANYI SÁNDOR

Bevezetés

A számítástechnika és a numerikus módszerek fejlődésével a tavak 3D-s áramlásmodellezése egyre inkább előtérbe kerül, melynek mély tavi környezetben való sikeres alkalmazására már számos példát találunk a nemzetközi szakirodalomban (lásd pl. *Simons*, 1980; *Laval et al.*, 2005). Ezzel szemben a térbeli megközelítés sekély tavi környezetre való alkalmazása kevésbé feltárt. Ennek számos oka van, melyek közül talán a legjelentősebb, hogy a mélység mentén integrálátlagolt 2D-s modellek a víztömeg transzportot kielégítően közelítik, így az ezt célzó számításokban sekély tavak esetében ritkábban merült fel a 3D-s számítás szükségessége. Az ezredfordulóra kiderült, hogy a terepi áramlásmérések sikeres reprodukálása nem elsősorban numerikus fejlesztés kérdése, hanem sokkal inkább a tó feletti szélmező jó térbeli leírásán múlik. Utóbbira adott megoldást *Józsa* (2001), hazai tavi méréseket 2D-s áramlási modellel sikeresen reprodukált oly módon, hogy külső gerjesztő mezőként a tó feletti belső határréteg fejlődés és a szélcsúsztatófeszültség összekapcsolt modelljét alkalmazta, azt összetett aerodinamikai modellezéssel (*Józsa et al.*, 2007a), összetett terepi és vízi növényzet fedettségére (*Krámer és Józsa*, 2007, *Józsa et al.*, 2007b) is igazolva. Ehhez a munkához kapcsolódva céltom 3D-ban modellezni hazai sekély tavainkat, melynek első lépéseként az eddig csak mélytavakra alkalmazott ELCOM 3D-s modellt adaptáltam a Balaton keszthelyi és szigligeti medencéjére.

Mérések

A modell sikeres validálásához egyidejű áramlás- és szélmérésekre volt szükségem. A BME Vízépítés és Vízgazdálkodási Tanszék 1997. tavaszán és őszén, illetve 1998. tavaszán három egy-egy hónapos mérési kampányt végzett el. Ezen mérések eredményeit használtam fel a modell adaptálási lehetőségének feltérképezésére. Mivel a mérések több ponton és helyenként több mélységben zajlottak, lehetőségem nyílt nem csak a mélységátlagoltan, hanem a tényleges mérési mélységekben vizsgálni a modell eredményeit.

Az ELCOM tómodell bemutatása

Az ELCOM tómodellt a Kelet-Ausztráliai Egyetem Vízutató Intézetében (CWR) fejlesztették ki. A modell 3D-ban hidrosztatikus állapotot feltételezve, Boussinesq-féle közelítésen alapuló, Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenleteket old meg (*Hodges*, 2000a), valamint ettől elválasztva oldja meg a transzportálódó anyagok keveredését és az impulzus advekciónak leíró egyenleteket. A szabadfelszín megoldásához ún. fél-implicit megoldást

alkalmaz (*Casulli és Cattani*, 1994), az impulzus advekciónak számításához pedig vegyes Euler-Lagrangian módszert, ezzel szemben a skalár-transzportegyenletek megoldásához konzervatív, hozamlimitált, explicit differencia sémát alkalmaz. A turbulencia hatását (*Hodges et al.*, 2000b, *Laval et al.*, 2003) egy mély tavakra kifejlesztett, a horizontális és vertikális örvényviszkózitási tagot különböző sémák alapján számító turbulencia modellel veszi figyelembe, mely eltér az ezen a területen mára már megszokott k-s vagy LES modellektől.

A modell paraméterezése

A Balaton modellezésére horizontálisan egységes 100 m-es cellakiosztást alkalmaztam, vertikálisan pedig egyenletesen változó 15–40 cm-es felbontást. Az időlépés megválasztása a séma fél-implicit volta miatt nem volt egyértelmű, érzékenység vizsgálat alapján a séma ugyan fél-implicit, de explicitként, időlépésben korlátozottan viselkedik. A mederérdesség változtatására a modell kis érzékenységet mutatott és mivel a mederfelszín anyagának térbeli eloszlására nem volt adat, konstans érdességet alkalmaztunk.

Konstans szél és szél-csúsztatófeszültség mező alkalmazásának eredményei

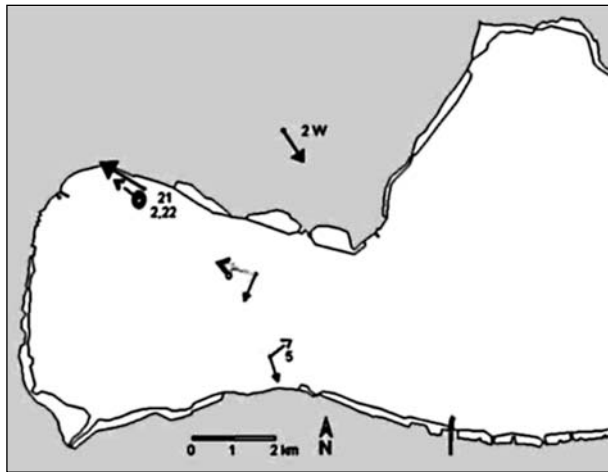
A modell adaptációjának során konstans szélsébség és szél-csúsztatófeszültség mező feltételezésével ugyanolyan problémákba ütköztem, mint *Shanahan et al.* (1981) valamint *Somlyódy és van Straten* (1986), akik korábban ilyen meghajtás mellett 3D-s, majd 2D mélység-integrálátlagolt modellel próbálták a Balaton áramlásait numerikusan reprodukálni. Nevezetesen, az áramlási irányok sok ponton ellentétes értelműek adódtak a mérésekkel. Ez a megállapítás a mérések mélységeiben modellezett áramlási irányokra is igaz. Erre a problémára sem az adaptív rácshálós 2D-s (*Borthwick et al.*, 2001), sem a konstans szélmező melletti további 3D-s közelítések (*Ciraolo et al.*, 2004) sem hoztak megoldást.

Az áramlást keltő szélmező realisztikus leírása

Terepi mérésekre támaszkodva elsőként *Józsa et al.* (1990) kísérlete meg, akkor még heurisztikusan, figyelembe venni a Balaton feletti szélmező meghajtási hosszmenti jelentős egyenlőtlenségeit. Mivel a konstans meghajtás mellett a szimulált és a mért áramlási helyzetek irányukban több ponton nem egyeztek, számos további vizsgálat alapján *Józsa* (2001) adaptált tavakra egy olyan szélmodellt, mely a belső határréteg meghajtási hossz menti fejlődését Taylor-Lee-féle összefüggésből, a vízfelszín érdességét Charnock-féle közelítésből, valamint a vízfelszín súrlódási tényezőjét *Wu* (1982) alapján

* A 2010. évi Lászlóffy Woldemár diplomamunka pályázaton alapképzés kategóriában I. díjat nyert diplomamunka kivonata.

¹ A modell alapján számított szélmezőre utalva az angol Internal Boundary Layer kifejezésből eredő IBL rövidítést használok.



1. ábra. Mért (fekete), illetve a mérési mélységben IBL-es meghajtás (sárga) és konstans meghajtás (piros) mellett modellezett áramlási helyzet 340°-os $W_{10} = 8$ m/s-os part feletti szél mellett

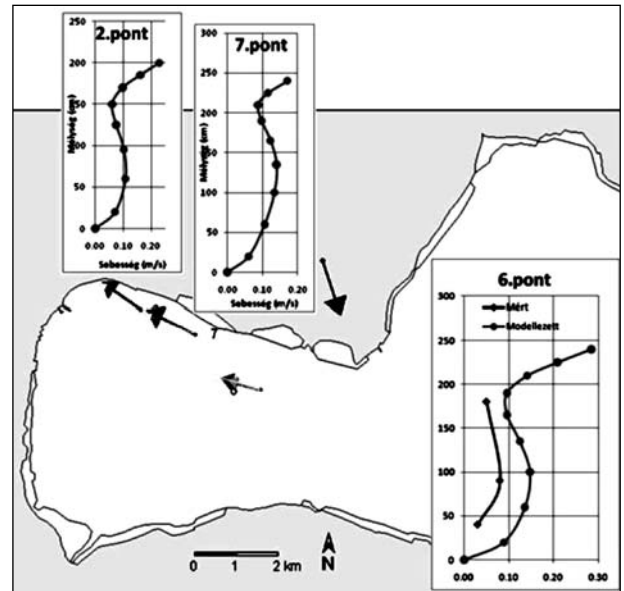
számítja¹. Az összekapcsolt modell ezen összefüggések alapján becsli a 10 m magasságban értelmzett szélsébséget. A módszer első alkalmazását egyszerű 3D-s medencékre Curto et al. (2006) mutatja be. Ezt az összekapcsolt modellt alkalmaztam a szélsébség és szélcsúsztatófeszültség mező számításához, és bemeneti adatként az így kapott szélsébséget adtam meg, annyi módosítással, hogy a vízfelszín sűrűlási tényezőjének Wu -féle közelítésével korrigáltam az ELCOM konstans sűrűlási tényezőjét.

Eredmények elemzése

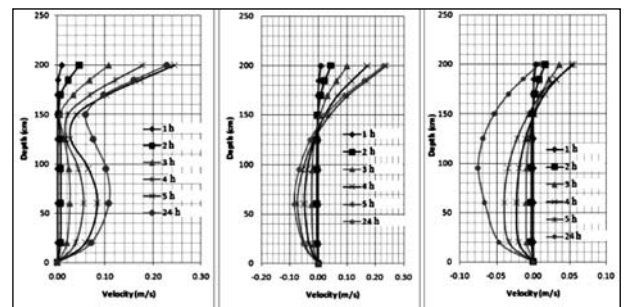
Az összekapcsolt modellel számított szélcsúsztatófeszültség mezővel gerjesztve, az ELCOM 3D képes volt realisztikusan reprodukálni a mért áramlási helyzeteket, mind mélységátlagoltan, mind a tényleges mérési mélységekben (1. ábra). Az áramlások iránya a mértekkel megegyezett, de a sebességek számos esetben nagyobbak voltak, mint a mérték (lásd pl. 2. ábra 6. pont). A függély menti sebességnagyság- és sebességi-irány-cioszlások alapján az mondható, hogy egy függély mentén kialakuló sebességirány a vízoszlop 70 %-át uralja (3. ábra), ami alátámasztja azt, hogy mélység-integrálátlagolt 2D-s modellel is jól lehet reprodukálni a méréseket.

Ennek megfelelően a modell mélységátlagolt képe jó egyezést mutatott a SWAN (Krámer et al., 2000), Balatonra hosszú ideje alkalmazott, hasonlóan paraméterezett 2D-s modell eredményeivel.

Tehát az öbölléptékű cirkulációk modellezésére sikeresen adaptáltuk a modellt, habár a modellezett sebességek nagyobbak voltak a mértéknél. Ezután áttértem kisebb léptékű áramlások vizsgálatára, hogy például a 2000. évi balatonfenyvesi partközeli méréseket modellezem, azonban ebben az esetben már nem kaptam olyan jó egyezést a mért és modellezett áramlási helyzetek között. Ennek oka valószínűleg az, hogy a mély tavakra kifejlesztett turbulencia-modell sekély vizek kisebb léptékű áramlásainak pontos reprodukálására már

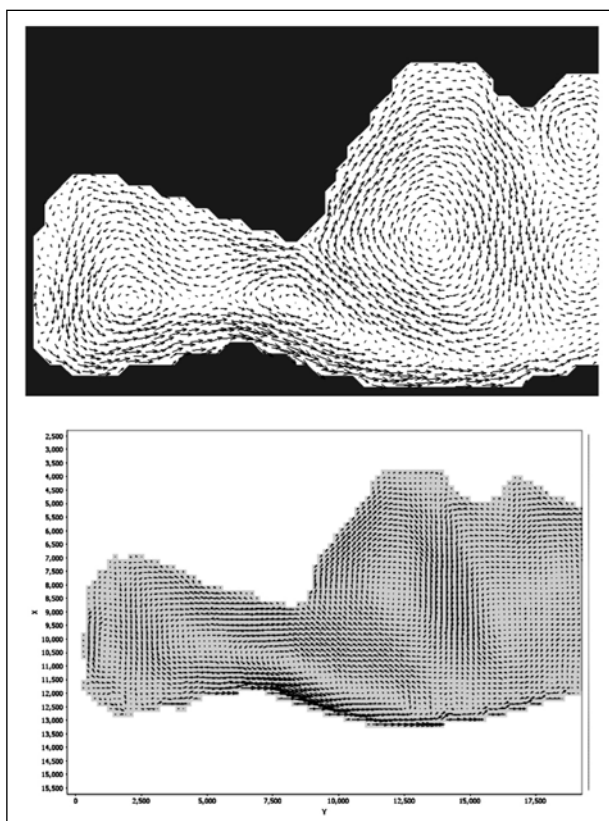


2. ábra. Mért (fekete), illetve a mérési mélységben IBL-es meghajtás (sárga) és mellett modellezett áramlási helyzet 350°-os $W_{10} = 8$ m/s-os part feletti szél mellett, a hozzájuk tartozó függélymenti vízszintes irányú sebességnagyság profillal (mért: kék; modellezett: narancssárga).



3. ábra. A szélfelőli oldalon $z_0 = 0,4$ m érdességmagasságúnak tekintett terep felett $W_{10} = 6$ m/s-os, 340°-os szél és a nyíltvíz felett a belső határreteg fejlődése szerint alakuló szélcsúsztatófeszültség hatására (balról jobbra haladva) a V sebesség abszolút értékének, illetve u , v keleti és északi állású vízszintes komponensének időbeli fejlődése

nem alkalmas. A modellezés során megmutatkozott, hogy számos hozadéka van a 3D-s modellezésnek a 2D-szel szemben, még sekély tavaknál is. Egyrészt mélység-integrálátlagolt 2D-s modelleknél a fenéken fellépő csúsztatófeszültséget a függély-középsébségből csak erősen közelítő analitikus függvényvel származtathatjuk, ezzel szemben azt 3D-ban közvetlenül tudjuk számítani. Emellett megmutatkozott az is, hogy az áramlási irány a függély mentén helyenként jelentősen változik, mely szennyeződés vagy lebegtetett hordalék terjedése esetén igen fontos lehet. Ezek mellett a kifejezetten térbeli folyamatok, mint például a függőleges síkban kialakuló átforduló jellegű áramlások, illetve a fel- és leáramlási zónák vizsgálata mindenképpen 3D-s számítást igényel. Megjegyzem továbbá, hogy jelen dolgozat után ennek vizsgálatát egy másik, PANORMUS nevű model-



4. ábra. Modellezett SWAN (felső) és ELCOM (alsó) állandósult áramkép a $z_0=0,4$ m érdesség-magasságúnak tekintett terep felett $W_{10}=8$ m/s-os, 340° -os szél és a nyíltvíz felett a belső határreteg fejlődése szerint alakuló szél-csúsztatófeszültség hatására

lel folytattam (Napoli, 2010), mellyel Lagrange-rendszerű vizsgálataimban megmutattam, hogy egyes vízrézszeccék milyen bonyolult pályákat járhatnak be, illetve hogy egyes helyeken milyen különböző módon viselkednek, ezen keresztül megmutatva számos olyan esetet, amikor mindenképpen 3D-s modellezés szükséges (Szanyi, 2010).

Összefoglalás

Habár az ELCOM tómodell adaptálása számos ponton sikeres volt ahhoz, hogy bizonyossággal mondhasuk, hogy a függély mentén is realisztikusan képes visszaadni a sekély tavi (csettanulmányként a balatoni) sebességprofilokat, az igazoláshoz több egyidejű, függély mentén többpontos mérésre lenne szükségünk. Továbbá azt is láttuk, hogy térben kisebb léptékű vizsgálatokra sekély tavaknál kevésbé alkalmas a modell. Míndazonáltal a jövőbeli mérések tervezésénél jóval célirányosabban tudunk műszereket telepíteni a modell eredményei alapján.

Köszönetnyilvánítás

Kiemelt köszönettel tartozom konzulensemnek: Dr. Józsa Jánosnak a diploma dolgozat szakmai irányításáért és a fáradtságot nem ismerő témavezetéséért, továbbá ipari konzulensemnek dr. Honti Márknak együttműködő segítségéért, valamint feleségemnek, Szanyi Reginának, aki végig támogott.

IRODALOM

- Borthwick, A. G. L., Cruz, S., Józsa, J.: Adaptive quad-tree model of shallow-flow hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Research* 39(4): 413–424. 2001.
- Casulli, V., Cattani, F.C.: Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. *Comput. Math. Applic.* 27, pp. 99–112. 1994.
- Ciraolo, G., Lipari, G., Napoli, E., Józsa, J., Kramer, T.: Three-dimensional numerical analysis of turbulent wind-induced flows in the Lake Balaton (Hungary). In: *Proc. International Symposium on Shallow Flows*. Delft, Hollandia, 2003.06.16–2003.06.18. Balkema, pp. 661–669. 2004.
- Curto, G., Józsa, J., Napoli, E., Krámer, T., Lipari, G.: Large scale circulations in shallow lakes. In: M Brocchini, F Trivellato (eds.) *Advances in Fluid Mechanics* 45. – Vorticity and turbulence effects in fluid structure interactions. Southampton, WIT Press, pp. 83–104. 2006.
- Hodges, B. R.: Numerical techniques in CWR-ELCOM. Technical report, Centre for Water Research, Technical Report WP 1422-BH., 2000a.
- Hodges, B. R., Imberger J., Saggio A. and Winters K.: Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and Oceanography* 45: 1603–1620. 2000b.
- Józsa, J., Sarkkula, J., Tamsalu, R.: Calibration of Modelled Shallow Lake Flow using Wind Field Modification. *Proc. VIII. International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Venice, Italy, Computational Mechanics Publications, pp. 165–170. 1990.
- Józsa J.: Sekély tavak szél keltette cirkulációs áramlásai. *MTA-doktori Értekezés*, MTA, Budapest, 178 p. 2001.
- Józsa, J., Napoli, E., Milici, B.: Numerical simulation of the internal boundary layer development and comparison with atmospheric data. *Boundary-layer Meteorology* 123: pp. 159–175. 2007a.
- Józsa, J., Kramer, T., Napoli, E.: The impact of terrain roughness and water level changes on wind-induced shallow lake circulation patterns. In: *CD-ROM Proc. Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics (ISEH V)*. Phoenix, USA, 2007.12.04–2007.12.07. p. 71. 2007b.
- Kramer, T., Józsa, J., Sarkkula, J.: Modelling of a coastal wetland for restoration planning. In: *Proceedings of the symposium on restoration of lakes and wetlands*, November 2000, Bangalore, India. 2000.
- Kramer T., Józsa, J.: Solution-adaptivity in modelling complex shallow flows. *Computers & Fluids* 36(3): pp. 562–577. 2007.
- Laval, B., Imberger J., Hodges B. R.: Modeling circulation in lakes: spatial and temporal variability. *Limnology and Oceanography*. 48(3): 983–994., 2003.
- Laval, B., Imberger J., Findikakis A. N.: Dynamics of a large tropical lake. *Aquatic Sciences*, 67(3):337–349., 2005.
- Napoli, E.: Panormus User's Manual, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Applicazioni Ambientali. Università di Palermo, Palermo, Italy, 2010.
- Simons, T. J.: Circulation Models for Lakes and Inland Seas, *Bulletin CCIW*, 1980.
- Shanahan, P., Harleman, D. R. F. and Somlyódy L.: Modeling wind-driven circulation in Lake Balaton. *IIASA Collaborative Paper – 81–7*, Austria, 105 p., 1981.
- Somlyódy L., van Straten, G. (eds.): Modeling and Managing Shallow Lake Eutrophication. with Application to Lake Balaton. *Springer Verlag*, Berlin, 1986.
- Szanyi S.: Szél keltette tavi vízmozgások térbeli struktúráinak vizsgálata. *TDK dolgozat*, BME, Budapest, 2010.
- Wu, J.: Wind-Stress Coefficients Over Sea Surface from Breeze to Hurricane. *J. Geophysical Research*, Vol. 87, No. C12, pp. 9704–9706, 1982.