

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

PhD téziszfüzet

Szél keltette sekélyvízi hullámmás vizsgálat és modellezése

Homoródi Krisztián

Témavezető: Dr. Józsa János

Budapest, 2012

A kutatás előzményei

A sekély tavaink értékes és egyben érzékeny környezeti rendszerek. A nádasban fészkelő gazdag madárvilág csak egy e tavak környezetvédelmi jelentőségét alátámasztó okok közül. Számos emberi tevékenység is kötődik hozzájuk, mint például a halászat, az üdülés vagy a nádgazdálkodás, így e tavak nemzetgazdasági szempontból is fontosak. Azonban a térfogatukhoz képest nagy felszínük és hosszú partvonaluk miatt ezek a tavak különösen érzékenyek a vízháztartásuk megzavarására. Továbbá a jellemzően kicsi átfolyó vízhozamok miatt a tóba kerülő anyagok tartózkodási ideje jóval meghaladja a folyókban tapasztalhatót. Így a szennyezések miatti felelősség is jóval nagyobb, mint a folyók esetén. Általában az ezekkel a tavakkal való körültekintő gazdálkodás fontos a fenntartható vízhasználatához.

A vízszinteshez képest csekély függőleges kiterjedés mellett a sekélység azt is jelenti, hogy a vízfelszínen működő erők hatása elér a mederfenéki és a mederfenéken ható erők hatása a vízfelszínen is megjelenik. Ismert, hogy a szél keltette felszíni hullámzás és a vízcsepceskék ehhez kapcsolódó periodikus mozgása jelentős szerepet játszik a sekély tavak áramlási és üledékvándorlási folyamataiban, mint például az üledék felkeveredésében. Sekély tavakban a szél keltette hullámzás több különböző folyamaton keresztül is érdemi hatással lehet az áramlási viszonyokra. Például a hullámzás okozta fenék közeli turbulencia miatt az áramlás a fizikainál nagyobb látszólagos érdességet érzékel. Döntően a hullámzás okozta fenék közeli turbulencia okozza a mederanyag felkeveredését is. Ez a folyamat nemcsak az üledékvándorlási folyamatokra van hatással, de befolyásolhatja az eutrofizációt is. Egyrészt az áramló üledékű tápanyagok visszakerülve a vízterbe ismét oldott állapotba kerülhetnek, másrészt viszont a felkeveredő üledék korlátozza a fény behatolásának mélységét.

A terepi mérések és azok részletes elemzése ma is fontos ahhoz, hogy valóságghú képet kapjunk a sekélyvízi hidrodinamikai viszonyokról. A Fertő tó áramlási viszonyainak módszeres feltárása 1990-ben indult meg a Fertőrákosi-öbölben, majd egy magyar-osztrák- finn kutatási program keretében a tó ausztriai részén folytatódott. A fő cél a szél keltette áramlási rendszerek feltárása kezdve a tó léptékű rendszerektől lemenve egészen az öbölléptékű struktúráig. Hullámzásméréseket a XXI. század első éveiben végeztek a Fertőrákosi-öbölben és a tó osztrák részén Illmitz közelében. Hallgatóként ezeknek a mérési adatoknak a feldolgozásába kapcsolódhattam be.

A legtöbb széles körben alkalmazott terepi hullámzásmérési módszer a hullámzás jellemzőiről csak egy pontban képes információkat adni, a hullámzási viszonyok térbeli változékonyságáról viszont nem. Az hidrodinamikai viszonyok térbeli jellemzésének lehetséges módja analitikus becslő képletek vagy numerikus modellek alkalmazása. A hullámzásbecslő képletek vagy a numerikus hullámzásmodellek révén lehetővé válik, hogy a hullámzási viszonyokról rendelkezésünk álló ismereteinket kiterjesszük a teljes vizsgált tóra. Mielőtt azonban alkalmaznánk ezeket a hullámzásbecslő módszereket, meg kell bizonyosodnunk arról, hogy kellő pontossággal képesek reprodukálni a mért adatokat. Az amerikai mérnökhadtest által kiadott Shore Protection Manual (partvédelmi kézikönyv, SPM) tartalmaz széles körben alkalmazott féltapasztalati összefüggéseket a szignifikáns hullámmagasság és a jellemző periódusidő sekélyvízi viszonyok közötti becsléséhez. Egyszerűségük ellenére a Balaton esetén az ezek a képletekkel számított hullámjellezők elfogadható egyezést mutattak a mért hullámjellezőkkel. A 2D spektrális alapú hullámzásmodellek körébe tartozó SWAN-t (Simulating Waves Nearshore rövidítése) alkalmaztam. Ez a modell kifejezetten tengerek partközeli, sekély területein a szél keltette hullámzási viszonyok szimulációjára készült.

A hullámzást keltő szélmező térbeli egyenlőtlenségeinek kellően részletes leírására általában nagy számú pontban párhuzamosan végzett mérésre van szükség. Rendszerint erre nincs lehetőség, ám a szélesebbéghajtási hossz menti szabályos változása, amit a felszíni

érdesség a környező terep és a nyílt vízfelület határán tapasztalható hirtelen változása okoz, egy légköri belső határréteg (internal boundary layer, röviden IBL) modellel jól leírható. Az IBL modellel terepi mérésekkel igazolták és megmutatták, hogy sekély tavak áramlási viszonyait érdemben befolyásolja. A szélmező IBL alapú egyenlőtlenégeinek a számított hullámzási viszonyokra gyakorolt hatását van Vledder vizsgálta. Az eredményei azt mutatják, hogy ez a hatás az általa vizsgált, a Fertő tóénál számottevően nagyobb vízmélység esetén elhanyagolható. Megvizsgáltam ezért, hogy a Fertő tóéhoz hasonlóan sekély tavak esetén tapasztalható-e számottevő hatás a hullámzási viszonyokon vagy nem.

Célkitűzések

Vizsgálataim fő célja az volt, hogy az eddiginél pontosabb képet kapjunk a sekélyvízi hullámzási viszonyokról. Ennek elérésére a doktori értekezésem céljai a következők:

- A nyomásalapú hullámzásméréssel gyűjtött adatok feldolgozási módszertanának fejlesztése, a turbulencia és a mérést terhelő hibák hatásának csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében.
- A hullámzás jellemzőinek 3D pontbeli sebességmérés eredményeiből való rekonstruálásához szükséges módszertan kidolgozása és igazolása. A hullámzáshoz köthető sebességkomponens elkülönítése, belőle a felszínelmozdulás idősorának rekonstruálása, a hullámzás jellemzőinek számítása.
- A hullámzás jellemzőiről a mérési pontban rendelkezésünkre álló ismereteinknek a teljes tóra való kiterjesztéséhez egy alkalmas tapasztalati hullámzásbecslő módszer igazolása vagy egy 2D numerikus hullámzásmoделl felállítása, kalibrálása és ellenőrzése.
- Az igazolt numerikus hullámzásmoделlrel a meghajtási hossz mentén szabályosan változó szélviszonyok a hullámzás jellemzőire és az üledéktranszport folyamatokra gyakorolt hatásának számszerűsítése.

Új tudományos eredmények

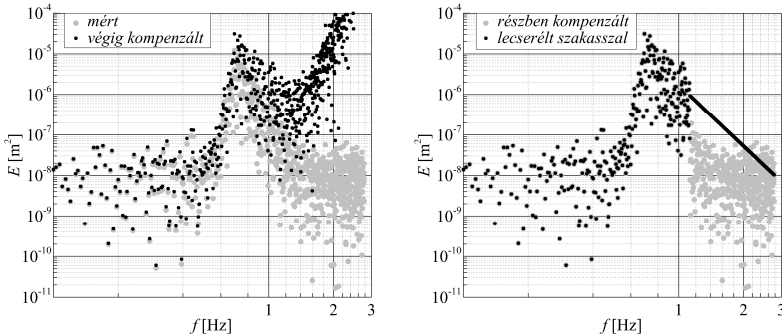
A kutatómunka során elért új tudományos eredményeket négy tézis formájában foglaltam össze. Az 1. és 2. tézis a hullámzásméréssel, a 3. és 4. tézis a hullámzási viszonyok numerikus modellezésével kapcsolatos eredményeimhez kapcsolódik.

A felszíni hullámzás a víznyomás ingadozását okozza a víztérben. Monokróm haladó hullám esetén a kialakuló nyomásmező leírható a lineáris hullámelmélet segítségével. A hullámzás okozta nyomásingadozás a hullám frekvenciájától függő mértékben csillapodik a mélység mentén. A felszínelmozdulás idősor nyomásadatokból való rekonstruálásakor ezt a hullámfrekvencia függő csillapodást kompenzálni kell venni. A hullám frekvenciájának növekedésével a csillapodás mértéke is nő.

A természetben a felszínelmozdulás idősort nagyszámú eltérő frekvenciájú hullámösszetevő alkotja. Mivel a csillapodás függ a hullám frekvenciájától, ezért a kompenzációt a mért idősor helyett annak spektrálfelbontásán kell elvégezni. A csillapodás miatt a hullámspektrum magasabb frekvenciákhoz tartozó tartományán elvégezve a kompenzációt valószínűtlenül nagy értékeket kapunk. Ennek oka feltehetően az, hogy a hullámzás helyett a turbulencia energiatartalma illetve a mérést terhelő hibák hatása a domináns ebben a frekvenciatartományban. Így a hullámzáshoz köthető nyomásingadozás csillapodásának kompenzálása itt nem alkalmazható. Emiatt a kompenzációt csak egy határfrekvenciáig végzik el. Az e határfrekvencia feletti, az előbbieket miatt a hullámspektrumban hibásan megjelenő hullámösszetevők is szerepet játszanak azonban a hullámzást jellemző paraméterek számításában.

1. tézis: Mért adatok feldolgozási módszerének továbbfejlesztése

Módszert állítottam fel a hullázmérési adatok feldolgozásának a továbbfejlesztésére, ami nyomás- és pontbeli 3D sebességmérésen alapuló hullázmérés esetén egyaránt alkalmazható. Megmutattam, hogy a hullámspektrum turbulencia által uralt szakaszának egy illesztett hatványfüggvénnyel való helyettesítése a számított hullámparamétereket érdemben módosítja, ezért a kidolgozott eljárást célszerű alkalmazni. A Fertő tavon végzett mérések alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az illesztett hatványfüggvények kitevőinek egésze kerekített átlaga -5 . [1, 3]



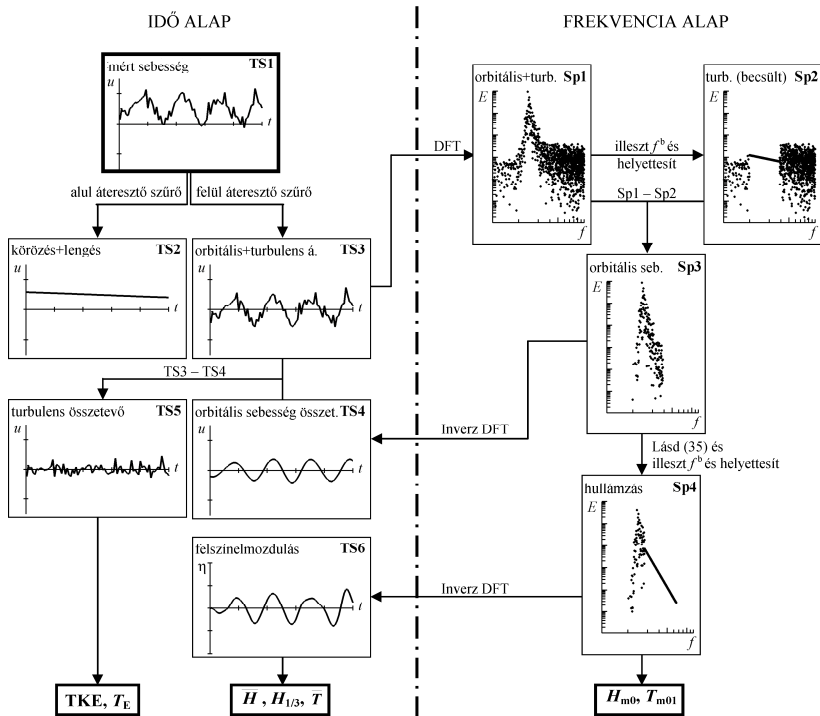
Egy jellegzetes 5 perces mérés hullámspektruma (szürke pontok), a teljes frekvenciatartományban és egy határfrekvenciáig kompenzált, a felett hatványfüggvénnyel helyettesített spektrumokkal (fekete pontok).

Számos egyéb hullázmérési módszerhez hasonlóan a nyomásmérésen alapuló hullázmérés sem alkalmas a hullámok terjedési irányának meghatározására, annak ellenére, hogy a hullámmagasság mellett a terjedési irány is fontos jellemző (például partvédő művek vagy kikötők tervezésekor). Több, összehangolt műszerrel végzett mérésekből a hullámszárnyjellemzői kinyerhetőek, ám ez közel sem egy általános megoldás. Ezzel szemben a pontbeli 3D sebességmérések eredményei tartalmazhatják a keresett irányjellemzőket.

2. tézis: Hullámjellemzők rekonstruálása pontbeli 3D sebességmérési adatokból

Módszert dolgoztam ki a hullámszárnyjellemzőinek a hullámszárnynál hosszabb időléptékű (pl. vízlengés, köröző áramlatok) és rövidebb időléptékű (pl. turbulencia) sebességösszetevőket is tartalmazó, pontbeli 3D sebességmérésekből való rekonstruálására. A bemutatott, sebességalapú hullámszárnyjellemzők alkalmazhatóságát a Stagnone di Marsala lagúnában végzett egyidejű nyomás és 3D sebességmérési adatokkal, illetve a Fertő tóban egy kijelölt függőleg több pontjában összehangoltan végzett 3D sebességmérés eredményeivel igazoltam. [1, 3, 4]

Egy alkalmas sebesség-dekompozíciós módszert alkalmazva a hullámszárnyt kísérő turbulenciához köthető sebességösszetevő azonosítható, így mód adódik annak hagyományos paraméterekkel való jellemzésére.

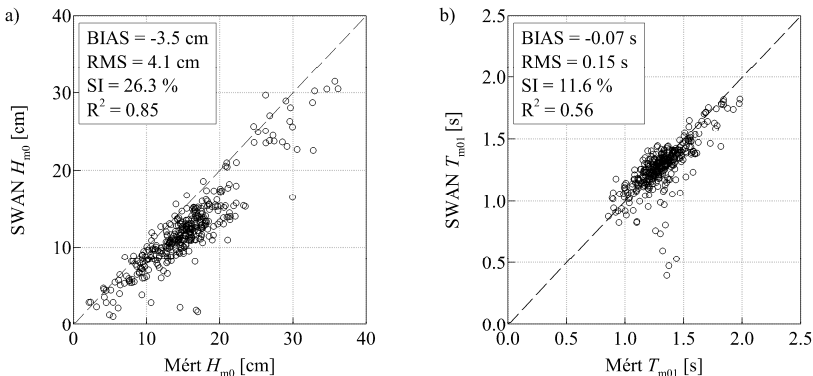


A pontbeli 3D sebességmérési adatokból hullámzás és turbulencia jellemzők számítási módszerének folyamatábrája.

A legtöbb széles körben alkalmazott terepi hullámzásmérési mód csak egy pontban ad képet a hullámzásról, ami egy egész tó hullámzási viszonyainak jellemzéséhez nem elegendő, vagy fénykép szerűen nagyobb területről, ami viszont a hosszúidejű statisztikai elemzéshez kevés. A hullámzási viszonyok leírásának térbeli vagy időbeli kiterjesztésének lehetséges módja analitikus becslő képletek vagy numerikus modellek alkalmazása.

3. tézis: Numerikus hullámzásmodellezés sekély tavakban

Bebizonyítottam a 2D spektrális alapú hullámzásmodellek körébe tartozó SWAN modell Fertő tóéhoz hasonlóan szélsőségesen sekély tavakban való érvényességét. Igazoltam, hogy a kalibrált hullámzásmo­ dell az ilyen sekély viszonyok esetén is képes a mért hullámzás-jellemzőket megfelelő pontossággal reprodukálni. [2]



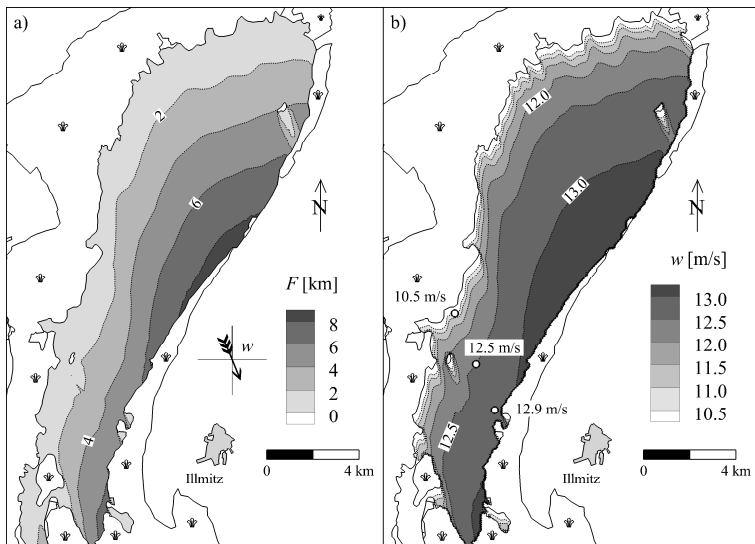
A becsült H_{m0} (a) és T_{m01} (b) hullámparaméterek a mért hullámjellemzők függvényében. A szaggatott vonal a tökéletes egyezésnek felel meg.

A felszíni érdességnek a környező terep és a nyíltvíz illetve a nádas és a nyíltvíz határán tapasztalható hirtelen megváltozása a meghajtási hossz mentén szabályosan változó térben egyenlőtlen szélmezőt eredményez. Ahogy már korábban említettem, ez a térben változó szélmező leírható egy IBL modellel. Ezt a terepi mérésekkel igazolt IBL modellt sikerrel alkalmazták például a Fertő tó hidrodinamikai modellezése során. Bár van Vledder vizsgálatait azt mutatták, hogy a szélmező ilyen egyenlőtlenégeinek a számított hullámzási viszonyokra gyakorolt hatása csekély, azonban azok a vizsgálatokat a Fertő tóénál jóval nagyobb mélységű tavakra végezték el. Éppen ezért célszerű volt számszerűsíteni a hatás a Fertő tóéhoz hasonlóan sekély tavak esetén.

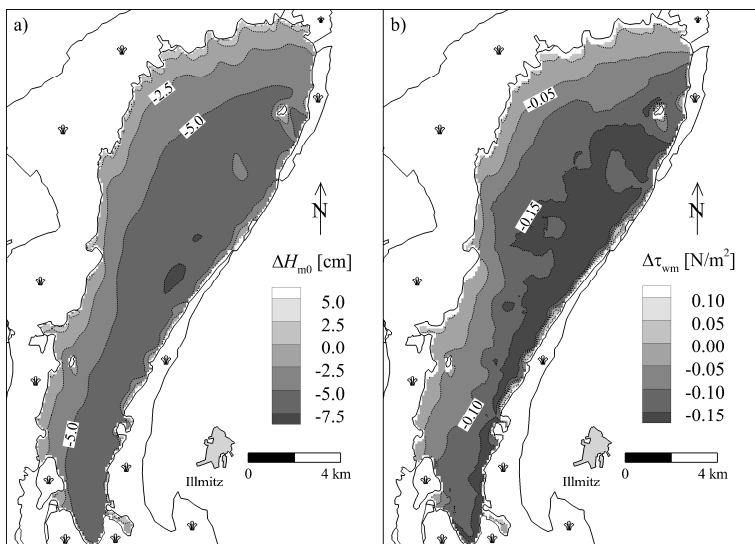
4. tézis: Hullámzásmodellezés a szélmező meghajtási hosszától való függésének figyelembevételével

Megmutattam, hogy a meghajtási hossz mentén légköri belső határréteg (IBL) modellel leírt szélmezőnek számottevő hatása van a hullámzás jellemzőire a Fertő tóéhoz hasonló sekély vizekben. Kimutattam, hogy ez a meghajtási hossz mentén változó mértékű hatás a hullámzáshoz köthető fenéksúrlódási feszültség esetén a leghangúlyosabb. Igazoltam, hogy létezik olyan egyenértékű, térben állandó szélesebesség, amivel egy-egy hullámjellemező elfogadható hibával reprodukálható, azonban ez az egyenértékű szélesebesség nem azonos az összes hullámjellemezőre. [2]

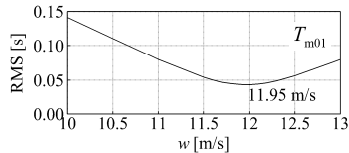
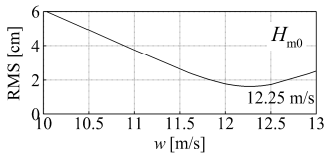
Ennek következtében hibát követünk el az olyan tavak esetén, ahol a meghajtási hossz korlátozott, a hullámzásmodell térben állandó szélmezővel hajtjuk meg, függetlenül a szélmérés helyétől legyen az nyíltvíz vagy akár a tavat környező terep felett. A szélmező térbeli egyenlőtlenégeinek leképezésére éppen ezért bizonyos esetekben célszerű lehet mikrometeorológiai modellek alkalmazása. Nagyobb, például 20 km feletti vízszintes kiterjedésű tavak esetén a mezo- és szinoptikus léptékű változások is fontossá válnak és ekkor légköri modellek alkalmazása lesz szükséges a szélmező térbeli egyenlőtlenégeinek helyes megadására.



Meghajtási hosszak (a) és az IBL modellel számított szélmező (b) a Fertő tó felett, ÉÉNy-i szél esetén.



Térben állandó ($w = 10.5$ m/s) és a szél felőli parti 10 m/s nagyságú szélhez tartozó, IBL modellel számított térben változó szélmezővel meghajtott modellel becsült H_{m0} (a) and τ_{wm} (b) közötti eltérések eloszlása.



Különböző térben állandó szélességekkel számított H_{m0} (a) és T_{m01} (b) értékek négyzetes hibái az IBL modellel számított értékekhez képest, a szél felőli parton mért 10 m/s nagyságú szélesség esetén.

Alkalmazás és lehetséges kutatási irányok

A 2D numerikus hullámzásmodellek tehát adaptálhatóak olyan szélsőségesen sekély tavakra is, mint a Fertő tó. Megmutattam továbbá, hogy a Fertő tóhoz hasonló tavak esetén, ahol a vízmélység és a meghajtási hosszak is korlátozottak, a meghajtási hosszától függő szélmező helyes leírása szükséges a hullámzásból származó fenékcúszató feszültségek helyes becsléséhez. Az eddigi vizsgálatok során az egyszerűség kedvéért a szél keltette áramlás hullámzásra gyakorolt hatását figyelmen kívül hagytam. Azonban, ahogyan azt már korábban említettem, sekély tavakban a szél keltette áramlás és hullámzás között kölcsönhatás van. Ez a kölcsönhatás az áramlási és hullámzási viszonyok összekapcsolt modellezésével figyelembe vehető. Ehhez a Fertő tóra felállított numerikus hullámzásmodell jól használható.

Nemrégiben indult meg tanszékünkön egy balatoni hidrodinamikai előrejelző rendszer fejlesztése. Várakozásaim szerint szükséges lesz a szél keltette áramlások modellezése során a hullámzási viszonyok figyelembe vétele. Ehhez fel kell állítani egy 2D numerikus spektrális alapú hullámzásmodellt a tóra, amihez azonban további hullámzásmérési adatokra is szükség lesz.

Továbbá célszerűnek tűnik a főbb hullámzás és turbulencia jellemzők mérését és becslését a nyíltvízről kiterjeszteni a nádasöbve, ahol azok csillapodásának feltárása javíthatja a feliszapolódási folyamatok leírását. A növényzet hullámenergia elnyelő képességét leíró modell kalibrálásához a nádasöv több pontján egy időben végzett hullámzásmérésre van szükség. A bemutatott 3D sebességmérésen alapuló hullámzásmérési mód alkalmas a nádasövben végzett hullámzásmérésre. Ezek a mérések a részét képezhetik a nádas és nyíltvíz határán lejártszódó folyamatok vizsgálatának.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk listája

1. Homoródi, K., J. Józsa, T. Krámer, G. Ciraolo, and C. Nasello (2012): Identifying wave and turbulence components in wind-driven shallow basins, *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 56(1), 87–95.
2. Homoródi, K., J. Józsa and T. Krámer (2012): On the 2D modelling of wind-induced waves in shallow, fetch-limited lakes, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, accepted for publication.
3. Homoródi K., T. Krámer and J. Józsa (2009): Analysis of high-frequency correction in shallow water wave reconstruction and parameter estimation. In: *Proceeding of the 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, 9-14 August, Vancouver, Canada, pp. 6139-6145. Paper ID: 11100, (on CD-ROM).
4. Homoródi K., T. Krámer and J. Józsa (2010): Analysis of wave and turbulence measurements in wind-driven shallow basins. In *Proceeding of the First IAHR European Congress*, 4–6 May, Edinburgh, UK, Paper ID: FMIVc, (on CD-ROM).