



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

PhD téziszfüzet

Jellegzőnák fizikai kölcsönhatásának vizsgálata sekély tavakban

Kiss Melinda

Témavezető: **Dr. Józsa János**

Budapest, 2015.

A kutatások előzménye

Sekély tavak gyakori jellemzője a vízfelszín fölé emelkedő vízi növényzet (pl. nádas), amely mind a parti (litorális) zóna nagyobb összefüggő területein, mind kisebb, különálló foltokban előfordulhat. Ezek a zónák számos tulajdonságukban különböznek a nyílt vízi törésektől, melynek következtében a vízi növényzettel benőtt és a nyílt vízi (pelágikus) jellegzőnák határfelülete erős horizontális gradiensekkel jellemezhető. Így számos gradiens-hajtotta kölcsönhatás alakul ki, valamint cserefolyamat játszódik le az átmeneti zónákban, amelyek jelentősen meghatározzák mindkét zóna fizikai, ezen keresztül vízminőségi és ökológiai állapotát, összességében a tó átfogó viszonyait is.

A nádas élőhelyet és táplálékot biztosít a zooplanktonok, gerinctelenek, halak és számos madárfaj számára, ezzel növelve a tó biodiverzitását. A fizikai folyamatokat tekintve, a nádas a tó feletti szélmezőt több módon befolyásolja. Egyrészt nagyobb aerodinamikai érdességének köszönhetően, másrészt szélárnyékoló hatásából kifolyólag, melyek a szél keltette tavi áramkép módosulásához vezetnek. A nádas közeli vízáramlás pedig fontos szerepet játszik az átmeneti zónán keresztül történő tápanyagcserében és a nádas friss, oxigéndús vízzel való ellátásában, tehát jelentős hatással van a nádas állapotára. Továbbá, a víz fölé emelkedő növényzet árnyékoló hatásának következtében a két jellegzőna eltérő mértékben képes felmelegedni, amely egy ugyan nem túl erős, de szélcsendes időkben gyakori, sűrűségkülönbség hajtotta áramlást indukálhat a zónákat elválasztó határfelületen keresztül.

A litorális zónák további sajátossága, hogy a növényzet miatt megnövekedett súrlódási és alaki ellenállás a hullámváz gyors csillapodását, ezáltal a lebegtetett hordalékszállító képesség csökkenését, és így hordaléklerakódást eredményez. A következmény a litorális zónák folyamatos feltöltődése, ami viszont kedvező körülményeket teremt a növényzet további terjedéséhez. Ezzel szemben, az erős áramlásnak és hullámvásznak közvetlenül kitett, nagyobb vízmélységű területek kedvezőtlen feltételeket jelentenek a nádas számára, így az fokozatosan visszaszorul, vagy eleve meg sem jelenik.

Munkám során komplex, átfogó vizsgálatot végeztem a nádas és nyílt vízi jellegzőnák kölcsönhatásainak feltárására, elsősorban az ezek határfelületén feltételezett éles aero-, hidro-, hordalék- és termodinamikai átmenetekre koncentrálna. A kutatás során több szempontot vizsgáltam, amelyek, bár

számos módon kapcsolódnak egymáshoz, három fő témakörbe rendezhetők:

1. Szélprofil és szél-csúsztatófeszültség a nádas - nyílt víz átmeneti zónában

2. Az átmeneti zóna hidrodinamikai jellemzése és

3. Energia-háztartás és párolgás a nádas és nyílt vízi zónákban.

A vizsgálatokhoz esettanulmányként választott Fertő tó megfelelően reprezentatív példája a nádassal borított sekély tavaknak. A mérési kampányok során (2012 tavasztól 2013 őszéig) nagyfrekvenciás, szinkronizált mikrometeorológiai és tavi áramlásméréseket végeztünk, a folyamatok összetettségéhez illeszkedő, korszerű technológiájú mérőrendszerrel. A rendszer fontos részét képezte egy örvény-kovariancia állomás, amely a turbulens energiaáramok és a párolgás mérésének legközvetlenebb módjaként ismert. Ez a Magyarországon még újnak számít, de külföldön (főleg Németországban és Amerikában) már elterjedten alkalmazott mérés technika teremtette meg a szélprofil, energia-háztartás és párolgászámításaim tudományos alapját a két jellegzónában.

Célkitűzések

A bemutatott szempontok figyelembevételével a kutatás fő célkitűzései a következők voltak:

- Egy komplex, átfogó mikrometeorológiai és áramlásmérési rendszer kialakítása, amely alkalmas a nádas - nyílt víz jellegzónák közötti legfontosabb fizikai kölcsönhatások feltárására.
- Olyan általánosítható eljárás kidolgozása és tesztelése ezen a konkrét esettanulmányon keresztül, amely lehetővé teszi az eljárás alkalmazását más nádassal borított sekély tavakra is.
- A cserefolyamatok és azok dinamikájának feltárása a nádas - nyílt víz jellegzónák határán, és annak bemutatása, hogy az átmeneti zóna erős horizontális gradiensekkel jellemezhető.
- A szélprofil és a szél-csúsztatófeszültség meghatározása mind a nádas, mind a nyílt vízfelület felett, továbbá a két zóna közti átmenet részletes vizsgálata.

- A nádas - nyílt víz átmeneti zónán keresztül történő csereáramlás mérése, továbbá az áramlás jellemzőinek, úgymint áramlási mező, fajlagos vízhozam, energia disszipációs ráta, turbulencia paraméterek és hordalék-üledési és felkeveredési tendencia feltárása.
- Sekély tavak párolgásbecslésének pontosítása a nádas és nyílt víz energiaháztartásának és párolgásának örvény-kovariancia technikán alapuló, külön-külön történő számszerűsítésével, és az eredmények összehasonlítása más ismert módszerek eredményével.

Új tudományos eredmények

A doktori kutatásaim során kapott új eredményeket négy tézisben foglalom össze:

1. Tézis: A sekély tavi nádas - nyílt víz jellegzónák fizikai kölcsönhatás-folyamataihoz illesztett hatékony mérési módszertan

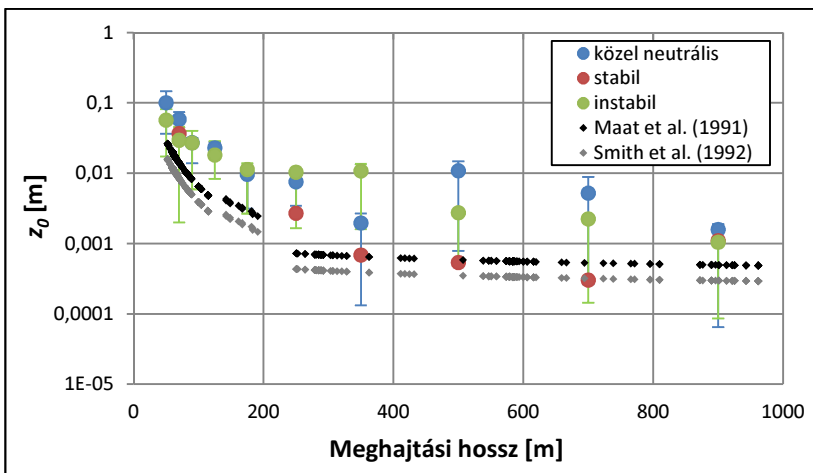
A nádas - nyílt víz jellegzónák közti legfontosabb fizikai kölcsönhatások feltárására alkalmas, komplex, átfogó mikrometeorológiai és áramlásmérési rendszert alakítottam ki, amelynek alkalmasságát a Fertő tó, mint esettanulmány példáján keresztül igazoltam. Az adatok rögzítésére és feldolgozására olyan általánosítható eljárást dolgoztam ki, amely lehetővé teszi az eljárás robusztus alkalmazását más nádassal borított sekély tavak esetében is. [2, 3, 4]

Az eljárás újszerűsége, hogy számos szenzort alkalmaztam összehangoltan az átmeneti zóna jellemzőinek mérésére, ezen felül a nádas zónán belül is végeztem mikrometeorológiai és áramlásméréseket. A mérő együttes részét képező örvény-kovariancia rendszer alkalmazása sekély tavi környezetben egyedülálló. A térbeli leírás növelésére a nyílt vízi mérőállomást adott időszakonként az uralkodó szélirány tengelye mentén áthelyeztük, továbbá a különböző szélviszonyok között mért adatokat a fix nádas állomás referenciaméréseivel normalizáltam.

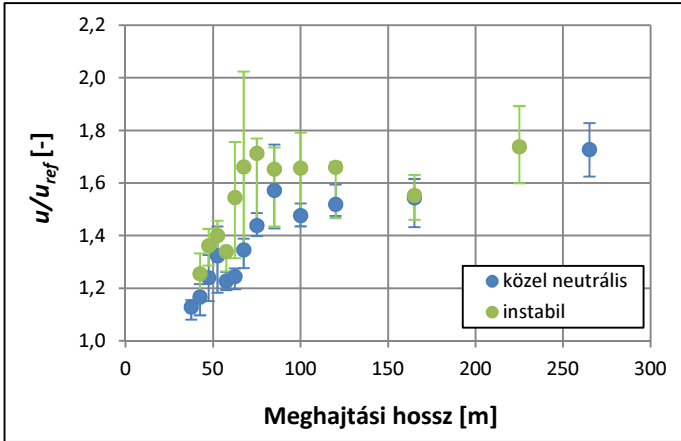
2. Tézis: Szélprofil és felszíni szél-csúsztatófeszültség becslése az átmeneti zónában

Mind a nádas, mind a nyílt vízfelület felett meghatároztam a szélprofil paramétereit, utóbbi esetben vizsgálva az aerodinamikai érdességmagasság függését a meghajtási hosszától, hőmérsékleti rétegződéstől, szélesebbségtől és ezek kombinációjától. Vizsgáltam továbbá a szélesebbség, szél-csúsztatósebesség és szél-csúsztatófeszültség meghajtási hossz menti eloszlását különböző hőmérsékleti rétegződések esetén.

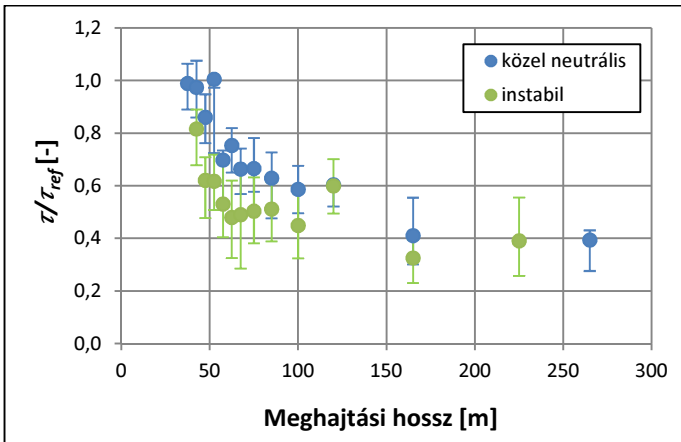
Bizonyítottam, hogy a nádas zónát elhagyva a szél adott kis meghajtási hosszon megtartja megelőző egyensúlyi állapotát, amely kis meghajtási hosszon az érdességmagasság pontosabban becsülhető a hullámkort tartalmazó összefüggésekből, mint a logaritmikus profilegeyenletből. Ez a nádasközeli szélprofil eltérését bizonyítja az elméleti logaritmikus alaktól. Továbbá rámutattam, hogy mind a nádas mögötti árnyékolt zóna hossza, mind az IBL fejlődés gyorsasága hőmérsékleti rétegződés függő, ugyanis instabil állapotban a profilátrendeződés a nádas zónához közelebb játszódik le. [1, 3]



A nyílt vízi zóna aerodinamikai érdességmagassága a meghajtási hossz mentén, a logaritmikus profilegeyenletből meghatározva (hőmérsékleti rétegződés alapján színezett pontok) illetve a hullámkort tartalmazó összefüggésekből becsülve (fekete és szürke rombuszok)



Normalizált horizontális szélesség a meghajtási hossz függvényében a nyílt víz felett. A normalizálás alapja a nádas állomás fix anemométerének referencia szélesség-mérése volt



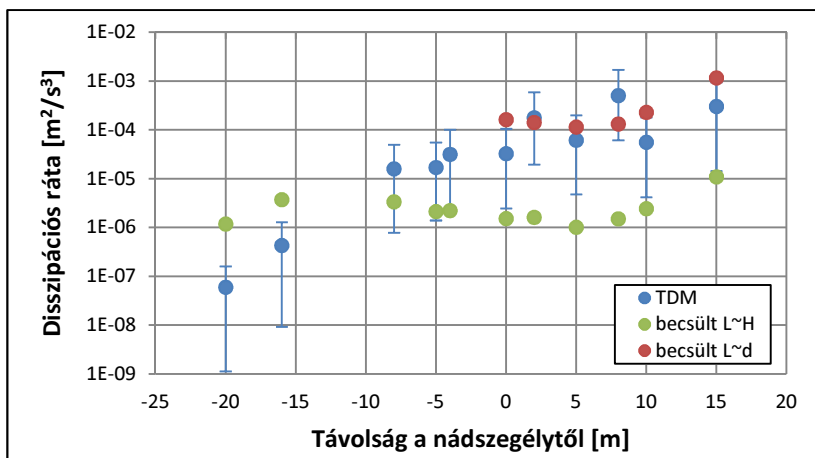
Normalizált szél-csúsztatófeszültség a meghajtási hossz függvényében a nyílt víz felett. A normalizálás alapja a nádas állomás fix anemométerének referencia szélesség-mérése volt

3. tézis: Az átmeneti zóna hidrodinamikai jellemzése

A nádas zónában illetve annak környezetében végzett 3D-s áramlásmérésekre alapozva számos szempont alapján jellemeztem a nádas - nyílt víz átmeneti zóna hidrodinamikáját.

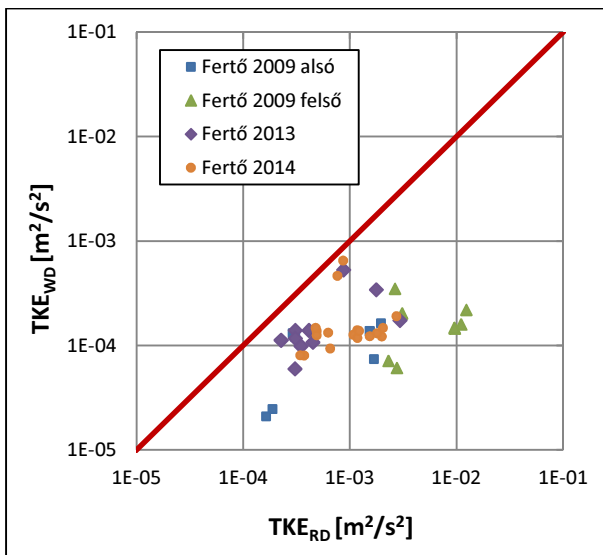
Bizonyítottam, hogy a nádas zónán belül a fenéksúrlódás következtében fellépő turbulens produkció elhanyagolható a nádszálak mint vízbe helyezett hengerek mögött fellépő turbulens produkcióhoz képest, így a kinetikai energiámérleg erre a nyírásból származó energiaprodukcióra és az energia-disszipációra egyszerűsödik. [1, 2]

Ennek igazolására rámutattam arra, hogy a nádas zónán belül a Tennekes és Lumley (1972) által bevezetett elméleti, energia-disszipációt becsülő formula jobban közelíti az ún. tehetetlenségi disszipációs módszerrel számított disszipációs rátát, ha a turbulencia karakterisztikus hosszmeretét nem a vízmélységgel, hanem az átlagos nádszál átmérővel jellemezzük.



Energia disszipációs ráta a nádszegélytől való távolság függvényében; az ún. tehetetlenségi disszipációs módszer (TDM) és a Tennekes és Lumley (1972) által bevezetett elméleti formula összevetése. Jelmagyarázat: L – karakterisztikus hosszmeret, H – vízmélység, d – átlagos nádszál átmérő

Vizsgálataimban kimutattam, hogy ha a vízmozgás hullámzáshoz köthető energiatarthatama jelentős, a turbulens fluktuáció és turbulens jellemzők becsléséhez javasolt a hullámzáshoz köthető komponensek és a turbulens komponensek különválasztása egymástól. Ennek a szempontnak a figyelembevételével számszerűsítettem a turbulencia paramétereket a mérési terület nádas zónáján belül illetve annak közvetlen közelében. Két becslő módszerrel igazoltam a vizsgált terület folyamatos hordalék lerakódási tendenciát és a felkeveredés hiányát.

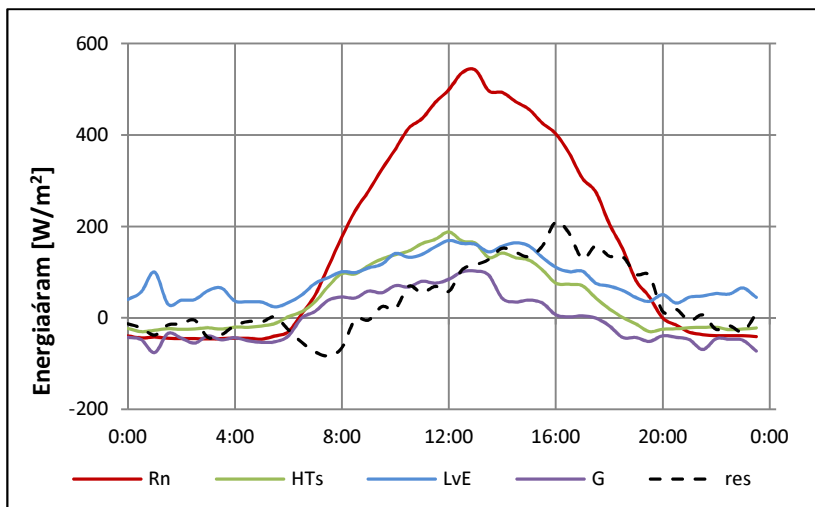


Reynolds dekompozíció (RD) illetve ún. hullám dekompozíció (WD) útján előállított turbulens kinetikai energia (TKE) összevetése

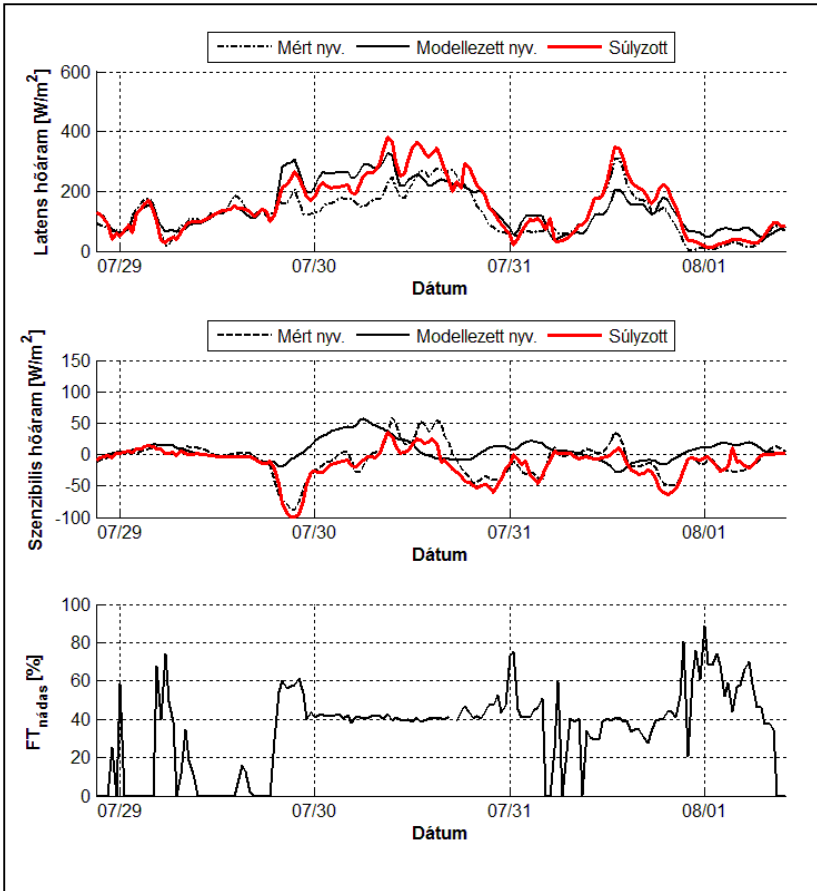
4. tézis: A nádas és nyílt vízi zónák energia-háztartása és párolgása

Bizonyítottam, hogy sekély tavak nádas és nyílt vízi jellegzónáinak energia-háztartása számszerűsíthető a kialakított mérési elrendezéssel és részletes adatfeldolgozással, továbbá kidolgoztam és igazoltam egy fluxus-gradiens módszerre épülő eljárást a turbulens energiaáramok nyílt vízi és nádas zónában külön-külön történő meghatározására a két jellegzónából vegyesen érkező, mért energiaáramokból. [4, 5]

Az átmeneti zónában elhelyezett mikrometeorológiai mérőállomás alapját egy örvény-kovariancia állomás képezte. A mért és a forrásterületek relatív hozzájárulása alapján súlyozott modellezett energiaáramok összevetésével igazoltam a felállított modell jóságát. A fluxus-gradiens módszerrel és adatpótlással előállított folytonos latens hőáram idősorokból a két zóna párolgásának havi összegét számítottam, majd összehasonlítottam számos más párolgásbecslő módszer eredményével.



Az energiaáramok átlagos napi menete havi átlagolással a nádas zónában, 2013 májusában. Jelmagyarázat: R_N – sugárzásegyenleg, HT_S – szenzibilis hőáram, L_{vE} – latens hőáram, G – tárolt hő és res – maradéktag



Mért, modellezett és a forrásterületek arányából (FT_{nádas}) számított súlyozott hőáramok a nyílt vízi zónában, egy reprezentatív időszakban

További kutatási irányok

Munkám során egy komplex, átfogó mikrometeorológiai és áramlásmérési rendszert illetve részletes adatfeldolgozási eljárást alakítottam ki, amely alkalmas sekély tavak nádas és nyílt vízi jellegzónáinak alapvető fizikai kölcsönhatás folyamatainak feltárására. A Fertő tó legújabb, magyar-osztrák együttműködéssel született Vízgazdálkodási Stratégiája már egyes

témaköreiben tartalmazza ezen eredményeket (pl. a vízmérleg becslések pontosságának növelése, a szél keltette áramlások modellezése illetve az ökológiai és élőhelyi viszonyok jellemzése témakörökben). Számos további lehetőség kínálkozik azonban, az átmeneti zónák fizikai leírásának tökéletesítésére, amelyek a fent említett témák alaposabb megértéséhez és számszerűsítéséhez járulnának hozzá.

A nádas hullámmzás-csillapító és hordalékmozgást befolyásoló hatásának vizsgálatához egy szélnél kitettebb mérési terület lenne optimálisabb. A 3-dimenziós ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) áramlásmérések alkalmasnak bizonyultak a hullámmzásparaméterek, fenékcúsztató feszültség és fajlagos hordaléklerakódás becslésére. Ezen műszerek mellett, hullámmzás- és zavarosságmérők alkalmazásával lehetővé válna a kérdéses hidrodinamikai állapotok még pontosabb feltárására.

A kialakított ADV műszerelrendezés, pontszerű méréseivel átfogó képet adott az átmeneti zóna áramlási viszonyairól. Részletesebb vizsgálatokhoz azonban elengedhetetlen lenne a függőleges sebességprofil feltárása. Ebben szintén a tó extrém sekélyisége és a nádas sűrűsége jelent korlátot, ezért a rendelkezésre álló, profilmérésre alkalmas műszerek adaptálása ezekhez a viszonyokhoz nem egyszerű feladat.

A vizsgált felszín energia-háztartásának és párolgásának feltárásához az energiamérleg komponensek precíz meghatározása szükséges. A szenzibilis és latens hőáramok nagy pontosságú becslése csak akkor lehetséges, ha nagy gondot fordítunk a mérési terület megválasztására, a mérés kialakításra és az örvény-kovariancia módszer feltételezéseit kielégítő korrekciók alkalmazására. Bemutattam, hogy vízfelszín esetén az alsóbb rétegekbe jutó és a tárolt hő nagysága jelentős, így a további vizsgálatoknál a vízhőmérséklet-mérő termisztorok számának növelése és a legfelső hordalékrétegen egy hőáram mérő lap alkalmazása javasolt.

Az örvény-kovariancia eljárással kapott Fertő tavi havi párolgásösszegek jelentősen eltértek az összehasonlító vizsgálatokhoz választott további párolgásbecslő módszerek eredményeitől (pl. WREVAP modell, ÉDUVÍZIG, Neuwirth, de Bruin, Penman és Bowen módszer). Az eltérés okainak feltárásához további vizsgálatok szükségesek a módszerek érzékenységét, hiányosságait és a forrásterületek különbségeit tekintve.

A tézisekhez kapcsolódó tudományos közlemények

1. **Kiss M**, Wind-induced exchange mechanisms of reed-water interface zones in shallow lakes, *Second Conference of Junior Researchers of BME in Civil Engineering*, Budapest, Hungary: 17-18 June 2013, pp. 256-263. (2013)
2. **Kiss M**, Józsa J, Measurement-based hydrodynamic characterisation of reed – open water interface zones in shallow lake environment, *Periodica Polytechnica, Civil Engineering*, 58(3), 1–13. (2014b)
3. **Kiss M**, Józsa J, Wind profile and shear stress at reed-open water interface: recent research achievements in Lake Fertő, *Pollack Periodica*, in press. (2015a)
4. **Kiss M**, Józsa J, A Fertő tó energiaháztartásának meghatározása örvény-kovariancia módszerrel, *Hidrológiai Közlöny*, in press. (2015b)
5. **Kiss M**, Torma P, Az energiaáramok fluxus gradiens eljárás alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből, *Hidrológiai Közlöny*, in press. (2015)

További hivatkozások a téziszűzetben

Maat N, Kraan C, Oost W A, The roughness of wind waves, *Boundary-Layer Meteorology*, 54 (1-2), 89. (1991)

Smith S D, Anderson R J, Oost W A, Kraan C, Maat N, Cosmo J D, Katsaros K B, Davidson K L, Bumke K, Hasse L, Chadwick H M, Sea surface wind stress and drag coefficients: The hexos results, *Boundary-Layer Meteorology*, 60(1-2), 109-142. (1992)

Tennekes H, Lumley J L, *A First Course in Turbulence*, MIT Press (1972)