

Okos tavak

KRÁMER TAMÁS, REHÁK ANDRÁS, JÓZSA JÁNOS

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
kramer.tamas@epito.bme.hu

CINKLER TIBOR, CSONTHÓ MARCELL, NAGY ZSOLT, JÁSZBERÉNYI ÁRON

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Távközlési és Médiainformaticai Tanszék
cinkler@tmit.bme.hu

Kulcsszavak: LoRa/LoRa WAN, ultrahangos távmérés, vízhőmérés, vízszintingadozás, tó, limnológia

Az internet vitathatatlanul behálózta életünk mind több területét. A Tárgyak Internete (Internet of Things: IoT) gyorsan terjed a különböző új rádiós hozzáférési technikáknak és azok csökkenő árának köszönhetően. A tárgyak hálózati hozzáférése és elérhetősege mindent „felokosít”. Eme „felokosítás” immár tavainkat is elérte. Cikkünkben egy olyan alkalmazási területet mutatunk be, ahol a szórt ponthálózatban gyűjtött adatok a Fertő déli nádasövének fizikai limnológiai kutatását támogatják.

1. Bevezető

Az olyan tógazdálkodási feladatok, mint a kotrás, a nád-aratás, a kikötők és a partvédő művek karbantartása, valamint a vízleeresztés csak akkor okosíthatók fel, ha a műveletek irányítói és az automatizált vezérlések folyamatosan rálátással vannak a tó aktuális állapotára. A katasztrófavédelem ugyanúgy igényli a folyamatos állapotkövetést a tavi mentések irányításához, sőt, a korai riasztáshoz az állapot jövőbeli alakulását is előre kell tudni jelezni. Egy operatív tavi előrejelző rendszernek márpedig alapvető eleme az, hogy asszimilálja az elmúlt órákban beérkezett mérési adatokat, ezzel biztosítva, hogy az előrejelzés olyan jelenlegi állapotból induljon ki, amely összhangban van a megfigyelésekkel [1].

A távérzékelés egyre nagyobb mértékben ki tudja szolgálni a folyamatos állapotkövetést [1], de a pusztá hidrodinamikára ezek hasznosságát jelenleg még korlátozza a műholdak ritka képsűrűsége, a közel folyamatos légi megfigyelések magas költsége és a távról mért változók bizonytalan átszámítása a tó lényeges állapotjellemzőire. Ezért az állapotkövetés a belátható jövőben elsősorban a valós időben közvetített helyszíni (in situ) mérésekre támaszkodik.

Meg kell említeni a limnológiai modellezés adatigényét is. A tudományos kutatáshoz nem kell valós idejű

információ a tóról, megteszik a mérési expedíciók során időszakosan gyűjtött adatok is. Számos környezeti folyamat szempontjából a mértékadó állapotok erős szél esetén állnak elő, amit a hullámszámításra kitéve csak az emberi jelenlétet nem igénylő, telepített, automatikus mérőeszközökkel lehet biztonságosan megfigyelni [2]. A mért adatok valós idejű továbbítása ugyanakkor kiváltható azok helyi tárolásával és időszakos kiolvasásával.

Cikkünkben egy Fertő tavi alkalmazással illusztráljuk azt, hogy nagyszámú, adathálózatba kötött mérőberendezéssel korábban elérhetetlen térbeli részletességgel tárhatók fel a tavi folyamatok.

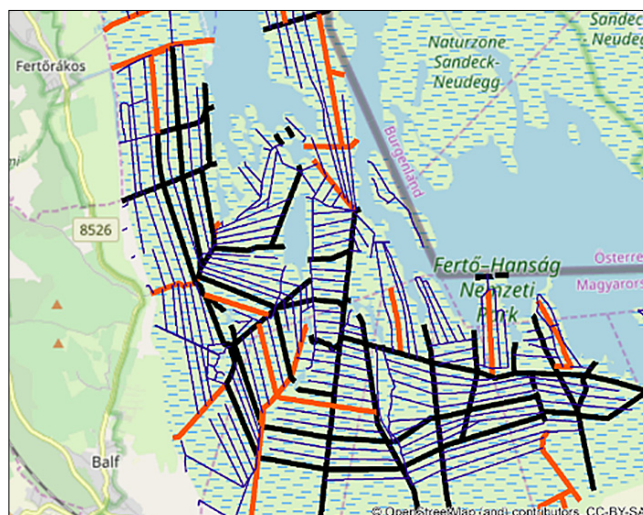
2. A Fertő nádascsatornáinak nyitott áramlástanai kérdései

A Fertő tó kiterjedt nádasövvel rendelkezik, amely az UNESCO világörökségként elismert kultúrtáj meghatározó eleme. Különösen kiterjedt a Magyarország területére eső déli nádas, amely amellet, hogy értékes vízi élőhely, jelentős mennyiségű nád kitermelését is biztosítja [3]. Csatornák sűrű hálózata szövö át (1. és 2. ábra).



1. ábra
A déli nádasöv egyik csatornája, kaszált állapotában

2. ábra
A Fertő tó déli nádasövében kiépített csatornahálózat térképe (vastag vonal: folyamatosan karbantartott szakaszok)



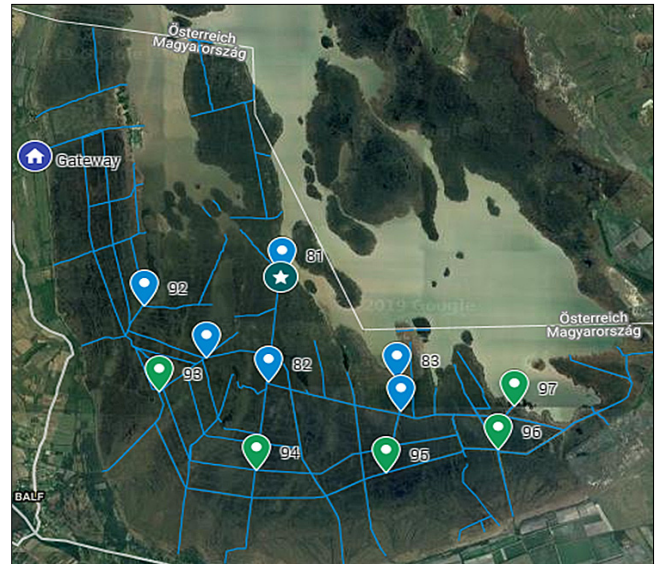
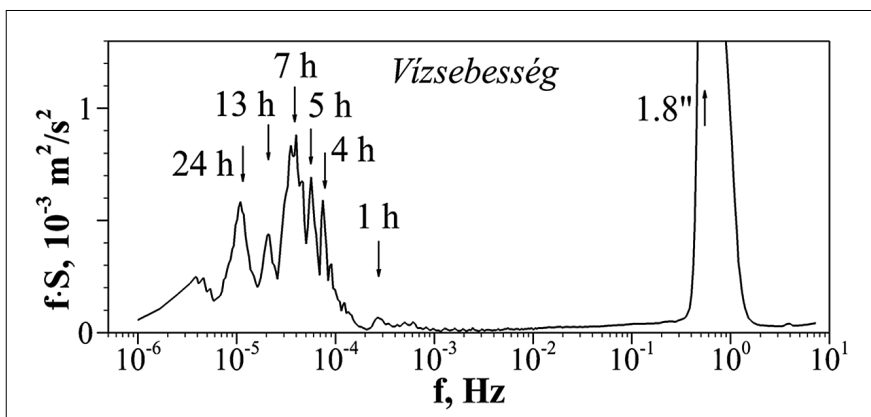
A partról ezen keresztül közelíthető meg a nádas belseje és a nyílt tó, továbbá a csatornák a pangó, oxigén-szegény vizek átöblítésére is hivatottak. A magyar nádasövben kialakuló vízforgalomról azonban korábról nem ismerünk átfogó, számszerű elemzést. Még az is kérdés volt, hogy a nyílt tó vize egyáltalán milyen távolságra képes a nádasövbe benyomulni nagy viharok során.

Az pusztán hidraulikai megfontolásból is megállapítható, hogy a csatornák vízhozamát a szűk nádaskanyonokban nem a szél, hanem a vízszintkülönbség kelti. A nyílt tó felszínének kilendülése hullámokat indít el a csatornák torkolatától befelé, magasabb vízállás esetén ezek a hullámok a nádasal borított terepen is előretörnek. A vízszintkülönbség természetesen csak időszakosan áll fenn a nádas pereme mentén és a szél elűtével fokozatosan meg is szűnik. A kilendülés hullámösszetevőinek periódusideje 2 és 24 óra közötti, ami az áramlásmérések hosszú adatsorának energiaspektrumán is jól kirajzolódik (3. ábra). Megjegyezzük, hogy a kiemelkedő energiacsúcsú, 1-2 másodperces hullámösszetevő értelemszerűen nem a tó víztömegének lomha mozgásához, hanem a felszín rövid hullámzásához kötődik.

Önmagában az is fontos információ, hogy a nádasövbe milyen távolságra hatolnak be a nyílt tó hullámai, és milyen ütemben csillapodnak. Emellett a hálózat csomópontjain mért vízszintingadozásból megbecsülhető a pontok közötti szakasz vízhozama is, hasonlóan ahhoz, ahogyan egy áramkörben az elektromos potenciálok különbségéből kiszámítható az áramerősség.

A 3. ábra spektrumából nyilvánvaló, hogy az ingadozásokat elegendő néhány perces időközzel mintavételezni. A csatornahálózat topológiája azonban olyan összetett, hogy a vízforgalmat egyértelműen csupán nagyszámú csomópont egyidejű vízszint-idősorából tárhatjuk fel. Ez még akkor is igaz, ha a mérésekkel numerikus modelleket kalibrálunk és a területi megoszlást végül a méréseket numerikus eredményekkel kiegészítve elemezzük. Ezért egyértelműen előnyös az, ha a mérőhálózat sok elemből áll és emellett olcsó. Ennek a kifejlesztését ismertetjük a következő fejezetben.

3. ábra
Egy jellemző nyílt tavi pont áramlásainak frekvenciával súlyozott energiaspektruma [4]



4. ábra
A Fertő tavi szenzormodulok és az átjáró (Gateway) elhelyezése

3. Mérőhálózat a vízforgalom és a felszíni hullámok megfigyelésére

A hullámzás és a vízáramlás megismeréséhez tehát szükség volt a tó több különböző, egymástól távoli pontján, időben jól szinkronizáltan, szabályos időközönként ismétlődő mérés elvégzésére. Emellett fontos volt, hogy az adatok akkor se vesszenek el, ha hálózati meghibásodás lépne fel és a mérőmodul is annyira olcsó legyen, hogy eltulajdonítása, vagy elvesztése se lehetetlenítse el a kutatást.

A 4. ábra szemlélteti a modulok és gateway elhelyezését. Az 5 zöld és az 5 kék jelölés a két szakaszban telepített 10 mérőmodulunk helyét szemlélteti. A csillaggal jelölt modul egy kereskedelmi forgalomban megvásárolható referenciaeszköz, melynek nincs hálózati kommunikációja és ára többszöröse a teljes általunk megvalósított hálózatnak. Ez a referencia, ennek segítségével győződünk meg rendszerünk pontosságáról.

A gateway helye adott volt. Ez az egyetlen objektum a környéken, mely a nádas fölé emelkedik, ahol van tápellátás, sőt még internet-hozzáférés is, és amelyhez mi is hozzáférhettünk. Így ez a hely adódott, mint méréseink átjátszója egy központi szerver felé, ahol az összes adat összegyűlt. Ez az adatgyűjtő központi szerver lehet akár egy IoT-platform is [5].

A mérőhálózat megvalósításánál az áthidalandó táv és a kis energiafogyasztás voltak a legnagyobb kihívások. Mivel nem állt rendelkezésünkre megfelelő celluláris mobilhálózati lefedettség, továbbá a Cat-M1 és NB-IoT moduloknak mind az ára, mind a fogyasztása nagyobb volt, az adatátviteli sebesség pedig nem indokolta, így inkább más rádi-

ős technológiát választottunk. Ez a LoRa/LoRa WAN rádiós LPWA (Low-Power–Wide-Area) technika volt. Mind a gateway-ből, mind a modulokból az egyik legolcsóbb megoldást választottuk. A gateway-oldal 100 ezer Ft körüli/alatti összeg, míg a modulok 20 ezer Ft körüli/alatti összegből valósultak meg.

A LoRa/LoRa WAN rádiós technika összesen 8 csatornán dolgozik, különböző jelszintekkel, sáv szélességekkel és SF- (Spreading Factor) tényezővel. Az SF értéke 7 és 12 között állítható. Minél nagyobb az SF értéke, annál nagyobb táv hidalható át, viszont annál több ideig tart az adás, ezáltal annál nagyobb lesz a fogyasztás is.

Amennyiben biztos átvitelt szeretnénk megvalósítani, a GW által fogadott csomagokat a GW nyugtázza. Nyugta hiányában a modulok ismétlik a küldést (állítható, hogy hányszor, de legfeljebb 8-szor LoRa/LoRaWAN esetén), ami szintén nagyobb ütközési valószínűséghez és nagyobb fogyasztáshoz vezet.

A fogyasztás csökkentése érdekében csökkentettük a modulok ébredési idejét úgy, hogy nem kértünk nyugtázást. Hogy nyugtázás hiányában csökkentsük az ütközés valószínűségét, a távolabbi szenzormodulokat magasabb SF-értékkel használtuk és mindegyiknek saját csatornája volt, míg a közelebbieket kisebb SF-értékkel működtetjük, illetve amelyek osztoztak egy csatornán, azoknak különböző SF-értéket adtunk, hogy legalább részleges („tökéletlen”) ortogonalitást [6] biztosítsunk.

További opcióként felmerült, hogy az egyes modulok, különösen a távolabbi modulok ne közvetlen a GW-nek küldjék adatait, hanem egy közbülső modulnak, mely átjátszóként szerepel az adott távoli modul és a GW között. Ezt az opciót végül két okból elvetettük. Egyrészt a fenti beállításokkal végül a legtávolabbi modul is képes volt elérni a GW-t. Másrészt pedig biztosítani kellett volna, hogy az átjátszó mindig éber legyen, mikor a többi modul ezen keresztül küldené saját adá-

sát. Fontos megemlíteni, hogy e modulok egy adott pillanatban csak egy hullámhosszon működnek, azaz csak egy hullámhosszra hangolva várják az átjátszandó adategységet. Emiatt célszerű, hogy ugyanazon a hullámhosszon adjanak és fogadjanak, hogy ne kelljen időközben átállítani, így az átjátszó és az átjátszott modul ugyanazon a hullámhosszon kell, hogy legyen. Noha e második opció is járható út, az első ok miatt nem erőltettük.

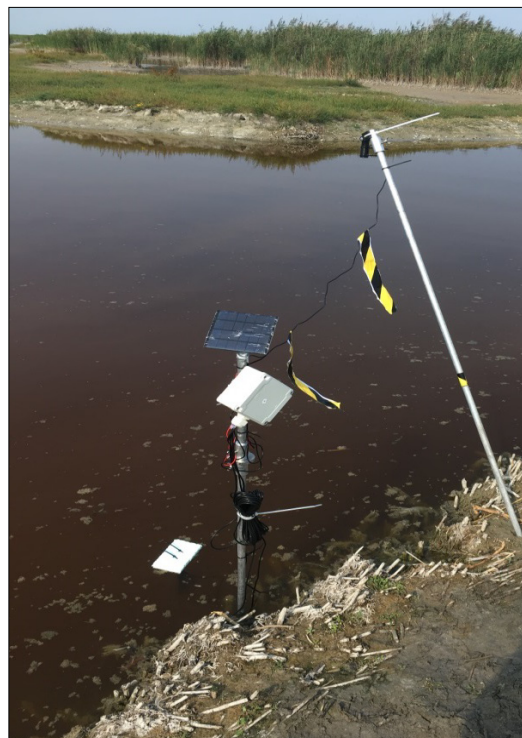
4. A mérőmodul összeállítása

A mérőmodul feladata a szenzorok adatainak leolvasása, a mért adatokból a kívánt információ kiszámolása, elegendően pontos ábrázolása minél kevesebb biten, majd a hasznos adat továbbítása a LoRa/LoRa WAN hálózat felett, majd interneten át a kiválasztott szerverre. Valamennyi adatot pontos időbélyeggel látunk el. A modulon belül elhelyezett SD-kártyára is mindent elmentünk, amit a rádiós hálózaton felküldünk.

A 5. ábrán láthatjuk a tóra kihelyezett 10 mérőmodul egyikét. Az ábra jobb felső részén látjuk a hullámszenzort, amely valójában egy autólókhárítóban is megtalálható olcsó, vízálló, ultrahangos távolságmérőhöz hasonló szenzor, ám szűkebb az ultrahang nyalábja, elkerülendő a zavaró visszaverődések vételét. A távolságszenzor egy ferdén leszúrt rúdon található, melynek dőlésszöge elegendő ahhoz, hogy a rúd ne lógjon bele az ultrahangos nyalábba. Az ultrahangos szenzortól balra lejjebb látható a fotovoltaiikus panel, mely a mérőmodulban lévő akkumulátorokat táplálja. A napelem alatt van a mikrokontroller, az akku, az SD-kártya, az óramodul és a rádiós modem IP67 tokozásban tömszelencés kivezetésekkel. A vízhatlan hőmérőket egyrészt a vízfelszín közvetlen közelében, a vízfelszín alatt helyeztük el a ké-

5. ábra

A tóra kihelyezett mérőmodul



6. ábra

A mérőmodul összeszerelése kihelyezés előtt



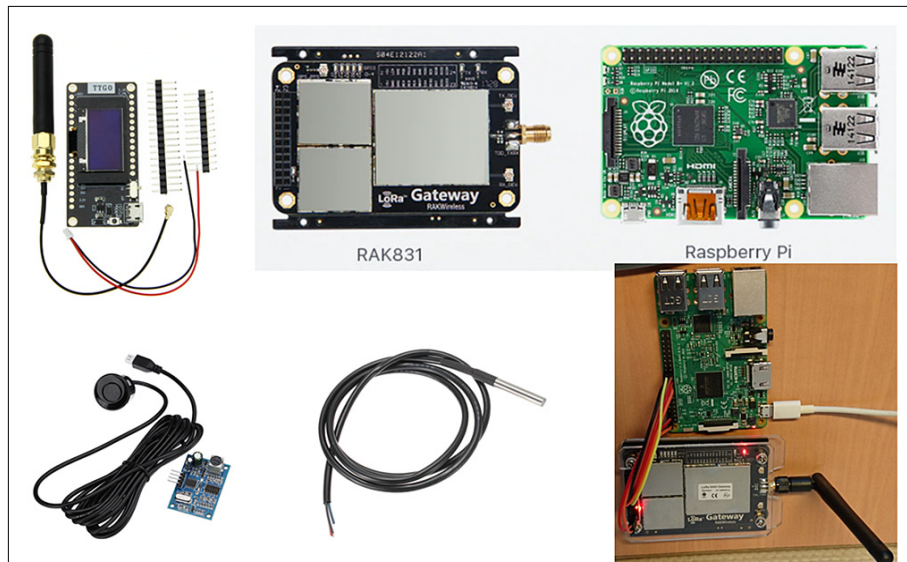
pen látható fehér úszó aljára rögzítve, másrészt a meder alján. Az ultrahang terjedési sebességét befolyásolja a levegő sűrűségének változása. A távolságmérés 2%-os ingadozással követte a lég-hőmérséklet napi menetgörbáját, ami az 1,6 m-es távolság mellett a vízszint kimozdulásához hozzá mérhető, 3 cm körüli hibát is eredményezett. Ezt a legközelebbi meteorológiai állomás adatsoraival utólag korrigáltuk, de a nádas csatornák mikroklimája eltérhet a nyílt tavitól, ezért a jövőben az ultrahangos vízfelszín-távolságmérés pontosítására a helyi lég-hőmérsékletet is célszerűnek lát-szik mérni és akár modulon belül helyben kompenzálni.

A 6. ábra (az előző oldalon) szemlélteti a modul összeszerelését. Itt látszik az általunk készített nyomtatott áramkör, az óramodul, az antenna, az akku, a szenzorok stb.

A 7. ábra szemlélteti az általunk választott rádiós modult és a gateway megvalósításához felhasznált hardvert. A bal alsó részen láthatók az ultrahangos szenzor és a hőmérő is.

A 8. ábrán látható, hogy egy modul ébredése pillanatától a mérések elvégzésén át, majd a rádiós küldés és újra elalvás között 5 másodperc telt el. Ebből a rádiós adás fél másodperc volt. Ezen időket természetesen sok minden befolyásolja, de talán a rádiós adás időtartama a legfontosabb, hiszen ezalatt a legnagyobb az áramfelvétel. Ábránkon a kevesebb mint fél másodperces adás alatt közel 70 mA áramot vesz fel 5V feszültség mellett. Nagyobb SF-érték mellett hosszabb ideig tart az adás, nagyobb távolság áthidalása esetén az áramfel-

8. ábra
A LoRa modul áramfelvétele
(feszültség egy 10 Ohm-os sorosan kötött ellenálláson)



7. ábra A rendszer legfőbb alkotóelemei

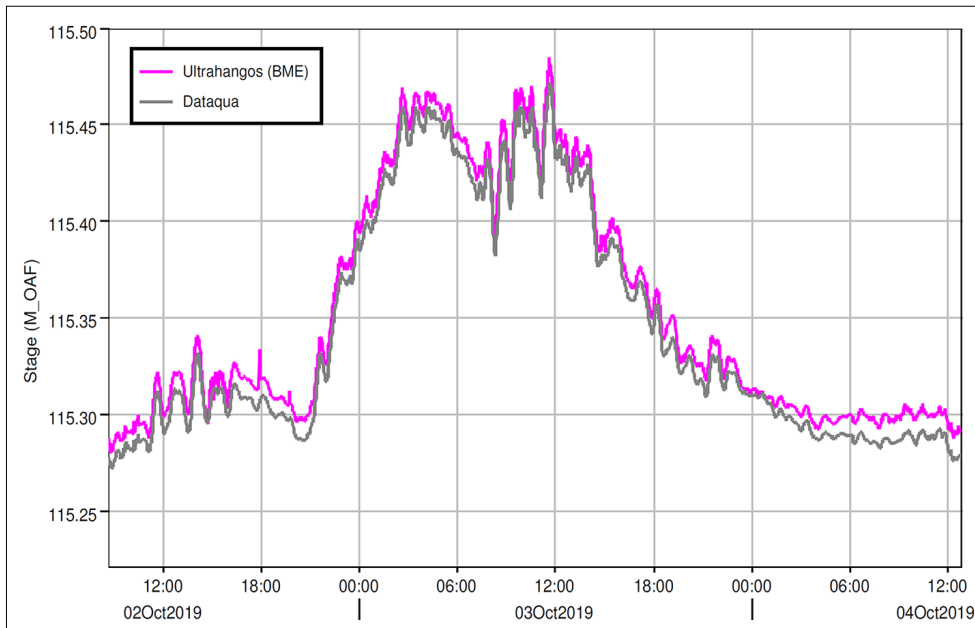
vétel háromszorosa (200 mA) is lehet. Feltéve hogy 15 percenként (azaz 900 másodpercenként) 5-10 másodpercig tart a mérés adással együtt, látjuk, hogy az alvási idő a legkritikusabb tényező (pontosabban az ébredési idő és alvási idő aránya) az energiafogyasztásban.

5. Mérési eredmények értékelése

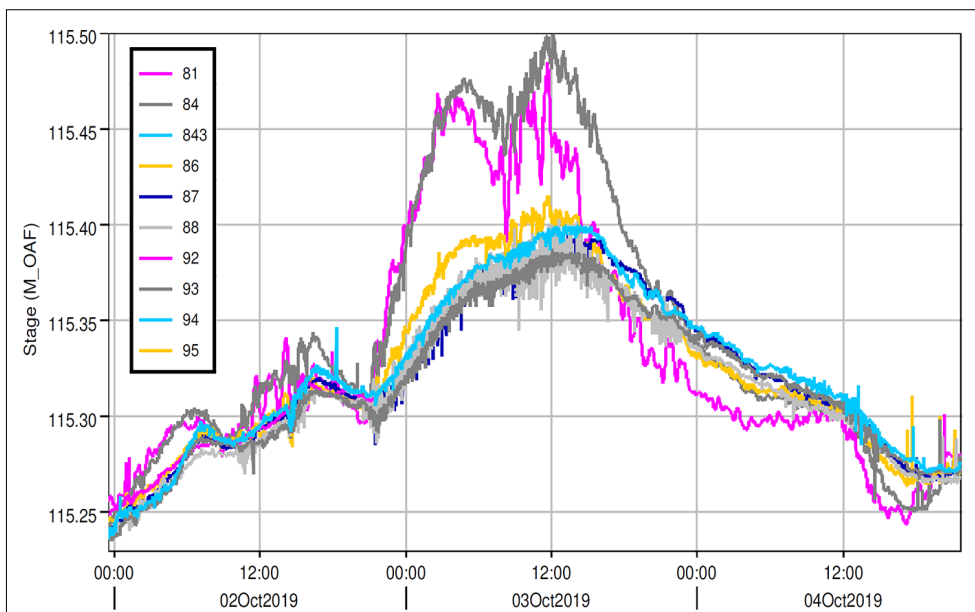
Az ultrahangos vízállásíró igazolására több pontban is DATAQUA típusú, nyomásalapú vízállásírókat helyeztünk el. Az eltérő mérési elv ellenére a két eszköz közötti különbség a magassági referálás pontosságának nagyságrendjébe esik (9. ábra), azaz a vízmércék „0” pontjának a szintjét nem tudnánk pontosabban meghatározni.

Egy gyakori, ÉNY-i szél a tó víztömegét a déli része felé lendíti ki és ez a csatornák torkolatánál (81 és 84-es pontok) eredményezi a legkorábbi, legerősebb vízszintemelkedést (10. ábra). A 0,20 m-es hullámok aztán gyorsan, felére csillapodnak a csatornahálózat belseje felé és tetten érhető a fáziskésés is. Méréseink idején a tó közepes vízszintje nem érte el a nádas terepszintjét, ezért a vízforgalom kizárólag a csatornában zajlott le.

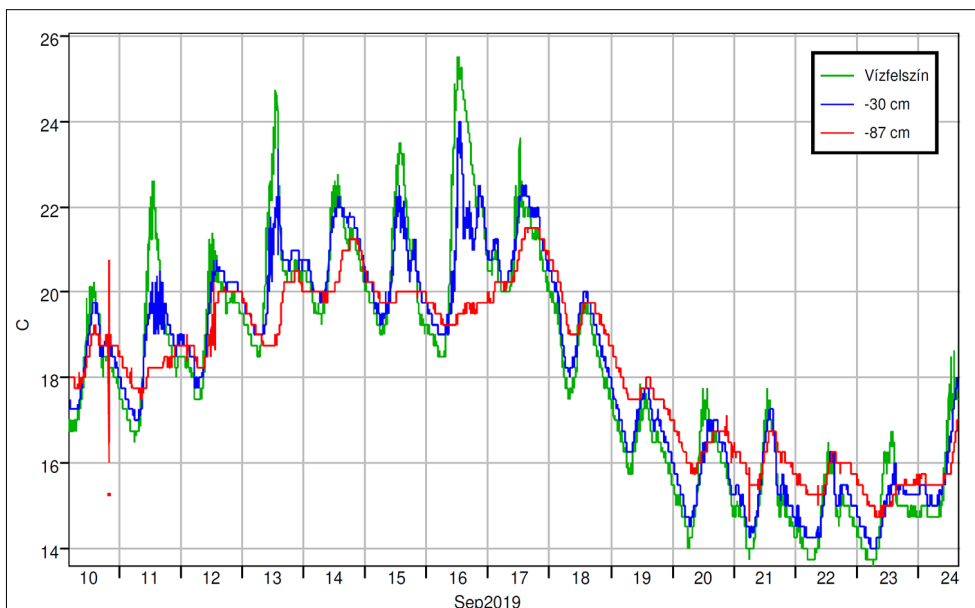
A vízszintek mellett betekintést adunk a víz-hőmérséklet idősoraiába is (11. ábra). Itt a hőingadozás mélység menti csillapodása érhető tetten. A magasabb rétegek a besugárzás hatására gyorsabban melegednek és magasabb hőmérsékleten tetőznek, ezzel szemben éjszakánként nagyobb mértékben lehűlnek. Szeptember 16-án egész nap igen stabil, 90 cm-en mintegy 5°C-os különbséget eredményező hőmérsékleti gradiens alakult ki, amiről tudjuk, hogy a függőleges turbulens elkeveredést már számottevően csillapítja. Ezzel szemben szeptember 17-től kezdve instabil sűrűségi rétegzettség figyelhető meg: 2°C-kal hűvösebb volt a vízfelszín, mint a mederközeli vízrétegek.



9. ábra
A 81-es pontban a saját fejlesztésű ultrahangos és a Dataqua típusú, nyomásalapú berendezéssel mért vízszint-idősorok összehasonlítása egy egynapos, 5 m/s-os ÉNy-i szélepeződ során.



10. ábra
A saját fejlesztésű ultrahangos távolságmérőkkel rögzített vízszint-idősorok a nádasöv tíz különböző pontjában, a 8. ábrával azonos időszakra.



11. ábra
A 87-es pontban a saját fejlesztésű berendezéssel mért víz hőmérsékleti menetgörbék a vízfelszínen, illetve 30 és 90 cm mélységben.

6. Összefoglalás

Cikkünkben az IoT tavi környezetre való adaptálásáról mutattunk be egy alkalmazási példát. Fejlesztésünk eredményeként a hálózatba rendezett, autonóm működésű és olcsó berendezésekkel alig kényszerülünk kompromisszumra a térbeli lefedettség és a térbeli felbontás között. A professzionális mérőeszközök annyira költségesek, hogy a szokásos pénzügyi keretek között ezek alig néhány pontban tudnánk csak egyidejű adatsort gyűjteni, ugyanakkor ezek az adatsorok tudományos igényességűek és robusztusak.

Jelen cikkünkben egy másik filozófiát követtünk: olcsó eszközök tömegével végzünk mérést kiterjedt pont-hálózatban. Ezek az eszközök ugyan kevésbé ütésbiztosak és pontosak, de a területről olyan sok helyről szolgáltatnak mintát, hogy ennek köszönhetően az adatokon megbízhatóbb geostatistikai elemzés is végezhető. A Fertő tavi mérési expedíció során élesben, egy kutatási projekt keretében teszteltük a kifejlesztett rendszert, amely eredményesen vizsgázott.

Jövőbeli fejlesztéseink arra irányulnak, hogy az ultrahangos távmérőket a kilendülésnél jóval finomabb frekvenciájú hullámmérésre adaptáljuk, több érzékelő összefogásával alkalmassá téve az irány spektrum levezetésére is. A valós idejű adatátvitel is tovább teszteljük, hiszen az nemcsak a tó állapotának követését szolgálja, hanem az esetleges meghibásodások gyors azonosítását is. Az olcsóságnak és a folyamatos monitorozásnak köszönhetően így egy-egy érzékelő kiesésének a kockázata nagyban mérsékelhető.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

Szerzőinkről



KRÁMER TAMÁS a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének egyetemi docense, szakterülete a felszíni vizek áramlásana. Sekély tavak szél keltette vízmozgásaival hallgató kora óta foglalkozik. PhD dolgozatát is ebben a témában szerezte 2007-ben. Aktuális kutatásai a tófelszín fölötti légköri és a vízi folyamatok összekapcsolt leírására irányulnak.



CINKLER TIBOR a BME Távközlési és Médiainformaticai Tanszék (TMIT) egyetemi tanára, az MTA doktora, az MTA-TTB és az IFIP 6.10 munkacsoportjának elnöke. Szakterülete az optikai hálózatok forgalmi és topológiai optimalizálása, továbbá különböző ipari, mezőgazdasági, városi, környezetvédelmi IoT- (Internet of Things) és IIoT- (Industrial IoT) alkalmazások megvalósítása 4G és 5G celluláris és LoRa/LoRa WAN hálózatok felett. Publikációi és azok hivatkozottsága az alábbi rendszerekben tekinthető meg:

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10000211>,
<https://scholar.google.hu/citations?user=Zl8D1UAAAAJ&hl=en>,
https://www.researchgate.net/profile/Tibor_Cinkler

Hivatkozások

- [1] T. Baracchini, P.Y. Chu, J. Sukys, G.Lieberherr, S. Wunderle, A. Wüest, D. Bouffard: Data assimilation of in-situ and satellite remote sensing data to 3D hydrodynamic lake models. Geosci. Model Dev. Discuss, 2019.
- [2] J. Józsa, T. Krámer, K. Homoródi, E. Napoli, J. Sarkkula: Wind-induced hydrodynamics and sediment transport of Lake Neusiedl – Hungarian-Austrian-Finnish research cooperation from lake-wide to bay-wide scale. Research report, Budapest Univ. of Techn. and Economics, Dept. of Hydraulic and Water Resources Engineering, Budapest, 2008.
- [3] G. Wolfram, L. Déri, S. Zech (Eds.): Lake Neusiedl strategy study, Phase 1, Study prepared for the HU-AT Water Commission, Vienna–Szombathely, 2013.
- [4] T. Krámer, J. Józsa: Sekély tavak szél keltette áramlásai-kaotikus elkeveredéshez vezető tér-és időstruktúrák. Természet Világa (2), pp.46–49, 2013.
- [5] H. Hejazi, H. Rajab, T. Cinkler, L. Lengyel: Survey of platforms for massive IoT, DOI: 10.1109/FIOT.2018.8325598, IEEE International Conf. on Future IoT Technologies (Future IoT), Eger, 2018. január 1-8.
- [6] D. Croce, G. Michele, T. Ilenia, G. Domenico, M. Stefano: Impact of Spreading Factor Imperfect Orthogonality in LoRa Communications, DOI: 10.1007/978-3-319-67639-5_13, Intern. Tyrrhenian Workshop on Digital Communication, 2017. szeptember.