



Dunai hőcsóva térbeli és időbeli viselkedésének elemzése terepi mérésekkel

TDK Dolgozat

Szerző:

Szirovatka Lilla Eszter

Konzulens:

Dr. Fleit Gábor

BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest, 2024



Tartalom

Kivonat.....	3
Abstract.....	4
1 Bevezető.....	5
2 Módszertan.....	9
2.1 A vizsgálati terület bemutatása	9
2.2 Terepi mérések.....	10
2.2.1 Alkalmazott MÉRŐMŰSZEREK.....	13
2.3 Adatok előkészítése	15
2.3.1 ADCP adatok előkészítése	15
2.3.2 Digibar adatok előkészítése	18
2.4 Adatfeldolgozás.....	20
2.4.1 Mozgó hajós adatok feldolgozása	20
2.4.2 Álló hajós adatok feldolgozása	22
2.4.3 Interpolált sebesség és hőmérséklet térképek.....	24
3 Eredmények.....	28
3.1 Hőmérsékletmérések összehasonlítása	28
3.2 Áramlási viszonyok	30
3.3 Vízhőmérséklet térképek	33
3.3.1 Vízhőmérséklet hosszmenti változása	34
3.4 Hőmérséklet idősorok	35
4 Diskusszió.....	38
5 Konklúziók	41
Köszönetnyilvánítás	42
Hivatkozások.....	43



Kivonat

Az atomerőművek számos előnyük mellett hátrányokkal is rendelkeznek, melyek nem mindegyikére van jelenleg általánosítható megoldás. Az egyik ilyen probléma a könnyűvízes reaktorok szekunder körében lévő élővízes hűtővíz visszavezetése az eredeti víztestbe. A paksi atomerőmű (felmelegített) hűtővíz bebocsátása már az erőmű megépítése óta megosztó téma. Pakson a hűtővíz a Dunából származik, melyet előhűtés nélkül juttatnak vissza a Dunába, így a visszavezetett víz hőmérséklete átlagosan 10 °C-kal magasabb a kivett víz hőmérsékleténél. Ez az érték akkor különösen fontos, ha a Duna eredeti vízhőmérséklete is magas, mint például a nyári hónapokban, ekkor ugyanis a visszajuttatott víz hőmérséklete elérheti a 35 °C-ot is, mely negatív hatással van a Duna élővilágára.

Jelen dolgozatban terepi mérések feldolgozásával és értékelésével foglalkoztam. Négy mérési kampány során gyűjtött adatok alapján a hőcsóva térbeli és időbeli változékonyságát kívánom feltárni és megérteni. Az új eredmények segítséget nyújtanak a jövőre vonatkozó predikciók felállításához is, ahol figyelembe veendő Paks 1 és 2 együttes üzeme, illetve a klímaváltozás hatására várhatóan megváltozó dunai vízhőmérsékletek és kisvízhozamok is. A fenti változások kivétel nélkül kedvezőtlenül befolyásolják a hőterhelés környezeti hatását, ezért kulcsfontosságú a jelenlegi állapot minél részletesebb feltárása és megértése.



Abstract

Nuclear power plants, despite their numerous advantages, also have drawbacks, some of which currently lack generalized solutions. One such issue is the discharge of cooling water from the secondary circuit of light water reactors back into the original water body. The release of (heated) cooling water from the Paks Nuclear Power Plant has been a controversial topic since the plant's construction. At Paks, the cooling water is sourced from the Danube and is returned to it without pre-cooling, causing the temperature of the discharged water to be, on average, 10 °C higher than the intake temperature. This is particularly significant when the original water temperature of the Danube is high, such as during the summer months, when the discharged water temperature can reach up to 35 °C, which negatively impacts the ecosystem of the Danube.

In this study, I focused on processing and evaluating field measurements. Based on data collected during four measurement campaigns, I aim to explore and understand the spatiotemporal variability of the thermal plume. The new results will support modelling-based predictions for the future, considering the joint operation of Paks 1 and 2, as well as anticipated changes in the Danube's water temperatures and low water flow rates due to climate change. All these changes have adverse effects on thermal impact, making a detailed exploration and understanding of the current state crucial.



1 Bevezető

Az atomenergia az egyik legkörnyezetkímélőbb módja az energia előállításnak. Ennek köszönhetően használata világszerte elterjedt, még annak ellenére is, hogy néhány problémájára nincs még megoldásunk. A dolgozatom is egy ilyen probléma közelebbi megértésének céljából készült.

A jelen dolgozatban bemutatott probléma a hűtővízes reaktorok egyik sajátossága. Az ilyen típusú reaktorok (WCR) leggyakoribb fajtája a könnyűvízes reaktor (LWR), melynek két típusát különböztetjük meg egymástól, a nyomott vizes reaktort (PWR) és a forróvízes reaktort (BWR). A hűtővízes reaktorok ritkább fajtája a nehézvízes reaktor (HWR). Az atomreaktorokban történő energia előállításának alapelve a maghasadás, mely jelentős hőfejlődéssel jár. A hűtővízes reaktorokban a maghasadás okozta hő felmelegíti a reaktorban található vizet, ami ezután gőzzé alakul és turbinákat hajt meg, melyek villamosenergiát állítanak elő. Ez az egész folyamat egy zárt rendszer, így a vízgőz cseppfolyósítását egy különálló rendszerrel kell megoldani.

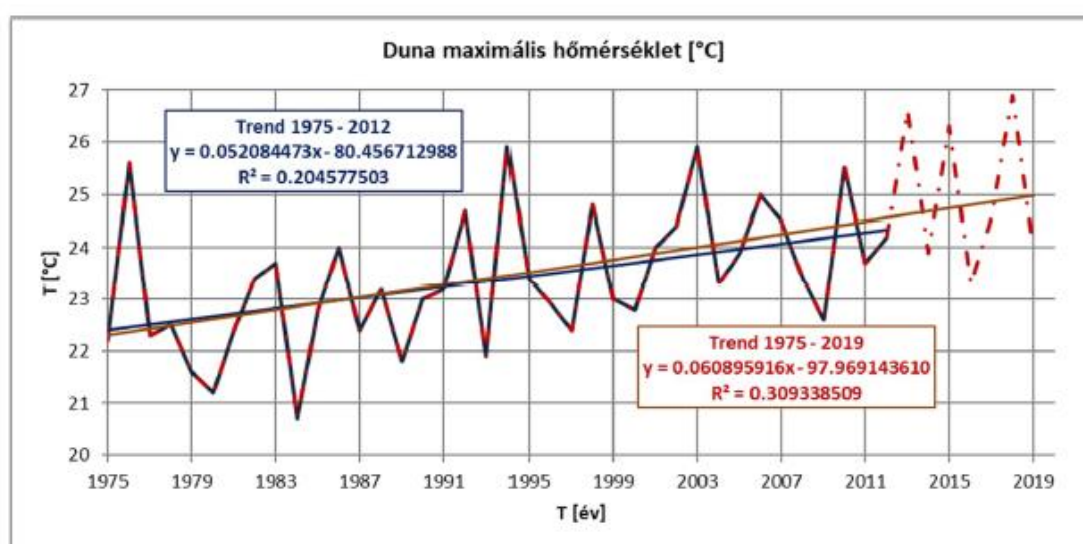
Cseppfolyósításhoz három módszert alkalmazhatnak. A legelterjedtebb a direkt hűtés, mely során, ha a reaktor egy folyó vagy egy nagyobb víztest mellett van, akkor innen vizet engednek a reaktor kondenzátoraiba, amit ezután visszavezetnek a folyóba vagy tengerbe, ekkor már néhány fokkal melegebben. Másik lehetőség a hűtővíz visszakeringtetése, amikor a hűtővizet egy reaktor melletti hűtőtorony hűti vissza, majd ezt visszavezetik a reaktorba. A harmadik és egyben legkevésbé elterjedt módszer a száraz hűtés, ahol nem használnak hűtőtornyot, hanem a hűtést teljes mértékben a levegőre bízzák. A dolgozatomban egy direkt hűtésű erőmű befogadóra kifejtett hatását vizsgálom meg közelebbről.

A direkt hűtés folyamata során a hűtővíz visszavezetése előtt sok esetben a visszaengedést egy előzetes hűtési folyamat előzi meg például hűtőtornyokkal vagy más megoldásokkal, melyre a Zaporizzsjai atomerőmű egy nagyszerű példa, ugyanis itt a folyamatban részt vesz egy hűtő, hűtőtornyok és szórtvízes hűtés is. A Paksi Atomerőmű (PAE) esetében direkt hűtési módszert használnak, melynek folyamán a visszaengedés előtt nincs előzetes hűtés, így a visszaengedett víz (a téli időszakban) akár $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal is melegebb lehet a kivett víz hőmérsékleténél.

Magyarországon jelenleg 4 reaktor működik Pakson. Mind a négy nyomottvízes reaktor és mindegyik másodpercenként 25 m^3 vizet igényel a hűtéséhez, tehát a 4 reaktorblokk összesen másodpercenként 100 m^3 vizet igényel, melyet mind a Dunából vesznek ki. A Duna átlagos vízhozama Paksnál kb. $2300\text{ m}^3/\text{s}$, viszont az eddig mért legkisebb adat $855\text{ m}^3/\text{s}$ volt.



A Duna maximális hőmérsékletének évről évre történő növekedése (**1. ábra**) mutatja, hogy a visszaengedett víz hőmérséklete is egyre inkább nőni fog. A jelenlegi előírás az, hogy a visszaengedett víz hőmérséklete és a befogadó víz közti különbség (hőlépcső) nem haladhatja meg a 11 °C-t, illetve +4 °C alatti dunai vízhőmérséklet esetén ez a különbség nem haladhatja meg a 14 °C-ot. A bevezetéstől számított 500 m-es referencia szelvényben sehol sem lehet a víz hőmérséklete 30 °C-nál magasabb (Forrás: A Paksi Atomerőműre irányadó 15/2001 (VI.6.) KöM rendelet). Ennek betartása érdekében csökkentik a reaktorok teljesítményét vagy a nyári hónapokra időzítik a reaktorok karbantartását (reaktoronként 15 havonta kb. 1 hónap), ilyenkor a visszaengedett víz nem 100 m³/s, hanem csak 75 m³/s. Ennek segítségével az előírások betarthatóak még a növekvő vízhőmérsékletek és csökkenő vízhozamok ellenére is.

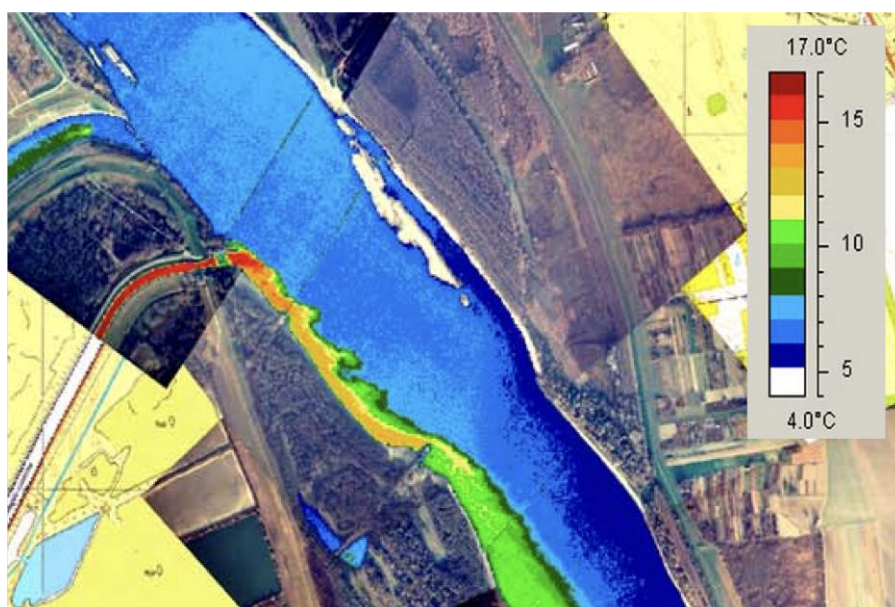


1. ábra A Duna éves maximális vízhőmérsékleteinek idősora 1975–2019 között (Forrás: MVM ERBE, 2024).

Paks 2 üzembe helyezése után a visszaengedett melegvízhozam 132 m³/s-mal nő, az együttes üzem alatt így 232 m³/s lesz. Az eredeti tervek szerint Paks 1 és Paks 2 csak pár évig üzemelt volna párhuzamosan, azonban Paks 2 építésének csúszása miatt Paks 1 üzemideje jelenleg hosszabbítás alatt van, így kb. két évtizedig együtt fognak üzemelni. Emiatt még inkább sürgető téma az elkeveredés megértése, ugyanis ez idő alatt a klímaváltozás okozta alacsonyabb vízhozamok és növekvő vízhőmérsékletek még inkább rontani fognak a jelenleg is kétséges helyzeten.

A Duna élővilágára vonatkozó friss kutatások azt mutatják (Füstös et al., 2022), hogy a Paksi atomerőműnek nincs kimutatható negatív hatása a dunai halközösségekre, viszont ez a vizsgálat más élőlényfajtákra, például a makrogerinctelenekre nem terjedt ki.

A paksi hőcsóvát már különböző mérési- és modellezési módszerekkel vizsgálták a múltban (ETV-ERŐTERV Rt., 2006), melyek során megállapítható volt a hőcsóva kiterjedése és észlelhető a hőcsóva időbeli változékonysága is (**2. ábra**). A csóva időbeli változékonyságán a Kelvin-Helmholtz instabilitásból kialakuló örvényfonalak okozta hőmérséklet fodrozódásokat értjük. Kelvin-Helmholtz instabilitás akkor következik be, amikor két különböző sebességgel mozgó folyadékréteg (Duna háttéráramlás és az MVCS-ből érkező melegvíz sugár) érintkezik egymással és a sebességkülönbségük miatt hullámszerű mintázatok jelennek meg az érintkezési felületükön, melyet a **2. ábra** is jól szemléltet. Az így képződött hullámokat örvényfonalaknak vagy fodrozódásoknak is nevezhetjük.



2. ábra: Termovíziós légifelvétel – a Duna felszíni víz hőmérséklet-viszonyai a Paksi Atomerőmű térségében (Forrás: ETV-ERŐTERV Rt., 2006).

Erőművek hűtővizének visszavezetéséből származó hőcsóvák élővízre kifejtett hatásáról nemzetközi példák is találhatók, azonban a téma szakirodalma meglehetősen szerény. A világon megtalálható direkt hűtésű hűtővizes reaktorok többsége hűtőtavakba és tengerekbe engedi vissza a felmelegített hűtővizet (Wei et al., 2023), így a legtöbb ezeknek a vizsgálatát mutatja be. A kutatások többsége műholdak által gyűjtött adatok feldolgozását ismerteti (pl. Ahn et al., 2006, Tang et al., 2003). A műholdfelvételek által rögzített adatok megfelelőek nagyobb területek vizsgálatához, mint az elkeveredés egy öböl területén, azonban a durva felbontás miatt kis területek (pl. folyók) pontos vizsgálatához már nem alkalmas.

Jelen dolgozatban egy ezeken túlmutató mérési és adatfeldolgozási módszertan kidolgozása a cél, kifejezetten folyami környezetre. Egy olyan módszertané, mely képes figyelembe venni a



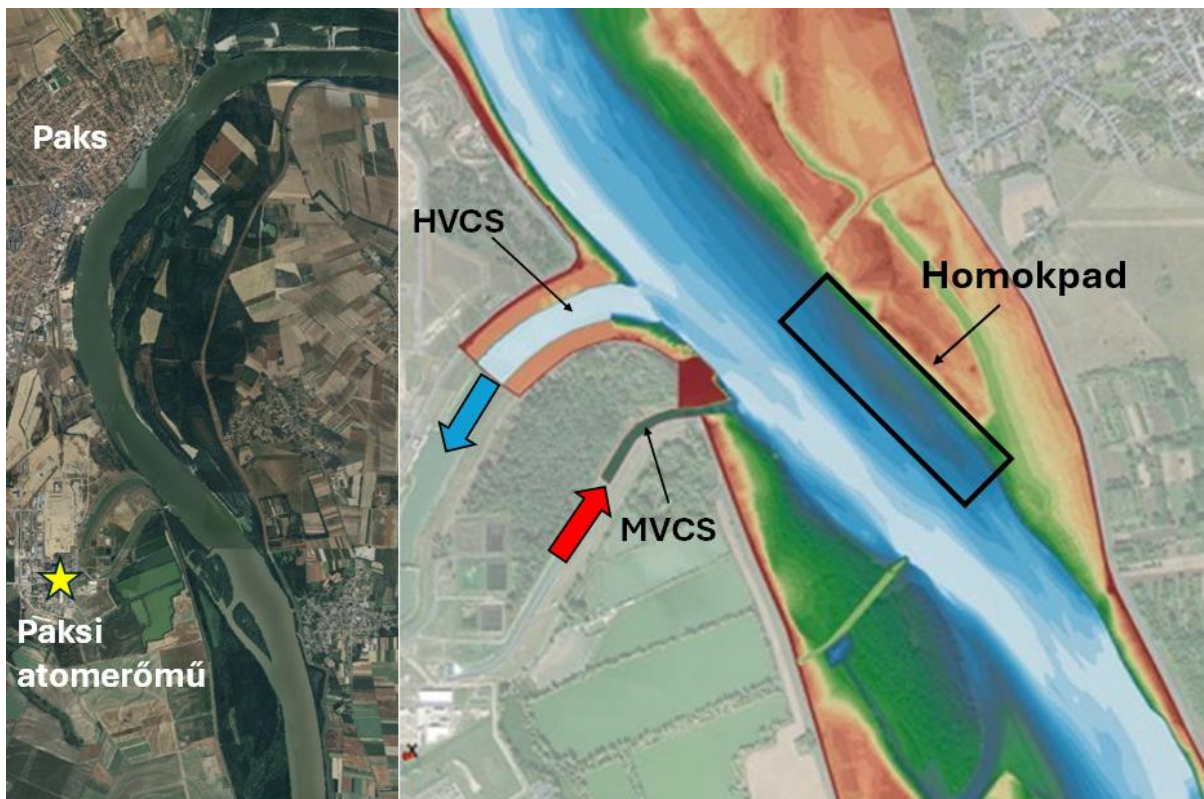
hőcsóva időben változó jellegét is és így támogatni a tranziens numerikus modellezési feladatokat is. A kidolgozott adatfeldolgozási módszertan segítségével a hőcsóva elkeveredésének hatékonysága és a Duna vízhozama közti összefüggést, a hőcsóva térbeli kiterjedését különböző hidrológiai állapotokban, illetve a csóva időbeli változékonyságát vizsgálom meg.



2 Módszertan

2.1 A vizsgálati terület bemutatása

A dolgozatom adatgyűjtésének helyszíne a Duna Paksi Atomerőmű környéki szakasza volt (**3. ábra**). Az atomerőmű, így a hozzá tartozó hidegvíz (HVCS) és melegvíz-csatorna (MVCS) is a Duna jobb oldalán helyezkedik el. A melegvíz-csatorna befolyásánál a Duna sodorvonala a jobb part mentén található, mely a Duna erőmű feletti, közel 90 fokos bal kanyarának köszönhető. A sodorvonal a befolyás után elhelyezkedő sarkantyú, illetve enyhe jobb kanyar hatására kerül vissza a bal partra. A befolyással szemben megfigyelhető egy homokpad, mely alacsonyabb vízállás esetén kilátszik a vízből. Az adatgyűjtést az említett homokpad felvízi végén kezdtük, majd a folyásiránnyal megegyezően haladtunk lefelé 1 km-en keresztül, ahol a hőcsóva elkeveredésének érdemleges része végbemegy.



3. ábra: A Duna Paks környéki szakasza (balra) és a vizsgált, erőmű környéki szakasz digitális terepmodellje jobbra. (HVCS = hidegvíz csatorna; MVCS = melegvíz csatorna).

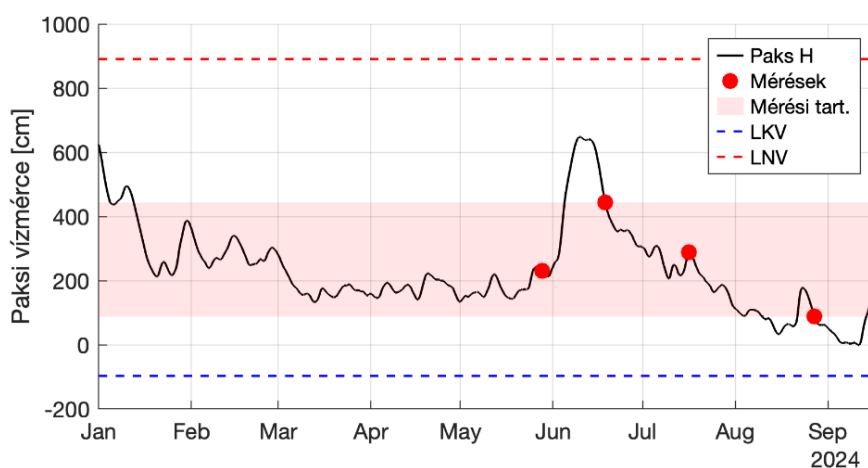


2.2 Terepi mérések

A paksi hőcsóva megértése egy egyre érdekesebb témává válik, ahogy közeledünk Paks 2 üzembe helyezése felé, illetve ahogy a klímaváltozás egyre extrémebb helyzeteket hoz létre. A hőcsóva megértése érdekében terepi méréseket kell végrehajtani, hogy pontosabban is meg tudjuk vizsgálni az időbeli és térbeli tulajdonságait és a későbbiekre megalapozott predikciókat tudjunk adni. A célom, hogy találjak egy olyan hatékony adatgyűjtési formát, mely az adatgyűjtés és adatfeldolgozás teljes folyamata során egyaránt praktikus. A vizsgálatok során négy terepi mérést végeztünk el (**4. ábra, 1. táblázat**), melyek közül a TDK munka kezdetével az augusztusi kampányon én is részt vettem.

1. táblázat: A terepi mérési kampányok idején uralkodó viszonyok összefoglalása.

Dátum	Paksi vízállás [cm]	Duna vízhozam [m ³ /s]	Duna vízhőm. [°C]	MVCS vízhozam [m ³ /s]	Relatív melegvízhozam, Q_r [%]
2024.05.28.	231	2670	20,0	75	2,8
2024.06.18.	444	3910	19,0	100	2,6
2024.07.16.	288	3130	24,1	100	3,2
2024.08.27.	85	1740	24.4	75	4,3



4. ábra: A paksi vízmérce idősora és a mérések időpontjai.

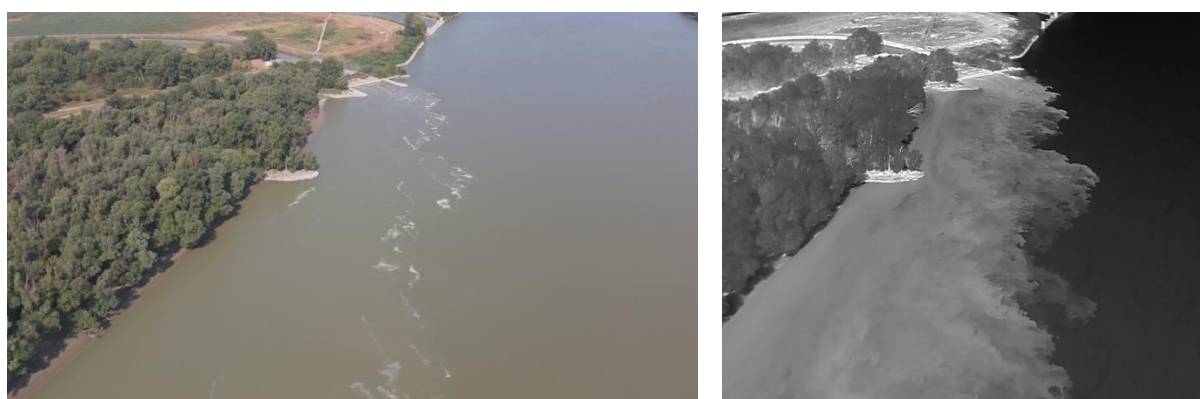
A fentiekből látszik, hogy a helyi vízjárás kb. egyharmadát sikerült lefedni a mérésekkel, illetve az is, hogy a mérések során – a szokásos karbantartások miatt – két esetben egy-egy reaktor üzemben kívül volt, ami az alacsonyabb hűtővízhozamon érhető tetten. A hűtővízterhelés jobb



értékelhetősége érdekében bevezettük a relatív melegvízhozam (Q_r) változót, mely a melegvízhozam Dunai hozamhoz képest viszonyított arányát fejezi ki százalékosan.

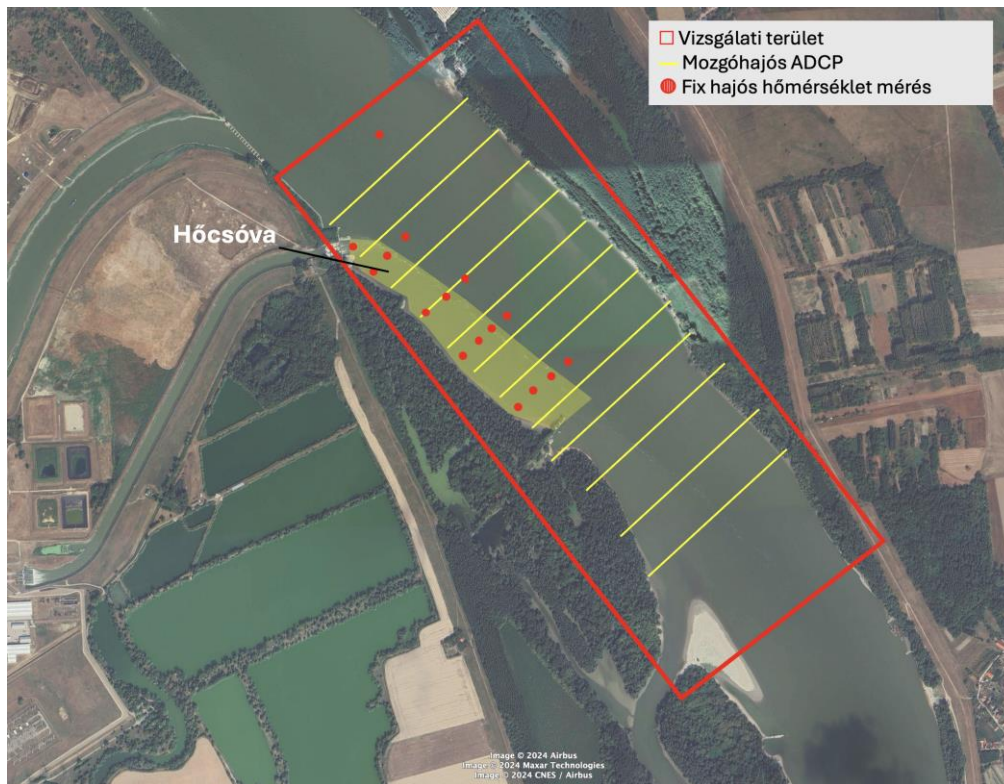
A mérési kampányok során először hőkamerával ellátott drónnal vizsgáljuk meg a hűtővíz kifolyást, ami már helyben láthatóvá teszi a hőcsóvát és annak térbeli kiterjedését, viselkedését (**5. ábra**). A hőkamerás felvételek elemzésével jelen dolgozat nem foglalkozik.

A dolgozatomban szereplő ábrák döntő többségét a kisvizes (08.27.) a nagyvizes (06.18.) és a középvízhez legközelebb álló (05.28.) mérések eredményeire készítettem el, így adva egy átfogó képet a hőcsóva viselkedéséről különböző vízjárási állapotok esetén.



5. ábra: Drónfelvétel a bevezetés utáni Duna-szakaszról. Balra a széleslátószögű kép (látható spektrum), jobbra a hőkamera képe.

A hőkamerás felvételek feldolgozása körülményes a drón mozgásai miatt, továbbá a korábbi tapasztalatok azt mutatták, hogy ezek a felvételek mindenképp kalibrálandók is – tehát a mérések nagy bizonytalansággal terheltek. A hőkamerával egyértelműen felderíthető jelenség pontosabb vizsgálatához ezért más módon is kell adatot gyűjtenünk. Ezért a drónos mérésekkel részben átfedésben, hajós méréseket is végeztük a vizsgált szakaszon, mely a befolyás felett kb. 100 méterrel kezdődik és a befolyás alatt 1 km-ig tart (**6. ábra**).

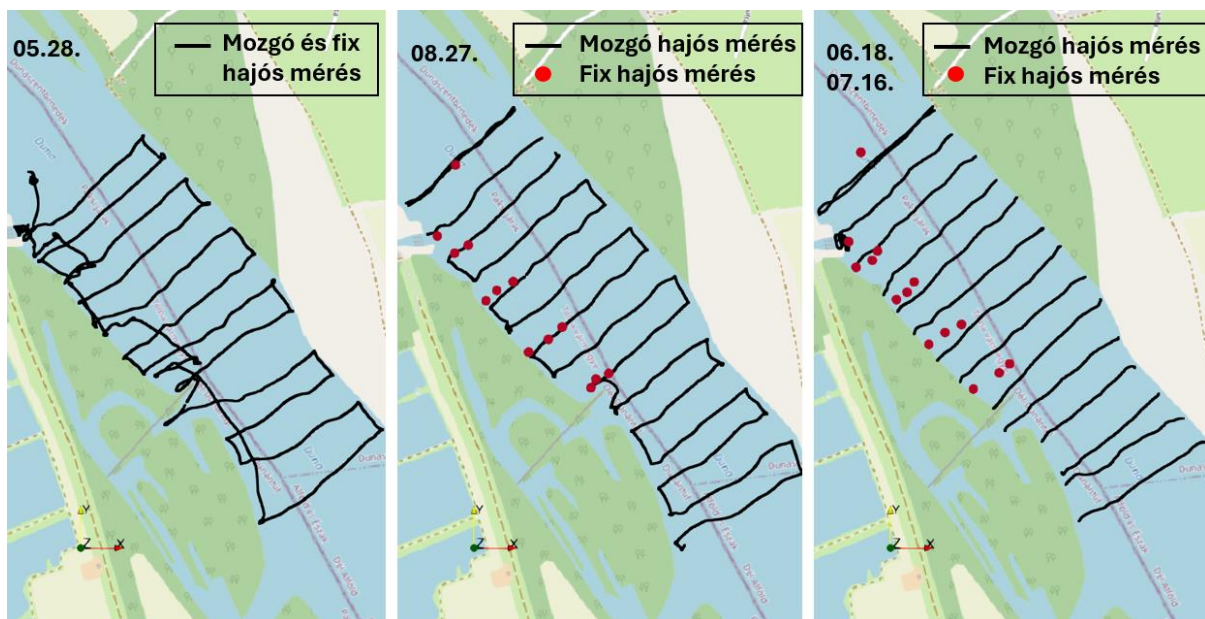


6. ábra: A vizsgálati terület és egy tipikus mérési terv.

A hajós mérés során a hajó egyik oldaláról egy akusztikus Doppler elvű áramlásmérő (ADCP) volt beengedve a vízbe, a másik oldaláról pedig egy Digibar típusú vízhőmérőműszer. A mérési folyamat alatt az ADCP műszerrel sok feladat nincs, számítógépes vezérlése egyszerű. A műszer tengelyébe egy RTK-GPS van szerelve, mely összhangban működik az ADCP-vel, így a mérési függvényekhez automatikusan koordinátákat rendel hozzá. Ezzel szemben a Digibar-ra több figyelmet kellett fordítani, mivel ezt a kifogásolható állapotban lévő műszert folyamatosan ellenőrizni kellett, hogy jól működik-e, illetve az adatokat gyakori időközönként le kell menteni az eszközről, az esetleges adatvesztést elkerülendő.

A mérések első felében a Duna egymást követő keresztmetszéveiben mértünk, miközben a hajó folyamatosan mozgásban volt, míg a mérések másik részében egyhelyben álltunk, így lettek mozgó hajós és fix hajós mérések egyaránt (6. ábra), melyek az adatfeldolgozás szempontjából még több jellemző tulajdonság feltárásához és megértéséhez lesz segítségünkre. A négy mérési kampány során három különböző mérési technikával lettek rögzítve az eredmények (7. ábra). Az első módszert májusban alkalmazták, amikor az összes mozgó és fix hajós mérés egyben lett lemérve az ADCP leállítása nélkül, egy folytonos adatsort eredményezve. A második típus augusztusban történt, amikor az összes mozgó hajós mérést egyben mérték, majd a fix hajós méréseket külön-külön. A harmadik típus pedig júniusban és

júliusban került kipróbálásra, ahol a mozgó hajós mérés során a szelvényeket is külön-külön mérték, illetve a fix hajós adatgyűjtések is egymástól elszeparáltan történtek. Mindegyiknek megvan a maga előnye és hátránya. Mindenképp kijelenthető, hogy a szelvények összevont mérése egyértelműen felgyorsítja az adatok előkészítését, mivel ezekben az esetekben csak egy mérési fájlal kell foglalkozni. Ezzel ellentétben bizonyos esetekben szükség lett volna például a mozgó hajós vagy fix hajós mérések kezdőkoordinátájára. Összességében az augusztusi mérési technika bizonyult a leghatékonyabbnak, mind az adatelőkészítés és feldolgozás szempontjából.



7. ábra: Az alkalmazott, eltérő terepi mérési stratégiák.

2.2.1 Alkalmazott Mérőműszerek

Akusztikus Doppler-elvű áramlásmérő (ADCP)

Az egyik alkalmazott mérőműszer az akusztikus Doppler-elvű áramlásmérő volt (RDI WorkHorse Rio Grande, **8. ábra**). A tanszék által végzett folyami áramlásmérésekhez már régóta ezt az eszközt használják, ebből kifolyólag terepi alkalmazása már rutinszerű. A műszer alapvetően sebesség-, illetve vízhozam mérésre specializálódott, de rendelkezik egy digitális vízhőmérsékletmérővel is. Mivel az eszköz koordináták mérésére nem képes, így egy RTK-GPS lett a műszer tetejére szerelve, melyeket ezután összehangoltak, így minden mérési ponthoz koordinátát tudunk párosítani. Az ADCP működési elve – a nevéből adódóan – a Doppler-eltolódás elvén alapszik, mely a következő: ha a hangforrás a vevőhöz képest

mozgásban van, akkor a vevő által érzékelt frekvencia eltolódik a hangforrás eredeti frekvenciájától. Aműszer ennek segítségével képes meghatározni a mélység mentén a pontbeli sebességeket, így pillanatképeket kapunk a turbulens áramlásról. Az akusztikus műszer a pontbeli vízmélységeket is meghatározza, így képet kapunk a szelvény alakjáról is.



8. ábra: ADCP műszer (jobbra) és a műszer működés közben, RTK-GPS-szel a mért függély tengelyében.

Vízhőmérsékletmérő

Mivel az ADCP nem kifejezetten hőmérsékletmérésre specializálódott, így úgy gondoltuk, hogy egy dedikált hőmérő pontosabban fog működni és a hirtelen hőmérsékletváltozásokat gyorsabban fogja kimutatni, ezért a hőmérséklet adatok mérését az ADCP mérésekkel párhuzamosan egy másik műszerrel is elvégeztük, mely a Teledyne Digibar S volt (**9. ábra**). A TDK dolgozatom egyik célja a hőcsóva vizsgálatához legmegfelelőbb mérési eljárás megtalálása is, így a Digibar által mért adatokat a későbbiekben összehasonlítom az ADCP által mért adatokkal. Ez az összehasonlítás megmutatja, hogy egy dedikált hőmérő valóban jobban működik-e, mint az ADCP és érdemes-e több műszer használata a mérések során.



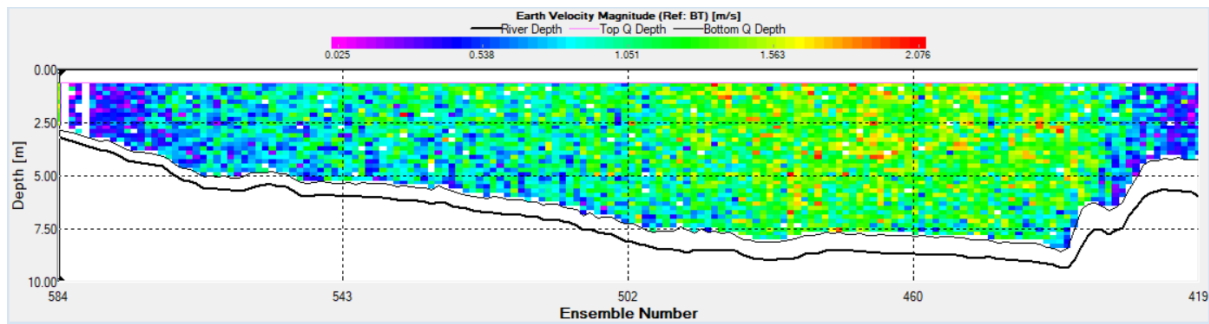
9. ábra: Teledyne Digibar S vízhőmérséklet mérőműszer.

2.3 Adatok előkészítése

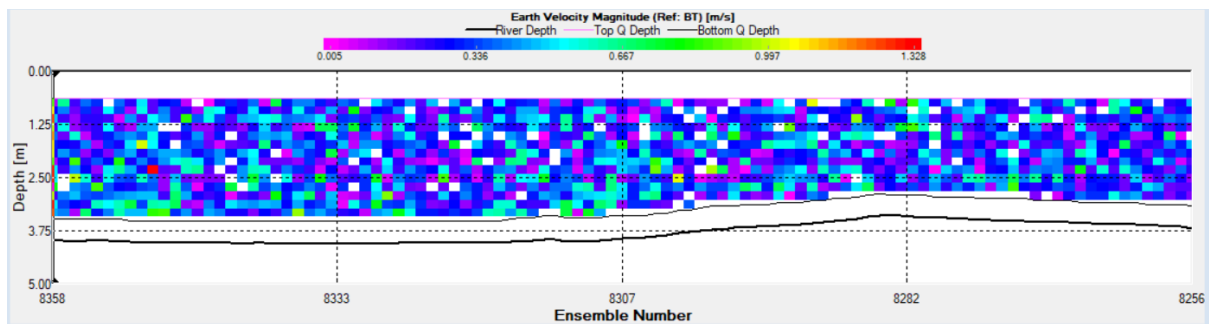
A következő fejezetben a mérés során alkalmazott mérőműszerek által rögzített adatok előkészítését fogom bemutatni. Ez a lépés lehetővé teszi, hogy az adatfeldolgozás során csak valós adatokkal dolgozzak, mivel az előkészítés folyamán a hibás és irreleváns adatokat már kiszűrtem.

2.3.1 ADCP adatok előkészítése

Az egyik mérési eszköz az ADCP volt, mely sebesség és hőmérsékletmérésre alkalmas, illetve a rászerezelt RTK-GPS miatt koordináták meghatározására is képes. Az ADCP által létrehozott fájlokat először a Winriver nevű programba kellett feltöltenem, mivel ez a program át tudja alakítani ezeket strukturált ASCII (TXT) fájlkká. Első lépésként beállítottam az akkori mérésre vonatkozó mágneses elhajlás értékét minden egyes fájlra, melyet betöltöttem. Ennek az értéke időtől és helytől is függ, így mind a négy mérés során más-más értéket kell megadni. A betöltött mérési fájlokhoz a program kirajzol mérési szelvényeket, melyek a szelvénymenti sebességeket mutatják a szelvény vízmélységeiben. Ezek az ábrák alapján egyértelműen megállapítható, hogy melyik szelvény készült mozgó hajós (10. ábra) vagy fix hajós (11. ábra) adatgyűjtési eljárással.



10. ábra: Mozgó hajós mérés szelvénye Winriverben.



11. ábra: Fix hajós mérés szelvénye Winriverben.

A második lépés az adatfeldolgozás szempontjából szükséges adatok kiválogatása volt, ugyanis csak ezeket fogom elmenteni TXT fájlalba. A számomra releváns adatok a következők voltak: a mérés ideje, a szelvény pontbeli mélysége, a víz pontbeli sebessége (u , v), elmozdulás (x , y) a kezdőponthoz képest és a pontbeli hőmérséklet. Ezután minden szelvényhez manuálisan el kell mentenem egy kezdőkoordinátát. A Winriver a koordinátákat WGS rendszerben rögzíti, így a kezdőkoordináta manuális EOV-ba történő transzformációja és a méterben kifejezett elmozdulások alapján már számítható volt minden mérési függvény EOV koordinátája. A transzformációt a BME Általános- és Felső Geodézia Tanszék egy online felületének¹ segítségével végeztem el.

A kapott eredményeket mérésenként Excel fájlalba gyűjtöttem össze az átláthatóság kedvéért, majd ezeket is átraktam TXT fájlalba az adatfeldolgozás könnyítése érdekében. Végül a szükséges ADCP adataimat elmentettem TXT fájlalba mérésenként és külön válogattam az előbb említett elv alapján a fix hajós és mozgó hajós méréseket, mert ezeknek az adatfeldolgozását külön kezelem. Tehát létrehoztam a mérési sorozat mind a négy méréséhez TXT fájlokat, melyekben már minden releváns adat rendelkezésre állt.

¹ http://www.agt.bme.hu/on_line/ets2eov/



Miután a mérési adataim rendszerezve voltak fix hajós és mozgó hajós mappákban TXT fájlokban, el tudtam kezdeni az adatok előkészítését Matlab segítségével. A feldolgozást nehezítette, hogy a négy mérés során más függőleges cellakiosztással mért az ADCP, azaz egy pontban való mérés során más számú cellára osztotta fel a vízfelszín és a meder távolságát. Az adatfeldolgozás másik nehézsége abban mutatkozott meg, hogy a négy mérés alatt háromféleképpen lettek rögzítve az adatok. Az adatelőkészítés során ezzel nem volt különösebb teendőm, mivel ez a TXT fájlokban úgy mutatkozott meg, hogy volt olyan mérési alkalom, amikor az egész mozgó és fix hajós mérés egy fájlban volt, illetve emellett volt olyan mérési időpont, amikor a mozgó és álló hajós mérések szelvényenként külön fájlokban voltak lementve.

A kész TXT fájlok kezeléséhez Matlab scripteket fejlesztettem, mely feldolgozza a mérési eredményeket. A négy mérési alkalomhoz tartozó fájlkat külön Matlab fájlokban kezeltem az átláthatóság kedvéért. Az első lépés az egyik mérési alkalomhoz tartozó ADCP fájl és az ezekhez tartozó kezdőkoordinátákat tartalmazó fájl beolvasása volt. Ezután létrehoztam két ADCP mátrixot, a sebesség adatok és hőmérséklet adatok elkülönítésének érdekében. Azoknál a mérési alkalmaknál, ahol a mozgó hajós szelvények és a fix hajós mérések külön voltak mérve ott szelvényenként külön mátrixokba gyűjtöttem az adatokat a későbbi adatfeldolgozás könnyítésnek érdekében. Az egyikben a mérési pontok koordinátáit, a mérésekhez tartozó időt, a sebességeket és a sebességekhez tartozó vízmélységeket tároltam el. A másikban a mérési pontok koordinátáit, a mérésekhez tartozó időket és a hőmérséklet adatokat helyeztem el. A mátrix feltöltését a mérési pontok koordinátaival kezdtem, melyet úgy tudtam meghatározni, hogy a szelvények kezdő x és y koordinátájához hozzáadtam az adott ponthoz tartozó x és y irányú elmozdulás értékét. Az idő adatokat a fájlok megfelelő oszlopaiból másolom át a mátrixba. A sebesség adatokat a megfelelő pontbeli mélységgel összehangolva másolom át az ADCP fájl megfelelő oszlopaiból. Végül a hőmérsékleteket szintén az előre meghatározott oszlopból helyezem át. Összességében létrehoztam két cella típusú (Matlab) adathalmazt mindegyik mérési alkalomhoz, melyek mátrixokban eltárolják a pontbeli mérésekhez tartozó koordinátákat, időket, sebességeket, vízmélységeket és hőmérsékleteket szelvényenként. Ezek segítségével az adatfeldolgozás során már csak azzal kell foglalkoznom, hogy éppen melyik adatot szeretném felhasználni vagy hogy a fix hajós vagy a mozgó hajós mérés adataira van szükségem.



2.3.2 Digibar adatok előkészítése

Az adatfeldolgozás pontossága érdekében az adatgyűjtés két különböző típusú vízhőmérő műszerrel történt, mint ahogy már korábban is említettem. Az ADCP-vel párhuzamosan Digibar műszerrel is történt adatgyűjtés a mérési sorozat minden alkalmán. A Digibar az ADCP-vel ellentétben csak a hőmérséklet adatok mérésére és tárolására alkalmas. Mivel a két műszer más időbeli felbontással mér, illetve az adatokat is máshogy tárolja el, így a mérési eredményeiket is más módon kell feldolgozni. A Digibar a mérés alatt szerzett mérési eredményeket (látszólag önkényesen tördelt) Excel fájlokba menti el. Matlabban az azonos mérési alkalomhoz tartozó fájlokat automatizáltan beolvasom és elmentem egy mátrixba a mért adatokat, ezek közül a következők voltak számomra fontosak: dátum, idő, vízfelszíntől számított távolság és a hőmérséklet. Ezután a műszer hardverhibáiból adódó helytelen adatokat kellett kiszűrni, melyek a következők voltak:

Időhiba: Az eszköz az adatrögzítő laptop által mért időtől eltér, a teljes szinkronizáció nem mindig lehetséges. A májusi mérés alatt ez az eltérés 2 perc 25 másodperc, júniusban 1 óra, júliusban 1 vagy 0 óra augusztusban 0 óra volt. Az adatokat a Digibar által mért idők megfelelő változtatásával javítottam.

Hibás dátum: Az eszköz memóriája a mérések közti adat eltávolítás ellenére összezavarodott a júliusi mérés során és a helyes értékek közé beszúrt 2003-as és 2024 májusi adatokat teljesen véletlenszerűen (**12. ábra**). Ezeket a sorokat dátum alapján töröltem a mátrixból.

321	7-16-24	10:53:29	1493.80	0.20	23.78	3.98
322	7-16-24	10:53:29	1493.80	0.00	23.78	4.00
323	7-16-24	10:53:29	1493.80	-0.20	23.80	4.00
324	7-16-24	10:53:30	1493.80	0.00	23.76	3.85
325	5-28-24	14:55:16	1486.00	0.20	20.80	3.92
326	7-16-24	10:53:30	1493.80	0.40	23.80	3.95
327	7-16-24	10:53:30	1493.80	0.20	23.78	3.82
328	7-16-24	10:53:30	1493.80	0.00	23.78	3.82
329	7-16-24	10:53:30	1493.70	0.20	23.80	3.95

12. ábra: Hibás dátum a Digibar által létrehozott Excelben.

Téves hőmérsékletadat: Az egyik hibát az adta, hogy ad hoc módon az eredmények között megjelentek 0-nál kisebb vagy irreálisan nagy értékek, melyek egyértelműen hibásak, ezeket töröltem az adatok közül.



Nem víz alatti mérésekből származó hőmérsékletadat: A második hőmérséklet probléma abból adódik, hogy a műszer hardveresen kifogásolható állapotban van, így a szelvények közt ki kell venni a Digibart a vízből, le kell állítani az éppen aktuális mérést és az adatokat le kell tölteni róla és utána törölni őket a készülékről, majd új mérést indítani és visszatenni a vízbe. Emiatt a mérőműszer már akkor elkezd, illetve folytatja a mérést amikor még nincs a vízben. Ez elsőre nem tűnik túl nagy hibának, mivel feltételezhetjük, hogy ez a rövid idő alatt az utoljára mért vízhőmérsékletet ismétli vagy kis eltéréssel esetleg tovább növeli vagy csökkenti őket. A feltételezéssel ellentétben a kapott adatok megvizsgálása után kiderült, hogy ekkor a műszer 5-6 °C-al magasabb hőmérsékleteket mért, mint előtte pár másodperccel a vízben, így ezeket az értékeket is törölnöm kellett. Mivel a Digibar által létrehozott Excelben a 4. oszlop adatai a vízfelszíntől számított távolságot jelentették, így ez alapján ki lehetett szűrni a vízfelszín felett történt méréseket. Ez alapján töröltem a hibás sorok összes adatát a mátrixomból.

Véletlenszerű leállás: Az utolsó és talán legjelentősebb probléma az adatrögzítés véletlenszerű leállásából adódott, mely azt jelentette, hogy voltak szakaszok, ahol a Digibar egyáltalán nem mért. Az augusztusi mérés során az álló hajós adatfelvétel alatt a műszer teljesen leállt, így onnan egyáltalán nincs Digibar adatunk.

Ezen finomítások után létrejött egy Digibar mátrix, melyből a mérési időket és hőmérsékleteket fogom felhasználni az adatfeldolgozás során. Az adatfeldolgozás egyszerűsítése érdekében szükségem volt a mérésekhez tartozó koordinátákra is, melyeket az ADCP segítségével kaptam meg. Mivel a Digibar rögzíti az időt, míg az ADCP az időt és a koordinátát is, ezért a Digibar időpillanataihoz az ADCP adatok alapján interpoláltam koordinátákat. Így már a Digibar mérésekhez is tartozott koordináta, mely az adatfeldolgozáshoz elengedhetetlen.

Digibar mérések álló és mozgó hajós különválogatását egyelőre nem teszem meg, mert volt olyan mérés, ahonnan fix hajós adat egyáltalán nincs is, illetve a Digibar körülményes működése miatt még nem tudni, hogy egyáltalán érdemes lesz-e ezekkel az adatokkal folytatni az adatfeldolgozást. Következésképpen mind a 4 méréshez tartozik egy Digibar mátrix, mely tartalmazza a mérési pontok koordinátáit, időpillanatait és a mért hőmérsékleteket.

2.4 Adatfeldolgozás

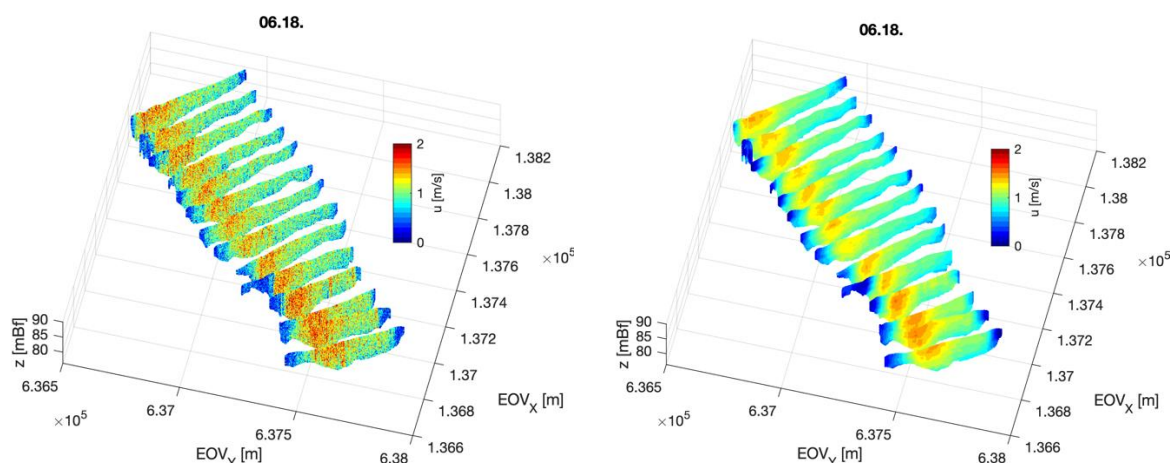
Az adatfeldolgozás során a mozgó és álló hajós adatgyűjtési eljárásból származó adatokat különböző módon dolgoztam fel, mivel ezek más jellegű eredmények feltárásához szükségesek.

2.4.1 Mozgó hajós adatok feldolgozása

A mozgó hajós mérések feldolgozásához az ADCP mérésekből származó sebesség és hőmérséklet adatokat használtam fel, illetve a Digibar mérésekből kapott hőmérsékletértékeket.

Áramlásmérések feldolgozása

Elsőként az ADCP által dokumentált sebesség adatokat dolgoztam fel. Itt egy mérés során minden mérési pontban több adat van, mivel egy mérési pozícióban a mélység mentén is rögzítve lettek a sebességek. Így létrehoztam minden mérési eseményhez a szelvénymenti sebességek koordinátahelyes eloszlását, melyen így látszódik a Duna áramlási sebességterének 3D eloszlása. Tehát egy pillanatképet kapunk a turbulens áramlásból, mivel minden függvényben egy mérésünk van. Az eredmények tehát terheltek némi turbulens zajjal. Ezeket az eredményeket a jobb értelmezhetőség érdekében ezért horizontálisan és vertikálisan is simítottam, hogy jobban értelmezhetők legyenek a lokális áramlási viszonyok. (13. ábra).

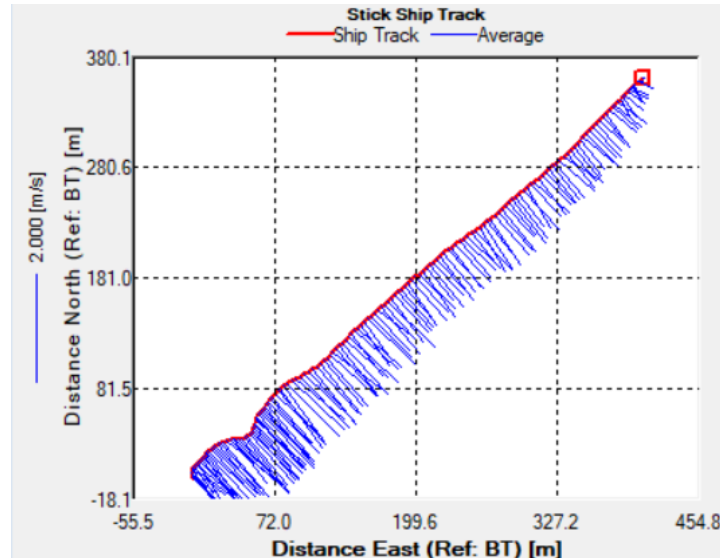


13. ábra: ADCP-vel mért szelvénymenti sebességeloszlások a vizsgált Duna szakaszon. Balra a nyers adatok, jobbra a mozgóablakos simítással kapott eloszlások.

A sebességadatok egy másik, szélesebb körben használt megjelenítési módja a térképi (2D) megjelenítés. Ilyenkor a mélységátlagolt áramlási sebességek eloszlásait ábrázoljuk, mely egy



jól emészthető és áttekinthető képet ad a lokális áramlási viszonyokról. Ezeket a mélységátlagolt sebességeket vektorosan ábrázolja egyébként a Winriver is a mérési fájlknál; egyúttal azt is mutatja, hogy a szelvényben hol történtek a mérések (**14. ábra**).



14. ábra: Mozgó hajós ADCP mérés nyomvonala (pirossal), és a mélységátlagolt áramlási sebességvektorok (kékkel).

A 2D megjelenítésre azért volt szükség, mert így egyértelműen látszódik a Duna sodorvonala és egyszerűbben megérthető a höcsőva elkeveredése. A 2D-s ábrázolásból remélhetőleg az is megállapítható lesz, hogy a Duna vízhozama, a befolyás alatt elhelyezkedő sarkantyú és az erőműből érkező melegvízhozam hogyan befolyásolja a sebességeket és az elkeveredést.

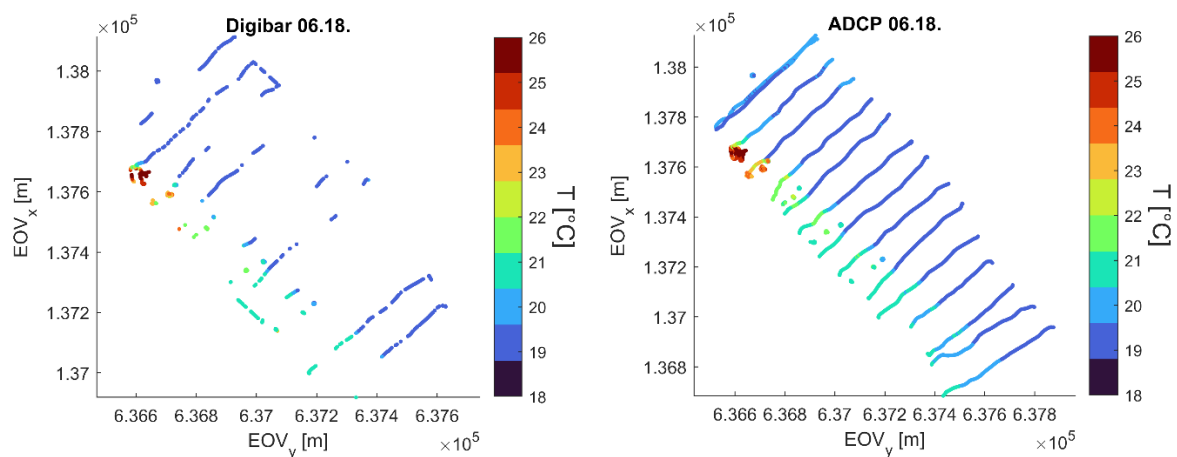
Az eredmények 2D-s ábrázolását egy folyami környezetre fejlesztett interpolációs eljárás segítségével végeztem, majd Paraview-ban jelenítettem meg, melyről bővebben az 2.4.3-as alfejezetben írok.

Hőmérsékletmérések feldolgozása

Mozgó hajós mérésekből származó hőmérséklet adataim két műszer által is rögzítve lettek. A két eszközzel való mérésre azért volt szükség, hogy minél biztosabb és egyértelműbb eredményeket kapjunk, illetve a Digibar készülék elviekben pontosabban mér hőmérsékletet, mint az ADCP, mely inkább a sebességmérésre van kiélezve. A Digibar pontossága a gyártó szerint $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg az ADCP pontossága $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az eredeti feltételezés az volt, hogy emiatt az ADCP a hirtelen hőmérsékletváltozásokra, mely a höcsőva szélén igen fontos, nem fog olyan gyorsan reagálni, mint a Digibar. Több mérés feldolgozása után azonban világossá vált, hogy a Digibar jelentősen terhelt hardveres hibákkal (ahogy azt korábban kifejtettem), illetve az is kiderült, hogy nagyon hasonló eredményeket ad a két műszer (ld. később a 3.1 alfejezetben),



ezért a két műszer méréseinek összehasonlításán kívül a Digibar adatait nem fogom felhasználni a hőmérséklet adatok feldolgozására, mivel az adathiány miatt a kapott eredmények csak nagyon mérsékeltten fedik le a valóságot (**15. ábra**). A két műszer összehasonlításához idő-hőmérséklet diagramokat hozok létre, melyen az azonos időpillanatban mért ADCP és Digibar hőmérséklet adatokat jelenítem meg, így megfigyelhető, hogy mennyivel térnek el az ADCP által mért adatok a Digibar adataitól.



15. ábra: Digibar által mért hiányos júniusi hőmérséklet adatok (balra) és az ADCP által mért júniusi hőmérséklet adatok (jobbra).

Az adatfeldolgozás végeztével remélhetőleg arra is választ fogok kapni, hogy a későbbiekben érdemes lesz-e Digibar-t használni a körülményes természete ellenére vagy a mérés könnyítése, illetve az ADCP pontossága miatt elég lesz csak az utóbbit használni. Céлом ezen felül megfigyelni azt is, hogy valós volt-e a feltételezés a műszerek eltérő reakció idejére (tehetetlenségére).

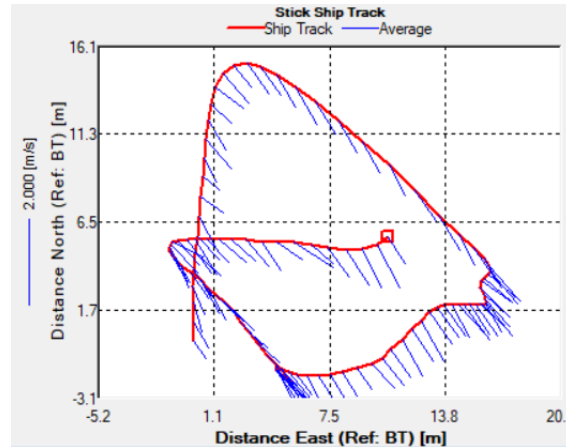
Az ADCP által mért hőmérséklet adatok Matlabos megjelenítése egy hozzávetőleges képet ad a hőcsóva elhelyezkedésére, viszont mivel itt csak a mérési pontfelhőt látjuk (**15. ábra**), ezzel még nem tudunk konkrét megállapításokat tenni a hőcsóva térbeli kiterjedésére, ezért az üres térrészt is fel kell tölteni adatokkal interpoláció segítségével (ld. 2.4.3 alfejezet). A mozgó hajós mérésből származó hőmérséklet adataim segítségével meghatározható lesz a hőcsóva lehűlése a befolyástól számított távolság függvényében.

2.4.2 Álló hajós adatok feldolgozása

Az álló hajós mérések feldolgozásához már csak az ADCP által mért hőmérsékleteket fogom felhasználni. A folyóknál a fix hajós mérések eredménye sosem fix koordináta, mivel a hajó az



áramló víz miatt nem tud tökéletesen egyhelyben maradni, még horgonyzás esetén sem. Így a mérési „pont” jellemzően egy 5–10 m sugarú kört jellemez (**16. ábra**).



16. ábra: Fix hajós mérés nyomvonala Winriverben.

Az elmozdulások miatt a feldolgozás során a mérési pont koordinátájának az összes mérési pontból számított átlagos koordinátát értelmeztem.

A csóva tranziens jellegéből adódó tulajdonságait (ld. **2. ábra**, **5. ábra**) a fix hajós mérések adatai alapján tudjuk megismerni és számszerűsíteni. Tehát az álló hajós hőmérséklet adatokat az időben változó hőmérsékletek jellemzőinek meghatározására és a mozgó hajós adatokból interpolált térképek pontosságának ellenőrzésére használtam fel.

Álló hajós mérésenként idősorokat hoztam létre, melyek egy mérési pont hőmérsékletingadozását követik (mérésenként kb. három perc). Így megállapíthatóak a hőmérséklet fodrozódások gyakoriságai, a mérési pontok átlagos hőingásai és a pontbeli átlagos hőmérsékletek. A kapott időátlagolt hőmérsékleteket összehasonlítottam a mozgó hajós mérésből kapott azonos pontra értelmezett hőmérséklettel is, mellyel a két mérés pontosságát tudtam ellenőrizni.

A hőmérsékletidősorok elemzését a következő módon végeztem: meghatároztam az ADCP által mért hőmérséklet idősorok energia sűrűség spektrumát ($S(f)$), ahol az f a frekvencia. A spektrum megadja, hogy az adott frekvenciájú hullámösszetevőknek milyen jellemző amplitúdóval szerepelnek a teljes mért idősorban. A spektrum alapján számíthatók a függvény momentumait (m_i) a következő integrálszámítással:



$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S(f) df.$$

A spektrum momentumai alapján lehetőség nyílik a hőmérséklet idősorok különböző jellemzőinek számítására (Harish & Baba, 1986), mint az átlagos hullámmagasság (H_{rms}):

$$H_{rms} = 2\sqrt{2m_0},$$

illetve az átlagos periódusidőt (T_{m01}) is:

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}.$$

Az átlagos hullámmagasság számszerűsíti a pontbeli hőmérséklet ingadozás mértékét és ebből számolható egy átlagos amplitúdó:

$$A_T = H_{rms}/2.$$

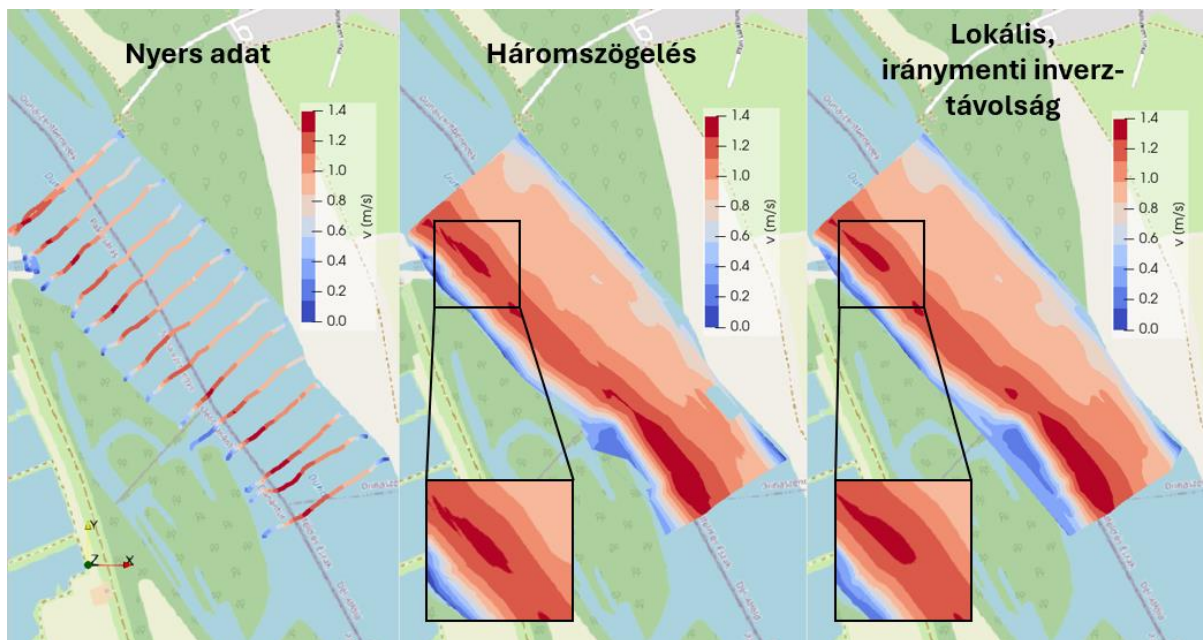
Az átlagos periódusidő a hőmérséklet ingadozások időbeliségét számszerűsítené, de a kapott adatok vizsgálata során kiderült, hogy ezek az értékek az idősorok rövidege miatt nem kellően megbízhatók, így ezeket a továbbiakban nem használtam fel.

2.4.3 Interpolált sebesség és hőmérséklet térképek

A mozgó és álló hajós adatfeldolgozás során nyilvánvalóvá vált, hogy a legkönnyebben úgy lehet értelmezni a kapott adatokat, ha szelvények közti üres területeken lévő értékeket megpróbálom a lehető legpontosabban meghatározni. Így szelvénymenti pontfelhőkből egy a teljes mérési területre kiterjedt felületet fogok kapni. Az így kapott ábrák már sokkal egyszerűbben lesznek értelmezhetőek és átfogóbb képet adnak a hőcsóva térbeli viselkedéséről.

Az üres területek feltöltéséhez interpolációt használtam. Kétféle interpolációs módszert teszteltem. A mérési alkalmak folyamán kapott hőmérséklet adatok, illetve a hozzájuk tartozó koordinátákat a Paraview adatvizualizációs szoftverben jelenítettem meg, így az első interpolációs módszer a Paraview beépített háromszögelésen alapuló lineáris interpolációja

volt. A másik eljárás a lokális, iránymenti inverz-távolság interpolációs módszer volt, mely már sikeresen használva volt folyami környezetben medertérképek generálására (Fleit, (bírálat alatt); Gyürky, 2023). Ezzel a technikával először elkészítettem az interpolált felületet Matlab-ban, majd a már kiegészített felületet raktam át Paraview-ba az egységes megjelenítés érdekében. A jobb értelmezhetőség érdekében az eredményező alá térképet raktam, mely lehetővé teszi a vizsgálati területen belül a változások pontosabb nyomon követését (**17. ábra**).



17. ábra: Mért mélység-átlagolt áramlási sebességek interpolációja 2 módszerrel a júniusi mérések alapján.

A két interpolációs módszer megvizsgálása után belátható, hogy a lokális, iránymenti inverz-távolság módszere valósághűbb eredményeket ad vissza, mentes a háromszögelésre jellemző interpolációs anomáliáktól, ezért a további adataimat ezzel a technikával fogom feldolgozni. Az interpoláció segítségével készítek mindegyik méréshez interpolált sebességmezőket, melyeken már egyértelműen látszódik a sarkantyú hatása, illetve ezek felhasználásával már fogok tudni megállapításokat tenni arra, hogy az aktuális vízállás továbbá a melegvízcsatorna hozama mennyire befolyásolja a sebesség alakulását. A célom, hogy a kapott eredményekkel a hőcsóva elkeveredését jobban megértsem.

A hőmérséklet adatok megértéséhez is interpolált felületeket készítek az előbb említett interpolációs módszer segítségével (**18. ábra**).



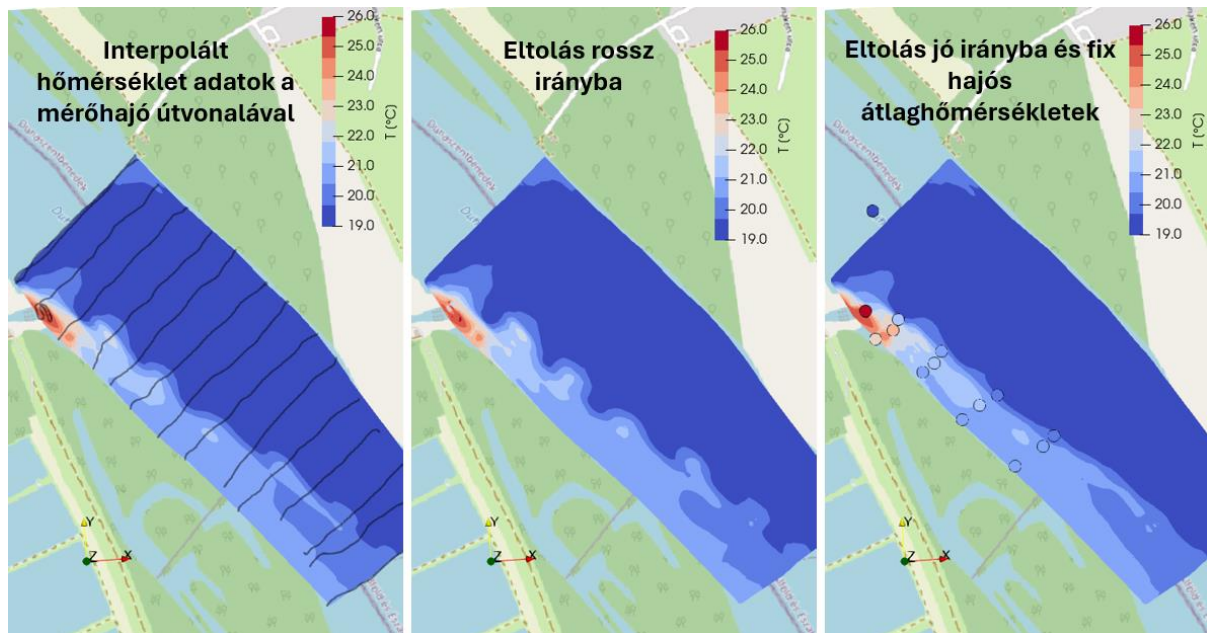
18. ábra: Júniusi mérés hőmérséklet adatainak interpolációja

Az elkészült ábrán a csóva szélén hullámokat lehet felfedezni. Ez elsőre úgy tűnhet, mintha ezek a már korábban bemutatott Kelvin–Helmholtz instabilitáshoz köthető örvények eredményei lennének, viszont mozgó hajós adatgyűjtéssel ezeket nem lehet kimutatni. A „hullámok” közelebbi megvizsgálása után észrevehető, hogy pontosan ott van maximumuk és minimumuk, ahol a hajó mért, tehát megállapítható, hogy ezek a hőmérő tehetetlenségéből, időbeli „lemaradásából” következnek. A hőmérő a hidegvízes területből a csóvába érven nem képes azonnal felvenni az ottani hőmérsékleteket, így a csóva szélén alacsonyabb hőmérsékleteket mér. A csóvából a hidegvízfelé haladva pedig pont az ellenkezője történik.

Az adatok korrigálására egy egyszerű kísérletet tettem: az adatokat időben eltoltam. Nem mindegy, hogy időben melyik irányban toljuk el az adatokat, melyet a **19. ábra** jól szemléltet. A feltételezésem az, hogy egy adott koordináta-hoz tartozó hőmérséklet adat igazából nem a vele egy sorban szereplő koordináta-hoz tartozik, hanem egy korábbi sorban szereplő koordináta-hoz, mert a műszer nem tud olyan gyorsan lehűlni és felmelegedni, mint amilyen gyorsan a hajó halad. Így a hőmérséklet adatokat kb. 5-10 másodperccel visszafele el kell tolnom. Az eltolás mértéke attól is függ, hogy az adott mérés során az ADCP milyen gyakorisággal mért, illetve milyen gyorsan haladt a hajó.

Az eltolás mértékét minden mérésnél egyedileg kell megállapítanom és beállítanom, annak érdekében, hogy a hullámok megfelelő mértékben eltűnjenek. A **19. ábra** jobb oldalán az is megfigyelhető, hogy az eltolott hőtérkép sokkal jobban illeszkedik a fix hajó által azonos pontban

mért átlaghőmérsékletekkel, mely szintén azt igazolja, hogy az eredeti „hullámos” ábra nem a valóságot mutatja és valóban szükség van a hőmérséklet adatok eltolására. Így innentől kezdve az eltolt ADCP mátrixot fogom használni a további eredményeim megértéséhez.

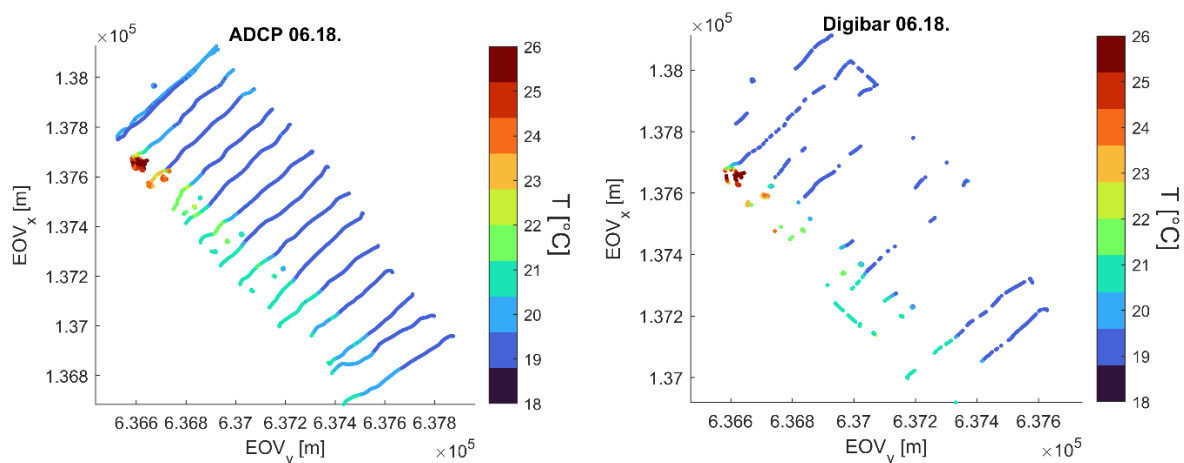


19. ábra: A hőmérő tehetetlenségének korrekciója.

3 Eredmények

3.1 Hőmérsékletmérések összehasonlítása

A terepi mérések tapasztalatai azt mutatták, hogy míg az ADCP alkalmazása kifejezetten felhasználóbarát, addig a Digibar működtetése lényegesen lelassítja az adatgyűjtési folyamatot a folytonos adatátvitel, illetve újraindítások miatt. Az előzetes feltételezésünk az volt, hogy a Digibar pontosabban mér hőmérsékleteket, illetve a reakcióideje is gyorsabb, ebből kifolyólag a nehézkes mérés ellenére az adatok megbízhatósága érdekében mindegyik mérés alkalmával használatba volt helyezve a Digibar is. Az ADCP és Digibar hőmérséklet adatok feldolgozása során az első szembetűnő különbség a valós mérési pontok gyakorisága volt (**20. ábra**). Láthatjuk, hogy az ADCP az egész mérés alatt folyamatosan mért és a mért adatok se tévesek, ezzel szemben a Digibar által rögzített adatok a hibás értékek szűrése után jelentősen lecsökkennek, így egy felettébb ritka adathalmazt kapunk. A két műszer összehasonlítását a mérési kampány összes mérésére elvégeztem és egyöntetűen mindenhol azt az eredményt kaptam, hogy a Digibar által mért valós adatok mennyisége lényegesen kisebb, mint az ADCP által mértéké. Az összehasonlítás eredményeket csak a júniusi adatokon keresztül fogom bemutatni.



20. ábra: Balra: ADCP által mért hőmérséklet adatok; jobbra: Digibar által mért hőmérséklet adatok.

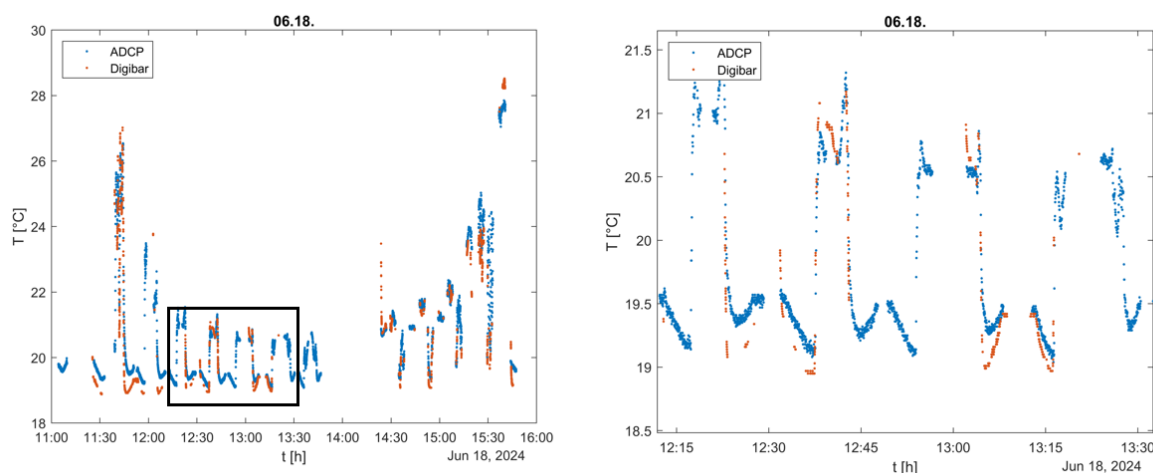
A valós ADCP és Digibar adatokat idő-hőmérséklet diagramon jelenítettem meg (**21. ábra**). Megállapítható, hogy az ADCP nagyon hasonló értékeket mért az adott időpillanatokban, mint a Digibar. Ez alól kivételt képeznek a minimum értékek, melyeknél azt fedezhetjük fel, hogy a



Digibar hozzávetőlegesen 0,3-0,5 °C-al alacsonyabb értéket mért, viszont a maximumokról elmondható, hogy a két műszer ugyanazokat az adatokat rögzítette.

Az eltérés egyik oka következhet abból, hogy ez két különböző típusú műszer, illetve mindkét műszer régi, nem tudjuk pontosan mikor voltak utoljára kalibrálva, így lehet némi eltérés az eredmények között. Egy másik magyarázat az eltérésre a két műszer különböző vízmélységben való elhelyezkedése. Az ADCP fixen volt a hajóhoz rögzítve és mindig 30 cm mélyen mért, ezzel ellentétben a Digibar egy súllyal együtt be volt lógatva a vízbe nagyjából 0,5-1 m mélyen, annak érdekében, hogy a hajó mozgása közben is víz alatt legyen és ne ússzon fel a vízfelszínre. A különböző mélységben való mérésből már származhat hőmérsékletkülönbség a szelvények mentén bárhol. Ezen felül az alacsony vízállás során megfigyelhető homokpad környezetében is kialakulhatnak ilyen hőmérsékletkülönbségek vagy az alacsony vízállás alatt a mederfenék felől a víztestbe áramló alacsonyabb hőmérsékletű talajvíz is okozhat ekkora különbségeket a felszín és mederközi rétegek között.

A fentiek magyarázhatják a két műszer által mért adatok közötti különbségeket, azonban fontos megjegyezni, hogy a magasabb (vizsgálatok szempontjából relevánsabb) értékek esetén jobb egyezéseket kaptam. A **21. ábra** azt is jól mutatja, hogy a két eszköz tehetetlensége, reakcióideje megegyezik. Ez abból látható, hogy amikor a Digibar értékei hirtelen változni kezdenek, akkor ugyan abban az időpillanatban kezdenek az ADCP értékei is ugyan abba az irányba változni.

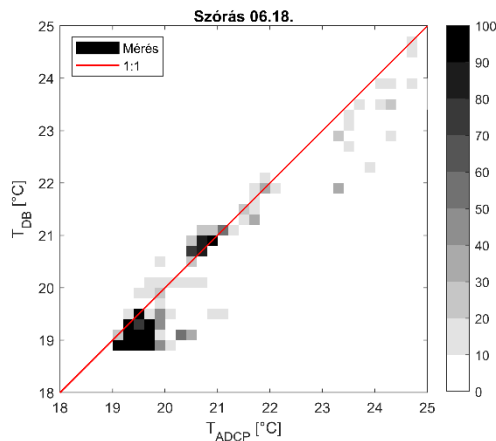


21. ábra. ADCP-vel és Digibarral mért hőmérséklet idősorok összevetése a 06.18-i mérési kampány példáján.

Mivel a mért ADCP adatok lényegi része nagyon hasonló a Digibar adataihoz (**22. ábra**) és a két műszer reakcióideje is hasonló, továbbá a Digibar mérése rendkívül adatritka, ezért a



további adatfeldolgozás során csak az ADCP-vel mért hőmérséklet adatokat fogom felhasználni.



22. ábra: Az ADCP-vel és a Digibar (DB) műszerrel mért vízhőmérsékletek összevetése 2D hisztogramon. A cellák sötétsége jelzi, az oda eső pontok számát.

3.2 Áramlási viszonyok

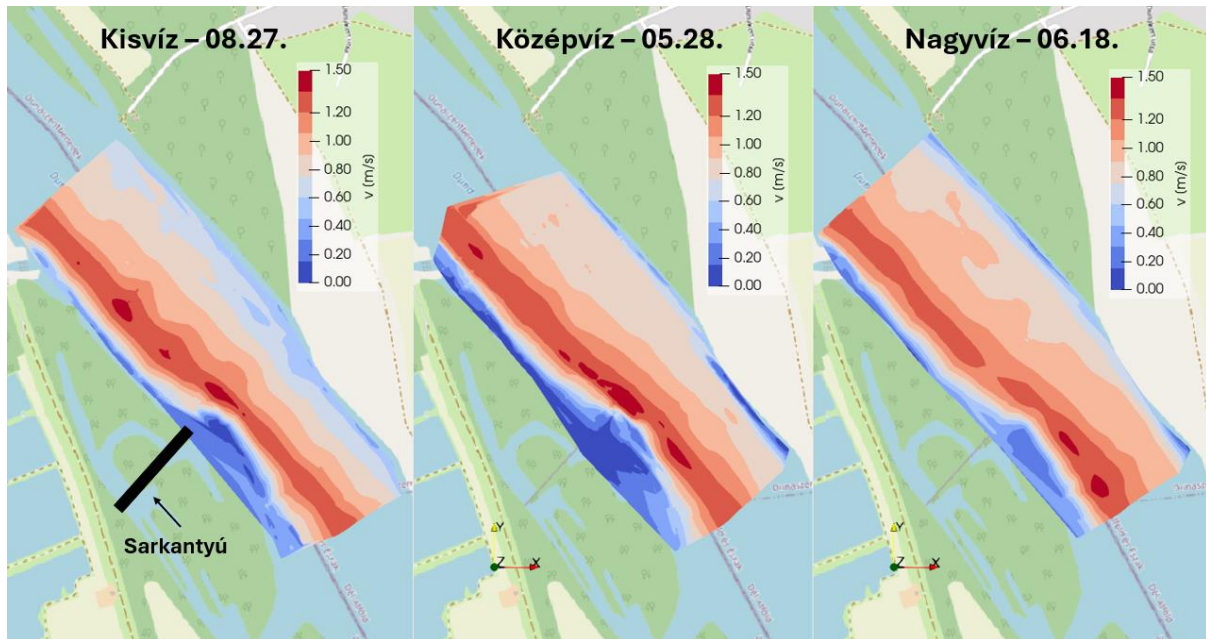
A vizsgált terület különböző vízhozamokra vonatkoztatott áramlási viszonyainak megismeréséhez sebesség térképeket hoztam létre, melyet a **23. ábra** szemléltet. A térképekről az első dolog, ami szembetűnik a sodorvonal elhelyezkedése a jobb part mentén, mely a hőcsóva elkeveredésének szempontjából nagyon szerencsés. A sodorvonal elhelyezkedése a Duna feljebbi szakaszán elhelyezkedő közel 90°-os kanyarulatnak köszönhető. Mivel a melegvíz csatornából érkező víztömeg azonnal a Duna legnagyobb sebességű és legmélyebb részébe folyik bele, így a melegvíz elkeveredése sokkal gyorsabb ütemben megy végbe, mintha a sodorvonaltól kívül esne a befolyás.

A térképekről leolvasható, hogy a különböző vízállások során mért sebesség értékek között nagy változékonyság nincs. Mindegyik vízállásnál a maximális sebesség 1,5 m/s körülire adódik. Így kijelenthető, hogy a sebesség mértékét a különböző vízhozam nem módosítja jelentős mértékben, a vizsgált vízjárás tartományban.

Megállapítható, hogy a nagy áramlási sebességű zóna kiterjedése a vízhozammal együtt növekszik. Míg kisvízes állapotban a bal parton már csak egészen kis sebességek vannak, addig nagyvízkor a bal part közelében is meglehetősen nagy sebességek alakulnak ki.

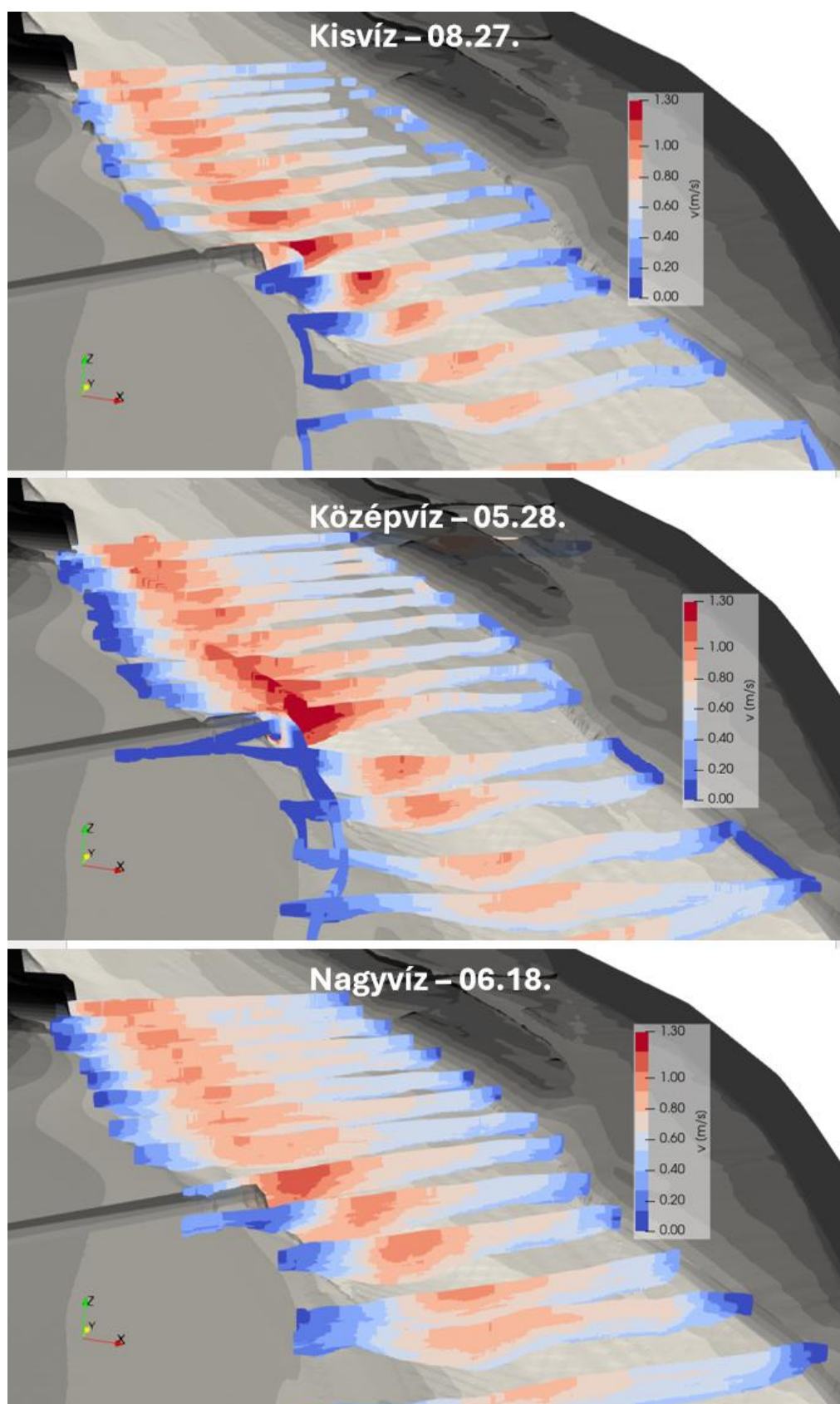
A **23. ábra** jól mutatja a sarkantyú hatását, mely középvíz esetén a legjelentősebb. Ekkor észrevehető, hogy a sarkantyú környezetében a sebességek megnőnek. Az is látható, hogy kis-

és középvíz esetén a sodorvonal jelentősen beljebb húzódik, míg nagyvíz esetén a sarkantyú hatása alig észlelhető – ilyenkor az áramlás már átbukik a mű felett.



23. ábra: Mélységátlagolt áramlási sebességek összevetése a három vízjárási állapotban.

A sebességviszonyok vizsgálatához 3D térképeket hoztam létre (24. ábra) a szelvénymenti eloszlások alapján. Ezeken a sebességek mélységmenti változását is megfigyelhetjük. Ezen az ábrán is látszódik a sodorvonal különös elhelyezkedése, illetve a sodorvonal fokozatos balra mozdulása a sarkantyú után. Az ábrák jól mutatják, hogy a sarkantyú hatása középvíz esetén a legjelentősebb, ugyanis ekkor láthatjuk a sarkantyú mélységmenti gyorsító hatását a legjobban. Kisvíz esetén pedig megfigyelhető a homokpad, melynek helyén nincsenek mérések, mivel ezt az alacsony vízszint miatt nem tudtuk megközelíteni.



24. ábra: Szelvénymenti áramlási sebességek összevetése a három vízjárási állapotban.

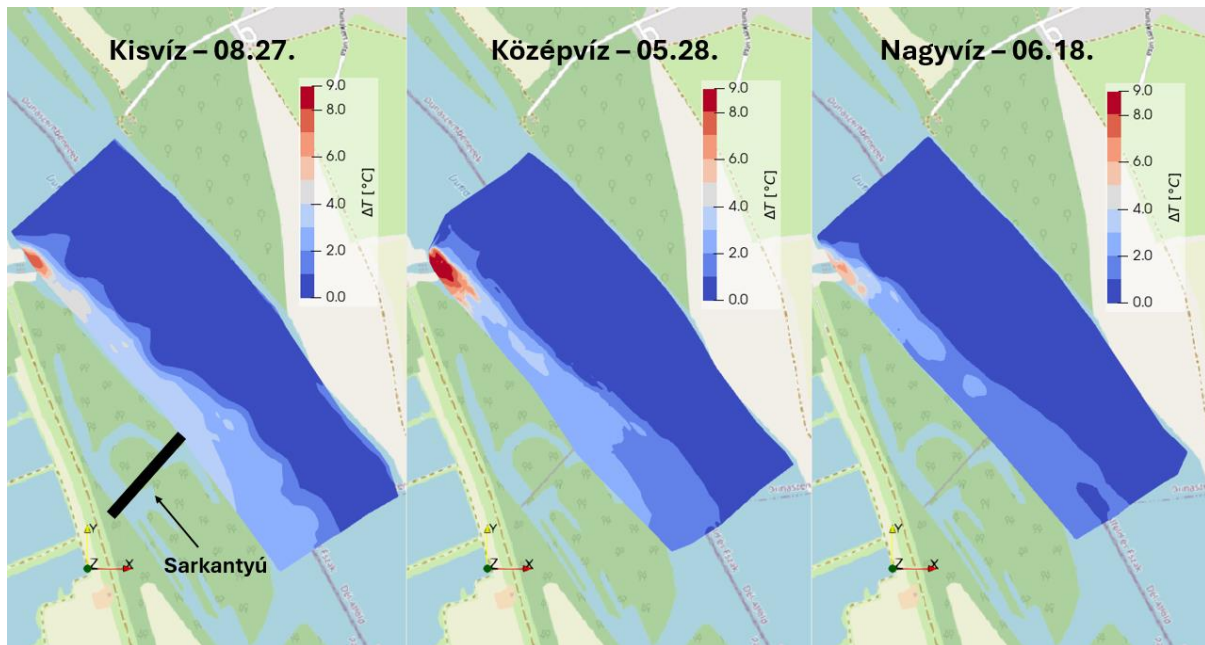
3.3 Vízhőmérséklet térképek

A hőcsóva térbeli kiterjedésének, illetve a különböző vízhozamok okozta változások megismeréséhez a **25. ábra** térképeit hoztam létre. A térképeken láthatjuk, hogy az eredeti vízhőmérséklethez képest hány fokkal melegítette fel a folyót a melegvíz csatornából áramló víz. Ez az érték 7-9 °C között mozog. A csóva térbeli kiterjedésével kapcsolatban azt láthatjuk, hogy körülbelül a Duna szélességének negyedét foglalja el, mely a vízhozamok változásának következtében érdemben nem változik. Azt is megfigyelhetjük, hogy kisvíznél a hőcsóva elkeveredése lényegesen tovább tart, mint nagyvíznél. Ennek a pontosabb vizsgálatához a **26. ábra** lesz segítségünkre.



25. ábra: Felszínközeli hőmérsékletek eloszlása különböző vízjárási állapotok esetén.

A hőcsóva hatásának jobb megértése érdekében készítettem **26. ábra** térképeit, melyen azt láthatjuk, hogy a melegvízcsatornából érkező víz hány fokkal melegíti fel a Duna vizét. A kis vízhozamhoz tartozó augusztusi mérésnél látszik, hogy a víz hőmérséklete még a sarkantyú alatt is akár 4 °C-kal magasabb, mint a Duna eredeti hőmérséklete. A nagyvízhez tartozó harmadik térképen ezzel szemben a sarkantyú alatt már csak 1-2 °C-kal magasabb a víz hőmérséklete és már a befolyás közelében lecsökken a különbség 4 °C alá. Ezek alapján, megalapozott a feltételezésünk, hogy nagyobb dunai vízhozamnál a lehűlés hamarabb végbemegy, mint kis vízhozamnál. Ennek részletesebb vizsgálatát a **27. ábra** szemlélteti.



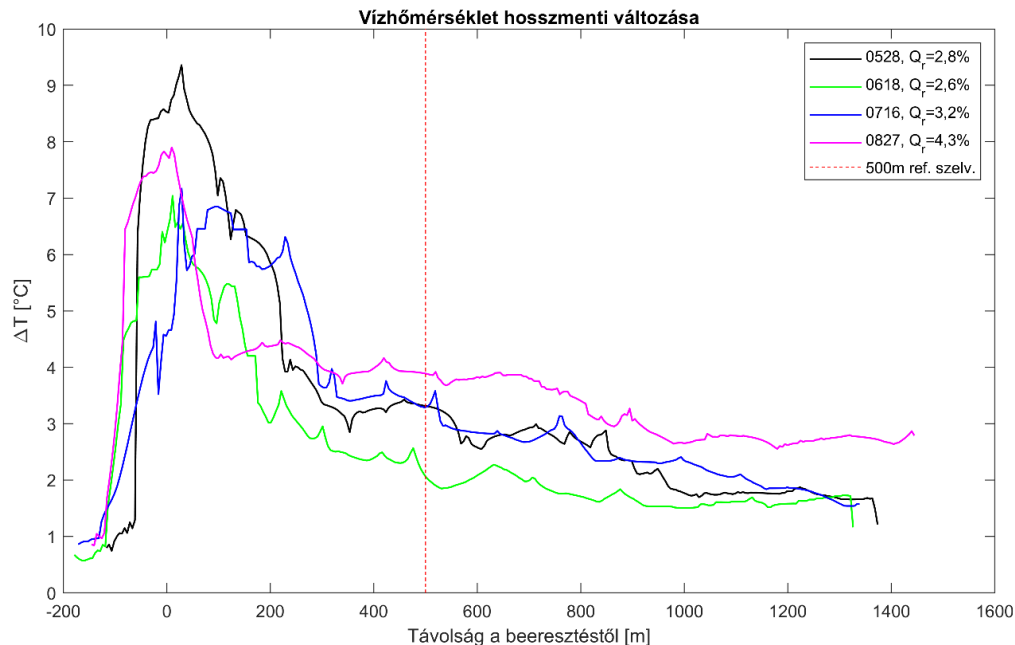
26. ábra: A hőcső okozta melegedés mértéke a víztest eredeti hőmérsékletéhez képest

3.3.1 Vízhőmérséklet hosszmenti változása

Ahhoz, hogy a vízhőmérsékletek hosszmenti változása és az eltérő vízhozamok közt kapcsolatot tudjak találni, diagramon ábrázoltam a szelvénymenti maximális hőmérsékleteket és ezeknek a távolságát a befolyástól az interpolált hőmérséklet térképek alapján (27. ábra). A jobb értelmezhetőség érdekében bevezettem a relatív melegvízhozam (Q_r) változót, mely a melegvíz csatornából érkező és a dunai vízhozam arányát mutatja százalékosan. A diagramon látható a melegvíz befolyás okozta hőlépcső, mely – ahogy már a 26. ábra is mutatta – májusban a legnagyobb. Ha leolvassuk a diagramot a beeresztés után 1200 m-rel, akkor beigazolódik, amit a korábban feltételeztünk, ugyanis a relatív melegvízhozam növekedésével az elkeveredés hatékonysága valóban csökken. A legkisebb Q_r értékhez a júniusi mérés tartozik, melynek értéke 1200 m-nél valóban a legalacsonyabb, illetve a legnagyobb relatív melegvízhozam az augusztusi méréshez tartozik, mely a legmagasabb hőmérséklet értéket mutatja 1200 m-nél. Mindegyik mérésre elmondható, hogy a befolyás utáni hirtelen hőmérséklet emelkedés után létrejött egy jelentős mértékű lehűlés, mely nagyjából a befolyást követő 100-300 m-en belül lezajlott. Innentől kezdve a négy görbe meredeksége, vagyis a hűlés mértéke közel állandó. A nagyobb vízhozamhoz tartozó mérésnél látható, hogy ez a lehűlés, ha nem is ugyan olyan nagy mértékben, de továbbra is folytatódott.



Tehát minél nagyobb a dunai vízhozam, annál jobb a hőcsóva elkeveredése és hossz mentén annál hamarabb fog közelíteni a hosszmenti maximális hőmérséklet az eredeti dunai hőmérsékletéhez.



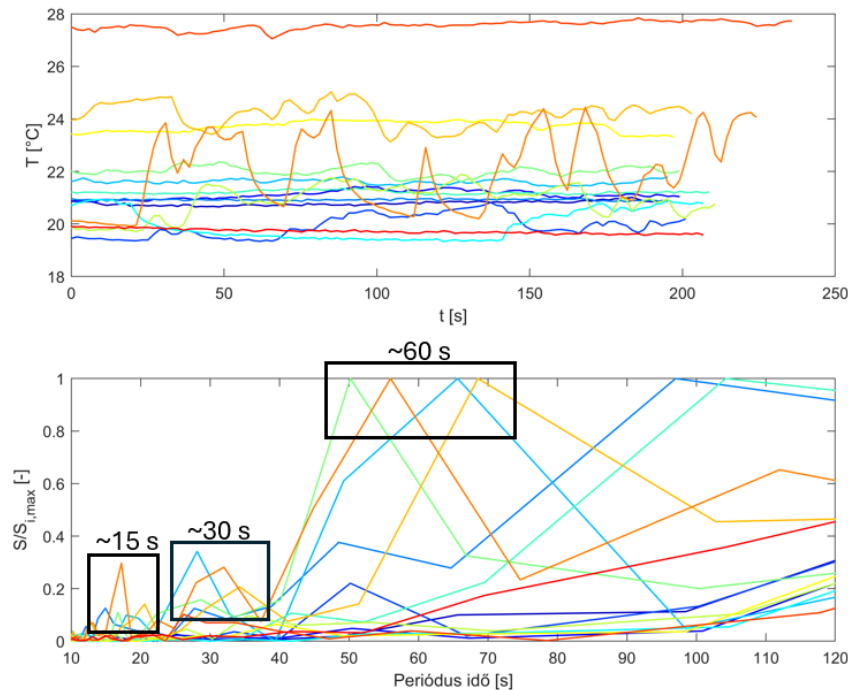
27. ábra: A hosszmenti maximális víz hőmérsékletek változása a beeresztéstől számított távolság függvényében.

3.4 Hőmérséklet idősorok

A fix hajós mérések során szerzett hőmérséklet adatok feldolgozásából idő-hőmérséklet diagramokat készítettem, melyeket a **28. ábra** mutat. Ezek a diagramok a Kelvin-Helmholtz-instabilitásból származó hőmérséklet fodrozódásokból keletkező hőingadozásokat követik nyomon. Láthatjuk, hogy vannak olyan mérési pontok, melyeknél nagyobb a hőingadozás, akár $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ezek a csóva szélén készültek és vannak olyanok is, ahol nagyon alacsony, közel $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a hőingadozás mértéke. Annak érdekében, hogy megismerjük a csóva időbeli viselkedését a hőingások gyakoriságát, spektrumát számítottam. A jobb értelmezhetőség érdekében a spektrumokat normalizáltam, azaz leosztottam a rájuk jellemző maximális értékkel ($S/S_{i,max}$), így jól összevethetőek lettek a különböző mérések során kapott eredmények. A **28. ábra** jól mutatja, hogy a domináns periódusidő a legtöbb esetben 60 s körülire adódik, de további lokális csúcsok is megfigyelhetők a periódusidő felében és negyedében (30 s és 15 s), felharmonikus jelleggel. Az adatok egy érdekes a természetben gyakran előforduló jelenségre utalnak, de ennek pontos magyarázatát jelen esetben egyelőre nem sikerült felderíteni. Fontos

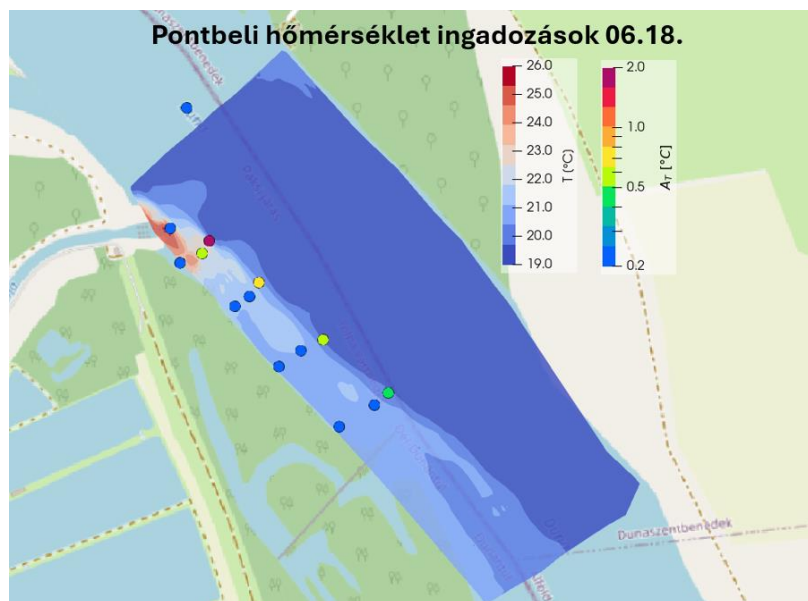


hangsúlyozni, hogy a fix hajós mérés során a hajó nincs tökéletesen egyhelyben, így az ingadozások a hajó – eltérő hőmérsékletek közti – mozgásából is eredhetnek.



28. ábra: Fix hajós mérések során mért hőmérséklet idősorok (fent) és az azokból számított normalizált spektrumok.

Hogy képet kapjunk a hőmérséklet ingadozásának térbeli változékonyságáról, a pontbeli átlagos amplitúdókat (A_T) térképen ábrázoltam (29. ábra). A térképen egyértelműen látszódik, hogy a csóva befolyáshoz közelebb eső szakaszán, illetve a csóva közvetlen szélén, a nyírózónában jelentősen nagyobbak az átlagos hőingadozások (akár a 2 °C-ot is elérik). Ezzel szemben a befolyástól távolabb, illetve a part közelében az amplitúdó ennél egy nagyságrenddel alacsonyabb. Az eredmények megegyeznek az előzetes várakozásokkal, illetve a hőkamerás felvételeken megfigyelt változékonysággal is egybeváganak. Az befolyástól távolodva, ahogy fokozatosan újra kiegyenlítődik az áramlási mező, a Kelvin-Helmholtz-instabilitást eredményező sebességnyrás is csökken, így megszűnik az áramlás örvényes és a hőcsóva „kacsos” jellege is.



29. ábra: Pontbeli átlagos hőmérséklet ingadozások júniusban

A fenti eredmények alapján kijelenthető, hogy a javasolt újszerű adatfeldolgozási módszertan alkalmas a hőcsóva térbeli és időbeli változékonyságának jellemzésére.



4 Diszkusszió

A direkt hűtésű hűtővízes reaktorok egyik sajátossága a hűtővízként használt víz élővízbe történő visszavezetéséből adódó hőcsóva. Ez számos problémát felvet az élővilág megfelelő életkörülményeivel kapcsolatban. A TDK dolgozatom célja a hőcsóva térbeli és időbeli változásainak közelebbi megismerése. A dolgozat eredményei hozzájárulnak a szimulációs modellekkel történő előrejelzések, így akár a klímaváltozás okozta magasabb víz hőmérsékletek és alacsonyabb vízhozamok, illetve Paks 2 üzembe helyezése utáni állapotot számszerű becsléséhez.

A hőcsóva megismeréséhez először adatokat gyűjtöttünk két műszer segítségével. Az egyik mérőműszer az ADCP volt, mely sebesség és hőmérsékletmérésre alkalmas. A másik alkalmazott mérőeszköz a Digibar volt, mely csak hőmérséklet adatok mérésére specializálódott. A két eszköz által mért adatokat különböző módon kellett előkészíteni és feldolgozni. Amért adatok megvizsgálása után világossá vált, hogy a Digibar által mért adatok jelentősen hiányosak, így valós képet nem tudnak adni a hőcsóva kiterjedésére, ezért az adatfeldolgozást csak az ADCP által mért adatokkal folytattam.

Az ADCP által mért sebesség adatokból interpolált 2D, illetve 3D eredménymezőket készítettem, melyeken megfigyelhető volt a sodorvonal elhelyezkedése, illetve általánosságban a helyi áramlási viszonyok jól értelmezhetők voltak. A jobb parthoz szoruló sodorvonalról kijelenthető, hogy nagyon kedvező a hőcsóva elkeveredése szempontjából, illetve a sarkantyú elkeverő és áramlásgyorsító hatása is megfigyelhető volt a különböző vízállások függvényében.

A hőmérséklet adatok interpolációja után felszíni hőmérsékletmezőket hoztam létre, melyek a hőcsóva térbeli kiterjedését szemléltetik. Ezeken megfigyelhető, hogy az elkeveredés a relatív melegvízhozam (Q_R) növekedésével jelentős mértékben nő. A vizsgált időszakokban a legnagyobb Q_R arány 4,3% volt. Az ekkor kapott elkeveredés térbeli kiterjedése jelentősen nagyobb, mint a legkisebb Q_R aránynál kapott elkeveredés, illetve a Q_R további növekedésével az elkeveredés hatékonysága várhatóan tovább romlana. Fontos megjegyezni, hogy a paksi Duna-szakaszon a valaha mért legalacsonyabb vízhozam 855 m³/s volt. Paks 2 üzembe helyezése után a két erőmű által kibocsátott hűtővíz összesen 232 m³/s lesz. Ezt társítva az extrém kisvízhozammal, 27%-os relatív melegvízhozamot kapunk, ami előrevetíti a hőcsóvához kapcsolódó várható problémákat. Fontos megemlíteni azonban, hogy Paks 2 esetén a visszavezetés előtt lesz lehetőség a melegvíz előhűtésére, mellyel a hőterhelést nagyjából



75%-kal csökkenteni tudják, ha azt a magas dunai vízhőmérsékletek megkövetelik. Így Paks 2 nem fog olyan nagy hőlépcsőt létrehozni a visszavezetésnél, mint Paks 1, viszont az együttes üzem mindenképp rontani fog a jelenlegi helyzeten.

A hőcsóva időbeli változékonyságának megértése érdekében a fix hajós mérésekből származó adatokat használtam fel. Az itt létrehozott idő-hőmérséklet diagramok és a spektrum számításokból származó adatok jól mutatják a Kelvin-Helmholtz instabilitásból származó hőmérséklet fodrozódásokat és ezek jellemzőit. Az idősorok spektruma alapján látszólag a hőmérsékletingadozások felharmonikus jellege fedezhető fel, ennek pontosabb felderítése és megértése további célirányos méréseket és elemzéseket igényel.

Az adatfeldolgozás során, illetve a kapott eredmények vizsgálata után számos bizonytalanság felmerült. A mozgó hajós mérések során az ADCP nem elég gyors a hőmérsékletváltozások lekövetéséhez, így a kapott interpolált hőmérséklet térképeket igazítani kellett, melyet a mérési adatok időbeli elcsúsztatásával oldottunk meg. Ez egy nagyon egyszerű korrekció, melyet még lehet finomítani, például kisebb hajósebességgel vagy érzékenyebb hőmérő használatával, viszont az eredmények a primitívebbnek mondható korrekció ellenére is láthatóan javultak.

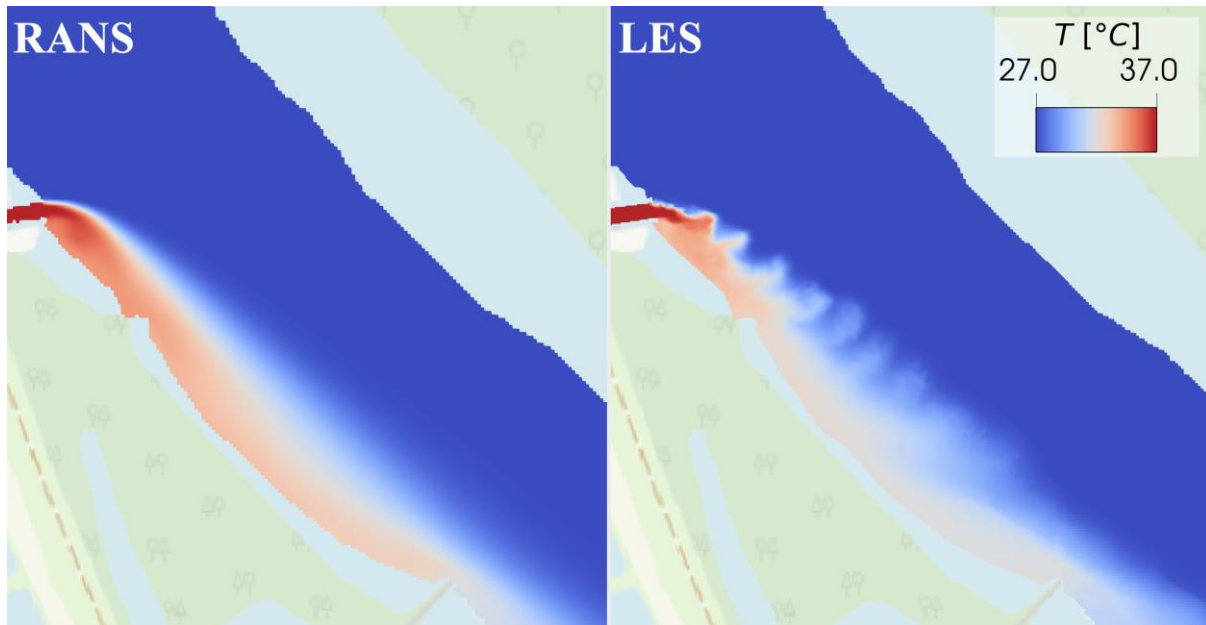
Az ADCP lassú reakciója a fix hajós mérések során is megjelenik, viszont itt is realisztikus eredményeket kaptunk. A még precízebb adatok érdekében a méréseket hosszabb ideig kell végezni (lehetőleg nagyobb időbeli felbontású és érzékenyebb hőmérővel), illetve a hajó mozgása is minimalizálendő.

Fontos megemlíteni, hogy léteznek hőkamerás módszerek, mellyel a hőcsóva térbeli és időbeli változékonysága is felderíthető, viszont ezek megbízhatósága is megkérdőjelezhető, számos hibával terheltek ezek a mérések is. A paksihoz köthető hőcsóva elemzések keretein belül készültek ilyen mérések is, viszont ennek az adatfeldolgozása nem képezte részét a jelen TDK dolgozatnak. A hőcsóva felderítése műholdfelvételek segítségével is lehetséges (Mohsen et al., 2024), mely a pixelek nagy mérete miatt egy kis terület vizsgálatakor nem elégségesen pontos, azonban választ adhat a hőcsóva nagyobb léptékű elkeveredési viszonyaira.

Korábbi paksi mérésekből kapott eredmények is bemutatták már a csóva térbeli elhelyezkedését, illetve időbeli változékonyságát, viszont ezek a mérések nem tértek ki a különböző hidrológiai állapotokban fellépő különbségekre, illetve az eredmények jelen dolgozatban bemutatott számszerűsítésére (Forrás: ETV-ERŐTERV Rt., 2006).

A ki nem mért vagy nem mérhető, például jövőbeli állapotok megfogalmazásához numerikus modelleket használunk. Ezek a modellek azért hasznosak, mert nem kell újból méréseket

végezni, melyek időigényesek és körülményesek, illetve jövőbeli előrejelzéseket csak ezek segítségével tudunk tenni. A különböző bonyolultságú modellek, más-más kérdésekre adhatnak választ, például a nagyléptékű 1/2D modellel 10-100km-es léptékben lehet vizsgálni a hőcsóva elkeveredését, ezzel szemben részletes Reynolds-átlagolt 3D (RANS) modellel lokálisan, pontosabban tudjuk tanulmányozni az elkeveredési viszonyokat. Nagyörvény szimulációs modellezéssel (LES) pedig akár a tranziens jelleg is leírható (30. ábra).



30. ábra: Reynolds átlagolt (RANS, balra) és nagy örvényszimulációs (LES, jobbra) áramlásmodellezéssel számított hőcsóvák (Forrás: Fleit G.).

Ezekhez a modellezési feladatokhoz elengedhetetlenek azok a célirányos terepi mérések, melyeket a TDK dolgozatomban bemutattam, annak érdekében, hogy igazolhassuk a modelleket, vagyis meggyőződhessünk róla, hogy a valóságnak megfelelő eredményt adnak. Különösen fontos ilyen szempontból a hőmérsékletidősorok számszerű értékelése, ugyanis a valósághoz legközelebb álló LES modell igazolásához ilyen információk szükségesek. Ha a mért értékeket (illetve azok időbeli változékonyságát) képes a modell reprodukálni, akkor fel vagyunk hatalmazva, hogy olyan állapotokat is értékeljünk, amire nincs mérés.

A hőcsóvához köthető jelenségek megértéséhez és számszerűsítéséhez további célirányos terepi mérésekre, a drónfelvételek elemzésére és numerikus modellek használatára van szükség. Jelen dolgozat eredményei nagyban hozzájárultak ennek a mérésen, adatfeldolgozáson és szimulációs modellezésen alapuló vizsgálati keretrendszer létrejöttéhez.



5 Konklúziók

A TDK dolgozatomban bemutattam egy újszerű, terepi méréseken (ADCP) alapuló adatfeldolgozási módszertant egy folyami hőcsóva térbeli és időbeli változékonyságának vizsgálatára.

Az ADCP által mért adatok elegendőnek bizonyultak a hőcsóva térbeli és időbeli változékonyságának feltárásához, illetve a vizsgált szakaszon uralkodó áramlási viszonyok számszerűsítéséhez. Az ADCP mérésekből származó bizonytalanságok, mint a műszer lassú reakcióideje vagy a klasszikus interpolációs módszerek hibáinak kiküszöbölésére, illetve csökkentésére az adatfeldolgozás során implementáltam megoldásokat; így megbízhatóbb és valósághűbb hőmérséklet térképeket tudtam létrehozni.

A korábbi vizsgálatokhoz képest újszerű módon a hőcsóva időbeli változékonyságát is vizsgáltam egy új módszertan segítségével, mellyel a helyi hőmérséklet ingadozások intenzitása és gyakorisága is számszerűsíthetővé vált, így a Kelvin-Helmholtz-instabilitásból eredő örvényes elkeveredés jellege is tetten érhető és számszerűsíthető volt.

Mindezek nagyban hozzájárulnak ahhoz, hogy megértsük a hőcsóva viselkedését különböző hidrológiai állapotokban, illetve a feltörekvőben lévő tranziens hidro- és termodinamikai szimulációkhoz (LES) is megfelelő ellenőrző adatot tud szolgáltatni, melyekkel jövőbeli előrejelzéseket tudunk tenni. Ez különösen fontos a klímaváltozás hatására egyre gyakrabban előforduló kisvizes állapotok, illetve magasabb dunai vízhőmérsékletek fényében, nem beszélve Paks 2 hatásáról.

Bár az eredmények előre mutatóak, hiszen korábban nem látott részletek kerültek feltárára, mégis számos továbbfejlesztési irány fogalmazódott meg a munka során.



Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki:

Dr. Fleit Gábornak, aki témavezetőmként végig irányította és segítette a munkámat.

Tóth Károly és **Galgóczy István** technikusoknak, akik a terepi méréseket végezték.

Rehák András tanszéki mérnöknek, amiért biztosította a terepi mérések létrejöttét és nagyban hozzájárult a mérések elvégzéséhez.



Hivatkozások

- Ahn, Yu-Hwan, Palanisamy Shanmugam., Jae-Hak Lee., Yong Q. Kang. (2006) Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea. *Marine Environmental Research* 61:186–201.
- ETV-ERŐTERV Rt. (2006) A Paksi Atomerőmű üzemidő-hosszabbítása. Környezeti Hatástanulmány, 11. sz. melléklet: A Paksi Atomerőmű hűtővizének a Dunában történő elkeveredés-vizsgálata légi termovíziós mérésekkel 1981 és 2005 között.
- Fleit G. (bírálat alatt) Windowed Anisotropic Local Inverse Distance weighted (WALID) interpolation method for riverbed mapping. *Acta Geophysica*.
- Füstös V., Sály P., Szaloky Z., Toth B., Vitál Z., Specziár A., Fleit G., Baranya S., Józsa J., Erős T. (2022) Effects of a nuclear power plant warmwater outflow on environmental conditions and fish assemblages in a very large river (the Danube, Hungary). *Ecohydrology*, e2512, 13p.
- Gyürky Katalin (2023) Térbeli interpolációs módszerek tesztelése komplex folyami környezetben. TDK dolgozat, BME VVT.
- Harish C.M., Baba M. (1986) On spectral and statistical characteristics of shallow water waves. *Ocean Engineering* 13(3):239–248.
- Jiawei Wei., Lian Feng., Yan Tong., Yang Xu., Kun Shi. (2023) Long-term observation of global nuclear power plants thermal plumes using Landsat images and deep learning. *Remote Sensing of Environment* 295:113707, 20p.
- Mohsen, A.; Kiss, T.; Baranya, S.; Balla, A.; Kovács, F. Thermal Profile Dynamics of a Central European River Based on Landsat Images: Natural and Anthropogenic Influencing Factors. *Remote Sens.* 2024, 16, 3196. <https://doi.org/10.3390/rs16173196>
- MVM ERBE Zrt. (2024) A Paksi Atomerőmű további üzemidő-hosszabbítása. Előzetes Konzultációs Dokumentum.
- Összefoglaló az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Duna víz hőmérséklet-mérési tevékenysége kapcsán, A Paksi Atomerőműre irányadó 15/2001 (VI.6.) KöM rendelet
- Tang, DanLing, Dana R. Kester., Zhaoding Wang., Jiansheng Lian., Hiroshi Kawamura (2003) AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China. *Remote Sensing of Environment* 84:506–515.