



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia (2019)

# **A mederhőáram szerepe a Balaton energiaháztartásában**

**Török Sebestyén Dániel**

*építőmérnök MSc szakos hallgató*

**Konzulens:**

**Dr. Torma Péter**

*egyetemi docens, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék*

Budapest, 2019.

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	2
2. Módszertan .....	3
2.1. Vizsgálati helyszín és mérések .....	3
2.2. Energiamérleg komponensek .....	5
2.2.1. Energiamérleg.....	5
2.2.2. Turbulens hőáram .....	6
2.2.3. Sugárzási hőáram.....	7
2.2.4. Víztestben tárolt energia.....	7
2.2.5. Mederhőáram.....	8
2.2.6. Energiamérleg (0D modell) vizsgálat.....	9
2.2.7. Energiamérleg zárása.....	10
3. Eredmények .....	12
3.1. Meteorológiai változók.....	12
3.2. Víz hőmérsékletek .....	14
3.3. Víztestben tárolt energia .....	15
3.4. Sugárzási hőáram.....	15
3.5. Turbulens hőáramok .....	16
3.6. Mederhőáram.....	17
3.7. Energiamérleg.....	18
3.8. Energiamérleg (0D) modell .....	20
4. Következtetések és összefoglalás .....	23
4.1. Következtetések.....	23
4.2. Összefoglalás .....	23
5. Köszönetnyilvánítás .....	24
6. Források .....	25

# 1. Bevezetés

A tavi ökoszisztémákra gyakorolt hatások közül az egyik legjelentősebb a hőmérséklet, mivel az nem csak befolyásolja, hanem irányítja is azok különböző biológiai és kémiai folyamatait. A tavaknál különbséget kell tenni sekély, illetve mélyebb víztestek között, mivel ezek hidrodinamikai jellemzőiben, mint például a napi hőretegzettség, jelentős eltérések vannak. A Balaton, a sekély tavak közé sorolható.

Jelen tanulmány célja a meder-víz kapcsolatánál létrejövő hőátadás, mely mederhőáram formájában jelentkezik, hatásának vizsgálata a Balaton energiaháztartásában, annak elhanyagolásával járó következményeknek a feltárása, illetve következtetések levonása és javaslattevés a jövőt illetően. Ehhez, rendelkezésemre álltak a Keszthelyi-öbölben, 2019. május 18 – 2019. október 8 közötti időszakban mért meteorológiai, vízhőmérsékleti, illetve hőárammérési adatok.

Elsőként az alkalmazott módszertant fogom bemutatni, mely keretén belül szót ejtek majd a mérési helyszínről, illetve mérésről, az energiamérlegről, annak tagjainak számításáról, és végezetül egy OD-s modellről, melyet a mederhőáram elhanyagolásával járó következmények vizsgálatára használtam.

Az eredmények meghatározása után azok bemutatásával fogok foglalkozni, melyet ábrák, és rövid szöveges leírások segítségével fogok megtenni.

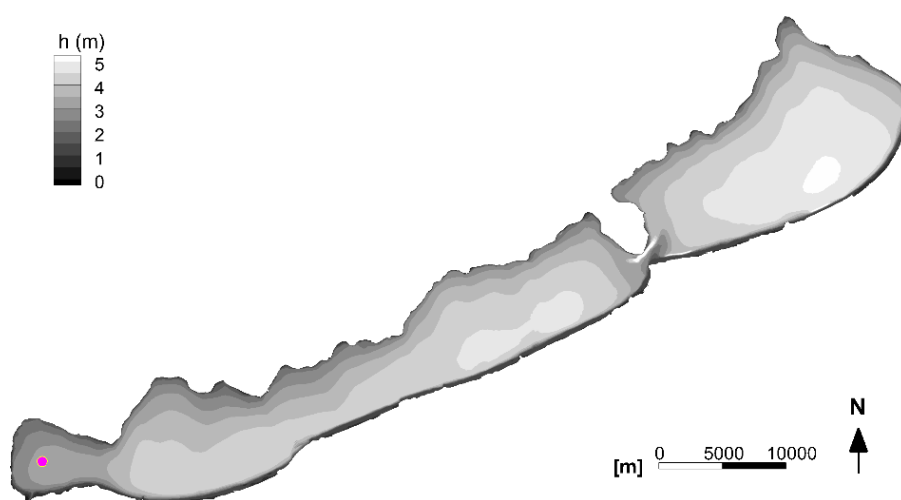
Végezetül, következtetéseket fogok levonni az energiamérleg, illetve mederhőáram kapcsán, majd pedig zárásként megfogalmazom véleményem a mederhőáram elhanyagolását illetően.

## 2. Módszertan

A tanulmány célja a mederhóáram szerepének meghatározása a Balaton energiaháztartásában, és ehhez állt rendelkezésemre egy mérési adatsor, mely a 2019 tavasz végi- őszi eleji időszakot foglalja magában. A mérések a Keszthelyi-öbölben történtek, egy mérőállomás segítségével, ami mérte a meteorológiai tényezőket, hóáramokat, illetve a víztest és üledék hőmérsékleti viszonyait. A mérési adatok, melyek 5 perces periodicitással lettek mérve, egyrészt *DAT file*, másrészt pedig *M file* formátumban álltak rendelkezésemre. A számítások elvégzéséhez egy *MATLAB* nevű programot használtam, mely file formátuma az *M file*, így azok beolvasását közvetlen meg tudtam tenni, míg a *DAT file*-ok esetében, először *Microsoft Excelt* kellett használnom, ahol egy előzetes hibaszűrés után, már képes voltam adatokat a *MATLAB*-be való bevitelére. Ezután, az energiamérleg ismeretében, meghatároztam annak egyes komponensit, hogy a későbbiekben majd következtetéseket tudjak levonni a mederhóáramról, illetve a vizsgálat tárgyát tartalmazó időszakról. A mederhóáram kapcsán elvégeztem még egy OD-s modellvizsgálatot, mely során, az elhanyagolásával járó következményeket vizsgáltam.

### 2.1. Vizsgálati helyszín és mérések

A mérések egy, a Balatonban, azon belül pedig a Keszthelyi-öbölben közepén felállított mérőállomás segítségével történtek, 2019. május 18 és 2019. október 8 között. Ezen időszak alatt a mérési eredmények, egy rövidebb, egy órás, június 11.-én, és egy hosszabb, 6 napos, június 15-21-ig, leállást kivéve, 5 percenként lettek regisztrálva. A leállás csak az örvény kovarianciát (eddy covariance) mérő műszert nem érintette. Jelen dolgozat során ennek az időornak csak egy részével foglalkoztam, mely május 18.-tól szeptember 3.-ig tartott, vagyis tavasz végétől, egészen őszi elejéig.



1. ábra: Keszthelyi-öbölben felállított mérőállomás helyzete

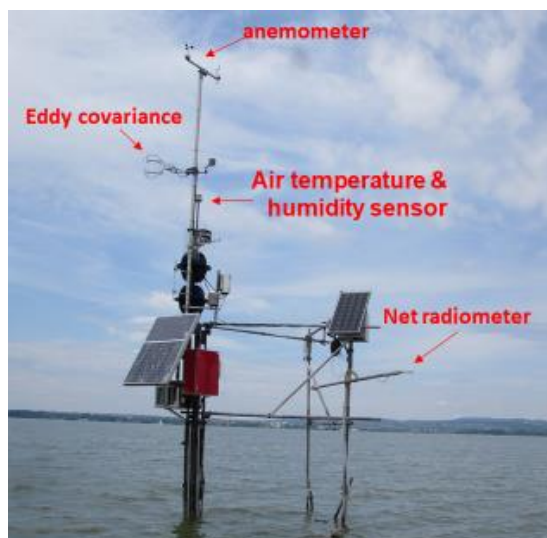
A mérések során a meteorológiai állapotváltozók, a víztér és üledék hőmérsékleti rétegződése, illetve az üledékben 8 cm mélyen lévő hőáram lett mérve. A meteorológia állapotváltozók közé a léghőmérséklet, páratartalom, szélesség, szélirány, illetve a sugárzási és turbulens hőáramok tartoznak.

A mérőberendezések a 2. ábrán láthatók:

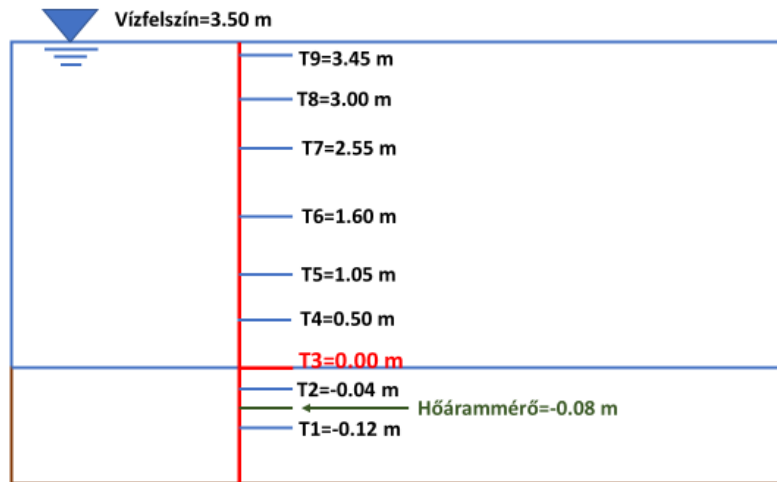
- *Anemometer*: szélesség és szélirány mérése
- *Eddy covariance*: turbulens hőáramok mérése
- *Net radiometer*: sugárzási hőáramok mérése
- *Air temperature & humidity sensor*: léghőmérséklet és páratartalom mérése

A víztér és üledék hőmérsékleti rétegződése kilenc darab hőmérő segítségével lett megmérve, melyek közül hat a víztestben, egy a víz és üledék határfelületén, kettő pedig az üledékben volt elhelyezve. A hőmérők a mérőállomáshoz úgy voltak rögzítve, hogy azok helye előre ki volt vágva, aminél fogva nagy biztonsággal elmondható, hogy azok helyzete a mérés időtartama alatt nem változott meg. Erre kivétel a vízfelszínhez legközelebb eső hőmérő, mely csupán 5 cm-re volt a vízfelszíntől, miután egy úszón helyezkedett, amely aztán a vízmozgások következtében két alkalommal fel is csavarodott az állványra, bár ennek előfordulása várható volt, és a mérési adatoknál is jól látszik, hogy ezen alkalomok mikor történtek. Ilyen esetekben az volt a megoldás, hogy valaki kiment és megigazította a hőmérőt. Végül az úszó átalakításával a problémát megoldották. A hőmérők magassági, és egy egymáshoz képesti elhelyezkedését, a 3. ábra mutatja.

Az üledékben mért hőáram, két darab, egymás mellett elhelyezett hőárammérő segítségével lett megmérve. Azért használtak kettőt, hogy az egyik esetleges meghibásodása esetén is legyen mérési adat. Ezeket az üledékben 8 cm mélyen helyezték el, azért, hogy egy esetleges felkavarodás ne legyen hatással a mérésre, mely úgy történik, hogy a korong alakú hőárammérő mind a felső, mind az alsó lapján mér hőmérsékletet, majd abból számol hőáramot az alsó felületre. Ennél fogva ezek úgy lettek elhelyezve, hogy alsó lapjuk legyen pont 8 cm mélyen.



2. ábra: Mérőállomás vízfelszín feletti műszerei



3. ábra: Vízfelszín alatti berendezések: T1-T9: az egyes hőmérők magassága a vízfelszín-üledék határfelülethez (T3=0.00 m) képest; A hőárammérő helyzete.

## 2.2. Energiamérleg komponensek

### 2.2.1. Energiamérleg

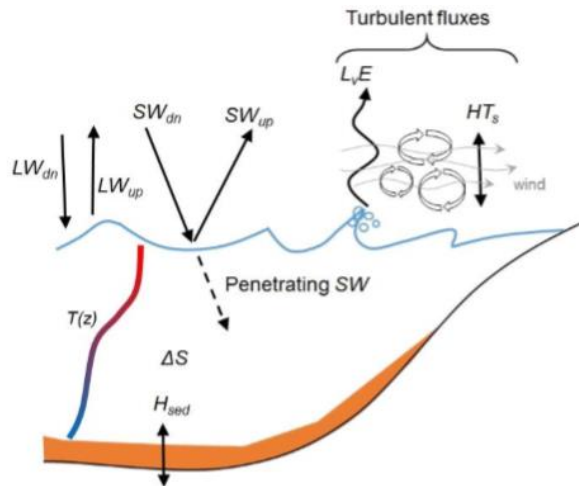
Az energiamérleg az energiamegmaradást fejezi ki, azaz, hogy egy rendszerbe belépő, az abban tárolt, illetve abból kilépő energiák összege nullát tesz ki. Ennek gyakorlatban való felírása sokszor nehézkes, elvégre, ha elméletileg tudjuk is mire fordítódnak ez egyes energiakomponensek, a mérési eredmények gyakran nem azt tükrözik vissza. Ennek több lehetséges oka is van, például a mérési pontatlanság, vagy hogy bizonyos tagokat nem lehetséges mérni műszer vagy technológia hiányában. Pont emiatt használják az energiamérleg zárási mutatót, mely a belépő és tárolt, illetve a kilépő tagok hányadosának értéket nézi, vagyis azt, hogy az energiamérleg két oldala hogyan viszonyul egymáshoz. Jelen esetben a vizsgált rendszer a víztest. *Energiamérleg zárási mutató egyenlete (Kiss 2014):*

$$EBR = \frac{\sum(HT_s + L_v E)}{\sum(R_n + \Delta S + H_{sed})} \quad (1)$$

Ahol:

- *EBR (Energy Balance Closure Ratio):* Energiamérleg zárási mutató, mely ideális esetben, mikor a felvett és leadott energiák nagysága megegyezik, 1.
- *HT<sub>s</sub>:* Szenzibilis hőáram, alapja a turbulens szélmozgás, légkör és víztest hőmérséklet-különbségének eredményeképpen jön létre. A turbulens hőáramok közé tartozik.
- *L<sub>v</sub>E:* Látens (párolgási) hőáram, alapja a turbulens szélmozgás, a párolgáshoz szükséges energiafelhasználásból származik. Az előzőhöz hasonlóan, ez is turbulens hőáram.

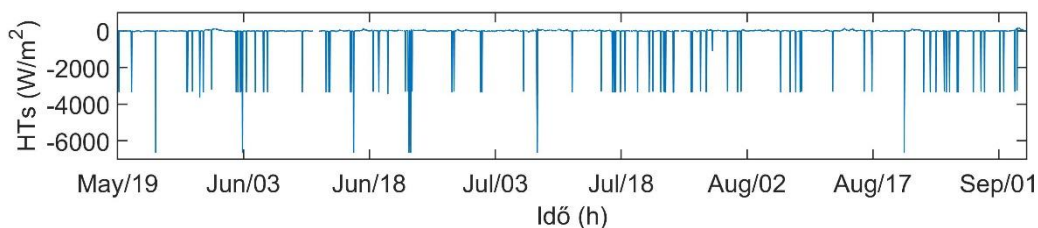
- $R_n$ : Sugárzási hőáram, a víztestre érkező, és arról visszaverődő rövid és hosszuhullámú sugárzások összegéből adódik.
- $\Delta S$ : Vízterben eltárolt energia, víztest hőmérsékletmegváltozásától, sűrűségétől, fajhőjétől, illetve a vizsgált térfogat nagyságától függ.
- $H_{sed}$ : Mederhőáram, víztest és meder hőmérséklet-különbségének eredményeképpen jön létre.



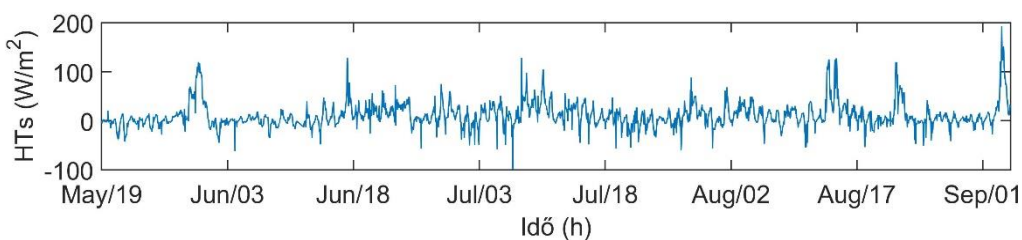
4. ábra: Az energiamérleg komponensei (forrás: Torma 2016)

### 2.2.2. Turbulens hőáram

A turbulens hőáram két részből tevődik össze, a szenzibilis, illetve látens hőáramból. Ezeket az értékeket a mérőállomás közvetlenül tudta mérni, így itt rögtön elkezdhettem az adatok feldolgozását. Elsőként az idő mentén ábrázolva az adatsorokat megnéztem, vannak-e kiugró értékek, majd, ha nem találtam rájuk magyarázatot, kivettem őket, vagyis pontosabban átállítottam az értéküket NaN-ra (Not a Number). Ezután ezeket az értékeket, illetve a többi, helyenként előforduló hiányzó adatokat, melyet okát sokszor csak valószínűsíteni lehetett, interpoláció segítségével előállítottam, végül pedig órás és napi átlagokat gyártottam belőlük. Az órás átlagok május 19. 16:00-tól kezdődnek, míg napiak május 20. 00:00-tól, és ezek, mindkét esetben szeptember 3. 23:55-ig tartanak.



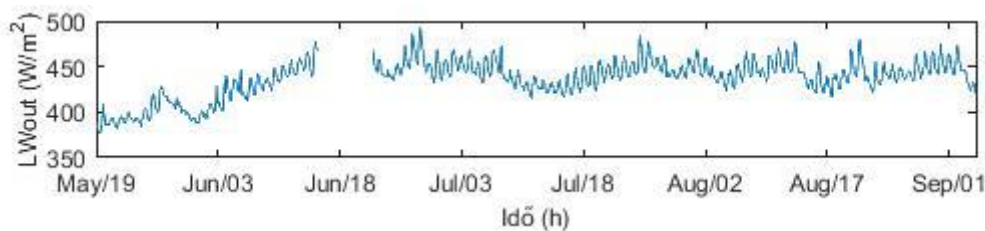
5. ábra: Szenzibilis hőáram alakulása a kiugró értékek kivétele, és iteráció előtt



6. ábra: Szenzibilis hőáram alakulása a kiugró értékek kivétele, és iteráció után

### 2.2.3. Sugárzási hőáram

A sugárzási hőáram a beérkező, illetve visszaverődő rövid és hosszú hullámokból tevődik össze. Ezen értékek is közvetlen voltak mérve, így az eljárás ugyan úgy zajlott, mint a turbulens hőáramok esetében, azzal a kivétellel, hogy itt nem kellett kivennem bizonyos adatokat, mivel nem volt semmilyen látványos, nem megmagyarázható változás az adatsorban. Korábban említettem, hogy volt egy rövidebb, és egy hosszabb leállás a mérés ideje alatt. Az előbbit interpoláció segítségével kiküszöböltem, elvégre csupán pár adatról volt szó, viszont az utóbbinál ezt már nem tettem, tehettem meg, így úgy vettem, hogy június 15-21-ig lévő időszakban nincs adat, és ez az idősor ábrázolásánál is jól látszódik. Az összes olyan komponens estében, amiket érintett a leállás, ezt a módszert alkalmaztam, így a továbbiakban ezt már nem fogom kiírni minden egyes helyen.



7. ábra: Visszaverődő hosszuhullámú sugárzás a vizsgálat időtartama alatt

### 2.2.4. Víztestben tárolt energia

A víztestben tárolt energia, a vizsgált térfogat  $\Delta t$  idő alatt bekövetkező hőmérsékletmegváltozást jelenti, mely fel van szorozva a víz fajfőjével és sűrűségével:

$$\Delta S = \frac{\Delta T \cdot \rho \cdot c \cdot V}{\Delta t} \quad (2)$$

Ahol:

- $\Delta S$ : víztestben tárolt energia.
- $\Delta T$ : hőmérséklet megváltozása.
- $\rho$ : víz sűrűsége,  $998.7 \text{ kg/m}^3$
- $c$ : víz fajhője,  $4128 \text{ J/kg/C}^\circ$
- $V$ : vizsgált térfogat nagysága. Ez esetben egy egységnyi oldalhosszú, szélességű, és a víztest magasságával megegyező ( $3.50 \text{ m}$ ) magasságú téglalast térfogata.
- $\Delta t$ : időlépés, az egyes  $\Delta T$  hőmérsékletmegváltozások között eltelt idő.

Mint látható, a képletben csupán a  $\Delta T$  hőmérsékletmegváltozás az, amit nem ismerek, így annak meghatározás volt itt a feladat. Ehhez a mért hőmérsékleteket először térben (mélység mentén), majd pedig időben átlagoltam le. A térben való átlagolásra több lehetőség is adódott, én végül amellet döntöttem, hogy a meder és vízfelszín között öt cm-re interpoláltam lineárisan a hőmérsékleteket, majd pedig vettem azok átlagát. Itt viszont szintén előjött egy újabb kérdés, mégpedig az, hogy mekkora a vízfelszín hőmérséklete,



elvégre a legmagasabban lévő hőmérő 5 cm-el volt a felszín alatt. Ennek meghatározására létezik egy képlet, mely a víztestből kilépő hosszuhullámú sugárzást átszámolja hőmérsékletté (Kipp & Zonen 2009):

$$TT_s = \left( \frac{LW_{out}}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (3)$$

Ahol:

- $TT_s$ : felszín hőmérséklete
- $LW_{out}$ : felszínről kibocsátott hosszuhullámú sugárzás
- $\sigma$ : Stefan-Boltzmann állandó,  $5.68e-8 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

A képlet *kelvinben* adta meg a hőmérsékletet, így azt még át kellett váltanom *celsiusra*. A térbeli átlagolás megkezdése előtt még egy problémával kellett foglalkoznom, mégpedig azzal, hogy a legfelső hőmérő két alkalommal is feltekeredett a mérőállomás oszlopára, aminek következtében így hibás hőmérsékleti adatokat lettek mérve. Itt a megoldás abban rejlett, hogy hibás részeket kivettem, majd pedig interpoláció segítségével pótoltam az így már hiányzóknak mondható adatokat. Ezt az egyik esetben, július 27- augusztus 8-ig terjedő időszakban, meg is tudtam tenni, viszont a másikonál, mely június 13-15-ig tartott, már nem, mivel közvetlen utána következett a hosszabb adathiányos időszak. Ezek után már semmi sem nem akadályozta a térbeli átlagok számítását, ezért miután az megtörtént, következett az időbeli, ahol is órás, illetve napi átlagokat számoltam. Az így kiszámolt értékeket egy-egy oszlopmátrixba rendeztem, majd eggyel elcsúsztatva őket, új mátrixokat kaptam, melyekhez hozzáadtam még egy nullát tartalmazó sort, hogy az új és régi mátrixok méreteikben megegyezzenek. Ezután vettem az új és régi mátrixok különbségét, majd pedig elvéve az utolsó sorokat, elvégre a korábban beiktatott nulla sorok következtében a kivonás ott valótlán értékeket eredményezett, megkaptam a  $\Delta T$  hőmérsékletmegváltozásokat.

### 2.2.5. Mederhőáram

A mederhőáram a víz és üledék határfelületén jön létre, a hőmérsékletkülönbség hatására. Kiszámításához rendelkezésemre álltak az üledékben mért hőmérsékleti adatok, T1, T2, illetve T3 mélységben, továbbá a 8 cm mélyen mért hőáramok. A számítás első lépéseként, a két mérőkorong által mért hőáramokat leátlagoltam, hogy a továbbiakban majd már csak egyféle értékekkel kelljen tovább számolnom. Ezután a T1 és T2 hőmérők adatainak segítségével kiszámoltam, egy átlagolással, a hőárammérők mélységénél lévő hőmérsékleteket, mivel a későbbiek során már ezekkel kellett tovább számolnom. Ennek oka, hogy mederhőáramokat, a mért hőáramok mélység mentén való megváltozásából tudtam meghatározni, s ennél fogva a vizsgált térfogatom magassága, a mérőkorongok szintjével kellett megegyezzen. A  $\Delta T_{sed}$ , üledék hőmérsékletmegváltozása, innentől kezdve ugyan úgy zajlott, mint a víztér esetében, ami eltérés akadt, az tárolt energia,  $\Delta S_{sed}$ , számolásánál jelentkezett, mivel az üledék egy bizonyos, 45%-ban vízzel van telítve, így annak sűrűségét és fajfőjét is ez alapján kellett venni. Erre a következő képletet és értékeket használtam:

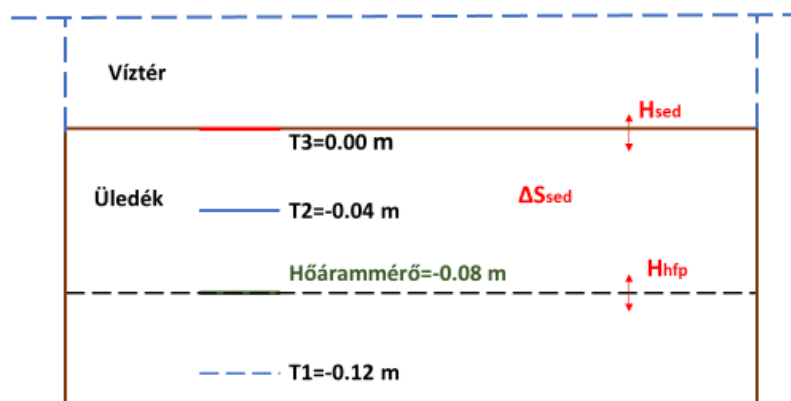
$$\rho_i \cdot c_i = \rho_w \cdot c_w \cdot r + \rho_{sed} \cdot c_{sed} \cdot (1 - r) \quad (4)$$

Ahol:

- $\rho_i$ : üledék átlagos sűrűsége
- $\rho_w$ : víz sűrűsége, 998.7 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_{sed}$ : üledék sűrűsége, 2670 kg/m<sup>3</sup>
- $c_i$ : üledék átlagos fajhője
- $c_w$ : víz fajhője, 4128 J/kg\*C°
- $c_{sed}$ : üledék fajhője, 870 J/kg\*C°
- $r$ : víz-iszap arány, 0.45

A  $\Delta S_{sed}$  meghatározása ezek után már könnyedén ment, lásd, mint a víztér esetében. Az utolsó lépés a mederhóáramok meghatározásához, a mederben tárolt energiák és a 8 cm-es mélységben mért hőáramok összegzése volt. Tehát, a mederüledékre szintén felírható egy mérlegegyenlet az alábbi formában:

$$H_{sed} + \Delta S_{sed} + H_{hfp} = 0 \quad (5)$$



8. ábra: Mederhőáram számításának megértését segítő skicce

Amit eddig még nem említettem, viszont több helyen is előkerült már, az a számításoknál használt x-y koordinátarendszer, mely origója a víztérben van, és y ordinátája a víztestből merőlegesen mutat kifelé. Ennek jelentősége az előjelek felvételénél van.

### 2.2.6. Energiamérleg (0D modell) vizsgálat

Az adatsorok órás és napi átlagainak elkészítése után, Dr. Torma Pétertől kaptam egy nulldimenziós (0D-s) energiamérleg modellt, mely segítségével képes voltam megnézni, hogyan alakul a víz hőmérséklet, a párolgás, illetve a szenzibilis hőáram attól függően, hogy figyelembe veszem-e a mederhőáramot vagy sem. A modell alapegyenlete az energiamérleg volt, azzal az eltéréssel, hogy itt minden tag egy oldalra volt rendezve:

$$0 = Rn + HT_s + L_v E + \Delta S + H_{sed} \quad (6)$$

Ahol:

- $R_n$ : sugárzási hőáram
- $HT_s$ : szenzibilis hőáram
- $L_v E$ : látens (párolgási) hőáram
- $\Delta S$ : víztestben tárolt energia
- $H_{sed}$ : mederhőáram

A modellben két lehetőség van, az egyik, hogy az általam beadott turbulens hőáramokkal számol, míg a másik, hogy maga számítja ki őket egy egyszerű aerodinamikai transzfer függvény segítségével (Arya 2001). Az utóbbi azért szerencsésebb, mivel mint már korábban említettem, a turbulens hőáramokat mérő műszer a valódi értékeket alul becsüli, viszont a képlettel való meghatározásuk pontosabb közelítést ad, s ezért a vizsgálat során, ezt a lehetőséget használtam. *Szenzibilis hőáram meghatározására szolgáló képlet:*

$$HT_s = \rho_l \cdot c_l \cdot C_H \cdot u \cdot (\Delta T) \quad (7)$$

Ahol:

- $\rho_l$ : levegő sűrűsége
- $c_l$ : levegő fajhője
- $C_H$ : aerodinamikai tényező
- $u$ : szélsősebesség
- $\Delta T$ : vízfelszín és légkör hőmérsékletkülönbsége

*Látens hőáram meghatározására szolgáló egyenlet:*

$$L_v E = \rho_l \cdot \lambda \cdot C_E \cdot u \cdot (\Delta q) \quad (8)$$

Ahol:

- $\lambda$ : párolgáshő
- $C_E$ : aerodinamikai tényező
- $\Delta q$ : specifikus nedvesség különbség a vízfelszín felett és attól adott magasságban

Mint látható, mindkét egyenletben van egy-egy modellkalibrációs tényező, melyek felvétele az én feladatomban volt, úgy, hogy a számítások végén, a mért és modellezett értékek jól lefedjék egymást. A modellbe az 1 órás átlagokat vittem be, azokkal számolt.

### 2.2.7. Energiamérleg zárása

Az energiamérleg zárásáról korábban már volt szó, ugyanúgy, mint zárási mutatóról (EBR), most viszont egy kicsit részletesebben foglalkoznék ezekkel a kérdéskörökkel, illetve feladatspecifikusan is beszélnék róla. Ideális esetben a zárási mutató értéke 1, viszont ennek gyakorlatban való előfordulása viszonylag kicsi, mivel több helyen is bekövetkezhet energiaveszteség. Az energiaátadás hőközlés formájában történik, jelen esetben hőáramként, így a továbbiakban majd ekként fogok rá hivatkozni. Ahogy korábban már látható volt, a zárási mutató öt tagtól függ: a turbulens hőáramoktól (látens és szenzibilis), a sugárzási hőáramtól, a víztérben eltárolt energia nagyságától, és a mederhőáramtól. Az utolsó tagot

gyakran elhanyagolják, mely nagyobb víztestek esetében azért tehető meg, mivel egy bizonyos mélység után a hőmérséklet már konstansnak tekinthető, míg sekély tavak esetében, mint például a Balaton, azért teszik, mert csupán nagyon kis részét teszi ki az energiamérlegnek. Ha most eltekintünk attól, hogy el van-e hanyagolva vagy sem, általánosságban az mondható el, hogy víztestek esetében a zárási mutató értékét 0.6-0.7 (60-70%) közöttire szokták tenni (Foken, 2008). Ez 30-40%-os veszteséget jelent, mely esetben szintén jelentkezett, viszont ennek valószínűsíthető okairól majd a későbbiekben beszélek, az *Eredmények* fejezet alatt.

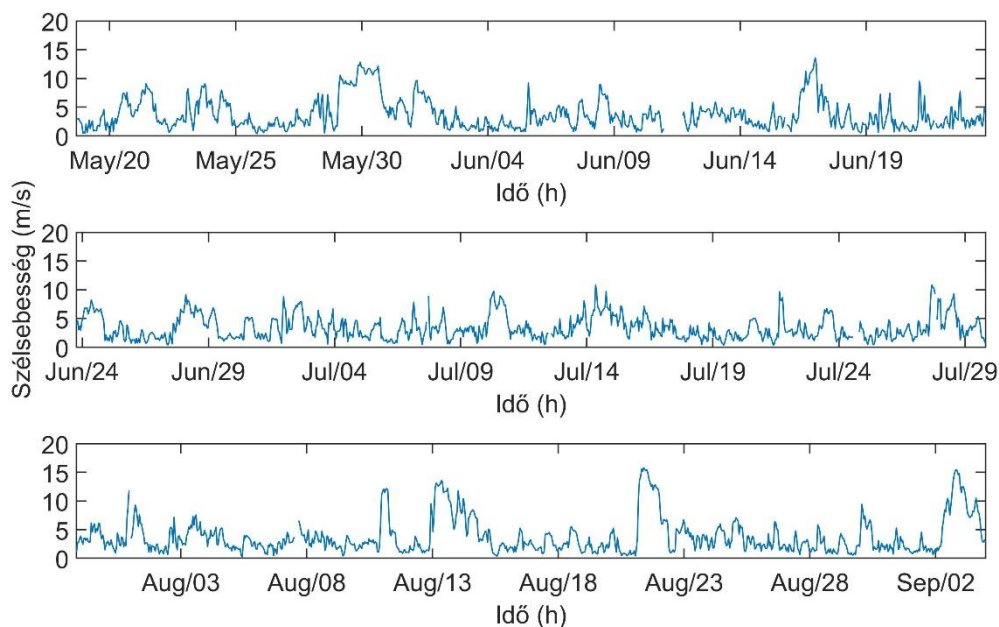
*Összegezve az eddigieket:* Bemutattam az energiamérleg egyes komponenseit, majd a rendelkezésemre álló adatsorok segítségével meghatároztam őket, a vizsgált, tavasz végétől ősz elejéig tartó időszakra. Az így kapott értékeket bevitettem egy 0D-s modellbe, amivel a mederhőáram elhanyagolásának következményeit néztem meg. A továbbiakban, a kapott eredményeket fogom bemutatni.

### 3. Eredmények

Ebben a fejezetben, a már feldolgozott adatsorok eredményeit fogom ismertetni ábrák, illetve rövid leírások segítségével. Elsőnek a légköri tényezőkkel fogom kezdeni, szélesség, léghőmérséklet, páratartalom, majd ezek után térek rá a hőmérsékleti viszonyokra és hőáramok bemutatására, majd végül az energiamérlegre, és a mederhőáram elhanyagolásával járó következményekre. A továbbiakban mindig az általam vizsgált időtartamra vonatkoznak majd a kijelentéseim, így, ha azt írom, hogy a vizsgálat során, akkor a május 19-szeptember 3-ig tartó időszakot kell érteni. A könnyebb érthetőség miatt, bár a számításokban nem, de az ábrázolásban áttértem egy olyan koordináta-rendszerre, ahol a pozitív irány víztest felé, míg a negatív a víztestből kifelé mutat. Ez pontosan az ellentétje a másoknak, viszont így pozitív előjellel fognak szerepelni a víztestet melegítő hatások.

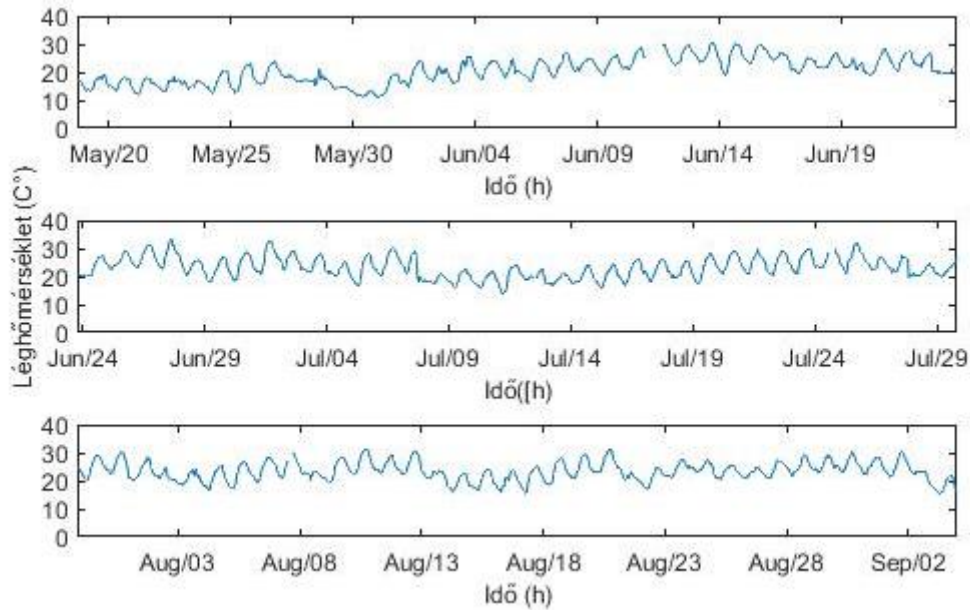
#### 3.1. Meteorológiai változók

A vizsgálat időtartama alatt a szél legnagyobb sebessége körülbelül 15.8 m/s nagyságú lehetett, míg a legkisebb értéke 0.28 m/s körülire volt tehető. Az átlagos szélesség 3.7 m/s körül lehetett. A tavasz végi-nyár eleji időszakban előfordult pár viharosabb nap, mikor is a szélesség hirtelen megnőtt, viszont utána, olyan június 19.-től egészen július végéig egy csendesebb időszak következett. Az augusztus folyamán több nagyobb vihar is volt, melyeket a 9. ábrán is jól lehet látni.



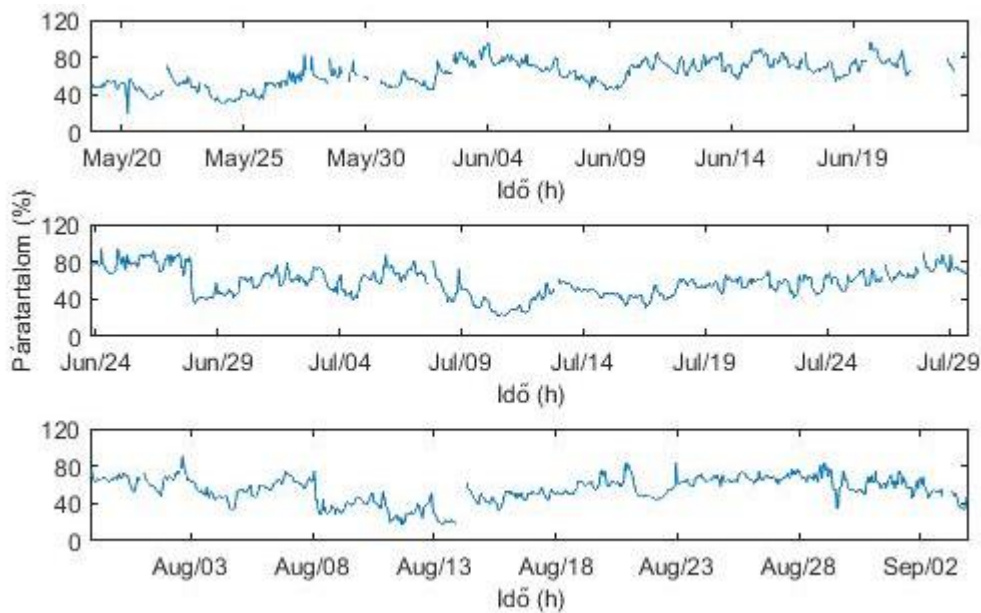
9. ábra: Szélesség alakulása a vizsgálat időtartama alatt

A számítás időtartama alatt a legalacsonyabb mért hőmérséklet  $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , míg a legmagasabb  $33.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt. Az átlagos hőmérséklet  $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül lehetett. A léghőmérsékletnél, ami jól megfigyelhető, hogy tavasz végétől kezdődően elkezdett felmelegedni az időjárás, illetve az, hogy a szeptember kezdetével pedig elkezdődött a visszalehülése. Ezek jelentősége abban rejlik, hogy a tó átfordulása, vagyis a hőrétegzettségének megváltozása, ezekre az időszakokra tehető, bár ezek, a vízhőmérsékletek vizsgálatánál majd jobban fognak látszani. Ami még szembetűnőnek mondható az adatsort vizsgálva, 10.ábra, hogy július elején, olyan 8.-tól kezdődően egy nagyobb lehülés volt tapasztalható.



10. ábra: Léghőmérséklet alakulása a vizsgálat időtartama alatt

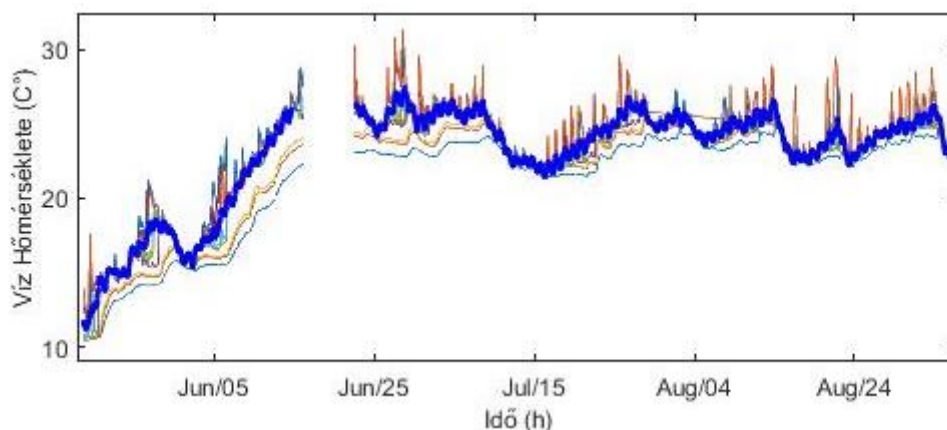
A páratartalom esetében az látható, hogy a nyár folyamán magasabb volt, mint például tavasz végén vagy ősz elején, de ennek így is kell lennie. Ami még megfigyelhető az ábráról, 11.ábra, hogy az értéke több helyen is meghaladta a 80%-ot, ami alapján arra lehet következtetni, hogy azokon a napokon valószínűleg csapadék volt. Július 9-én látható, hogy lecsökkent a páratartalom, ami egybevág a léghőmérséklet lehülésével.



11. ábra: Páratartalom alakulása a vizsgálat időtartama alatt

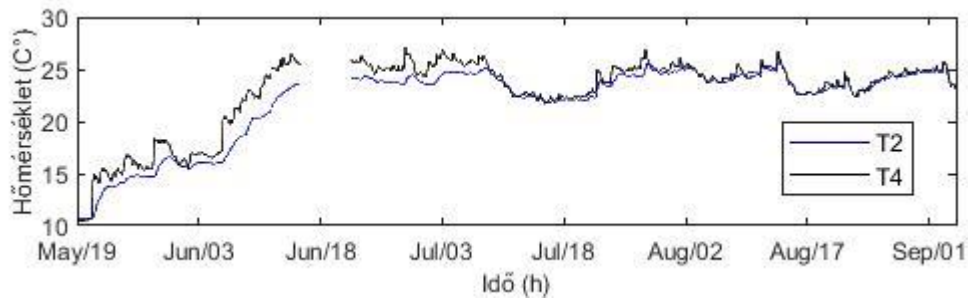
### 3.2. Vízhőmérsékletek

A 12. ábrán a hőmérők, T1-T9, által mért hőmérsékletek láthatók, illetve, a mélység mentén és időben egy órára átlagolt értékük, melyet a vastag kék vonal mutat. Jól megfigyelhető a víztest felmelegedése a tavaszi, és kezdődő hűlési időszak a nyár végi/ősz kezdeti időszakban. A tó átlagos hőmérséklete  $22.9\text{ C}^\circ$  körül volt, ami jól illeszkedik a léghőmérsékletnél mérthez. A víztestre számolt, átlagolt értékekből, legmagasabb hőmérséklet  $27.4\text{ C}^\circ$ , a legkisebb  $11.2\text{ C}^\circ$  volt. Ami még látványosan kijön az ábrán, hogy a mederben mért hőmérsékletek sokkal lassabban változnak, mint a víztér esetében, illetve a napi ingadozásuk is számottevően kisebb.



12. ábra: Mért és számolt hőmérsékletek a vizsgálat időtartama alatt

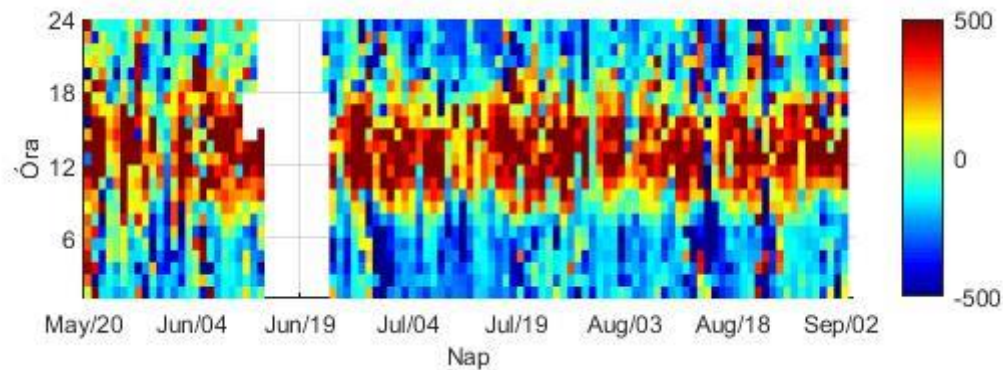
A 13. ábra, a víztér és üledék közti hőmérséklet-különbséget mutatja, ezzel érzékeltetve, hogy a határfelületnél létrejövő mederhóáram értéke nem hanyagolható el feltétlenül. Ami még látható az ábrán, hogy a melegebb nyári időszakban szépen kivehető a két hőmérséklet közötti eltérés, viszont az őszi időszak közeledtével ez egyre kisebb lesz.



13. ábra: T2, -4 cm mélyen, és T4, +50 cm magasságban mért üledék és vízhőmérséklet

### 3.3. Vízterben tárolt energia

A vízterben tárolt energia, a víz hőmérsékletmegváltozáson alapul, így ennél fogva, ez jól használható a hőmérsékletviszonyok jellemzésére. Miután a sugárzási hőárammal erős kapcsolatban áll, ezért a levonható következtetések között is igen nagy az átfedés. A tárolt energia segítségével, a víztest hőmérsékleti alakulását lehet jól nyomon követni.

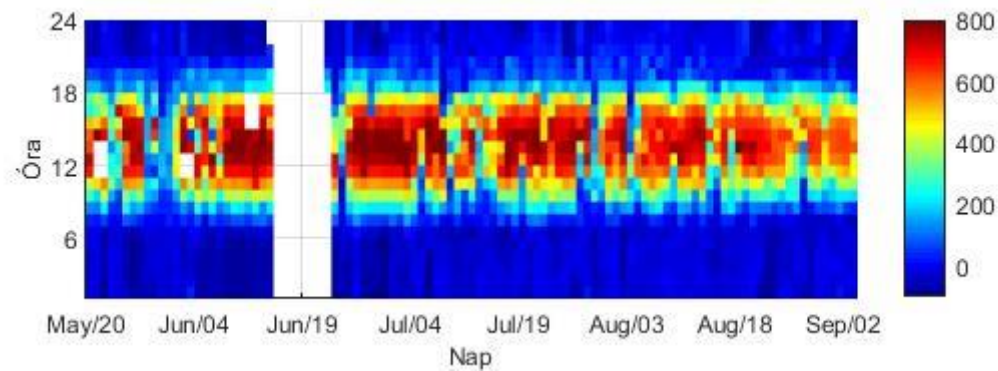


14. ábra: Vízterben tárolt energia alakulása egy napon belül, illetve a vizsgálat időtartama alatt

### 3.4. Sugárzási hőáram

A sugárzási hőáramnál már egybevettem a beérkező, illetve visszaverődő rövid és hosszuhullámú sugárzásokat, így ez már azok összesített értékét mutatja. A sugárzási hőáram, és a vízter hőmérséklete közt igen erős a kapcsolat, elvégre ez felel leginkább a felmelegedésért, így ennél fogva, ha a 24 óra megváltozását nézem, akkor azzal elég jól vissza tudom kapni a víztest nap folyamán való hőmérsékletváltozását. Ezt mutatja a 14. ábra. Ami megfigyelhető rajta, hogy a víztest felmelegedése olyan reggel 7 órától kezdődik, s ez egészen délután 1-2 óráig eltart, majd egy rövid stagnálás után, elkezd visszahúlni. Ez körülbelül este 7-8 óráig tart, majd másnap reggel kezdődik újra az egész. Az ábrán nem csak a napi, hanem az évszakok közötti hőmérsékletváltozások is megfigyelhetők, például, hogy az ősz beköszöntével csökkent a sugárzási hőáram nagysága, amivel párhuzamosan, a hőmérséklet is.

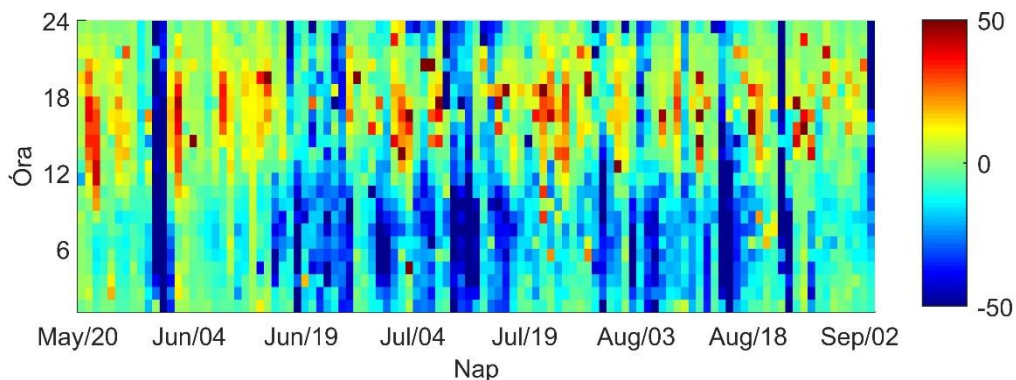




15. ábra: Sugárzási hőáram alakulása egy napon belül, illetve a vizsgálat időtartama alatt

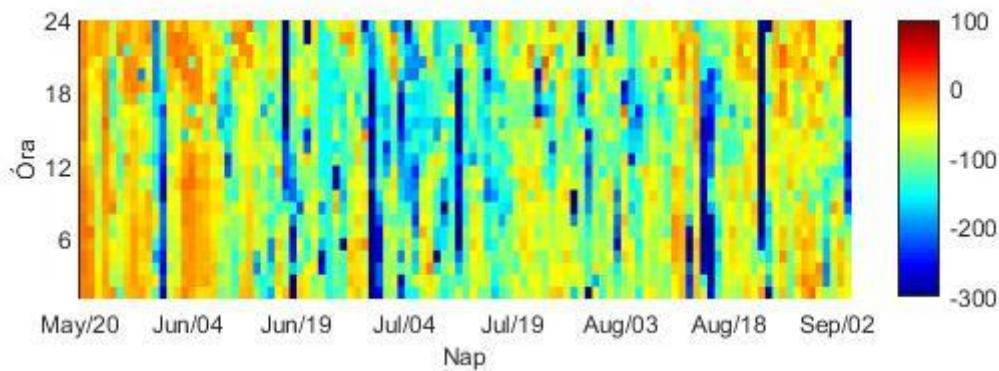
### 3.5. Turbulens hőáramok

A szenzibilis hőáram esetében, ami a levegő és víztest határfelületén hat, és a hőmérséklet-különbség hatására jön létre, a turbulens szélmozgások mellett, az figyelhető meg, hogy pozitív értékeit valóban napközben, 12 és este 7 óra között veszi föl, vagyis ekkor melegíti a víztestet, s ezen időintervallumon túl, a hűtésé a fő szerep. Ami szépen látszik a 15. ábrán, hogy míg nyáron, mikor nagy a hőmérséklet, nagy a hőáram napi ingadozása, viszont az ősz beköszöntével ez lecsökken.



16. ábra: Szenzibilis hőáram alakulása egy napon belül, illetve a vizsgálat időtartama alatt

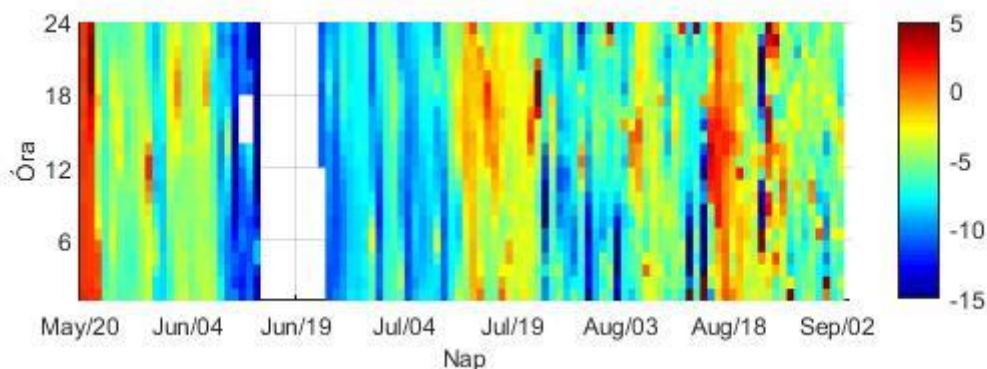
A látens (párolgási) hőáramtól az volt elvárható, hogy nap közben, mikor magasabb a hőmérséklet, erősen negatív értékeket vegyen fel, elvégre ekkor legnagyobb a párolgás, míg az este folyamán már kevésbé negatívakat, és ez így is lett, ezt mutatja be a 16. ábra. Ha viszont nem függőlegesen, hanem vízszintesen nézzük rá az ábrát, akkor láthatjuk, hogy a tavaszi és őszi időszakokban viszonylag egyenletes volt párolgás, ami arra utal, hogy a léghőmérséklet napi ingadozása nem volt túlságosan nagy, mint például a nyár folyamán, de ezen kívül még a tó felmelegedési, illetve lehülési szakaszait is meg lehet rajta figyelni. Az ábra bal oldalán lévő skála megjelenítési okok miatt tart +100-ig.



17. ábra: Látens hőáram alakulása egy napon belül, illetve a vizsgálat időtartama alatt

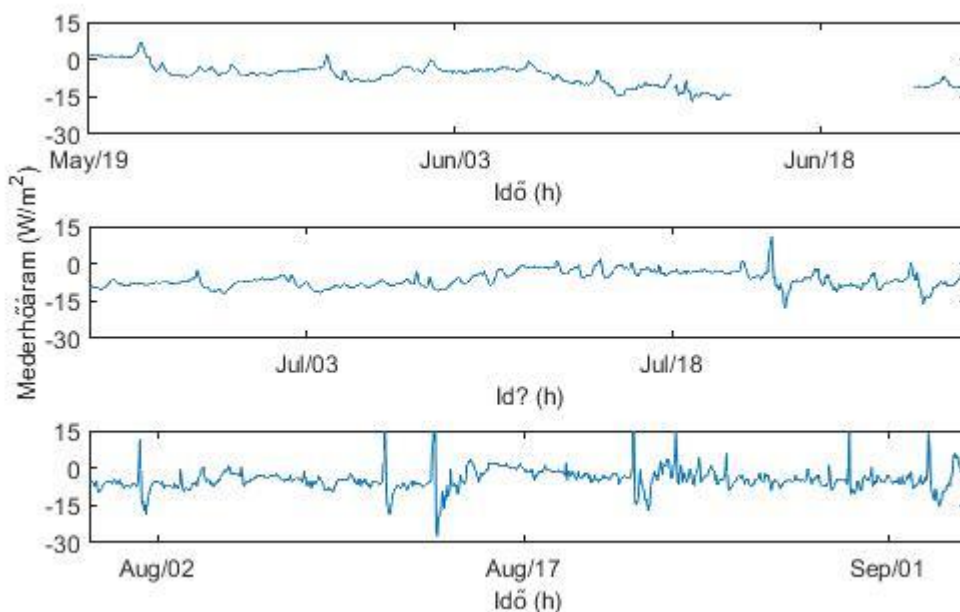
### 3.6. Mederhőáram

Mint már korábban említettem, a mederhőáram víztest és a meder határfelületén jön létre a hőmérsékletkülönbség következtében. Miután értéke kellően kicsi, sokan el is szokták hanyagolni ezt a tagot. A vizsgálat időtartama alatt az átlagos mederhőáram  $-5.7 \text{ W/m}^2$  volt. A 18. ábrán, mely a mederhőáram idő menti alakulását mutatja, ami szépen látható, az a tó „átfordulása”: a tavasz végi időszak elején, a mérés kezdetét követő első pár napban, pozitív mederhőáram értékek voltak, ami azt jelenti, hogy akkor még a meder adott át energiát a víztestnek, viszont ez a külső, vízhőmérséklet növekedésével gyorsan megváltozott, és onnantól kezdve felcserélődtek a szerepek.



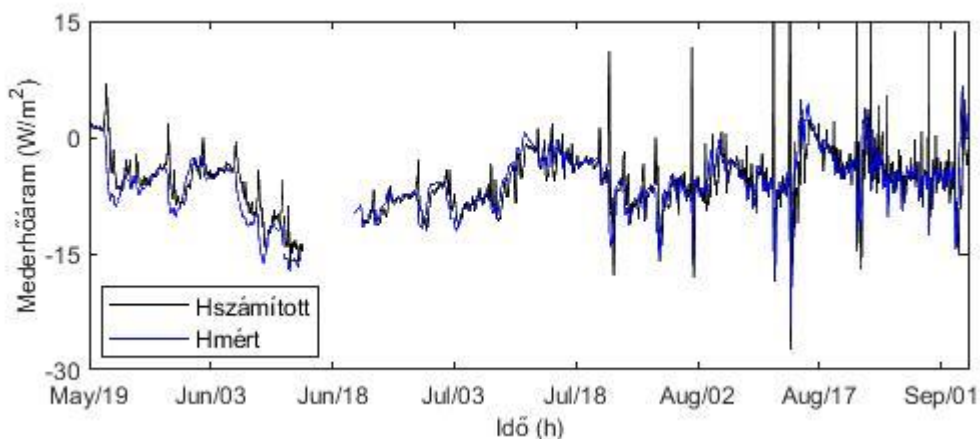
18. ábra: Mederhőáram alakulása egy napon belül, illetve a vizsgálat időtartama alatt

A 19. ábra szintén számolt mederhőáram időbeli alakulását szeretné bemutatni a vizsgálat időtartama alatt, viszont más ábrázolásban. Ennek hála, az egyes hőáramértékek jobban leolvashatók, illetve az augusztusi viharok hatása is szépen jelentkezik. Ha megnézzük az ábrát, látható, hogy augusztusban a mederhőáram napi ingadozása megnő, illetve több kiugró érték is megjelenik. Az előbbi oka a tó, és azáltal az üledék felkeverődése lehet, míg a kiugró értékek a viharok időpontjaiban jelentkeztek.



19. ábra: Számolt mederhőáram értékek alakulása az vizsgálat időtartamában

A 20. ábra, az üledékben elhelyezett hőárammérők által mért hőáramot hasonlítja össze, a számolt mederhőárammal. Ennek ellenőrzési szerepe van, mivel megmutatja, hogy milyen mértékben fedik egymást a mért, illetve számított értékek. Miután a nyár folyamán a víztér ad át energiát az üledéknek, így várható volt, hogy a számított értékek nagyobbak legyenek, mint a mérték. (Emlékeztető: a térben más magasságban helyezkednek el)

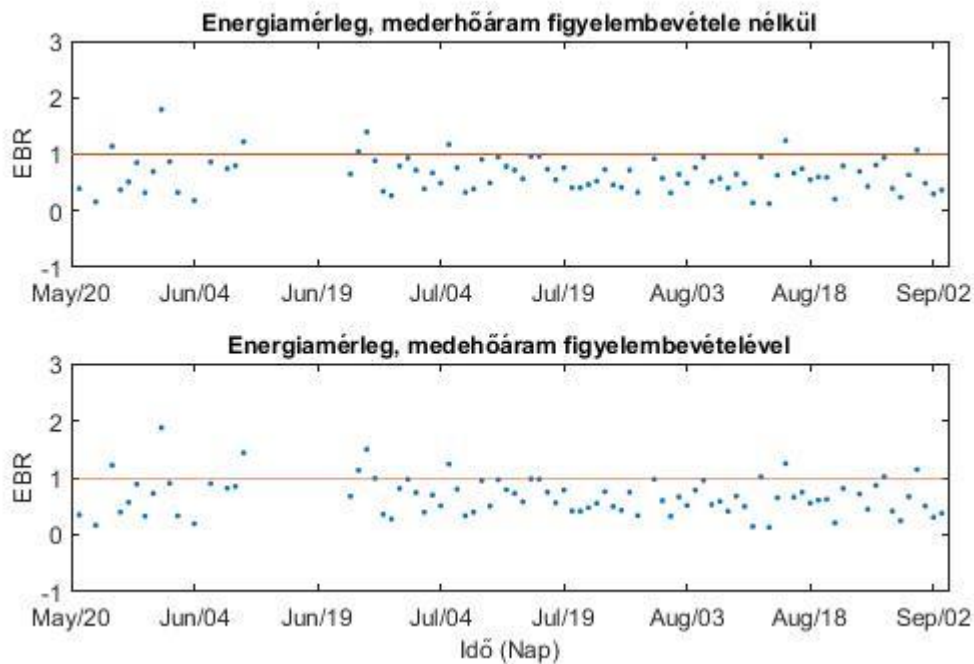


20. ábra: Mért és számított hőáramok összehasonlítása

### 3.7. Energiamérleg

Az energiamérleget a zárási mutató segítségével lehet legjobban jellemezni, így a következőkben azt segítségül hívva fogom bemutatni a kapott eredményeket. Ideális esetben a zárási mutató értéke 1, ezért a 21-22. ábrákon azt néztem meg, hogy ahhoz képest mekkora értékek adódtak a mért adatsorok felhasználásából. Mint látható, a két ábra közt nincs nagy eltérés, mindkét esetben főként 0 és 1 közötti értékek jöttek ki a zárásra. Az első esetbe az átlag 0.646-ra adódott, míg a másodikban 0.673-re. Ez 2.7%-os eltérést jelent, vagyis a

mederhőáram ekkora százalékban javítja a nyári időszakban az energiamérleget. Itt jogosan merülhet fel az a kérdés, hogy hová tűnt a maradék, 33-35%, így most erre próbálok majd választ adni. Esetemben ez két okra vezethető vissza. Az első, hogy a turbulens hőáramokat mérő műszer fizikai adottságaiból adódóan, szóval nem meghibásodás vagy amortizáció miatt, alábecsülte a ténylegesen kialakuló szenzibilis, illetve látens hőáramok nagyságát, míg a második, hogy a vízmozgások okozta hőcserefolyamatok nem lettek figyelembe véve a számítások során.

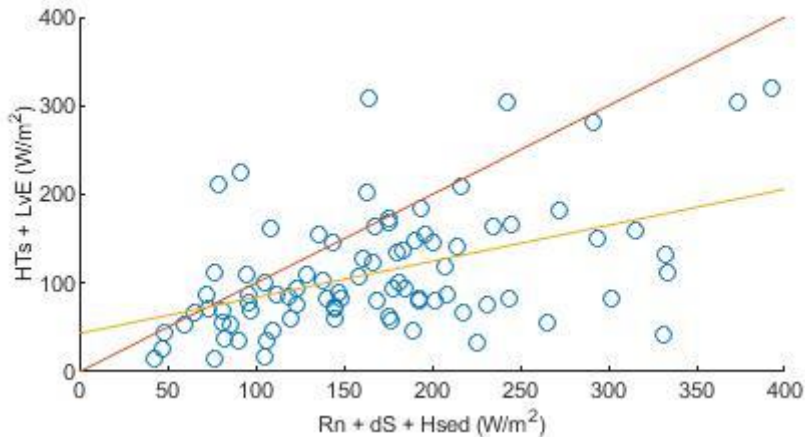


21-22. ábra: Energiamérleg zárási mutató értékének alakulása a mederhőáram figyelembevétele nélkül, illetve annak figyelembevételével

A turbulens hőáramok (EBR mutató számlálója), és a rendelkezésre álló energia (EBR mutató nevezője) közötti kapcsolatot a 23-24. ábrákon szemléltetem, ahol is az előbbit az  $y$ , az utóbbit pedig az  $x$  tengelyre vettem fel. Ha értékeik megegyeznének, vagyis teljes lenne az energiamérleg zárása, akkor egy  $45^\circ$ -os hajlásszögű egyenest kellene kapjunk, viszont ahogy az már kiderül, ez nem így lesz. Miután e módon ábrázoltam a mért adatokat, egy egyenest illesztettem rájuk, melyek egyenletei majd az ábráknál lesznek feltüntetve. Ez arra volt jó, hogy így képes voltam meghatározni a pontok, illetve a rájuk illesztett egyenesek közötti kapcsolatot egy korrelációs együttható kiszámolásával. Az első esetben ez 0.316-ra, míg a másodikban 0.311-re adódott. A korrelációs együttható  $-1$  és  $1$  között változhat, ahol az előjel a kapcsolat irányát, míg az érték a kapcsolat szorosságát mutatja meg. Az, hogy nálam 0.3 körüli értékek jöttek ki, azt jelenti, hogy az  $x$ - $y$  tengely között nem túl erős az összefüggés, azaz nagy a minta szórása.

**Egyenes egyenlete, mikor el van hanyagolva a mederhőáram:**

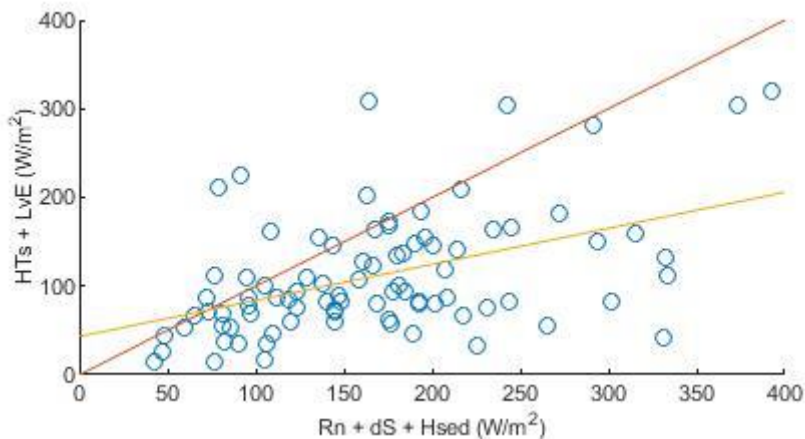
$$y_1 = 0.4041 * x + 41.433 \quad (9)$$



23. ábra: Rendelkezésre álló energia és turbulens hőáramok közötti kapcsolat, mederhőáram nincs figyelembe véve

**Egyenes egyenlete, mikor nincs elhanyagolva a mederhőáram:**

$$y_1 = 0.40638 * x + 43.272 \quad (10)$$



24. ábra: Rendelkezésre álló energia és turbulens hőáramok közötti kapcsolat, mederhőáram figyelembe van véve

### 3.8. Energiamérleg (0D) modell

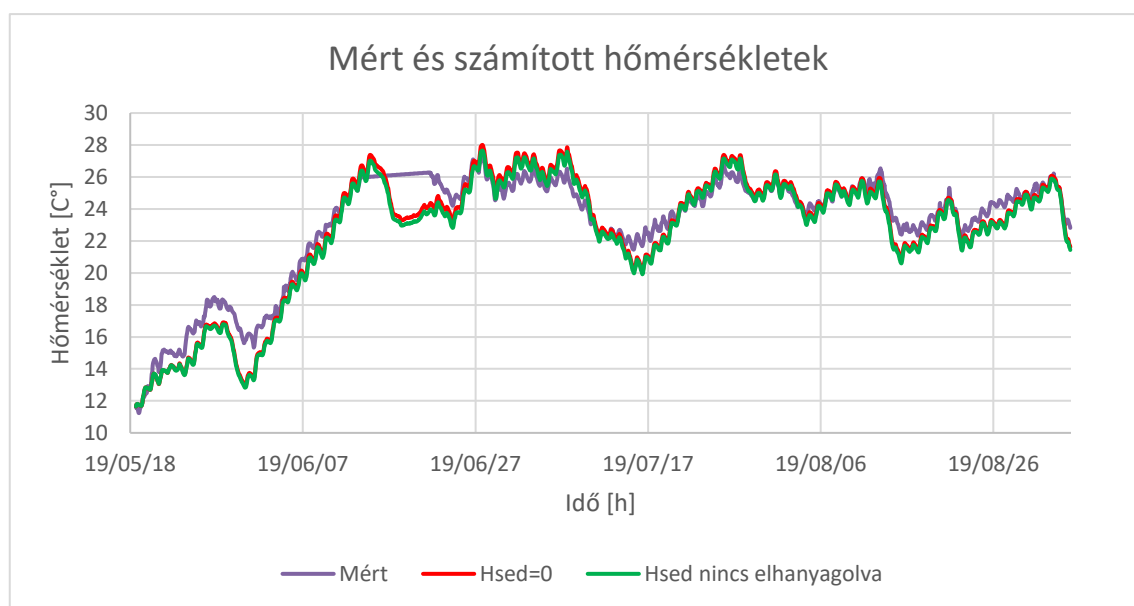
Az előzőekben már bemutattam a modell működését, viszont eredmények könnyebben való megértésének céljából, most pár mondatban ismételni szeretném a lényegesebb pontokat:

- A modellbe, a számolt órás átlagokat vittem be.
- Két lehetőség volt a turbulens hőáramokat illetően, hogy ő maga számolja ki őket, vagy hogy az általam bevitt értékekkel számoljon. Én az utóbbit választottam.
- A modellt kétféleképpen futtattam:
  - 1. figyelembe vettem a mederhőáramot;

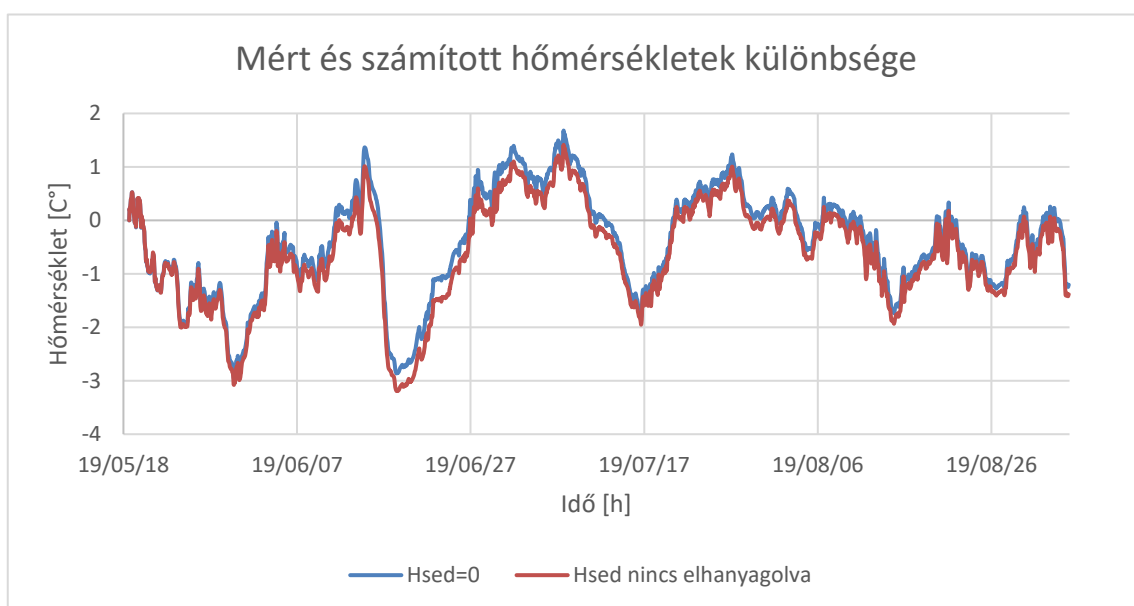
- 2. nem vettem figyelembe a mederhóáramot.

A 0D modell eredményeinek feldolgozásához, az eddigiektől eltérően, *Microsoft Excelt* használtam, mivel a kapott adatsorok feldolgozása, illetve együtt kezelése így módon egyszerűbbnek bizonyult.

A vizsgált három tényező közül az első, a hőmérséklet volt, amellyel kapcsolatosan azt lehetett elmondani, hogy míg a mért és számított értékek között van látható eltérés, addig a számítottak között már nem. Ezt mutatja be a 25. ábra, míg a 26. a hóáram vízhőmérsékletre való hatását szemlélteti. A hőmérséklet vizsgálat alatti alakulásával már többször is foglalkoztam, így ezt itt most nem tenném meg.



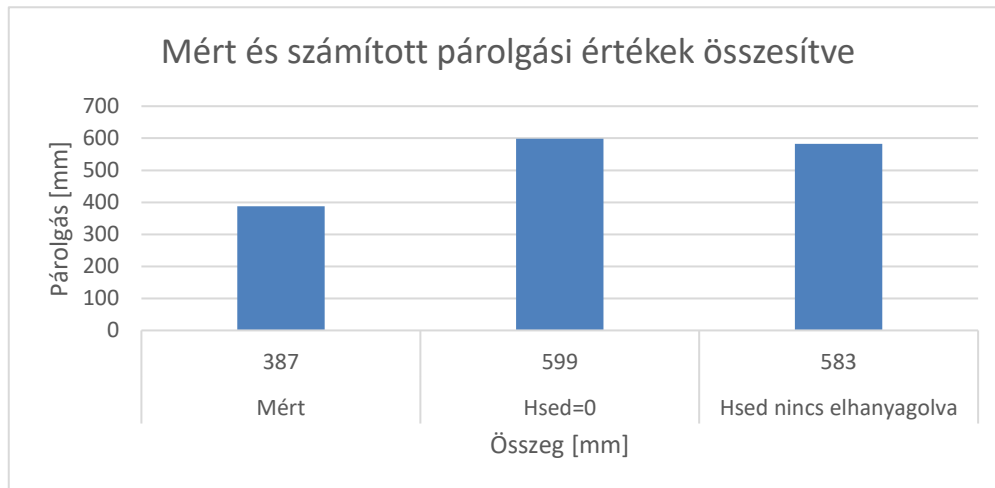
25. ábra: Mért és a 0D modell által számolt hőmérsékletek összehasonlítása



26. ábra: Mért és modellezett hőmérsékletek különbségének alakulása mikor nincs figyelembe véve a mederhóáram, és akkor, amikor igen

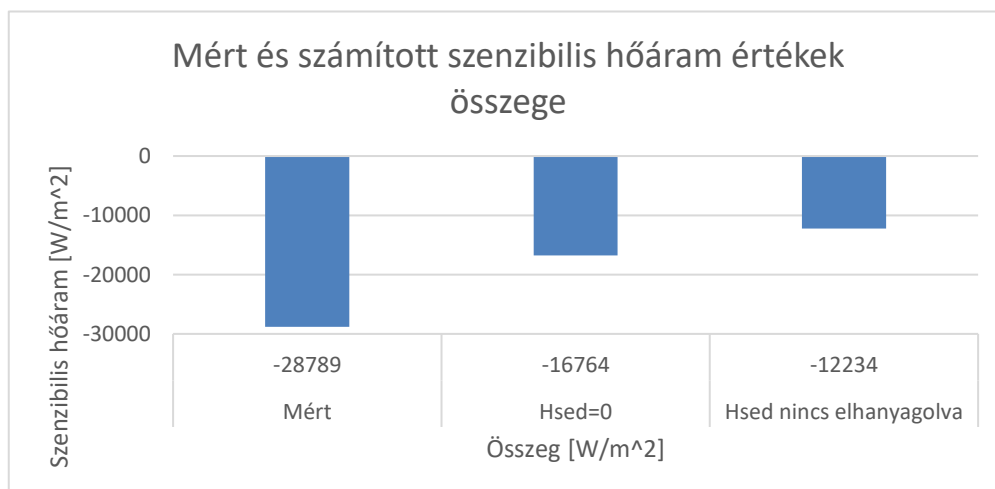
A vízhőmérséklet számítások előre jelző képességét a Nash-Sutcliffe hatékonysági mutatóval néztem meg, és jött ki, hogy mederhőáram esetén ez 0.9, míg annak elhanyagolásánál, 0.89. Ezek azt jelentik, hogy a számítások megbízhatósága nagy.

A második érték, aminek a változását megnéztem, az a párolgás volt. Ez eredetileg nem volt mérve, viszont a mért látens hőáramból vissza lehetett számolni a párolgáshő hőmérsékleti függvényében történő kiszámítása segítségével. A párolgásoknál már jelentkezik a mederhőáram elhanyagolásának hatása, mivel a teljes időszakra számolt párolgások összegében egy 16 mm-es eltérés tapasztalható az elhanyagolás javára, vagyis mikor figyelembe van véve a mederhőáram, kisebb az elpárolgó vízmennyiség.



27. ábra: Mért és a 0D modell által számolt párolgási értékek összehasonlítása

Az utolsó tényező, amivel foglalkoztam, az a szenzibilis hőáram volt. Itt látszik igazán jól, hogy a műszer, amivel a turbulens hőáramok mérve lettek, valóban alul becsülte a tényleges értékeket, elvégre a számított értékekhez képest, melyek már egy jobb közelítést tudtak adni, nagy eltérés adódott. Ezen felül, a mederhőáram elhanyagolása a vizsgált tagok közül itt fejt ki legjobban hatását. Amit látni lehet a 27.ábrán, hogy a mért értékek összege messze kisebbek, mint a számítottak esetében, illetve, hogy a számítottak között is igen jelentős az eltérés. A mederhőárammal számolt összeg mindössze 73%-át adja ki az anélkül számoltaknak.



28. ábra: Mért és a 0D modell által számolt szenzibilis hőáramok összegének összehasonlítása

## 4. Következtetések és összefoglalás

### 4.1. Következtetések

A vizsgálat során, bár az összes energiakomponens mérve lett, az energiamérlegben mégis egy 30%-os hiány jelentkezett, melynek oka, két dologra vezethető vissza. Az egyik, hogy a turbulens hőáramokat mérő műszer, a tényleges értékeket alul becsülte, bár ez, a fizikai adottságai miatt történt, mivel csak a kisléptékű turbulens áramlásokat volt képes mérni. A másik ok pedig, hogy a víztestben lévő hőmérséklet-transzport nem lett figyelembe véve, bár ettől azt várjuk, hogy kisebb szerepet kap, mivel az energiamérleg napi átlagra lett meghatározva

A mederhőárammal kapcsolatosan az mondható el, hogy ha el van hanyagolva, akkor az üledék, mint puffer eltűnik, és így minden hőáram, csak a légkör felé tud eltávozni. Ez a vízhőmérsékletre kis hatással van, viszont a turbulens hőáramok alakulását számottevően befolyásolja. Erre mutatott példát a párolgás értékének megváltozása, mely csaknem, 16 mm-el volt több az elhanyagolás esetében. A szenzibilis hőáram tekintetében még jelentősebb a hatás, mivel a légkör felé történő hőleadás 27%-kal nagyobb volt a meder és víztér közti hőcsere elhanyagolásával. Szeretném megjegyezni, hogy ez a meteorológiai előrejelző modellek szempontjából fokozott jelentőséggel bír, és ezek többségéről elmondhatjuk, hogy mederhőáramokat rendre elhanyagolják.

Végző következtetésként azt mondanám, hogy a mederhőáram elhanyagolása a Balaton esetében nem szerencsés, elvégre az elhanyagolásával járó következmények hatásai egyértelműen kimutathatók, és nem elhanyagolható nagyságúak, viszont még további vizsgálatokra van szükség, hogy ne csak a rövid, hanem a hosszú távú hatásokat is figyelembe lehessen majd venni, ennek a döntésnek a meghozatalánál. Illetve, a rövidtávú hatásoknál jelentős további szerepet kap, mivel folyamatos hőmérséklet gradienst tart fenn a meder közeli vízrétegben. Ez a gradiens stabil rétegzettséghez, visszafogottabb turbulens keveredéshez vezet a víztér és tápanyagdús üledék között.

### 4.2. Összefoglalás

A tanulmány célja, a mederhőáram szerepének meghatározása volt a Balaton energiaháztartásában, melyhez rendelkezésemre álltak a Keszthelyi-öbölben, 2019. május 18 – 2019. szeptember 4-ig tartó időszakban mért adatok. Elsőként ezen adatsorok feldolgozása volt a feladatom, majd utána, órás és napi átlagok képzése. Ezen átlagokat felhasználva képes voltam felírni a tó energiamérlegét, mely során azt kaptam, hogy a mederhőáram, a teljes energiának 3%-át adja ki. A mérleg zárása nem volt tökéletes, egy közel 33%-os veszteség jelent meg, mely okát nagy bizonyossággal meg tudtam mondani. Utolsó lépésként az átlagokat bevitettem az OD modellbe, mellyel megnéztem, hogy milyen hatással jár a mederhőáram elhanyagolása. Azt kaptam, hogy míg a vízhőmérsékletet csak kis mértékben, addig a turbulens hőáramokat számottevően befolyásolja.



## **5. Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni Torma Péter konzulensem munkáját, mely nélkül jelen mű nem születhetett volna meg.

Köszönöm a Kék Bolygó Klímavédelmi Alapítvány támogatását, mely nélkül jelen mű nem jöhetett volna létre.

## 6. Források

Arya S. P. (2001): Introduction to Micrometeorology, *Academic Press*, 2<sup>nd</sup> edition.

Condie S.A. and Webster I.T (2001): *Estimating Stratification in Shallow Water Bodies from Mean Meteorological Conditions*. Journal of Hydraulic Engineering, 127 (4), 286-292.

Foken T. (2008): *The energy balance closure problem: an overview*. Ecological Applications, 18 (6), 1351-1367.

Hipsey R. M., Bruce L.C., Boon C., Busch B., Carey C.C., Hamilton D.P., Hanson P.C., Read J.S., de Sousa E., Weber M., and Winslow L.A. (2019): *A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON)*. Geoscientific Model Development, 12, 473-523.

Kipp & Zonen (2009): *CNR 4 Net Radiometer Instruction Manual*, Manual version 1107, Delft, Netherland.

Kiss M. (2014): *Physical interaction mechanism at the littoral-pelagic interface of shallow lakes*. PhD thesis, Budapest University of Technology, Budapest, Hungary.

Torma P. (2016): *Modelling wind-driven shallow lake hydrodynamics and thermal structure*. PhD thesis, Budapest University of Technology, Budapest, Hungary.

Yang Y., Wang Y., Zhang Z., Wang W., Ren X., Gao Y., Liu S., Lee X. (2017): *Diurnal and Seasonal Variations of Thermal Stratification and Vertical Mixing in a Shallow Fresh Water Lake*. Journal of Meteorological Research, 32(2). 219-232.