



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A Hévízi-tó vízmérlegének, hőháztartásának és víz-levegő határfelületi cserefolyamatainak együttes vizsgálata

Tudományos Diákkör Konferencia dolgozat

Reska Zsombor János
[zsombor.reska@gmail.com]

Konzulens:
Torma Péter, egyetemi docens

Lezárás: 2023.11.05., Budapest

Tartalom

1	Bevezetés.....	4
2	Módszertan.....	5
2.1	<i>Elméleti áttekintés.....</i>	5
2.1.1	A tó hőháztartása	5
2.1.2	Sugárzás komponensek	5
2.1.3	Turbulens hőáramok.....	6
2.1.4	Advektív hőáramok	7
2.1.5	Vízmélység, morfológiai görbe.....	8
2.1.6	Tóban tárolt hő	9
2.1.7	Be- és kifolyó vízhozam meghatározása napi léptékben	9
2.2	<i>Mérések.....</i>	10
2.2.1	Az örvény-kovariancia mérések.....	11
2.2.2	Sugárzás komponensek mérése	11
2.2.3	Adatfeldolgozás.....	12
3	Eredmények.....	12
3.1	<i>Meteorológia.....</i>	12
3.2	<i>Sugárzások.....</i>	13
3.3	<i>Turbulens hőáramok</i>	15
3.4	<i>A turbulens áramok átviteli együtthatói</i>	15
3.5	<i>Energiamérleg komponensek</i>	18
3.6	<i>Napon belüli változékonyság</i>	19
3.7	<i>Vízmérleg</i>	20
3.8	<i>Szén-dioxid fluxus</i>	22
4	Összefoglalás és Konklúziók	23
5	Irodalomjegyzék.....	25

Kivonat

A Hévízi-tó Európa legnagyobb melegvizes tava 4,4 hektáros kiterjedésével. Tőzegmedrű forrástó, amelyet a közel 40 méter mély forrásbarlangból feltörő, nagy hozamú, majdnem 40 °C-os melegvíz táplál. A tavat tápláló vízhozam a '70-es évektől a Bakonyban folyó bauxitkitermeléssel együtt járó karsztvízkiemelés következtében rohamosan csökkent, ami a 80-as évekre majd a felére csökkent. A bányászati tevékenység rohamos csökkenésével a vízhozam újra emelkedni kezdett és napjainkra újra magas szinten áll. A mélységi forrásbarlangból előtörő melegvíz összetett áramlási, hőmérsékleti viszonyokat teremt, aminek eredményeképp jelenleg ismeretlen légkör-víz határfelületi cserefolyamatok, keveredési viszonyok és transzportfolyamatok játszódnak le. Az áramlási viszonyokat például a 80-as évek elején vizsgálták utoljára, amikor a melegvíz-utánpótlás jelentősen kevesebb volt, mint napjainkban. Mindezeknek köszönhetően, illetve a forrásvízhozam mérésének hiányában jelenleg nagy bizonytalansággal tudjuk megbecsülni a tó vízmérlegét és hőháztartását. Mindemellett a tavak esetében folyamatosan visszatérő kérdés, hogy az üvegházhatásért felelős légköri anyagokat, például a vízgőzt és a szén-dioxidot, milyen mértékben bocsátják ki magukból, vagy éppen nyelik el. Ebből a szempontból a Hévízi-tó esete érdekes. A vízgőz esetében fontos szerepet játszik a víz hőmérséklet, amely nemcsak a nyári időszakban magas, hanem a téli időszakban is. A tó hőmérséklete a téli hónapokban is 20 °C felett van, vagyis ekkor is nagy intenzitással történik párolgás, szemben az ugyanilyen klímájú, természetes tavakkal. A szén-dioxid tekintetében a tőzeges üledék kulcsszerepet játszhat, mivel az abból eredő kibocsátás számottevő lehet. Ezzel kapcsolatban azonban semmilyen vizsgálatot nem végeztek ez idáig.

A kutatás célja a Hévízi-tó alapvető víz- és hőmérleg komponenseinek, valamint ennek részeként a víz-levegő határfelületén történő vízgőz- és szén-dioxid cserefolyamatainak feltárása. Ez utóbbiakat közvetlenül meghatározzák a fentebb említett tavi keveredési, áramlási és hőmérsékleti folyamatok. Jelen kutatás egy első lépés a tó jelenlegi állapotának megismeréséhez. A helyzetkép felállításához több hetes terepi mérést valósítunk meg, amelyek során mérjük az áramlási sebességeket, az elfolyó vízhozamokat, illetve egyidejűleg hidrometeorológiai méréseket végzünk egy általunk telepített állomás segítségével. Ennek részét képezik örvény-kovariancia mérések, amelyek közvetlenül szolgáltatják a vízgőz- és szén-dioxid fluxusokat. A kutatómunka alapvetően tehát mérésekre összpontosít, de ezek a későbbiekben meg tudják alapozni azon numerikus modellfejlesztéseket, amelyekkel az egyes tervezett fejlesztések hatását vizsgálni lehet.

Abstract

Lake Hévíz is Europe's largest geothermal lake, with a surface area of 4.4 ha. It is a peat lake, supplied by the nearly 40°C warm spring water at a depth of almost 40 meters. In the '70s, the lake's water supply faced an intensive decrease due to bauxite mining-related water withdrawal. This led to halving the inflow by the '80s. With the decline of mining, the lake's inflow has started to rise and reached a high level for today. The ascending warm spring water from the lake's deepest point creates a complex flow pattern and thermal structure, resulting in unknown mixing conditions, transport pathways, and exchange processes at the air-water interface. The latest research on circulation patterns was conducted in the '80s when the warm water supply was significantly lower than today. Thanks to all this, and in the absence of inflow discharge measurements, we can currently estimate the lake's water balance and heat budget with high uncertainty. In addition, in the case of lakes, a constantly recurring question is the extent of emittance or absorption of atmospheric gases responsible for the greenhouse effect, such as water vapor and carbon dioxide. From this point of view, the case of Lake Hévíz is interesting. In the case of water vapor, water temperature plays an important role, which is high not only in the summer but also in the winter. The lake's temperature is above 20 °C even in the winter months, which means that evaporation takes place with great intensity throughout the year, compared to natural lakes in the same climate. Regarding carbon dioxide, the peaty sediment can play a crucial role, as its emission can be significant. However, no investigation has been carried out in this regard so far.

The aim of the research is to explore the water balance and heat budget of Lake Hévíz, including the water vapor and carbon dioxide exchanges at the air-lake interface. The latter are directly influenced by the mixing, flow, and temperature processes mentioned above. This research would be a first step in understanding the lake's current state. To reveal the current state, we conduct several weeks of field measurements, during which we measure the currents in the lake and the outflows. Simultaneously, we conduct hydrometeorological measurements with a station we've installed. This will include eddy covariance measurements, directly providing water vapor and carbon dioxide fluxes. Therefore, the research primarily focuses on measurements; however, these results can later form a basis for numerical model developments to assess the impacts of planned developments.

1 Bevezetés

A Hévízi-tó Európa legnagyobb melegvizes tava 4,4 hektáros kiterjedésével. Tőzegmedrű forrástó, amelyet a közel 40 méter mély forrásbarlangból feltörő, nagy hozamú, majdnem 40 °C-os melegvíz táplál (Nagy, 2022). A mélységi forrásbarlangból előtörő melegvíz összetett áramlási és hőmérsékleti viszonyokat teremt, amelynek eredménye, hogy jelenleg ismeretlen légkör-víz határfelületi cserefolyamatok, keveredési viszonyok és transzportfolyamatok játszódnak le.

A kutatás célja a Hévízi-tó alapvető víz- és hőmérleg komponenseinek, valamint ennek részeként a víz-levegő határfelületén történő vízgőz- és szén-dioxid cserefolyamatainak feltárása. A hőháztartás jellemzője a hőmérleg; ennek felírása volt az első feladatunk, amelyből - ha minden más vízhőt befolyásoló tényezőt is pontos adatokkal mérünk -, meg tudjuk állapítani a tó mélyén beáramló vízhozammal érkező hőt, valamint a vízhozamot is. A kapott adatokból fel tudjuk állítani a vízmérleget, ezáltal a tavat jól leíró, átfogó képet tudunk alkotni. A vertikális vízgőzáram (vagyis párolgás) vizsgálata esetén fontos szerepet játszik a vízhőmérséklet, amely nemcsak a nyári időszakban, hanem télen is magas. A tó hőmérséklete a téli hónapokban is 20 °C felett van, vagyis ebben az időszakban is nagy intenzitással történik párolgás. A szén-dioxid fluxus tekintetében a tőzeges üledék kulcsszerepet játszik, az abból eredő kibocsátás számottevő. Ezzel kapcsolatban korábban semmilyen vizsgálatot nem végeztek.

Az általunk végzett mérések igen körülményesek, költségesek ezért egyik célkitűzésünk volt, hogy a kapott adatokból és felállított egyenletekből kiszámítsuk a tavat jellemző átviteli együtthatókat, melyek segítségével később rutin meteorológiai adatok alapján is jellemezni tudjuk a tó hőháztartásának víz-levegő cserefolyamatait.

Jelen kutatás egy első lépés a tó jelenlegi állapotának megismeréséhez, az itt leírtak célja tehát nem az, hogy végső eredményeket adjunk, például a vízhozamra, hanem hogy feltárjuk az egyes mérési eljárások alkalmazhatóságát és a tó vízmérlegének és hőháztartásának legfontosabb bizonytalanságait. Kutatási eredményeinket célunk a későbbiekben tovább pontosítani, például a téli hónapokban folytatott mérésekkel, szükség esetén a mérési helyszínek jobb megválasztásával, valamint a tó áramlásainak feltérképezésével.

A kutatómunka tehát alapvetően mérésekre összpontosít, de ezek a későbbiekben megalapozhatják azokat a numerikus modellfejlesztéseket, amelyekkel az egyes tervezett fejlesztések hatását vizsgálni lehet.

2 Módszertan

A kutatás során helyszíni méréseket végeztünk, melyeknek elméleti háttérét és mérési módszereit taglalja ez a fejezet.

2.1 Elméleti áttekintés

2.1.1 A tó hőháztartása

A tó hőháztartásának kiszámításakor a hőt, mint energiát vesszük figyelembe. A hőháztartás alakulásában a sugárzás komponensei, a turbulens- és az advektív hőáramok vesznek részt (a talajon át elszivárgó hőt ezen dolgozatban nem vesszük figyelembe). Ezek a behatások alakítják a tóban tárolt hő mennyiségét. Ezeket a komponenseket összegezve az energiamérlegben, egy fennmaradó összeget kapunk, vagyis az energiamérlegnek zárási hibája van. Ennek számos oka van. Ezek közül a két legfontosabb, hogy egyrésről az energiamérleg számítások általában lokális méréseken alapulnak, jóllehet egy területet vagy térfogatot jellemzünk velünk. Másrésről a turbulens fluxusok mérése csak számos feltétel teljesülése esetén tud pontos lenni, ami miatt azok 10-20%-os hibával sokszor terheltek. A fennmaradó hőenergiát szekunder turbulens áramlatok szállítják, ennek mérésére azonban még nem áll rendelkezésre alkalmazható módszer, (Foken, 2008) így annak érdekében, hogy becsülni tudjuk a tóba érkező vízhozamot, a fennmaradó energiát zérusnak tekintjük. Ezek alapján a tó hőháztartására vonatkozó energiamérleg:

$$R_{net} - \Delta S - HTs - LvE + H_{in} - H_{out} = res \sim 0$$

ahol R_{net} a nettó sugárzás, ΔS a tárolt hőmennyiség, HTs a szenzibilis hőáram, LvE a látens hőáram, H_{in} a bejövő, H_{out} a távozó vízhozam által szállított advektív hőáram, valamint res a fennmaradó hőmennyiség. Minden tag W/m^2 mértékegységgel bír.

2.1.2 Sugárzás komponensek

A sugárzás komponensek a Napból érkező rövid hullámú sugárzásból és a légkör hosszú hullámú sugárzásából áll. Ezeknek egy része a tóban tárolódik, egy részét pedig visszaveri a felszín. Kutatásunk során mértük mind a beérkező, mind a visszaverődő sugárzásokat, ezek összege adja a nettó sugárzást:

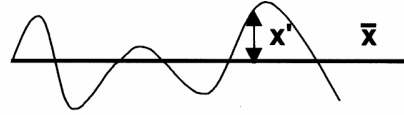
$$R_{net} = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out}$$

ahol R_{net} a nettó sugárzás, SW_{in} , LW_{in} a tóba érkező SW_{out} , LW_{out} a visszavert rövid- és hosszúhullámú sugárzás.

2.1.3 Turbulens hőáramok

A légkör alsó rétegében turbulens kis légörvények mozgatják a meteorológiai állapotváltozókat. A vizsgált állapotváltozók a szélsébség egy iránykomponense (w – függőleges iránykomponens sebessége), a léghőmérséklet (T), a vízgőz (q) és a szén-dioxid (CO_2).

Turbulens áramlásakor egy állapotváltozó felbontható átlagértékre ($\bar{x}$) és az átlagértéktől számított pillanatnyi eltérésre (x'), vagyis fluktuációra.



Felszín közeli rétegben, bizonyos feltételek fennállása esetén az egyes turbulens áramok függőleges gradiense zérus. Ilyen feltételek például, hogy a függőleges szélsébség átlagértéke zérus, a turbulencia kifejlődött és stacionárius, a felszín homogén.

$$\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \approx 0 \quad \frac{\partial \overline{T'w'}}{\partial z} \approx 0 \quad \frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z} \approx 0$$

Ez azt jelenti, hogy a kovarianciák gradiense közel nulla felszín közeli légkörben és függőleges irányban állandónak tekinthetjük. A kovarianciát a függőleges szélsébségre (w), vízszintes szélsébségre (u), vagy az általunk ezen dolgozatban figyelembe vett skalárra (hőmérséklet (T), vízgőz (q), szén-dioxid (CO_2)) az alábbi módon számítható:

$$\overline{w'x'} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} [(w_k - \bar{w}_k)(x_k - \bar{x}_k)] = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{k=0}^{N-1} w_k x_k - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=0}^{N-1} w_k \sum_{k=0}^{N-1} x_k \right) \right]$$

Tehát a fluxus megegyezik a kovariancia értékével. (Lükő, 2020)

A mérésünkben az örvény-kovariancia mérési módszerhez használjuk ezeket a feltevéseket. Az örvény-kovariancia méréshez nagy időbeli felbontással kell mérjünk, legalább 10Hz-en a turbulens fluxusokat. A vízszintes szélsébség (u) méréséből a szélcsúsztatósebessége (u^*), a hőmérsékletből (T) a szenzibilis hőáram (HT_s) és a páratartalomból (q) a látens hőáram (LvE) a következő képletekkel számítható:

$$u_*^2 = -\overline{u'w'}$$

$$HT_s = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot \overline{T'w'}$$

$$LvE = \rho_a \cdot \lambda \cdot \overline{q'w'}$$

ahol ρ_a a száraz levegő sűrűsége, c_{pH} az állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitás és λ a párolgási hő.

Mivel az örvény-kovariancia mérés körülményes és magasköltségű a műszerigénye ezért, a mért eredmények mellett levezetjük az egyes turbulens fluxus átviteli együtthatóit, hogy a későbbiekben rutin meteorológiai adatok alapján is számíthatók legyen az áramok:

$$u_*^2 = C_{Dz} \cdot U_z^2$$

$$HTs = \rho_a \cdot c_{pH} \cdot C_{Hz} \cdot U_z \cdot (T_z - T_0)$$

$$LvE = \rho_a \cdot \lambda \cdot C_{qz} \cdot U_z \cdot (q_z - q_0)$$

A Monin-Obukhoz hasonlósági elmélet alapján (Monin & Obukhov, 1954) az átviteli együtthatók a következő képp számíthatók:

$$C_{Dz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right)^2$$

$$C_{Hz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_{0H}}\right) - \psi_H\left(\frac{z}{L}\right)} \right)$$

$$C_{qz} = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \right) \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right)} \right)$$

ahol κ a Kármán-konstans, z_0, z_{0H}, z_{0q} az érdességi magasságok és ψ_m, ψ_H, ψ_q a légkör stabilitását leíró ún. univerzális függvények, L az ún. Obukhov-hossz melynek képlete:

$$L = \frac{u_*^2 T}{\kappa g (T_* + 0.61 T q_*)}$$

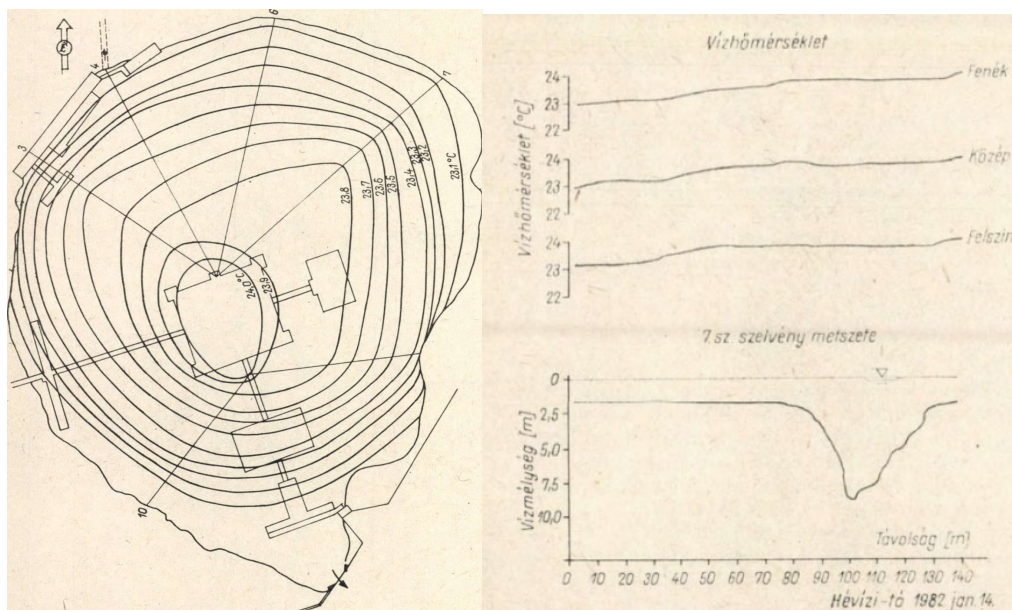
Ahol T_* a hőmérsékleti skála, q_* a vízgőzre vonatkozó skála és g a gravitációs gyorsulás.

2.1.4 Advektív hőáramok

A 40 méteren található forrás szerint a tó fő hőenergia-forrása. A tó vízszintjét két kifolyóval szabályozzák, melyeken a kiáramló vízhozam hőt visz el magával. A forrás vizével beáramló, és a kifolyókon távozó hőenergiák az advektív hőáramok: H_{in} és H_{out} , melyekre az alábbi összefüggés áll fenn:

$$H_i = \rho_w \cdot c_{pw} \cdot \frac{Q_i}{A} \cdot T_w$$

ahol ρ a víz térfogatsűrűsége, c_{pw} víz specifikus fajhője. Ezeket a hőmérséklet függvényében számítottuk. Q_i a ki- vagy beáramló vízhozam, A a tó felszínének területe és T_w a víz hőmérséklete.

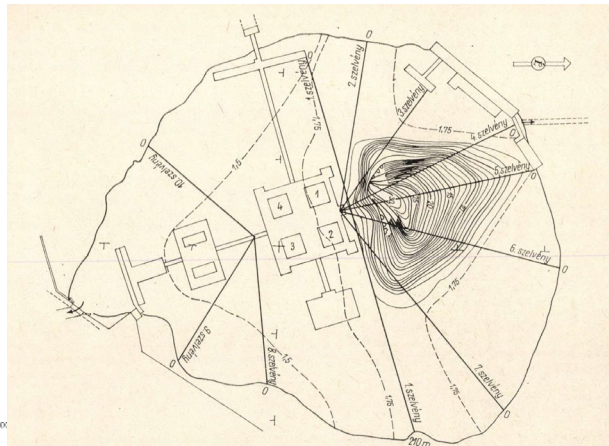
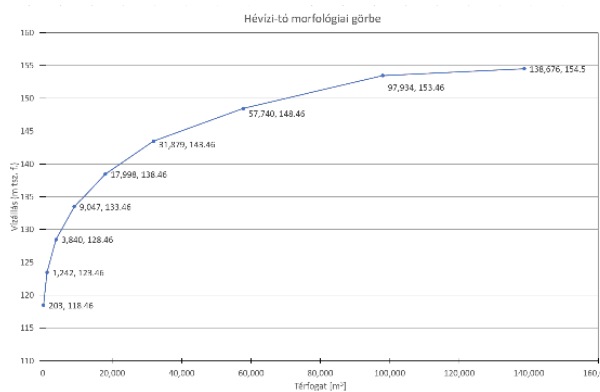


1. ábra. Balra: A Hévizi-tó felszín hőmérsékletének eloszlása 1982. január 14-én. Jobbra: A 7-es mérési szelvényben mért hőmérsékletek három mélységben és szelvény metszete 1982. január 14-én (Strasolszky, 1984.)

Korábbi adatok alapján (Strasolszky, 1984.) alapján a felszín mentén a hőmérséklet csupán 0,7 °C -t változik a forrás felszínre érése és a között (1. ábra), valamint a mélység menti hőeloszlás is hasonlóan elhanyagolható (1. ábra). Ezek alapján a tó hőmérséklete homogénnek tekinthető, tehát a kifolyókon távozó víz hőmérséklete megegyezik a mérőállomásunknál mért értékkel.

2.1.5 Vízmélység, morfológiai görbe

A tó üzemeltetőjétől megkaptuk az egy napon belüli vízállások adatait. (15. ábra). Valamint rendelkezésünkre bocsájtották a tó mederfelmérésének pontfelhőjét, ami alapján elkészítettük a tó háromdimenziós modelljét CloudCompare szoftverben. A modellből vízszintes metszeteket vettünk fel, melyekből a program segítségével kiszámítottuk a mederben tárolt víztérfogatokat a vízállás függvényében. Ezek alapján elkészítettük a tó morfológiai görbéjét (2. ábra), továbbá megkaptuk a tó felszínének területét: 46 350 m². A vízállást leolvasva megkaptuk a tó (vízállástól függő/átlagos) térfogatát: 127 950 m³. A térfogatot osztva a felszínnel megkaptuk a tó átlagos mélységét: 2,76 m.



2. ábra. Balra: az új mederfelmérés alapján számított morfológiai görbe. Jobbra: az 1980-as években végzett felmérés szintvonalas medertérképe (Starosolszky, 1984).

2.1.6 Tóban tárolt hő

A tóban tárolt hőt a víz térfogatsűrűsége(ρ), a víz specifikus fajhője (c_{pw}), a hőmérséklet idő szerinti változása és az átlag mélység (h) alapján számítottuk:

$$\Delta S = \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta t} \cdot h$$

A fent említett okokból itt is a tó hőmérsékletének homogenitásával számoltunk. A fentebb ismertetett összefüggések alapján meghatározható a be és kifolyó vízhozam

2.1.7 Be- és kifolyó vízhozam meghatározása napi léptékben

A vízmérleg felállításakor azt vesszük pozitívnak, ami a tavat táplálja, azaz a pozitív oldalon a forrásból érkező vízhozam áll. (Megjegyzem, hogy ehhez hozzáadódik a csapadék, valamint feltételezésünk szerint a tó medrén át kisebb források is hozzáadhatnak a tó vizéhez, azonban ezek pontos adataihoz további, ezen dolgozat keretein kívül eső kutatások szükségesek, így a tanulmány során eltekintünk ezektől.) A negatív oldalon (az örvény-kovariancia vizsgálatok során mért) párolgás során távozó, valamint a kifolyócsatornákon távozó víz összessége áll. A vízhozamot ezek alapján az energia mérleg alapján határozzuk meg.

$$R_{net} - \Delta S - HTs - LvE + H_{in} - H_{out} = res$$

$$H_{in} = \rho_{w,in} c_{pw,in} \cdot \frac{Q_{in}}{A} \cdot T_{w,in}$$

$$H_{out} = \rho_{w,out} c_{pw,out} \cdot \frac{Q_{out}}{A} \cdot T_{w,out}$$

A vízszint egy napon belüli ingadozásából leolvasható, hogy egy napon belül az átlag vízszintváltozás zérus. Ezek alapján az egy napon belül távozó és érkező vízhozam mennyisége azonos.

$$Q_{in} = Q_{out} = Q$$

$$R_{net} - \Delta S - HTs - LvE + \rho_{w,in} c_{pw,in} \cdot \frac{Q_{in}}{A} \cdot T_{w,in} - \rho_{w,out} c_{pw,out} \cdot \frac{Q_{out}}{A} \cdot T_{w,out} = 0$$

A fennmaradó mennyiséget zérusnak vesszük, így az egyenlet átrendezéséből megkapjuk a vízhozamot.

$$Q = \frac{R_{net} - \Delta S - HTs - LvE}{\rho_{w,in} c_{pw,in} \cdot T_{w,in} - \rho_{w,out} c_{pw,out} \cdot T_{w,out}} \cdot A$$

2.2 Mérések

Helyszíni méréseket végeztünk a tavon 2023. augusztus 22. és szeptember 10 közötti időszámban. A tófürdő épület teraszának északnyugati sarkára szereltük fel a mérőállomásunkat (3. ábra). A kutatás során mértük a szél irányát és sebességét, a beérkező és visszaverődő rövid- és hosszúhullámú sugárzást, a levegő páratartalmát, a légköri és a vízfelszíni hőmérsékletet. Továbbá mértük a légkör-víz határfelületi turbulens cserefolyamatokat, vagyis az impulzusfluxust, a szenzibilis és látens hőáramokat, illetve a szén-dioxid fluxust. A rutin hidrometeorológiai paramétereket 5 percenként rögzítettük, míg a fluxusok mérése 10 Hz-es felbontást igényeltek. Ezeket az adatfeldolgozás során 20 perces átlagokra aggregáltuk (2. ábra).



3. ábra. A telepített hidrometeorológia mérőállomás és annak elhelyezkedése a tófürdő teraszán.

2.2.1 Az örvény-kovariancia mérések

Az örvény-kovariancia elvű méréshez a *Campbell Scientific CSAT3 + EC150* műszeregyüttessel mértünk. Örvény-kovariancia számításoknál fontos, hogy minden komponens a lehető legközelebb mérjünk egymáshoz, egy időben és nagy felbontásban. A *CSAT3* háromdimenziós szélmérő szinkronizálva mért az *EC150* nyílt utas gázanalizátorral, amit speciálisan örvény-kovariancia mérésekhez fejlesztettek vízgőz fluxus és szén-dioxid fluxus mérésére.

2.2.2 Sugárzás komponensek mérése

A sugárzásokat Kipp & Zonen gyártmányú *CNR4* típusú nettó sugárzásérővel mértük, amely négy szenzorból áll, egy-egy felfelé, illetve lefelé néző pyrano- és pyrgeométerből. A beérkező hosszuhullámú sugárzás korrigálásához szükség volt a műszertest hőmérsékletére, amelyet szintén mért a műszer.

Emellett az örvény-kovariancia ellenőrzéséhez és minőségbiztosításához egy lassú szenzorral (Vaisala *HMP45*) rögzítettük légkör hőmérsékletét és páratartalmát. Végezetül a vízfelszín alatt 20 és 70 cm-es mélységben mértük *Campbell T107* típusú termisztorokkal a vízhőmérsékletet.

2.2.3 Adatfeldolgozás

A lassú mérések esetén az 5 perces idősorokból – igazodva a fluxusmérések lehetséges minimális időbeli felbontásához – 20 perces átlagokat képeztünk. Ehhez a kiugró, hibás értékeket egy spike-szűrővel eltávolítottuk és helyükre lineárisan interpoláltunk. A sugárzásmérések esetében a délelőtti órák során volt egy rövid, kb. 1 órás időszak, amikor egy oszlop a rövidhullámú sugárzásmérőt árnyékolta. Ezeket hibás értékeket manuális eltávolítottuk és megint csak lineáris interpolációval pótoltuk.

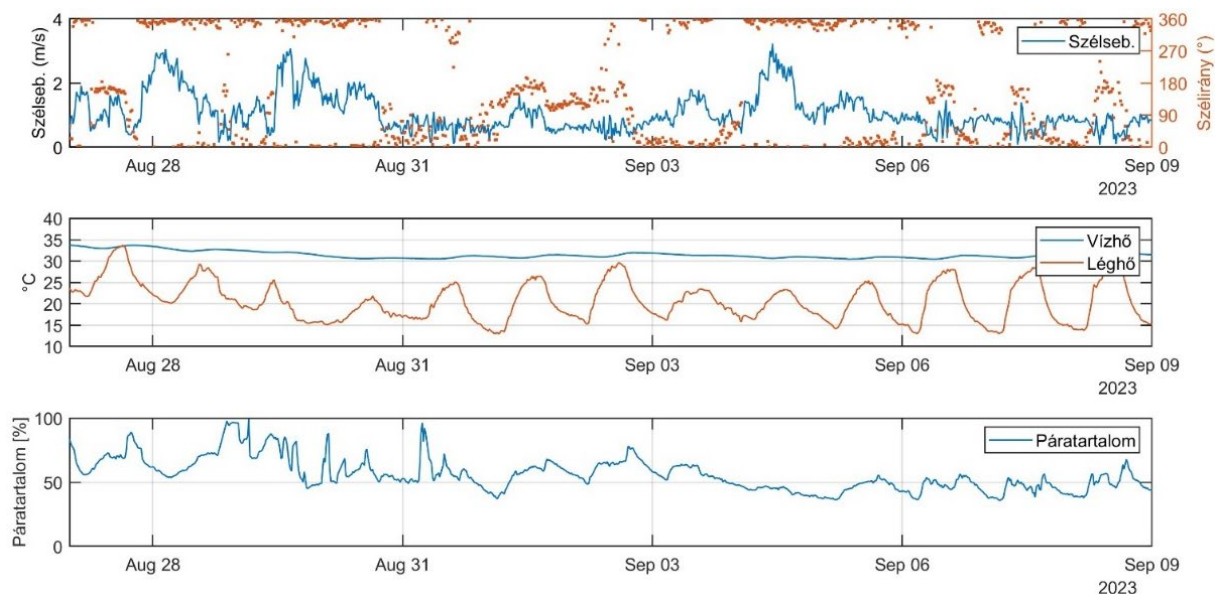
Az örvény-kovariancia mérések adatait először ASCII file-okká konvertáltuk, majd *TurbulentKnight3* (Mauder & Foken, 2011) szoftverrel alakítottuk húszperces átlagokká, miközben kiszűrtük a jelentősen kiugró adatokat melyek hibás méréseknek számítanak. A szoftver beállításait úgy végeztük, hogy a szabványos és elvárható korrekciókat egyúttal is el is végezze. Ezeket részletesen ismerteti Lükő et al. (2022) cikke. Egyúttal alkalmaztuk a Foken-féle minőségbiztosítási eljárást, miszerint a fluxusokat értékeljük egytől kilencig terjedő skálán, ahol 1 a legjobb 9 a legrosszabb. A kapott idősorokból *Matlab* matematikai szoftver segítségével kiszűrtük a méréseket, amik 6-nál rosszabb értékelést kaptak. Továbbá kiszűrtük azokat a méréseket, amelyek olyan szélirány mellett történtek, hogy amikor a mérés lábnyoma nem vízfelület volt. Például délkeleti szélirány esetén a turbulens fluxusok a terasz felületét jellemezhetik, különös tekintettel a szenzibilis hőáramra. Végezetül szinkronizáltuk a sugárzás, a hidrometeorológiai rutin méréseket az örvény-kovariancia mérések idősorával.

3 Eredmények

A 2.1 fejezetekben ismertetett számításokat *Matlab* -ban végeztük el és grafikonokon ábráztuk.

3.1 Meteorológia

Méréseinkből megállapítottuk, hogy az uralkodó szélirány északi. Ez egybevág egyébként az Országos Meteorológiai Szolgálat méréseivel is. A maximális szélesség méréseink alatt 3,22 m/s volt, az átlag szélesség 0.98 m/s. Ez az örvény-kovariancia méréshez kedvező, de nem a legoptimálisabb, mivel kis szélességnél mellett könnyebben sérülnek a mérési eljárás, illetve a Monin-Obukhov hasonlósági elmélet alapfeltevései.

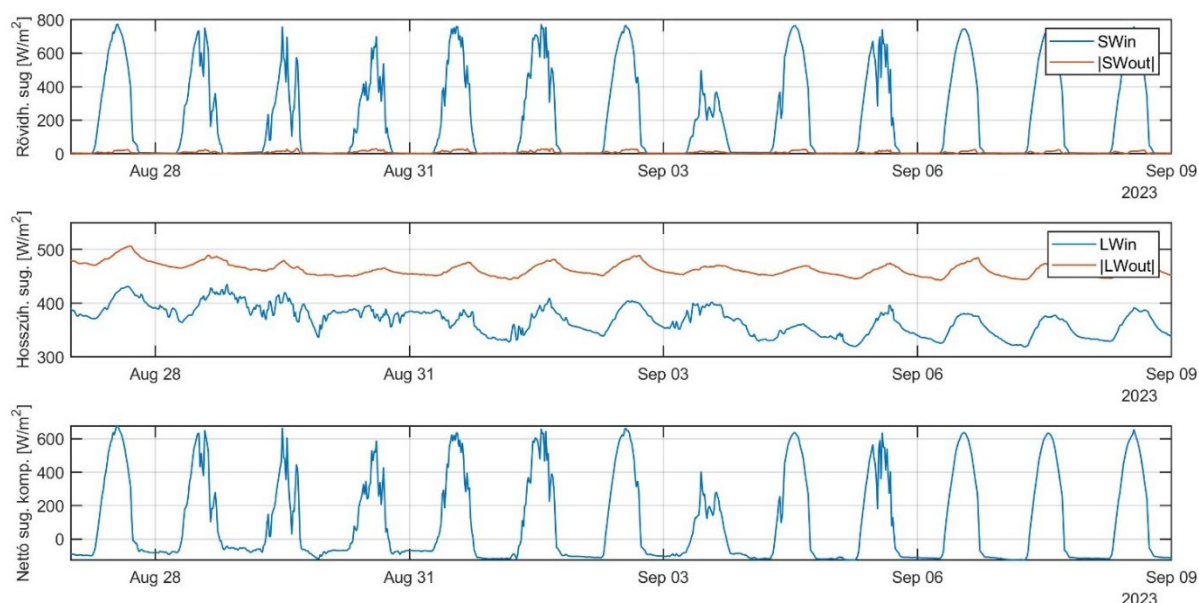


4. ábra. A mért rutin hidrometeorológiai változók idősorai.

A víz- és lég-hőmérséklet viszonyából megfigyelhető, hogy a víz a meleg évszak végén és a lehűlési időszak kezdetén szinte mindvégig melegebb a levegőnél. A tó átlaghőmérséklete: 31.9 °C a légkör átlag hőmérséklete: 22.0 °C, amely egy jelentős különbség. Ebből arra következtethetünk, hogy a szenzibilis hőáram nagy intenzitású, azonban negatív előjelű lesz, amennyiben a tavat melegítő hőáramlási irányt vesszük pozitívnak. A páratartalom a vártnál alacsonyabb, átlagosan 60%.

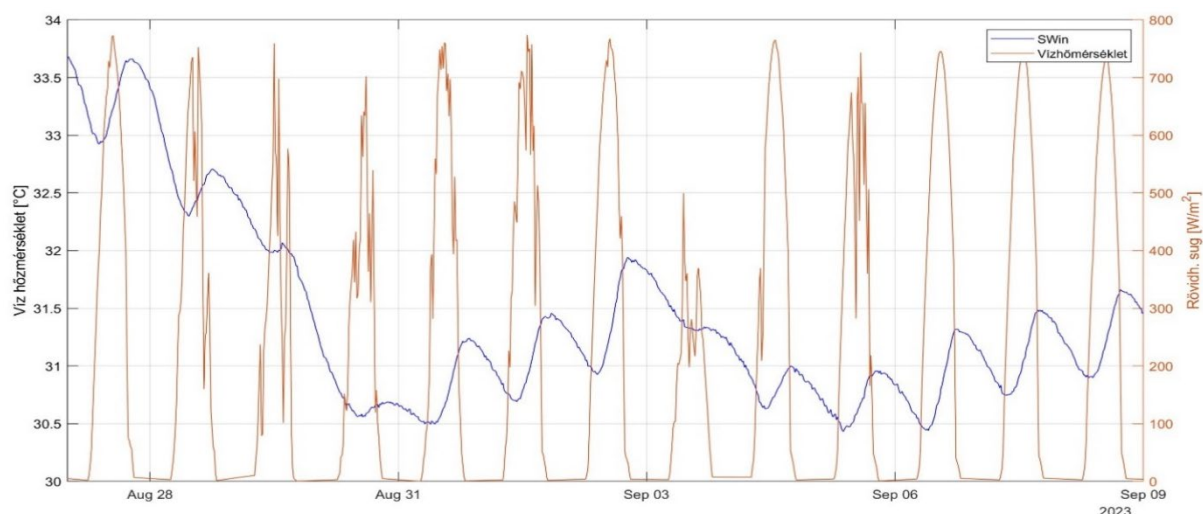
3.2 Sugárzások

A rövidhullámú sugárzásból látható (5. ábra), hogy a mért időszakban alacsony/elenyésző volt a felhőborítottság, hat napon egyáltalán nem volt felhőzet. Ennek köszönhetően többnyire mérni tudtuk a napsütés napi ciklikusságát.



5. ábra. A mért rövid- (fent) és hosszúhullámú (középen) bejövő és kimenő sugárzáskomponensek. Lent: a négy komponensből képzett nettó sugárzás időszora.

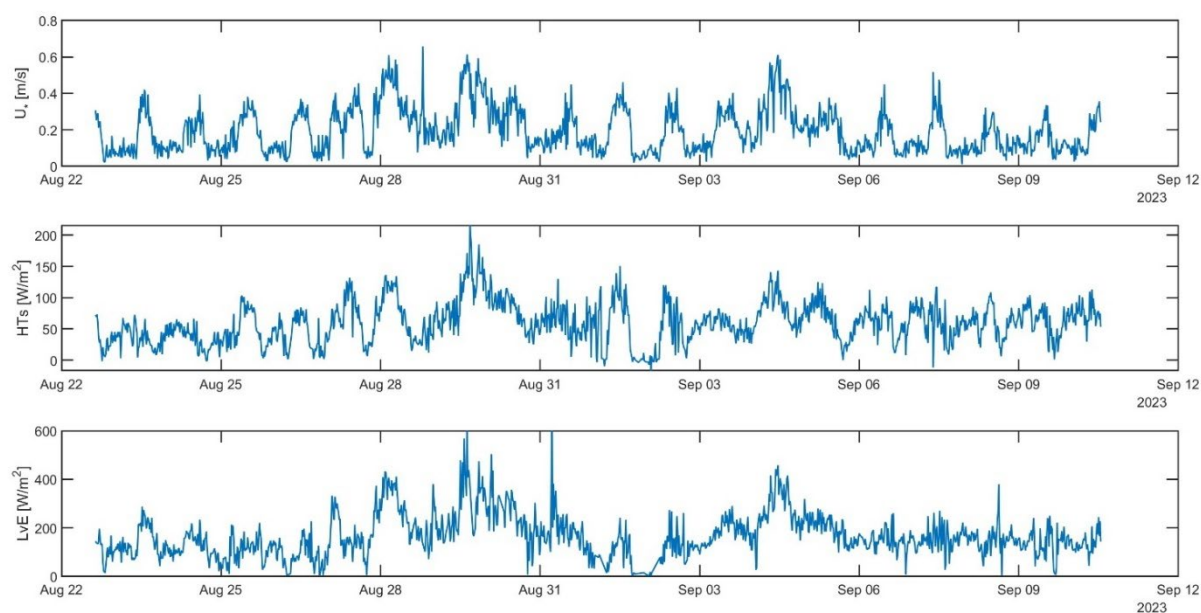
A beérkező rövidhullámú sugárzásnak csak töredéke verődik vissza, az majdnem teljesen elnyelődik a tóban. Ez megmutatkozik a víz hőmérséklet változásain is melyek ugyanazt a ciklikusságot írják le, pár óra késleltetéssel (6. ábra). A távozó hosszúhullámú sugárzás azonban több, mint a beérkező; ez várható volt annak ismeretében, mivel a víz hőmérséklete magas és a kisugárzott hőmennyiség annak negyedik hatványával arányos a Stefan-Boltzmann törvény szerint (Foken, 2008). A nettó sugárzás mértéke tehát a rövidhullámú sugárzástól függ a legerősseben és ezáltal annak a ciklikusságát követi.



6. ábra. A víz hőmérséklet és rövidhullámú sugárzás egyidejű időszorai.

3.3 Turbulens hőáramok

A szenzibilis hőáramok átlaga $59,16 \text{ W/m}^2$, szórása $32,84$ és bár többnyire ezen értékek körül mozognak a mért adatok, helyenként elérik a 200 W/m^2 -t is, illetve negatív értéket is felvesznek. Ezeknek az adatoknak a viszonylagosan alacsony értéke is abból következik, hogy a tó hőmérséklete általában magasabb, vagy legalább olyan magas, mint a levegőé.

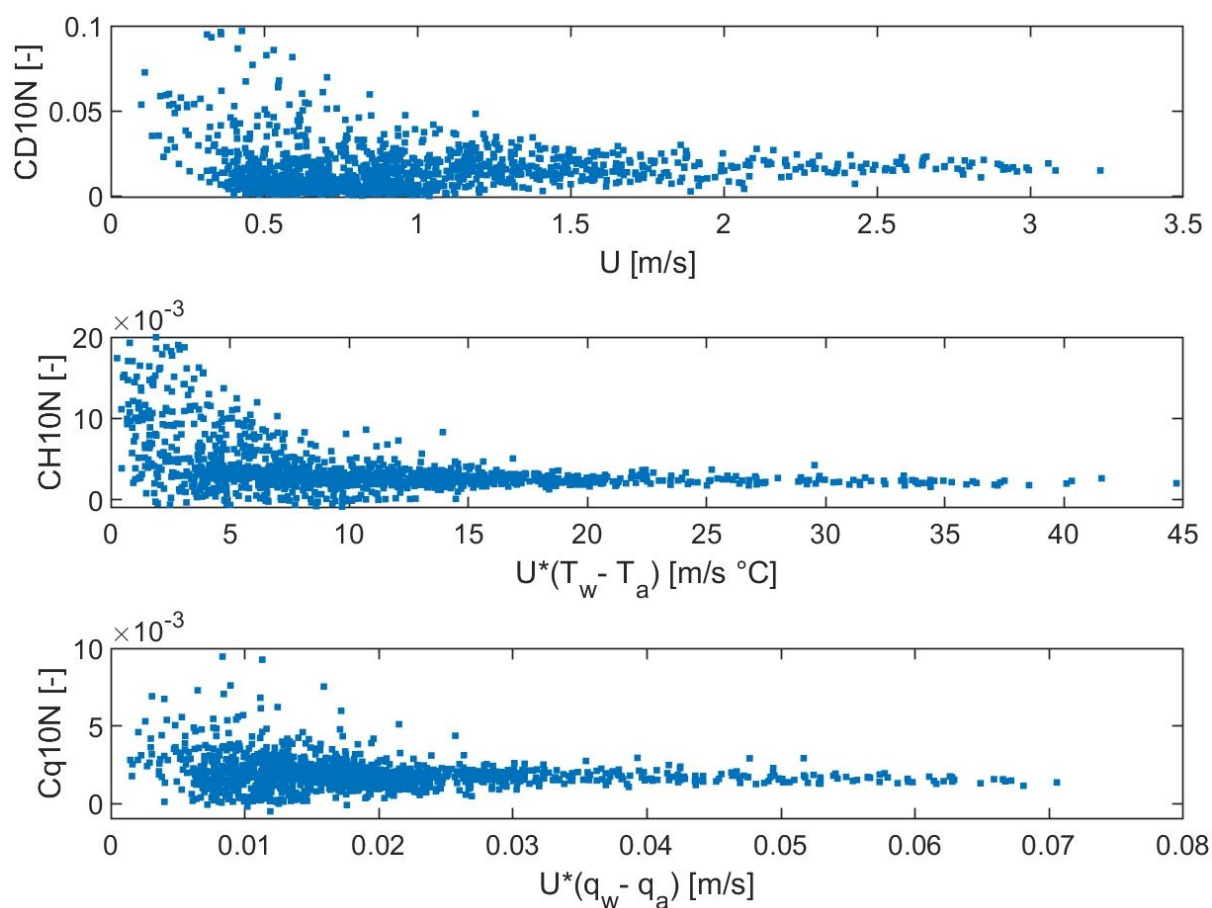


7. ábra. A mért impulzus- (fent), szenzibilis (középen) és látens (lent) hőáramok.

A látens hőáram, azaz a párolgás során a tóból elvonódó hő, átlaga $163,36 \text{ W/m}^2$, szórása $89,81$ de egyes mérések adatai elérik a 600 W/m^2 -t is. A magas vízhőmérséklet ellenére a párolgási hő értéktartománya nem nagyobb, mint más nem melegvízű hazai tavak esetében, mint például a Balaton (Lükő et al., 2022).

3.4 A turbulens áramok átviteli együtthatói

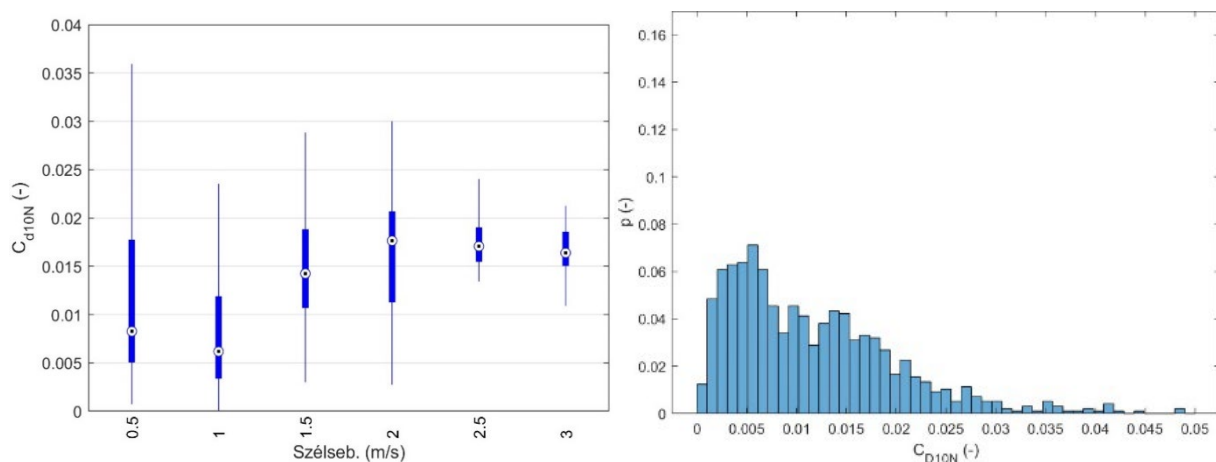
Az átviteli együtthatók kiszámított értékeinek értékelése fontos, hogy el tudjuk dönteni, hogy használhatóak-e. Az értékeken, jól látszik, hogy a szélesség (U) növekedésével arányosan konvergálnak egy értékhez.



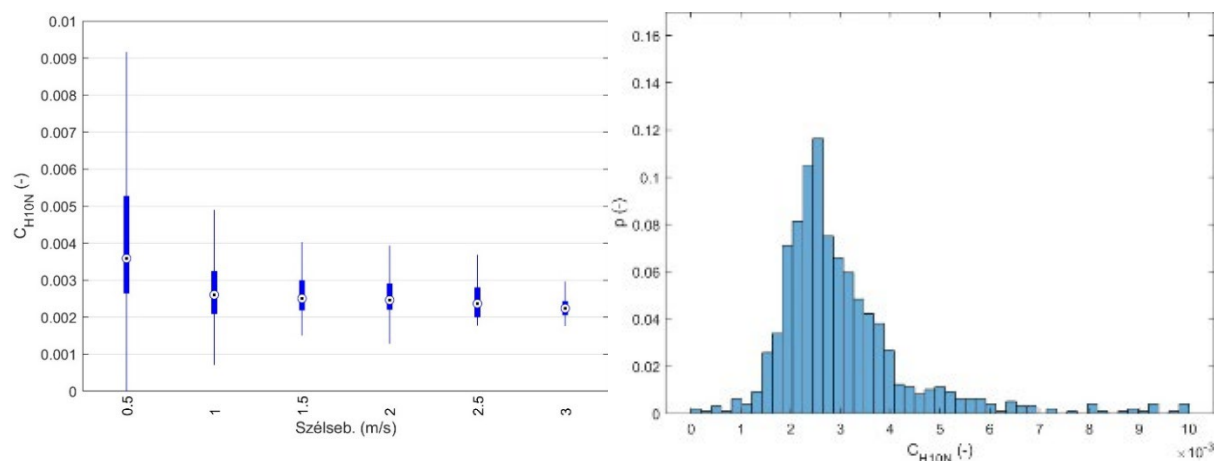
8. ábra. Az örvény-kovariancia mérésekből levezetett átviteli együtthatók, az adott áramot alakító meteorológiai változók függvényében.

Jól látható, hogy nagyobb szélesség értékeknél ez az érték tovább csökken. Ez a boxplot ábrákon (9-11. ábra) is jól látszik, hogy minél nagyobb a szélesség annál kisebb

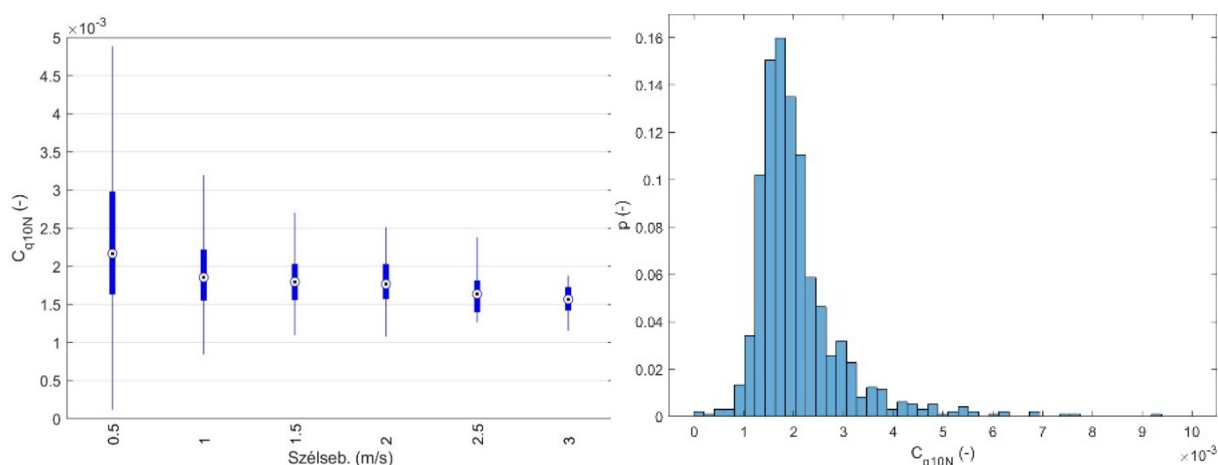
intervallumon oszlanak el a mérések. Ez további mérésekkel vizsgálandó pontosabb eredményekért.



9. ábra. A számított C_{d10N} együttható szélesség függése (balra), illetve eloszlása.



10. ábra. A számított C_{H10N} együttható szélesség függése (balra), illetve eloszlása.



11. ábra. A számított C_{q10N} együttható szélesség függése (balra), illetve eloszlása

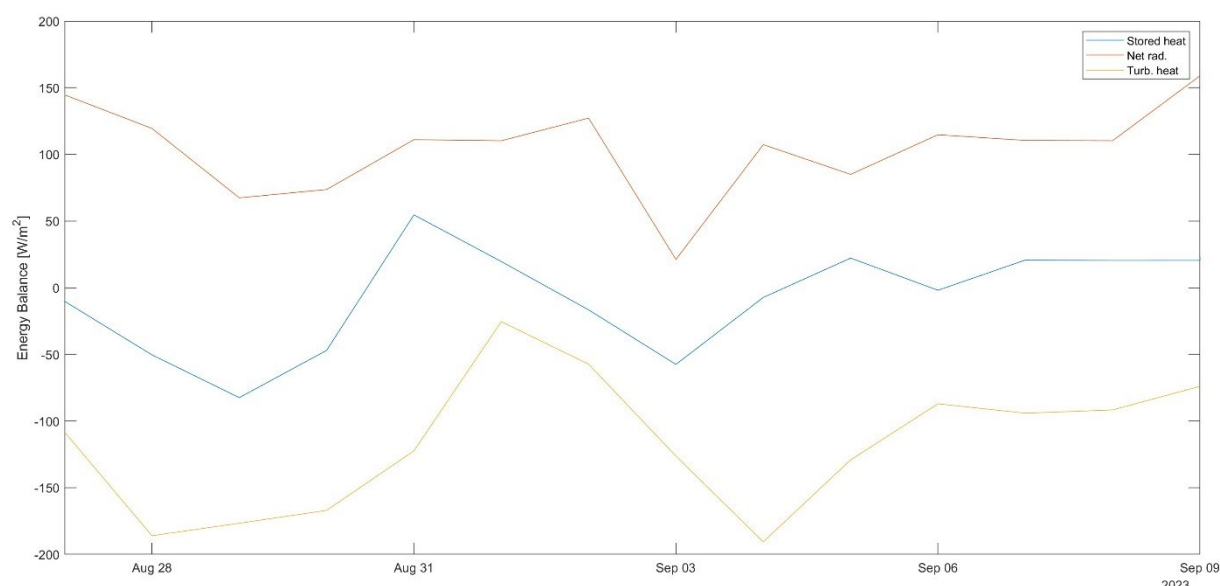
A bemutatott eloszlás görbék alapján az impulzusáram átviteli együtthatójának medián értéke 0,018. A kapott érték egy nagyságrenddel nagyobb, mint amit a nemzetközi irodalom

alapján vártunk. Azonban fontos kiemelni, hogy a mért szélsőérték tartomány kis értékeket tartalmaz, amikor a mechanikai turbulencia mellett erőteljes szerephez juthat a felhajtó erő okozta turbulens keveredés. Ilyen esetben C_{D10N} értéke több nagyságrenddel meg tud növekedni (Guseva et al 2023).

A hőáram együtthatók esetében az átviteli együtthatók értékei az alábbiak szerint alakultak; a látens hőáram együtthatójának medián értéke $1,86 \cdot 10^{-3}$, míg a szenzibilis $2,27 \cdot 10^{-3}$. Mindkét érték meghaladja a Balatonra korábban kapottakat ($1,2 \cdot 10^{-3}$, illetve $1,8 \cdot 10^{-3}$), azonban arányuk közel megegyezik (Lükő et al, 2022b).

3.5 Energiamérleg komponensek

Az energia mérleg komponensei a nettó sugárzás, a turbulens hőáramok (szenzibilis és látens), az advektív hőáramok (vízhözam által szállított) és a tóban tárolt hő. A mért komponenseink a nettó sugárzás, a turbulens hőáramok. Ezekből számítottuk a tóban tárolt hőt (12. ábra).

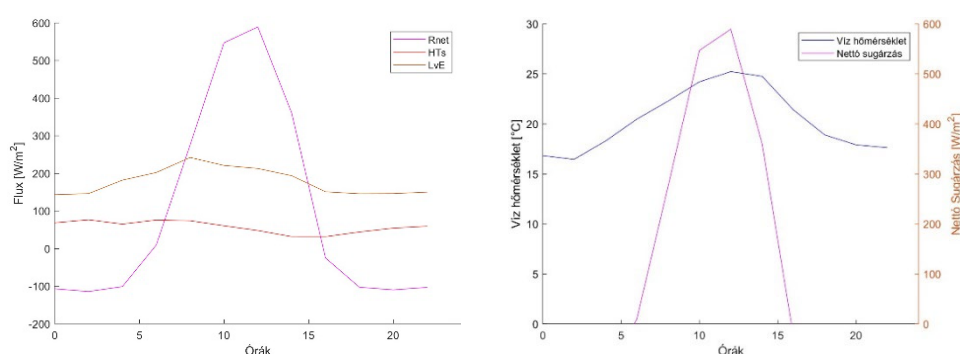


12. ábra. A tóban tárolt hő (Stored heat), a nettó sugárzás (Net rad.) és a turbulens hőáramok (Turb. heat) napi átlagértékének alakulása.

Jól látható, hogy a tóban tárolt hő ingadozása követi a sugárzás ingadozását. Az energia mérlegben, ezek alapján az adatok alapján tehát van egy fennmaradó összeg. Azzal a közelítéssel élünk, hogy zárjuk az energia mérleget, így becslést tudunk adni az advektív hőáramok mértékére.

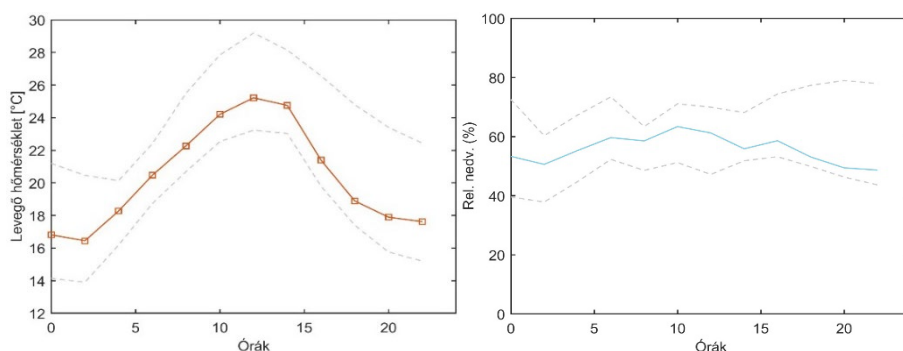
3.6 Napon belüli változékonyság

A napi eloszlás görbéket minden kétóránkénti átlagértékekből készítettük. Jól bemutatják a komponensek napi ciklikusságát, illetve következtetni engednek az egyes meteorológiai meghajtó folyamatok szerepére. Amíg a nettó sugárzás napi átlagértéke 107 W/m^2 a szenzibilis hőfluxusé 59 W/m^2 a látens hőfluxusé $161,8 \text{ W/m}^2$. A lenti ábrán a két turbulens komponens pozitív értékkel mutatjuk a jobb összehasonlíthatóság kedvéért, jóllehet azok negatív értékűek, mivel az időszak során a tó hűlését eredményezték. Megfigyelhető továbbá, hogy a vízhőmérséklet ciklikussága a nettó sugárzás ciklikusságát követi, miután a legerősebb tag az energiamérlegben, azonban pár órás késleltetéssel (13. ábra).



13. ábra. Balra: a mérési időszak során mért nettó sugárzás és turbulens hőáramok átlagos napi menetgörbéi. Jobbra: a vízhőmérséklet és a nettó sugárzás átlagos egyidejű menetgörbéi.

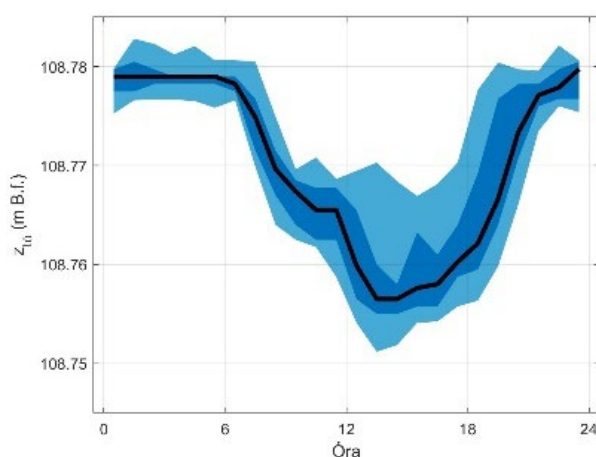
A tó fölött mért léghőmérséklet ezzel hasonlóan nagy napi ingással jellemezhető, amely átlagosan 10°C volt. Ezzel szemben a relatív nedvességtartalom számottevően kisebb napi ingadozást mutatott és várttal ellentétben annak szokatlanul alacsonyra adódott átlagértéke, amely 60% volt. Érdeemes megjegyezni, hogy 80% feletti értéket is kevés esetben rögzítettünk. Ez azért meglepő, mert a meleg vízfelszín miatt sokkal erőteljesebb párolgást és ezzel magasabb relatív nedvességet feltételeztünk korábban.



14. ábra. A mérési időszak során a léghőmérséklet (balra) és relatív páratartalom (jobbra) napon belüli alakulása. A sávok a 25, illetve 75%-os percentiliseket jelölnék.

3.7 Vízmérleg

A tó üzemeltetőjétől kapott vízállás adatokból elkészítettük a napi vízállás grafikonját (15. ábra). Ezen jól látható, hogy egy napi ciklus alatt a tó vízszintje a kezdeti vízállásból a déli kifolyón történő megnyitás hatására vízszintesökkenés indul meg. A kora délutáni órákban a megnyitást visszaállítják a megelőző értékre, aminek hatására a vízszint pár óra alatt visszaáll eredeti értékére és az éjszaka folyamán nem változik érdemben. Ez alapján feltételezhetjük, hogy a forrásokból érkező és a két kifolyón leeresztett vízhozam napi összege megegyezik. Ezt használjuk fel a 2.1.7 fejezetben ismertetett hőmérleg egyenletben.

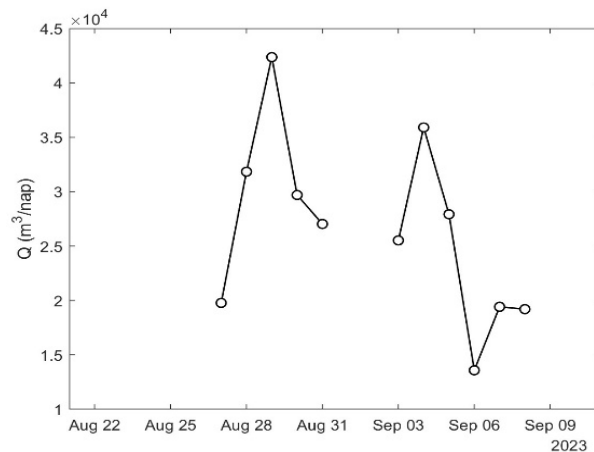


15. ábra. A mérési időszak során mért vízállás átlagos napi alakulása. A sávok a 10-25-75-90%-os percentiliseket jelölik.

Ebből kiindulva tekintettük a kimenő és a bejövő vízhozamot egyenlőnek. A számításban a bejövő víz hőmérsékletét időben konstansnak feltételeztük, mivel a kutatóbúvárok által végzett mérések alapján az elmúlt hónapokban nem volt érdemi hőmérsékletváltozás megfigyelhető. A beérkező vízhőmérsékletet tehát $T_{w,in} = 37,2^{\circ}\text{C}$ -nak vettük fel. Az elfolyó víz esetén a hőmérsékletet ($T_{w,out}$) időben változónak tekintettük és a két mélységben mért tóközépi hőmérsékletek átlagaként határoztuk meg, amelyek így a 2.1.7 fejezetben bemutatott összefüggések alapján becslést adtunk a tóba beáramló vízhozamra, aminek átlaga:

$$Q_{napi} = 26\,569 \text{ m}^3/\text{nap}$$

$$Q = 308 \text{ l/s}$$



16. ábra. Az energiamérleg alapján számított napi be- és kifolyó vízhozamok.

Ezt az átlag értéket a X. ábrán mutatott 11 napjára kapott vízhozamok átlagaként kaptuk. Az idősor elejéről több napot nem tudtunk figyelembe venni, mert ekkor a hosszúhullámú sugárzásmérő nem működött jól. A szeptember elsejei és másodikai értékeket pedig azért vetettük el, mert irreálisan kis értéket kaptunk.

Ez a korábbi mérésnél kapott 400-410 l/s (szóbeli tájékoztatás alapján) jelentősen kisebb, hozzávetőleg annak 75%-a. Szakirodalom alapján feltételezhetjük, hogy az örvény-kovariancia módszer rendelkezik egy 20%-os hibával, miszerint a két hőáramot számottevően alul tudja becsülni (Foken, 2008b, Lükő et al., 2022b). Ez esetben alulbecsüljük a vízhozamot, amit a 20%-os hibával korrigálhatunk. Ekkor számításunk a következő átlag vízhozamokat adja:

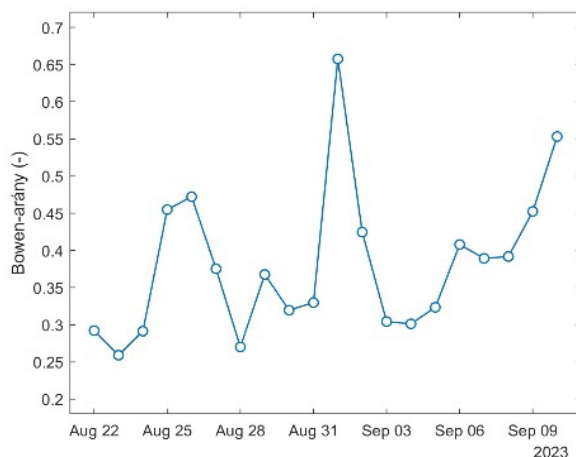
$$Q_{2,napi} = 34\,047 \text{ m}^3/\text{nap}$$

$$Q_2 = 394 \text{ l/s}$$

Ez már jobban megközelíti a szóbeli tájékoztatás során kapott értéket, illetve Starosolszky (1984) mérését is.

A napi vízhozamok hőmérleg alapú számításakor egyidejűleg megvizsgáltuk a Bowen-hányados alakulását, amely a szenzibilis és látens hőáramok hányadosa (17. ábra). Ezen látható, hogy a Hévízi-tó esetén a rendkívül meleg felszínhőmérsékletnek köszönhetően a hányados értéke akár több, mint kétszerese a Balatonon mért értékhez képest. Az idősoron kitűnik szeptember elseje, amikor a hányados értéke meghaladta 0,6-et. A szélidőssorral összevetve megállapítható, hogy ekkor a szélirány miatt az örvény-kovariancia mérés lábnyoma a fürdő teraszára feltételezhető, vagyis a kapott turbulens áramok, nem a tóra jellemző értéket mutatnak. Bár a hányados értéke, nem extrém, de ugyanez mondható el szeptember

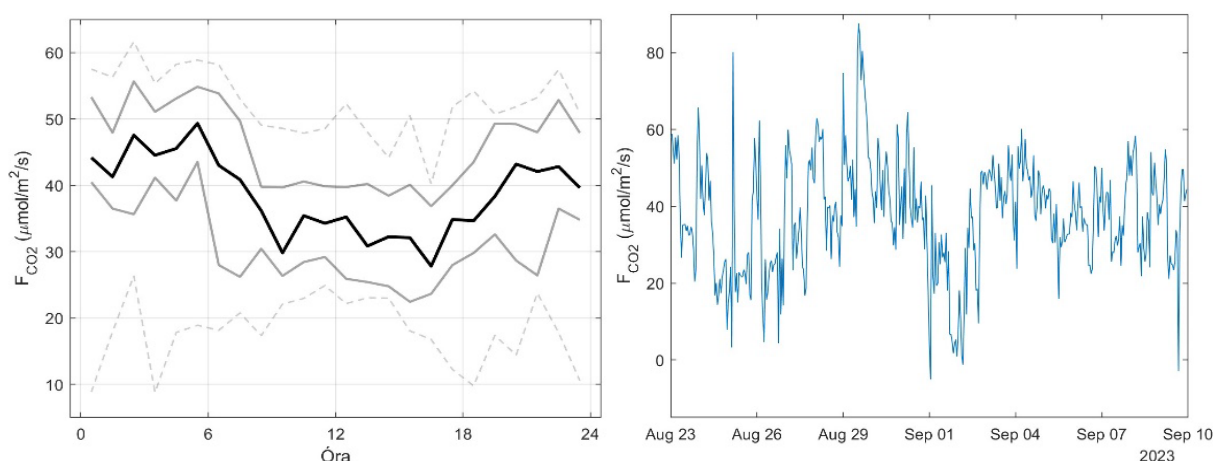
másodikáról is. Ez viszont jól magyarázza, hogy miért kaptunk irreális vízhozam értékeket e két napra és, hogy azok eltávolítása az átlagvízhozam meghatározásából helyes döntés volt.



17. ábra. A Bowen-hányados napi átlagértékének alakulása.

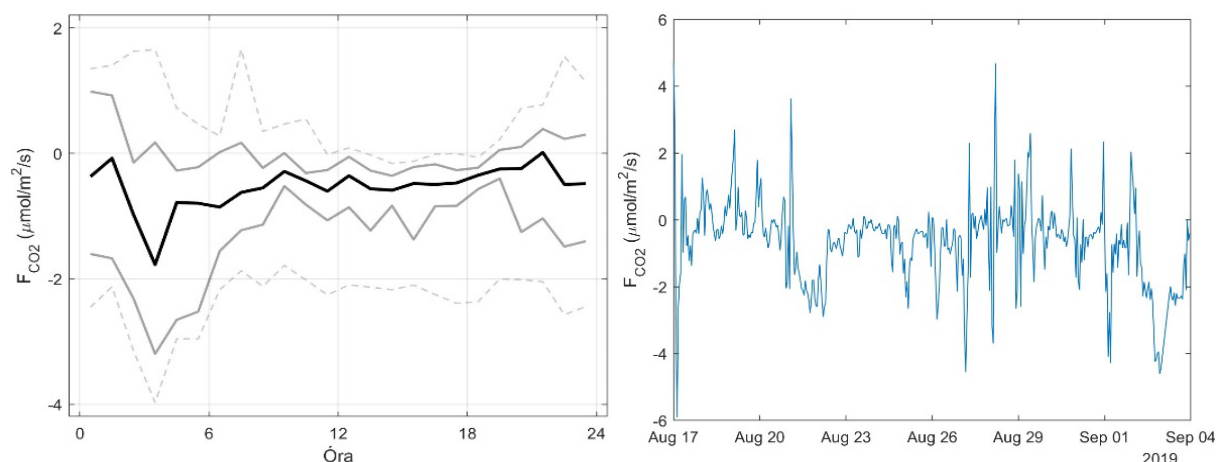
3.8 Szén-dioxid fluxus

Végezetül érdemesnek látjuk bemutatni a Hévízi-tó esetén mért szén-dioxid fluxusokat, jóllehet ezek nem kapcsolódnak szervesen a hő- és vízmérleg számításokhoz. A Hévízi tavon mért szén-dioxid fluxusok azonos klímájú tavakhoz képest igen magas. A közel három hetes periódus során a CO₂ fluxus átlagértéke 37,584 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ $\pm$ 14,85 szórással. A mért értékek mediánja: 36,647 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. A CO₂ áram napi menetgörbéjén egy jól kivehető ciklikusság jelenik meg, miszerint a tó CO₂ kibocsátása az éjszakai órákban nagyobb, míg napközben közel 25%-kal lecsökken. Ez összefüggésben állhat a vízállással, mivel annak napi menetgörbéje közel megegyező.



18. ábra. A Hévízi-tó felett mért CO₂ fluxus időszora (jobbra) és az abból levezetett napi menetgörbe és annak változékonysága (10-25-75-90% percentilisek jelölésével).

Ezzel szemben a 10 kilométeres távolságban fekvő Balatonon mért fluxusok ennél jóval kisebb értékek körül mozognak. Átlag szén-dioxid fluxus érték hasonló nyár végi, ősz eleji időszakba a Balatonon: $-0,684 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Tehát amíg a Balaton elnyel szén-dioxidot a Hévízi-tó kibocsátja azt. A Balaton esetén az átlag körüli szórás $1,316$, míg a medián $-0,442 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. A Balatonon napi ciklikusság sem volt megfigyelhető. A mért értékek szórása azonban a nappali órákban töredékére csökkent, míg tág határok közt mértünk értékeket az éjszaka folyamán. Utóbbi időszakban mind elnyelés, mind kibocsátás előfordult.



19. ábra. A 2019 nyár végén a Balaton felett mért CO_2 fluxus időszora (jobbra) és az abból levezetett napi menetgörbe és annak változékonysága (10-25-75-90% percentilisek jelölésével).

4 Összefoglalás és Konklúziók

A Hévízi-tó kiemelt értékű víztestünk, amely számos változáson ment át az elmúlt évtizedekben, többek közt a bányászatnak és az egyre intenzívebb turizmusnak köszönhetően. A tó fenntartható üzemeltetése és az esetleges jövőbeli fejlesztések megkívánják, hogy részletesen ismerjük a tó hidro- és termodinamikai rendszerét, vízkészletének elemeit, illetve hőháztartását a jelenlegi állapotban.

Emiatt a fenti TDK kutatás keretében hidrometeorológiai méréseket folytattunk a tóban közel három héten át, hogy feltérképezzük a tó hőháztartását és az azt alakító meteorológiai folyamatokat. Ennek keretében feltártuk a légkör-víz határfelületen zajló turbulens hőcserét, amelyek alapján a későbbiekben már rutin meteorológiai mérések is elegendőek lehetnek a hőcserék meghatározására. Megállapítható, hogy a párolgási hő nagyobb, mint egy felszíni vizek által táplált tó esetében, azonban a szenzibilis hőáram jóval nagyobb emelkedést mutatott. Míg más tavaknál (pl. Balaton) a szenzibilis hőáram kis súllyal bír, addig a Hévízi-tó esetében egy számottevő komponens.

Egyúttal kísérletet tettünk a tavat tápláló forrás napi átlagos vízhozamának becslésére tisztán energiamérleg alapon. Eljárásunk hibáját 25% körülire becsüljük, azonban az örvénykovariancia módszer ismert alulbecslésének figyelembevételével ez majd 5% alá csökkenthető. Véleményünk szerint ez arra enged következtetni, hogy egyrészt a tó energiamérlegét megfelelően fel tudtuk tártani első közelítésben, másrészt pedig, hogy a javasolt módszerrel vizsgálható a tó vízkészletének alakulása is. Például a számítási eljárásunk pontosításával becsülhető lehet a nem forrásvízből eredő esetleges felszín alatti hozzá- és elszivárgás a későbbiekben.

Hangsúlyozzuk, hogy jelen kutatás egy első lépés volt a tó hő- és vízháztartásának feltárásában. A pontosabb képhez további mérésekre van szükség. Egyrészt más időszakok vizsgálata mindenképp javasolható, úgy, mint nyár közepe, illetve hideg téli periódusok. Előbbi esetén várható a víz- és léghő különbségének előjelváltása, míg utóbbi esetben egy még erőteljesebb hőmérsékleti gradiens a légkör és a vízfelszín között. Másrészt jelenlegi vizsgálatunk pontbeli mérésekre alapult, amelyek kiterjesztettünk a teljes tóra. Ez bizonyosan hibákat eredményezett a számításunkban, amelyek mértéke feltárandó, mivel számottevő lehet.

A vízmérlegszámítás tekintetében pedig fontos lesz nyomon követni és pontosan meghatározni a tó két levezetőcsatornáján szállított vízhozamokat és azok napon belüli, a tó vízállásától és a műtárgyak szabályozásától függő alakulását. Az északi kifolyó esetében – kis szelvényméretének köszönhetően – már végeztünk vízhozammérést. A déli kifolyó méretéből adódóan akusztikus Doppler-elvű műszerrel lesz mérhető. Ezt követően, a mért vízhozamok ismeretében, a tó víz- és energiamérlege összekapcsolható lesz a beérkező és távozó hőmennyiségeken és a párolgáshőn keresztül.

5 Irodalomjegyzék

- Nagy, J. (2022.): *Hévíz térségének hidrogeológia vizsgálata*, BME-VVT, M.Sc. Thesis, Budapest
- Foken, T. (2008): *Micrometeorology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Foken, T. (2008): *The energy balance closure problem: an overview*. -Ecological Applications, 18(6), 1351–1367.
- Guseva, S., Armani, F., Desai, A. R., Dias, N. L., Friborg, T., Iwata, H., et al. (2023). Bulk transfer coefficients estimated from eddy-covariance measurements over lakes and reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037219.
- Lükő, G. (2020): *Momentum and heat exchange at the air-water interface of Lake Balaton from eddy-covariance measurements*, BME-VVT, M.Sc. Thesis, Budapest
- Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T. (2022a): *Intra-Seasonal and Intra-Annual Variation of the Latent Heat Flux Transfer Coefficient for a Freshwater Lake* - *Atmosphere*, 13, 352.
- Lükő, G., Torma, P., Weidinger, T., Krámer, T. (2022b), *Air-Lake Momentum and Heat Exchange in Very Young Waves Using Energy and Water Budget Closure* - *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD036099
- Mauder, M. and T. Foken. (2011.): *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3*. *Arbeitsergebnisse* 3(46):60, ISSN 1614-8916.
- Monin, A. S. and A. M. Obukhov. (1954.): *Basic Laws of Turbulent Mixing in the Atmosphere near the Ground.*, *Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst* 24(151):163–87.
- Starosolszky, Ö. (1984): *A Hívi tó belső áramlásai*, -Hidrológiai Közlöny 1984. 6. sz., Budapest