



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

A Hévízi-tó áramlási viszonyainak numerikus modellvizsgálata különböző időléptékek mentén

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

Reska Zsombor János
[SJBJSX]

Konzulensek:

Dr. Torma Péter
egyetemi docens, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Dr. Hajnal Géza
egyetemi docens, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Lükő Gabriella
doktorandusz, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Nagy Judit Barbara
doktorandusz, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Budapest, 2024.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	- 4 -
2. Problémafelvetés és célkitűzés	- 5 -
3. Mérések.....	- 7 -
3.1 Mérési pont és mérőműszerek.....	- 8 -
3.2 Hidrometeorológiai körülmények	- 9 -
3.3 Keszthely-Tanyakereshti meteorológia mérőállomás	- 12 -
4. Módszertan.....	- 15 -
4.1 Alkalmazott hidrodinamikai modell.....	- 15 -
4.1.1 Számítási háló.....	- 15 -
4.1.2 Numerikus hidro- és termodinamikai modell.....	- 18 -
4.1.3 Modell matematikai háttere	- 20 -
4.1.4 Modell peremfeltételei.....	- 21 -
4.2 Felhajtóerő fluxusok.....	- 21 -
4.3 A feláramló csóva jellemzői.....	- 23 -
5. Eredmények	- 25 -
5.1 Modell eredmények.....	- 25 -
5.2 Meteorológiai és a konvekciós meghajtó folyamatok.....	- 28 -
5.3 Csóva terjedése.....	- 30 -
6. Konklúzió.....	- 34 -
7. Irodalomjegyzék	- 36 -

Kivonat

A Hévízi-tó Európa legnagyobb melegvizű tava és gyógyfürdője, amelynek melegvizű forrása egész évben működő fürdő lehetőséget biztosít. A melegvíz egy közel 40 méter mély kráterből érkezik az amúgy sekély tóba. A tó összetett áramlási viszonyait alapvetően a mélyen beáramló melegvíz alakítja amellett, hogy annak napon belüli változása is van a tó vízszint-szabályozásának következtében. E két folyamat mellett természetesen a meteorológiai viszonyok további változékonyságot okoznak. A kráter térségében a fel- és leáramlások évszakos irányváltozását és átfordulását figyelték meg a tavon dolgozó kutatóbúvárok. Dolgozatomban numerikus áramlástanival modellezéssel szeretném feltárni az áramlási viszonyok mind nagy, mind rövid időskálájú jellemzőit. A nagy időlépték esetében az áramlási jellemzők szezonális változását vizsgáljuk, amely a tó hőmérsékleti szerkezetének, vagyis rétegződésének a hatását jelenti a cirkulációra. Itt a meteorológia alakította felszíni vízhőmérséklet és a mélységi melegvíz hőmérsékletének különbsége játszhat döntő szerepet feltételezésünk szerint. A rövid időlépték esetén pedig a tó napi ciklusú vízszint-szabályozásának hatását határozzuk meg az áramlási képre és a hőmérsékleti viszonyokra.

A vizsgálatokat FVCOM 3D hidro- és termodinamikai modellel végzem. A peremfeltételeket a meteorológiai meghajtó erők (léghőmérséklet, relatív légnedvesség, szélsébség és szélirány, ki- és bejövő rövid- és hosszúhullámú sugárzás) idősorai, valamint a turbulens cserefolyamatok átviteli együtthatói adják. A korábbi részletes hidrometeorológiai méréseim segítségével kalibrálom és igazolom a modellt, amikhez a mért vízszinteket, az áramlási irányokat és nagyságokat, valamint a vízhőmérsékleteket használom fel. Ezt követően végzem el az igazolt modellel a hosszú idejű (több hónapot magába foglaló) szimulációt, amely eredménye alapján vizsgálom a Hévízi-tó áramlási és hőmérsékleti viszonyainak alakulását, valamint azok lehetséges meghatározó folyamatait a különböző időléptékeken.

Abstract

Lake Hévíz, the largest geothermal lake in Europe, uniquely offers continuous therapeutic bathing opportunities all year round, sustained by its warm springwater. The thermal water flows from a nearly 40-meter-deep crater in the otherwise shallow lake. The lake's complex circulation patterns are primarily influenced by the inflow of the spring, along with the daily regulation of the water level. Next to these two driving forces, the meteorological processes cause further changes in the circulation. The divers working in the lake observed a seasonal change in the upwelling and downwelling currents near the crater. In this research, I aim to investigate the underlying causes of these changes with numerical hydrodynamic modelling on both long-term and short-term time scales. On long-term scale we investigate the impact of seasonal changes in the stratification on the lake's circulation. According to our theory, the observed phenomenon is caused by the difference between the water surface temperature driven by the meteorology, and the deep warm-water spring. On short-term scale, we intend to investigate the impact of the water level regulation over the daily changes in flow and water temperature distribution.

I will carry out my analysis using the FVCOM 3D hydro- and thermodynamical model. The boundary conditions are provided by the time series of meteorological driving forces (air temperature, relative humidity, wind speed and direction, incoming shortwave radiation), as well as the transfer coefficients of turbulent exchange processes. The model will be calibrated and validated using my previous detailed hydrometeorological measurements, which include water levels, velocity directions and magnitudes, and water temperatures. Using the validated model, I will perform a long-term (several months) simulation. Based on the results, I will analyze the circulation patterns and temperature conditions in Lake Hévíz, as well as the potential key processes influencing these conditions on various temporal scales.

1. Bevezetés

Hazánk egyik legkülönlegesebb természeti jelensége a negyven méter mély Hévízi-tó, melyet a meder mélyén feltörő melegvizű forráscsoport táplál. A tó turisztikai értéke is kiemelkedő, mivel azon kevés melegvizű tavak közé tartozik melyek vize egész évben fürödhető és ezek közül is a legnagyobb területű. A tó területe $46\,350\text{ m}^2$, térfogata $127\,950\text{ m}^3$. Legmélyebb pontja a forrásbarlangon kívül 39 méter, átlag mélysége 2,76 méter. A tó északi részén található a forráskráter, melynek mélyén nyílik a forrásbarlang. Innen ered számos meleg- és hidegvizű forrás, amely a tavat táplálják. Ezek együttesen a barlang szájánál kialakított, körülbelül egy négyzetméteres, mesterséges szűkületen keresztül érnek a tóba, melyet gyűjtőnéven a dolgozatban forrásnak fogok nevezni (Nagy, 2022).

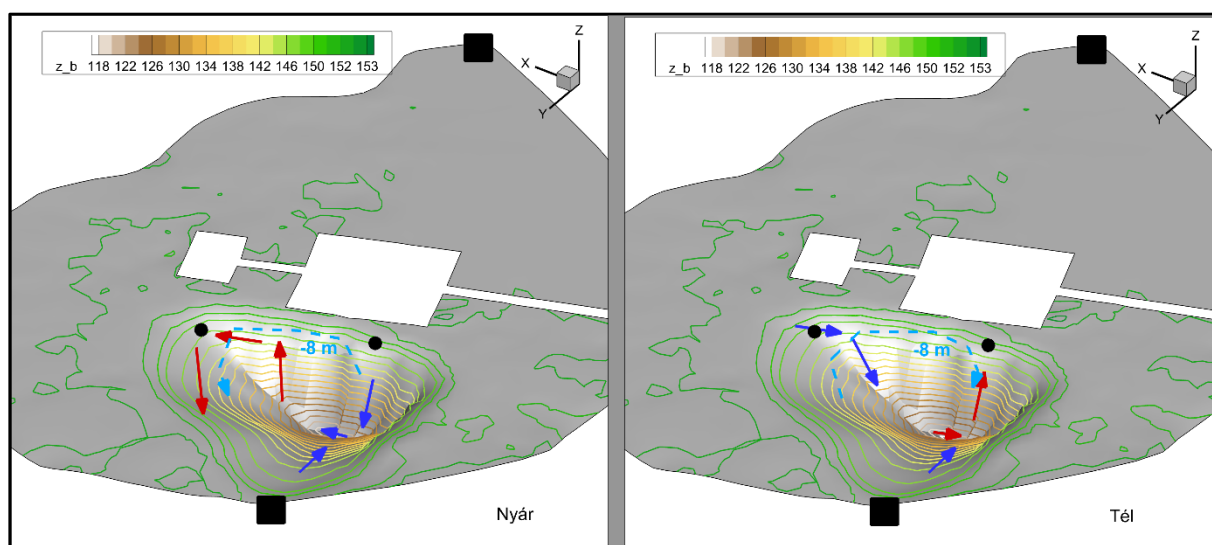
A tó hőmérséklete a hetvenes évektől csökkenni kezdett. Ekkor számos kutató vizsgálta ennek kiváltó okát és kerestek megoldási lehetőségeket. Végül 1985-ben a BME Vízépítési Tanszék, Haszpra Ottó vezetésével „kéményt” tervezett, mely egy szivattyúk nélküli csőrendszer, ami a forrástól közvetlenül a fürdőépülethez vezeti fel a meleg források vizét (Haszpra, 1985). Ez a mai napig működik karbantartások és felújítások mellett. Mivel a forrás vízhozama jelenleg csak becsléssel állapítható meg ezért a „kéményen” felérkező vízhozam is csak becsülhető.

Jelen dolgozatomban a Hévízi-tó kráterében létrejövő feláramlás cirkulációjának jellemzőit vizsgálom. Ennek eszközeit a numerikus modellezés, valamint a felhajtóerőből eredő és a meteorológiai meghajtókból származó fluxus számítások adták. Terepi méréseket végeztünk 2023 nyarán és 2024 telén. Ezek felhasználásával készítettünk numerikus modellt a tóról. A modell eredményeit a felhajtóerőhöz kapcsolódó számítások eredményeivel együtt értékelve a cirkuláció szezonális változásainak okát tárjuk fel ezen dolgozatban. Ezeken kívül tárgyalom a forráscsóva sajátosságait is.

Dolgozatom bemutatja a tó jelenlegi állapotát, feltárja és magyarázza a cirkuláció szezonális átfordulásának jellemzőit és okait, valamint alapot adhat jövőbeli szimulációkra a klímaváltozás potenciális hatásának vizsgálatához.

2. Problémafelvetés és célkitűzés

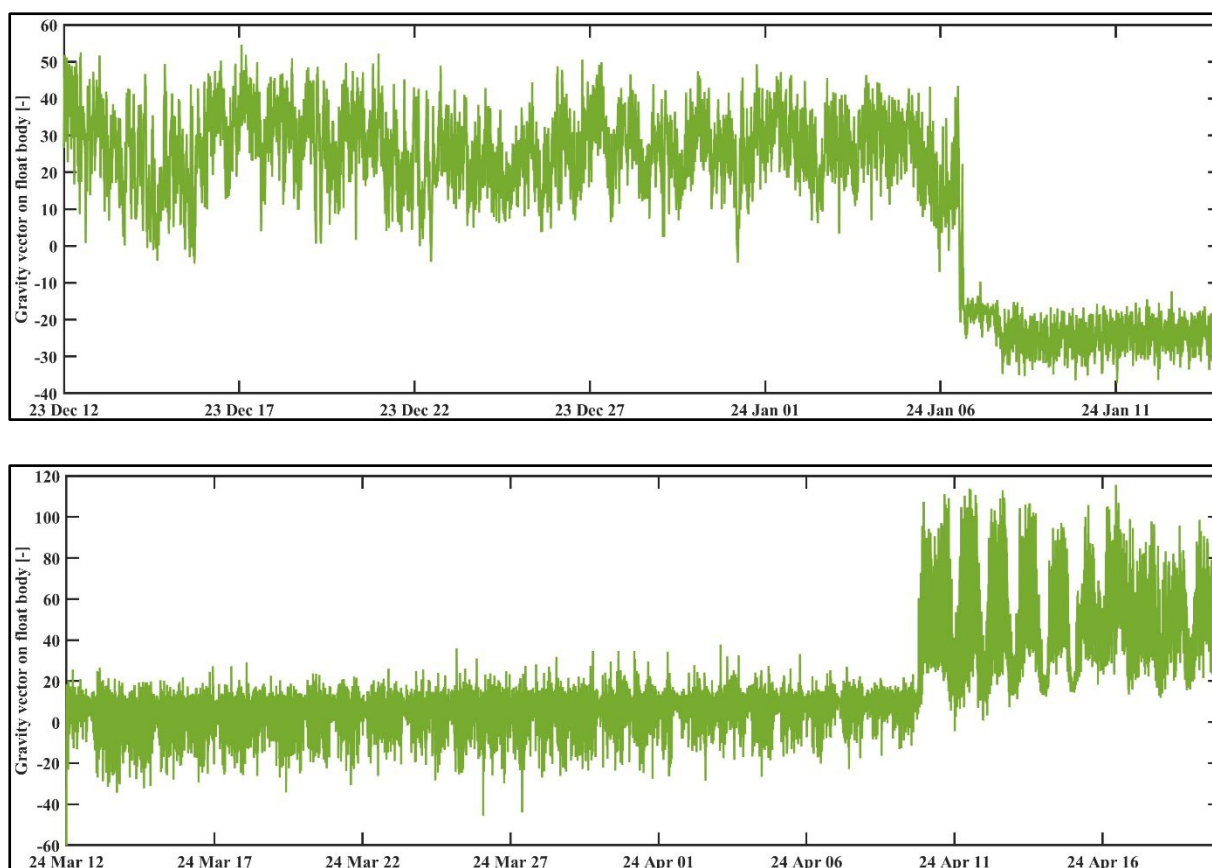
A tó cirkulációjának jól érzékelhető, szezonális váltakozását először a tavon dolgozó kutató búvárok figyelték meg. Nem meghatározott időközönként a tavi lebegtetett hordalék mozgásán megfigyelték, hogy időnként irányt vált. A kráter oldalán további mintázatot figyeltek meg: a forrás által kibocsátott, kénhidrogénben gazdag víz nyomán fehér szőnyegszerű foltok jelennek meg a kráter falán. Ezek a fehér foltok szulfidoxidáló fonalas baktérium telepek, amelyek a forrásvízből származó elemi ként kötik meg. E lerakódások helye a feláramlás menti falakon jelenik meg pár nap után. Így a cirkuláció fordulásokor kijelölik az új feláramlási zónákat



1. Ábra: Sematikus ábrák a cirkuláció szezonálisáról

A sematikus ábrákat (1) a búvárok beszámolóí alapján készítettük a forráskráter cirkulációjáról. Ezek szerint nyáron a forráskráteren belül az óra járásával megegyező irányban haladnak az áramlatok, míg télen óra járásával ellentétesen (kék szaggatott vonal). A forrás csóvája nyáron kelet felé ér a felszínre, télen pedig a nyugati oldalon, a felszíni hidegebb víz pedig a csóvával ellentétes oldalon bukik alá a forráshoz. (Az alábukást Moll Károly kutatásában (1941.) is feljegyezte, azonban a cirkulációt nem vizsgálta.)

A jelenség okának kutatása érdekében egy billenőlapos áramlási mérőműszert helyeztek el a forráskráter peremén, amely a billenőlap dőlésszögét rögzíti időbélyeggel ellátva ((2.) ábra), mutatva ezzel az áramlás irányát.



2. Ábra: Billenő mérőműszer dőlésszögének mérései. Felül: téli időszak Alul: tavaszi időszak

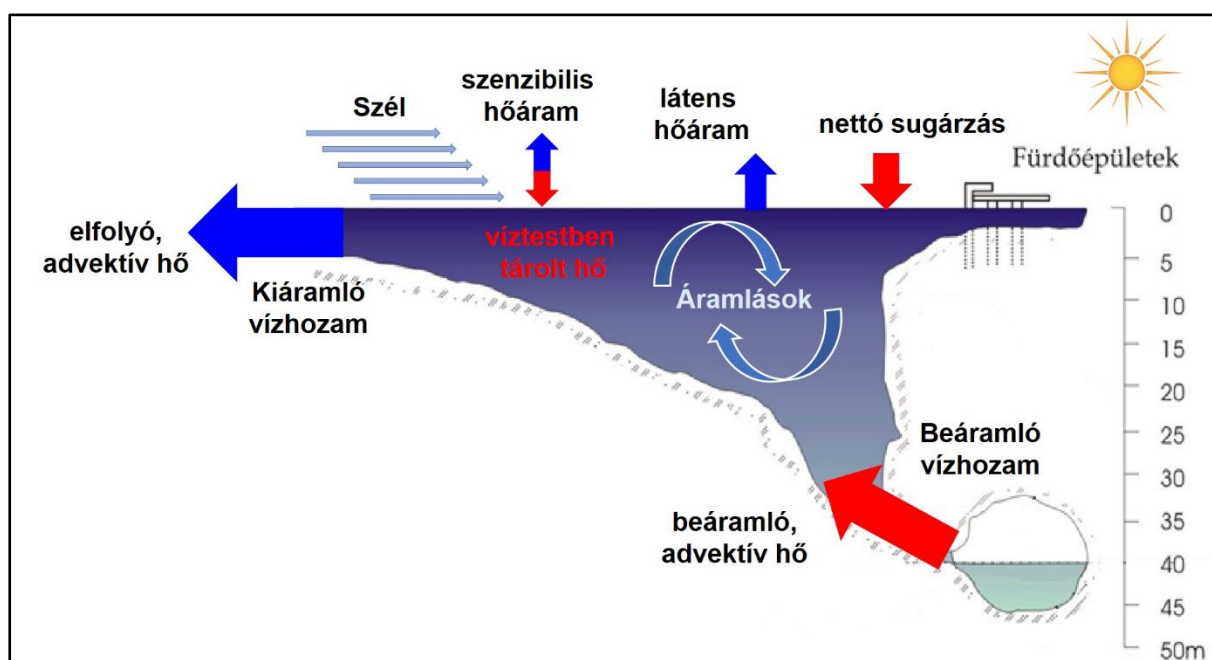
Egy egész éves mérés során két eseményt rögzítettek 2023. december 12. és 2024. április 18. között amikor a műszer dőlésszöge drasztikusan megváltozott. Mindkét alkalommal a dőlésszög jelentős megváltozása után egy új egyensúlyi helyzet látszik beállni. Az idősorokon egy napon belüli szisztematikus ingadozás is megfigyelhető, amelyet azonban nem a meteorológiai hajt meg, hanem a tó vízszint-szabályozásának következménye.

Hipotézisünk szerint ezek az átfordulások a víz hőmérsékletéből adódó sűrűségváltozások indukálta konvekciós áramlások miatt következhetnek be. Nyáron és télen eltérő sűrűségű a tó alsó- és felső rétege. Ez okozhat eltéréseket a felszínről alábukó vízmennyiségében, és az alábukás helyszínében is. Természetesen ebben erősen közrejátszik a kráter térségének domborzata, vagyis a mederesés térbeli eloszlása.

Ebben a dolgozatban a tó cirkulációs irányváltásának lehetséges okait és az irányváltás jellegzeteségeit vizsgálom. A dolgozat célja a cirkuláció változását befolyásoló tényezők feltárása, valamint annak részletes bemutatása, hogy a fordulat milyen körülmények között és hogyan mehet végbe.

3. Mérések

Kutatásunk során 2023 nyaratól egészen mostanáig kampányszerű méréseket végeztünk egy, a Hévízi Tófürdő teraszán felállított hidrometeorológiai mérőállomás segítségével. A mérőállomás egy nyári, és egy téli időszakban átfogóan mérte a hidrometeorológiai meghajtó erőket. A nyári időszak mérései két héten keresztül tartottak (Reska, 2023), míg a téli időszakban négy héten keresztül zajlott a mérés (Torma et al., 2024). A mért meghajtó erők és hidrometeorológiai paraméterek a következők: a víz hőmérséklete (két mélységben a felszínhez közel), beérkező- és a tóból eltávozó hosszú- és rövidhullámú sugárzás, valamint az örvény kovariancia módszerrel mért légkör-víz határfelületi turbulens cserefolyamatok, vagyis az impulzusfluxus, szenzibilis és látens hőáramok, (a szén-dioxid fluxus), illetve a szélesebesség, a szélirány, a levegő hőmérséklete és páratartalma. A mérések célja egyrészt az volt, hogy feltárjuk a tó energiaháztartási viszonyait.



3. Ábra: Hévízi-tó hidro- és termodinamikai meghajtóerői

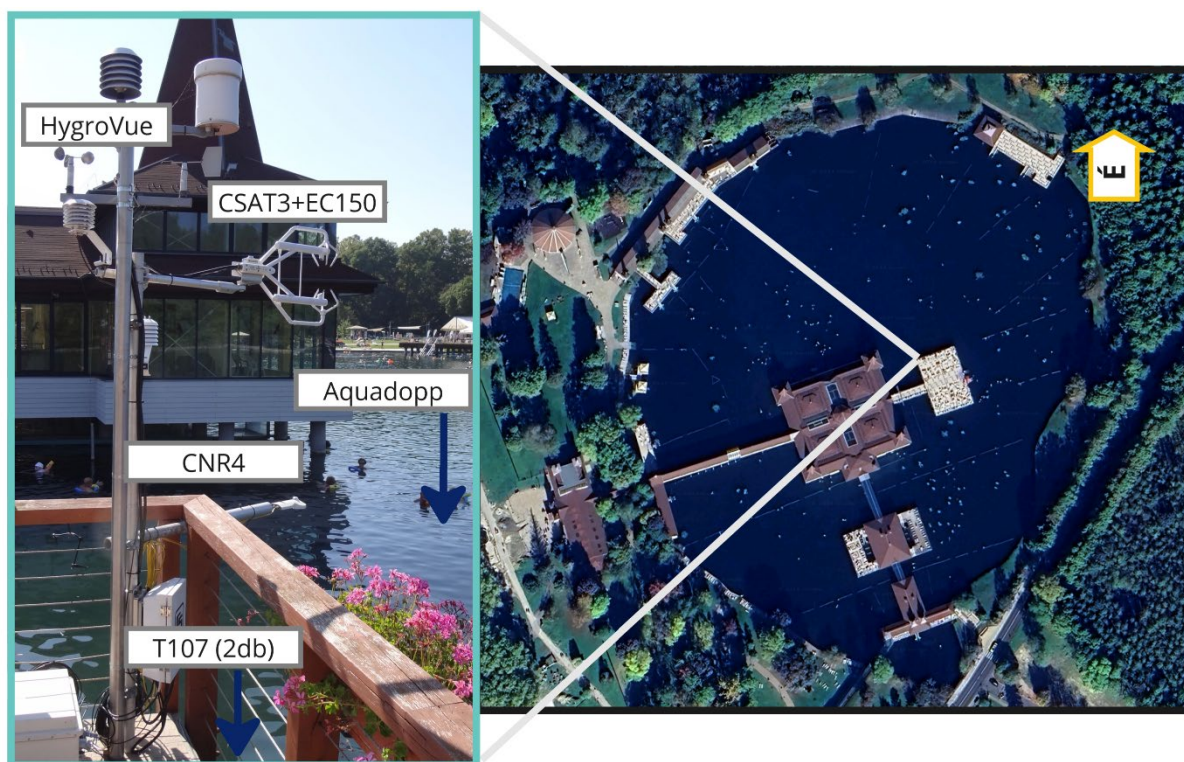
Az átfogó mérés-kampányokon túl a 2023-as nyári mérés kezdetétől fogva mérőeszközeink folyamatosan rögzítették a vízhőmérsékletet, hosszú- és rövid-hullámú sugárzást, a légkör hőmérsékletét és a relatív páratartalmát 2024 októberéig. Az alábbi fejezet ezen mérések helyszínét, eszközeit és a mérési eredményeken keresztül a tó hidrometeorológiai körülményeit mutatja be.

Bemutatom továbbá, hogy hogyan végeztem minőségellenőrzést a mérési adatsorokon, valamint, hogy hogyan dolgoztam fel ezeket, illetve hogyan vettem össze a saját méréseim, a Keszthely-tanyakeresztí mérőállomás méréseinek adataival, majd gyűjtöttem össze egy átfogó, éves adatsorba.

3.1 Mérési pont és mérőműszerek

Mérőállomásunk helyszínét úgy választottuk meg, hogy a mért időszak alatt a méréseink mérési lábnyoma reprezentatíván a tó felületén legyen. Hévízen – hasonlóan, mint Magyarország többi részén –, az északi- vagy északnyugati szélirány domináns. Ezért választottuk a tófürdő teraszának északnyugati sarkát, ahol egy helyen gyűjthettünk be adatokat a vízhőmérsékletről, a látens- és szenzibilis hőáramokról, valamint a sugárzásról.

A nyári és téli méréseket azonos helyszínen, azonos mérőeszközökkel végeztük el a következetes adatgyűjtés biztosítása érdekében.



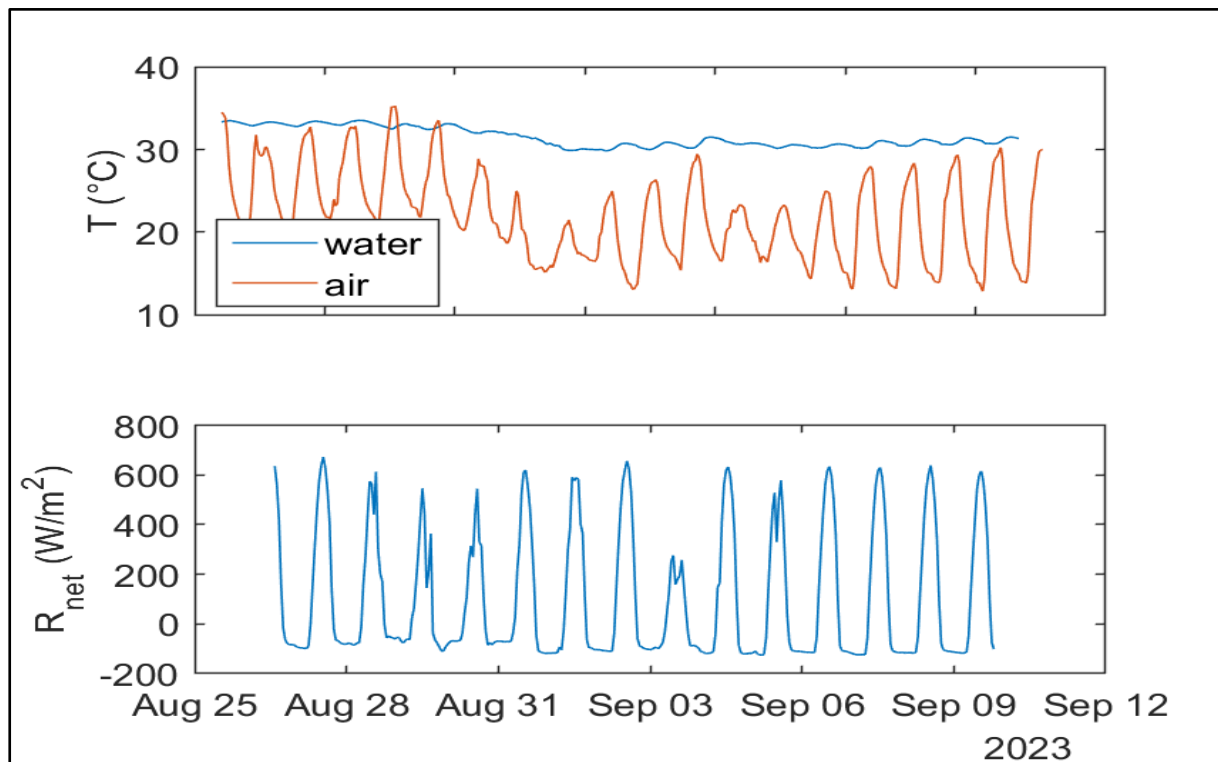
4. Ábra: A telepített hidrometeorológia mérőállomás és annak elhelyezkedése a tófürdő teraszán

Az örvény-kovariancia elvű mérés során a *Campbell Scientific CSAT3 + EC150* műszeregyüttessel mértünk. A *CSAT3* háromdimenziós szélmérő szinkronizálva mért az *EC150* nyílt utas gázanalizátorral, amit speciálisan örvény-kovariancia mérésekhez

fejlesztettek vízgőz fluxus és szén-dioxid fluxus mérésére. 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 a légkör hőmérsékletét és páratartalmát. Végezetül a vízfelszín alatt 20 és 70 cm-es mélységben mértük Campbell T107 típusú termisztorokkal a vízhőmérsékletet.

3.2 Hidrometeorológiai körülmények

Első mérési kampányunk 2023. augusztus 22. és szeptember 10. között zajlott. Ekkor telepítettük először a mérőállomást.



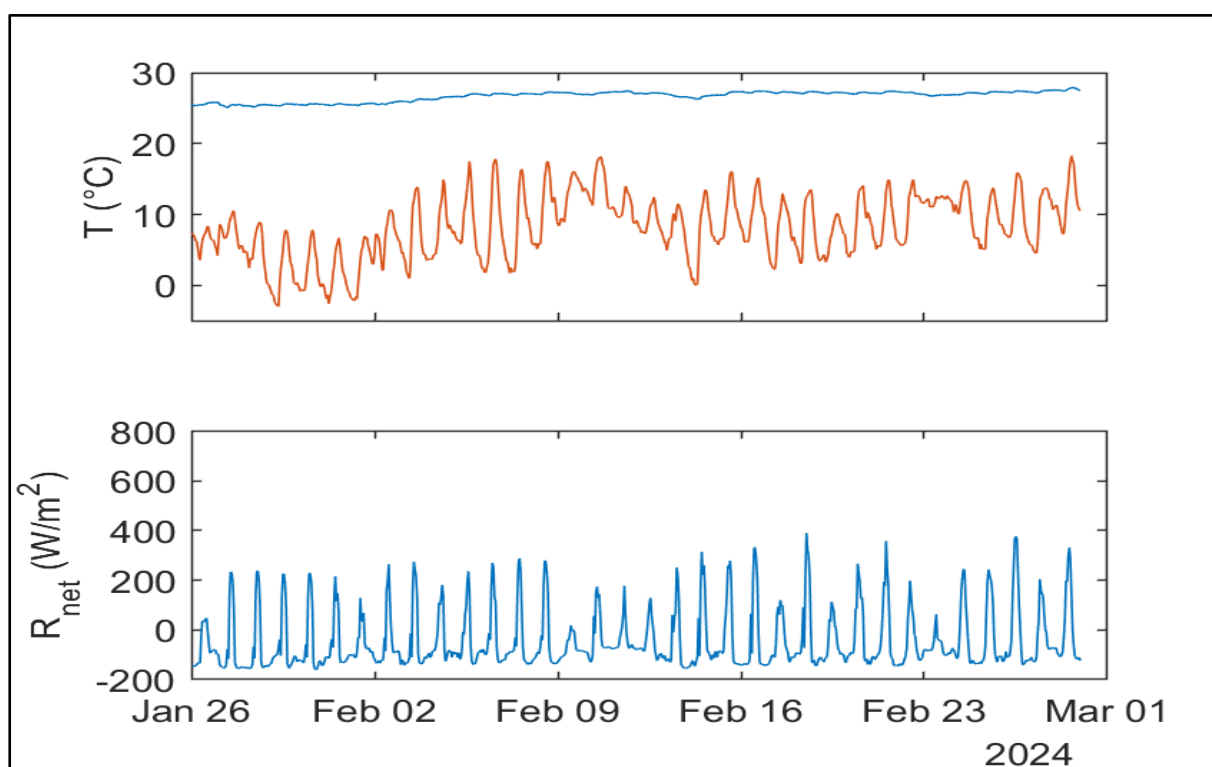
5. Ábra: Hidrometeorológiai mérések 2023. augusztus 22. – szeptember 10.

Többnyire szélcsendes és derűs idő volt a mérés időtartama alatt; a szélsébség nem haladta meg a 3 m/s-ot, ami kismértékű turbulens hőáramokat eredményezett. A szélirány dominánsan északi. A víz átlaghőmérséklete 31,9 °C volt, mely a meleg, nyárvégi napok időjárása ellenére is végig magasabb volt, mint a levegő hőmérséklete. Ennek következtében a szenzibilis hőáram iránya azt mutatta, hogy a tóból adódik le hőenergia a légkörbe és nem

fordítva. A páratartalom a mért időszak alatt átlagosan 60% volt. A nyári időszakra a következő átviteli együtthatókat mértük (Reska, 2023).

Az impulzusáram átviteli együtthatójának medián értéke $C_{D10N} = 10,2 \cdot 10^{-3}$. A kapott érték egy nagyságrenddel nagyobb, mint amit a nemzetközi irodalom (Foken, 2008) alapján vártunk. Fontos azonban kiemelni, hogy a mért szélességtartomány kis értékeket mutat, ilyenkor pedig a mechanikai turbulencia mellett erőteljes szerephez juthat a felhajtóerő okozta turbulens keveredés. Ilyen esetben C_{D10N} értéke több nagyságrenddel meg tud növekedni (Guseva et al., 2023). A látens hőáram átviteli együtthatójának medián értéke $C_{H10N} = 1,4 \cdot 10^{-3}$, míg a szenzibilisé $C_{q10N} = 1,1 \cdot 10^{-3}$.

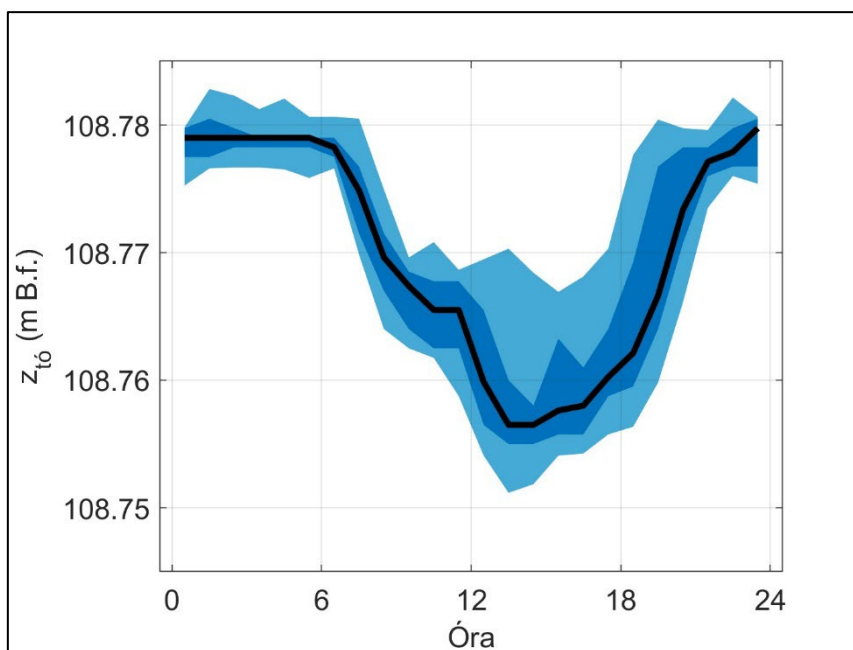
A téli időszakban ismét átfogó terepi méréseket végeztünk, a nyári mérésekkel megegyező helyen, valamint ugyanazokkal a mérőműszerekkel az összehasonlíthatóság érdekében. A téli mérési kampány 2024. január 26-tól 2024. február 28-ig tartott.



6. Ábra: Hidrometeorológiai mérések 2024. január 26. – február 28.

A téli időszak során is alacsony szélességeket mértünk, melyek alig haladták meg a 3 m/s-ot. A szélirány a nyárihoz hasonlóan ebben az időszakban is dominánsan északi volt. A víz átlagos hőmérséklete 26,7 °C volt, míg az átlagos relatív páratartalom 73%. Az impulzusáram átviteli együtthatójának medián értéke $C_{D10N} = 10,4 \cdot 10^{-3}$, a látens hőáram átviteli együtthatójának medián értéke $C_{H10N} = 1,0 \cdot 10^{-3}$, míg a szenzibilisé $C_{q10N} = 0,6 \cdot 10^{-3}$.

A tó forrásának vízhozam mérésére nem volt lehetőségem, mivel a forrás negyven méter mélyen található a felszín alatt és a forrás barlang morfológiája tovább nehezíti a mérést. Ezért a tóba érkező vízhozamot a tavat szabályzó elvezető csatornák és a tó vízállása alapján becsültem. A tó vízszintjét olyan módon szabályozzák, hogy az éjszakai órákban a vízszint konstans marad (7), oly módon, hogy a vízszint elérje a tóközepi épület üvegfalának alsó élét, ezzel csökkentve a hőveszteségét az épületnek. Ezzel szemben a nappali órákban a vízszint az üvegfal alsó pereme és a vízszint között egy pár centis rést hoznak létre, hogy átlegegőzhessen az épület.



7. Ábra: Tó vízállásának átlag értékei egy napon belül tóközépen

A tó üzemeltetője (Hévízi Szent András Reumakórház és Gyógyfürdő) és a NYUDUVIZID (Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság) rendelkezésemre bocsátotta az általam mért időszak vízhozamának idősorait az északi és déli kifolyó csatornára, valamint a tóközép vízszint állásának idősorát. Kigyűjtöttem az éjszakai órák vízállásait és az átlagukat vettem, ami 108,78 m.B.f. volt a mért időszak alatt. Majd megkerestem azt a periódust amelyikben a legjobban közelítette ezt a vízállást a tó vízszintje és a legstabilabban tartotta azt. Így összeadva a két elfolyó csatorna vízhozamát ebből a periódusból, megkaptam, hogy a forrás vízhozama:

$$Q_{out,Dél} + Q_{out,Észak} = 330,29 \text{ l/s} + 105 \text{ l/s} = 435,29 \text{ l/s} \quad (1)$$

A forrás hőmérséklete a vízhozammal ellentétben mérhető, átlag értéke 36,6 °C. A mért intervallumon belül a forrás vízének hőmérséklet-eltérései 0.1 °C-on belül mozogtak. Ez azt

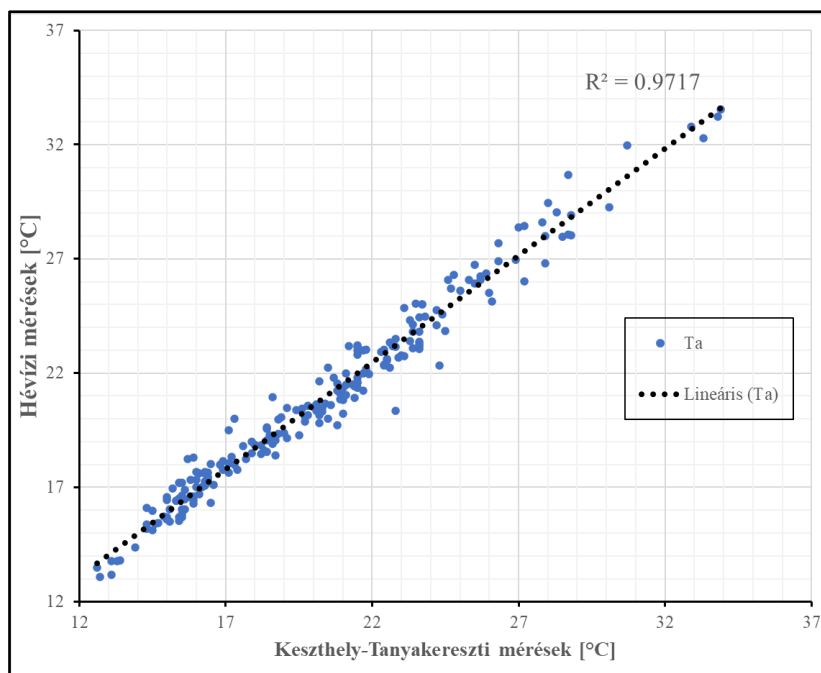
jelenti, hogy a forrás hozama sem változott jelentős mértékben a mért időszakban, ezért ezt konstansnak tekintem a modellezés szempontjából.

3.3 Keszthely-Tanyakereshti meteorológia mérőállomás

Mivel a szélsébségről nem állt rendelkezésünkre elegendő adat a kampányméréseken kívül, ezért a teljes évre kiterjedő számításokhoz szükséges meteorológiai meghajtó folyamatok idősorait, a mért időszakokon kívül a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató adatbázisából (https://odp.met.hu/climate/observations_hungary/hourly/) szereztem be.

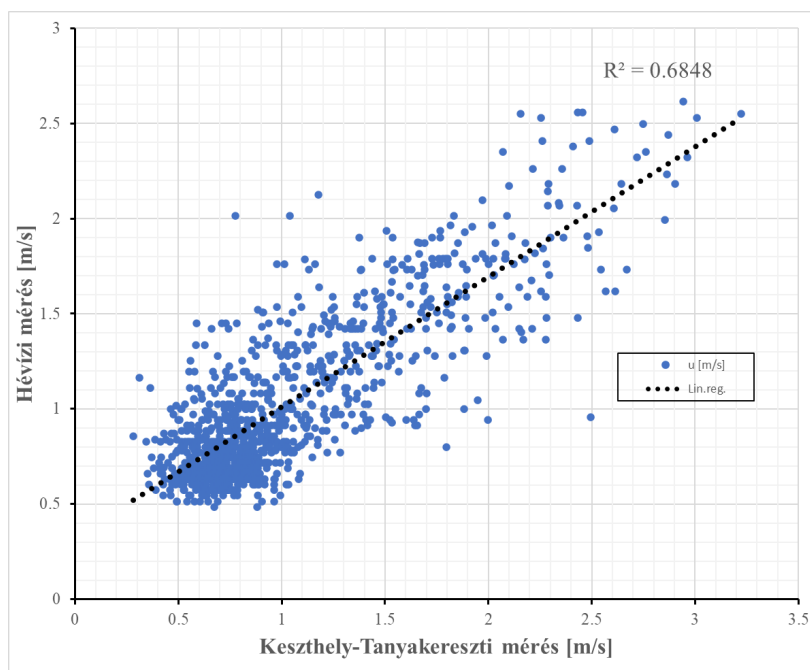
A hosszú időléptékű vizsgálatokhoz szükségem volt a kampányméréseken és a 2023. augusztus 22. óta mért adatokon túl a szélsébségek és szélirányok adatsorára. Ezért a Hévízi-tóhoz legközelebbi, Keszthely-Tanyakereshti HungaroMet meteorológiai mérőállomásának adataival egészítettem ki az idősoromat. A kampány mérések 2023. augusztus 22-től szeptember 10-ig, illetve 2024. január 26-tól február 28-ig zajlottak. A kampányszerű mérések mellett, az első mért időszak kezdetétől az utolsó mérésig műszereink a levegő- és vízhőmérsékletet, valamint a relatív nedvességet folyamatosan rögzítették (egy-két napos megszakításokkal, melyek az adatok letöltéséből, illetve hibás mérésekből adódtak). A HungaroMet által mért szélsébség és szélirány adatokat tehát 2023. szeptember 11-től 2024. január 26-ig, illetve 2024. február 29-től 2024. október 14-ig tartó időszakokból használtam fel.

A kapott adatokat felhasználásuk előtt összevettem az általunk mért időszak adataival és lineáris regresszióval vizsgáltam az illeszkedésüket. A hőmérséklet kitűnő illeszkedést mutatott ($R^2 = 0.97$) ((8) ábra).



8. Ábra: Lineáris regressziós egyenes a légkör hőmérséklet adatokkal

A Hévízi-tavat körülvevő véderdő jelentős hatást gyakorol a tó feletti széljárásra, ezért ezt a hatást feltétlenül figyelembe kellett vennem. Ennek megfelelően a Keszthely-Tanyakeresztői mérőállomás adatait ezeknek a behatásoknak a figyelembevételével korrigáltam. A Keszthely-Tanyakeresztői méréseket összevettem a saját mérési eredményeinkkel ((9.) ábra). A két adatsor R^2 -értéke alapján jó egyezést állapítottam meg ($R^2 = 0,69$), ezért lineáris regressziót alkalmaztam a korrekciós tényezők megállapítására. Ezek segítségével korrigáltam a kapott adatokat. A tó felett mért szélsősebesség nagysága közelítően 2/3-a keszthelyinek.



9. Ábra: Lineáris regressziós egyenes a szélesebbesség adatokkal

A kampányszerű méréseinkből, a folyamatos méréseinkből, valamint a Keszthely-Tanyakereshti mérések korrigált eredményeiből egy teljes éves idősort állítottam össze, amely tartalmazza a numerikus modell peremfeltételeihez és a meghajtó folyamatok vizsgálatához szükséges összes kulcsfontosságú meteorológiai változót.

4. Módszertan

A helyszíni méréseink pontszerű mérések, ezért annak érdekében, hogy a tó egészének cirkulációját tudjam vizsgálni numerikus modellt készítettünk.

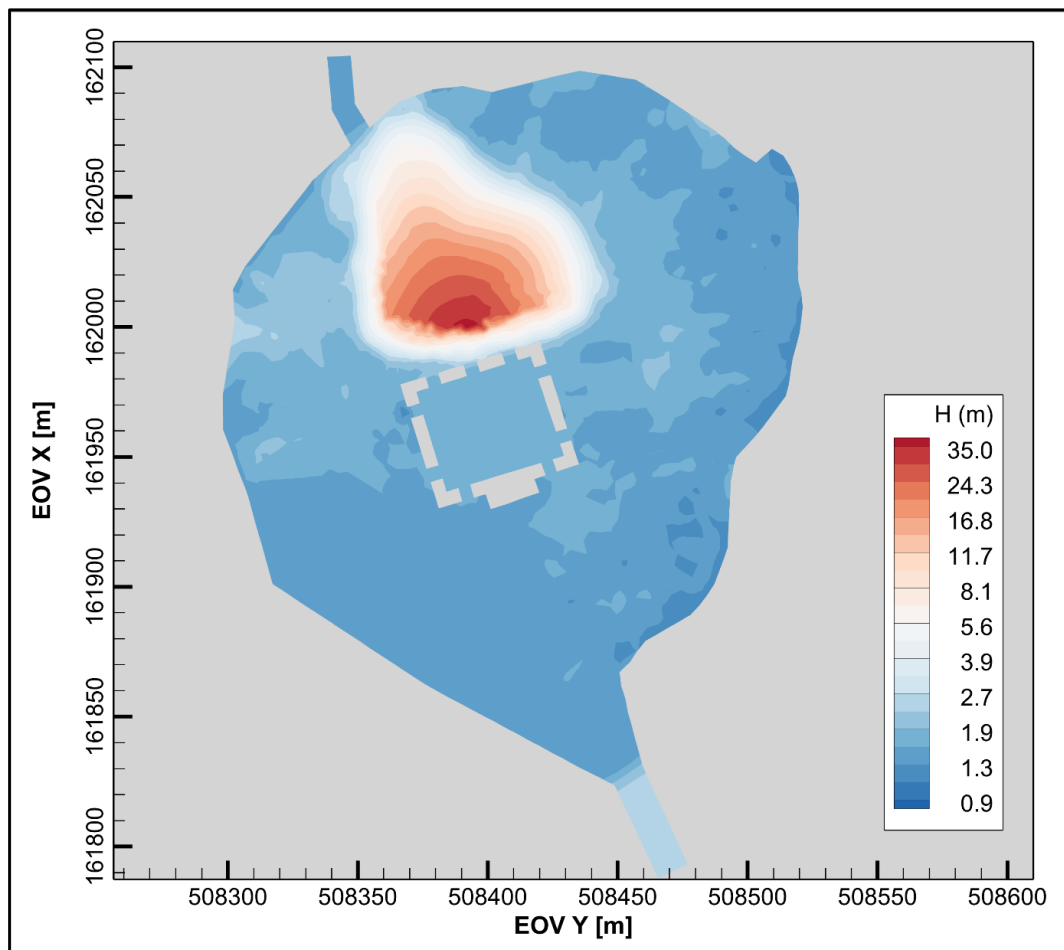
A sűrűségkülönbség okozta konvektív, valamint a mechanikai erőkből származó áramlások arányának vizsgálatát az Imberger által javasolt módszer (1985) segítségével végeztem. Ezt követően pedig a forrás feláramló csóvájának jellemzőit vizsgáltam meg.

4.1 Alkalmazott hidrodinamikai modell

Az áramlásban megfigyelt változások modellezése érdekében egy téli-, illetve nyári időszakban történő, hosszabb futtatást végeztünk a modellen. Ehhez két kéthetes időszakon futtattuk a modellt. A modell peremfeltételeit a helyszíni mérések, a Nyugat-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság (NYUDUVIZIG) mérései és a HungaroMet mérőállomásának adatai szolgáltatják.

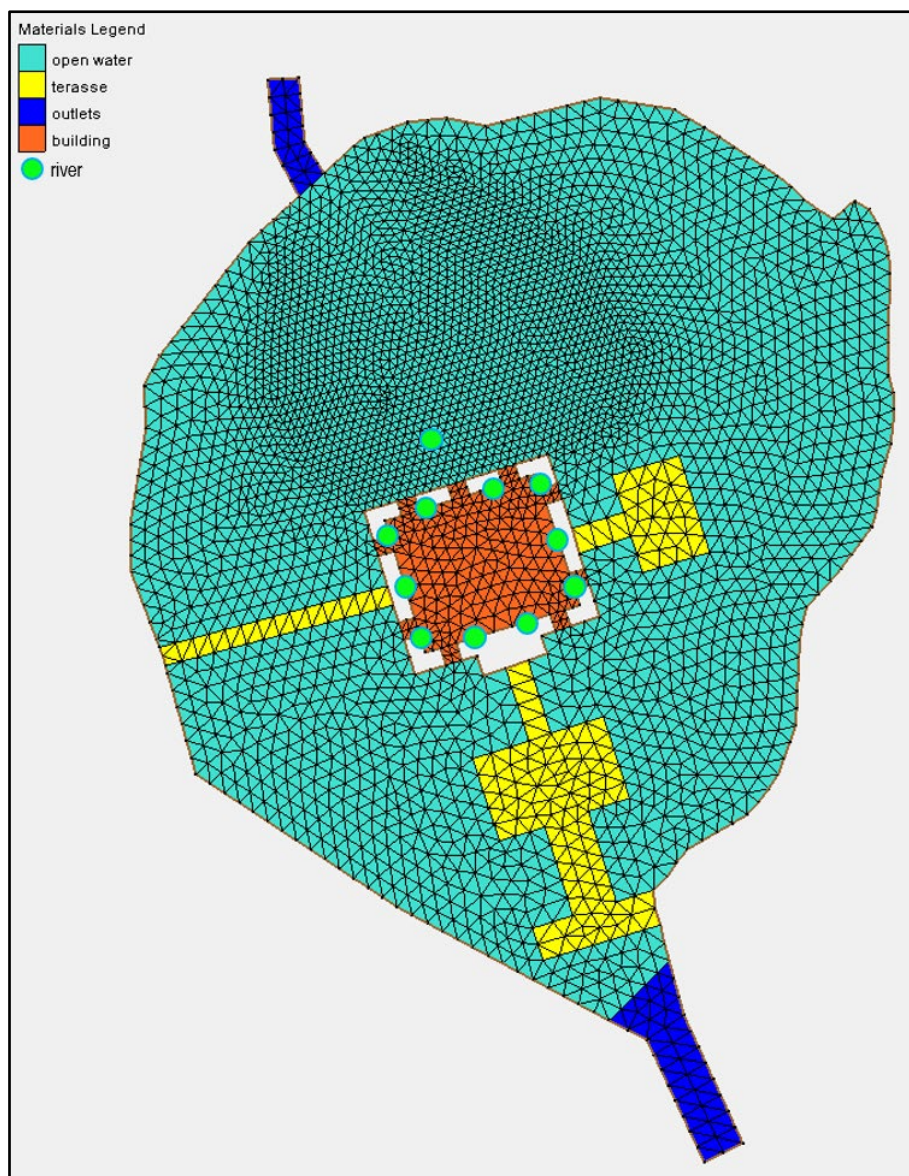
4.1.1 Számítási háló

A számítási hálót az SMS (Surface-water Modelling System) a felszíni vizek modellezésére fejlesztett szoftver segítségével készítettem el. Az SMS 2D modellezésben alkalmazott, széles körben elterjedt vízmérnöki szoftver. Egy korábbi felmérés során szonárral készített pontfelhőből készítettem terepmodellt, amelyet importáltam a programba. Ezen a domborzati modellen jelöltem ki a modellezni kívánt területet, így a kijelölt területek és a rácsháló elemei már tartalmazták a domborzati modell adatait. Az SMS programmal generáltam a számítási rácshálót, amely tartalmazza az egyes pontokon a vízmélységi adatokat ((10.) ábra).



10. Ábra: Hévízi-tó batimetrikus térképe

A különböző tulajdonsággal rendelkező területeket a Map Modul segítségével határoltam le. A modul vonalakat és pontokat használ a területek lehatárolásához. A területek lehatárolását szabadkézzel végeztem el, miután egy georeferált térképet illesztettem a domborzati modell alá. Minden olyan területet, amelynek jellemzői eltérőek voltak, külön területként határoltam le, majd ezeket a területeket különböző osztályba soroltam és határoztam meg, ugyanis a program ennek megfelelően tudja különböző tulajdonságokkal ellátni az adott területeket.



11. Ábra: Számítási háló, nyílt vízfelszín (open water), folyosók és terasz (terasse): nem befolyásolt rövidhullámú sugárzás által, fürdőépület (building): nem befolyásolt rövidhullámú sugárzás és szél által, páratartalom 99%, kifolyó csatorna (outlets), beérkező vízhozamok (river)

A tó területének legnagyobb része nyílt felszínű víz (open water), ezen a területen minden hidrometeorológiai folyamat zavartalanul zajlik. A tó közepén áll azonban a fürdőépület és ez a hozzácsatlakozó folyosókkal, teraszokkal együtt a tó jelentős részét (, több mint 15%-át) leárnyékolja. Ennek megfelelően a hidrometeorológiai folyamatokat válogatva kapcsoltam be a különböző területeken. A fürdőépület (building) területén nem éri rövidhullámú sugárzás a tavat, valamint a szél sem éri el itt a vízfelszínt, ezért ezeket a meghajtóerőket itt kikapcsoltam. Továbbá az épületet hermetikusan lezárják a hőmérséklet megtartása érdekében, ennek megfelelően az épületen belül a vízfelszín fölött 99%-os

páratartalmat állítottam be. A fürdőépülethez csatlakozó folyosók és teraszok (terasse) területén a szél eléri a vízfelszínt, ugyanis az építmények cölöpökön állnak a tó fölött, azonban rövidhullámú sugárzást ezeken a területeken is kikapcsoltam.

A tó vízszintjét elvezető csatornákkal szabályozzák. Mivel ezek a csatornák a modell egyik peremfeltételét adják, ezért a csatornák egy szakaszát felvettem a számítási hálóba (outlets), hogy a peremfeltétel pontját eltávolítsam a modellezni kívánt területtől, és a modell működéséből következő számítási hibák ne befolyásolják a tóra kapott eredményeket.

A tavat a fürdőépülettől északra található kráter mélyén feltörő forrás táplálja. Ennek becsült vízhozama 435,29 l/s. A fürdő üzemeltetésének érdekében a forrás melegvizének egy részét csöveken keresztül a felszínre vezetik. A szabadon felérkező-, valamint a csöveken keresztül felvezetett vízhozam arányát, a csövek mérete és a forrás hozama alapján, kétharmad – egyharmad arányban becsültem meg. A csöveken érkező hozamot a fürdőépület tíz pontján engedtem be a modellbe (lásd (11) ábra).

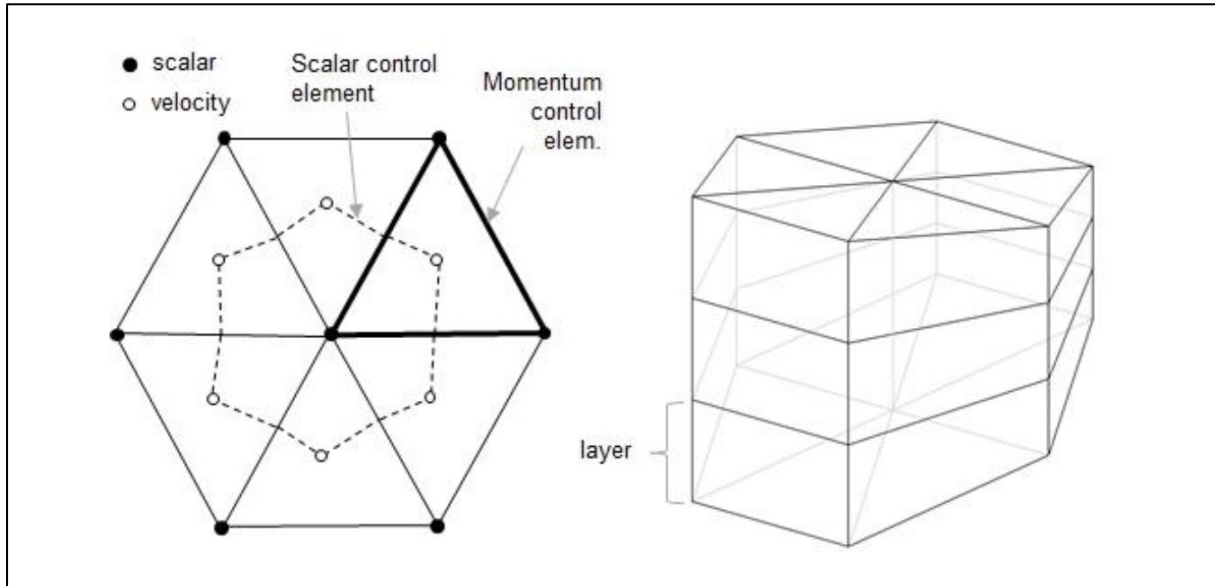
Figyelembe kellett vennem továbbá, hogy a forrás kráterének mélysége jelentősen nagyobb a tó többi részére jellemző mélységnél. A feláramló, igencsak jelentős vízhozam pedig sajátos áramlási viszonyokat teremt, amelyet mindenképpen nagyobb felbontásban szerettem volna vizsgálni, mint a tó többi részét. Ebből következően ezt a területet is külön területnek jelöltem ki és sűrített rácshálóval láttam el. A forrás fölötti területen a rácshálók mérete 2,5 méter míg a tó többi területén 5 méter. A vonalakon elhelyezkedő pontok sűrűsége határozza meg a rácsháló sűrűségét. Ezért sarokpontokat helyzettem le, amelyek segítségével változtatni tudtam a két sarokpont közötti pontok sűrűségét. Ezeket a finomításokat követően generáltam le a rácshálót.

Mivel a tó morfológiája szabálytalan, ezért háromszög-rácshálót alkalmaztam. A folyamat végeztével ellenőriztem, hogy a számítási háló típusát jól állítottam-e be, illetve, hogy a magassági adatok megfelelő módon kerültek-e fel a számítási hálóra.

4.1.2 Numerikus hidro- és termodinamikai modell

A numerikus vizsgálatokat a vízmérnöki modellezésben széles körben elterjedt FVCOM (Finite Volume Community Ocean Modell) modellel végeztem. A Chen et al. (2003) által fejlesztett FVCOM egy véges térfogat módszeren alapuló numerikus számítási modell. A modell eredetileg óceánok modellezésére lett kifejlesztve, azonban már több helyen alkalmazták sekély- és mélyvízű tavakra is (Lükő és Torma, 2024).

A számítási háló vízszintes irányban háromszögekből épül fel, amelyek rendszertelenül, de egymást nem fedve helyezkednek el a modellezett területen. Függőleges irányban az FVCOM cellákra osztja a víztestet, ezáltal az egész víztestet háromszög alakú hasábokra bontja.



12. Ábra: Számítási háló vízszintes (balra) és mélységmenti (balra) kiosztása

A program a cellák magasságának meghatározására σ kiosztást használ. Az egyenlő kiosztással szemben a σ kiosztás a felszínhez és a mederfenékhez közel sűríti a cellák számát; ennek az az oka, hogy a hidrodinamikai folyamatok ezeken a területeken sokkal változékonyabbak, tehát a megfigyelésük nagyobb felbontást igényel. Mivel a vízmélység folyamatosan változik, ezért a kiosztáshoz szükséges egy σ konstans, amelyhez mérten a modell meghatározza a cellaméreteket. Ezt a konstanst a következőképpen számítja a modell a vízmélység függvényében:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{D} \quad (2)$$

Ahol z – kezdeti nyugalmi relatív vízszint, ζ – aktuális vízszint a nyugalmi vízszinthez képest és D – a vízmélység. Ez az egyenleg a vízfelszínen $\sigma = 0$ és a mederfenéken $\sigma = -1$. (Torma, 2016)

A skalármennyiségű változókat, mint például a hőmérséklet, fajsűrűség stb., a számítási háló csúcaiban számítja a modell, míg a vektormennyiségű komponenseket cellaközépre.

4.1.3 Modell matematikai háttere

A számítási modell a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenleteket oldja meg explicit véges-térfogat módszerrel.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (4)$$

Az első egyenlet a folytonossági egyenlet, a második az összenyomhatatlan folyadékok impulzus egyenlete. Kifejtve ezek az alábbi formát öltik hidrosztatikus formában:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u, \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v, \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (8)$$

Ahol x, y, z a Descartes-féle koordináta rendszer szerinti koordináták, u, v, w a sebesség komponensek, f a Coriolis paraméter, P a nyomás, K_m az örvény viszkozitási együttható, F a vízszintes turbulens fluxus, ρ a sűrűség, ρ_0 a referencia sűrűség és g a gravitációs gyorsulás.

Emellett még megoldjuk a hőmérséklet transzportjára vonatkozó egyenletet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T, \quad (9)$$

Ahol T a hőmérséklet, K_h a függőleges örvénydiffúziós együttható, F_T a vízszintes örvény-viszkozitási fluxus.

A függőleges irányú örvény-viszkozitási együttható meghatározására a két egyenletes Mellor-Yamada turbulencia modellt alkalmazzuk, míg a vízszintes irányú keveredést a Smagorinsky-féle modellel számítjuk (Qi et al. 2009)

4.1.4 Modell peremfeltételei

A víz-levegő határfelületen zajló turbulens hő- és impulzus cserefolyamatokat a modell a Monin-Obukhov hasonlósági elmélet szerint számolja, amelyhez minden egyes felszíni cellára meg kell adni az alábbi meteorológiai változókat:

- a szél kétirányú sebességkomponense
- léghőmérséklet
- relatív páratartalom

A rövid- és hosszúhullámú sugárzási hőáramok meghatározásához pedig az alábbi paraméterek megadása szükséges:

- beérkező rövidhullámú sugárzás
- a vízfelület albedója ($\alpha = 0.08 [-]$)
- beérkező hosszúhullámú sugárzás

A visszavert rövidhullámú sugárzást a modell az albedó értéke alapján határozza meg, míg a kimenő hosszúhullámú sugárzást a vízfelszín modellezett hőmérséklete alapján interaktívan számolja a Stefan-Boltzmann-törvény alapján, mely szerint a sugárzás értéke a hőmérséklet negyedik hatványával arányos.

A befolyó vízhozam kétharmadát a tó legmélyebb pontján adjuk meg és fennmaradó egyharmadát a fürdőépületen belüli 10 ponton, időben konstansként. A kifolyó hozamot a mérések alapján adjuk meg mind az északi, mind a déli kifolyó esetén. Értékük időben változó.

4.2 Felhajtóerő fluxusok

A sűrűségkülönbségekből adódó áramlások lehetséges kialakulását az Imberger által javasolt módszer (Imberger, 1985) alapján elemeztem. A módszer segítségével elkülöníthetők a tavon belüli áramlási és keveredési folyamatok kiváltó okai. Az elkeveredést okozhatják mechanikai folyamatok, mint például a szél keltette áramlások, és okozhatja a nagymértékű sűrűségkülönbség, amelyből kifolyólag konvekciós áramlás alakulhat ki. A mechanikai és sűrűségi folyamatok arányának alakulása a meteorológiai- és áramlási idősorokkal összevetve következtetésre vezethet a cirkuláció változásainak okára. Hipotézisünk szerint az átfordulások pillanatában a sűrűségi áramlások dominálnak, és ezek okozzák a cirkuláció elváltozását.

Ahhoz, hogy a mechanikai és sűrűségi áramlások összehasonlíthatóak legyenek, két paramétert vizsgáltam meg: a szél okozta mechanikai energia, és az ebből származó áramlási folyamatok sebességének léptékét (u_*), valamint a felhajtóerőből következő áramlási folyamatok sebességének léptékét (w_*). Ezek a tényezők az egyes energiaáramok számításával hasonlíthatóak össze. Kim (1976) tanulmánya alapján az energia fluxus (F_k) sebesség léptékek függvényében az alábbi képlettel számítható:

$$F_k = 0.5 \cdot (w_*^3 + C_N^3 \cdot u_*^3) \quad (10)$$

Ahol C_N a szélesebbesség konstans együtthatója, ami a keveredéshez szükséges szél erősséget írja le. (Rayner, 1981 128. oldal)

A szél okozta mechanikai áramlási folyamatok sebességmértékét a légköri oldalon keletkező csúsztatófeszültségből vezettem le, mivel ezt a szélesebbesség és impulzusfluxus mérési adatsoraimból és az impulzus áram átviteli együtthatójából kiszámíthattam, míg a víz oldalon kialakuló csúsztatófeszültség meghatározásához a felszínközeli áramlási sebesség mérésére lett volna szükség.

$$u_* = \sqrt{C_d \cdot u^2} \quad (11)$$

A légköri oldal csúsztatófeszültségét az alábbi módon számítottam:

$$\tau_a = \rho_a \cdot u_{*,a} \quad (12)$$

Ahol ρ_a a levegő sűrűsége, $u_{*,a}$ a légköri impulzus áram.

$$\tau_a = \tau_w = \rho_w \cdot u_{*,w} \quad (13)$$

$$u_{*,w} = \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot u_{*,a} \quad (14)$$

Ahol C_d a korábban meghatározott átviteli együttható, u a szélesebbesség.

A felhajtóerő okozta áramlási folyamatok sebességléptékét az alábbi képlettel számítottam:

$$w_* = (B \cdot h)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Ahol B [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$] a felhajtóerő fluxusa, h pedig a felszín közeli réteg mélysége [m] (Deardoff, 1970). Utóbbi a Hévízi-tó esetében megközelítőleg 2 méter, amelyet a kráter térségén kívüli átlagos mélység. A felhajtóerő fluxusa az alábbi képlettel számítható:

$$B = g * \alpha * H_* * \frac{1}{c_{pw} * \rho_w} \quad (16)$$

Ahol α a hőtágulási együttható, H_* a hatékony felszíni hőáram fluxusa [W m^{-2}] és c_{pw} a víz specifikus fajhője. A hatékony felszíni hőáram a nettó rövidhullámú sugárzás mértékéből határozza meg, hogy az adott felszínközeli réteg a hőt elnyelte vagy leadta. Számítását az alábbi képletekkel végeztem el:

$$H_* = S + q(0) + q(h) \quad (17)$$

$$q(h) = q(0) * e^{-\gamma * h} \quad (18)$$

$$S = LW_{in} - LW_{out} + LvE + H \quad (19)$$

$$LvE = \rho_a * \lambda * c_E * u * (q_s - q_a) \quad (20)$$

$$HTs = \rho_a * c_{pa} * c_H * u * (T_s - T_a) \quad (21)$$

Mely összefüggésekben $q(0)$ a felszínt érő nettó rövid hullámú sugárzás [W m^{-2}], $q(h)$ a felszíni réteg aljára behatoló rövidhullámú sugárzás [W m^{-2}]. A rövidhullámú sugárzást mélység menti elnyelődését a Beer-Lambert törvénnyel számítottam, amelynek számításában a γ fénykioltási együttható értékét konstansnak vettem fel: $0.33 \text{ [m}^{-1}\text{]}$. S a nettó hő fluxus [W m^{-2}], LW_{in} és LW_{out} a beérkező- és kibocsátott hosszuhullámú sugárzás, LvE a látens hőáram [W m^{-2}], HTs a szenzibilis hőáram [W m^{-2}].

4.3 A feláramló csóva jellemzői

Az tó cirkulációjának fő meghajtóereje a forrás, ezért fontos megállapítani, hogy a forrás vízhozamának csóvája milyen hidrodinamikai jellemzőkkel rendelkezik. A csóva szétterjedését egyrésről magasságának meghatározásával lehet leírni. A vízalatti meleg forrásokból érkező csóvák a járatból kiérve terjedni kezdenek. A terjedés magassága addig tart, amíg a csóva vízszintes irányban el nem terjed annyira, hogy a sűrűségkülönbségből eredő felhajtóerő már nem elég nagy a csóva további intenzív emelkedéséhez. Ilyenkor a kiáramlás sebessége még tovább növelheti a csóva magasságát, azonban az már nem sűrűségi áramlásból eredő növekedés; vagyis nem a víz hőmérséklete befolyásolja azt, hanem a vízhozam mennyiségéből, és – jelen esetben a forrásbarlang és a kráter morfológiájából adódó – keresztmetszetek méretéből adódik, melyeken át érkezik a vízhozam. A sűrűségkülönbségből, valamint a mechanikai erőből eredő áramlások arányát tehát azért fontos meghatározni, hogy megismerjük a cirkulációt befolyásoló meghajtóerőket.

A csóva magasságának meghatározásának első lépése (Campbell, 1982) a felhajtóerő fluxus számítása:

$$f_0 = g \cdot \frac{\rho_w - \rho_f}{\rho_f} \cdot Q \quad (22)$$

Ahol ρ_w a tó vízének sűrűsége, ρ_f a forrás vízének sűrűsége és Q a forrás vízhozama. A csóva magasságának számításához szükséges a Brunt-Vaisala frekvencia meghatározása:

$$G = -\frac{g}{\rho_f} \cdot \frac{d\rho_w}{dz} \quad (23)$$

Ahol $\rho(z)$ a sűrűség z magasságban, és ρ_0 egy referencia-sűrűség, amelyet általában a forráshoz közeli értéknek tekintenek. Ez a szám azt mutatja meg, hogy egy vízcsepecske mekkora stabilitással bír a függőleges elmozdulással szemben. Így végül közelíthetően számítható a csóva magassága:

$$z_{max} = 3.8 \cdot f_0^{\frac{1}{4}} \cdot G^{-\frac{3}{8}} \quad (24)$$

A képlet levezetése lineáris elkeveredést, valamint a forrás és a környező víz között alacsony sűrűségkülönbségeket feltételez (Turner, 1987).

A csóva konvekciójának vizsgálatával állapítható meg, hogy a víz felszínre törése a sűrűségkülönbségekből adódik, azaz természetes konvekció, vagy egyéb mechanikai okokból, azaz kényszerített konvekció. Ennek vizsgálata az Archimédész-számmal (Ar) (Turner, 1987) lehetséges. Amennyiben az Archimédész-szám nagyobb, mint egy ($Ar \gg 1$), természetes-, amennyiben egy vagy több nagyságrenddel kisebb, mint egy ($Ar \ll 1$), kényszerített a konvekció. Az Archimédész-számot a Grashof-szám és a Reynolds-szám négyzetének hányadosaként kapjuk:

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} \quad (25)$$

A Grashof-szám a sűrűségi áramlások során fellépő felhajtóerők és viszkozus erők viszonyát írja le. Számítása a következő képlettel lehetséges:

$$Gr = \frac{g \cdot \alpha \cdot (T_f - T_w) \cdot D^3}{\nu^2} \quad (26)$$

Ahol α a köbös hőtágulási tényező, T_f a forrásvíz hőmérséklete, T_w a tó hőmérséklete, D a jellemző átmérő, melyet jelen vizsgálathoz 1 méterben állapítottam meg igazodva a szűkített forrásjárat méretéhez, és ν a kinematikai viszkozitás.

A Reynolds-szám szintén egy dimenzió nélküli szám, mely azt mutatja meg, hogy az áramlás lamináris vagy turbulens. Számítása a következő képlettel lehetséges:

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (27)$$

Ahol ν a sebesség, D a jellemző átmérő, és ν a kinematikai viszkozitás. A sebességet a forrás hozamából állapítottam meg. A forrásbarlang nyílását egy szádfallal látták el, melyen egy 0,75 négyzetméteres átjárón keresztül hagyja el a víz a barlangot.

5. Eredmények

Egy nyári és egy téli időszakra futtattuk az FVCOM modellt. Mind a két modell egy-egy kéthetes egybefüggő időszakra készített számításokat. A modellek kéthetes méréseinek mindegyike 23 órán keresztül futott 6 processzor felhasználásával. Az eredményeket Tecplot 360 szoftverben készített ábrákon keresztül mutatom be. A számítások során órás átlagokkal dolgoztam, majd ezek eredményéből vezettem le a napi értékeket.

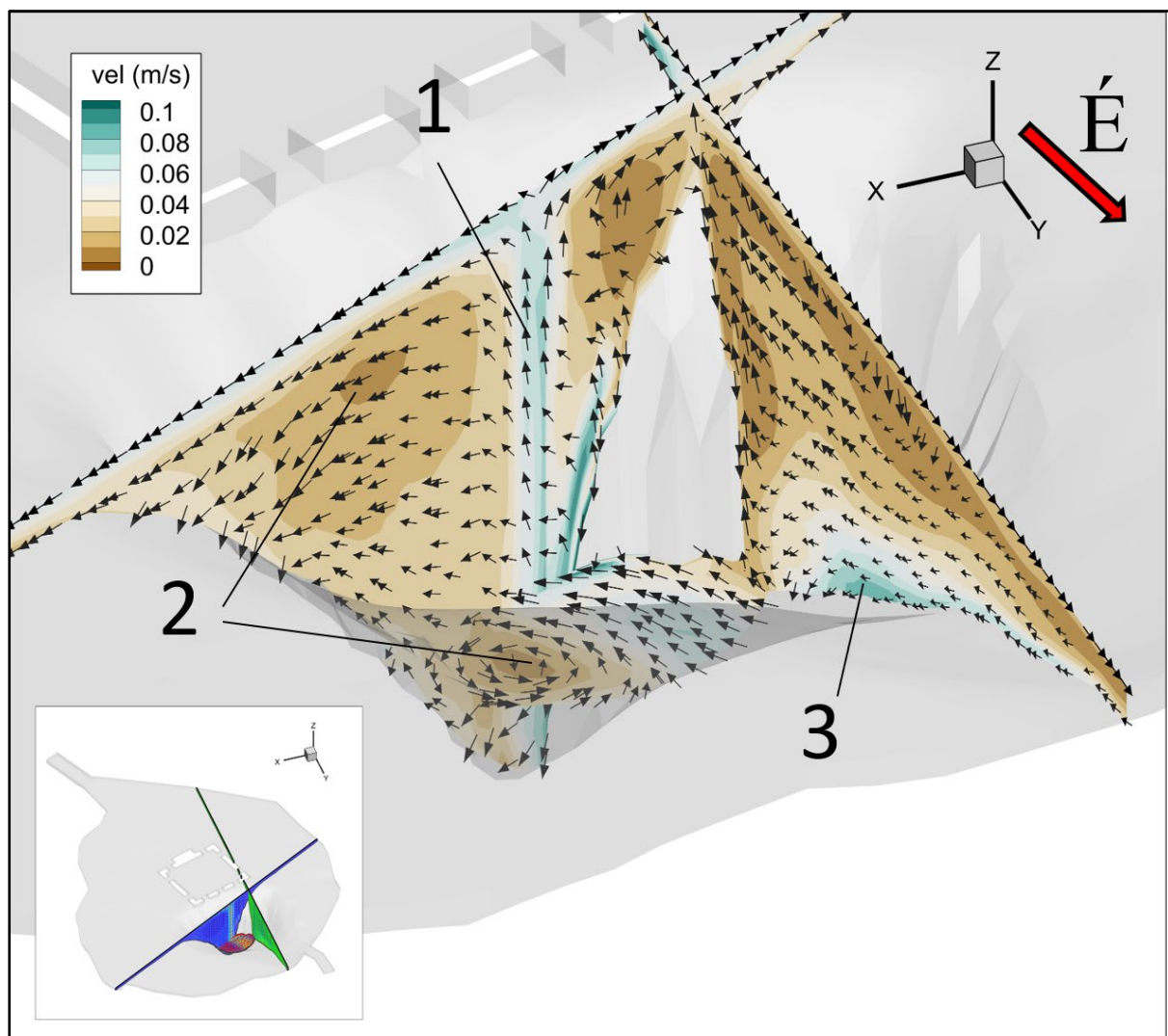
5.1 Modell eredmények

A 2023. augusztus 22. és szeptember 5. közötti időszakban a tó átlag felszíni hőmérséklete 33 °C volt és szinte végig meghaladta a levegő hőmérsékletét, ami 19°C és 34 °C között mozgott. A szélesebbesség nem haladta meg a 3 m/s-ot és nem esett csapadék.

A nyári időszakban a búvárok által mért és tapasztalt cirkuláció a forrás kráterében a következő módon zajlott: a forrás csóvája a kráter déli oldalának a közepétől kicsit keletre tör föl, majd keleti irányban áramlik tovább a felszínen. Eközben a kráter nyugati oldalán a hidegebb, nagyobb sűrűségű víz alábukik a forrás felé. Ilyenkor a kráter cirkulációja 8-10 méter mélységben az óra járásával ellentétes irányú ((1.) ábra).

A numerikus modell eredményei azt mutatták, hogy az áramlási mintázatok jól követik a búvárok által megfigyelt áramlási viszonyokat a forráskráterben. A feláramlás sebessége a kráter déli oldalának közepén a legnagyobb. A felszínre érve az áramlás mindkét irányba eloszlik. Azonban a felső 10 méteres vízréteg áramlása egyöntetűen keleti irányba mutat

(óramutató járásával ellentétesen), ezzel beigazolvva a megfigyelt áramlási tendenciákat. A hideg víz a kráter nyugati oldalán bukik alá (14), de kis intenzitással.

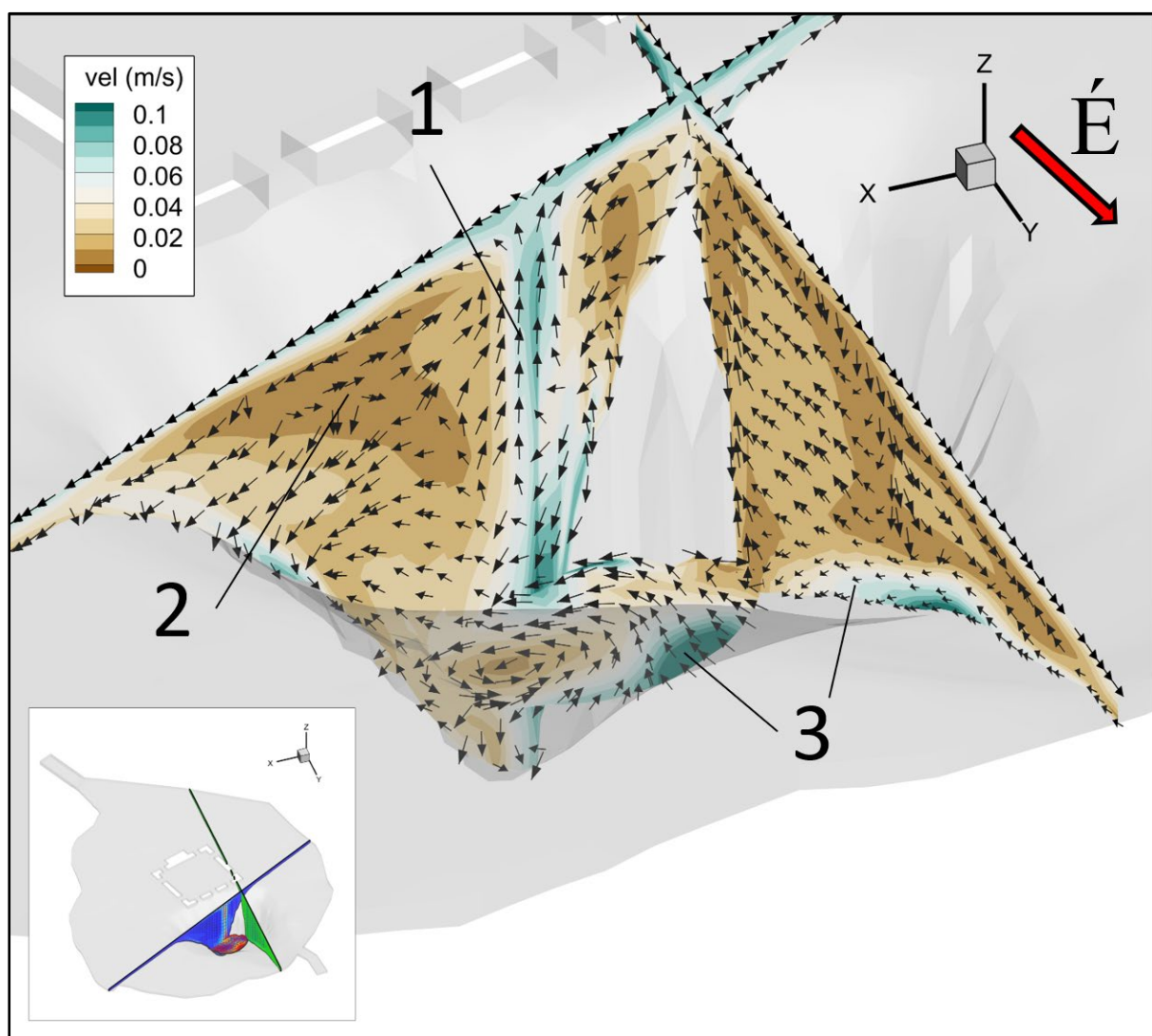


13. Ábra: Nyári időszakra futtatott numerikus modell áramlási viszonyai a forráskráterben három metszet jellemző mentén. 1: feláramlás, 2: cirkuláció a felső tíz méteres vízrétegben, 3: alábukás

A 2024. január 26. és február 28. közötti időszakban a tó átlagos felszíni hőmérséklete 27 °C volt és végig meghaladta a levegő hőmérsékletét, ami 1-15 °C között mozgott, a szélsősebesség nem haladta meg a 2 m/s-ot és nem esett csapadék. A vízfelszín és a levegő hőmérsékletkülönbsége tehát ebben az időszakban jóval kisebb volt, mint a nyári mérésakor.

A bűvárok megfigyelései alapján, a téli időszakban az áramlás iránya megváltozik. A forráskráter déli oldalának közepétől kissé nyugat felőli részén érkezik a felszínre a forráscsóva, majd halad tovább nyugat felé. A hideg víz, a nyári adatokkal ellenkezőleg, a keleti oldalon bukik alá a forrás felé ((1.) ábra).

A billenő mérőeszköz január 7-én rögzítette a cirkuláció megváltozását. A modellnek tehát a megváltozott cirkulációt kellett volna mutatnia előfeltevéseink alapján. A felső 10 méteres vígréteg áramlásaiban találhatóak olyan szakaszok, ahol az áramlások nyugat felé tartanak azonban dominánsan keletfelé áramlik a felérkező víz. Tehát a várt változással szemben, a cirkuláció domináns irányai megegyeztek a nyári cirkulációéval. Ebből az következik, hogy hiába volt a tó felszíne és a levegő között sokkal kisebb a hőmérsékletkülönbség, a futtatott modell nem mutat fordított cirkulációt a nyári időszakhoz képest. Ezzel szemben a keleti oldalon megjeleneni látszik a tapasztalt alábukás, illetve a feláramlás is kezd átalakulni a csökkenő sebességek alapján. A nyugati oldali leáramlás emellett megerősödik a nyári állapothoz képest.

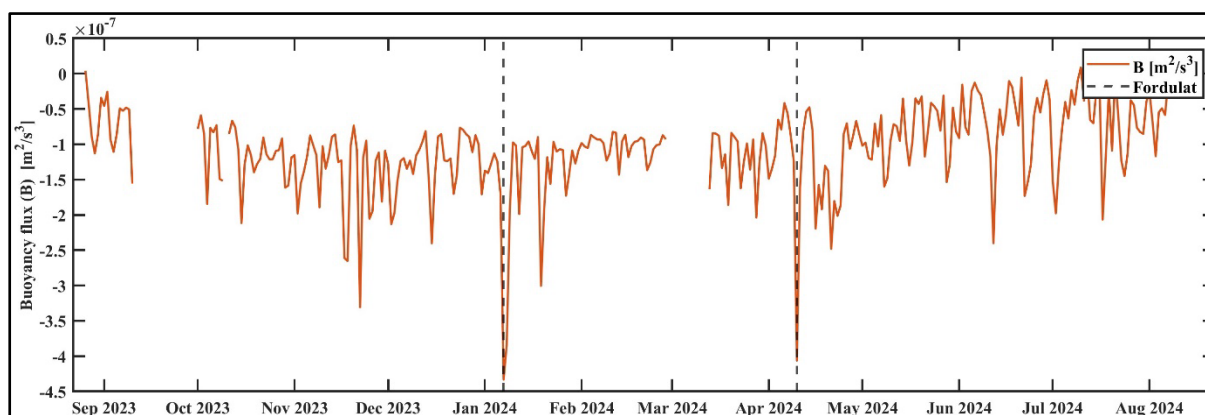


14. Ábra: Téli időszakra futtatott numerikus modell áramlási viszonyai a forráskráterben 1: feláramlás, 2: cirkuláció a felső tíz méteres vígrétegben, 3: alábukás

Összeségében tehát a modell nem volt képes reprodukálni a horizontális cirkuláció jellemző irányát, azonban mutat tendenciát az áramlás átalakulására. Ebből arra tudunk következtetni, hogy önmagában az átlagos hőmérséklet-, illetve sűrűségkülönbségből eredő konvekció nem volt kellően erős ahhoz, hogy nagyléptékű áramképet érdemben átformálja. A várt fordulat elmaradásának okára a keveredési mutatók számításakor találtuk meg a magyarázatot, amelyet az alábbiakban ismertetek.

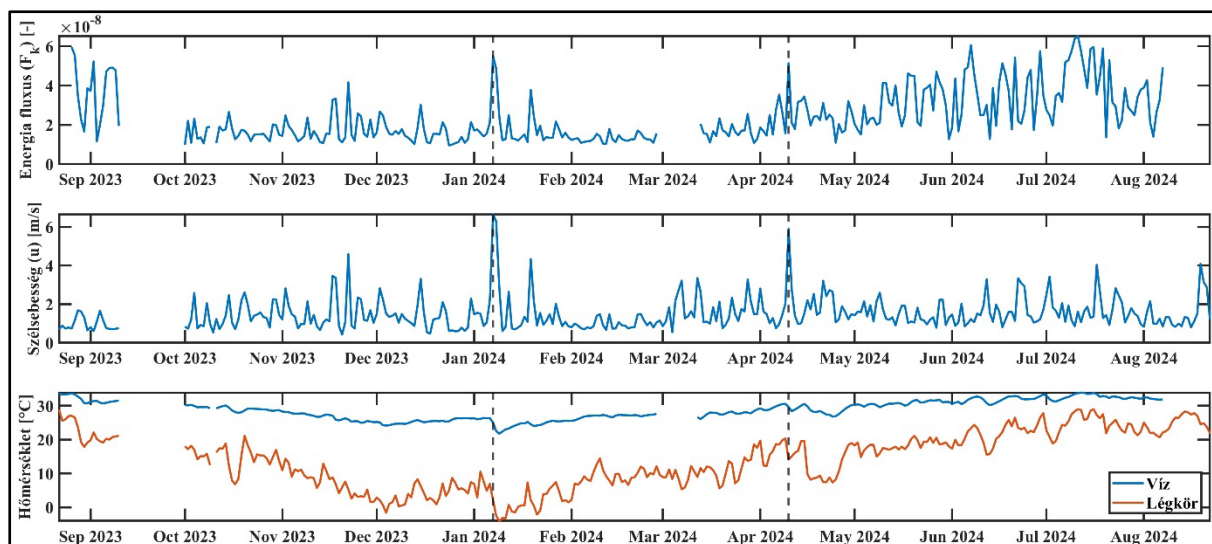
5.2 Meteorológiai és a konvekciós meghajtó folyamatok

A billenő mérőeszközzel mért idősorokban két irányváltás szerepel. Az első január 7-én a második április 10-én. A fordulatot kiváltó jelenség kereséséhez az egész éves idősort vizsgáltam az Imberger- féle módszerrel. A felhajtóerőhöz köthető fluxus idősora (17) mutatja be, hogy a sűrűségkülönbségek által kiváltott energiaátviteli sebesség milyen mértékű volt az év során.



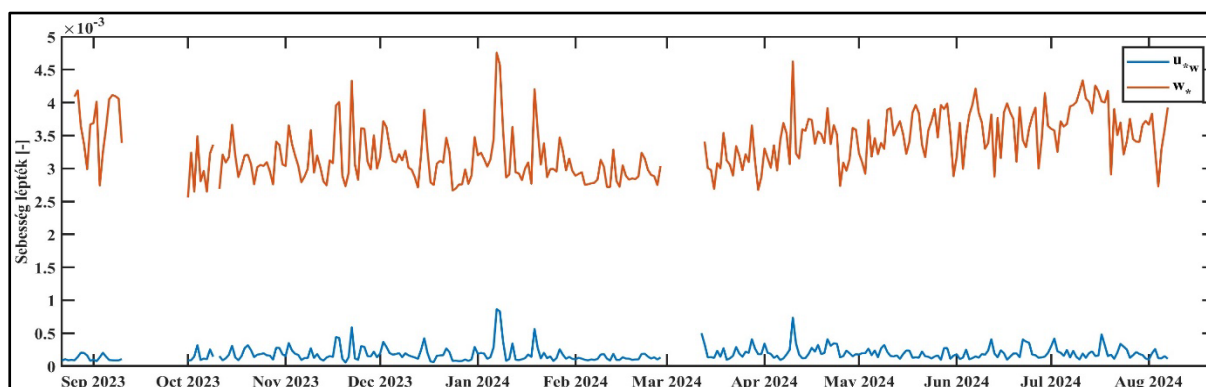
15. Ábra: Felhajtóerő fluxus éves idősora és a billenő műszer által mért fordulatok időpontja

Az ábrán látható, hogy az átfordulások időpontjában a felhajtóerő fluxus jelentősen kiugrik, vagyis a sűrűségi áramlások a fordulatok napján a legintenzívebbek. A fordulatokat megelőző meteorológiai idősorokon látszik ((16.) ábra), hogy a januári fordulatot a lég- és vízhőmérséklet erőteljes hirtelen lehűlése előzte meg, hasonlóan az áprilisi fordulathoz, amikor a hőmérséklet szintén csökkent, de jóval kisebb mértékben. A változásokat követően – a fordulat napján – kiugróan magas szélességgel, valamint hirtelen lehűléssel együttesen következett be az átfordulás. Fontos látni, hogy mindkét esetben a vízhőmérséklet ugyanazon irányban változott meg. Áprilisban sem hőmérséklet-emelkedéshez köthető az áramlás átalakulása.



16. Ábra: Fent: Energia fluxus egyéves időszora és a cirkuláció mért fordulata, Középen: Szélsébség egyéves időszora és a cirkuláció mért fordulata, Alul: Víz- és léghőmérséklet egyéves időszora és a cirkuláció mért fordulata

Az energia fluxus kiugró értékét a mechanikai energiából származó áramlási folyamatok sebességléptéke, valamint a felhajtóerőből származó áramlási folyamatok sebességléptéke befolyásolja. Ahhoz, hogy megállapíthassam, hogy valóban a sűrűségi áramlás a domináns a fordulat bekövetkeztében, összehasonlítottam ezek idősorait.



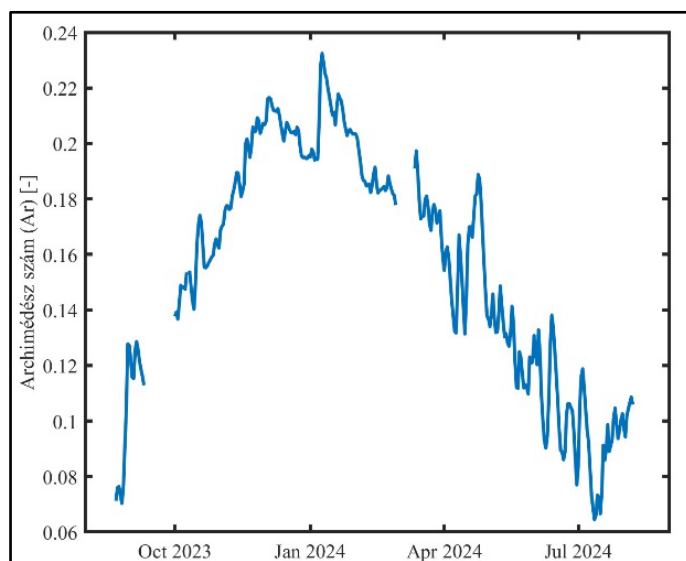
17. Ábra: Mechanikai energiából származó áramlási folyamatok sebességléptékének(u^*) és felhajtóerőből származó áramlási folyamatok sebességléptékének(w^*) összehasonlítása

Az idősorból látszik, hogy a felhajtóerőből származó áramlási folyamatok sebességléptéke a domináns tényező az energiafluxusban. Így feltételezhetjük, hogy a monoton lehűlő, vagy -felmelegedő időszak után bekövetkező, hirtelen lehűlésből keletkező sűrűségi áramlások okozzák a Hévízi-tó cirkulációjának fordulatát. Bár ezek az esetek erős szél kíséretében történtek meg (hiszen u^* idősorában is érzékelhetők a csúcsok), azonban nem közvetlenül a szél-keltette mechanikus energiabevitel látszik dominánsnak, hanem a vele

együtt járó erőteljes légkör-víz határfelületi hőfluxusok hatása, amely a vízfelszín hirtelen lehűlését eredményezik.

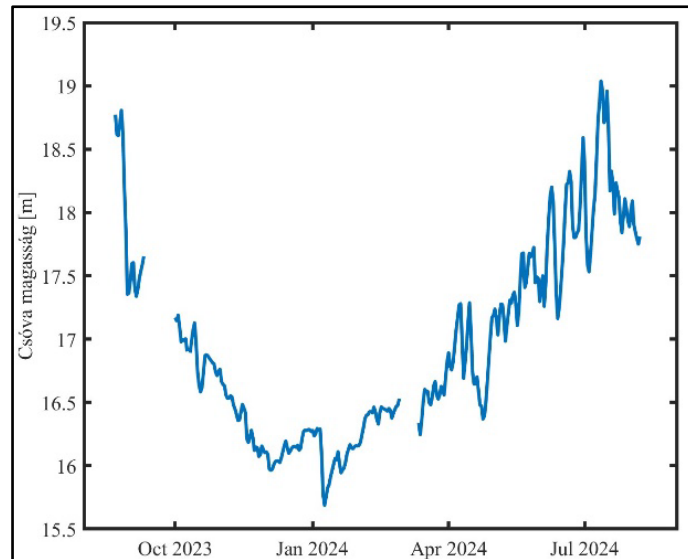
5.3 Csóva terjedése

A csóvaterjedés vizsgálatának fontosságát a *Módszertan* fejezetben ismertettem. A csóva konvekciójának jellemzésére az Archimedes-számot állapítottam meg, melynek alakulása a (20) ábrán látható.



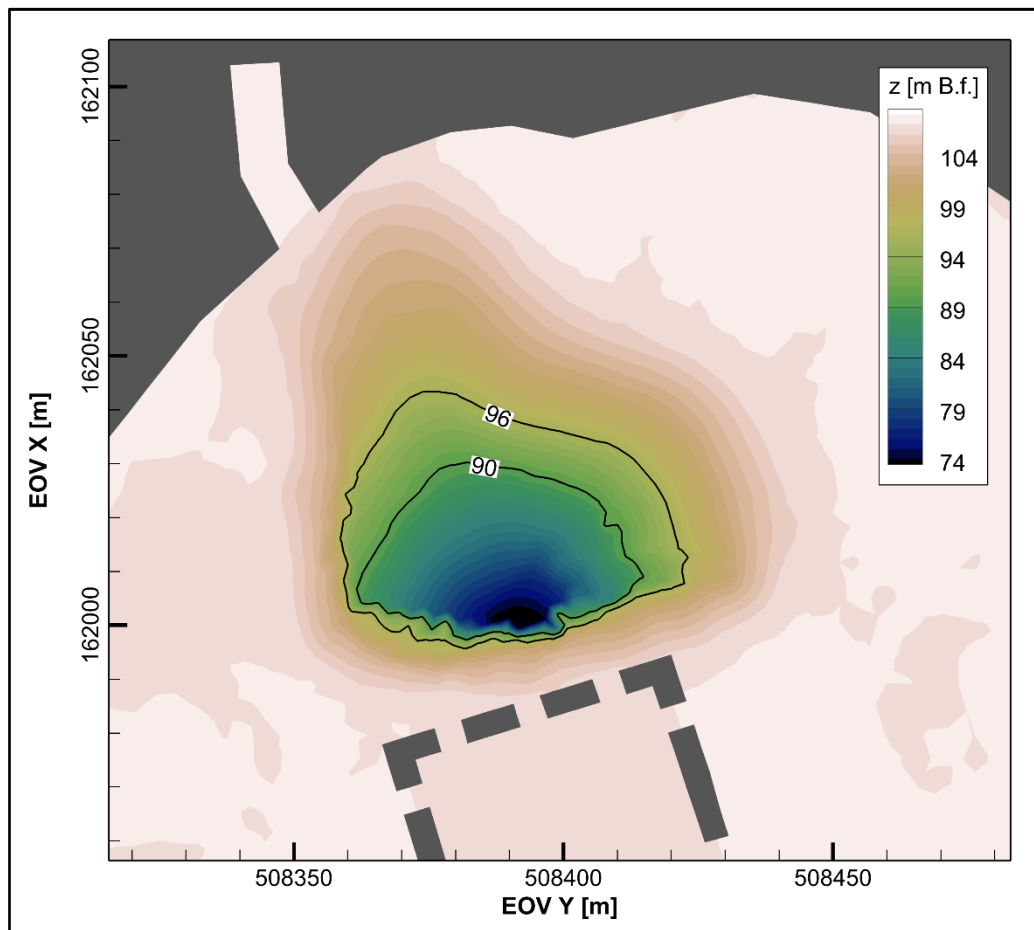
18. Ábra: Archimedes-szám egyéves időszaka

Az Archimedes-szám az egész év folyamán 1 alatt maradt, tehát a konvekció egész évben kényszerített. Ezt az Archimedes-szám mellett a csóva magasságának számítási eredményei is indokolják. A csóva magasságának alakulása az évfolyamán a (21) ábrán látható.



19. Ábra: Csóva magasságának egyéves időszaka

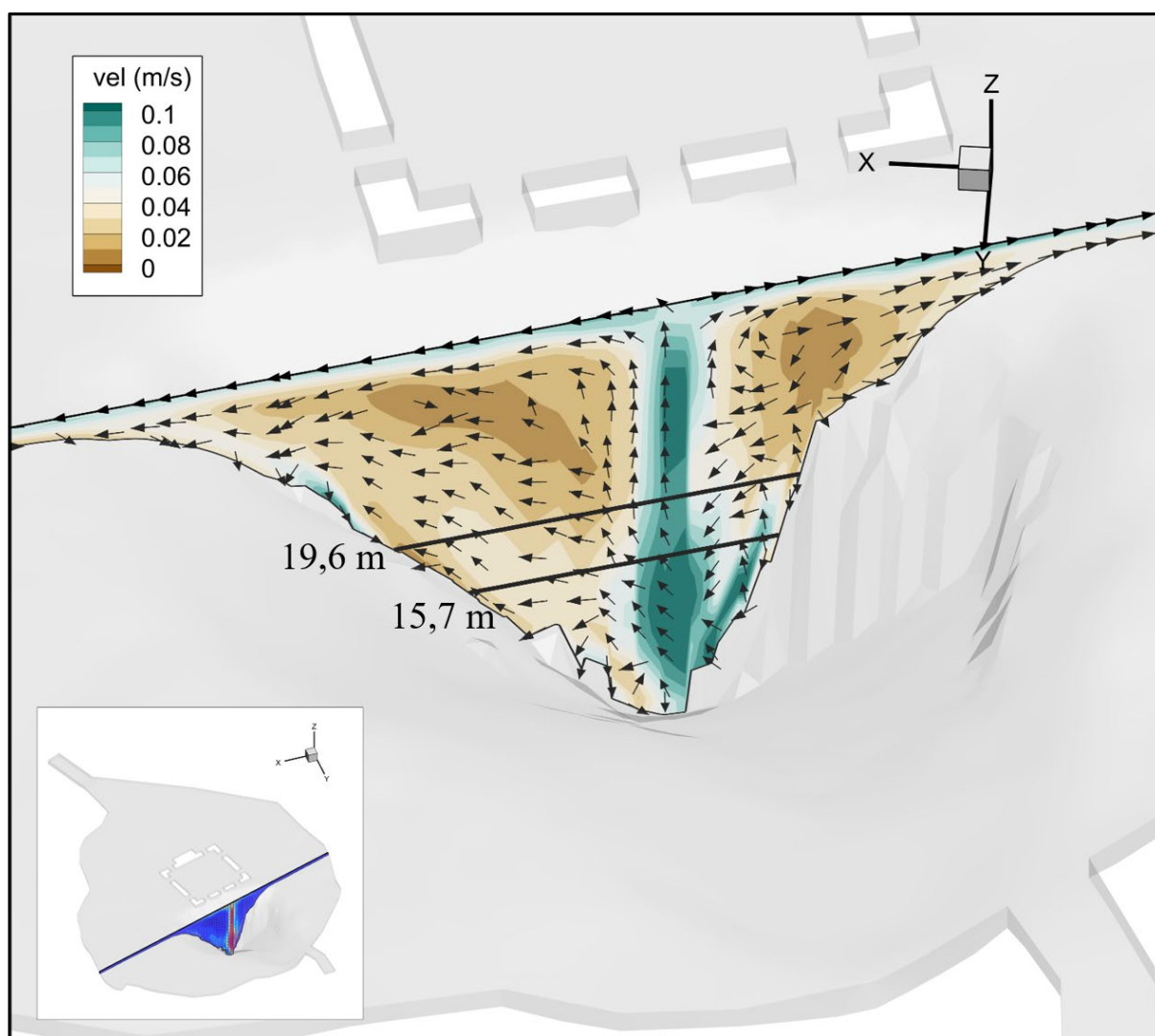
A csóva legkisebb magassága a forrásbarlang bejáratától számítva 15,7 méter, míg a legnagyobb magassága 19,6 méter. A forráskráter felső pereme 2-3 méter mélyen van a vízfelszíntől mérve.



20. Ábra: Csóva terjedésének legmagasabb és legalacsonyabb értékei az éven belül

A 40 méter mély kráterből tehát a csóva nem ér fel a kráter felső pereméig. Ebből az következik, hogy amikor a csóva eléri a függőleges terjedésének becsült határát még a kráterben van, amely azonban egyre szélesedik, de csak korlátozottan. A meghatározott magasság felett várható, hogy ott vízszintesen kezd el terjedni, amíg a forráskráter fala ezt lehetővé teszi, kialakítva ezzel a 8-10 méter mélységben tapasztalt erőteljes vízszintes cirkulációt.

Amikor a csóva eléri maximális magasságát, a forrásvíz és a tó vize közötti sűrűségkülönbség annyira lecsökken, hogy felhajtóerő számottevően mérséklődik. Ebből következik, hogy megközelítőleg a forráskráter felétől a feláramlás intenzitása lecsökken.



21. Ábra: Téli időszakról készített numerikus modell áramlási sebességei és a csóvamagasságának (mederfenéktől számított) becsült maximális magasság határvonalai

Ez a jelenség a numerikus modellen is valamelyest megjelent. A becsült maximális csóvamagasságok által behatárolt sávban a függőleges áramlási sebesség lecsökken, jóllehet

utána felette újra erősödik valamelyest, és a vízszintes irányú áramlások sebessége megnövekedik. Továbbá a kráter nyugati oldalán megfigyelhető feláramlás pont ebben a becsült csóvamagassági sávban szűnik meg.

Mivel a forráskráter a legnagyobb befolyásolója a tó cirkulációjának, ezért fontos eredmény, hogy a forrás csóvájának meghajtóerejét a hozam mennyisége is befolyásolja, nem pedig kizárólag a hőmérséklete.

6. Konklúzió

Egy adatbázist készítettem 2023 augusztusa óta kivitelezett méréseink alapján, ami tartalmazza az elmúlt év hidrometeorológiai idősorait melynek segítségével numerikus modellt tudtunk készíteni a Hévízi-tóról. Ezek támogatják mind a tó jelenlegi állapotának a feltárását, az üzemeltetés optimalizálását, valamint a jövőbeni fejlesztési lehetőségek és környezeti hatások vizsgálatát. A tó jelenlegi állapotának feltárására jelen dolgozat egy problémát járt körül. Ahogy az előző fejezet végén említettem a feláramlás kényszerített konvekciós folyamat, tehát vízhozam függő. Ennek következménye, hogy a forrás vízhozamának megváltozásával a feláramlási mintázatok is várhatóan átalakulnának. Ez szem előtt tartandó különböző tervezett beavatkozások, fejlesztések tervezésekor. Ezek számszerűsítésére a jelenlegi modellfejlesztés jó alapot adhat.

A megfigyelt problémára hipotézist alkottunk, mely szerint a Hévízi-tó cirkulációja évente többször irányt változtat és ennek a sűrűségi áramlások az okozói. A feltevésünket numerikus módszerekkel és számításokkal igyekeztünk igazolni. A Hévízi-tó cirkulációja monoton hőmérsékletváltozás után bekövetkezett hirtelen lehűlés hatására váltott irányt mindkét évszakban. Ez a jelenség a sűrűségi áramlásokra vezethető vissza, melyek egy hirtelen lehűléskor nagy mennyiségű víz alábukását okozzák a forráskráterben. Ennek eredményeképpen a forrás csóvájának cirkulációja egy új, stabil állapotot vesz fel. A cirkulációs időszakok hosszát tekintve a nyári állapot hónapokkal tovább tart a télihez képest. Feltételezhetjük, hogy előbbi nagyobb stabilitással bír.

A felállított numerikus modell a nyári időszokról valós képet adott, azonban a téli időszak cirkulációi nem változtak olyan mértékben, ahogy azt a billenőlapos mérőműszer eredményei és a búvárok szolgáltatott információk mutatták. Ennek véleményünk szerint az elsődleges oka, hogy a téli modellben nem szerepelt a hirtelen lehűlés (amely erős széllel is együtt járt). Vagyis a felszíni és mélyebb vízrétegek átlagos hőmérséklet-különbsége nem elegendő az áramkép átbillentéséhez, hanem szükség van egy intenzív impulzusra is ehhez. Látna a különböző sebességléptékek (u^* és w^*) értékeinek nagyságát, a domináns folyamat a behatásban a hirtelen kialakuló konvekció és nem a felszínen ható szél-csúsztatófeszültség.

A szél több okból is visszafogottabb a Hévízi tó esetében. Egyrészt a tó körüli véderdő magas és sűrű faállománya szélárnyékot eredményez. Ez látszik a keszthelyi szélesebségek összevetéséből is. Másrészt a vízfelszín felülete is kicsi, rövidek a meghajtási hosszak. Továbbá a tó feletti épületek is csökkentik a szélnek való kitettséget.

Végezetül fontos kitérni a használt modellezési eljárás korlátaira is. Egy hidrosztatikus modellt alkalmaztunk, amely a függőleges sebességkomponensre vonatkozó impulzusegyenletet egyszerűsített formában írja le. A feláramlási sebességek számítása esetén ennek érdemi hatása lehet a pontosságra. Ez mindenképp további vizsgálatokat igényel. Megjegyzem, az FVCOM modell futtatható nem-hidrosztatikus egyenletekkel is, azonban ennek tesztelésére nem nyílt lehetőség a TDK kutatás során, mert egy ilyen modell nagyságrenddel nagyobb számítási idejű és könnyen válhat instabillá. Emellett a modell számítási hálójának vertikális kiosztása σ -elven történt. Erről a hálózásról kimutatták, hogy nagy lejtésviszonyok mellett pontatlanná válik a nyomás-gradiens számítása, ami hamis áramlásokat hozhat létre (Zhang et al. 2015). Ennek kiküszöbölésére az FVCOM-ban nincs lehetőség. A numerikus modell további fejlesztéseképp érdemes lenne a fordulatkor mért viharokhoz hasonló idősorokkal tovább kalibrálni a modellt. Így a jövőben a klímaváltozással járó szélsőséges időjárási körülményekről is készíthető lesz előrejelzés a modell segítségével. A kutatás következő lépése a téli áramlási forduló időszakának modellezése. Amennyiben az intenzív behatása eredményeképp a modellben nem változik meg az áramkép, akkor az előző bekezdésben feltett numerikus kérdések vizsgálatát kell elvégezni.

7. Irodalomjegyzék

- Campbell, I.H., McDougall, T.J., Turner, J.S. (1984): *A note on fluid dynamic processes which can influence the deposition of massive sulfides*, Economic Geology. 79, 1905-1913
- Chen, C., Beardsley, R. C., & Cowles, G. (2003): *A finite-volume, primitive equation ocean model for regional coastal applications*. Ocean Modelling, 9(1), 1-25.
- Deardoff, J. W. (1970.): *Convective velocity and temperature scales for unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection*, Journal of Atmospheric Sciences. 27: 1211-1213
- Foken, T. (2008): *Micrometeorology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Guseva, S., Armani, F., Desai, A. R., Dias, N. L., Friberg, 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.
- Haszpra, O. (1985): *Kémény a hévízi-tóban, Élet és Tudomány* 40 (7) pp. 195-196
- Imberger, J. (1985): *The diurnal mixed layer*, Limnology and Oceanography., 30(4), 1985, 737-770
- Kim, J. W. (1976.): *A generalized bulk model of the oceanic mixed layer*, Journal of Physical Oceanography. 6: 686-695.
- Lükő, G.; Torma, P. (2024): *A Balaton 3D hidro- és termodinamikai modelljének továbbfejlesztése*, HIDROLÓGIAI KÖZLÖNY 104 (2) pp. 16-27.
- MacIntyre, S. (2002): *Spatial-temporal variability in surface layer deepening and lateral advection in an embayment of Lake Victoria, East Africa*, Limnology and Oceanography, 47(3), 2002, 656-671
- Moll, K. (1941): *A hévíztófürdő hőmérsékleti vizsgálata*, Hidrológiai Közlöny, pp 1-14.
- Nagy, J. (2022): *Hévíz térségének hidrogeológiai vizsgálata*, BME-VVT, M.Sc. Thesis, Budapest
- Qi, J., Chen, C., Beardsley, R.C., Perrie, W., Cowles, G. W., Lai, Z. (2009): *An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): Implementation, validations and applications*. Ocean Modelling 28(1-3). pp. 153-166.
- Rayner, K. N. (1981): *Diurnal Energetics of a reservoir surface layer*, University of Western Australia Center of Water Research Reference ED-80-005
- Turner, J.S., Campbell, I.H. (1987): *Temperature, density and buoyancy fluxes in „black smoker” plumes, and the criterion for buoyancy reversal*, Earth and Planetary Science Letters, 86 (1987) 85-92
- Torma, P. (2016): *Modelling wind-driven shallow lake hydrodynamics and thermal structure*, BME-VVT, Ph.D. Thesis, Budapest
- Torma, P.; Reska, Zs.; Nagy, J. B.; Rehák, A.; Hajnal, G. (2024): *Analyzing the turbulent air-water fluxes and the energy balance of a geothermal lake*, In: Shared Lakes: One Water, One Health, IAGLR's 67th Annual Conference on Great Lakes Research, Windsor, Kanada (2024) p. 217.
- Zhang, Y. Z.; Ateljevich, E.; Yu, H.; Wu, C. H.; Yu, J. (2015): *A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model*. Ocean Modelling, 85, 16-31.