

# A Velencei-tavi vízmérlegszámítás záróhibáinak elemzése és a számítási módszertan felülvizsgálata

CHAPPON Máté, Dr. BENE Katalin  
Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium,  
Széchenyi István Egyetem, Közlekedésépítési- és Vízmérnöki Tanszék  
9026 Győr, Egyetem tér 1.  
[chapon.mate@sze.hu](mailto:chapon.mate@sze.hu)

## **Kivonat:**

Az elmúlt években a Velencei-tó vízszintje természeti és emberi hatások együttes hatására jelentősen csökkent. A tó vízszintje 2022. szeptemberében új negatív rekordot döntött. Szakértők, civilek és politikai szereplők egyaránt keresik a megoldást a tó vízszintjének helyreállítására.

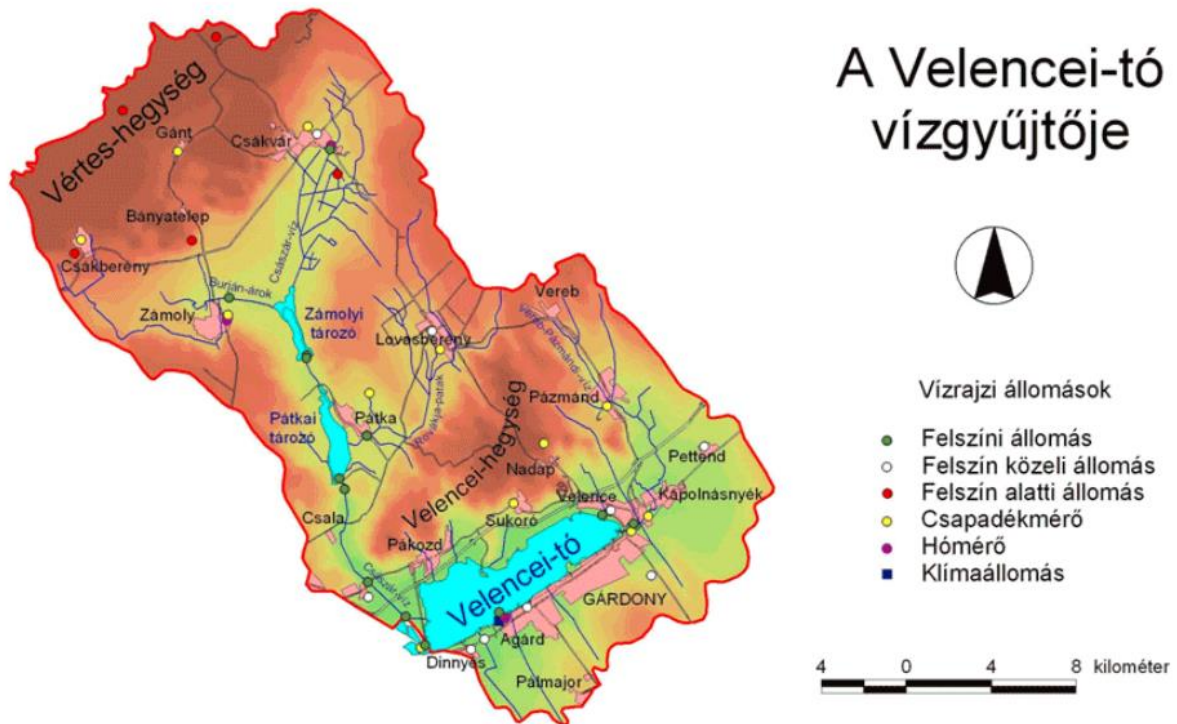
Jelen kutatásban az elmúlt 37 évre rendelkezésre álló havi rendszerességű vízmérleg számítás adataiból indulunk ki. A számítás záróhibája a számított és a megfigyelt tóbeli vízszint különbségeként kerül meghatározásra. A záróhibák vizsgálatából kiderült, hogy az 1970-es évek végén kidolgozott és jelenleg is alkalmazásban levő számítási módszertan több bizonytalansággal terhelt. E bizonytalanságok hatására a záróhibák jellemzően negatív értéket vesznek fel, azaz a számított vízszintek jellemzően alacsonyabbak, mint az agárdi vízmércén mért szintek.

A tanulmányban feltárjuk a vízmérlegszámítás záróhibáinak lehetséges okait és javaslatot teszünk a módszertan továbbfejlesztésére. Célunk, hogy a tó vízháztartását befolyásoló folyamatok jobb megértése révén segítsük a vízszintek helyreállítását célzó mérnöki és szabályozási beavatkozások megalapozását.

**Kulcsszavak:** Velencei-tó, vízmérleg, záróhiba, vízkészlet, csapadék, párolgás, felszíni hozzáfolyás, felszín alatti hozzáfolyás, víztározás

## **BEVEZETÉS**

A Velencei-tó hazánk második legnagyobb természetes tava. A Velencei-hegység lábánál, a Mezőföld peremén elhelyezkedő, délnyugat-északkeleti hossz tengelyű tó felülete 24,2 km<sup>2</sup>. Hossza 10,5 km, átlagos szélessége 2,3 km, átlagos mélysége 1,9 méter. (Vizügy.hu 2009) A tó nyugati részén természetvédelmi terület, a Velencei-tavi madárrezervátum (Természetvédelem.hu, 2021) található. Az egykor a tóhoz tartozó, mára a feltöltődés miatt már elkülönült Dinnyési Fertő területével együtt a Velencei-tó nádas területe a Ramsari egyezmény védelme alatt áll (Ramsar.org). A tó keleti fele ugyanakkor elsősorban rekreációs hasznosítású üdülőtóként működik. A Balaton és a Tisza-tó után Magyarország harmadik legjelentősebb vízparti turisztikai célpontja. (Reich 2022)



1. ábra: A Velencei-tó vízgyűjtő területének áttekintő térképe. forrás: (Vizügy.hu 2009)

A Velencei-tó vízgyűjtőterülete (1. ábra) 602 km<sup>2</sup>, amely 3 részre osztható. (Bogárdi, Koris, and Vajnai 1976) Ezek: 1) A tó fő tápláló vízfolyása a Császár-víz, mely a Vértess-hegység déli lejtőin, Csákvár település közelében ered és a Velencei-tó nyugati oldalán torkollik a tóba. A Császár-víz vízgyűjtője a tó teljes vízgyűjtőjének kb. 64 %-a. 2) A tó keleti oldalról a Vereb-Pázmándi-víz folyáson keresztül kap vízutánpótlást. A vízfolyás vízgyűjtője a teljes vízgyűjtőterület mintegy 17%-a. 3) Emellett a tó közvetlen vízgyűjtőjéről, mely a teljes vízgyűjtő 19 %-át teszi ki, számos kisebb, időszakos vízfolyás éri el a tavat. Az 1800-as évek végéig természetes hatások (csapadék, párolgás, hozzáfolyás, illetve túlfolyás a Sárvíz irányába) befolyásolták a tó vízszintjét, amely ennek megfelelően erősen ingadozott. (Vizügy.hu 2009) A XIX. század végi vízrendezés előtt a tó vízszintje számos alkalommal jelentősen lecsökkent és így a tó a jelenlegi méreténél jóval kisebbre zsugorodott. Ugyanakkor különösen bővizű időszakokban, illetve hóolvadást követően előfordultak nagyobb áradások is, legutóbb 1963-ban.

### Üdülőtó és vízszintszabályozás

A XX. század elejére a tó vízszintjének szabályozására megépült a Dinnyés-Kajtori-csatorna, illetve a Dinnyési-zsilip. Ezt követően felélénkült az érdeklődés a tó rekreációs hasznosítása iránt, melyben jelentős szerepe volt Székesfehérvár és Budapest közelségének. A tó hasznosítása érdekében az 1950-es évektől elkezdve nagy mértékű emberi beavatkozás vette kezdetét a tó medrében, majd később a vízgyűjtő területen is. Nagyszabású kotrási és partépítési munkák történtek, amelyek eredményeképpen a tóban a nádas felületek 60%-ról 40%-ra csökkentek (1. kép), a partvonal 65%-a pedig mesterséges burkolatot kapott. (Szilágyi et al. 1989). Mindemellett meg kell említeni, hogy a természetvédelmi szempontokat sem

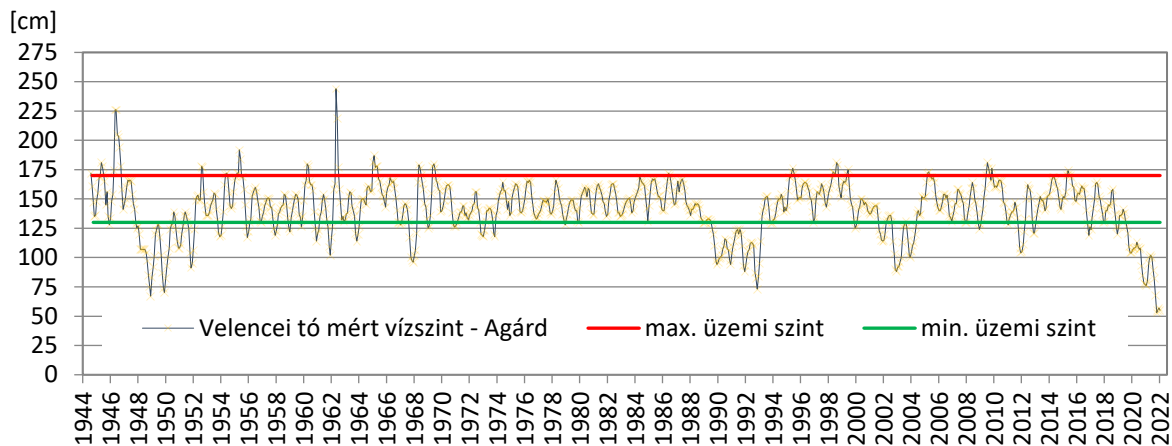
hagyták figyelmen kívül, hiszen 1958-ban védetté vált a Velencei-tavi Madárrezervátum, illetve 1979 óta a Velencei tavi nádas a Ramsari egyezmény által is védett terület lett.



1. kép: Velencei-tó madártávlatból (válaszonline.hu)

A Velencei-tó fokozódó turisztikai hasznosítása megkövetelte az egyre kifinomultabb vízszintszabályozást. Míg a nagyvizek levezetésében a Dinnyési-zsilip tölt be kulcsszerepet, addig a kisvizes időszakok vízpótlásáról a Császár-vízen megépült, sorba kapcsolt két tározó hivatott gondoskodni. A Zámolyi- és Pátkai-tározókat az 1970-es években építették kimondottan azzal a céllal, hogy a tavaszi vízbő időszak feleslegét visszatartva – szükség esetén – pótolni tudják a Velencei-tó vízkészletét. A tározók völgyzárógáttal, illetve szabályozható vízkivételi művekkel épültek meg. Üzemeltetésükre korszerű számítógépes döntéstámogató modell is készült. (Koris and Nagy 1977).

A Velencei-tó vízszintszabályozása az üzemelési szabályzat alapján az Agárdi vízmérce szerinti 130-170 cm, mint minimum és maximum üzemi szintek figyelembevételével történik. (VKKI 2010). A tározókból történő vízeresztést meg kell kezdeni, amennyiben a Velencei-tó szintje nem éri el az alsó szabályozási szintet. Ezt elsősorban a tavaszi, természetes feltöltődési időszakokra ütemezve kell végezni, de egyéb szempontok mérlegelése alapján a vízpótlás máskor is kivitelezhető. A 1. ábra2. ábra a Velencei-tó Agárdon található vízmércéjén leolvasott vízállások idősorát mutatja be.



2. ábra: Az Agárdi vízmérce vízállás időszora 1944 – 2022 között (adatok forrása: Középdunántúli Vízügyi Igazgatóság - KDTVÍZIG)

A tározók megépülése óta eltelt hozzávetőleg 50 évben a tározókból történő vízpótlás a tó vízkészlet-szabályozásának szerves részét alkotta, sőt az utóbbi 20 évben a tározott készletek igénybevételének aránya növekedett (Reich 2022). Mindazonáltal a vízgyűjtőterület jellegzetességeiből adódóan a tó vízszintje az elmúlt 30 évben többször is éveken át a minimum üzemvízszint alatt maradt. Az egyik ilyen alkalommal, 1993-1995 között a Székesfehérvár melletti Rákhegy II. vízaknából mintegy 12 millió m<sup>3</sup> karsztvíz került átvezetésre a Velencei-tóba, a vízszint helyreállítása érdekében. (OVF 1996)

Az elmúlt években a Velencei-tó vízszintje ismét évről évre csökkenő tendenciát mutat. A Dinnyési-zsilipen 2016 decembere óta nem történt vízeresztés, ennek ellenére 2022 szeptemberében a Velencei-tavi vízszintrögzítések kezdete (1934) óta mért legkisebb vízállást rögzítették (53 cm). Mindeközben a Zámolyi-tározó már leürítésre került, a Pátkai-tározó szintje pedig elmaradt a minimum üzemvízszinttől.

Jelen kutatásban az elmúlt 37 évre rendelkezésre álló havi rendszerességű vízmérleg számítás (KDTVÍZIG.HU), illetve a számítás záróhibáinak elemzéséből kiindulva igyekszünk feltárni a tó vízháztartását befolyásoló folyamatokat. Meggyőződésünk, hogy ezek jobb megértése révén segíthetjük a vízszintek helyreállítását célzó mérnöki és szabályozási beavatkozások megalapozását.

## VÍZMÉRLEGSZÁMÍTÁSI MÓDSZERTAN

A tó jelenleg alkalmazott vízmérlegszámítási módszertanának alapját a Vízügyi Tudományos Kutatóintézet (VITUKI) munkatársainak 1970-es években történt kutatási eredményei adják. (Szabó, Antal, and Kozma 1977) A módszer lényege, hogy a tó havi vízkészletváltozását mért hidrológiai és hidrometeorológiai adatok alapján számítják, majd a kapott eredményhez hozzáadják a tavi vízmércéken észlelt mért vízkészletváltozás előjeles értékét. Az eredmény 0-tól való eltérése adja a vízmérlegszámítás záróhibáját. A mérleg készítés utolsó lépéseként a záróhibát a mérlegszámítás elemei között felosztják.

A havi vízmérlegszámítás az (1) képlet szerint történik (Antal, 1986; Simonics - Tóth, 2003).

$$C + H + H_t = P + L + V_k \pm \Delta K \quad (1)$$

A tóra hulló csapadék (C), a tavat tápláló hozzáfolyás (H) és a Pátkai-tározóból történő vízpótlás ( $H_t$ ) adja a vízmérleg bevételi oldalát. A tó vízmérlegének kiadási oldalán a legfontosabb elem a párolgás (P), emellett időszakonként előforduló elem a Dinnyés-Kajtori-csatornán keresztül történő vízeresztés (L) és a Dinnyési Ivadéknevelő Tógazdaság számára történő vízkivétel ( $V_k$ ). A mért vízkészletváltozás ( $\Delta K$ ) pozitív, amennyiben a tó vízszintje növekedett és negatív, ha a vízszint csökkent. A mérlegszámítás minden tagját tó-milliméter (tó mm) mértékegységben adják meg. Az egyes elemek tó mm-re történő átszámítása a GEOMONTÁN Kft. 1996-ban elvégzett geodéziai felmérése alapján készült morfológiai görbék (Simonics - Tóth, 2003) figyelembevételével történik. A számításnak nem része a tóhoz történő felszín alatti hozzáfolyás, vagy a tóból való elszívárgás. Ennek esetleges felülvizsgálatával, illetve annak módszerével egy későbbi fejezetben foglalkozunk.

### **Számítási módszertan**

Az alábbiakban a Középdunántúli Vízügyi Igazgatóság (KDTVÍZIG) által 1986 óta használt módszertan leírását ismertetjük. A módszertanban 2002-ben történt minimális változtatás, amely a Velencei-tó morfológiai görbéit, illetve a tó náddal való borítottságának mértékét érintette. (Simonics - Tóth, 2003)

#### *Csapadék (C)*

A tóra hulló csapadék értéke a Velencei-tó partjához közeli négy csapadékmérő állomás – Agárd, Dinnyés, Kápolnásnyék, Velencefürdő – havi csapadékösszegeinek számtani átlagaként állítható elő.

#### *Hozzáfolyás (H)*

Az alább számított két érték összegzése adja a vízgyűjtőről származó teljes hozzáfolyás értékét:

1. A Császár-víz vízgyűjtőjéről származó hozzáfolyás meghatározásához, a kőrakáspusztai szelvényének (000819) havi középvízhozam értékeit csökkentik a Pátkai-tározóból történő esetleges vízeresztések mértékével (az ún. alaphozam leválasztása). Ezt követően a vízgyűjtőnövekedés arányának megfelelően megállapított szorzótényezővel (értéke: 2,63) szorozzák az alaphozam értékét.
2. A tó vízgyűjtőjének további területeiről származó hozzáfolyás számításához a Vereb-Pázmándi-vízfolyás kápolnásnyéki szelvényének (000820) adatait egy hidrológiai analógiával megállapított szorzótényezővel (értéke: 1,84) szorozzák, a tó nem mért – közvetlen – vízgyűjtőjének figyelembevétele érdekében.

#### *Hozzáfolyás a Pátkai-tározóból ( $H_t$ )*

A mérlegelem számításához a Császár-víz kőrakáspusztai szelvényének adatsorát használják fel. Értékét a vízeresztéses időszakok vízhozamából a kisvízfolyás alaphozamának leválasztásával kapják meg.

### *Párolgás (P)*

A Velencei-tó párolgását az agárdi műszerkertben mért alapadatokból, 42%-os nádborítottságot figyelembe véve az alábbi módon számítják:

Novembertől márciusig:

$$P=0.55 \times [(E-e)/1,33]^{0,9} \times (1+t/273)^9 \times (1+0,015 \times u)^2 \times n$$

ahol:

E - a levegő havi, közepes telítési párányomása (hPa)

e - a levegő havi, közepes párányomása (hPa)

t - a havi közepes léghőmérséklet (°C)

u - a havi közepes szélesség

n - a hónap napjainak száma

Áprilistól októberig:

$$P=1,11 \times (0,58+0,42 \times K) \times A_{\text{átl.}}^{0,79} \times (1+u)^{0,13} \times n$$

ahol:

$A_{\text{átl.}}$  - az „A” típusú párolgásmérő kád átlagos napi párolgása (mm)

u - a havi közepes szélesség

n - a hónap napjainak száma

K - nádkonstans

A nádkonstans értéke éves viszonylatban változatlan, értéke az egyes hónapokban:

hónap	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
K	1,02	1,13	1,22	1,26	1,22	1,13	1,04

### *Víz kivétel ( $V_k$ )*

A víz kivétel vízmérlegelem számításánál a Dinnyési Ivadéknevelő Tógazdaság (DIT) számára a Császár-vízből és a Velencei-tóból kiszolgáltatott vízmennyiséget, a Fejér-megyei Szakasz mérnökség által meghatározott értékkel veszik figyelembe.

### *Vízeresztés (L)*

A vízeresztéses időszakok havi összegeit a Dinnyési-zsilip zsilipnaplói, illetve ellenőrző vízhozammérések és a zsilip hitelesítési egyenlete alapján számítják.

### **Záróhibák**

A vízmérlegszámítás (1) számú képletét úgy is lehet értelmezni, hogy egy adott  $n$  hónap vízkészletváltozása ( $\Delta H_n$ ) mért és számított értékkel is meghatározható:

1.  $\Delta H_M$  - Mért vízkészletváltozás:

a hóeleji közvetlen vízállásmérések különbözeteként előálló előjelhelyes érték

$$\Delta H_{M,n} = \Delta h_{n+1} - \Delta h_n \quad (2)$$

2.  $\Delta H_C$  - Számított vízkészletváltozás:

a számított vízmérlegelemek előjelhelyes összegeként kapott érték.

$$\Delta H_{C,n} = C_n + H_n + H_{t,n} - P_n - L_n - V_{k,n} \quad (3)$$

A két módszer (a számított és a mért készletváltozás) különbsége adja a vízmérleg adott hónapra vonatkozó záróhibáját ( $Z_n$ ).

$$Z_n = \Delta H_{C,n} - \Delta H_{M,n} \quad (4)$$

Amennyiben  $Z_n$  értéke negatív, akkor a vízmérlegszámítás (3) számú képletének eredményeként előálló tóbeli vízszint kisebb, mint a hónap végén a tóban levő valós vízszint. Ez legegyszerűbben úgy következhet be, ha a vízmérleg bevételi oldalát alul becsüljük és/vagy a kiadási oldalt túlbecsüljük. Pozitív záróhiba esetén természetesen ennek ellenkezőjéről van szó, ekkor a számítással kapott hónap végi vízszint magasabb, mint a valós vízszint – a bevételi oldalt túlbecsültük és/vagy a kiadási oldalt alul becsültük. Abban a ritka esetben, amikor a számítás záróhibája 0, akkor a tóbeli számított vízszint a hónap végén megegyezik a mért vízszinttel. Ez egy adott hónapban úgy is előfordulhat, hogy az egyes elemek számított értéke nem egyenlő a valós értékükkel, ám a számítások hibái kioltják egymást. Megállapítható ugyanakkor, hogy ha hosszú időre vonatkoztatva vizsgáljuk a vízmérleg számítási záróhibák idősorát, akkor a hibák statisztikai jellemzőiből következtethetünk a számítás megfelelőségére, illetve hibáinak forrására.

## ZÁRÓHIBÁK ELEMZÉSE

A KDTVÍZIG 1986 óta végzi a vízmérlegszámítást a Velencei-tóra vonatkozóan. Az elvégzett számításokat éves jelentés formájában az interneten is közzéteszik (KDTVÍZIG.HU). A közzétett dokumentumok a havi adatokat is tartalmazzák. Az alábbiakban az éves és havi záróhibák idősorát külön elemezzük.

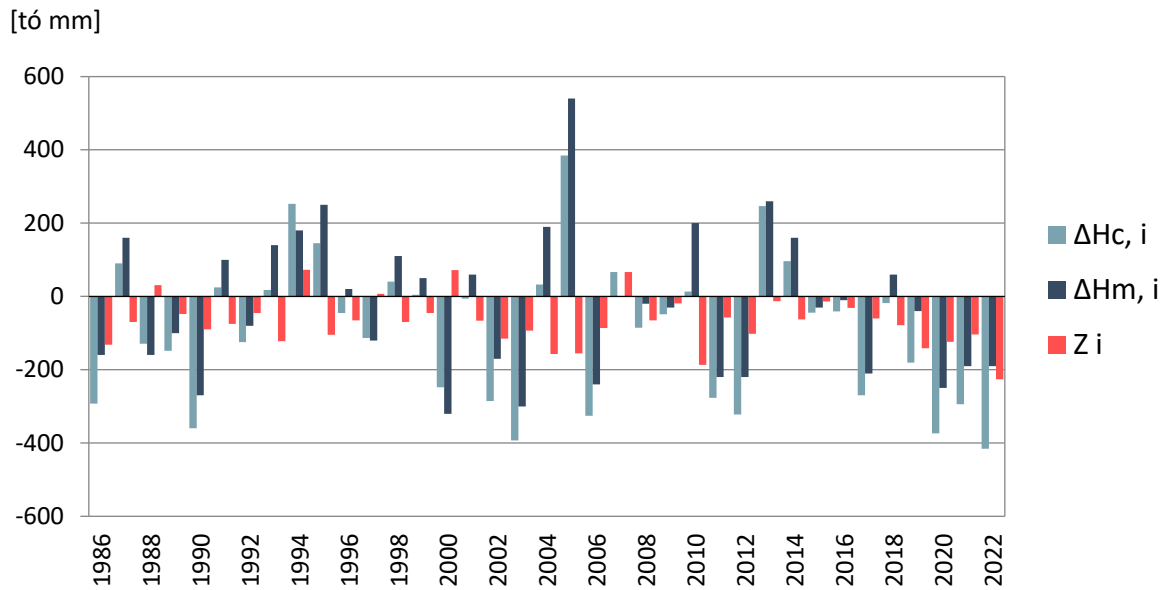
### Éves záróhibák

Elsőként a számítások éves záróhibáinak ( $Z_i$ ) idősorát vizsgáljuk, mely a havi számítások záróhibáinak összegeként adódik.

$$Z_i = \sum_{n=1}^{12} Z_n = \sum_{n=1}^{12} \Delta H_{C,n} - \Delta H_{M,n}$$

A vízmérlegszámításból, valamint a vízszintmérések eredményeiből adódó vízszintváltozás éves összegzett értékét, továbbá a számítás záróhibáját a 3. ábra szemlélteti.



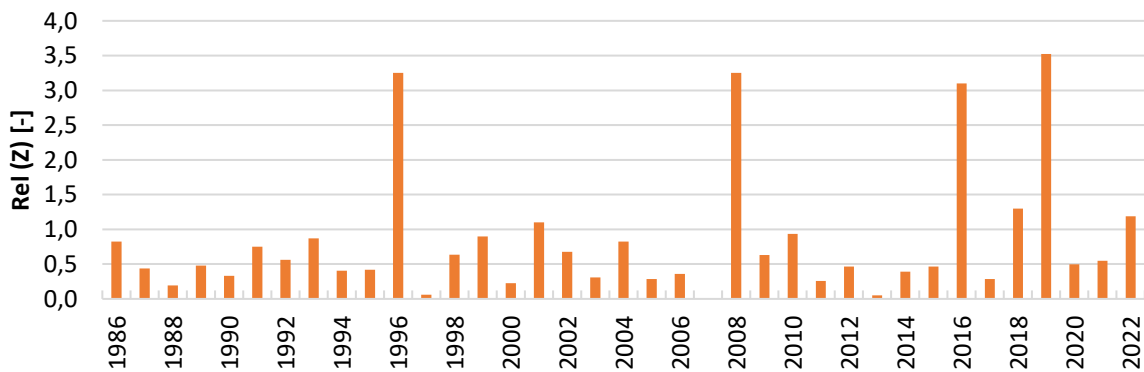


3. ábra: Mért- és számított vízszintváltozás, illetve záróhiba éves adatok időszora 1986-2022

A záróhibák idősorából kitűnik, hogy a vizsgált 37 év közül csak 4 olyan volt, melyben az éves záróhiba értéke pozitív lett volna. A hibák átlaga  $-70$  tó mm, szórása 67 mm. Ebből az látszik, hogy a vízmérlegszámítási módszer várhatóan következetesen alul becsüli a vízmérleg bevételi oldalát és/vagy felül becsüli a kiadási oldalt.

A hibák nagyságrendjének érzékeltetésére a 4. ábra a relatív hibákat is feltüntetjük. A relatív hiba számításához az éves hiba abszolútértékét az éves vízszintváltozás abszolútértékével osztjuk.

$$Rel(Z) = \frac{|Z|}{|\Delta H_M|}$$



4. ábra: Velencei-tó vízmérlegszámítás relatív hibáinak időszora 1986-2022 – éves adatok

A relatív hiba értéke tehát egy arányszám, amely megmutatja, hogy a hiba nagysága hányszorosa a tényleges vízszintváltozás nagyságának. A relatív hiba értékek átlaga 0,86; míg a szórásuk 0,92. Tehát elmondható, hogy az éves hiba értéke átlagosan közel megegyező nagyságrendű, mint maga a vízszintváltozás mértéke, ugyanakkor a relatív hiba értékeiben nagy szórás fedezhető fel.

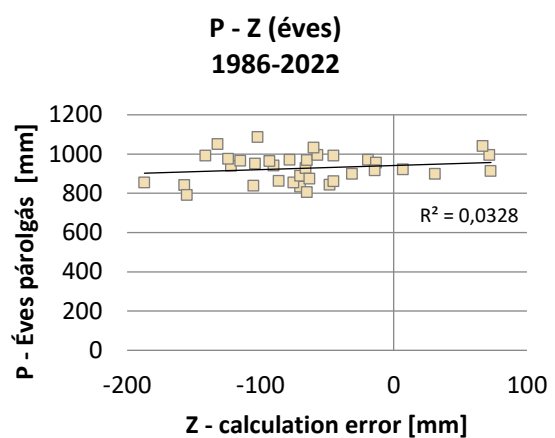
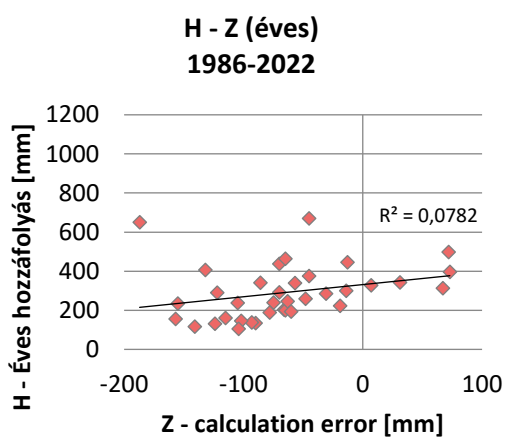
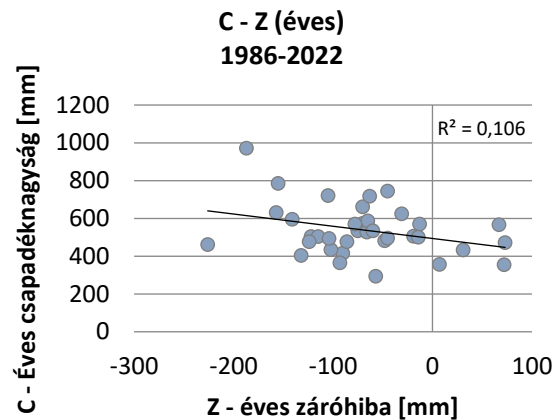
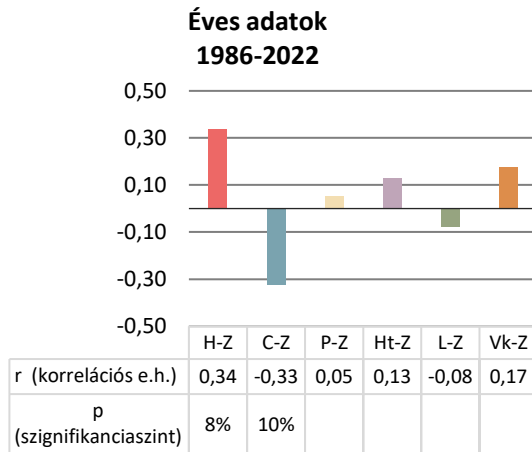


Az éves hibák lehetséges okainak vizsgálatához elsőként megvizsgáltuk az egyes vízmérlegelemek éves értékének és a záróhiba éves értékének összefüggéseit. Ehhez felhasználtuk a vízmérlegszámítás elemeinek idősorait. Ezen adatokat halmozott oszlopdiagramba foglalva az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: Velencei-tó vízmérlegszámítás elemeinek éves idősorai 1986-2022. ( $H_{ext}$  – külső forrásból származó vízpótlás)

A vízmérlegszámítások egyes elemeinek értéke és a záróhiba értéke között nem találtunk egyértelmű összefüggéseket. A kétváltozós korrelációanalízis eredményeit a 6. ábra mutatja.



6. ábra: Éves záróhiba és az egyes vízmérlegelemek korreláció vizsgálatának eredményei. Továbbá az évi csapadék (C), Hozzáfolyás (H) és párolgás (P) valamint a záróhiba (Z) értékeinek pontfelhői.

A 6. ábra látható, hogy a hozzáfolyás (H) valamint a csapadék (C) éves nagysága rendre 8%-os és 10%-os T-próbával számított szignifikancia szint mellett igen gyengén korrelált a záróhiba éves (Z) nagyságával. A hozzáfolyás és a záróhiba nagysága között gyenge pozitív összefüggés látható. Eszerint a relatív nagy hozzáfolyás értékkel rendelkező években a záróhibák értéke inkább pozitív, vagy kisebb mértékben negatív volt.

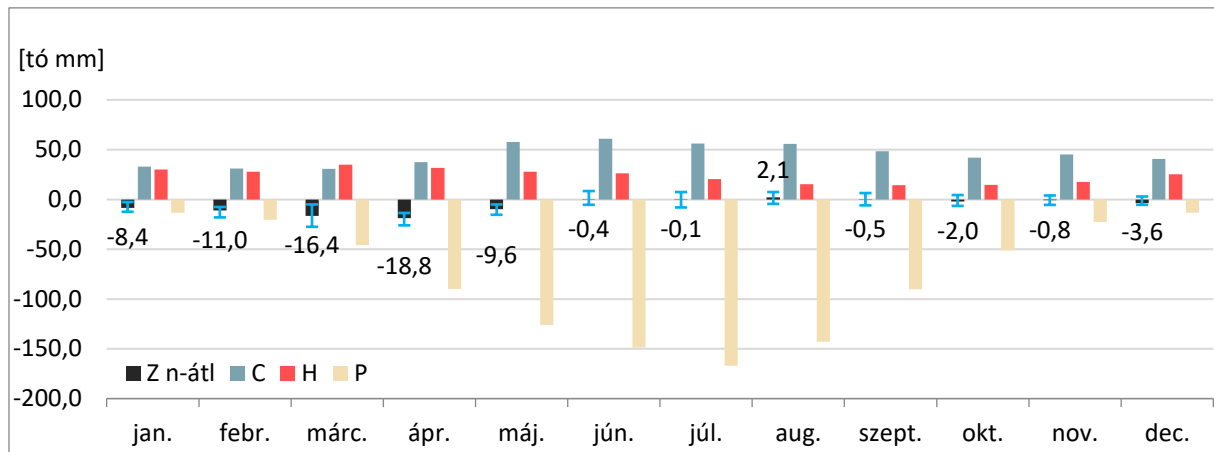
A csapadék esetében az összefüggés negatív, azaz csapadékosabb években a záróhiba inkább alacsonyabb negatív értéket vett fel, míg szárazabb években a záróhiba inkább pozitív, vagy kisebb mértékben negatív volt.

A párolgás (P), a tározóból történő hozzáfolyás (H<sub>t</sub>), a vízeresztés (L), illetve a vízhasználat (V<sub>k</sub>) éves értékei nem korreláltak a záróhiba nagyságával.

### Havi záróhibák

A havi záróhibák vizsgálatát azzal kezdtük, hogy az egyes hónapokra vonatkozóan meghatároztuk az átlagos hibák értékeit (Z<sub>n-átl</sub>). Ebből született meg a 7. ábra, melyen látható, hogy az éves záróhibaértékeknél tapasztalt általában negatív hibák jellemzően a január-májusi

időszakban akkumulálódnak. A nagyságrendek érzékeltetése érdekében a havi csapadék (C), hozzáfolyás (H), illetve párolgás (P) értékeit szintén feltüntettük az ábrán.

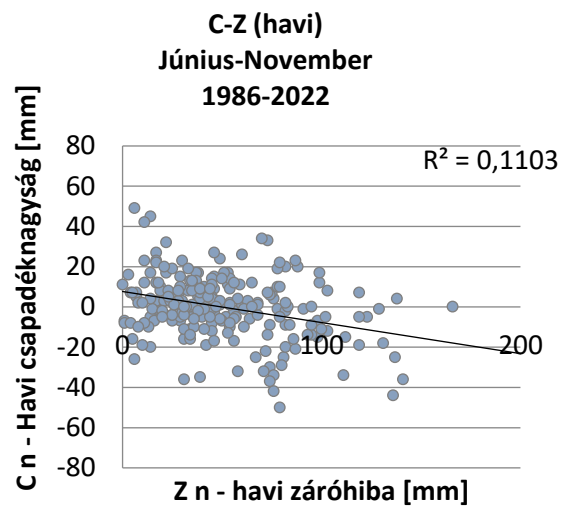
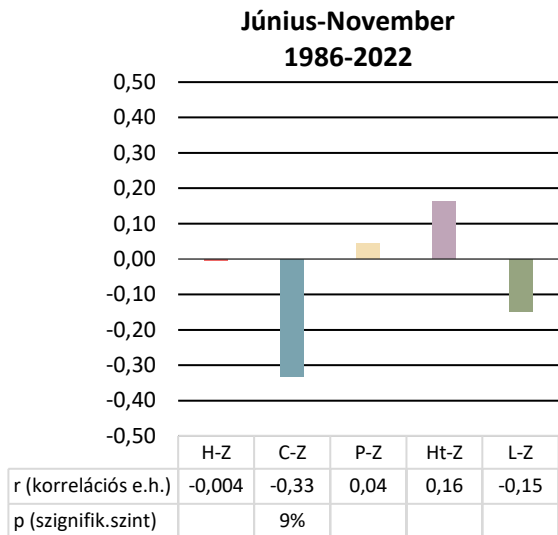
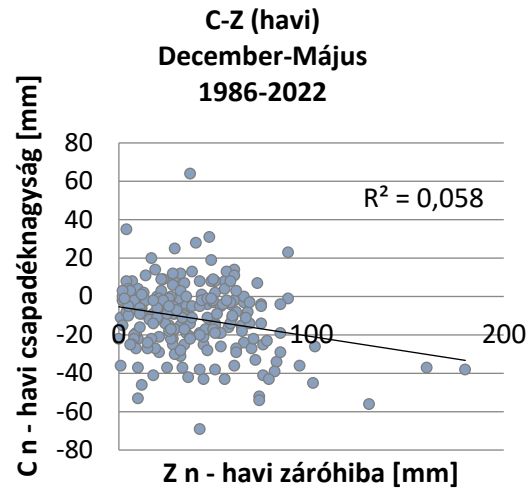
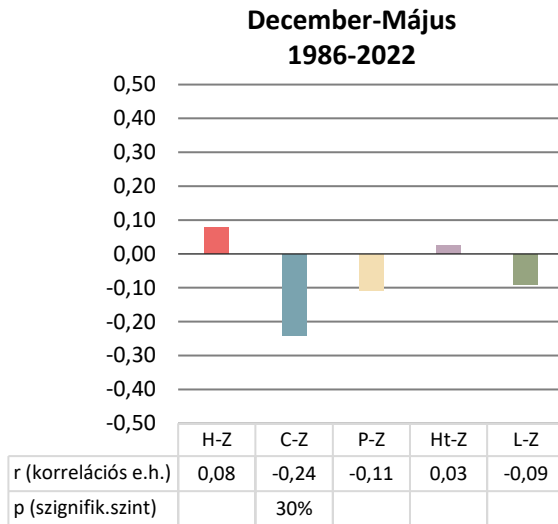


7. ábra: Átlagos havi záróhiba ( $Z_{n-átl}$ ), átlagos havi csapadék(C), hozzáfolyás(H) és párolgás(P)

A havi záróhibák elfogadható mértékére vonatkozóan a VITUKI 1996-ban készült tanulmánya (Pappné Urbán et al. 1996) szolgál iránymutatással. Eszerint a havi számításban 10 tó mm alatti hiba elfogadható mértékű, hiszen ez a vízkészletváltozás meghatározásának pontossági határa. A 7. ábra azonban jól látható, hogy a januári, februári és májusi átlagos hiba értékek 10 mm körül szórnak, míg a márciusi és áprilisi értékek jelentősen meghaladják azt. Sőt, utóbbi hónapban majdnem kétszerese az átlagos hiba az elfogadhatónak! A 7. ábra ugyanakkor az is látható, hogy a június-november közötti időszak záróhibáinak átlaga igen közel esik 0-hoz, azaz itt nem lelhető fel rendszeres hiba a havi számításban. E 6 hónap átlagos hibaértékeinek eredője mindössze  $-1,7$  mm; kisebb, mint bármelyik havi érték az év másik 6 hónapjában. Decemberben a hiba értéke jóval 10 mm alatt marad, de markánsan eltér negatív irányban a június-november hónapok átlagos hibáitól.

Fentiek alapján a további vizsgálatokhoz a havi adatokat két részre bontottuk. Az egyik minta a decembertől májusig tartó időszak adatait, a másik pedig a júniustól novemberig tartó adatokat foglalta magába. A 37 éves időszakra vonatkoztatva ez két darab 222 elemből álló mintát eredményezett, a vízmérlegszámítás minden elemére vonatkozóan. Érdekes felismerni, hogy a havi átlagos hibák alapján elkülöníthető két időszak hozzávetőlegesen követi a hidrológiai év két félévét, a téli-tavaszi felhalmozódás, illetve a nyári-őszi készletcsökkenés időszakát. Megállapítható tehát, hogy a Velencei-tó jelenleg használt vízmérlegszámítási módszertana lényegesen rosszabbul teljesít a felhalmozódás időszakában, mint a készletcsökkenés hónapjaiban.

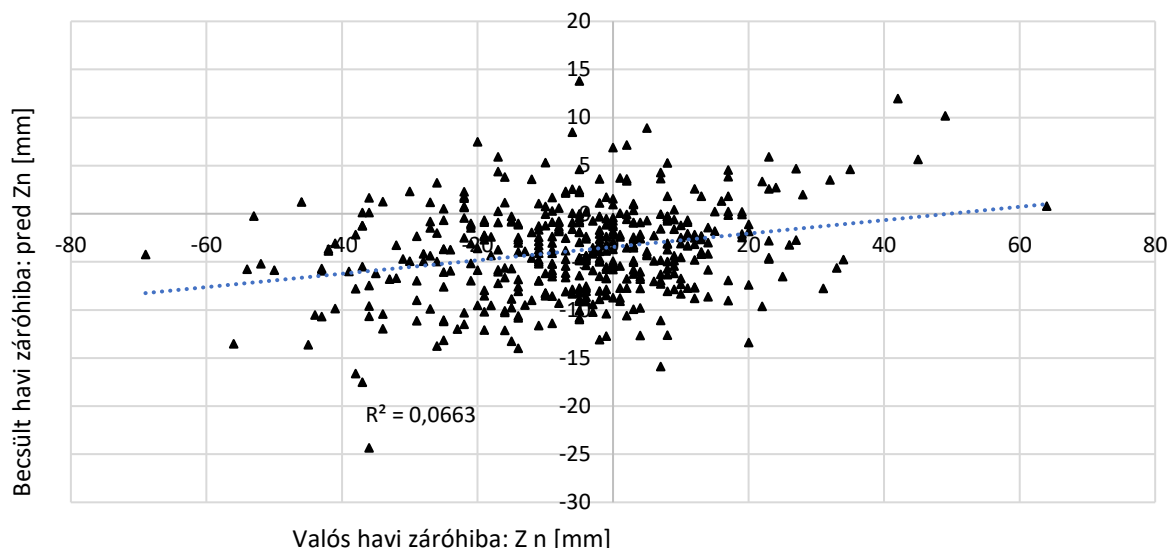
A korrelációs vizsgálatok azonban a havi hibák értékeinek értelmezésében sem szolgáltak meggyőző bizonyítékként. A két időszakra külön-külön elvégzett korrelációszámítások 5%-os szignifikancia szinten nem mutattak ki összefüggést a vízmérlegelemek és a záróhibák havi értékei között. (8. ábra)



8. ábra: Havi záróhiba és az egyes vízmérlegelemek korreláció vizsgálatának eredményei a december-május, illetve a június-november időszakra vonatkozóan. Továbbá a havi csapadék (C), valamint a havi záróhiba (Zn) értékeinek pontfelhői.

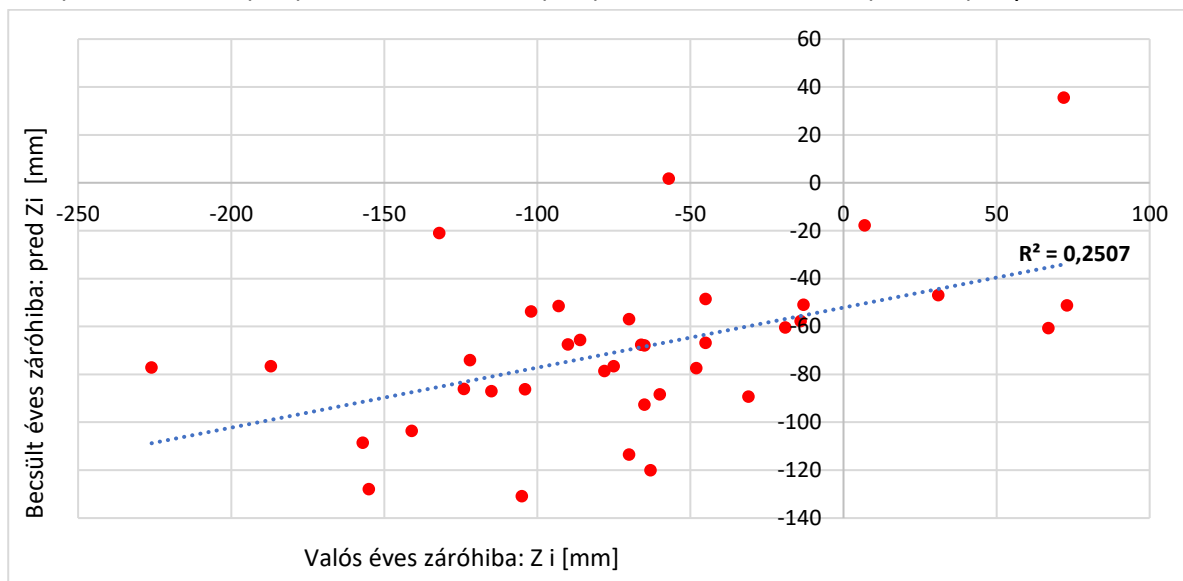
Az egyetlen 10%-os T-próba szerinti szignifikancia szinten kimutatható korreláció a leürülés időszakában a csapadéknagyság és a záróhiba havi értéke között volt jelen, de ez mindössze egy igen gyenge, már-már elhanyagolható ( $R^2=0,11$ ) értékű negatív korrelációt jelent.

Egy 1996-ban készült tanulmány (Pappné Urbán et al. 1996) alapján a havi záróhiba-adatok és a vízmérleg elemek 1986-1995 közötti adatainak többváltozós regressziós vizsgálatának eredményei a párolgás és a felszíni hozzáfolyás meghatározó szerepét sugallják a hibák alakulásában. Ugyanakkor a jelen vizsgálat során a havi adatokra elvégzett többváltozós regressziós vizsgálatok ezt nem támasztják alá. Többváltozós regresszióanalízis esetén a T-próba szerinti szignifikancia szintek a C,  $H_{be}$  ( $H_{be} = H+Ht$ ) és P havi értékeire hiába voltak kisebbek 5%-nál, az  $R^2$  értéke mégis jóval 0,1 alatt maradt a becsült záróhiba ( $pred Z_n$ ) és a valós záróhiba értékei között. (9. ábra).



9. ábra: Havi záróhibák többváltozós regresszióanalízissel történő becslése (C,  $H_{be}$  és P havi értékeit felhasználva)

Megvizsgálva a többváltozós regressziót az éves adatok esetében a C és H együttes szerepe látszik szignifikánsnak. A havi záróhiba (pred  $Z_i$ ) becslésekor az  $R^2$  értéke 0,251-re javult (10. ábra), a korábbi  $R^2(C-Z) = 0,106$ ; illetve  $R^2(H-Z) = 0,115$  értékekhez (6. ábra) képest.



10. ábra: Éves záróhibák többváltozós regresszióanalízissel történő becslése (C és H éves értékét felhasználva)

A többváltozós regresszióanalízis eredményeként pred  $Z_i$  képletében C negatív együtthatóval, míg H pozitív együtthatóval szerepel. Ez azt jelenti, hogy a záróhiba értéke nagyobb negatív érték lesz a csapadékosabb években, amikor ennek ellenére kicsi a hozzáfolyás értéke. A záróhiba kisebb, esetleg pozitív lesz szárazabb, de relatív nagyobb felszíni lefolyást mutató években.

#### Záró hibák lehetséges okai

Az ismertetett vizsgálatok alapján a vízmérlegszámítás záróhibái nem köthetőek egyértelműen egyik vagy másik vízmérleg elemhez. Mindazonáltal a hibák nagyságrendje megkérdőjelezi a módszertan megfelelőségét arra vonatkozóan, hogy az alapján megértsük a tóbeli vízszintek változásait előidéző tényezők valós súlyát. Éppen ezért a tó külső forrásból való pótlását, illetve a vízgyűjtőterület vízgazdálkodására vonatkozó hosszútávú stratégiai döntéseket meg kell, hogy előzze a vízmérlegszámítás módszertanának felülvizsgálata és egy olyan módszertan bevezetése, amelyik pontosabb képet ad a tó vízszintjeit befolyásoló hatásokról.

A fenti eredményeket némileg más megközelítésben vizsgálva elmondhatjuk, hogy az éves hiba átlagos nagysága köbméterben kifejezve:  $-1.780.000 \text{ m}^3$ . A havi átlagok ugyanezt az arányt képezik le, viszont, amint láttuk az éves hiba nagy részét a december-május közötti hónapok hibái adják. Felmerül a kérdés, hogy ha ennyivel alul becsüljük a bevételi oldalt, akkor ez a mennyiség honnan, milyen forrásból jut a tóba? Ha pedig ennyivel túlbecsüljük a kiadási oldalt, akkor a feltételezett vízforgalomnál nagyjából 7%-kal kevesebb víz fordul meg a tóban egy év alatt. Ez utóbbi eshetőség a vízminőség szempontjából nem elhanyagolható, ésszenen tartva, hogy többek között vízpótlási lehetőségként merült fel az Agárdi tisztított szennyvíz tóba vezetése is.

A KDTVÍZIG a záróhibák szétosztásánál azzal a feltételezéssel él, hogy egyfelől alul becsüljük a bevételi oldalt másrésztől túlbecsüljük a kiadási oldalt. Ezért, amikor a vízmérlegkészítés során a hibák felosztásáról döntenek, elsősorban a felszíni befolyási értékek növelésével, illetve a párolgási értékek csökkentésével érik el a vízmérleg egyensúlyba hozását. Ha azonban szisztematikusan vizsgáljuk a záróhibák forrásainak lehetséges okait, figyelembe véve a havi záróhibák átlagairól szerzett ismereteket, akkor félévekre bontva a 11. ábra látható mátrixokat kapjuk.

December - Május		KIADÁS		
		Alul becs.	Pontos	Túl becs.
B E V É T E L	Alul becs.	AA	AP	AT
	Pontos	PA	PP	PT
	Túl becs.	TA	TP	TT

Június - November		KIADÁS		
		Alul becs.	Pontos	Túl becs.
B E V É T E L	Alul becs.	AA	AP	AT
	Pontos	PA	PP	PT
	Túl becs.	TA	TP	TT

11. ábra: Havi záróhibák lehetséges okai a bevételi oldal és a kiadási oldal vonatkozásában

A december-május közötti záróhibák rendszeres jellegére tekintettel és figyelembe véve annak negatív előjelét a 11. ábra bal oldalán látható, hogy az alkalmazott vízkészletszámítási módszertan milyen módon becsülheti a bevételi és kiadási oldal havi értékeit. A június-novemberi időszak hibáit figyelembe véve, melyek inkább véletlen, zajszerű hibának tűnnek, a 11. ábra jobb oldalán látható ábrát kapjuk. Ha az ábra két felét egymásra vetítenénk, arra a

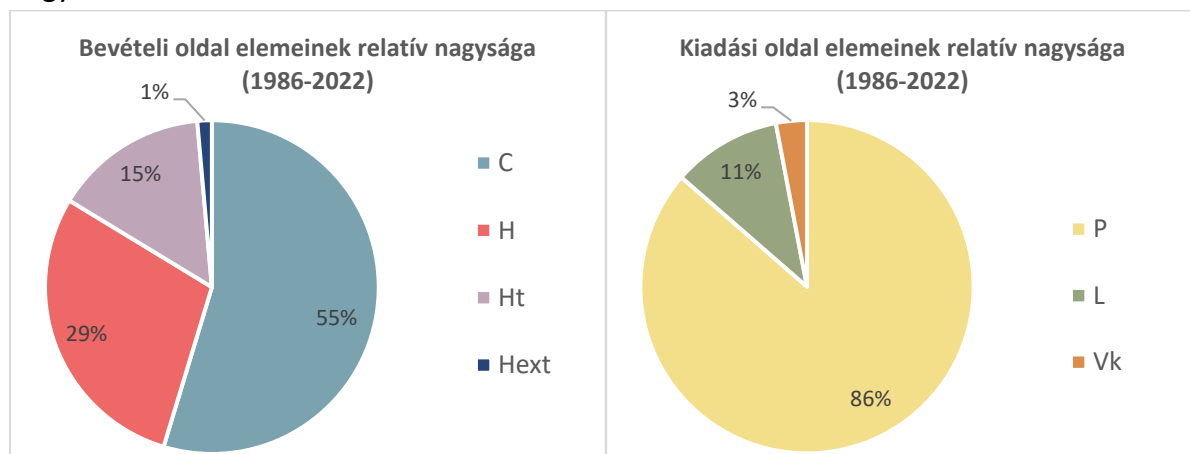
következtethetünk, hogy elképzelhető, hogy a bevételi oldalt és a kiadási oldalt is alul becsüljük, de a december-májusi időszakban a bevételi oldalt *jobban alul becsüljük*, mint a kiadási oldalt (AA). Vagy a mérleg mindkét oldalát túlbecsüljük, de a feltöltődés időszakában a kiadási oldalt *jobban túlbecsüljük*, mint a bevételi oldalt (TT). A tavi vízforgalom szempontjából ezen esetek számottevő eltérést eredményeznek a jelenleg feltételezettől a két szélsőség irányába.

A teljes képhez hozzátartozik, hogy a vízmérlegszámítás nem minden hónapban azonos metodika alapján valósul meg, hiszen a 2. fejezetben leírtak alapján a párolgás számításához november-március között pusztán hidrometeorológiai (hőmérséklet, páratartalom, szélsébség) adatokat használnak, míg április-október között kádpárolgási adatokból, nádkonstansok segítségével határozzák meg a havi párolgás értékét. Ezzel együtt az áprilisi és májusi nagy abszolút értékű hibák, illetve a novemberi elhanyagolható hibát ez a módszertani váltás nem magyarázza meg egyértelműen.

Továbbá a kép még bonyolultabb, ha a bevételi és kiadási oldal egy-egy elemét külön vizsgáljuk, hiszen a mérleg két oldalára vonatkozóan a 11. ábra hasonlóan fel lehetne vázolni az egyes elemek bizonytalanságaiból következő alul-, illetve túlbecslések mátrixát. Az alábbiakban ezért számításba vesszük a vízmérlegszámítás egyes elemeinek legfontosabb bizonytalanságait.

## BIZONYTALANSÁGOK ÉS JAVASLATOK

A számítási módszertan felülvizsgálatát célszerű a legnagyobb súlyú összetevők elemzésével kezdeni, hiszen egy ezekben ejtett néhány százalékos hiba abszolút értékben jóval nagyobb lehet, mint egy kevésbé fajsúlyos, vagy csak időszakosan előforduló összetevőben ejtett nagyobb tévedés.



12. ábra: A vízmérlegszámítás bevételi és kiadási oldalán található elemek relatív nagyságai

A 12. ábra a bevételi és kiadási oldal elemeinek a teljes bevételi, illetve kiadási oldalhoz mért relatív nagyságát tüntette fel. Ez alapján egyértelműen látható, hogy a bevételi oldalon a csapadék és a hozzáfolyás (rendre 55%, 29%), míg a kiadási oldalon a párolgás (89%) a



legjelentősebb összetevő. A további elemek (hozzáfolyás tározóból, külső vízpótlás, vízkivétel, leeresztés) súlya a vízmérlegben ennél jóval csekélyebb.

### **Csapadék**

A tóra hulló csapadékot a számítási módszertanban a tó partján található 4 db csapadékmérő állomás napi adatai alapján határozzák meg. A csapadékmérők adataiból egyszerű átlagolással számítják a C értéket, mm/hónap mértékegységben. Az állomások elhelyezkedését figyelembe véve két javaslat fogalmazható meg.

1. A csapadékmérő állomások adatainak átlagolásánál Thiessen poligon módszerrel meghatározott területi súlyszámokkal történő átlagolással pontosabb eredmények várhatóak
2. A négy állomás (Dinnyés, Agárd, Velencefürdő, Kápolnásnyék) mind a tó déli, keleti partján található. A tó északi oldaláról származó csapadékat nem kerül felhasználásra a számításnál. Figyelembe véve a Velencei hegység elhelyezkedését és a csapadékképződésben betöltött szerepét ez jelenthet számottevő hibaforrást. A földfelszíni csapadékmérőállomások adatait radaradatokkal kiegészítve, illetve közösségi csapadékmérések adatait bevonva lehetne javítani az eredményeken.

### **Párolgás**

A párolgás meghatározása jelenleg az Agárdi meteorológiai műszerkertben végzett mérések adatain alapszik. E mérések eredményeként részletes időbeli felbontású adatokkal rendelkezünk a léghőmérséklet, víz hőmérséklet, páratartalom, szélesebbé, illetve kádpárolgás tekintetében. Ugyanakkor a Velencei-tó térbeli kiterjedése indokolná a több helyszínen történő információgyűjtést. További bizonytalanság, hogy az április-októberi időszakban használt nádkonstansok értékét közel 50 éve határozták meg, ezért ezek értéke szintén felülvizsgálatra szorul. Fentiekre tekintettel a párolgás-számítás vonatkozásában is két javaslat fogalmazható meg:

1. Földfelszíni mérések térbeli kiterjesztése a tó, illetve a vízpart több pontjára. A nádas és a nyílt vízfelületekre vonatkozó – akár expedíció-szerű – méréseket is ideértve.
2. Nagy térbeli felbontású (<1000 m rácsméretű) műholdas távérzékelési adatokból, az energiamérleg számítása alapján kapható evapotranspiráció becslések alkalmazása. A földfelszíni pontszerű, de finom időbeli felbontású mérések adatainak és a távérzékelés – finomabb térbeli felbontású, de időben ritkábban rendelkezésre álló – adatok együttes felhasználása.

### **Felszíni hozzáfolyás**

A felszíni hozzáfolyás számítása a Császár-víz vízgyűjtőjére, illetve a tározókból történő hozzáfolyásra vonatkozóan a Kőrakáspusztai vízrajzi állomás adatain alapul. A tó közvetlen vízgyűjtőjének, valamint a Vereb-Pázmándi-vízfolyásnak a hozzáfolyását az utóbbin található Kápolnásnyéki vízmérce adatai alapján számítják. Mindkét összetevő esetében egy-egy

konstanssal kerül figyelembevételre a nem mért vízgyűjtőterületről származó vízhozam. E konstansok értékét az 1970-es években határozták meg. Az elmúlt 50 évben azonban számottevő területhasználati változások következtek be a vízgyűjtőterületen – elsősorban a Velencei-tó közvetlen vízgyűjtőjén (Kálmán – Bene, in press). Ennek tükrében a hozzáfolyás számítási módszertana szintén felülvizsgálatra szorul. Ehhez kapcsolódóan ismét két javaslattal élünk:

1. A Császár-vízen 1993. óta szolgáltat adatokat a Kisfalud-i vízmérce, amely a torkolathoz lényegesen közelebb helyezkedik el, mint a Kőrakáspusztai vízmérce. A két állomás adatait össze kell vetni, ez alapján a korábban meghatározott konstans értékét felülvizsgálni. Illetve megvizsgálni annak lehetőségét, hogy a Kisfalud állomás adatait, mint a Császár-vízen keresztül a tóba érkező vízmennyiség elsődleges adatforrását használjuk.
2. A közvetlen vízgyűjtőről történő lefolyás mennyiségét, illetve általában a lefolyási viszonyokat hidrológiai modellezéssel érdemes támogatni. A Császár-víz és a Vereb-Pázmándi-vízfolyás mért adatai megfelelő kalibrálási lehetőséget adnak, mely alapján a közvetlen, nem mért vízgyűjtőre vonatkozó lefolyási adatok pontossága, elfogadhatósága értékelhető.

### **Morfológiai görbék**

A mérlegszámítás során a Velencei-tó morfológiai görbéje alapján konvertálják vízszint (tó mm) adatokká a vízhozam adatokat. A vízmérlegszámítási módszertanban jelenleg az 1996-os mederfelmérés adatai kerülnek felhasználásra. Ugyan a vizsgálataink során sem az 1996 előtti adatoknál, sem az azóta eltelt időszakban nem találtunk összefüggést a vízszint nagysága és a záróhiba értékei között, ezen adatok aktualizálását mégis fontosnak tartjuk az átszámításból származó hibák kiküszöbölése érdekében.

További hasonló javaslat a Pátkai-tározó morfológiai görbéinek felülvizsgálata; a tározó létesítését követő feliszapolódás számbavételére, hiszen a tározóból történő hozzáfolyás vízmérlegelemnél a tározóból távozó vízmennyiség így pontosabban kalkulálható, ellenőrizhető.

### **Egyéb bizonytalanságok**

A vízmérleg kiadási oldalának átlagosan 11%-os, illetve 3%-os részét adó vízeresztés (L) és vízkivétel ( $V_k$ ) szintén bizonytalansággal terhelt. A vízeresztésnél a tóból a Dinnyési-zsilipen keresztül távozó vízmennyiséget a zsilip hitelesítési egyenlete, vízhozammérések és a zsilip-naplóban rögzített zsilipállások alapján számítják. Az 1996-ban készült elemzés (Pappné Urbán et al. 1996) alapján ennek értékében esetenként jelentős hiba is előfordulhat, így javasolt a zsilip vízhozam-görbéjének felülvizsgálata.

A Dinnyési Ivadéknevelő Telep vízkivétele egy tápcsatornán keresztül, a Császár-víz irányából történik. A vízkivétel tehát valójában nem a Velencei-tóból közvetlenül valósul meg, hanem a Császár-víz mért szelvénye alatt, de még a tóba történő betorkollás felett. Ez ugyan a számítást

nem befolyásolja, viszont a tó vízforgalmáról alkotott képünket tovább torzítja. A tápcsatorna töltésére szolgáló, a Császár-vízen elhelyezett duzzasztó működéséről, a vízmegosztás arányairól nincsenek rögzített adatok. A vízkivétel ( $V_k$ ) mérlegelemet, azaz a telep vízhasználatának pontos mennyiségét ezért a tápcsatornában elhelyezett vízkivételi szivattyúk üzemelési adatai alapján határozzák meg, ami szintén rejt magában bizonytalanságot. Mindazonáltal a hibaidőszak és a vízeresztés, illetve vízkivétel idősorai között nem látható egyértelmű összefüggés. (lásd 6. ábra, 8. ábra)

### **Felszín alatti vízmozgások**

A jelenleg alkalmazott vízmérlegszámítási módszertannak ugyan nem képezi részét a felszín alatti hozzáfolyás, illetve elfolyás, de annak lehetséges hatásaira több jel is enged következtetni. Egyfelől a Velencei-tó keleti medencéje szikes jellegű, vize jellemzően magas oldott sótartalommal (nátrium, magnézium, szulfát, hidrogén-karbonát) és 8,8-9,0 körüli pH értékkel rendelkezik (Borics et al. 2017). E vízminőségi paraméterek részben a lefolyástalan jellegre, részben a szikes tavakra jellemző felszín alatti megtáplálásra utalnak.

A felszín alatti vízzel való kapcsolatot explicit mutatták ki az elmúlt évek hidrogeológiai kutatásai. (Baják et al. 2022) E tanulmányban több mint 1100 talajvízkút bevonásával állítottak elő a régió talajvízdomborzatának térképeit. Továbbá vízkémiai és izotóp vizsgálatokkal támasztották alá a tóban, illetve a felszín alatt található víz kapcsolatát és eredetét. Eredményeik alapján a Velencei-tó a lokális sekély áramlások vonatkozásában feláramlási terület, míg a nagyobb regionális rétegvizes rendszer leáramlási zónájába esik.

A felszín alatti hozzáfolyás szerepét valószínűsíti az a tény is, hogy a záróhibák havi értékei a hidrológiai év feltöltődési időszakában (december-május) mutatnak negatív értékeket, míg a kiürülés időszakában (június-november) a havi záróhibák átlagértéke közel 0.

A felszín alatti hozzáfolyás nagyságára vonatkozóan ezidáig nincsen számszerű adat, ezért ennek – akár egyszerű szivárgáshidraulikai alapelveken történő becslése – mindenképpen fontos lenne. Természetesen előállhat olyan helyzet is, amelyben a megemelkedett tóbeli vízszintek a környező talajvizet, illetve a mélyebb rétegvizeket táplálják és ekkor felszín alatti elfolyásról beszélhetünk. A vízmérlegre vonatkozóan a hibaidőszak, illetve a hozzáfolyás, vagy elfolyás egymásra hatásának kimutatása a talajvízszintek és a tóbeli vízszintek egyidejű vizsgálatával lehetséges.

### **ÖSSZEGZÉS ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK**

A Velencei-tó vízszintváltozásainak számításal történő meghatározását a KDTVÍZIG 1986 óta végzi. A számításal meghatározott és a vízmércéről leolvasható vízszintváltozás különbszete adja a számítás záróhibáját. Az elmúlt 37 év záróhibáinak elemzéséből számos következtetés vonható le. A záróhibák sokéves átlaga  $-70$  mm, azaz egy év alatt átlagosan ennyivel alul becsüljük a tóban mért vízszintet. Az éves hiba egyértelműen a december – május közötti fél

évben akkumulálódik. A legnagyobb átlagos havi hibák március és április hónapokban észlelhetőek. A hibák okai szerteágazóak lehetnek, de jelen tanulmány és korábbi vizsgálatok eredményei elsősorban a párolgás és a hozzáfolyás elemek jelentős bizonytalanságait jelölik meg fő okokként. További fontos megállapítás, hogy a vízmérleg számítás során a felszín alatti komponens nem elhanyagolható.

Fentiek alapján a jövőben felülvizsgáljuk a vízmérlegszámítás domináns- és egyben nagy bizonytalansággal terhelt elemeinek – a párolgásnak, a felszíni hozzáfolyásnak, továbbá a csapadéknak – a számítási módszertanát. Emellett a felszín alatti hozzáfolyás/elfolyás nagyságának számszerű értékelésére is kísérletet teszünk. Mindezt annak érdekében, hogy a felülvizsgált havi- vagy akár napi vízmérlegszámítás eredményei alapján megvizsgálhassuk a záróhibák értékeinek alakulását. A cél az, hogy a havi és éves záróhibák átlagos értéke 0-hoz közelítsen, miközben abszolút értékük, illetve szórásuk nem növekszik.

A vízmérlegszámítás felülvizsgálatát követően, a tóbeli vízszintváltozásokat meghatározó folyamatok valós nagyságrendjeinek ismeretében lehetséges a Velencei-tó vízpótlási stratégiájának többszemponitú elemzését lefolytatni. E vizsgálatok részét képezheti a tó vízgyűjtőjén levő víztározók, vizes élőhelyek, egyéb vízhasználatok és vízvezető rendszerek működési feltételeinek számba vétele, továbbá különböző vízgazdálkodási forgatókönyvek következményeinek és a Velencei-tó vízszintjére való hatásának értékelése.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Antal, Gábor. 1986. *A Velencei-Tó 1986. Évi Vízmérlege I. Rész*. Középdunántúli Vízügyi Igazgatóság, Székesfehérvár.
- Baják, Petra, Katalin Hegedűs-Csondor, Mia Tiljander, Kirsti Korkka-Niemi, Heinz Surbeck, Bálint Izsák, Márta Vargha, Ákos Horváth, Tamás Pándics, and Anita Erőss. 2022. 'Integration of a Shallow Soda Lake into the Groundwater Flow System by Using Hydraulic Evaluation and Environmental Tracers'. *Water* 14(6). doi: 10.3390/w14060951.
- Bogárdi, István, Kálmán Koris, and Imre Vajnai. 1976. 'A Velencei-Tó Vízgazdálkodási Problémái'. *Hidrológiai Közöny* (7):329–36.
- Borics, Gábor, Éva Ács, Pál Boda, Emil Boros, Tibor Erős, István Grigorszky, Tihamér Kiss Keve, Szabolcs Lengyel, Mária Reskóné Nagy, Boglárka Somogyi, and Lajos Vörös. 2017. 'Magyarország Fontosabb Vizeit Érintő Problémák, Beavatkozások És a Jelenlegi Állapot Áttekintése'. *Hidrológiai Közöny* 2:84–97.
- Kálmán, Attila, and Katalin Bene. n.d. 'Implementation of Nature-Based Solutions on a Catchment of Lake Velence, Hungary'. *Pollack Periodica - in Press*.
- KDTVÍZIG.HU. n.d. 'KDTVÍZIG - Velencei Tó Vízmérlegei'. Retrieved 2 May 2023 (<http://www.kdtvizig.hu/hu/velencei-to-vizmerleg>).
- Koris, Kálmán, and Béla Csikós Nagy. 1977. 'REGULATION MODEL OF THE LAKE VELENCE RESERVOIR SYSTEM'. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering* 21:147–55.
- OVF. 1996. *A Velencei-Tó Egyszeri Vízpótlása*. Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest.
- Pappné Urbán, Judit, György Varga, Sándor Baranyi, István Bíró, and Pál Liebe. 1996. *A Velencei-Tó Vízszintszabályozásának Felülvizsgálata III. Ütem*. Vízügyi Tudományos Kutató Intézet, Budapest.
- Ramsar.org. n.d. 'Velence and Dinnyés Nature Conservation Area'. *Ramsar Sites Information Service*. Retrieved 2 May 2023 (<https://rsis.ramsar.org/ris/183>).

- Reich, Gyula. 2022. *Javaslat a Velencei Tó Fenntartható Vízpótlására*. Kék Bolygó Klímavédelmi Alapítvány által felkért munkacsoport, Budapest.
- Simonics, László, and Sándor Tóth. 2003. *A Velencei-Tó Vízmérlege 2002*. Középdunántúli Vízügyi Igazgatóság, Székesfehérvár.
- Szabó, Gyula, Emánuel Antal, and Ferencné Kozma. 1977. *A Velencei-Tó És Vízgyűjtője Havi Vízháztartási Mérlegei*. Vízügyi Tudományos Kutató Intézet, Budapest.
- Szilágyi, Ferenc, Szabolcs Szabó, Mónika Mándoki, and László Tóth. 1989. 'A Műszaki Beavatkozások Hatása a Velencei-Tó vízminőségére'. *Vízügyi Közlemények* 71(3):443–57.
- Természetvédelem.hu. 2021. 'Védett Természeti Területek'. Retrieved 2 May 2023 (<https://termeszetvedelem.hu/vedett-termeszeti-teruletek-2021-december/>).
- Vizügy.hu. 2009. 'A Velencei Tó Természetföldrajza'. Retrieved 2 May 2023 (<https://www.vizugy.hu/print.php?webdokumentumid=46>).
- VKKI. 2010. *Vízgyűjtő-Gazdálkodási Terv 1-14. Velencei-Tó*. Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság és Középdunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, Budapest.