



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

**A BALATON VÍZMÉRLEG ELEMEINEK ÉS
MEGHAJTÓ FOLYAMATAINAK ALAKULÁSA AZ
ÉGHAJLATVÁLTOZÁS FÉNYÉBEN**

Kirchknopf Réka

Építőmérnök BSc szakos hallgató

Konzulensek:

Dr. Torma Péter

egyetemi docens, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Nagy Eszter Dóra

doktorandusz, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

TDK Dolgozat

Budapes, 2021. november 2.

Absztrakt

A Balaton vízkészlete és vízminősége számos emberi tevékenységnek van kitéve, mint például a vízszintszabályozás vagy a vízgyűjtőről érkező tápanyagterhelés. A tó mennyiségi és minőségi állapotát emellett közvetlenül meghatározzák az időjárási meghajtó erők, így komoly hatással van rá az éghajlatváltozás is. Erre jó példa a 2000-es évek elején tapasztalt száraz évek hatására időszakosan lecsökkenő vízállás, illetve a nyári átlagos vízhőmérsékletek folyamatos emelkedése.

A kutató munka során célunk, hogy meghatározzuk az éghajlatváltozás Balaton vízkészletére gyakorolt hatását. Ehhez vizsgáljuk a tó vízmérleg elemeinek változását az elmúlt 40 évben. A vízjárást meghatározó tényezők közül a legfontosabbak a tóra hulló csapadék és tó párolgása. Statisztikai eszközökkel meghatározzuk, hogy ezen elemek és ezek meghajtó folyamatai – úgy, mint a léghőmérséklet, a szél, a csapadék, a besugárzás és a páratartalom – hogyan változtak az elmúlt évtizedekben. Vizsgáljuk a vízkészlet komponensek és a meteorológiai változók trendjeit és éven belül megoszlásának alakulását. A vizsgálatban külön hangsúlyt fektetünk a tó párolgási viszonyainak és megváltozásának számszerűsítésére. Célunk, hogy a tó párolgás számítását tovább fejlesszük és ezzel a tó vízmérleg számítását pontosítsuk.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. Helyszín: A Balaton	5
1.2. Kiindulási adatok	6
1.2.1. Vízmérleg komponensek	6
1.2.2. Meteorológiai adatok	7
2. Módszertan	9
2.1. Statisztikai vizsgálat	9
2.1.1. Függetlenség	9
2.1.2. Egyöntetűség	10
2.2. Trend analízis	10
2.2.1. Éven belüli eloszlások: Pardé tényező	11
2.2.2. Szignifikancia: A t-próba	12
2.3. Fordulópont	13
2.4. Párolgás számítása	13
2.4.1. A Meyer-képlet	14
2.4.2. Korreláció-analízis	14
2.4.3. Új empirikus összefüggés	15
3. Eredmények	16
3.1. Függetlenség és egyöntetűség	16
3.2. Trend analízis	17
3.2.1. Éves és havi idősorok	17
3.2.2. Havi értékek áttekintése	25
3.2.3. Éven belüli eloszlások: Pardé tényező	27
3.2.4. Pardé értékek áttekintése	29
3.3. Fordulópont	30

3.4. Párolgás számítása	32
3.4.1. Korreláció–analízis	33
3.4.2. Új empirikus összefüggés	38
4. Diskusszió és Következtetések	42
5. Köszönetnyilvánítás	44
6. Hivatkozások	44

1. Bevezetés

A Balaton, méretét tekintve, az első helyet foglalja el Közép-Európa nagy tavainak ranglétráján. Irodalmi feljegyzések szerint legelőször Pálóczi Horváth Ádám költőnk nevezte a Balatont „magyar tenger” -nek, és ez a szójárás a mai napig fennmaradt. Nem véletlenül persze, hiszen az ország bármely pontján tartózkodunk, a Balaton közelebb van hozzánk mint bármely sós tengerpart. De vonzereje nem egyedül a kiterjedésében rejlik. A tó dunántúli fekvése és a környékének gazdag kulturális öröksége miatt is figyelemre méltó. Az északi vízpart a mélysége végett kedvelt úticél az úszni vágyók, vitorlázók és horgászok körében, míg a déli lassan mélyülő part a kikapcsolódásra vágyóknak nyújt pihenési lehetőséget. Természeti kincsei közül a Balaton-felvidék vulkanikus eredetű bazaltképződményeit, a Tapolcán található tavasbarlangot és a Tihanyi-félszigetet érdemes megemlíteni, amelyet különleges geológiai és tájképi jellege miatt az Európai Tanács 2003-ban Diplomával illetett, és ezzel a védnöksége alá vett (Horváth, 2011). A vidék kulturális oldalát a táj arculatába kellemesen illő épített környezet, a számos kastély, templom, múzeum és a nemzeti hagyományok élő művelése alkotja meg. A Balaton-felvidék hegyoldalai kiváló bázist biztosítanak a minőségi bortermelésnek, amelynek hagyományát csaknem kétezer évvel ezelőtt a római telepések alapították meg, és átvéve tőlük a feladatot, a magyarok tökéletesítették.

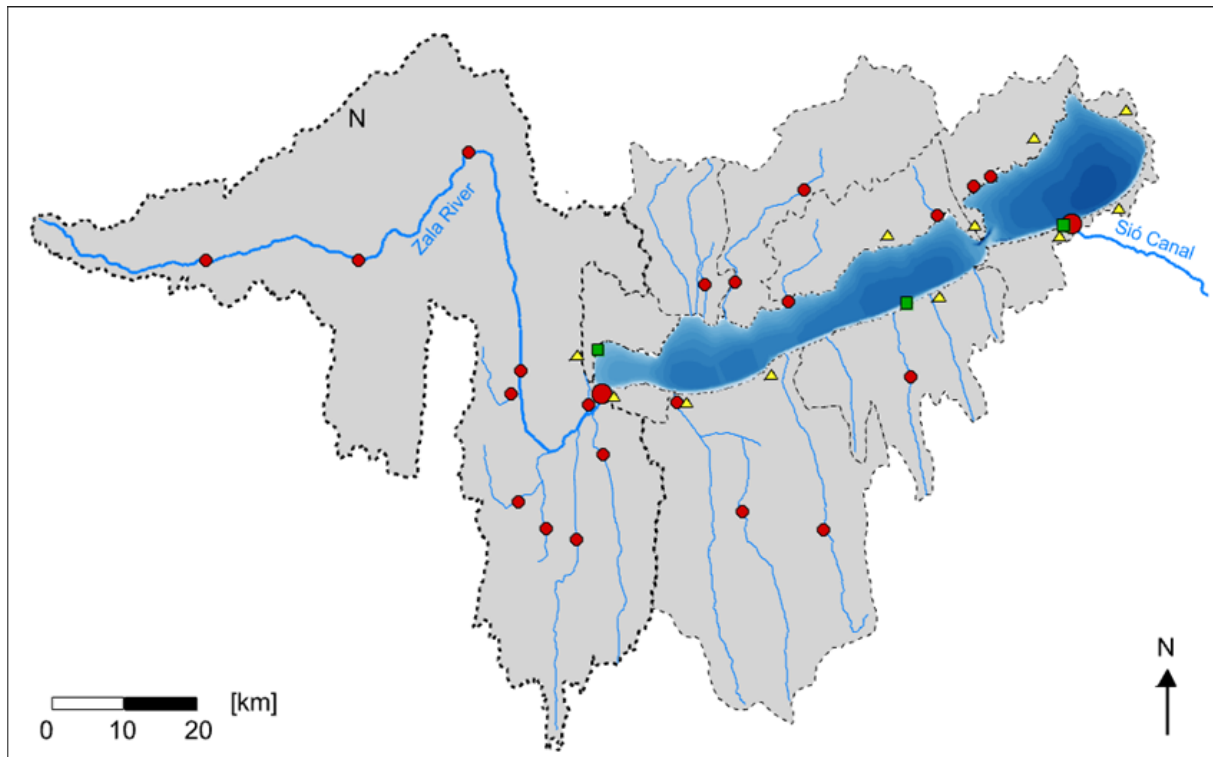
Mindezt leszögezve nem nehéz belátni miért a Balaton régiója az ország második legkedveltebb turistacélpontja (az első helyet Budapest és környéke foglalja el). Ennek értelmében pedig rendkívüli szerepet játszik az ország gazdaságában. Az elmúlt egy évtizedben főképpen: 2010 és 2019 között a térség vendégforgalma pozitív irányú tendenciát mutatott, 1,2 millió főről 1,9 millióra emelkedett (Dombi *et al.*, 2021). A Balaton fontossága mind kulturális, természeti és gazdasági szempontból vitathatatlan. A környék védelme és rekreációs szolgáltatásainak fenntartása pedig Magyarország elmaradhatatlan felelőssége.

Az éghajlatváltozás és az ezzel együtt járó globális felmelegedés mára már tudományos körökben is elfogadott tény. A változások kiterjedése és gyorsasága pedig aggasztó kérdéseket vet fel a hazai nagy tavak vízkészlete szempontjából. Korábban is előfordult már, hogy hosszabb aszályos időszak következtében a tó vízkészlete megcsappant, a vízszintek a vártnál jóval alacsonyabb értéket vettek fel, ezzel gondot okozva az üdülők és szolgáltatók számára (Varga, 2005). A Balaton vízkészletét és vízminőségét közvetlen befolyásoló, természetes eredetű tényezők a csapadék, a hozzáfolyás és a párolgás, illetve ezen tényezők időjárási meghajtó erői. Mindezek szoros kapcsolatban állnak az éghajlattal, így ha az megváltozik, feltételezhetjük, hogy a vízkészletekben is változás fog bekövetkezni.

A kutatásom célja, hogy meghatározzam az éghajlatváltozás Balaton vízkészletére gyakorolt hatását a már rendelkezésre álló múltbeli, hosszú idejű mérések alapján. Ennek érdekében soron követem a tó vízmérlegelemeinek alakulását az elmúlt négy évtizedben. Majd, hogy egy pontosabb képet kaphassak a klímaváltozás hatásáról, vizsgálom ezen elemek meteorológiai változóit is – mint például a beérkező napsugárzást, a páratartalmat, a szélet és a léghőmérsékletet. A vizsgálatokban a változók értékének tendenciáját és éven belüli eloszlását statisztikai módszerek segítségével állapítom meg. A mérési nehézségek végett elmondható, hogy a vízkészlet legbizonytalanabb eleme a tó párolgása, így annak számszerűsítésére külön figyelmet szentelek. Célom egy olyan egyszerű, akár empirikus párolgás-számítási módszer felállítása, amelyben biztosabban lekövethető az éghajlatváltozás hatása, akár a jövőre nézve is.

1.1. Helyszín: A Balaton

A Balatont eredeti latin nevén „Lacus Pelson”-ként emlegették, ami annyit tesz: sekély tó. Ez a leírás a mai napig teljesen megfelel a valóságnak, a tó átlagos mélységét összesen 3 méternek tekinthetjük. A vízfelületének kiterjedése CHOLNOKY (1918) mérése alapján 597 km², míg a vízgyűjtőjének teljes területe: 5147.34 km², amelynek csaknem felét a Zala részvízgyűjtő területe teszi ki (1. ábra). Mivel a Zala részvízgyűjtője a legnagyobb az összes közül, erre a területre érkezik a legtöbb csapadék, így ezzel párhuzamban a Zaláról érkező hozzáfolyás a legjelentősebb. Éves szinten ez körülbelül 700 tó mm plusz vízmennyiséget jelent. A csapadék éves értéke az egész vízgyűjtőre nézve 600 tó mm körül mozog.



1. ábra A Balaton részvízgyűjtő területeinek és mérőállomásinak térképe
A piros pontok a vízhozammérő állomásokat, a sárga háromszögek a csapadékmérő állomásokat és a zöld négyzetek a vízállások leolvasási helyeit jelölik.

A vízszintek szabályozásáért a Sió-csatornán létesített siófoki zsilip felel. A siófoki vízmércétől mérve jelenleg maximálisan 120 centiméteren igyekeznek tartani a vízállást. Közepes vízállás mellett a Balatonban tározott vízmennyiség mintegy 1.8 km³.

A Balaton vidéke éghajlatát tekintve mérsékelten kontinentális, mint Magyarország általában, viszont délnyugati fekvése miatt erősebb óceáni és mediterrán hatások is érik. A napsütéses óráinak száma éves átlagban 2000, a legnaposabb hónapja a június. Június, július és augusztus hónapok mutatkoznak a legmelegebbnek, és január-március között hullik a legkevesebb csapadék. A tó sekélysége miatt vize könnyebben felmelegszik, nyáron átlagosan 20-25°C közötti értéket vesz fel, de ez extrém helyzetekben a partok mentén akár a 28-29°C-t is elérheti (Nagy, 2013).

A sekélység miatt, és mivel a vízgyűjtőjéhez képest nagy vízfelülettel rendelkeznek, elmondhatjuk hogy a tó és környezete érzékeny a klimatikus változásokra (Somlyódy & Honti, 2009).

1.2. Kiindulási adatok

Minden felhasznált vízmérleg adatot a Balaton vízgyűjtőjének területéért felelős Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (KDTVIZIG) szolgáltatta. Minden adat idősor formájában volt elérhető. A vízmérleg komponensek, a vízállás és a meteorológiai adatok közül a szél, léghőmérséklet és víz hőmérséklet idősorait az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által elvégzett mérésekből határozták meg. A beérkező napsugárzás és relatív páratartalom (nedvességtartalom) idősorait pedig az European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) nevű kormányközi szervezet ERA5 reanalízis adatbázisából töltöttük le (C3S, 2020).

Mivel az ECMWF reanalízis produktuma részben modell által számolt, az OMSZ pedig közvetlen méréseket végez, elmondható, hogy az OMSZ adatok a pontosak. Tehát amely idősnál elérhető volt OMSZ mérési adatsor, ott az került felhasználásra.

1.2.1. Vízmérleg komponensek

Egy állóvíz készletváltozását legegyszerűbben a vízmérleg-egyenlet segítségével írhatjuk le:

$$\Delta K = C + H - (P + V_k + L)$$

Az egyenletben szereplő vízháztartási elemek a következők: a mennyiséget növelő C – csapadék és H – felszíni hozzáfolyás, illetve a csökkentő P – vízfelszín párolgás, V_k – víz felhasználás és L – leeresztett vízmennyiség.

Ebből az öt vízháztartási elemből a csapadék, a hozzáfolyás és a párolgás előjeles összegét nevezzük természetes vízkészletváltozásnak.

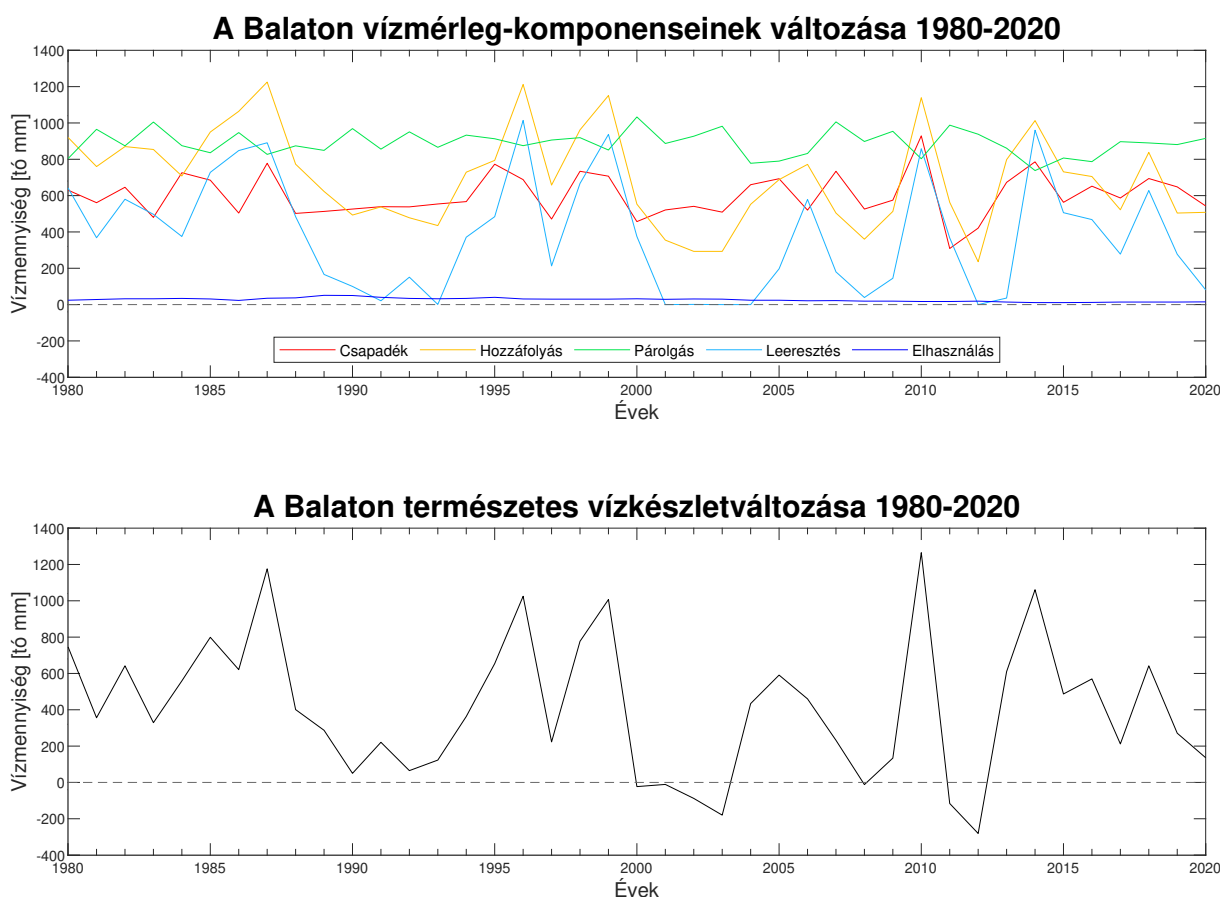
$$\Delta K_T = C + H - P$$

Mivel a kutatásom célja az éghajlatváltozás hatásának kimutatása a Balaton vízkészletére nézve, ez okból az emberi eredetű tényezőket, tehát a víz felhasználást és a Siófoki zsilip által szabályozott leeresztést, a dolgozat elkészítése során nem elemeztem.

A Balaton vízmérleg komponenseit döntő többségben méréssel határozzák meg. A beérkező vízhozamot, vagyis hozzáfolyást, a Zala torkolati szelvényében létesített ultrahangos mérőberendezés szolgáltatja, míg a kisebb vízfolyásokon vízállás-leolvasásokból állítanak elő vízhozam-idősort. A csapadékot 11 db a partvonal mentén elhelyezett csapadékmérő állomás felméréséből kapják meg. A párolgást 7 db parti automata meteorológiai állomás mért adataiból és a Meyer-képlet segítségével határozzák meg. Az ivó-, ipari- és mezőgazdasági vízkivételeket szivattyútelepeken mérik, míg a lefolyás becsléséhez a Siófoki zsilipen való átbukási hozamot mérik. A mérőberendezések pontos elhelyezkedése az 1. ábrán látható.

A vízmérleg-egyenlet által számolt havi készletváltozásokat az esetleges hibák kiküszöbölése érdekében összevetik a vízállásokból számolt készletváltozással. Ott, ahol ezek eltérést mutatnak, képzik a záróhibákat, majd havi léptékben szétosztják azokat a komponensek között. Az elmúlt 46 évben, 1975 és 2020 között, a vízállás-idősor napi értékekben került leolvasásra a siófoki vízmércén.

Minden komponens pontos értéke tó mm-ben nézve, 1980 és 2020 között, havi bontásban és éves összegben állt rendelkezésemre. Ezek az értékek a záróhibák szétosztása után kapott – tehát javított - értékek. A komponensek 41 éves változása és a természetes vízkészletváltozás alakulása a 2. ábrán látható. A vízmérleg kialakításában a természetes eredetű elemek játszanak döntő szerepet, és azok közül is a párolgáson van a legnagyobb hangsúly: éves szinten mintegy 900 tó mm-nyi vízmennyiség párolog el a Balatonból.



2. ábra A Balaton vízmérleg komponenseinek és természetes készletének a megváltozása, 1980-2020

1.2.2. Meteorológiai adatok

A vízjárást befolyásoló legfontosabb meteorológiai adatok, amelyeket figyelembe kell venni:

- a beérkező napsugárzás (W/m^2),
- a szélsébség (m/s),
- a nedvességtartalom (%),
- a léghőmérséklet ($^{\circ}C$),
- és a víz hőmérséklet ($^{\circ}C$).

Ezen adatok közül a besugárzás és a nedvességtartalom 1981 és 2020 között órás idősorban, az ECMWF ERA5 reanalízis modell felhasználásával került meghatározásra. A szélsősebesség és a két hőmérséklet idősora az OMSZ siófoki obszervatóriuma jóvoltából 1975 és 2020 közötti időszakokra állt rendelkezésemre. A szélsőbességek 3 órás átlagok, míg a hőmérsékletek napi időközökben kerültek átadásra. Mind az öt idősorból havi és éves átlagok idősorát képeztem.

2. Módszertan

Az összes számítást a *MathWorks* fejlesztőcég által létrehozott MATLAB R2021a ver. numerikus matematikai szoftver segítségével végeztem. A lineáris modellek építéséhez, a görbe illesztésekhez és a hibaérték számításokhoz a programba beépített funkciókat használtam fel.

2.1. Statisztikai vizsgálat

A számítások elvégzése előtt érdemes előkészítő vizsgálatokat tenni. Mivel egyes komponensek értékei egészen 1975-től rendelkezésemre álltak, felmerült a kérdés, hogy vajon a több mint 4 évtizede mért adatok összeegyeztethetőek-e a manapság felmérésekkel? Egészen bizonyosnak vehető, hogy a mérési technikák és eszközök mindez idő alatt megváltoztak, a legtöbb esetben modernizáláson estek át.

Egy másik szempontból, rosszabb esetekben, felellhetők olyan évek, ahol a mérőberendezések meghibásodtak és más módszerekkel kellett a kívánt értékekhez hozzájutni. Példa ilyen esetre a 2011 és 2012-es év, amikor a Zalán és a Nyugati-övcatornán létesített ultrahangos mérőeszköz meghibásodott, így nem tudták közvetlen mérésekből meghatározni a Balatonba érkező hozzáfolyás havi mennyiségét.

E bizonytalanságok végett statisztikai vizsgálatot végeztem a vizsgálandó 10 idősorra. A statisztikai vizsgálat két részből tevődik össze: az idősor függetlenségének és az idősor egyöntetűségének (vagy más néven homogenitásának) a vizsgálatából.

2.1.1. Függetlenség

Egy adatsor függetlennek tekinthető, ha a mérési sorrendben korábban vett adatok nem befolyásolják a közvetlen utánuk következőket. A függetlenség kimutatására a kis elemszámú idősorokon jól alkalmazható előjel-próbát hajtottam végre. Ez a statisztikai próba függetlenségre jellemző valószínűséget számol. Ha a számolt valószínűség $p > 5\%$ (tehát meghaladja az 5%-os döntési szintet), akkor az adatsor független. A számítás lépései (Kontur *et al.*, 2003):

[1] x_i értékét összehasonlítjuk x_{i+1} - el:

$$\begin{aligned}x_i > x_{i+1} \text{ esetén } z_i &= 1, \\x_i = x_{i+1} \text{ esetén } z_i &= 0.5, \\x_i < x_{i+1} \text{ esetén } z_i &= 0\end{aligned}$$

[2] képezzük z_i összegét: $R = \sum_{i=1}^N z_i$ (ahol N az adatpárok száma)

[3] R normál eloszlást követ, aminek paraméterei:

$$\text{középpérték: } \bar{R} = \frac{N}{2}$$

$$\text{szórás: } \sigma_R^2 = \frac{N}{4}$$

[4] R standardizált értéke: $R^* = \frac{|R - \bar{R}|}{\sigma_R}$

[5] Az adatsor függetlennek tekinthető, ha az alábbi feltételnek megfelel: $R^* < 1.96$

2.1.2. Egyöntetűség

„Egy adatsor akkor egyöntetű, ha egyes részei ugyanolyan típusú és paraméterű eloszlásfüggvénnyel írhatók le” (Kontur *et al.*, 2003). Az egyöntetűség számszerű leírására szintén előjel-próbát alkalmazunk. Azonban ennél a próbánál nem a szomszédos adatokat nézzük, hanem az adatsort középen kettévágjuk és a két-rész adatsor megegyező helyszámú adatait hasonlítjuk össze (páratlan adatszám esetén az első vagy utolsó adatot elhagyjuk). A számítás menete ezentúl megegyezik a függetlenség részben leírtakkal.

2.2. Trend analízis

Az éghajlat egy nagyobb terület hosszú távú, sajátos időjárási viszonyainak az összességét írja le. Jellemzően meteorológiai elemek befolyásolják, mint például a csapadék és a léghőmérséklet. Ezen elemeket, sztochasztikus jellegük végett, a legjobban az eloszlásukkal tudjuk behatárolni. Azonban az éghajlatunk rohamos és nagymértékű változása ezen eloszlások felülírását vonja maga után. A változások kimutatására trend analízis elvégzése javasolt (Somlyódy & Honti, 2005).

A trend analízis, vagy trendelemzés, a statisztikában gyakorta elvégzett számítás. Az idősorok tekintetében egy viselkedési mintázat kinyerésére ad segítséget. Ha feltételezzük, hogy ez a viselkedési mintázat lineáris, akkor lineáris trendbecslést végzünk el. A lineáris trendbecslésre legkönnyebben alkalmazható matematikai formula a legkisebb négyzetek elve. Az elv maga a kritérium: azt az egyenest keresi, ahol a valós adatok és a becsült egyenes pontjai közötti különbségek ("távolságok") négyzetes összegének minimuma található (Koris, 2014):

$$\min E = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

ahol y_i – mért adat, \hat{y}_i – egyenes adatpontja, N – adatpárok száma.

A trendelemzés elvégzéséhez a MATLAB *LinearModel* elnevezésű előre beépített modell objektumát használtam. A modell az egyenes meredeksége mellett megadja az adatok konfidenciatartományát is. A modell a konfidenciatartományt 95%-os valószínűséggel számítja, tehát annak a valószínűsége, hogy a valós értékek ezen a tartományon belül esnek: 95%. A program a tartományt Wald módszere alapján számítja, részletes leírást lásd: https://www.mathworks.com/help/stats/linearmodel_coefci.html

A tíz vizsgált változóm trendelemzését éves idősorban és havi bontásban is elvégeztem.

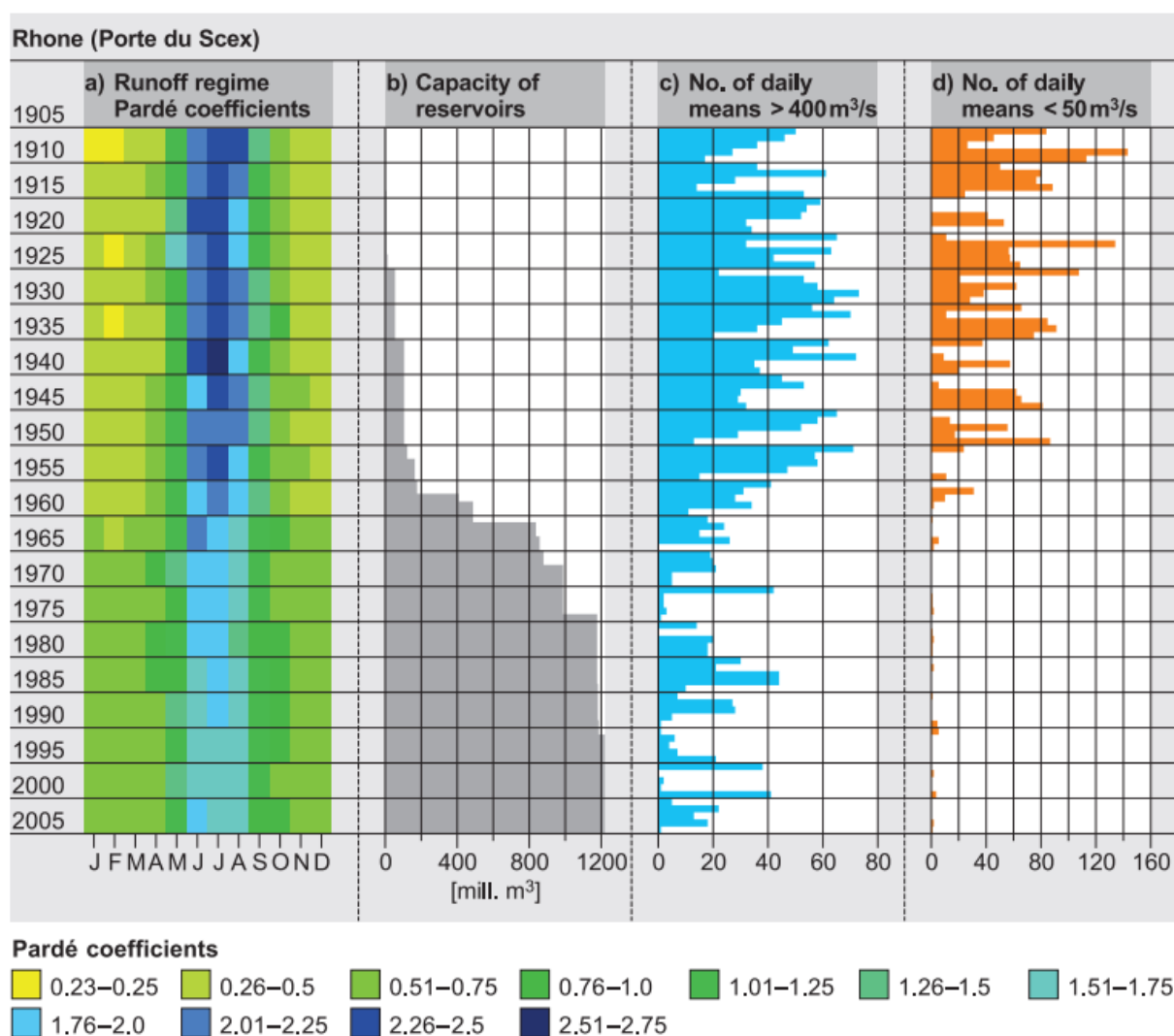
2.2.1. Éven belüli eloszlások: Pardé tényező

Ha nem csak a változók valós értékeinek a tendenciájára vagyunk kíváncsiak, hanem azok éven belüli eloszlása is érdekel minket, Pardé tényezőt érdemes számolnunk. A Pardé tényező egy dimenziómentes szám, a változó havi értékeinek és éves átlagának hányadát teszi ki (Blöschl *et al.*, 2013):

$$PK_i = \frac{x_i}{x_A}$$

ahol PK_i az i -edik hónap Pardé tényezője, x_i a változó i -edik havi értéke, és x_A az éves átlag.

A Pardé tényező előnye, hogy az adott változó havi értékeit konzisztensen össze tudja hasonlítani, nem számít, hogy az éves összegek eltérőek. Ennek következménye, hogy ha idősorban felvázoljuk a Pardé tényezőket, az éven belüli eloszlások megváltozása nagyon egyszerűen megfigyelhető. Szemléltető példának az alábbi ábrára hivatkoznék (3. ábra):



3. ábra Pardé értékek ábrázolása
(kép forrása: Blöschl *et al.*, 2013)

A képen a Rhône folyó vízgyűjtő területén mért lefolyás Pardé tényezőit ábrázolják. 1905 és 1955 között a lefolyás legnagyobb hányada a nyári hónapokat terhelte, itt jelentkeztek a legnagyobb Pardé értékek. De az 1950-es években bővíteni kezdték a víztározók kapacitását, és ennek következtében a lefolyás éven belüli eloszlása kiegyenlítődött.

Az egyes változók éven belüli megoszlásának átrendeződését a Pardé tényező két fontos tulajdonsága miatt képes számszerűsíteni: az egyik, hogy a Pardé értékek összege minden évben 12, a másik, hogy egy változóra nézve a havi trendek meredekségének összege 0.

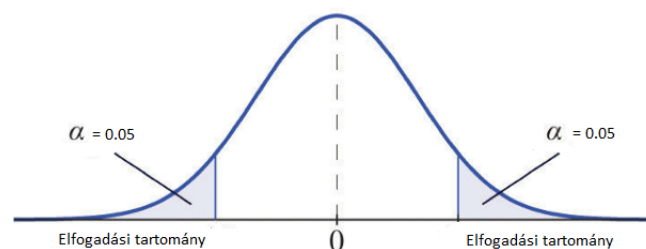
Az én kutatásomban a Pardé tényező számításának jelentősége abban rejlik, hogy ha vízmérleg komponensek éves eloszlása megváltozik, az vízkészletgazdálkodási vagy akár árvízvédelmi szempontból is problémákat von maga után. Nagy különbség van aközött hogy 100 tó mm-nyi csapadék 3 hónap alatt vagy 2 nap alatt esik le. Az utóbbi változatban fel kell készülni a területen hirtelen összegyűlő többlet vízmennyiségre és annak minden veszélyére.

A Pardé számítást csak az éven belül összeadódó mennyiségekre van értelme elvégezni, így csak a vízmérleg komponenseket – a csapadékot, a hozzáfolyást, a párolgást és a természetes vízkészletváltozást – vizsgáltam meg. Mind a négy változó Pardé értékeit havi bontásban ábrázoltam és szintűgy elvégeztem rajtuk a trendbecslést.

2.2.2. Szignifikancia: A t-próba

A trend analízis elvégzése után vizuális és számszerű eredményt is kapunk a tendenciák mértékéről, azonban nem tudjuk biztosan eldönteni, melyek azok a mértékek, amelyeknél azt mondhatjuk, hogy jelentős változást tapasztalunk. A hiányosság kiküszöbölése céljából t-próbát kell végrehajtanunk.

A t-próba egy nullhipotézis (H_0) feltevésére ad választ. A mi nullhipotézisünk, hogy a trendvonal meredeksége szignifikánsan különbözik nullától. A t-próba során tehát a meredekségek t-értékeit számoljuk. A t-próba feltételezi, hogy a t-értékek követik a Student-féle t-eloszlást, vagyis annak egy megadott intervallumába esnek (4. ábra). A mi esetünkben 5%-os valószínűséget adunk meg határnak, tehát ha a t-értékek a $p < 0.05$ elfogadási tartományba esnek, akkor igazoltuk a H_0 -t, és a trend szignifikáns (Kontur *et al.*, 2003).



4. ábra Elfogadási intervallumok

(kép forrása: <https://towardsdatascience.com> alapján)

A t-értékeket a MATLAB a lineáris modellben automatikusan számolja. A számításról bővebben itt olvashatnak: <https://www.mathworks.com/help/stats/f/T1/textendashstatistic/T1/textendashand/T1/textendasht/T1/textendashstatistic.html>

2.3. Fordulópont

A fordulópont egy olyan jelenséget ír le, amikor egy komplex rendszerben hirtelen, ugrásszerű változás következik be, és ez a rendszert egy új állapotú síkba tolja át. Ugrásszerű változásra hajlamos komplex rendszerek lehetnek a makroklimák, az ökoszisztémák vagy akár az egyes pénzügyi rendszerek. Számos oka lehet a rendszerek nemlineáris változásának, viszont a megfigyelések arra következtetnek, hogy az okok túlnyomó részben emberi eredetűek.

Az időjárásban bekövetkező fordulópontok detektálására RODIONOV (2004) dolgozott ki algoritmust. A módszere a sorozatos adatfeldolgozáson alapszik: az algoritmus minden új megfigyelési adat bevitel után lefut, hogy ellenőrizze a nullhipotézist, miszerint fordulópont észlelhető. A teszt eredménye alapján az algoritmus vagy elfogadja a nullhipotézist, vagy elveti azt, vagy egyiket sem tartja helytálló megoldásnak, így tovább folytatja a tesztelést.

Az algoritmus egy sor számítási lépésen megy végig, aminek összesen 3 beviteli adatát kell megadni: az vizsgálandó időszávok hosszát, a szignifikancia szintet és a Huber veszteségi paramétert. A vizsgálandó időszávokat a pontosság végett nem érdemes 10 megfigyelési pontnál (évnél) kisebb értékre felvenni. A szignifikancia szint a nullhipotézis elfogadási tartományához tartozó határérték, kétoldali próbára nézve. A Huber veszteségi paraméter a kiugró értékekről felel.

Az algoritmus működésének pontos leírását és számítási lépéseit az alábbi cikkben találhatják meg: Rodionov (2004).

2.4. Párolgás számítása

Mivel a vízmérleg komponensek közül egyedül a párolgást nem közvetlen mérésekből határozzák meg, ezért kijelenthetjük, hogy a legnagyobb bizonytalanság ebben a tagban rejlik. A párolgást, mint egzakt értéket, eleve igen körülményes megmérni. Egy sor tényezőtől függhet a pillanatnyi értéke: vízhőmérséklet, léghőmérséklet, páratartalom, szélereősség, csapadék és felhőborítottság. Magyarországon a párolgásmérő kádak használata a bevett szokás, de ezzel a módszerrel csak a partközeli párolgást tudjuk megbecsülni. A tó közepén mért párolgás és az ottani meteorológiai tényezők jelentősen eltérhetnek a partközeli viszonyokhoz képest. Így egy közel 600 km²-es vízfelszínű tó párolgásának becsléséhez ilyen eljárással nem kapnánk meg az elvárt pontosságot. Ezen kívül a Balatont körülvevő párolgásmérő kádhálózat közel sem olyan kiterjedt, mint például a csapadékmérőállomások hálózata (Kontur *et al.*, 2003).

A Balaton vízmérlege esetében az elmúlt 11 évben a KDTVIZIG a záróhibák elosztását a következőképpen végezte el:

- Csapadékra évente átlagosan 45.7 tó mm korrigálás került
- Hozzáfolyásra évente átlagosan 40.2 tó mm korrigálás került
- Párolgásra évente átlagosan 69.5 tó mm korrigálás került.

Ha a párolgás javításának pontos értékeit vizsgáljuk, azoknak 11 éves összege 764 tó mm, ami az összes elosztott záróhiba 44.7%-a. Ezek mellett azt is tudjuk, hogy a Balaton átlagos párolgása 900 tó mm körül mozog évente, míg a hozzáfolyás 750 tó mm és a csapadék 600 tó mm

körüli értékeket vesz fel. Láthatjuk tehát, hogy a párolgás milyen súllyal szerepel a vízmérleg számításában, és azt is, hogy milyen bizonytalansággal tudjuk csak meghatározni az értékét.

Elérhető volt számomra a KDTVIZIG által számolt eredeti párolgás értékek idősora (P_{Meyer}) és a záróhibák elosztása utáni korrigált idősor ($P_{korrigált}$) 2010 és 2020 között. A rendelkezésemre álló további vízmérleg komponensek idősoraiból és a vízállásokból mért vízkészlet idősorból átrendezve a vízmérleg egyenletet képeztem az vízkészletből számított párolgást ($P_{vízkészlet}$). Az átrendezett egyenlet:

$$P_{vízkészlet} = C + H - (V_k + L + \Delta K_{mért})$$

2.4.1. A Meyer-képlet

A KDTVIZIG az elmúlt 41 évben a párolgás becslését a Meyer-képlet egy módosított verziójával végezte el. A Meyer-képlet régi tapasztalati képlet, amely Magyarország állóvizeinek párolgás-számítására lett kifejlesztve. A képletben beviteli adatként meteorológiai értékeket kell megadni.

$$P = a(E - e) \cdot (0.59 + 0.013v)n$$

ahol a - az évszaktól függő korrekciós tényező,
 E - telítettségi páratartalom (mbar), 7 mérőállomás alapján,
 e - tényleges páratartalom (mbar), 7 mérőállomás alapján,
 v - közép szélesség (m/s), a síófoki állomás alapján,
 n - a hónap napjainak száma.

Észrevehető, hogy a képletben szereplő két meteorológiai adat a páratartalom és a szélesség. Régebben azzal a feltételezéssel éltek, hogy ez a két fő befolyásoló tényező, ami meghatározza a vízfelszín párolgását. Ugyanakkor most, hogy az éghajlatváltozás hatásai egyre jobban megmutatkoznak, feltehető a kérdés, hogy vajon továbbra is ez a két változó az, amely legjobban leírja a tó párolgás alakulását? A következő fejezetben erre a kérdésre keresem a választ a meteorológiai adatok párolgással való korrelációit vizsgálva.

2.4.2. Korreláció-analízis

Az 5 db meteorológiai változóm közül egyedül a nedvességtartalom volt az, amin átszámítást kellett végezni. A nedvességtartalom, más néven relatív páratartalom ($Relative Humidity = R_H$), a tényleges páratartalom és a 100%-os telítettségi páratartalom arányát adja meg. Viszont ebből az arányból kevésbé következtethetünk a tó felszín párolgására, hiszen a légkör által felvehető vízgőz mennyisége a léghőmérséklettől függ.

A 100%-os telítettség a hőmérséklet függvényében (Foken, 2008): $E = 6.112 \cdot e^{\frac{17.62 \cdot t}{243.12 + t}}$ [hPa]

A tényleges páratartalom: $e = R_H \cdot E$ [hPa]

A páratartalom-differencia (telítési hiány): $E - e$ [hPa]

Mind az 5 meteorológiai változóm 11 éves adatsorát összehasonlítottam a három párolgási idősorossal. Az összehasonlítás számszerűsítésének céljából függvényt kellett illeszek az adatpárok halmazára. Az adathalmazok jellegéből adódóan a függvényillesztést nemlineáris regressziós modellel végeztem el. A modellről az alábbi linken olvashatnak bővebben: <https://www.mathworks.com/help/stats/nonlinear\T1\textendashregression\T1\textendash1.html>

Az illesztések pontossága felől az úgynevezett RMSE (Root Mean Square Error), magyarul átlagos négyzetes eltérés ad irányszámot. Az RMSE-t a modell a következőképpen számolja:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

ahol N - az adatok elemszáma,
 x_i - a megfigyelt adatok,
 \hat{x}_i - az elméleti (becsült) értékek.

Minél kisebb az RMSE értéke, annál biztosabbak lehetünk az illesztett görbénk pontossága felől.

2.4.3. Új empirikus összefüggés

Miután a korrelációk megmutatják nekünk melyek azok a változók, amelyekkel a párolgás a legszorosabb kapcsolatban áll, megkísérelhetünk összeállítani egy új empirikus összefüggést. Mindezt abban a reményben tesszük, hogy ez az új összefüggés (a) pontosabban tudja lekövetni a tényleges párolgást, mint az előzőleg használt Meyer-képlet, vagy (b) ugyanolyan pontossággal tudja meghatározni a tó párolgást, mint a Meyer-képlet, viszont olyan változóktól függ, amelyekben egyértelműen megmutatkozik az éghajlatváltozás hatása. Ebből adódóan pedig feltételezhetjük, hogy a jövőbeni párolgás-számítások elvégzésénél precízebb eredményeket biztosít.

Az új empirikus összefüggés elméleti, általános alakja a következő formában írható le:

$$P_{empirikus} = \alpha_1 + \alpha_2(x_1^{\alpha_3} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_k})$$

3. Eredmények

3.1. Függelenség és egyöntetűség

Az előjel-próba kimenetele szerint minden vizsgált idősor független. Számunkra ez a kedvező és egyben várható eredmény, mivel az idősorok éves felbontásúak, és az egyes évek havi átlagai nem szabad, hogy kihatással legyenek a következő évek havi átlagaira.

Az egyöntetűség vizsgálata ennél már vegyesebb eredményekkel zárult. Az inhomogenitás arra utal, hogy az adott idősorban feltételezhető trend, hiszen nem írható le a teljes időszak egyazon eloszlással. Az alábbi eredmények születtek:

Változó	Homogén	Inhomogén	Homogenitást elérte
Csapadék	x		–
Hozzáfolyás		x	1982
Párolgás	x		–
Természetes vízkészletvált.		x	1982
Szél erősség		x	1994
Léghőmérséklet		x	1998
Víz hőmérséklet		x	1994
Besugárzás		x	1982
Nedvességtartalom	x		–
Víz állás		x	1976

1. táblázat Homogenitás vizsgálat eredményei

A tíz vizsgált változó közül csak három felelt meg a homogenitás előjel-próbájának, míg hét esetben a teljes idősort nézve inhomogén lett a próba végkimenetele.

A hozzáfolyás és a természetes vízkészletváltozás 41 éves idősorában az utolsó 39 év már megfelelt a homogenitás próbájának, míg a besugárzásnál ugyanez a 40 éves idősorról mondható el. Mind a három példában az első 1–2 év mérési eredményei vitték el a próbát, ami arra enged következtetni, hogy folyamatosan változó - trenddel bíró - idősorral van dolgunk.

A szél erősség idősorában 1994 után tapasztalhatunk egyöntetűséget. Az eredeti 3 órás adatsor méréseit megtekintve az lehetséges fel, hogy 1975 és 1995 között egész értékekben, míg 1995 májusától kezdve már egy tizedesjegy pontossággal jegyezték fel a balatoni szelek sebességét. Ebből kifolyólag én azzal a feltételezéssel élek, hogy 1995 májusában javították a mérőműszer érzékenységén és evégett jutottunk az egyöntetűség vizsgálatában inhomogén végeredményre.

A léghőmérséklet idősor esetében nem sejtünk érdemi változást a mérési technikában. A nagyobb víztestek jellemzője, hogy a közvetlen környezetükre kiegyenlítő mikroklimatikus hatással bírnak (Nagy, 2013). Az inhomogenitás adódhat abból, hogy a mérési "lábnyom" a szélirány függvénye. Míg északi szél esetén a vízfelszín feletti viszonyokat rögzítjük, addig déli szelek esetén a szárazföld fölötti állapotot mintázzuk.

A víz hőmérsékletek esetében a mérési módszertan változhatott. Az évek során esetleg más

mélységben történt a vízhőmérséklet nyomon követése. Például jégmentes időszakokban bójára van rögzítve a szenzor, míg télen a fenéktől adott távolságra igyekeznek elhelyezni a műszert. A telepítés mikéntje változhatott az évek alatt.

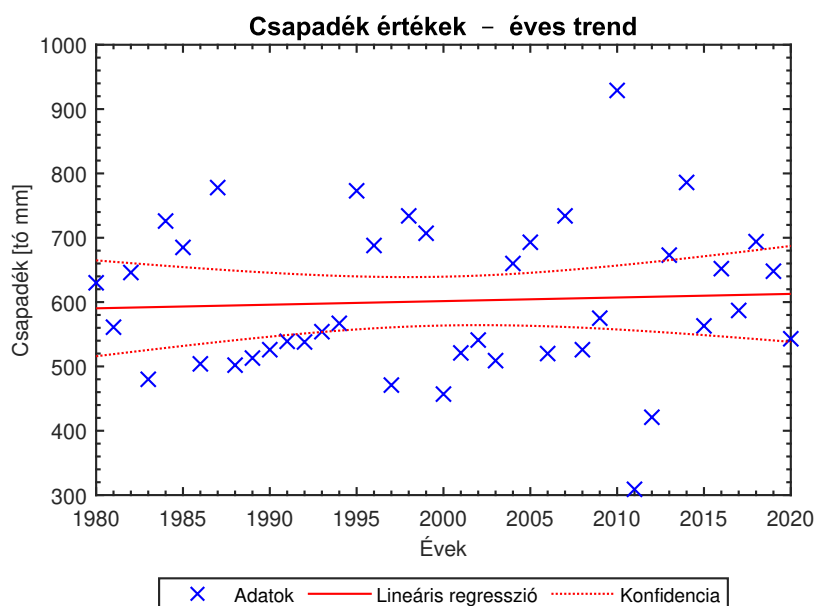
A vízállás és besugárzás időszora inhomogénnek mutatkozott, de csak akkor ha a legelső évet (1981) is bevettük a vizsgálatba. Vagyis jó közelítéssel ezek az idősorok egyöntetűnek tekinthetők.

3.2. Trend analízis

3.2.1. Éves és havi idősorok

CSAPADÉK

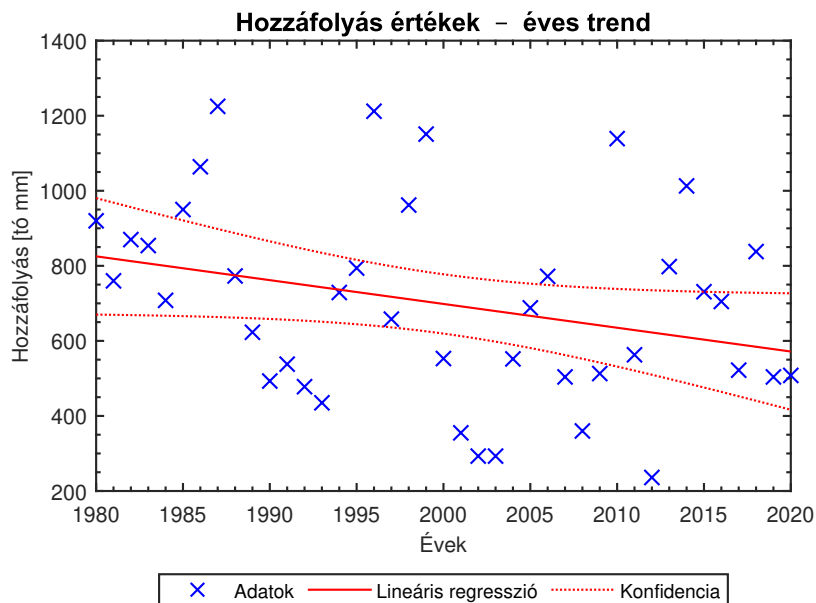
A csapadéknál éves szinten enyhe emelkedés jelentkezett a trendben, de ez kis mértéke miatt se az éves se a havi bontásban nem mutatkozott szignifikánsnak. Az évek során a legtöbb csapadék májusban, és a legkevesebb csapadék március hónapban hullott.



5. ábra Csapadék éves trendje

HOZZÁFOLYÁS

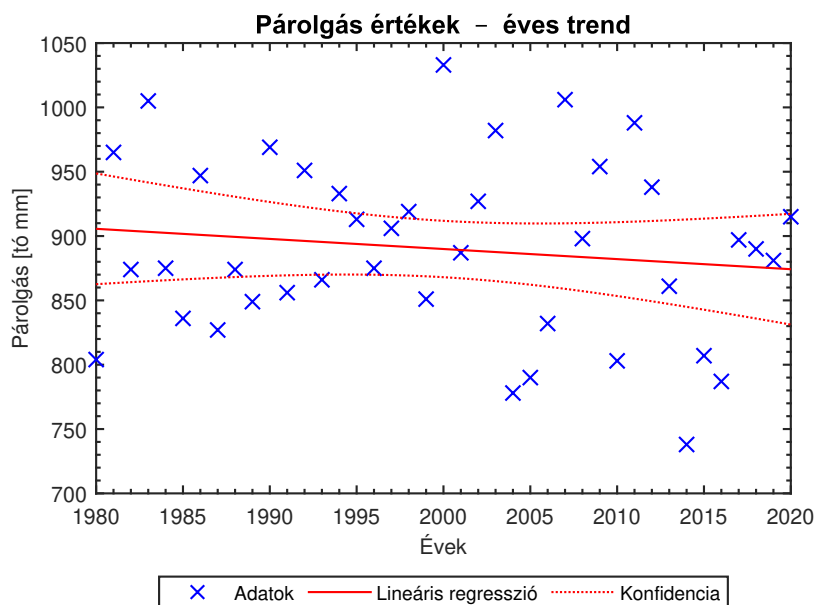
A Balaton hozzáfolyási adataiban csökkenő trend figyelhető meg, ami a havi bontás szerint egész évben jellemző. 41 év alatt több mint 800 tó mm vízmennyiségről lecsökkentünk kevesebb mint 600 tó mm-re. A legdrasztikusabb hanyatlás májusban és júliusban jelentkezett, és összeségében elmondható, hogy július – november között érkezik a legkevesebb hozam.



6. ábra *Hozzáfolyás éves trendje*

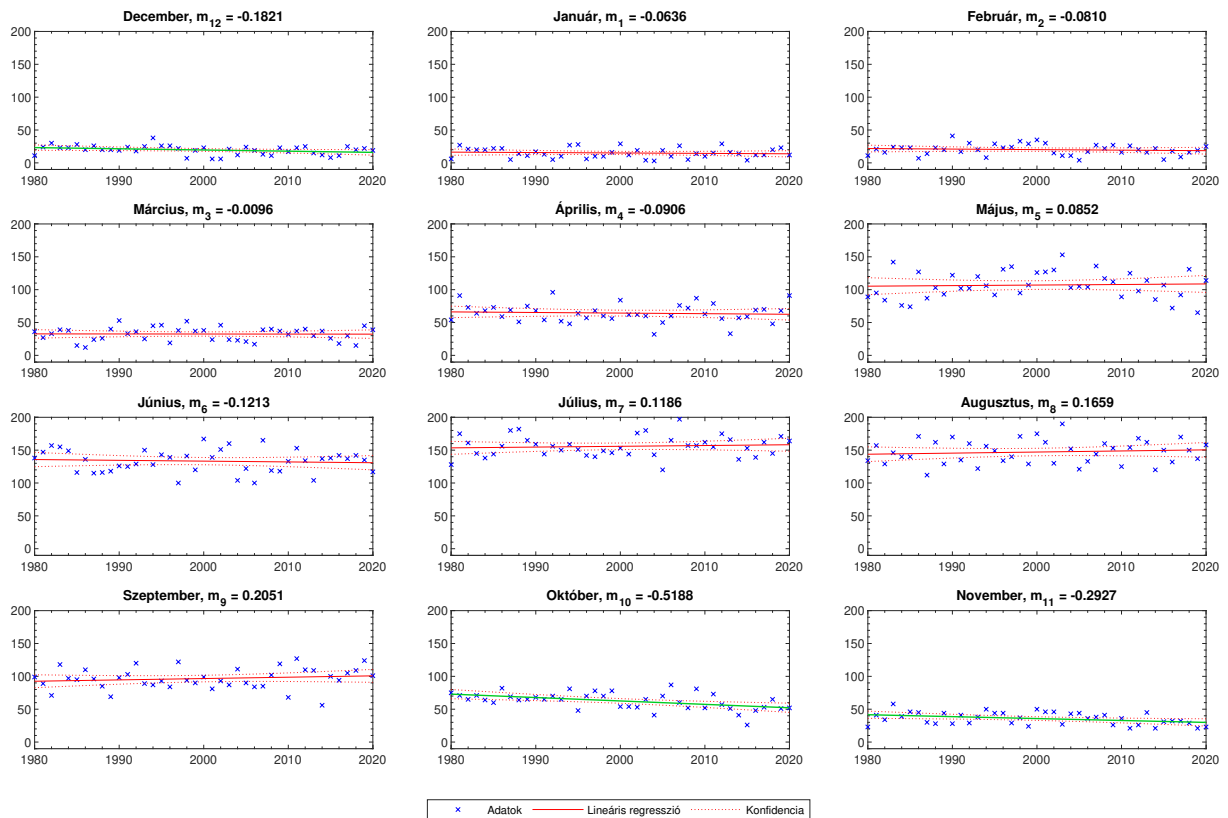
PÁROLGÁS

Ha az éves eredményt vizsgáljuk gyenge csökkenő trendet fedezhetünk fel, azonban ha összevetjük ezt a havi trendekkel, láthatjuk, hogy ez az őszi és téli hónapok párolgásában jelentkező szignifikáns visszaesés eredménye. Továbbá az is megfigyelhető, hogy májustól egészen szeptemberig a párolgások pozitív irányban nőttek.



7. ábra *Párolgás éves trendje*

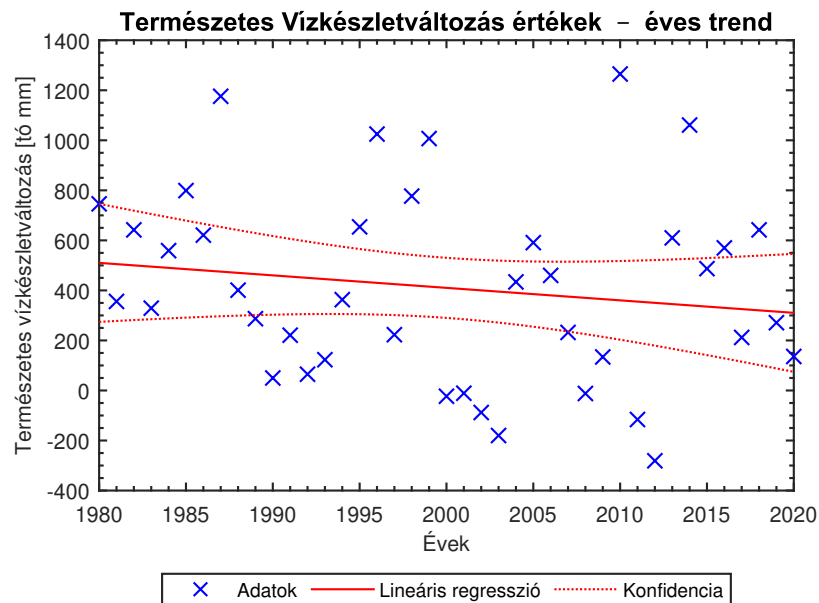
Párolgás értékek [tó mm] – havi trendek



8. ábra Párolgás havi trendek
 A szignifikáns trendek **zöld vonallal** jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

TERMÉSZETES VÍZKÉSZLETVÁLTOZÁS

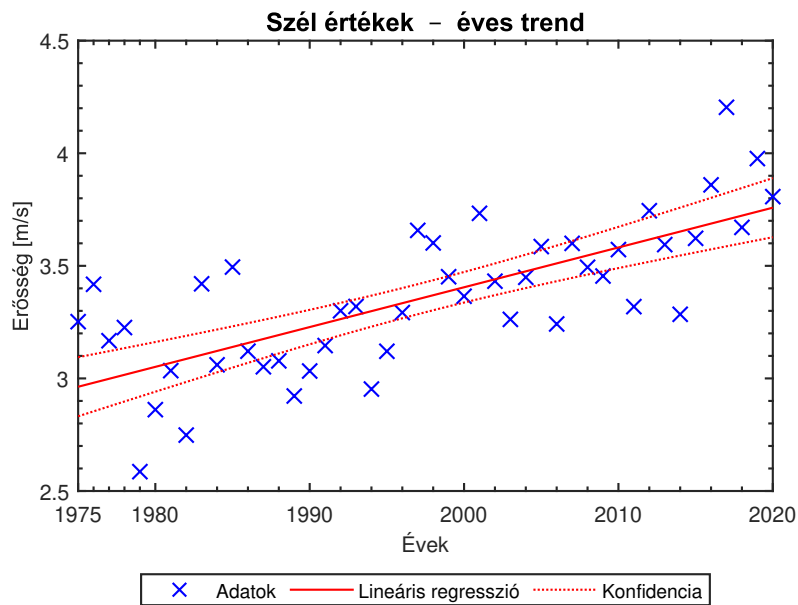
A vízkészletek természetes változása éves felbontásban negatív trendet mutat, de a havi értékekben nincs szignifikáns trenddel bíró hónap. Az éves csökkenés párhuzamot mutat a hozzáfolyás visszaesésével, azonban mértéke nem követi azt, mivel éves szinten a párolgás is csökken, ami így mérsékli a készlet negatív változását.



9. ábra Term. vízkészletváltozás éves trendje

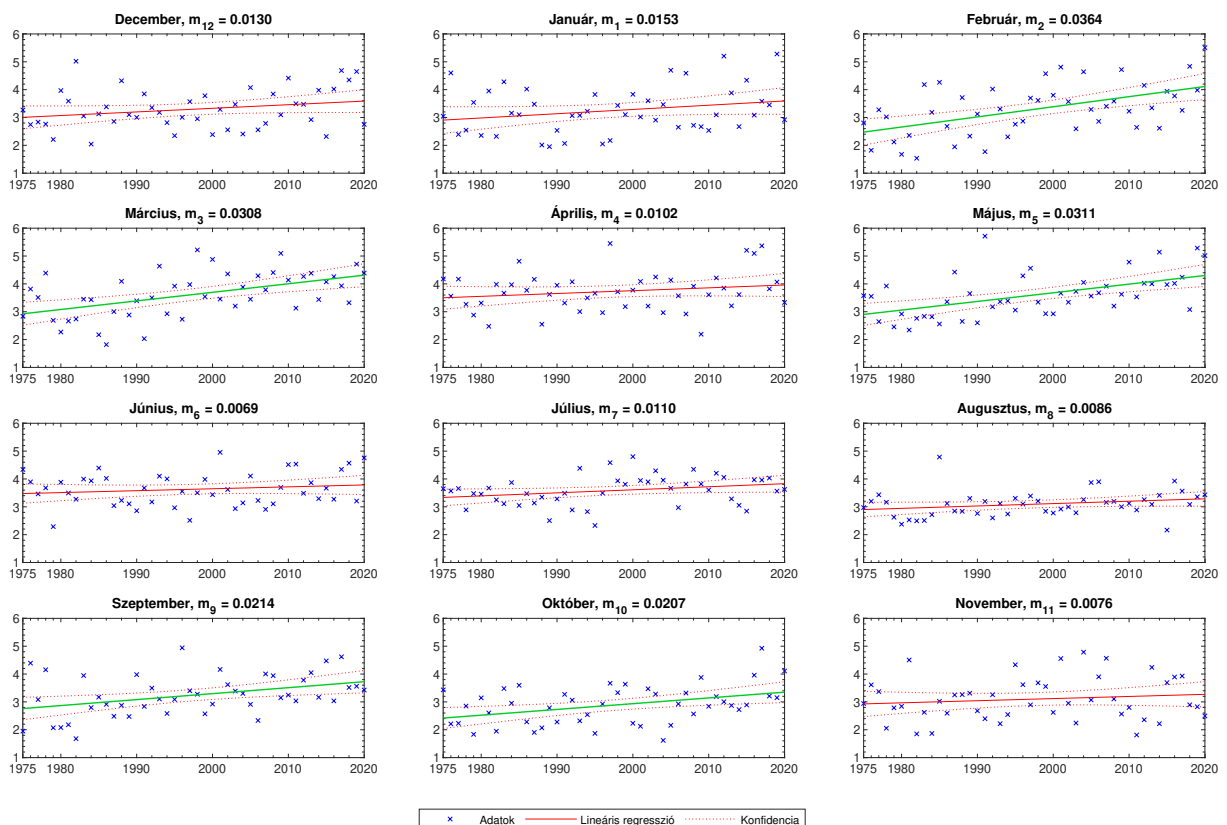
SZÉL

A szélerősségek esetében mind az éves, mind a havi trendeket vizsgálva nagyon erős emelkedés figyelhető meg. Az emelkedés éves értéke 0.8 m/s. Ez annak fényében érdekes, hogy azokban az őszi hónapokban is megfigyelhető a szélesebbesség növekedése, amelyekben a párolgás csökkenő tendenciát mutat.



10. ábra Szélerősség éves trendje

Szél értékek [m/s] – havi trendek



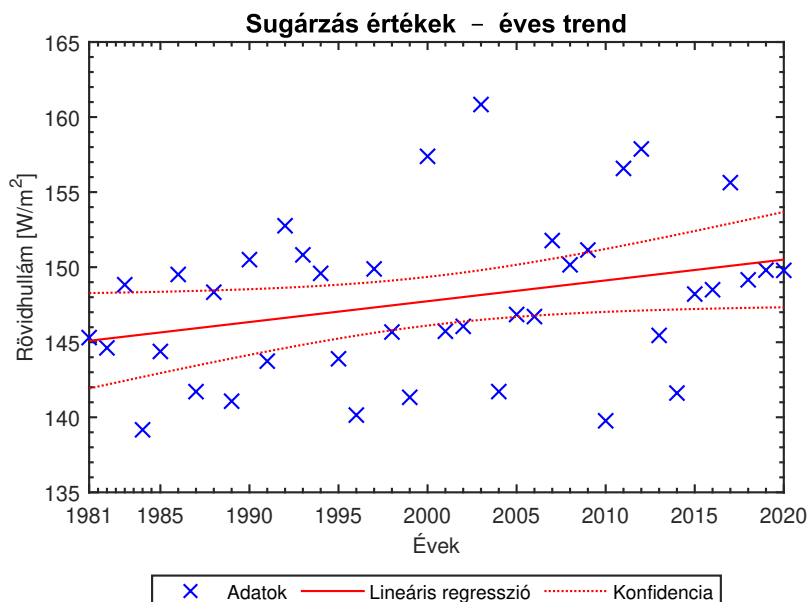
11. ábra Szélerősség havi trendek
A szignifikáns trendek **zöld vonallal** jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

NEDVESSÉGTARTALOM

A tíz változó közül egyedül a nedvességtartalomban nem lelhető fel éves szinten változás. 40 év alatt a Balaton környékének páratartalma szinte konstans 75.6 %-os telítettségi értéket vett fel. Ellenben havi bontásban már megjelenik némi ingadozás: a tavaszi és nyári hónapokban enyhe csökkenés, míg az őszi és téli hónapokban enyhe emelkedés jelentkezik, de értékeik éves átlagban kiegyenlítik egymást.

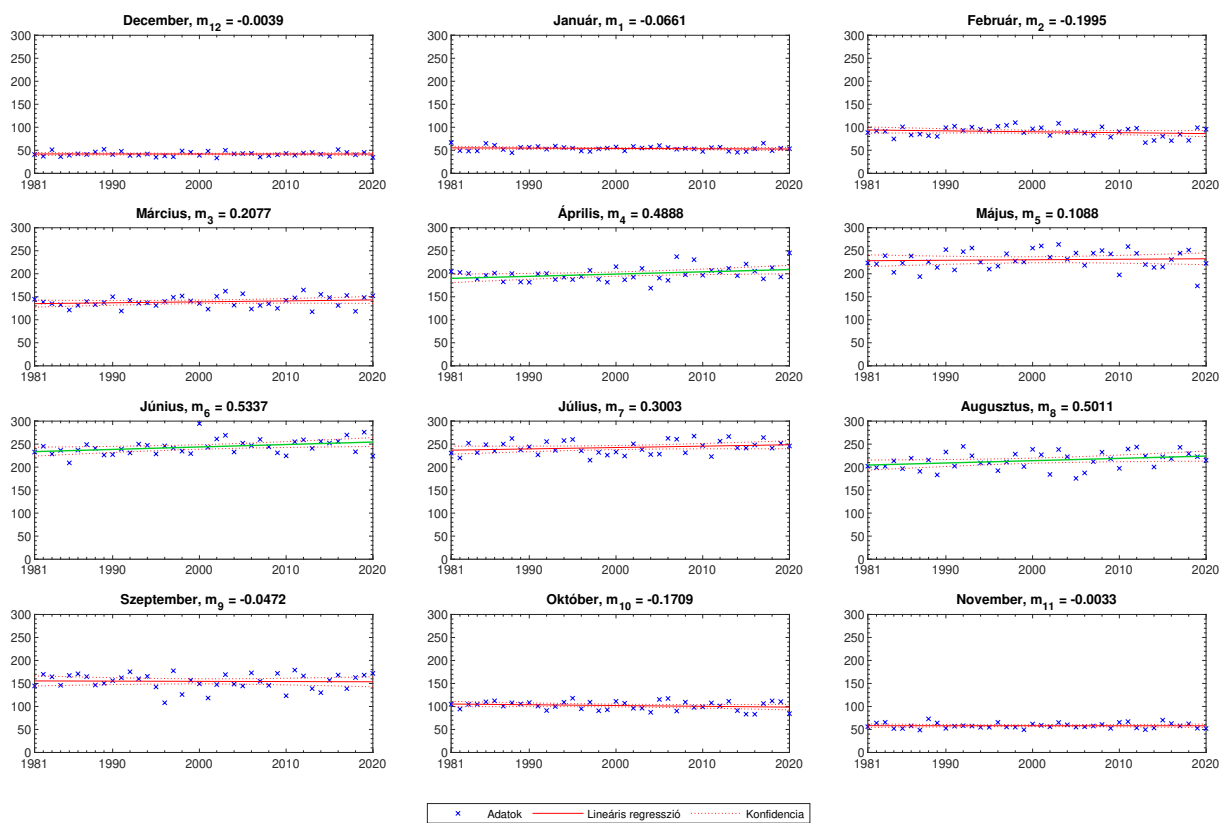
SUGÁRZÁS

Az éves és havi beérkező sugárzások értékei egyaránt növekedtek. 2020 napsugárzásának éves átlaga kb. 5 W/m^2 -rel több az 1981-es átlagértéknél. A havi átlagok alakulását vizsgálva április, június és augusztus hónapok besugárzásában érzékelhető a legjelentősebb növekedés, míg a téli hónapokban stagnál a besugárzás. A rövidhullámú besugárzás növekedése a csökkenő felhőborítottság eredménye, vagyis valójában nem a légkör felső határát érő napsugárzásban történik érdemi változás, hanem a felhőborítottságban és ezáltal változik meg a felszínre érő sugárzásérték. A tavasz végi és nyári hónapok átlagos besugárzása $200\text{-}250 \text{ W/m}^2$ között mozog.



12. ábra Sugárzás éves trendje

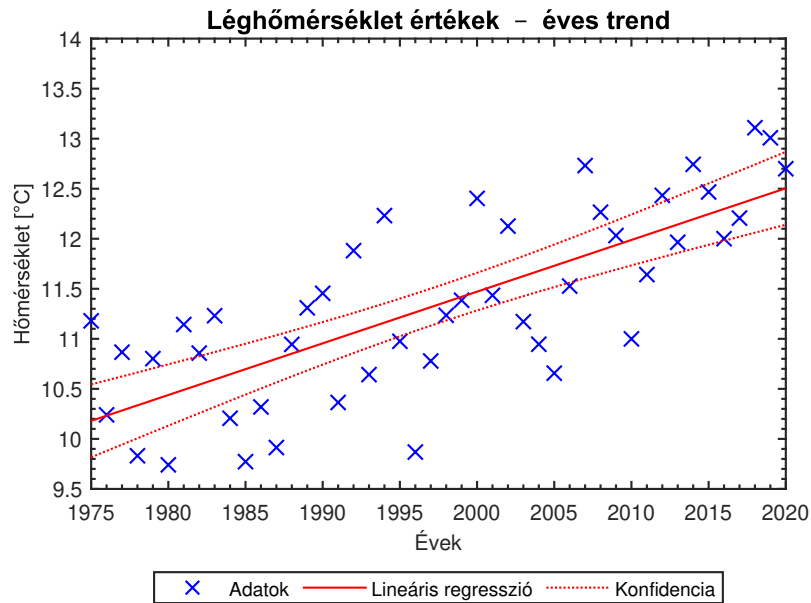
Sugárzás értékek [W/m^2] – havi trendek



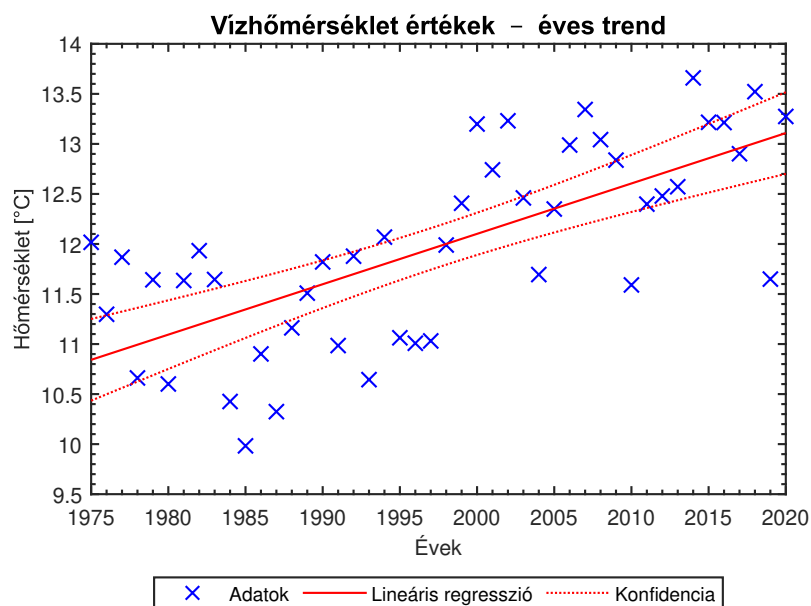
13. ábra Sugárzás havi trendek
 A szignifikáns trendek *zöld vonallal* jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

LÉG- ÉS VÍZHŐMÉRSÉKLET

A sugárzással egyhuzamban mindkettő hőmérsékleti idősorban erős pozitív trend mutatkozott. 46 év leforgása alatt a lég- és vízhőmérsékletek éves átlaga 2.3°C -al emelkedett. A hőmérsékletek havi bontását vizsgálva elmondható, hogy a levegő esetén a melegedés áprilistól novemberig jelentkezett szignifikánsnak. A víz esetén pedig május kivételével az összes hónap trendje szignifikánsnak bizonyult. Ebből látszik, hogy a vízhőmérséklet alakulása és megváltozása egyazon meredekséggel szorosan követi a légkör felmelegedését az éghajlatváltozás hatására. Ez anna tudható be, hogy a Balaton rendkívül sekély tó, kis víztömeggel, ami gyorsan képes követni a légköri hőmérsékletváltozást.



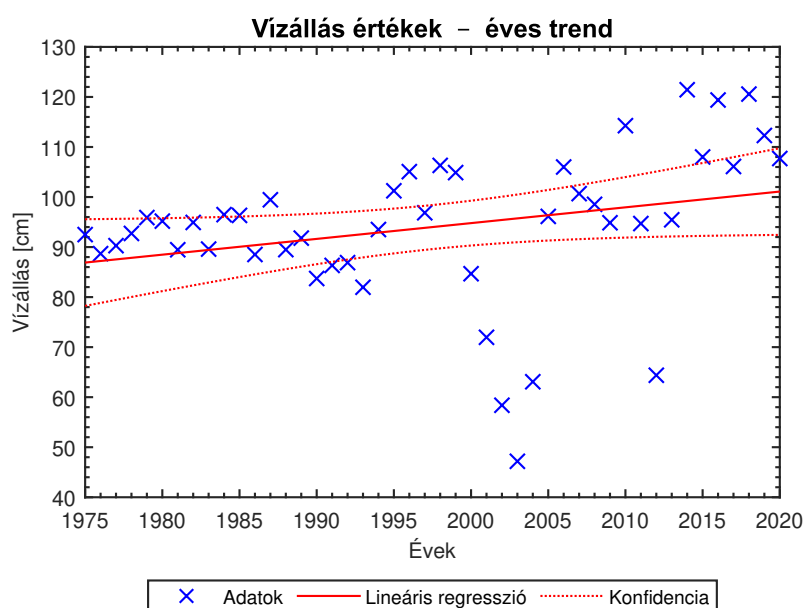
14. ábra Léghőmérséklet éves trendje



15. ábra Vízhőmérséklet éves trendje

VÍZÁLLÁS

A Balaton vízállásainak idősorában a 2000-es évek elején az átlagostól jóval kisebb értékek figyelhetők meg. A 2000-től 2004-ig tartó egyenletes és nagymértékű zuhanás eredete a meteorológiai tényezők idősoraiban keresendő. Ugyanebben az időszakban a csapadék éves értéke éppen hogy meghaladta az 500 tó mm-t (5. ábra), a hozzáfolyás szintén tartósan alacsony átlagokkal rendelkezett (6. ábra), a párolgás pedig hirtelen emelkedésnek indult (7. ábra). Ez a pár aszályos esztendő a Balaton vízszintszabályozására komoly hatással volt. 2005 után, egyetlen év kivételével, a vízállást szabályozás útján tartósan az addigi évek átlaga felett tartották. Így tehát a vízállások éves trendjében megfigyelhető pozitív tendenciáról elmondható, hogy nem természetes eredetű, hanem az emberi beavatkozások eredménye.



16. ábra Vízállások éves trendje

3.2.2. Havi értékek áttekintése

Külön áttekintésben szeretném összefoglalni a vizsgált tíz változó havi átlagainak tendenciáját, amit az egyszerűség kedvéért egy összefoglaló táblázatban jelenítek meg (17. ábra). A táblában a színek a változások irányát jelzik - a piros szín pozitív, a kék szín negatív trendre utal. A jelölők méretei a trendmeredekségek nagyságával állnak párhuzamban. A karikák kitöltöttsége pedig a szignifikanciát igyekszik szemléltetni - a teli a szignifikáns, az üres karika a nem szignifikáns trend.

A tapasztalt legfontosabb változások összefoglalóan a következők:

- ⇒ Havi bontásban a csapadék átlagainak nincs jelentős változása, azonban július és október között enyhén emelkedő trend tapasztalható.
- ⇒ A hozzáfolyás egész évben negatív tendenciát mutat, kiemelkedően erős májusi és júliusi értékekkel.

- ⇒ A párolgás havi trendjei szerint a nyár végi és őszi eleji hónapokban a párolgás értékeinek emelkedése figyelhető meg. Az év végén azonban igen szignifikáns csökkenés jelentkezett a havi átlagokban.
- ⇒ A természetes vízkészletváltozásban április – június között enyhe csökkenő trend jelenetkezik, de mindent összevetve az évek nagyobb részében nincs mérhető változás.
- ⇒ A szél esetében három kivétellel az összes hónapban emelkedő az átlagértékek tendenciája, kiemelkedően február – május és szeptember – október között.
- ⇒ A páratartalom időszora azt mutatja a legtöbb esetben konstans értékek jellemzőek az évekre. A tavaszi átlagértékek csökkenése kiegyenlítődik az őszi átlagértékek emelkedésében.
- ⇒ A beérkező napsugárzás sokéves trendje tavasszal és nyáron pozitív irányú növekedést mutat; április, június és augusztus hónapban mégózzá szignifikánsan.
- ⇒ A lég- és vízhőmérsékletek átlagai egy hónap kivételével egész évben szignifikánsan megnövekedtek.
- ⇒ A vízszintek szintén egész éves növekedést mutatnak, február és június közötti időszakra nézve jelentős mértékben. Azonban erről el kell mondani a fenti trendek fényében és a szabályozási szintek megváltozásának ismeretében, hogy nem természetes eredetű változásról van szó.

	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Csapadék	-	○	-	○	-	-	○	-	○	○	○	-
Hozzáfolyás	○	-	-	○	●	○	●	○	-	-	○	○
Párolgás	-	-	-	-	-	○	○	○	○	●	●	●
T. Vízkészletváltozás	○	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-
Szélesség	○	●	●	○	●	-	○	-	●	●	-	○
Nedvességtartalom	-	-	○	●	-	-	-	-	-	●	○	-
Sugárzás	-	-	-	●	-	●	○	●	-	-	-	-
Lég hőmérséklet	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○
Víz hőmérséklet	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●
Vízszint	○	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○

17. ábra Havi trendek összefoglaló táblázata

piros: növekvő trend, *kék:* csökkenő trend,

üres karika: nem szignifikáns trend, *teli karika:* szignifikáns trend,

karikák mérete: a trendek meredekségének mértékét mutatják,

"-" jel: nincs mérhető trend

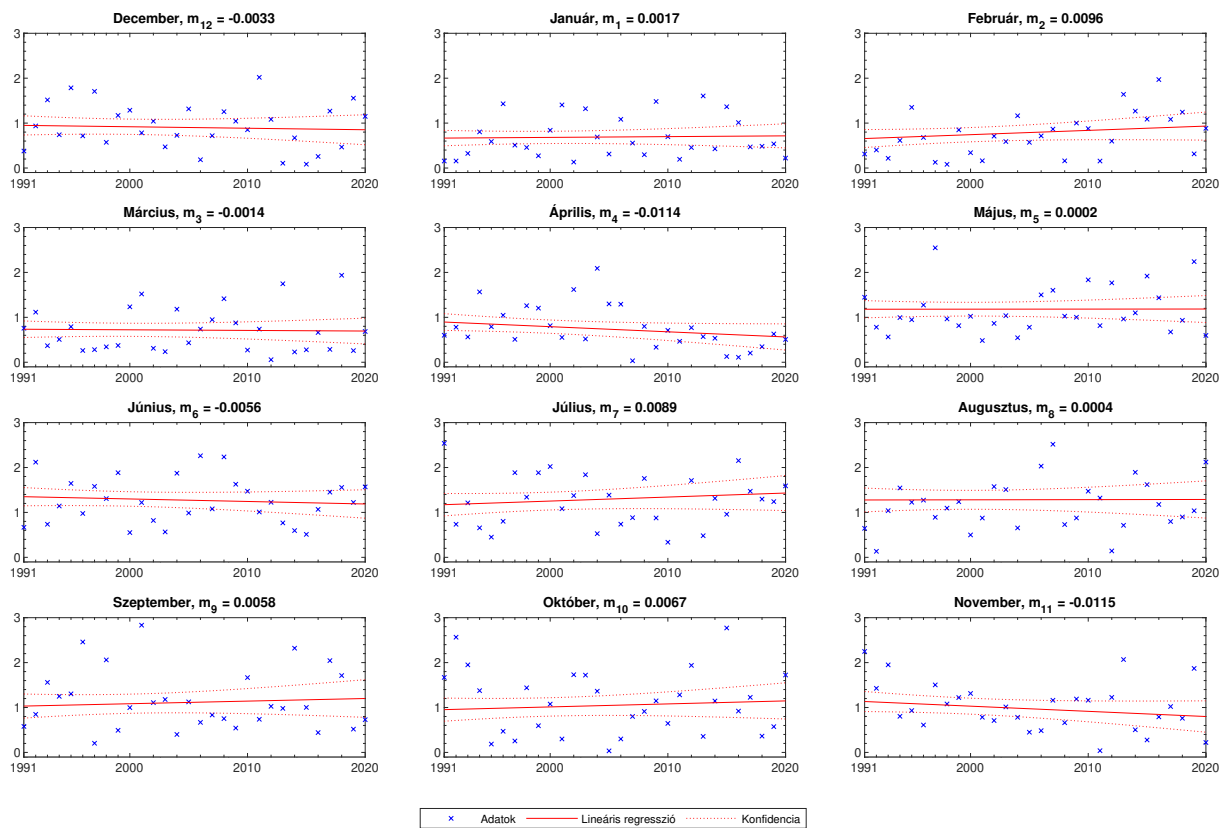
3.2.3. Éven belüli eloszlások: Pardé tényező

A Pardé tényezők az éven belüli eloszlásokról, illetve sokéves adatok ábrázolása esetében, azok megváltozásáról adnak tanúbizonyságot. A vízmérleg komponenseken végzett számítások alapján az alábbi következtetéseket érdemes levonni.

CSAPADÉK

A csapadékok terén egyik Pardé trend sem bizonyult szignifikánsnak. Azonban nem mondható el, hogy sehol sem jelentkezett mérhető trend. Februárban, júliusban, szeptemberben és októberben a Pardé értékek növekedése, míg novemberben és áprilisban az értékek csökkenése mutatkozott.

Csapadék Pardé – havi trendek

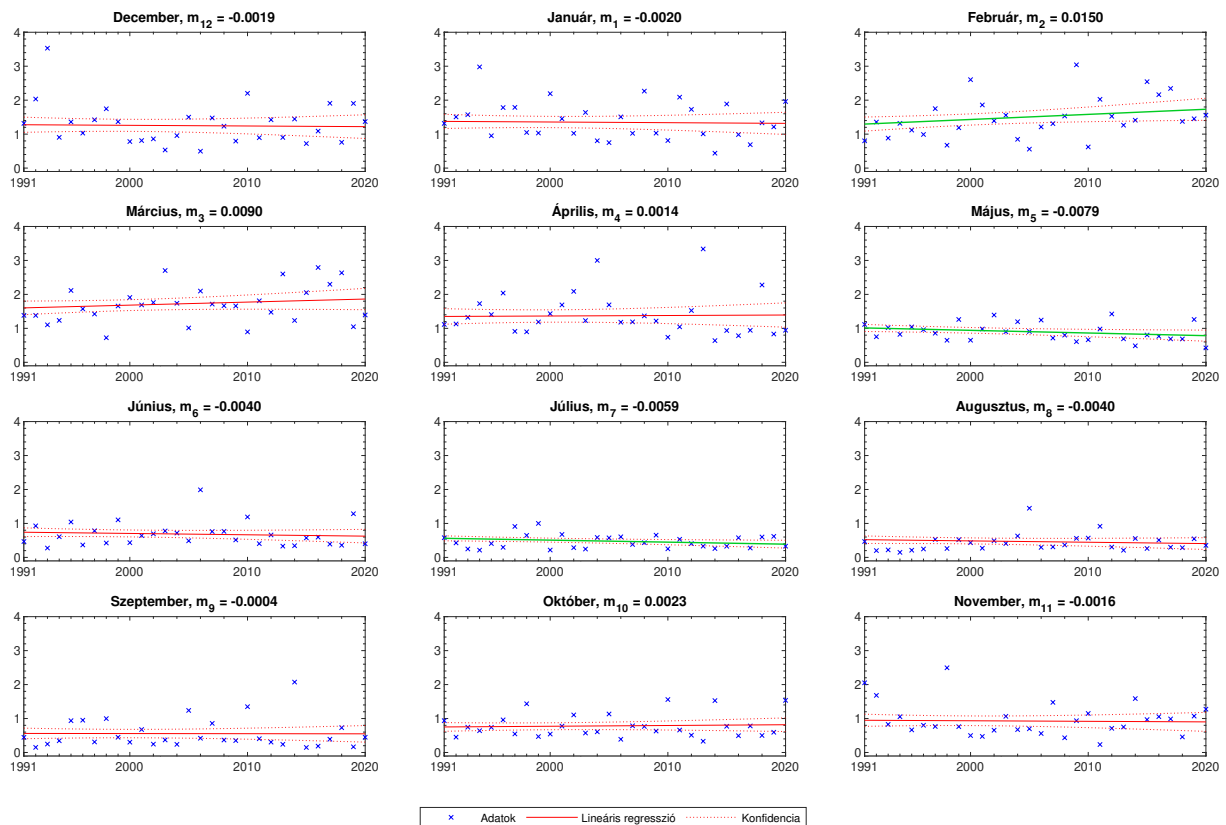


18. ábra Csapadék Pardé értékei és trendjei
A szignifikáns trendek **zöld vonallal** jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

HOZZÁFOLYÁS

A hozzáfolyás Pardé tényezőit vizsgálva láthatjuk, hogy a beérkező vízmennyiségek legnagyobb hányada az éven belül február és március között jelentkezik, az előző évekhez képest jelentősen az év eleje felé eltolódva. Ezzel együtt májusban és a nyári hónapokban a hozzáfolyás Pardé tényezői egészen 1 alá csökkennek, tehát az évnél ebben a szakaszában egyre inkább fogyóban van a befolyó hozamok mértéke.

Hozzáfolyás Pardé – havi trendek

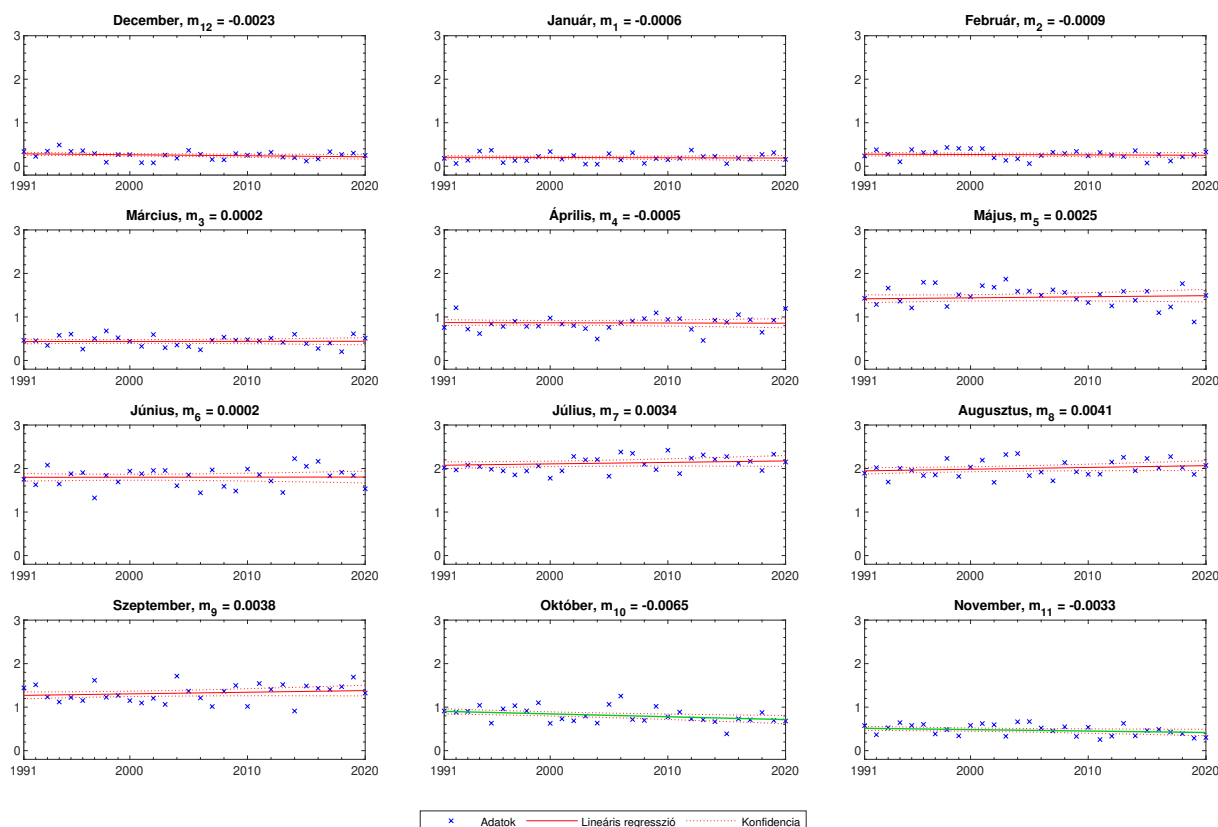


19. ábra Hozzáfolyás Pardé értékei és trendjei
A szignifikáns trendek **zöld vonallal** jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

PÁROLGÁS

A párolgás tekintetében elmondható, hogy 2-es Pardé értékekkel továbbra is az év közepe a mértékadó időszak, és hogy két hónap kivételével nincs jelentős trendbeli változás. Az említett két hónapban – októberben és novemberben – a Pardé 1-ről indulva lecsökken egészen 0.2-re, vagyis a párolgás igen nagymértékben alulmaradt az előző években tapasztaltakhoz képest.

Párolgás Pardé – havi trendek



20. ábra Párolgás Pardé értékei és trendjei
A szignifikáns trendek *zöld vonallal* jelölve
 m_i - az egyenesek meredeksége

3.2.4. Pardé értékek áttekintése

Az előzőekhez hasonlóan a Pardé értékekről is készült külön összefoglaló táblázat (21. ábra).

A tapasztalatok röviden összefoglalva:

- ⇒ A csapadék az április, június és november hónapokról a februári, illetve nyár végi és őszi eleji hónapokra rendeződik át.
- ⇒ Hozzáfolyásnál egyértelműen a február és március havi hozamok növekedtek meg jelentősen, míg a májusi és nyári hónapok beérkező vízhozama egyre jobban megcsappant. Ezt okozhatja a nyári hónapokban a párolgás növekedése, a tél végi időszakban a csapadék növekedése.

⇒ Párolgásnál a július – november hónapok szerepe értékelődött át: július–augusztus–szeptember nő, míg október és november hónapokban szignifikánsan csökken a Balaton tó párolgása az éven belül.

	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus	Szeptember	Október	November	December
Csapadék	-	○	-	○	-	○	○	-	○	○	○	-
Hozzáfolyás	-	●	○	-	●	○	●	○	-	-	-	-
Párolgás	-	-	-	-	-	-	○	○	○	●	●	-

21. ábra Pardé értékek trendjeinek összefoglaló táblázata

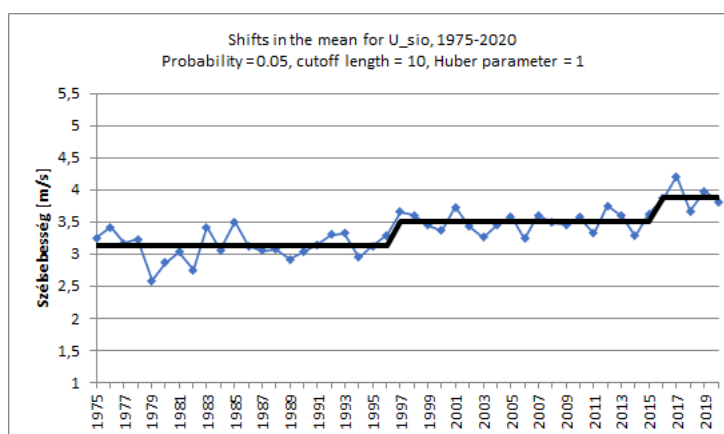
piros: növekvő trend, *kék:* csökkenő trend,
üres karika: nem szignifikáns trend, *teli karika:* szignifikáns trend,
karikák mérete: a trendek meredekségének mértékét mutatják,
"-" jel: nincs mérhető trend

3.3. Fordulópont

A fordulópontok detektálásánál a szignifikancia szintet 5%-os valószínűségnél számoltam, a vizsgálandó időszakot 10 év hosszúságúra vettem és Huber paramétert 1-nek állítottam be. Az elemzést mind a tíz időjárási változóra elvégeztem. A tíz közül összesen négy változó idősorában jelent meg észlelhető ugrás. Az eredményekben csak ezt a négy változót tüntetem fel.

SZÉL

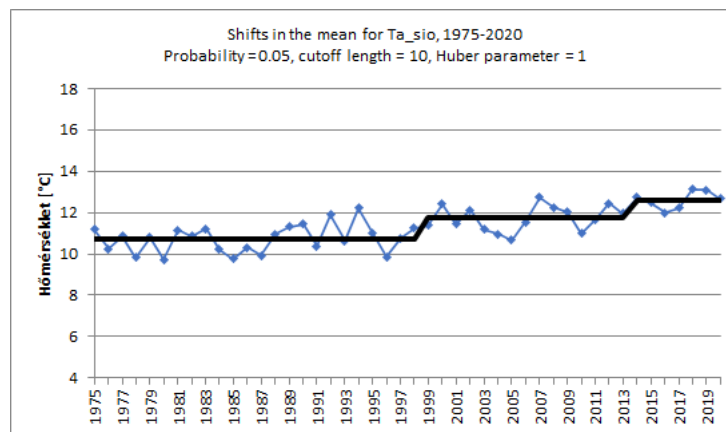
Azt, hogy a szélsébségek éves szinten jelentősen megnövekedtek, az éves trend ábrájáról könnyen le tudtuk olvasni, azonban az értékek emelkedésének nemlineáris voltáról csak a fordulópontok elemzése által kaphattunk bizonyosságot. A Siófoknál mért szélsébségekben három "regime" rajzolódott ki (22. ábra). Az első állapot az 1975 és 1997 közötti időszak, melynek átlagos szélsébsége 3.1 m/s. A második időszak bekövetkezte ezt az átlagot 0.4 m/s-al növelte meg a 3.5 m/s-os értékre. A harmadik időszak 2016-tól egészen máig eltart és a 3.9 m/s-os átlagértéket veszi fel.



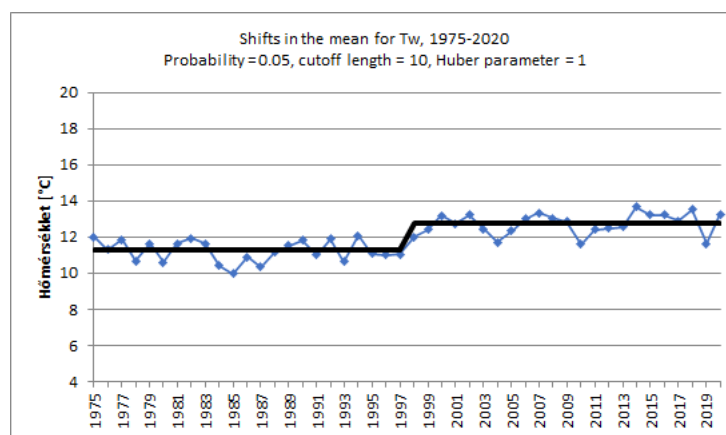
22. ábra Fordulópont: szél

LÉG- ÉS VÍZHŐMÉRSÉKLET

A szélhez hasonlóan a hőmérsékletek éves trendelemzéséről meg tudtuk állapítani, hogy növekvő tendenciát mutatott, de a fordulópontot az nem jelezte. Itt mindkét idősoron a 2000-es évek elején tűnik fel egy ugrás: a léghőnél 1999-ben, a víz hőnél 1998-ban. A levegőnél egy utólagos ugrás 2014-ben is megfigyelehető, ahol az átlagos hőmérséklet még egy szintet nőtt, elérve a 12.6°C-t. Feltűnő, hogy a két hőmérséklet idősorban majdnem egyazon évben jelentkeznek az ugrások, azonban a 2010-es évek közepén jelentkező növekedés nem mutatkozik meg víz-hőmérsékletekben. Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy ezeket az éveket nem merjük biztosan fordulópontoknak nevezni, mivel a tapasztalt változások kis mértékűek, nem úgy, mint a vízállás esetében.



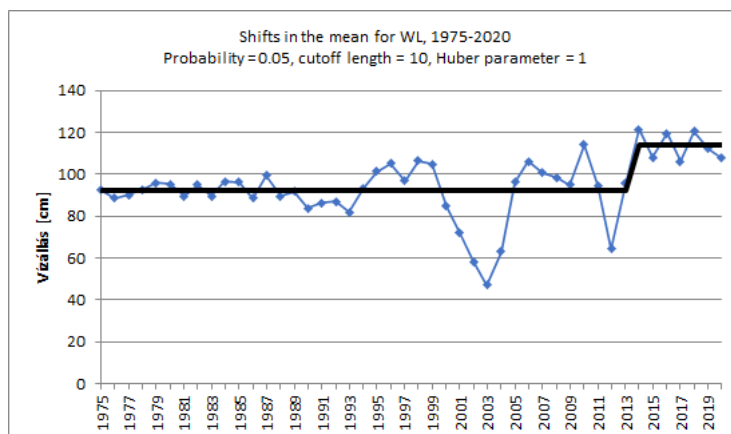
23. ábra Fordulópont: léghőmérséklet



24. ábra Fordulópont: víz hőmérséklet

VÍZÁLLÁS

A vízállásoknál érdekes eredményre jutott az algoritmus. Se a 2000-2005 közötti, se a 2012-es kiugró értékeket nem számítja új "regime"-be, ami arra enged következtetni, hogy az algoritmus szerint ezek az értékek a természetes vízszintingadozás jelenségének határain belül esnek. Ezzel szemben a 2015 és az aztutáni, antropogén beavatkozás hatására előálló értékek már egy új állapotnak felelnek meg.

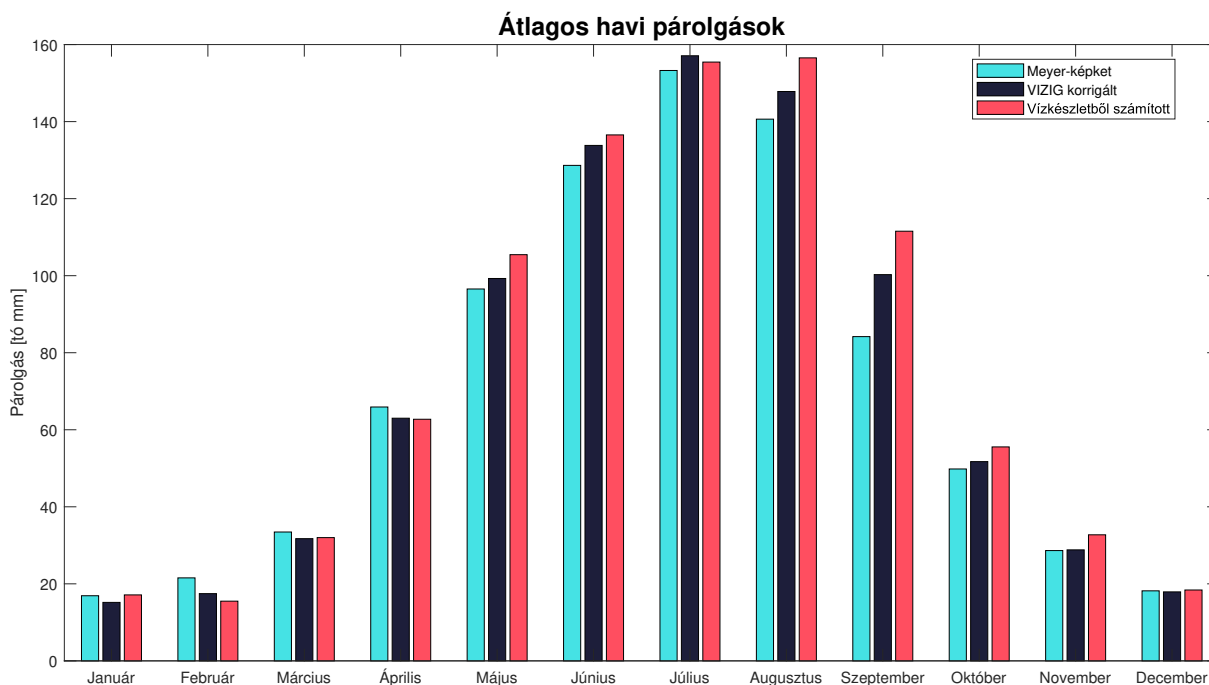


25. ábra Fordulópont: vízállás

3.4. Párolgás számítása

A módszertanban említett megállapítások alapján a párolgást találtam a vízmérleg legbizonytalanabb komponensének, ennél fogva ennek a tagnak a pontosítására szenteltem a legtöbb figyelmet.

Az elmúlt 11 év adatsoraiból három különböző párolgás-idősor adatait tudtam kinyerni: a Meyer-képlettel számított párolgást (P_{Meyer}), a Meyer-képlettel számolt és aztán a záróhibákkal korrigált párolgást ($P_{korrigált}$), illetve a vízkészletből újraszámolt párolgást ($P_{vízkészlet}$). E három idősor havi átlagai a következőképpen alakultak (26. ábra):



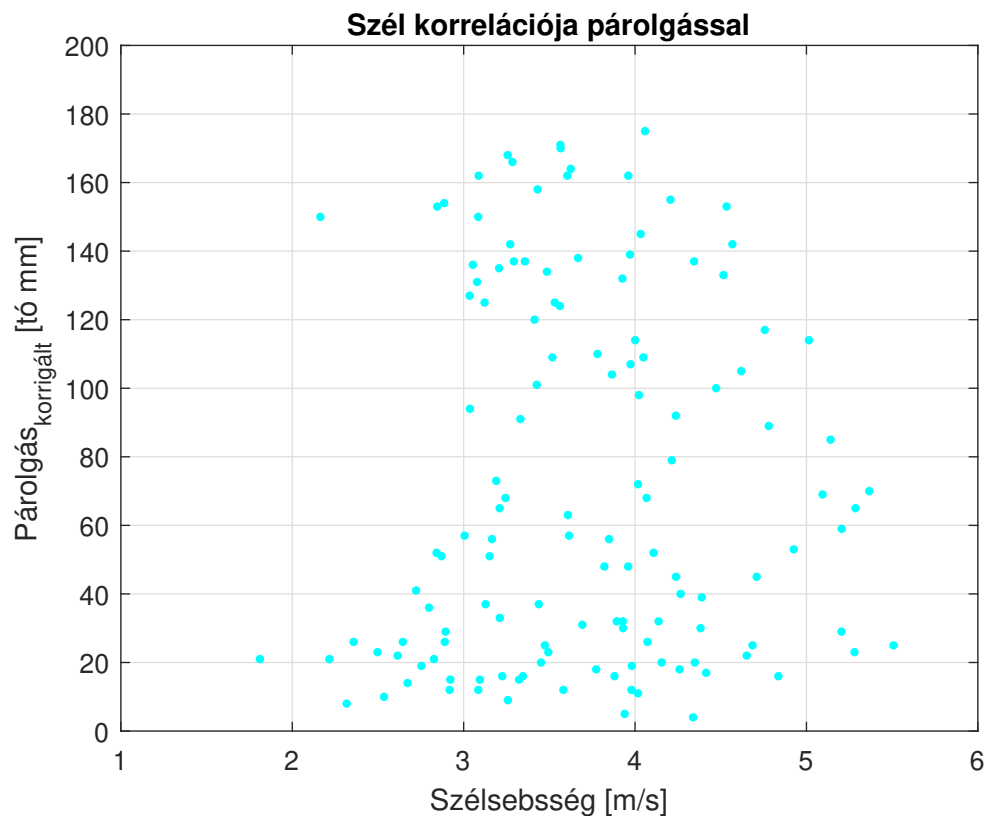
26. ábra Átlagos havi párolgások alakulása

A Meyer-képlet korrigálásában egyértelműen megjelölhető az alul- és felülbecslés időszaka: január – április között csökkentik, május – október között növelik az értékét, az utolsó két hónapban pedig egyezést ad. Ez a jól kivehető tendencia arra enged következtetni, hogy a Meyer-képlet jelenlegi paraméterezésének javítása célszerű.

3.4.1. Korreláció–analízis

A párolgásszámítás pontosítása céljából megkerestem azokat a meteorológiai változókat, amelyek a legszorosabb kapcsolatot mutatták a párolgások adatsoraival. Mindegyik korrelációvizsgálatnál a három párolgás-adatsor közül a VIZIG által javítottnál ($P_{korrigált}$) kaptuk a legkisebb szórást (és ezzel a párhuzamban a függvényillesztésnél a legkisebb RMSE-t), így ezt fogadtuk el mint a valóságot legjobban közelítő mérési adatsort.

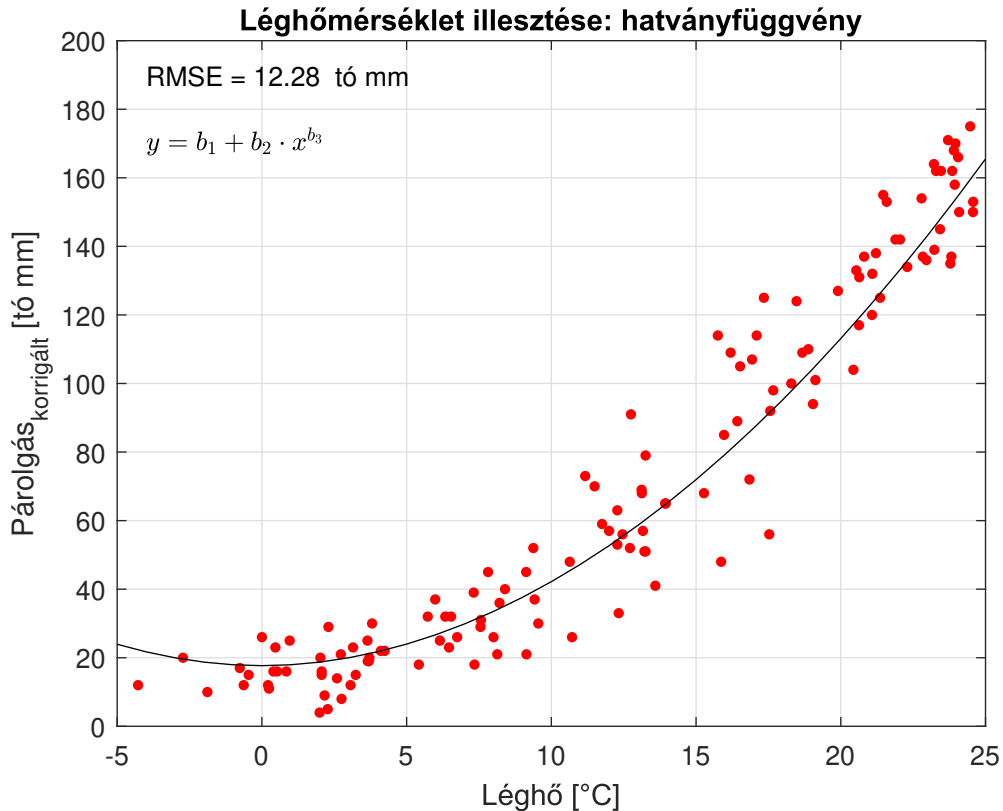
Fontos látni, hogy az 5 db meteorológiai változó közül egyedül a szél volt az, amely nem korrelált a párolgással havi léptékben és ezért a havi léptékű párolgás számításához nem szükséges figyelembe venni. (27. ábra).



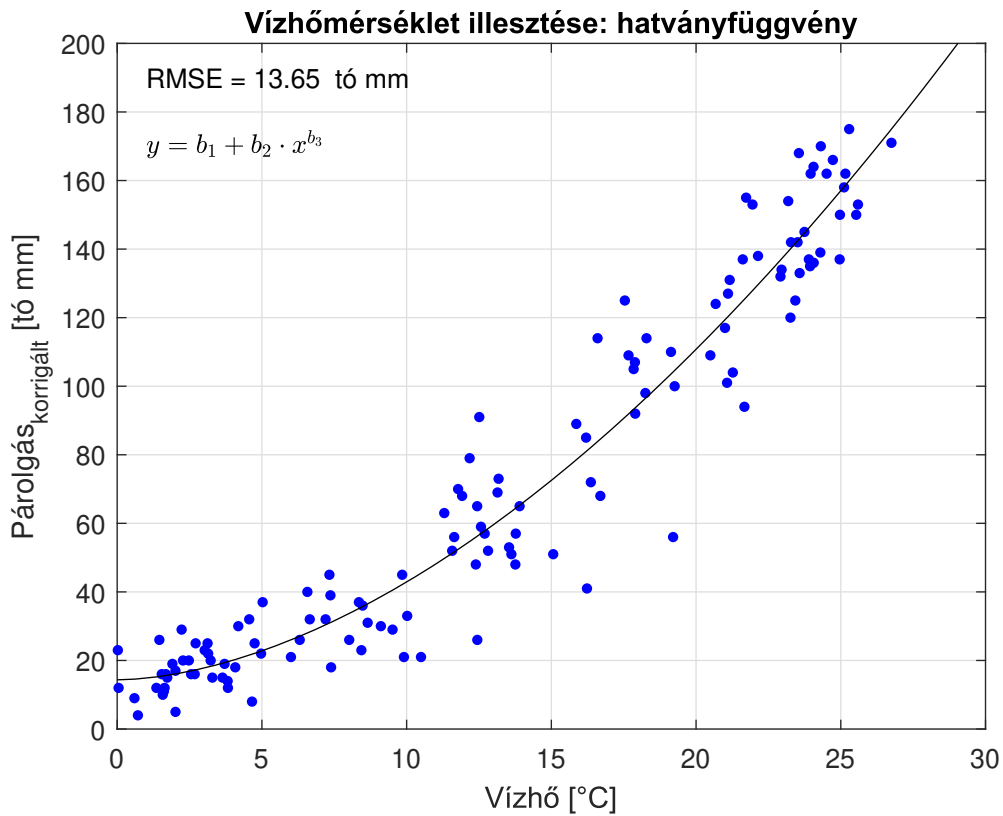
27. ábra Szél korrelációja párolgással

A léghőmérséklet és vízhőmérséklet esetében, a ponthalmaz alakjából kifolyólag, először a másodfokú görbeillesztést kíséreltem meg: $y = b_1 + b_2 \cdot x^2$. A léghőnél RMSE = 12.4 tó mm, a vízhőnél RMSE = 13.8 tó mm adódott. Ezután a kitevőt is változónak felvéve, az általános hatványfüggvény alakkal próbálkoztam: $y = b_1 + b_2 \cdot x^{b_3}$ (28. és 29. ábra). Itt a léghőnél RMSE = 12.3, a vízhőnél RMSE = 13.6 tó mm lett az eltérés. Habár ez az eltérés egy Balaton kiterjedésű tónál tulajdonképpen elenyésző, én a lehető legnagyobb pontosságra törekvés végett a hatványfüggvényt választottam követendő modellnek.

Mivel a léghő mutatott szorosabb kapcsolatot a párolgással, így a további számításoknál a léghőt vittem tovább, mint érdemi meghajtó tényezőt.

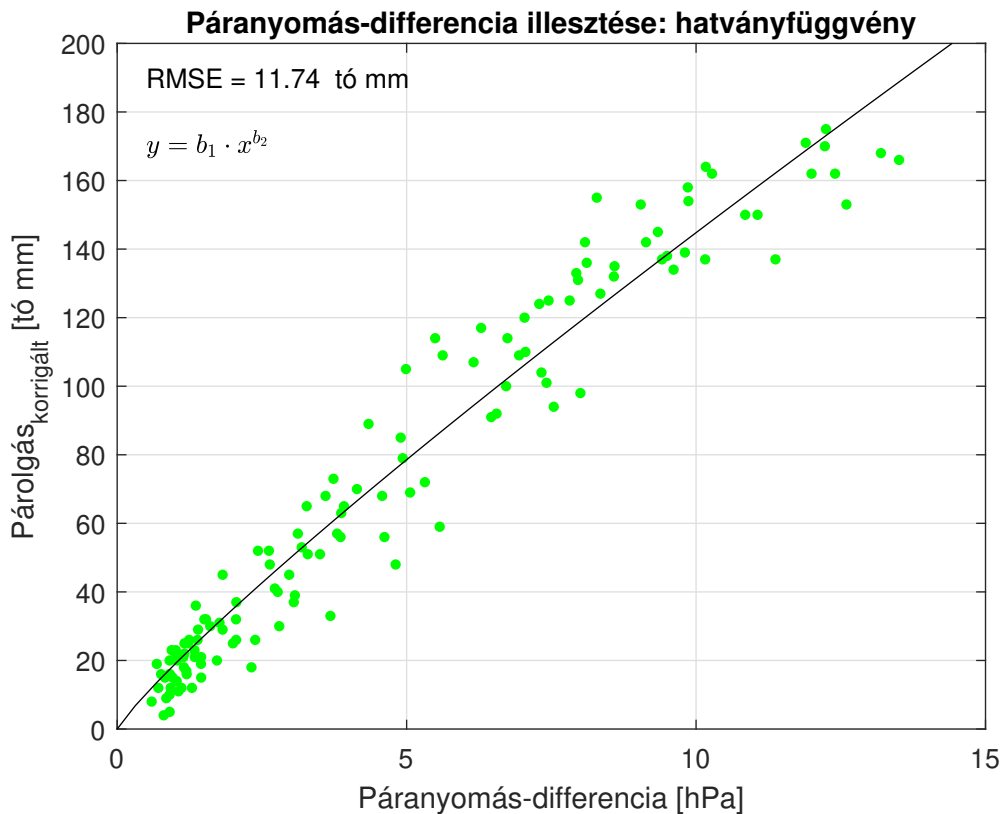


28. ábra Léghőmérséklet korrelációja párolgással



29. ábra *Vízhőmérséklet korrelációja párolgással*

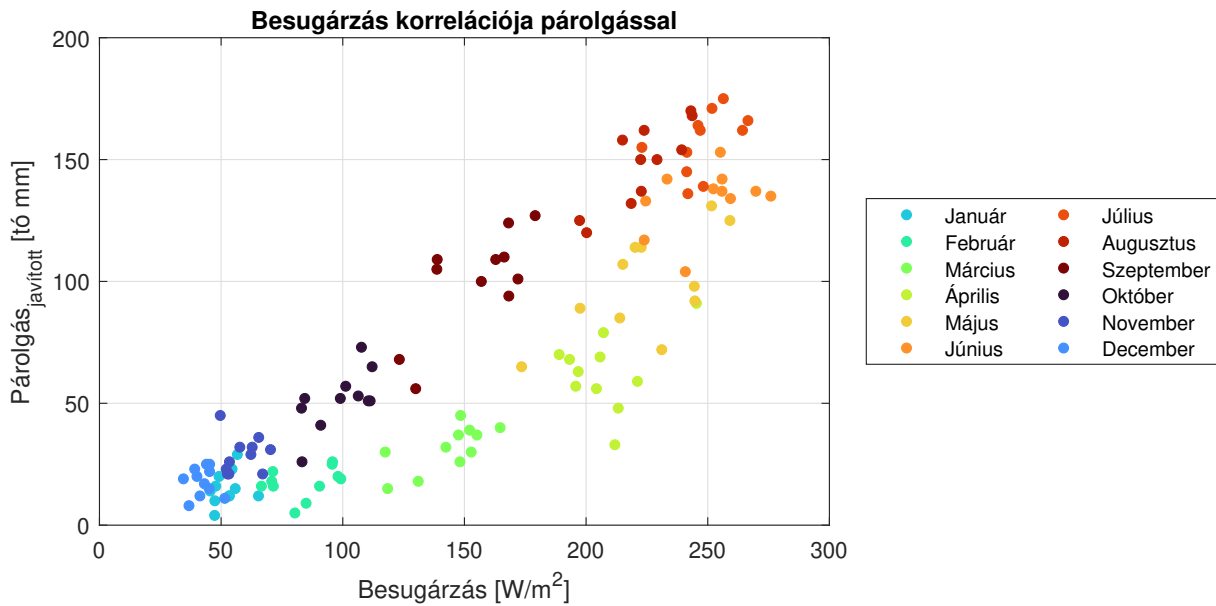
A telítési hiány ponthalmazát vizsgálva első ránézésre lineáris egyezést véltem felfedezni, így az $y = b_1 + b_2 \cdot x$ görbét illesztettem az adathalmazra, és ez RMSE = 12.3 tó mm hibát adott. Az előző eljárásból tanulva, itt is megnéztem a hatványfüggvény nem mutat-e pontosabb egyezést: $y = b_1 \cdot x^{b_2}$ (30. ábra). A hiba értéke RMSE = 11.7 lett, tehát ismét ez a modell bizonyult jobb megoldásnak.



30. ábra *Telítési hiány (párányomás-differencia) korrelációja párolgással*

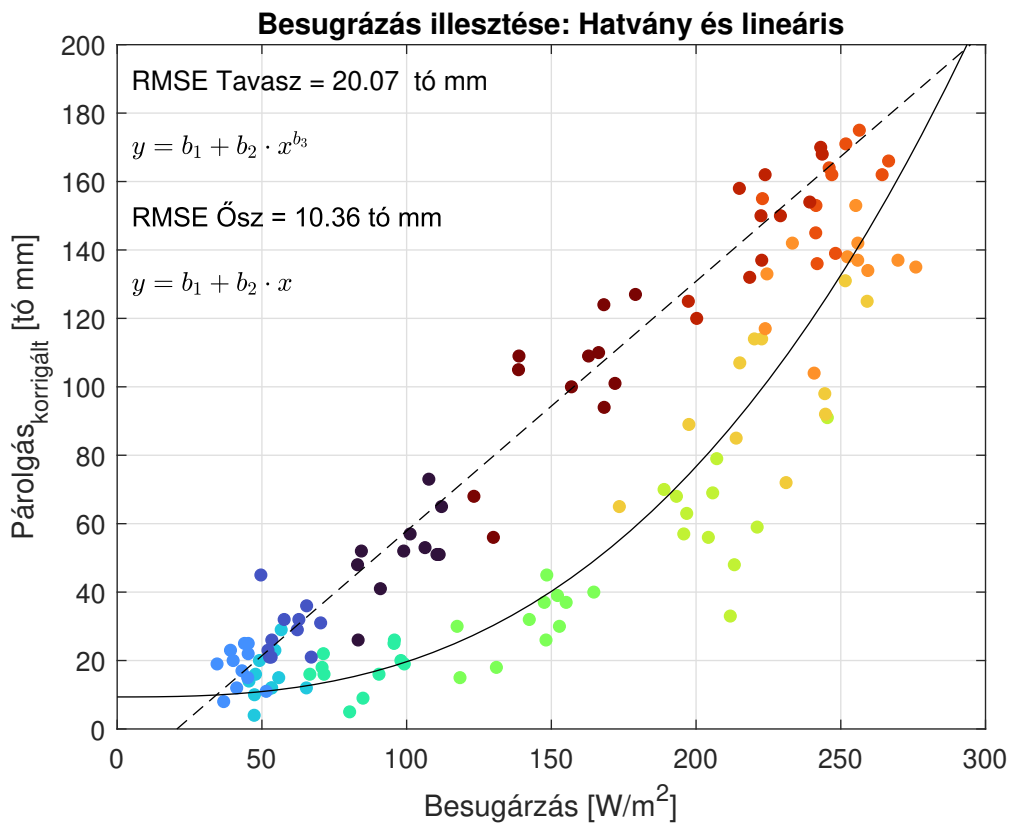
A besugárzás korrelációja mutatta a legérdekesebb összefüggést. A ponthalmazban fellelhető volt egyfajta kettősség, mintha a halmaz két külön ágra bomlana szét. A gyanú igazolása végett színelosztással jelöltem az adatképekre tartozó hónapokat, és gyönyörűen kirajzolódott, hogy hiszterézissel van dolgunk (31. ábra).

A hiszterézis jelensége azt mutatja meg, hogy a rendszer viselkedését a múltja határozza meg. Ez a párolgás esetében annyit tesz, hogy más periódusában más mértékű tó párolgás fog bekövetkezni ugyanolyan sugárzás beérkezése mellett. Vegyük példának a 150 W/m^2 -es besugárzást: március hónapban erre a sugárzás értékre a párolgás még az 50 tó mm-t sem éri el, azonban fél évvel később, szeptemberben, ugyanekkora besugárzásra 100 tó mm-nyi vízmennyiség is elpárologhat a rendszerből. A különbség abban rejlik, hogy a március a tél után következő legelső hónap, míg a szeptember a nyarat követi - a télen beérkező sugárzás a nyári 1/5-e, télen a környezet közel sem tud annyira felmelegedni, mint nyaranta mikor a Föld ezen feltekét a legtöbb sugárzás éri. A nyári hónapok után nagyobb a vízben eltárolt hő mennyisége, emiatt kisebb sugárzás beérkezése esetén is több víz tud elpárologni, szemben tél végén, amikor a hideg vizek a beérkező napsugárzást szinte teljesen "felemészítik". Így hat ki a múlt a rendszer aktuális válaszára. Összefoglalva, azt mondhatjuk el, hogy a Balaton esetében elkülöníthetünk egy melegedési és egy hűlési periódust. A melegedés során a párolgás és a besugárzás hatványfüggvény szerinti, míg a lehűlés időszakában lineáris kapcsolatot mutat az elmúlt tíz év adatsorai alapján.



31. ábra Hiszterézis

A hiszterézis kettőse azt vonja maga után, hogy a görbe illesztésnél is kétféleképpen kell eljárni: külön görbe határozza majd meg az év eleji (tavaszi) és év végi (ősz) párolgást. A tavaszi görbe januártól júniusig tart és alakját a hatványfüggvény összefüggése írja le: $y = b_1 + b_2 \cdot x^{b_3}$. Az őszi görbe pedig augusztustól decemberig tart és lineáris egyenesként jelenik meg: $y = b_1 + b_2 \cdot x$. A görbeillesztéseket a 32. ábra tartalmazza.



32. ábra Besugárzás korrelációja párolgással

A korrelációvizsgálat eredménye megmutatta, hogy a párolgással legszorosabb összefüggésben álló meteorológiai változók a léghőmérséklet (Ta), a páryanomás-differencia (Δe) és a besugárzás ($SWin$).

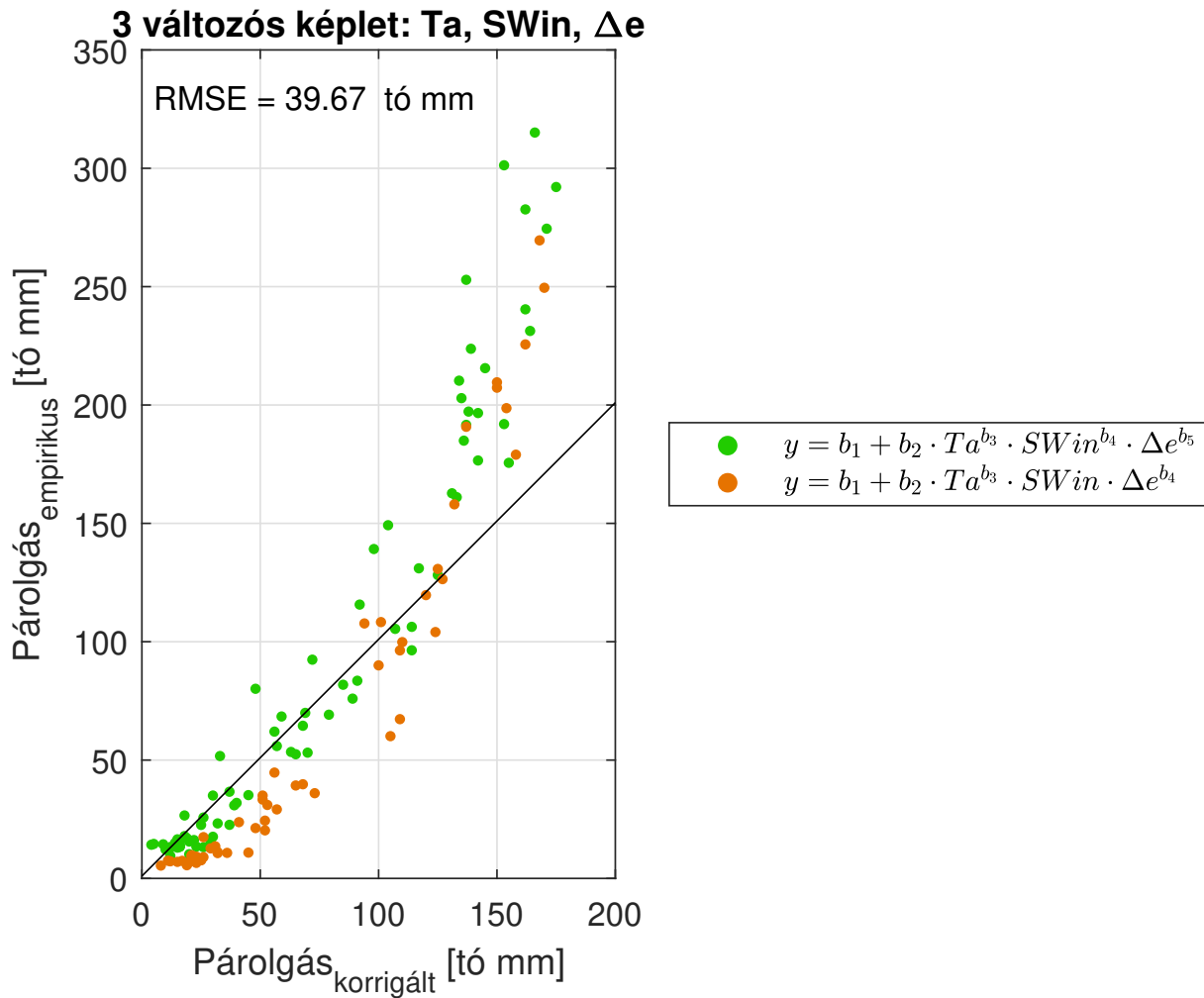
3.4.2. Új empirikus összefüggés

A Balaton tó párolgását számító, új empirikus összefüggés elméleti alakja a módszertanban is leírt: $P_{empirikus} = \alpha_1 + \alpha_2(x_1^{\alpha_3} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_k})$ alakot követi. A paraméterek meghatározása mellett még az is feladat, hogy eldöntsük vajon 2 vagy 3 változó bevitelével kapunk pontosabb eredményeket. A képletet több vezióban is ellenőriztem:

- léghő (Ta) és besugárzás ($SWin$)
- telítési hiány (Δe) és besugárzás ($SWin$)
- léghő (Ta) és telítési hiány (Δe)
- léghő (Ta), besugárzás ($SWin$) és telítési hiány (Δe)

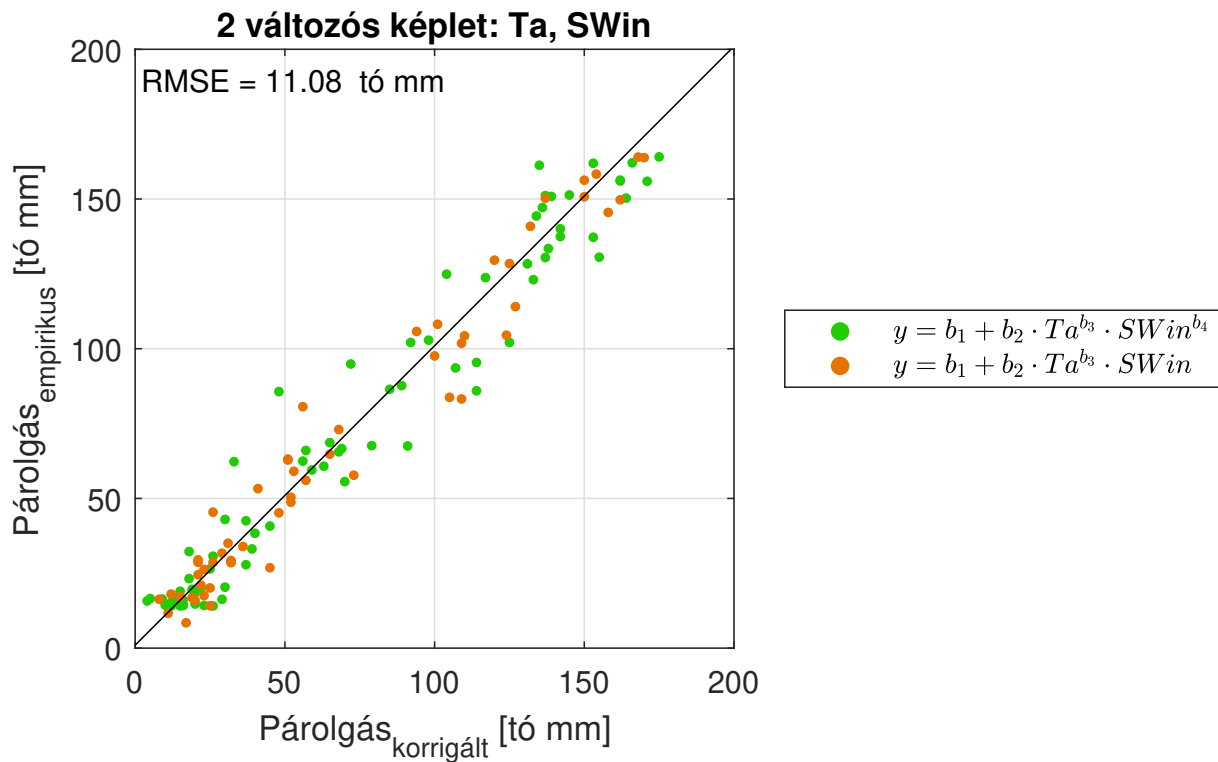
Azokban a képletekben, ahol megjelenik a besugárzás, mint bemeneti adat, ott a hiszterézis időszakossága miatt a képletet két részre kell osztani: melegedési időszakra, ahol a párolgás a besugárzástól hatványosan függ, illetve egy hűlési periódusra, ahol attól lineárisan függ.

Mindhárom változó használatával az empirikus képlet és a korrigált képlet közötti eltérés összesen 39.7 tó mm volt (33. ábra). Az ábrán látható is, hogy a két képlet 100 tó mm-ig egész jó egyezést ad, de 100 tó mm felett az empirikus képlet nagymértékben túlbecsül.



33. ábra 3 változós empirikus képlet eltérése
zöld jelölő: melegedési periódus, narancs jelölő: hűlési periódus

A kétváltozós képletek közül mind a három jóval pontosabb becslést végzett, mint a három változós. Az RMSE értékek 10.0 - 11.3 között alakultak. Az ezek közül választott verzió a léghő (Ta) és besugárzás ($SWin$) bemeneteli adatok verziója, amelynek RMSE = 11.1 tó mm a hibáértéke (34. ábra). Igaz, szigorúan nézve a léghő (Ta) és telítési hiány (Δe) verziója adta a legkisebb RMSE-t, azonban a hiszterézis megmutatkozása és a besugárzás várható növekedése miatt egy olyan képletet szükséges megalkotni, ami követni tudja a besugárzások hatására képződő párolgás időszakos jellegét és jövőbeli változását.



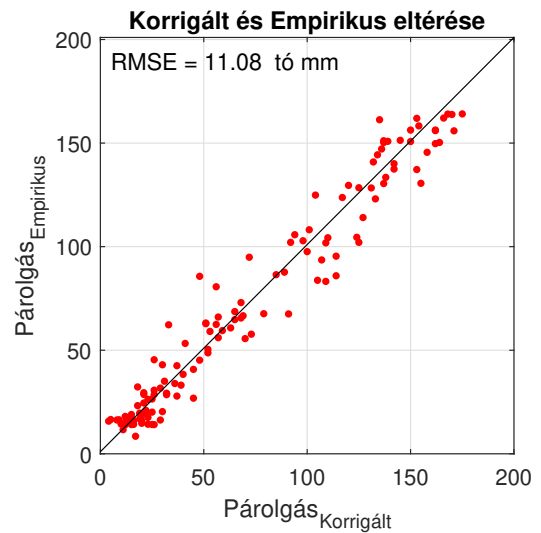
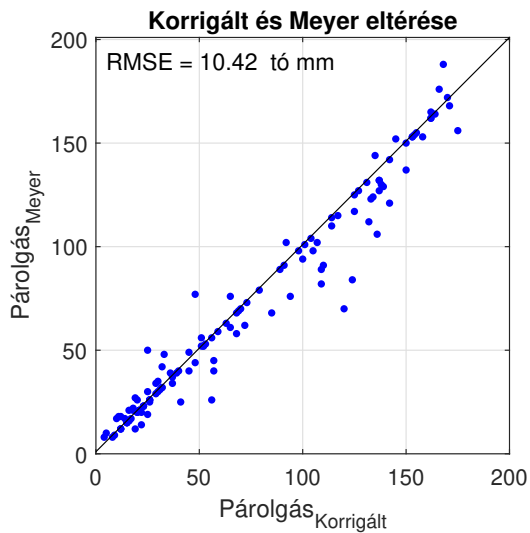
34. ábra 2 változós empirikus képlet eltérése: *Ta* és *SWin*
 zöld jelölő: melegedési periódus, narancs jelölő: hűlési periódus

Az új empirikus képlet alakja ezek által:

$$P_{empirikus,tavaszi} = 14.08 + 0.15 \cdot Ta^{1.56} \cdot SWin^{0.35}$$

$$P_{empirikus,ősz} = 6.25 + 0.18 \cdot Ta^{0.40} \cdot SWin$$

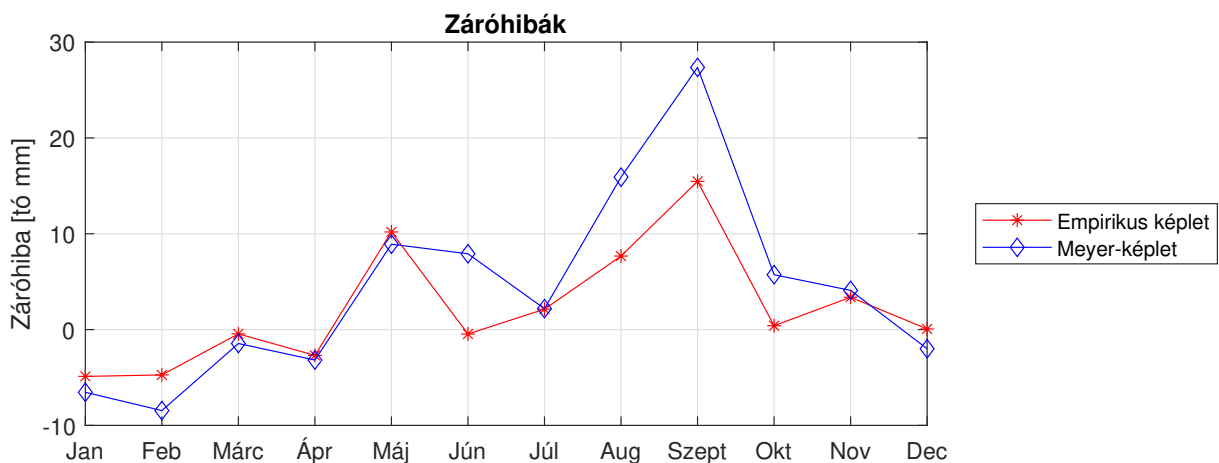
Az összehasonlítás végett ábrázoltam a Meyer-képlet és az új empirikus képlet eltérését a korrigálthoz képest (35. ábra). A Meyer-képlet érhető módon jobb egyezést mutat a korrigált időssorral, hiszen a korrigált idősor a Meyer-képletből származik. Azonban az új empirikus képlet mindössze 0.66 tó mm-rel tesz rosszabb becslést, mint a Meyer, és ez a különbség egy Balaton méretű tónál tulajdonképpen jelentéktelen.



35. ábra Meyer képlet és Empirikus képlet összehasonlítása

Továbbá ábrázoltam még a két párolgás-számítás eredményével kapott, elosztandó záróhibák havi átlagát az elmúlt tíz évre (36. ábra). A záróhibák éves átlaga a Meyer-képlet felhasználásával 7.81 tó mm, az új empirikus összefüggés alkalmazásával pedig 4.38 tó mm.

Elmondhatjuk, hogy az újonnan levezetett empirikus összefüggés számottevően kisebb záróhibákat eredményez. A záróhibában korábban megjelenő periodikus hiba érdemben lecsökkent, jóllehet valamelyest továbbra is fennáll.



36. ábra Meyer vs Empirikus: záróhibák

4. Diskusszió és Következtetések

A dolgozatban megvizsgáltam a Balaton vízkészlet elemeinek és meteorológiai meghajtó folyamatainak változásait az elmúlt 40 év mérési adatain keresztül, amelyek alapján már jól megmutatkoznak az éghajlatváltozás eddig lezajlott hatásai. A trendelemzések rámutattak, hogy a Balaton természetes vízkészletváltozása, ha nem is szignifikánsan ugyan, de csökkenő trendet mutat. Ennek legfőbb oka a hozzáfolyás által biztosított vízkészlet lecsökkenése, mely erős csökkenést mutat, ami jelenleg is folytatódik. A hozzáfolyás csökkenésével párhuzamosan azonban a tó teljes vízkészlete jelentősen kisebb mértékben csökken. Ennek alapvetően két oka van. Egyrészt az éves tóra hulló csapadékmennyiség kis mértékben ugyan, de növekszik. Másrészt pedig – meglepő módon – a párolgás éves szinten csökkenő tendenciát mutat az elmúlt négy évtized vízmérleg adatai alapján, ami kompenzálja a csökkenő hozzáfolyás hatását.

A trendvizsgálattal párhuzamosan végzett fordulópont vizsgálat kimutatta, hogy a vízkészlet elemekben nem történt ugrásszerű változás, a csökkenő és növekvő tendenciát mutató jelenségek folyamatosan zajlanak le. A vízkészlettel párhuzamosan a tó vízszintje mindazonáltal nem csökkent. A 2000-es évek elején tapasztalt aszályos időszak rendkívül alacsony vízszinteket eredményezett, azonban az ezt követő csapadékos évek újra pozitív tartományba mozdították a természetes vízkészletváltozást, és ez által a tó vízszintje visszatért a korábbi évek szintjére. Az elemzés szerint tehát ez a pár év aszályos időszak természetes folyamatnak mondható. A fordulópont elemzés rámutatott arra is, hogy a tó vízszintjének tekintetében a tó új állapotba került 2015-től, ami a mesterséges vízszint-szabályozásnak köszönhető. 2015-től az új felső szabályozási szint 120 cm-re emelkedett. Ennek hatása a többi vízkészlet komponensre természetesen nem hat vissza, viszont nagyban megváltoztatta a tó más jellemzőit, többek közt a tó hőmérsékleti szerkezetét (Torma, 2021).

Az emelt vízszintnek köszönhetően a nyári időszakban megnövekedett azon időszakok száma és hossza, amikor a tó vízoszlopa rétegződik, vagyis a felszín és meder közeli vízhőmérsékletek számottevően eltérnek. Ennek számos hatása van a tó ökológiai állapotára (Torma, 2021). Ezt a rétegződésre való hajlamot tovább erősíti a vízhőmérséklet emelkedése, amely jól láthatóan azonos ütemben zajlik a légköri melegedéssel. Emellett elmondható, hogy a vizsgálatok alapján az éghajlatváltozás hatása nemcsak a léghőmérséklet emelkedésében jelenik meg, hanem a növekvő tavaszi és nyári besugárzás értékekben is. Ez annak köszönhető, hogy megváltoznak a felhőborítottsági viszonyok ezekben a hónapokban.

A léghőmérséklet és besugárzás emelkedése mellett jelentős növekedést mutat a szélesebség is. Mindhárom folyamat elősegíti a párolgást, azonban mind ezek ellenére a párolgás éves szinten csökkenő tendenciát mutat. A csökkenő tendenciáért az őszi végi és téli eleji hónapok felelnek, míg a nyári hónapokban, ha nem szignifikánsan ugyan, de megjelenik egy közepesen erős növekvő tendencia. Ezt fontos figyelembe venni a vízszint-szabályozási stratégiák kidolgozásakor. A Balaton esetében, miután lefolyástalan tó, a legfontosabb vízkészletet csökkentő tényező a párolgás, értéke 900 tó mm körüli. A teljes tó párolgás közvetlenül nehezen mérhető és sok bizonytalansággal terhelt. A párolgást jelenleg a Meyer-féle képlettel becsülik, majd pedig a vízmérlegszámítás során jelentkező záróhibákkal korrigálják. Az elmúlt tíz év záróhibáinak vizsgálata rámutatott, hogy a Meyer-képlet szisztematikus hibát eredményez. A téli végi és tavaszi eleji hónapokban az összefüggés felülbecsli, míg májustól novemberig alulbecsli az elfogadott párolgásértékeket.

Ennek a problémának a feloldására egy egyszerű, új empirikus párolgásképletet vezettem

le. Első lépésben megvizsgáltam melyek a legfontosabb meteorológiai változók, amelyek a párolgás alakulásáért felelnek havi léptékben. A korrelációanalízis rámutatott, hogy havi léptékben a szélsébség nem meghatározó, így nem szükséges bevonni a számításokba. A léghőmérséklet és nedvességtartalom mellett a párolgás szoros kapcsolatot mutatott a besugárzással a vártnak megfelelően. A sekély Balaton esetében ez a kapcsolat hiszterézis jellegű. A melegedési periódusban a párolgás és a besugárzás közötti kapcsolat hatványfüggvénnyel közelíthető, míg a hűlési ciklusban jó közelítéssel lineáris a kapcsolat. Ezért az új empirikus függvényt is szétbontottam két időszakra. A rendelkezésre álló 10 évnyi záróhiba-idősor alapján azt találtuk, hogy mind a záróhibák átlagos havi értékei, mind a szisztematikusan jelentkező hiba számottevően lecsökkentek. A kapott új empirikus eljárásban mindösszesen a besugárzás és a léghőmérséklet havi középértéke szerepel. Fontos látni, hogy pont ez a két változó mutat jelentős változást az éghajlatváltozás hatására, ezért a felállított új és egyszerű modellel lehetőségünk van a jövőbeli várható változások kvantitatív becslésére is. A jelenleg használt Meyer-képletben a sugárzás nem jelenik meg. Végezetül megemlítem, hogy a számítás egyszerűségének nagy előnye, hogy nem igényli a tóban tározott hőmennyiség becslését, amelyet a már jól bevált módszerek (pl. Priestley-Taylor egyenlet) igényelnek. Ehhez szükséges lenne számítani a tó átlagos hőmérsékletének megváltozását, ezért az új függvény különösen a jövőre vonatkozó előrejelzések esetében válik praktikussá.

5. Köszönetnyilvánítás

Ez a kutatás nem valósulhatott volna meg biztos mérési adatok nélkül, ennélfogva köszönetemet szeretném kifejezni a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóságnak, hogy rendelkezésemre bocsátották a Balaton 41 éves vízmérlegkomponenseinek és meteorológiai idősorainak adatbázisát.

6. Hivatkozások

- BLÖSCHL, GÜNTER, SIVAPALAN, MURUGESU, WAGENER, THORSTEN, VIGLIONE, ALBERTO, & SAVENIJE, HUBERT (eds). 2013. *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. New York: Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CB09781139235761>.
- C3S, COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. 2020. C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service. 2021.04.20. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- CHOLNOKY, JENŐ. 1918. *A Balaton és környékének fizikai földrajza*. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei, vol. 1. Budapest: Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága.
- DOMBI, GÁBOR, FEKETE, KÁROLY, OLÁH, MIKLÓS, & KULICS, BEATRIX (eds). 2021. *A Balaton Kiemelt Üdülőkörzet 2020. évre vonatkozó területi monitoring jelentése*. Balaton Fejlesztési Tanács, Balatonfüred, Siófok.
- FOKEN, THOMAS. 2008. *Micrometeorology*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- HORVÁTH, JÓZSEF (ed). 2011 (Január). *A Balaton Kiemelt Üdülőkörzet társadalma és gazdasága*. Központi Statisztikai Hivatal.
- KONTUR, ISTVÁN, KORIS, KÁLMÁN, & WINTER, JÁNOS. 2003. *Hidrológiai Számítások*. Gödöllő: Linograf Kft.
- KORIS, KÁLMÁN. 2014. *Hidrológia II. Műszaki hidrológia*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- NAGY, SÁNDOR ALEX. 2013. *Hidroökológia*. Debrecen: Debreceni Egyetem.
- RODIONOV, SERGEI N. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, **31**.
- SOMLYÓDY, LÁSZLÓ, & HONTI, MÁRK. 2005. The case of Lake Balaton: how can we exercise precaution? *Water Science & Technology*, **52**(6).
- SOMLYÓDY, LÁSZLÓ, & HONTI, MÁRK. 2009. Stochastic water balance simulation for Lake Balaton (Hungary) under climatic pressure. *Water Science & Technology*.
- TORMA, PÉTER. 2021 (október). A Balaton hőmérsékleti rétegződésének becsült változásai az elmúlt 40 évben. In: *LXII. Hidrobiológus Napok*.
- VARGA, GYÖRGY. 2005. A Balaton vízháztartási viszonyainak vizsgálata. *Vízügyi Közlemények*, **87**.