

A FERTŐ TÓ ÉS VÍZGYŰJTŐJÉNEK PÁROLGÁSTÉRKÉPEZÉSE MODIS MŰHOLDKÉPEK SEGÍTSÉGÉVEL

Készítették: Baros Tímea
Szabó Brigitta
Zsoldos Ádám
Konzulensek: Dr. Szilágyi József
Dr. Kovács Ákos

**Tudományos Diákkör Konferencia
Budapest, 2011. november 16.**

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk támogatásukért konzulenseinknek: Dr. Szilágyi Józsefnek és Dr. Kovács Ákos Domonkosnak.

Továbbá nagyon köszönjük az adatszolgáltatást Szépszó Gabriellának, az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) munkatársának, Dr. Clement Adrienne-nek a Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszékről, valamint Sütő Lászlónak, az Észak-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság (ÉDUKÖVÍZIG) munkatársának.

TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	1
TARTALOMJEGYZÉK	2
ÖSSZEFOGLALÁS	4
SUMMARY (IN ENGLISH)	5
1. BEVEZETÉS	8
2. A FERTŐ TÓ	10
2.1. Földrajzi helyzete	10
2.2. Kialakulása	11
2.2. A tó típusa és éghajlata	11
3. PÁROLGÁSBECSLŐ MÓDSZEREK	13
3.1. Vízmérlegből számított párolgás	13
3.2. Meyer-eljárás, hagyományos módszer	13
3.3. Párolgásmérő kádak	13
3.4. A „Bowen-hányados” módszer	14
3.5. Automata meteorológia állomások (AWS)	14
3.6. Légörvény-korrelációs módszer	15
4. PÁROLGÁSKÉPLETEK	16
4.1. Adatgyűjtés a Fertő tavon	16
4.2. Mérési és számítási módszerek	16
4.2.1. A kutatás során felhasznált képletek	17
4.2.2. További képletek	18
5. A FERTŐ TÓ PÁROLGÁSANALÍZISE	21
5.1. Meteorológiai jellemzők	21
5.1.1. Napfénytartam	21
5.1.2. Albedó	22
5.1.3. Csapadék	23
5.1.4. Szél	24
5.1.5. Léghőmérséklet	25
5.1.6. Vízhőmérséklet	25
5.2. Hidrológiai jellemzők	26
5.2.1. Fertő tó vízjárása	26
5.2.2. Vízháztartás	26
5.3. Adatgyűjtés és feldolgozás	28
5.3.1. MODIS műholdképek	28
5.3.1.1. Felszíni hőmérsékletek	28
5.3.1.2. Albedó	33
5.3.2. Hidrometeorológiai adatok	38

5.3.3. Számítások összefoglalása.....	39
5.3.3.1. Empirikus képletek.....	39
5.3.3.2. Morton párolgásbecslése.....	40
5.3.3.3. Lineáris transzformáció.....	41
5.3.3.4. Korrelációs számítás.....	42
5.3.3.5. Érzékenységvizsgálat.....	43
5.4. Eredmények kiértékelése, elemzése.....	44
KONKLÚZIÓ ÉS JÖVŐBELI KITEKINTÉS.....	51
IRODALOMJEGYZÉK.....	53

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt évek során szélsőséges eseményeket figyelhattunk meg időjárásunkban, melynek hatásai tavainkon is érezhető. Egyes időszakok túlzottan csapadékosak, ilyenkor árvizek jelentkezhetnek, ugyanott egy szárazabb időszakban vízpótlás kérdése merülhet fel. Ilyen volt a 2000-es évek elején, amikor is négy egymást követő évben jelentősen csökkent a Balaton vízszintje.

Kutatásunk fő témája a Fertő tó és vízgyűjtője párolgásának meghatározása. A tó vízszintje igen változó, ugyanis az utóbbi évszázadokban többször is kiszáradt. A szélsőséges vízrajzi események az elvégzett vízszintszabályozást követően nem ismétlődtek meg, de hosszabban tartó aszályos évek során a Fertő tó vízszintje ismét alacsony szintre süllyedhet.

A kutatást döntő részét a tó párolgása adja, de kitekintést adunk a területi párolgásra is. Külön figyelembe vesszük a nád párolgását, mikor is a nádas tórész evapotranspirációját viszonyítjuk a nyílt vízfelszín párolgásához. A kutatás folytatása során az eredmények felhasználásával lehetőség nyílik a náddal borított terület esetleges csökkentésével vagy növelésével a tó vízszintjének stabilizálására is.

A vizsgálat időintervalluma 2000-2010. A kiindulási adatokat a NASA 2000-ben pályára állított műholdjai biztosították: 8 napos felszíni hőmérsékleteket, illetve 16 napos 1x1 km-es felbontású albedó értékeket. Mindkét adathalmazt havi szintre átlagoltuk, melyhez több szakmai program is segítségünkre volt, többek közt a ModisTool, HEG Standalone, ArcGIS, és a Matlab. Tó párolgás esetében a cellákat típus szerint felosztottuk, így három kategóriát határoztunk meg: sekély vízi területek (part menti vizek), mély vízi területek (nyílt vízfelszín), illetve nádassal borított területek.

A párolgászámításhoz további adatokra is szükségünk volt, mint például a vízhőmérséklet, léghőmérséklet, szélesebbesség, páratartalom, melyeket az Észak-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóságtól (ÉDUKÖVÍZIG) illetve az Országos Meteorológiai Szolgálatától (OMSZ) szereztünk be.

Számításaink során olyan módszereket alkalmaztunk, mint az empirikus párolgásképletek (Neuwirth illetve Kozmáné féle módszerek), Morton WREVP programja, továbbá a lineáris transzformáció.

Célunk a nádas, a tó és az azt körülvevő területek párolgásának összevetése volt, a felszíni hőmérsékletek és albedók figyelembevételével. Ezek meghatározása után, az értékek havi, éves, illetve 11 éves átlagát vizsgáltuk. A klímaadatok és a párolgásértékek összefüggésének vizsgálatához korrelációt végeztünk éves és havi szinten is.

Kutatásunk fontossága és egyedisége a párolgásanalízis műholdas mérési eredmények alapján történő vizsgálatában rejlik, mely a jövőben több hidrológiai, meteorológiai, illetve gazdasági témakörben is hasznos újításokat hozhat.

Az alkalmazott párolgásbecslő módszerek a nádas evapotranspirációjának tófelszínre gyakorolt párolgásalakító hatásának további vizsgálatára adnának lehetőséget, mely a tavak vízjárás-alakulásának befolyásolását segítheti elő a tavak védelmének érdekében. A párolgásbecslés tanulmányozása során alkalmazott eljárások alapjai lehetnek további, akár műholdképek adataira épülő képlet, valamint párolgás-előrejelző módszer kidolgozásának. A felhasznált eljárások közül Morton WREVP programján alapuló párolgásbecslés adódott a legmegbízhatóbbnak a nyílt vízfelszíni párolgás meghatározására, mindemellett a többi módszer is lehetőséget biztosít a párolgásbecslések további pontosítására.

SUMMARY

The past few years have seen some periods of severe weather conditions, leaving a mark, among others, on our lakes. A considerably wet season can result in floods, while a drought often requires compensation for water loss. The early 2000s was an example of the latter when the level of Lake Balaton dropped significantly.

The subject of our research is Lake Fertő and the quantification of the level of evaporation in its catchment area. Lake Fertő is a climate-prone shallow lake having been dried up several times over the past centuries. After water level controls have been installed, extreme hydrological events did not replicate in the catchment. However, due to the long lasting drought years in the past decade, it has reached a low level yet again.

The focus of our research was divided into two areas: lake and regional evaporation. Special attention was given to reed evaporation: comparing evapotranspiration of the reed-covered areas to that of open water. More specifically, whether the annual evapotranspiration rate in reed-covered areas is higher than the evaporation of open water surface. Findings give insight into stabilization of the lake level through the potential decrease or increase of reed-covered lake regions.

Data collection took place between 2000 and 2010. Baseline data were provided by NASA's Earth observation satellites sent to orbit in 2000, namely ~1x1 km resolution 8-day-composited surface temperatures and 16-day-composited albedo values. Among others, we used ModisTool, HEG Standalone, ArcGIS and MatLab to derive areal and temporal averages. Three types of evaporation were calculated: shallow water areas, deep water areas and reed-covered areas.

We utilized additional data for evaporation calculations, such as water temperature, air temperature, wind velocity, and humidity. These were provided by the North Trans-Danubian Environmental and Water Directorate (Észak-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóságtól; ÉDUKÖVÍZIG) and the Hungarian Meteorological Service (Országos Meteorológiai Szolgálat; OMSZ).

Calculations were based on empirical evaporation formulae, such as that of Neuwirth, Kozmáné, by Morton's WREVP model (Morton, 1985) and by a linear transformation of surface temperatures into evapotranspiration rates.

We compared the evaporation of reed-covered areas, water surface and surrounding areas, controlling for surface temperature and albedo. Monthly and annual averages as well as multi-year (11 years) averages were examined. Furthermore, monthly and yearly climate data and evaporation values were correlated among themselves.

The importance and uniqueness of our research is in the satellite-measurements-based evaporation analysis, which is likely to have a positive impact on future developments in hydrological, meteorological and economical areas.

ETo estimation methods can also provide a basis for the development of a satellite image based formula as well as evaporation forecasting methods.

The applied evapotranspiration (ETo) estimation methods could provide further opportunities to examine the effect of reed ETo on open water evaporation, which, in turn, could aid lake level management and the protection of lakes.

Morton's WREVAP program has proven the most reliable method of determining open water evaporation, while the other methods can help refine these evaporation estimates.

1. BEVEZETÉS

A hidrológiai körfolyamat egyik legfontosabb eleme a párolgás, ugyanis a tóra lehullott csapadékok legnagyobb része elpárolog. Nagy energiát felemésztő fizikai jelenségről van szó, melyet a klímaváltozás és a területhasználat jelentősen befolyásol. A hidrológiai, és klimatikus előrejelzések pontosításához szükséges a párolgásnak a vízmérleg többi elemétől független becslése.

Nemrégiben ismét előtérbe került Bouchet komplementáris elmélete (1963). Ennek az az előnye, hogy a becsült párolgáshoz csupán meteorológiai adatok szükségesek.

Ezt fejlesztette tovább Morton, és létrehozta a saját párolgásbecslő modelljét (1985), a WREVP programot. Ennek segítségével a Föld bármely pontjára lehet becslést adni, a tó és területi párolgás tekintetében egyaránt. Ezek jó közelítést nyújtanak a magyarországi területekre is, így kutatásunk során nagymértékben felhasználtuk a programot.

A területi párolgás becslése bonyolult, melyre ugyan több módszer is létezik, azonban a talaj és a növényzeti információk beszerzése hosszadalmas illetve drága folyamat. Azonban az ezredforduló elején a NASA két műholdat állított földkörüli pályára, a TERRA-t és az AQUA-t.

A két műhold új távlatokat nyitott a hidrológiában, hiszen olyan változókat mérnek, melyekről eddig nem, vagy csak korlátozott mértékben voltak információink. Ezek a mérési eredmények (mint például az albedó, vagy felszíni hőmérséklet értékek) tökéletesen alkalmazhatók a párolgásbecslésben is. A felszíni hőmérsékletek ismerete jelentős előrelépéseket jelenthet a hidrológiában, ugyanis az evapotranspiráció révén a talaj nedvességtartalma befolyásolja a felszín hőmérsékletét. Így pedig a mért felszíni hőmérsékletekből közvetett adatokat kaphatunk a nedvességtartamról is.

A műholdas mérések a Föld minden pontjára kiterjednek, nagy térbeli és időbeli felbontásúak, ami a paramétertől függően akár pár száz méteres, napi többszöri mérést is jelenthet.

Mivel a kutatásunk fő témája a párolgás, továbbá a hidrológiában a vízmérlegek felállításánál a minimális lépték a havi szint, ezért mi 1 km-es felbontást választottunk. Ennek részleteit a kutatás során pontosítjuk. Úgy gondoljuk, ezek a műholdas mérési eredmények lehetőséget nyújtanak a párolgásszámítás pontosítására is, melyeket a számítási eredményeink is alátámasztanak.

Napjainkban még jelentősebb szerepet tulajdoníthatunk a párolgás pontosításának, ugyanis a klíma változékonysága miatt sok helyen csapadékbővség okozta árvizek pusztítanak, máskor ugyanott pedig az aszály okoz gondot. Vegyük példaként a 2000-es évek elejét, amikor is egymást követő négy évben csökkent a Balaton átlagos vízszintje, és felmerült a vízutánpótlás kérdése.

Hasonlóan aggasztónak tűnt a helyzet a Fertő tavon, ahol 2006-ban vitorlás Világjátékokat rendeztek volna, de nem tudták megfelelően megbecsülni, hogy lesz-e elegendő víz a tóban.

Végül a verseny megrendezésre került, de nem feledkezhetünk meg arról a tényről, hogy a megfelelő előrebecslő módszerek sok fölösleges költségtől kímélhetnek meg több ágazatot is, úgy, mint a gazdaságot vagy a turizmust.

2. A FERTŐ TÓ

2.1. Földrajzi helyzete

A Fertő tó Ausztria és Magyarország területén helyezkedik el, 309 km²-es összfelületéből 71 km² tartozik Magyarországhoz, a tó 88,5%-a osztrák részre esik.

Területének több mint felét nádas borítja. Két nagyobb geológiai egység, az Alpok és a Pannon-medencéhez tartozó Kisalföld találkozásánál fekszik. Észak-déli kiterjedése 36 km, míg szélessége 6-12 km között változik.

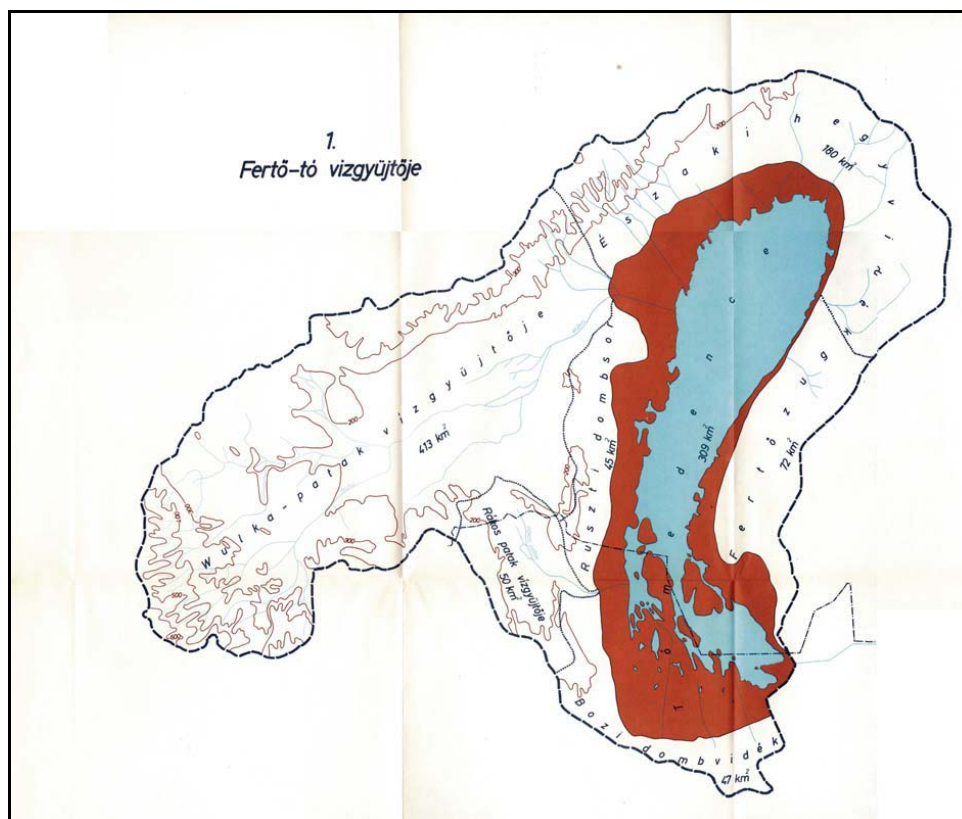
A tó teljes vízgyűjtőjének területe 1383 km², mely az Alpok keleti nyúlványaira (Rozália-, Soproni- és Lajta-hegység), a Fertőzugra és a Hanság nyugati részére terjed ki. Az átlagos mélysége 1,1 méter, tehát sekély vizű tó.



1. ábra: A Fertő tó

Vízszintje az elmúlt években megfelelően szabályozhatóvá vált. A tavat tápláló két legnagyobb vízfolyás a Wulka és a Rákos-patak, de rajtuk kívül néhány időszakos vízfolyás is

táplálja a tavat, és nem elhanyagolható a felszín alatti hozzáfolyás sem. A tó felesleges vizét a Hansági-főcsatorna vezeti le a Mekszikópusztai zsilipen keresztül [XII.].



2. ábra: A Fertő tó vízgűjtője

2.2 Kialakulása

A Fertő (vagy Fertő tó) a kontinentális síkvidéki sós ún. sztyepptavak legnyugatibb képviselője, kora kb. 15-20 000 év. A Fertő és a Hanság medence elkülönülését a pleisztocéntól lehet kimutatni. A szerkezeti, illetve topográfiai tagolódás után a Hanságot számos folyó és patak – köztük a Rába, Ikva Répce, stb. – valamint a mosoni síkságról lefolyó vizek táplálták. A környező területeknél alacsonyabban fekvő medence a vízfolyások által szállított hordalék és az elláposodás következtében zárt lefolyástalan területté vált.

A történelem során többször kiszáradt, legutóbb az 1868-1872 közötti években. A XX. század első harmadában a tó és a vele vízrajzilag összefüggő Hanság lecsapolása és szabályozása miatt a tópart mentén, főleg a déli oldalon gyors ütemben elnádásodott. Ez a folyamat mára jelentősen lelassult, de nem állt meg.

2.3 A tó típusa és éghajlata

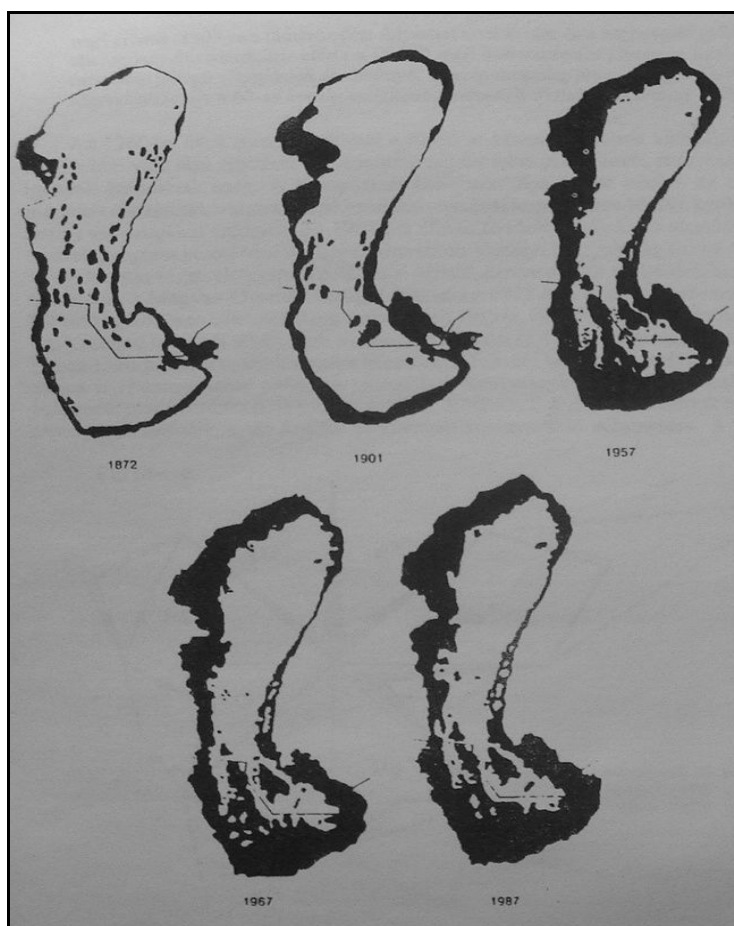
A mérsékelt, ill. nedves éghajlatú övek a nyitott, lefolyásos állóvizek jellemzőek, míg a zárt lefolyástalan tavak a sztyeppék, puszták kísérői és ritkán fordulnak elő a közép-európai térségben. A Fertő tó pedig a legnagyobb és legnyugatibb ilyen zárt, sztyepp tó.

A tavon három különböző éghajlati hatás érvényesül: keletről a kontinentális, délről a földközi tengeri és nyugatról az óceáni. Ezek közül a legerősebb befolyásoló hatása az Alpok miatti mérsékelt hatású óceáni áramlatoknak van.

Térségének évi átlagos középhőmérséklete 10°C. A tó közvetlen közelében a vízfelület hőmérsékletkiegyenlítő hatása érvényesül, miközben a Tózug keleti részén erősebb a kontinentális hatás.

A Fertő-vidék az ország más részeihez képest rendkívül szeles. Az uralkodó szél az északnyugati, ami a Pozsony és Sopron közötti kapun tör be. A szabad vízfelszín feletti szélsőségek általában jóval nagyobbak a parton mért értékeknél, így a tó sekély vizének mozgását a szélviszonyok igen erősen befolyásolják. A tó vízszintje kilendül és tartós erős északnyugati szélnél a déli rész vízszintje 0,50-0,60 m-rel magasabb, mint az északi részen.

A tó térségében az átlagos évi csapadékösszeg 500-700 mm.



3. ábra: A nádas terjeszkedése (1872,1901,'57,'67,'87) - [XI]

Érdekességgént megjegyzendő, hogy Európa legkiválóbb minőségű tetőfedő anyaga a Fertő-tavi nád. Németországban, Dániában, Hollandiában rendkívül keresett a fertői nád, melyről bebizonyosodott, hogy a tetőfedésre legalkalmasabb nádfajta [V.]. Akár 30 éven keresztül is állja az időjárás viszontagságait, míg a máshol termett anyagból kialakított nádtetőket általában 15 év után cserélni kell. A Fertő tavi nádat a tó sóartalma teszi erőssé.

3. PÁROLGÁSBECSLŐ MÓDSZEREK

Definíciók:

Potenciális (E_0 , E_p) párolgás: azt mutatja meg, hogy mekkora lenne a párolgása egy olyan vízszintes, nagy (E_0 esetén) vagy kisebb méretű felületnek, ami soha nem szárad ki, mindig elegendő mennyiségű víz áll rendelkezésre.

Aktuális (E_a): tényleges párolgás.

A következők szerint osztályozzuk a párolgásbecslő módszereket [VI.]:

3.1. Vízmérlegből számított párolgás

$$C + H = E + F + \Delta K \quad (1)$$

ahol: C - csapadék

H - felszíni és felszín alatti hozzáfolyás

E - párolgás

F - elfolyás, szivárgás, vízkivétel

ΔK - vízkészlet változás

A módszer hátránya, hogy a felszín alatti hozzá- és elfolyások nehezen becsülhetők, valamint a szivárgás nehezen meghatározható. A probléma úgy oldható meg, ha a hajnali órák vízszintváltozását vesszük figyelembe, és ebből állapítjuk meg a szivárgást.

3.2. Meyer-eljárás, hagyományos módszer

$$E = a[e_s(t') - e_a](1 + bw) \left[\frac{\text{mm}}{\text{hónap}} \right] \quad (2)$$

ahol: e_s [g/m³] - a levegő telítési páratartalma közvetlenül a vízfelszín felett, amelyet a havi közepes vízhőmérséklet (t') alapján határoznak meg.

e_a [g/m³] - a vízfelszín feletti levegő tényleges vagy abszolút nedvességtartalmának havi középértéke

w [m/s] - havi közepes szélesség

a, b - állandók (itt vesszük figyelembe a szélességet)

3.3. Párolgásmérő kádak

A párolgásmérő kádaknak több fajtája létezik. Lehet a talajfelszín felett, és a talajba süllyesztve. Az elpárolgott vizet naponta mérik. Ezek a módszerek azonban pontatlanok, mert a modellezettől eltérő hőmérsékleti és aerodinamikai viszonyok alakulnak ki, hiányos a

karbantartás, valamint állati beavatkozás is zavarhatja a mérést. A talajba süllyesztett kádaknál a hőcsere a talaj és a kádban lévő víz között a többszöröse lehet a valós viszonyoknak.

- A pontatlan mérés okai:
- az edény és a víz szennyezett lehet
 - egyéb vízbevételek (eső, beloccsanás, stb.)
 - egyéb vízkivételek (állatok ivóvíznek használják, kiloccsanás)
 - hullámhatások, pl. szeles körülmények között
 - hőátadás a talajnak
 - emberek jelenléte (csökkenti a szellőzést és a sugárzást)
 - árnyékoló hatások
 - aerodinamikai változások a kád oldalán illetve pereménél

Egyes hatásokat nem lehet megszüntetni, van, amelyiket pedig csak csökkenteni tudjuk.

3.4. A „Bowen-hányados” módszer (energia elkülönítési módszer)

Energia-háztartás mérleg:

$$R_n - G - H - \lambda E = 0 \quad (3)$$

- ahol:
- R_n - nettó beérkező sugárzás
 - G - a föld által elnyelt sugárzás-fluxus
 - H - érzékelhető sugárzás-fluxus (hő)
 - λE - látens sugárzás-fluxus

Az egyenlet átrendezés után:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta}$$

ahol β – Bowen-hányados (az érezhető és látens sugárzás Bowen-hányadosa)

A Bowen-készülékkel β közvetlenül mérhető.

A készülék egyidejűleg méri a páratartalmat és a hőmérsékletet a felület fölött, két, kissé eltérő magasságú pontban. A készülék elhelyezésénél rendelkezünk kell a szükséges meghajtási hosszal. A Bowen-hányadost a hőmérséklet, valamint a páratartalom különbségekkkel lehet összefüggésbe hozni.

3.5. Automata meteorológiai állomások (AWS) (röviden)

A változékony és szélsőséges időjárással rendelkező területen elterjedtek a PC-hez csatlakoztatható meteorológiai állomások, melyek pillanatnyi potenciális párolgást számolnak a sugárzás, a szélesebbesség és a páratartalom alapján.

Az AWS használatához szükségünk van egy minimális meghajtási hosszra, ami 150 m, ezt úgy kapjuk meg, hogy a hossz a parttól mérve 100-szorosa legyen a műszer magasságának (a műszer magassága 1,5 m).

Az AWS tehát csak akkor alkalmazható, ha:

- elegendő nagyságú felület áll rendelkezésünkre
- a műszer a vízfelület uralkodó széliránnyal szembeni oldalán van
- ha nem elég nagy a felület, és nincs elegendő meghajtási hossz a műszer minden oldalán, akkor oly módon tudunk mérni, hogy a tó minden oldalára helyezzünk egy műszert, hogy bármilyen irányú szelet tudjunk mérni.

Az AWS használatát korlátozó tényezők:

- sugárzás mérése
- napenergia behatolásának szöge
- felület hullámozása
- tározó oldalainál fellépő aerodinamikus hatások

3.6. Légörvény-korrelációs módszer (röviden)

A vízpára molekulák felfele áramló mozgását méri.

A módszer a hőmérsékletnek, a légáramlás sebességének és a páratartalom ingadozásának pontos mérésétől függ. Ha a pillanatnyi páratartalmat és a légmozgás sebességét ismétlésszerűen mérjük nagy időbeli felbontással, akkor statisztikai korrelációmódszereket tudunk használni a párolgási fluxus levezetésére. Ezen értékek összeadásával kapjuk meg a napi párolgás értékét.

4. PÁROLGÁSKÉPLETEK

4.1. Adatgyűjtés a Fertő tavon

Az Észak-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság (továbbiakban ÉDUKÖVÍZIG) – korábbi nevén Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság – az 1960-as évek végétől végez hidrometeorológiai méréseket a Fertő tavon, illetve annak közvetlen környezetében. Négy meteorológiai megfigyelőállomást telepítettek a térségbe az Országos Meteorológiai Szolgálat (továbbiakban OMSZ) segítségével és szakmai irányításával – egyet-egyet Fertőújlak és Fertődoboz, kettőt pedig Fertőrákos térségében [XIV.].

Az állomásokon 1969 közepétől, ill. végétől vannak rendszeres megfigyelések, ezért folyamatos teljes éves adatsorok az 1970. évtől elérhetőek.

Az ÉDUKÖVÍZIG az 1970-es évek második felében egy kutató és megfigyelő bázist telepített a fertőrákosi térségbe (jelenleg Fertő tavi Hidrometeorológiai Állomás). Ezen állomás legfőbb feladatai közé tartozik a már létező megfigyelőállomások munkájának koordinálása, adatainak begyűjtése, feldolgozása és tárolása, valamint a Fertő tó vízminőségének rendszeres, folyamatos, üzemszerű vizsgálata.

4.2. Mérési és számítási módszerek

A tavak, tározók párolgásveszteségének meghatározása közvetlen és közvetett módon lehetséges.

Közvetlen módszert jelent az ún. úszó párolgásmérőkkel történő mérések. Ezekkel a tóban úszó, jó hővezető képességű anyagból (vaslemezből) készült berendezésekkel, ha azok reprezentatív környezetben működnek, valóban megközelíthetjük a naponkénti párolgás értékét. A folyamatos adatgyűjtés azonban mivel a be- és kifröccsenő víz mennyiségét nem ismerjük, ezért ezzel a módszerrel nem biztosítható (legalábbis a Fertő tavon végzett mérés technika mellett). Egy hosszabb periódus során viszont rendelkezésünkre állhat olyan hibával nem terhelt mért párolgási adathalmaz, amely felhasználható a meteorológiai elemekkel történő összefüggés-vizsgálatra, illetve empirikus párolgásszámítási formula kidolgozására.

A párolgás-meghatározás közvetett módszereihez többségükben valamilyen meteorológiai elemegyüttes ismerete szükséges. Csak azokra a módszerekre térünk ki, amelyeket rendszeresen felhasználtak, illetve közvetlenül a Fertő tóra határoztak meg az evaporáció meghatározására.

4.2.1. A kutatás során felhasznált képletek

Az osztrák oldalról Neuwirth [I.] dolgozott ki egy összefüggést a Fertő tó párolgásának számítására egyszerű meteorológiai adatok felhasználásával. Az összefüggésvizsgálatokban az energiaháztartási módszer és az aerodinamikus profil módszer eredményeit használta fel:

$$P = (E_0 - e)(0,13 + 0,0028 \cdot u) \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (4)$$

ahol E_0 = a vízfelszín hőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás [mbar],
 e = a víz fölött 2 m magasságban mért párányomás napi közepe [mbar],
 u = szélesség napi közepe 3 m magasságban, km/h-ban.

Ez a formula is alkalmas havi párolgásösszegek számítására.

A jelenlegi fertő tavi párolgászámításra 1996. szeptember 26-a óta használatos formula – melyet az ÉDUKÖVÍZIG bocsátott a rendelkezésünkre – a Dr. Kozma Ferencné által módosított képlet, ami csak a konstansokban tér el a (12) összefüggéstől:

$$P = (E_0 - e)(0,294 + 0,056 \cdot u) \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (5)$$

ahol E_0 = a vízfelszín napi középhőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás,
 e = a 2 m magasságban mért párányomás napi közepe [mbar],
 u = szélesség napi közepe 13 m magasságban, m/s-ban.

A Fertő tavi nádas evapotranspirációjának mérésére 5 db 4 m² felületű, 1 m mély tenyészedeény szolgált. Az 1973-1980 közötti reprezentatív nádállományban történő adatgyűjtés lehetővé tette a nádkonstansok megállapítását közvetlenül a Fertő tóra. Ezek a következők:

hónapok	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
nádkonstans (b)	1,02	1,11	1,20	1,26	1,21	1,13	1,11

A képlet ugyanaz, mint a vízfelszín evaporációjához használt (12) formula, csak a nádkonstanssal beszorozva:

$$P = b \cdot (E_0 - e)(0,34 + 0,05 \cdot u) \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (6)$$

ahol b = nádkonstans.

4.2.2. További képletek

A kutatási időszak első szakaszában, amikor az „Adatgyűjtemény” számára elkészült a hosszú párolgási adatsor, a szabad vízfelszín evaporációját az Antal (1968) által kidolgozott

$$PE = 0,74(E - e)^{0,7} (1 + \alpha t)^{4,8} \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (7)$$

formulával határozhatjuk meg, ahol

$(E - e)$ = a levegő telítési hiányának napi közepe [mbar],

t = a léghőmérséklet napi közepe [°C],

α = átszámítási tényező (1/273).

A Fertő-tavon végzett hidrometeorológiai kutatások első kétévi eredménye alapján született meg az

$$P = 0,42(E - e)^{0,9} (1 + \alpha t)^9 (1 + 0,015 \cdot u)^2 \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (8)$$

összefüggés, amelynek kidolgozásához az energiaháztartás-mérések szolgáltak alapul. A formulában szereplő jelölések az előbbiekkel azonosak, u pedig a szélesebbesség napi közepe m/s-ban, a Fuess szélíró szintjében. Ez esetben a képletbe a vízfelszín fölött mért értékeket kell behelyettesítenünk.

Energiaháztartás-mérések eredményei alapján is meg lehet határozni egy formulát. Az energiaháztartási módszer az energia-megmaradás törvénye alapján feltételezi, hogy az egységnyi terület energia-bevétele egyenlő a kiadással. A tófelszín energia-bevételének fő forrása a napsugárzás, mely a víz felmelegítésére, valamint a párolgásra fordítódik. Feltételezve, hogy a vízgőz és a hő átvitele a felszínközeli légrétegben azonos törvényszerűségek útján megy végbe, a párolgást jégmentes időszakban az

$$P = \frac{R - Q_{v+t}}{L(1 + \beta)} \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (9)$$

formula adja, ahol

R	= a sugárzási egyenleg,
Q_{v+t}	= a víz és a víz alatti talaj hőforgalma,
L	= a párolgás látens hője,
β	= az ún. Bowen-hányados, értéke a

$$\beta = \gamma \frac{t_0 - t_e}{E_0 - e} \quad (10)$$

képlettel fejezhető ki. Itt

- t_0 = a vízfelszín hőmérséklete,
- t_e = a levegő hőmérséklete,
- E_0 = a vízfelszín hőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás,
- e = a levegő párányomása,
- γ = pszichrometrikus állandó.

Ha ezeket a képletbe a bennük szereplő komponensek havi összegét, illetve közepeit helyettesítjük be, a párolgás havi értékét kapjuk meg mm-ben.

Az „A” típusú kád párolgása, továbbá a kádban és a tóban mért hőmérséklet, valamint az úszópárolgásmérővel mért adatok összevetése alapján, regresszióanalízis eredményeként adódott a következő összefüggés (Kozma és Tóth, 1978):

$$P_F = P_A [0,683 - 0,099(t_A - t_{t_0})] \left[\frac{\text{mm}}{\text{pentád}} \right] \quad (11)$$

ahol

- P_F = a tó,
- P_A = az „A” kád párolgásának pentádösszege,
- t_A = az „A” kád vízhő,
- t_{t_0} = a tó vízhőmérséklet pentádátlag.

Ezzel a formulával csak az „A” kád üzemelésének időszakában, vagyis áprilistól októberig számolható ki a párolgás.

Az évek során az úszó párolgásmérő üzemeltetésével elegendő mennyiségű adat állt rendelkezésre egy egyszerű empirikus összefüggés kidolgozására. 600 mért napi párolgást használtak fel egy Dalton típusú formula előállításához:

$$P = (E_0 - e)(0,34 + 0,05 \cdot u) \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (12)$$

ahol

- E_0 = a vízfelszín napi középhőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás,
- e = a 2 m magasságban mért párányomás napi közepe [mbar],
- u = szélesség napi közepe 13 m magasságban, m/s-ban.

A képletet havi összegek becslésére is alkalmazhatjuk, a meteorológiai elemek havi közepeit figyelembe véve és a hónap napjainak számával szorozva.

A Fertő tó hidrológiai jellemzői című kiadványban a (8) összefüggéstől egyetlen állandóban eltérő képlettel határozták meg a párolgást:

$$P = 0,55(E - e)^{0,9} (1 + \alpha t)^9 (1 + 0,015 \cdot u)^2 \left[\frac{\text{mm}}{\text{nap}} \right] \quad (13)$$

ahol

$(E - e)$ = a tófelszín feletti levegő telítési hiánya,

α = átszámítási tényező (1/273),

u = a tófelszín felett mért szélesebbesség.

Richter egyszerűsített kombinációs módszere:

A nyílt vízfelületek havi összesített párolgásának meghatározására szolgál a Richter által 1984-ben kidolgozott képlet [XVI.]:

$$E_w = (0,327 \cdot (e_s(T_{w_0}) - e) + 0,00055 \cdot R_G - 0,035) \cdot n \left[\frac{\text{mm}}{\text{hónap}} \right] \quad (14)$$

ahol

$e_s(T_{w_0})$ = a vízfelszín hőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás [hPa],

e = a levegő párányomása hPa,

R_G = nettó sugárzás,

n = napok száma a hónapon belül.

5. A FERTŐ TÓ PÁROLGÁSANALÍZISE

5.1. Meteorológiai jellemzők

5.1.1. Napfénytartam

A napfénytartam, tehát a napsütéses órák száma, az az időtartam ameddig a felszínt közvetlen napsugárzás éri. Értékét lényegében három tényező befolyásolja, a csillagászati lehetséges napfénytartam, a domborzati viszonyok és a felhőzet.

Napfénytartam mérést hagyományos Campbell-Stokes-féle napfénytartammérővel végeznek. A Fertőrákos parti állomáson 1970, a fertőújlaki állomásokon 1983-óta.



4. ábra: Campbell-Stokes- féle napfénytartammérő

Magyarországon a napsütéses órák éves összege 1750 és 2050 óra között változik. A napfénytartam az ország déli részén a legmagasabb, míg az Alpoknál és az északkeleti országrészben a legalacsonyabb.

Fertőrákoson a 1970 és 2005 között átlagosan évi 1821 órát sütött a nap, értéke 1406 és 2187 óra között alakult. Az Alpoktól távolodva egyre kevésbé érződik a hegyek árnyékoló hatása, ezt mutatja, hogy a nem egészen 14 km-re távolabb lévő Fertőújlakon egy százalékkal nő a napfényes órák száma, értékük 1717 és 2232 között változik. A különbség főleg a tavasz végén, nyár elején mutatkozik. A legtöbb napsütés mindkét térséget júliusban, a legkevesebb decemberben éri. Legmagasabb értékei egyik állomáson sem érik el a csillagászati lehetséges napfénytartam 50%-át.

5.1.2. Albedó

A felszínre érkező sugárzás egy része visszaverődik. A visszaverődött és beérkező sugárzásnak a hányadosát albedónak nevezzük, értékét százalékban adjuk meg. Egyik legfontosabb tulajdonsága a napmagasságfüggés: magas napállásnál alacsony értéket, míg alacsony napállásnál magas értéket kapunk. Továbbá jelentősen befolyásolja a visszaverődés mértékét a közvetlen és a szórt fény aránya, illetve a felhőzet mennyisége is. A vízfelületi albedó kisebb, mint más természeti anyagoké, mivel a felszínre érkező sugárzás nagy része behatol a vízbe, ott elnyelődik, szétszóródik. (A szétszóródás mértéke a tó mélységétől, szennyezettségétől függ.)

A vízmozgásnak is szerepe van az albedó-értékek alakulásában, mert megváltozik a felszín érdessége, és a víz átláthatósága. Növényborítottság, és jéggel való borítottság szintén befolyásoló tényező.

A téli albedó értékeknél jelentős ingadozás figyelhető meg, ami annak köszönhető, hogy különböző vastagságú jég, illetve hóborítottság is jellemző lehet a felületre. Így akár 20 és 70% között is alakulhatnak az albedó-értékek.

1971-74 közötti mérésekből származik az, miszerint a nádas albedója télen nem olyan magas, mint a sima befagyott vízfelszíné. Áprilisban, mikor az új nád növekedni kezd, az albedó még alig különbözik a szabad vízfelületétől. Később a növényzet fejlődésétől, sűrűségétől függően gyorsan nő, és a maximumát nyáron éri el. Ősszel az állomány fokozatosan összeesik, elszáradnak a levelek és egyre nagyobb szerephez jut az alacsonyabb vízalbedó.

A tó meteorológiai jellemzőinek vizsgálatához ismerendő a hőháztartás alapegyenlet:

$$R - LP - Q_{it} - Q_l = 0 \quad (15)$$

ahol	R	–	a sugárzási egyenleg
	LP	–	a párolgása fordított hő
	Q_{it}	–	a víz és a víz alatti talaj felmelegítésére fordított hő
	Q_l	–	levegő hőforgalma

A Fertő tó sugárzásháztartásának feltárására irányuló méréseket az OMSZ Központi Légtörfizikai Intézete 1969-ben kezdte el, közvetlenül a tó felszíne felett elhelyezett sugárzásmérők működtetésével.

A tó energiabevételét sugárzási egyenlegének nagysága szabja meg, amit a következő formula ír le:

$$R = (1 - A) \cdot G - E_{\text{eff}} \quad (16)$$

ahol G - a rövidhullámú globálisugárzás
 A - a vízfelszín illetve a nádas albedója
 E_{eff} - a felszín hosszuhullámú sugárzástorgalma

Már a 70-es évekbeli mérésekből is azt állapították meg, hogy a tó déli része nyáron valamivel több sugárzást élvez, mint az északi területek. A sugárzási egyenleget leíró formulából az albedó elemzésére térünk még ki. Az albedó értékét a Fertő tó felett közvetlen mérések útján határoztuk meg.

5.1.3. Csapadék

A Fertő tó vízháztartásában rendkívül fontos szerepe van a csapadéknak. Vízháztartási egyenlegének két legnagyobb tagja a bevételi források közül a csapadék, míg a vízcsökkentő tényezők közül a párolgás. Az elpárolgott vízmennyiség több mint 2/3-a a csapadékból pótlódik. A tóra hulló csapadékot három magyar és öt osztrák csapadékmérő állomás adataiból számolják. A három magyar állomás Fertőrákos parton, Fertőbozon és Fertőújlakon található. Mivel nem egyenletesen helyezkednek el ezek az állomások, ezért a számításoknál a területarányos Thiessen-féle poligon módszert alkalmazzák.

A csapadék térben és időben az egyik legváltozatosabb meteorológiai elem. Területi eloszlásában gyakorlatilag két tényező, a tengerszint feletti magasság és a tengertől való távolság játssza a legfőbb szerepet. A kontinens belseje felé haladva fokozatosan csökken a csapadék mennyisége, a tengerszint feletti magasság emelkedésével pedig nő. 100 m-es magasságnövekedés kb. 35 mm/év csapadékösszeg növekedést eredményez. Magyarországon átlagosan 600-650 mm csapadék hull, azonban ettől akár ±30%-kal is eltérhetnek az egyes évek értékei.

A 35-éves adatsorok alapján az éves csapadékösszeg Fertőrákos parti állomáson 550mm, Fertőbozon 600mm, Fertőújlakon 570 mm körüli. A tóra hulló csapadék számított éves csapadékösszege 570mm körül alakul.

A csapadék időbeni eloszlása nem csak éven belüli ún. évszakos váltakozást mutat, hanem az évek hosszú adatsoraiban hosszabb-rövidebb száraz illetve nedves időszakok váltakoznak. Magyarország a szárazabb telű és nedvesebb nyarú mérsékeltövi területekhez tartozik, ennek megfelelően térségünkben a nyári félév csapadéka meghaladja az éves csapadékösszeg 60%-át. Mindhárom fertő tavi állomáson – az országos átlagnak megfelelően – a legcsapadékosabb hónap a június, a csapadékban legszegényebb a február.

5.1.4. Szél

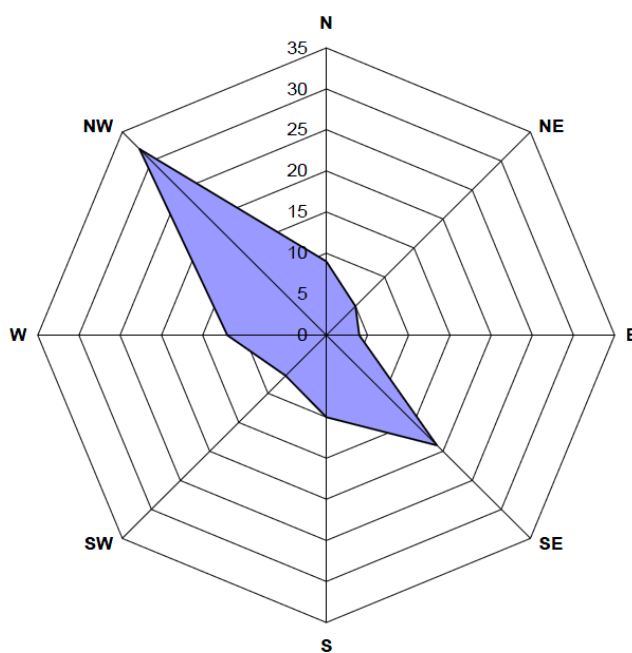
Földünkön a légkör állandó mozgásban van, nagyon ritka eset, amikor nincsenek vízszintes és/vagy függőleges áramlások. A levegő vízszintes irányú mozgását nevezzük szélnek. A szelet két tulajdonságával, irányával és sebességével jellemezzük [XI.].

A szél irányán mindig azt az égtájat értjük amerről fúj. Az égtájak nevei szerint négy fő irányt és 12 mellékirányt különböztetünk meg. A meteorológiai gyakorlatban, különösen az automata műszerek használatánál szokásos még a szélirány fokokban történő kifejezése.

A szél sebességét a meteorológiában m/s-ban, a köznapi életben km/h-ban, angol nyelvterületeken mérföld/óránban vagy csomóban fejezik ki. Van még a szél sebességének kifejezésére – különösen a vitorlázók, szörfösök körében – elterjedt és használatos mértékegysége a Beaufort fok, jelölése B°. Ezt a 12 fokozatból álló tapasztalati skálát Beaufort, 1805-ben állította fel a szélesebbé meghatározására.

Magyarországon a szélviszonyokat alapvetően két tényező, az általános cirkuláció és a helyi viszonyok (domborzat, vízfelületek közelsége) együttesen alakítják ki. Hazánkban az uralkodó, vagyis a leggyakoribb szélirány északias, az ország nagyobb részén északnyugatis, a keleti országrészben inkább északkeleties. Szélviszonyainkra jellemző még, hogy az uralkodó szélirányból csupán az esetek 15-35%-ában fúj a szél és nagyobb részt a többi irányból megosztva.

A Fertő tó területén szinte állandó a légmozgás. Szélcsend évi átlagban mindössze 2%-ban fordul elő, amely az év 365 napjából mindössze 6-7 napot jelent. A leggyakoribb az északnyugati szélirány.



5. ábra: Szélirány gyakoriság évi átlaga, Fertőrákos tavi állomás

5.1.5. Léghőmérséklet

A levegő hőmérsékletét a Fertő tó környezetében három helyen mérik, a Fertőrákos parti, a Fertőrákos tavi és a Fertőújlaki megfigyelő állomáson. A méréseket főként hagyományos eszközökkel, (higanyos hőmérők, hőmérsékletírók) valamint modern automata műszerekkel végzik.

A levegő hőmérsékletének jellemzésére általánosan használt hőmérsékleti fogalmak

- a középhőmérsékletek (napi, havi, évi),
- a maximum hőmérséklet,
- a minimum hőmérséklet.

A középhőmérséklet egy adott időszak (nap, hónap, év) hőmérsékletének középértéke. A maximum hőmérséklet egy eltelt időszakban mért, vagy egy adott időszakban várható legmagasabb hőmérsékleti érték. A minimum hőmérséklet egy eltelt időszakban mért, vagy egy adott időszakban várható legalacsonyabb hőmérsékleti érték.

Hazánkban az éves középhőmérséklet általában 10°C körül alakul, csak a magasabb területeken süllyed $8,0^{\circ}\text{C}$ alá.

A Fertő magyar részének térségében az éves középhőmérséklet, 35 év adatai alapján $10,2^{\circ}\text{C}$. A nyári félév átlaghőmérséklete $16,7^{\circ}\text{C}$, a téli félévé $3,8^{\circ}\text{C}$. Az országos átlagnak megfelelően a leghidegebb hónap a január a legmelegebb a július.

Az évi közepes hőingás, amely a legmelegebb és leghidegebb hónapok középhőmérséklete közötti különbség, megmutatja, hogy egy terület hőmérsékleti viszonyai milyen szélsőségek között változnak. Ezt a hőingást, amely a kontinensek belseje felé haladva növekszik a kontinentalitás mértékének kifejezésére is használják. Értéke az ország középső és keleti területein 23°C , a nyugati régióban általában $21-22^{\circ}\text{C}$ körül alakul. Fertőrákoson $20,7^{\circ}\text{C}$, Fertőújlakon $20,9^{\circ}\text{C}$.

5.1.4 Vízhőmérséklet

A Fertő vízhőmérsékletét napi rendszerességgel, naponta csak egy alkalommal, reggel nyolc órakor mérték. A méréseket három szintben, - felszín, vízközép és mederfenék - végezték. A tó sekély volta, és a szél keltette szinte állandó vízmozgás miatt hőrétegződés, különösen a reggeli órákban nagyon ritkán és csak rövid időre tud kialakulni. A különböző szintek reggeli, havi középhőmérsékletének különbözősége a kora tél végi – tavaszi időszakban és a nyárközepén kimutatható.

A Fertő tó vize viszonylag gyorsan felmelegszik, viszont gyorsan ki is hűl. A legalacsonyabb havi középértékek januárban és februárban alakulnak ki a legmagasabbak átlagosan augusztusban, de a legmagasabb értékeket mégis júniusban mérték. A Fertő vízhőmérsékletének alakulása trendjében kismértékű emelkedés tapasztalható.

5.2. Hidrológiai jellemzők

5.2.1. A Fertő tó vízjárása

A Fertő tó vízállásait viszonylag rövid ideje, az 1930-as évek eleje óta mérik folyamatosan. Levéltári és térképészeti adatok alapján viszonylag sokat tudunk a tó korábbi vízjárásáról. A Fertő medence az Ikva, a Répce, a Rábca és a Rába torkolati szakaszának szabályozásáig, valamint a Hansági-főcsatorna és a leeresztő zsilip megépítéséig egy vízrajzi egység volt. A Hanságba torkolló vízfolyások árvíz idején a Fertő medencét is táplálták.

A Fertő tó 1443-1451, 1534, 1786, 1813, 1853 és 1883. években olyan mértékben megáradt, hogy elérte vagy elöntötte a szántókat, legelőket, néha a környező falvakat is. A tó a XV-XIX. században ötször, átlagosan 100 évente ki is száradt, emellett többször olyan alacsony volt a vízszintje, hogy közel állt a kiszáradáshoz.

A tó kedvezőtlen szélsőségeinek megelőzése céljából több emberi beavatkozást is terveztek. Ezek közül számos meg is valósult az elmúlt egy évszázadban. A XIX. századi tervek között szerepelt a tó teljes kiszárítása is. A XIX-XX. század fordulóján a Hanság-főcsatornát meghosszabbították a Fertő tóig, valamint Pomogynál a szabad lefolyás korlátozására egy zsilip épült. A szabályozható vízlevezetés érdekében 1956-57-ben megépült a csatornán a Mekszikópusztai zsilip. A zsilip kezelésére a Magyar-Osztrák Határvízi Bizottság 1965-ben fogadott el először szabályzatot, amelyet 1998-ban módosítottak. A tó vízszintszabályozása a természetes tényezők mellett nagyban függ a zsilip üzemeltetésétől. A zsilip kezelésére vonatkozó szabályzat elsősorban az árvízi biztonságot tartja szem előtt, viszont nagy hatással volt a kisvízi állapotokra is. Az elmúlt évek aszályos időszaka azonban újabb kérdéseket vet fel a Fertő tó vízgazdálkodásával, vízszintszabályozásával kapcsolatban.

5.2.2. Vízháztartás

A Fertő tó vízháztartásának vizsgálata már a XX. század elején megkezdődött. A legjelentősebb eredmények Károlyi, Szesztay és Kopf nevéhez fűződnek a tó vízháztartási tényezőinek – hidrológiai analógia alapján – becslésével, valamint a tó korábbi kiszáradásai hidrológiai okainak vizsgálatával [VIII.].

A folyamatos vízháztartási vizsgálatokat és a mérlegek készítését az Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóságon kezdték 1967-ben. 1967 óta évi, 1972-től havi vízháztartási mérlegeket készítenek. A folyamatos vízháztartási mérleg készítéséhez a meteorológiai és hidrológiai észlelőhálózat rendszeres működése, adatszolgáltatása és a tó 1963-1967. évi felmérése teremtette meg a lehetőséget [II.].

A mérleg elemei: a tóra hulló csapadék, hozzáfolyás a vízgyűjtőről, a párolgás a tó felszínéről, lefolyás a tóból és a tó vízkészlet-változása. A Fertő tóból számottevő vízhasználat nincs.

A tavat tápláló kisebb vízfolyások, csatornák és tó közeli források havi vízszállítását meghatározni nem lehet. A Fertő tó peremterületén a talajvízszint három oldalról is a tó irányába lejt. A talajvízből történő évi hozzáfolyás mennyiségét többen becsülték, a havi hozzáfolyás összegek azonban nem határozhatók meg. Hasonlóan nincsenek adatok a rétegvizekből történő hozzáfolyásról sem, pedig a hidrogeológiai feltárások szerint valószínű van felszín alatti hozzáfolyás rétegvízből.

A tó havi vízkészletváltozását a vizsgált hónap vízállásváltozása és a havi közepes vízszinthez tartozó tófelület figyelembevételével lehet számolni:

$$\Delta K = (h^{(2)} - h^{(1)}) \cdot F_{k\ddot{o}} = \Delta h \cdot F_{k\ddot{o}} \quad (17)$$

ahol, ΔK – a vízkészletváltozás a hónapban [m^3]
 $h^{(1)}$ – a tó közepes vízszintmagassága a tárgy hónap első napján [m]
 $h^{(2)}$ – a tó közepes vízszintmagassága a következő hónap első napján [m]
 Δh – a tó tárgyhavi vízszintváltozása [m]
 $F_{k\ddot{o}}$ – a tó tárgyhavi közepes vízszintmagasságához tartozó tófelület [m^2]

A Fertő tó vízháztartási mérlegét a következő formában írjuk fel:

$$\Delta K = (C + H) - (P + L) \quad (18)$$

ahol, ΔK – a tó vízkészletváltozása
 C – a tóra hulló csapadék
 H – hozzáfolyás vízgyűjtőről
 P – párolgás (szabad vízfelszín + nádas tórész evapotranspirációja)
 L – lefolyás a Hansági-főcsatornán

A Fertő tavon – a Hansági-főcsatornán történő leeresztésen kívül – az utóbbi 10 évben nincsenek olyan emberi beavatkozások, melyek a tó vízháztartását jelentősen befolyásolják, így a vízháztartási tényezők a természetes állapotot tükrözik.

5.3. Adatgyűjtés és feldolgozás

5.3.1. MODIS műholdképek

5.3.1.1. Felszíni hőmérsékletek

A területi tulajdonságoknak (növényborítottság, területhasználat, talajban tározódott vízmennyiség, stb.) párolgásra gyakorolt hatásait a felszíni hőmérsékletek jól jellemzik, ugyanis a párolgás a felszínre nézve nagy hőelvonással jár. Ezeket a hőmérsékleteket a NASA két műholdja, a TERRA és az AQUA is méri, melyeket a 2000-es évek elején állították pályára. Egész pontosan a TERRA-t 1999. december 18-án, az AQUA-t pedig 2002. május 4-én. Ezek a műholdak egy-két naponta mérik a Föld minden pontját, egyszerre 2330 km széles területre látnak rá, és adatokat kapnak egy adott terület növényborítottságáról és talajtípusáról is.

Az úgynevezett MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) műholdképek a <http://modis.gsfc.nasa.gov/> [XV.] oldalon bárki számára ingyenesen hozzáférhetőek. A számítások során havi időlépcsőket alkalmaztunk, azonban ilyen a honlapon nem áll rendelkezésünkre, így a 8-napos periódusokat választottuk ki. Térbeli felbontás szerint a számunkra lehető legfinomabb felbontást választottuk, ami esetünkben kb. 1x1 km-es cellákat jelent. A vizsgált időszak 2000 márciusa és 2010 decembere közé tehető, ezáltal két évvel kibővítvé Kovács Ákos Domonkos (PhD) párolgásbecslésről szóló kutatásait [VII.].

Ezek a fájlok alapvetően nagy felbontásúak, ezért a könnyebb hozzáférhetőség érdekében, egy csökkentett méretű, ún. HDF formátumban érhetőek el. A megfelelő layer kiválasztása fontos volt. Elsősorban a napszak alapján kategorizáltunk, ugyanis nappali hőmérséklet értékekre volt szükségünk, hiszen nappal nagyobb a párolgás, mint éjjel. Néhány fontos adat a kiválasztott layerekről: az érvényes adattartomány 7500 és 65535 közé esik, a bitformátum 16 bites integer, az értékek Kelvinben mértek. Az értékekre vonatkozó szorzótényező nagysága 0,02. A HDF fájlok felbontása 1200x1200-as, szinuszos vetítésűek, és nagyjából 1100x1100 km-es területet fednek le.

Dr. Kovács Ákos, kutatásai során előbb a nagyjából 1 millió km² nagyságú területet lefedő képekből kivágta a vizsgált területeket, így kisebb méretű fájlokon végezte el a további műveleteket. Mivel a módszer még új, úgy gondoltuk, más irányból közelítjük meg a folyamatot: mi mindvégig a teljes területtel dolgoztunk, utána végeztük el a szükséges kivágásokat.

A HDF fájlokat azonban át kellett konvertálnunk GEOTIFF formátumba, amiben a Modis Tool nevű program volt segítségünkre, mely a honlapon szintén ingyenesen elérhető. Ennek elérhetősége az alábbi: https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool.

A továbbiakban az ArcGIS 9.3-al dolgoztunk, azon belül döntő többségében az ArcCataloggal, illetve az ArcMap-el, hogy mindegyik 8-napos periódushoz hozzárendeljünk egy képet. Ezekből a TIFF fájlokból már ASCII fájlokat tudtunk létrehozni.

A 8-napos periódusokat havi átlagokká alakítottuk, melyeket a 8-napos periódusok számtani átlagából tudtunk létrehozni. Ha egy 8-napos fájl mindkét hónapba beletartozott, azokat ahhoz a hónaphoz számoltuk, amelyikből több napot tartalmazott. Ez minden hónapra 3-4 adatot eredményezett. Némi átfedés így is kialakult a hónapok között, de ez nem számottevő, a kutatás szempontjából elhanyagolható.

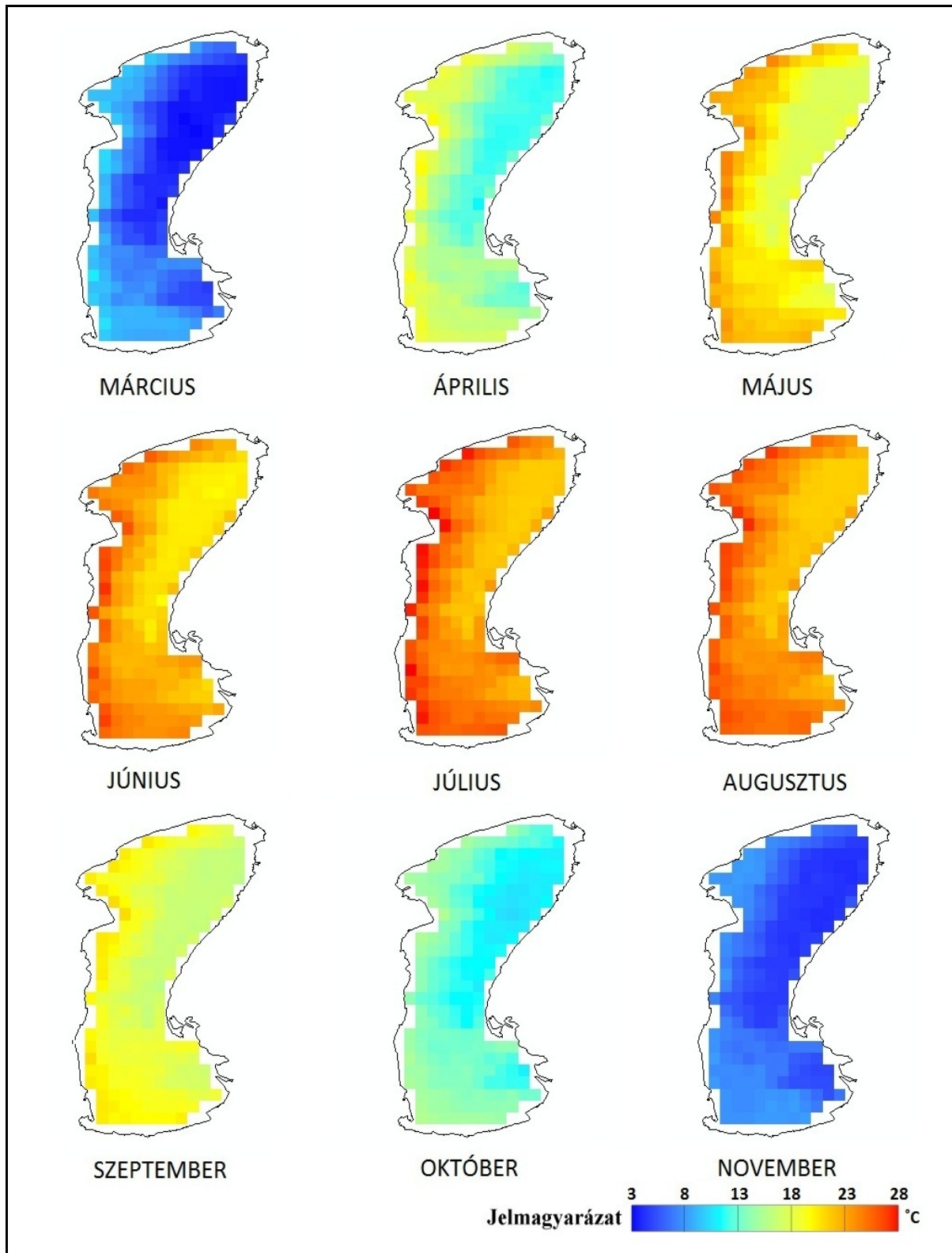
Ezeket a havi átlagokat a Matlab segítségével kaptuk, illetve további számításokat végeztünk el a programban. A hőmérsékleteket Kelvinből Celsius fokba váltottuk át, továbbá figyelembe vettük a már korábban említett szorzótényezőt is.

Mivel a szükségesnél még jóval nagyobb terület állt rendelkezésünkre, az adatokból ArcMap-ba illesztve kivágtuk a Fertő tavat, így megkapva, csak a Fertő tóra vonatkozó felületrész értékeit. Ehhez szükségünk volt egy shape fájlra, mely tartalmazza a Fertő tó alakját.

A tavon kiválasztottuk az összes 1x1 km-es cellát, amely közvetlenül a tó vízfelszínére esik, tehát nem lóg ki a vízparti területre. Minden hónapra kaptunk egy képet, amiken jól látszanak a tó eltérő részein mért hőmérsékletek. Az így kapott fájlok további feldolgozásokon mentek keresztül. A téli hónapokban (december, január és február) az eredményekből arra következtettünk, hogy valószínűleg jég borította a vízfelszínt, így ezekkel tovább nem foglalkoztunk. A 2009. márciusi fájlban volt egy cella, amelyben nem kaptunk értelmezhető értéket, azt a többi év azonos hónapjainak átlagával becsültük. Minden használható hónapra számoltunk havi átlagot (6. ábra).

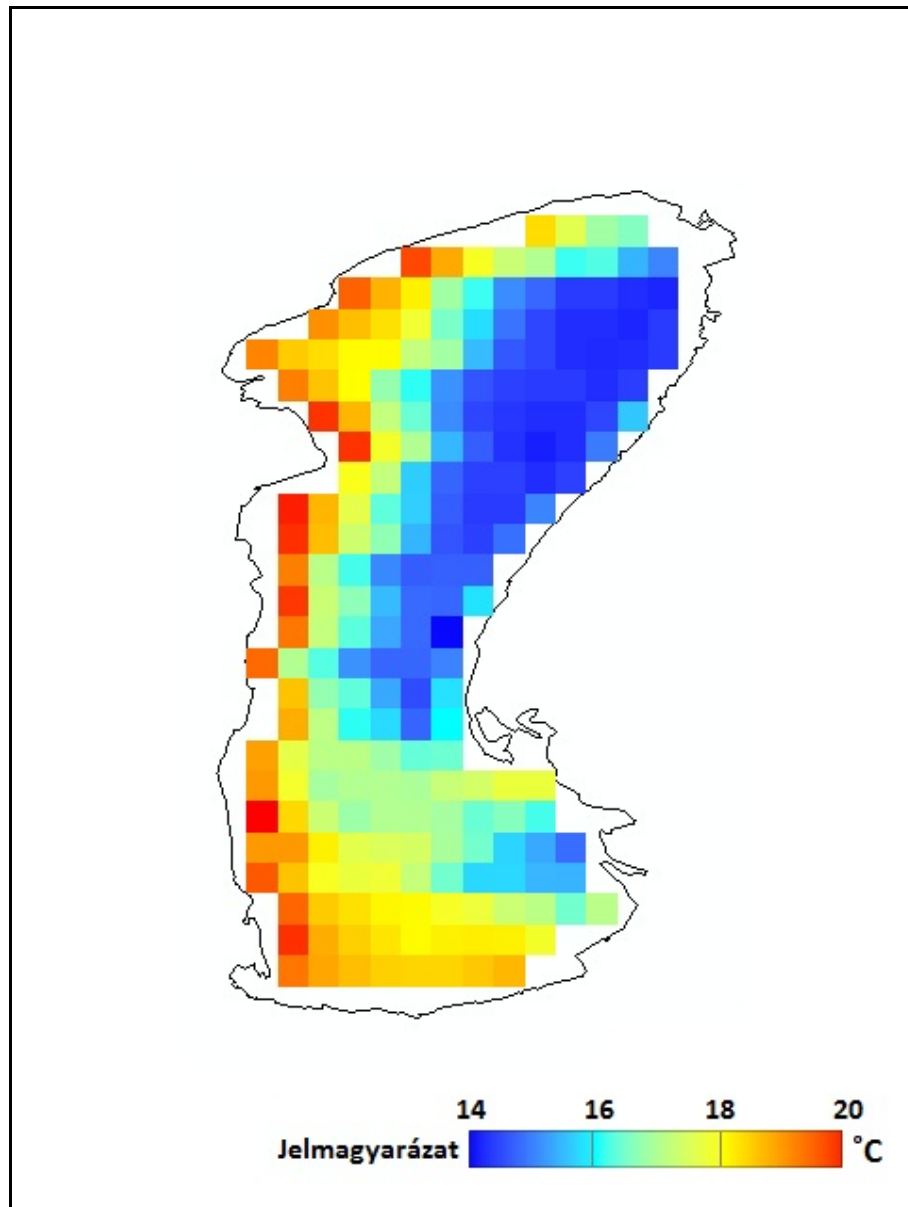
Itt definiáljuk, hogy a továbbiakban a part menti vizeket sekély vízként, a nyílt vízfelszínt pedig mély vízként értelmezzük. Mivel a tó alapvetően sekély, ezért alapvetően nem beszélhetünk mély vízről, viszont a part menti vizeket a nyílt vízfelszínnel összehasonlítva igen, hisz a nyílt vízi vízmélység duplája is lehet a part menti vízmélységnek.

A 6. ábrán jól látszik, hogy a nádas területének hőmérséklete minden hónapban magasabb. A legkisebb hőmérséklet általában a mély víz területén van, ami nem meglepő, hiszen a mélyebb víz a sekély víznél nehezebben melegszik fel, ezért nyáron több fokos eltérés is lehetséges, továbbá az is igaz, hogy nehezebben hűl ki, ezért szeptembertől már kisebb a differencia.



6. ábra: Felszíni hőmérsékletek, havi átlag

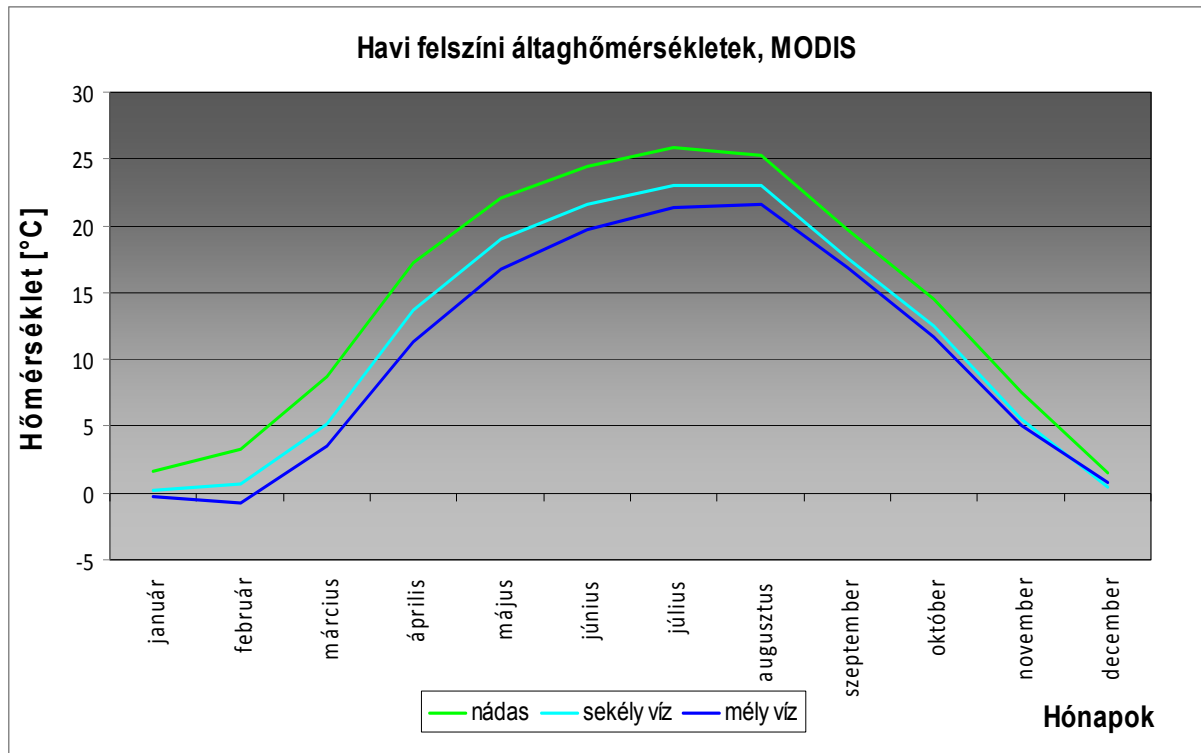
Kiszámoltuk a 11 éves átlagot is (7. ábra), ami egyértelműen megmutatja a nádas és a mély víz területe közti felszíni hőmérsékletkülönbséget. A náddal borított területeken magasabbak a hőmérsékletek.



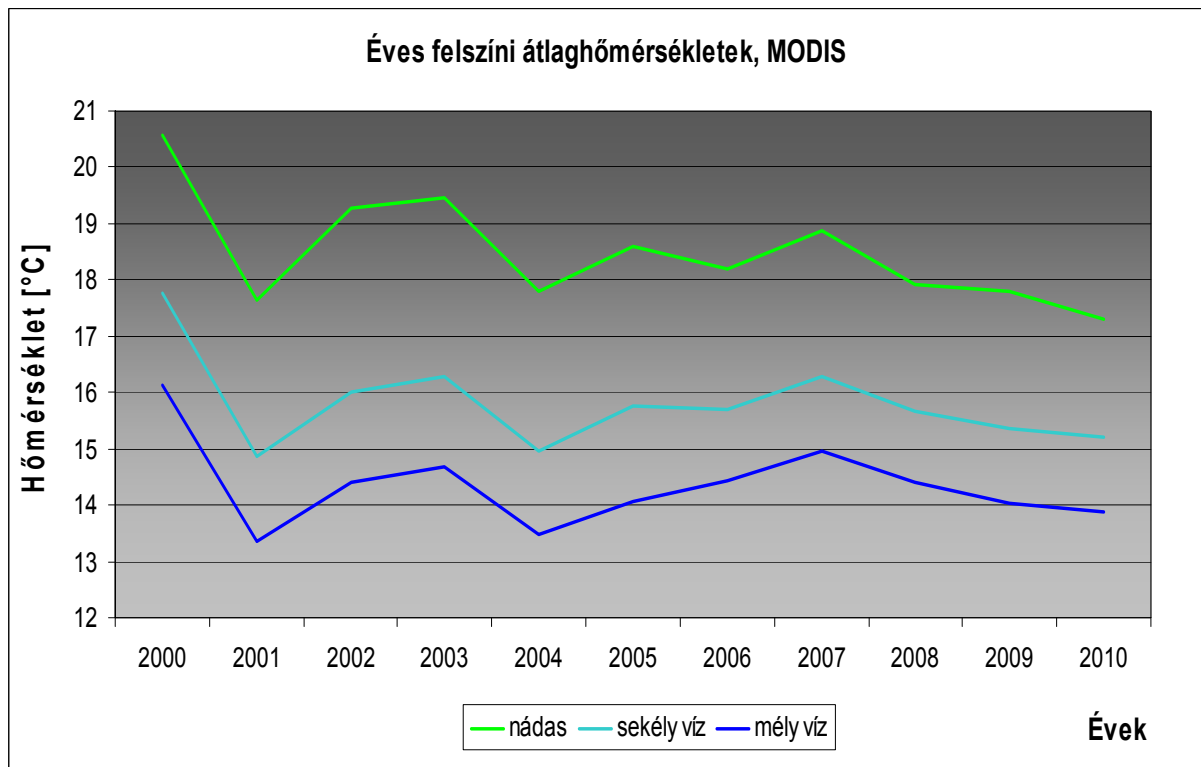
7. ábra: Felszíni hőmérsékletek, 11 éves átlag

A tavat felosztottuk Magyarország és Ausztria területére eső cellákra, melyeket 3 részre bontottunk mindkét országban: nádas, sekély víz, valamint a mély víz. Ez utóbbi kategóriába tartozó cellák, csak Ausztria területén voltak megtalálhatók. Az osztrák oldali nádas és a magyar nádas eredményei hasonlóak lettek, ezért egy cellatípusként kezeltük a továbbiakban, ugyanígy tettünk a sekély víz esetében is.

Ebben a három kategóriában kapott értékeket átlagoltuk. Ezekre a cellákra is kiszámoltuk a 11 éves átlaghőmérsékleteket minden hónapra (6. ábra). Az ábrán látszik, hogy minden hónapban a mély víz a leghidegebb, majd a sekély víz melegebb, és a nádas területére eső cellák rendelkeztek a legmelegebb felszíni hőmérséklettel. Ugyanez látszik az éves átlaghőmérsékleteken is (9. ábra).



8. ábra: Havi felszíni átlaghőmérsékletek



9. ábra: Éves felszíni átlaghőmérsékletek

A havi hőmérsékletek éves alakulása alapján látjuk, hogy a nádas hőmérséklete a legmagasabb. A sekély víz értékei a decemberi hónapot kivéve folyamatosan a mély víz értékei felett maradnak. Ez valószínűleg annak tudható be, hogy alapvetően egy sekély vizű tóról beszélünk, melynek – alacsony vízmélysége miatt – a hőtározás nem érvényesül olyan szinten, mint egy nagyobb mélységű tónál (mint például a Balatonnál).

5.3.1.2. Albedó

Az adatszerzés hasonlóan zajlott, mint a felszíni hőmérsékletek esetében. A már korábban említett AQUA és TERRA műholdak mérései lehetőséget adnak albedó értékek megismeréséhez is.

A letölthető fájlok szintén HDF formátumban érhetőek el, melyet első lépésként GEOTIFF formátumba konvertáltunk át a már korábban említett HEG Standalone v2.10 programmal. Ezek után az ESRI ArcGIS 9.3-es verziójával dolgoztunk, melyről a lépéseket később részletesebben ismertetjük.

Az adatok albedó terén is többféle időbeli és térbeli felbontásban állnak rendelkezésre, azonban az egyik nagy különbség az, hogy legfeljebb csak 16-napos változat érhető el.

Mivel felszíni hőmérsékleteknél 1x1 km-es felbontást választottunk, ezért az albedónál is ugyanígy tettünk. A layerek kiválasztása a felszíni hőmérsékletekhez hasonlóan itt is megtörtént. A felhasznált layer típus adatai a következők:

- HDF felbontás: 1200x1200
- vetítés: szinuszos
- terület: kb, 10x10 szélességi fokot fed le
- szorzótényező: 0,0010
- érvényes adattartomány: 0-32766
- bit típus: 16 bites integer

A raszter fájlokat első körben ASCII-ba alakítottuk át, majd a 16-napos fájlokból havi fájlokat hoztunk létre. Ez értelemszerűen két 16-napos fájl egyesítésével történt meg. Némi átfedés ugyan van a hónapok között, de ez a kutatás szempontjából elhanyagolható. Mivel egy 16-napos adathoz két fájl tartozott: BSA (Black Sky Albedo) illetve WSA (White Sky Albedo), ezeket még a havi adattá alakítás után egyesíteni kellett. Néhány további lépés után már csak a megfelelő terület kivágására volt szükség, ugyanis a letöltés során kiválasztható régiók/területek igen nagyok, sok – a kutatás szempontjából – fölösleges részt is tartalmaztak. A kivágáshoz úgynevezett shape fájlokat alkalmaztunk. Ez egy speciális fájl, mely lényegében a Fertő tó alakját tartalmazza, továbbá kompatibilis az ArcGIS-el, és a megfelelő koordináta-rendszerek megadása után, pontosan illeszkedik a műholdképekhez.

Az albedó vizsgálatának időszaka 2000-2010, a hónapokat pedig márciustól novemberig terjedő időszakban határoztuk meg, ugyanis a téli időszakban (december, január, február hónapok) hóborítottság lehet az ország területén. Ez jelentősen befolyásolná az eredményeket, mivel a hó albedója jelentősen eltér a hóval nem fedett területek albedójától.

Az 1x1 km-es cellák közül végül csak azokat tekintettük mérvadónak, melyek a Fertő tó határain belül esnek, így pontosítva az értékeket. Elkülönítettünk öt különböző cellatípust: Nádas az osztrák és magyar területeken, sekély víz szintén mindkét területrészen, illetve mélyvíz, mely csak az osztrák területen található.

Mivel a nádas és a sekély víz értékeiben nincs jelentős eltérés a két ország között, ezért három csoportra szűkítettük le az értékeket:

- sekély víz
- mély víz
- nádas

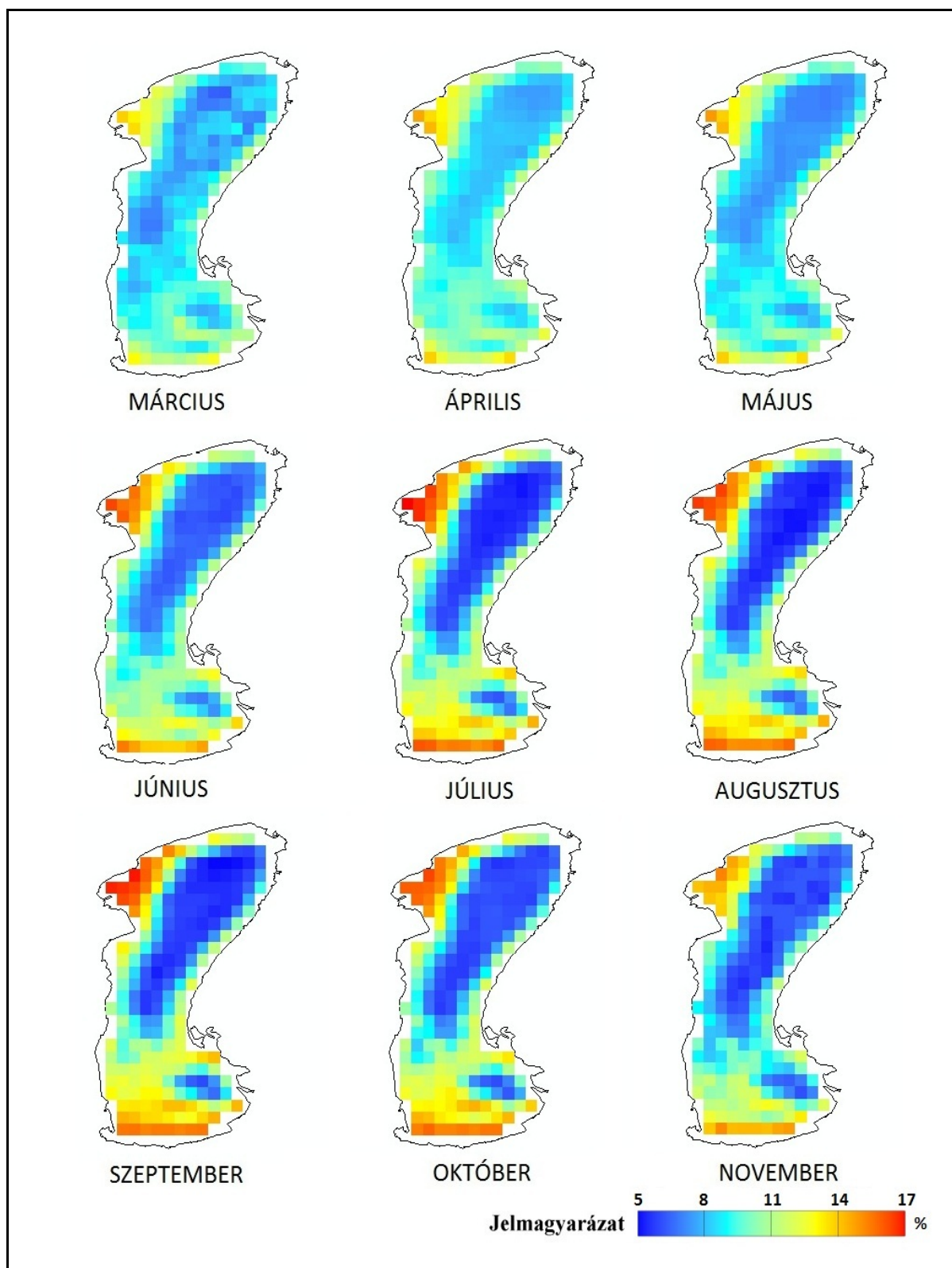
A cellákból kategóriánként átlagot vontunk, melyet a továbbiakban a kategória jellemző értékeként vettünk figyelembe. Ezekből az értékekből elkészítettük a havi átlagot és a 11 éves átlagot is.

Éves átlagokat is készítettünk, eredményül azt kaptuk, hogy az egyes évek között jelentős eltérés nincs. Szórást is számoltunk, mely megadja, hogy az értékek mennyiben térnek el az adott cellatípus átlagértékeitől. Ennek eredménye a következőképp alakul:

Szórások	Nád [%]	Sekély víz [%]	Mély víz [%]
Március	1,09	2,50	3,25
Április	2,11	1,94	2,15
Május	0,80	1,38	2,08
Június	0,88	0,86	0,93
Július	0,87	0,66	0,70
Augusztus	0,88	0,86	0,96
Szeptember	1,06	0,96	0,76
Október	1,13	0,94	1,02
November	1,01	1,73	1,64

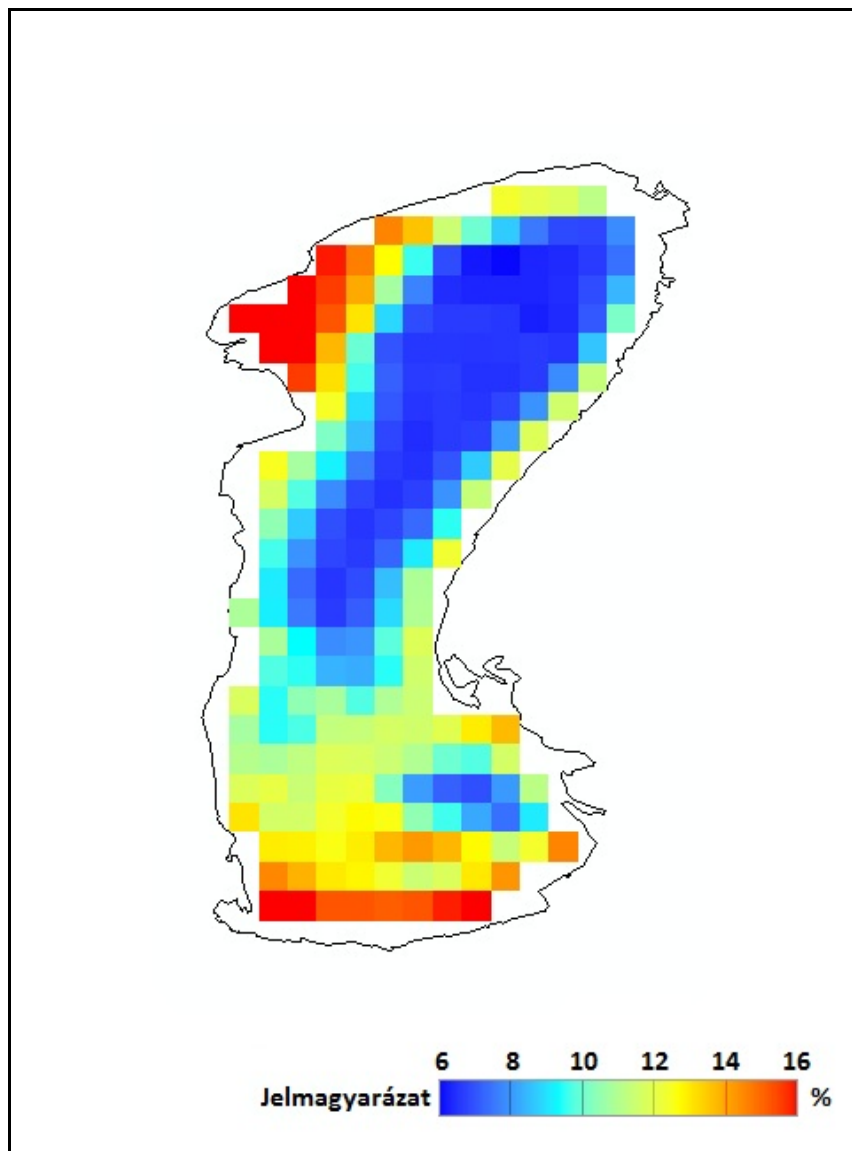
1. táblázat: Albedók havi szórásai

Az eredményeken jól látszik, hogy jelentős eltérés nincs, így ennek alakulását a továbbiakban nem tárgyaljuk.



10. ábra: Albedó, havi átlag

Az 10. ábrán jól látható, hogy a márciustól májusig terjedő időszakban kisebbek az albedó értékek, illetve ezen belül is elég hasonlóak. Ez feltehetőleg annak köszönhető, hogy ebben az időszakban a nád még kezdeti, növekvő stádiumban van, ez által a műholdak által jobban észlelhető a nádszálak között lévő vízfelület, a nád még nem borítja be azt. Látható továbbá az is, hogy októberben és novemberben is igen erős még a visszaverődés a nádassal borított területekről. Annak ellenére, hogy már nem zöldell a nád, az elszáradt részek beborítják a területet így a felülete közel ugyanakkora marad, mint nyáron. A száradó levelek albedója pedig nagyobb, mint a vízfelületé.

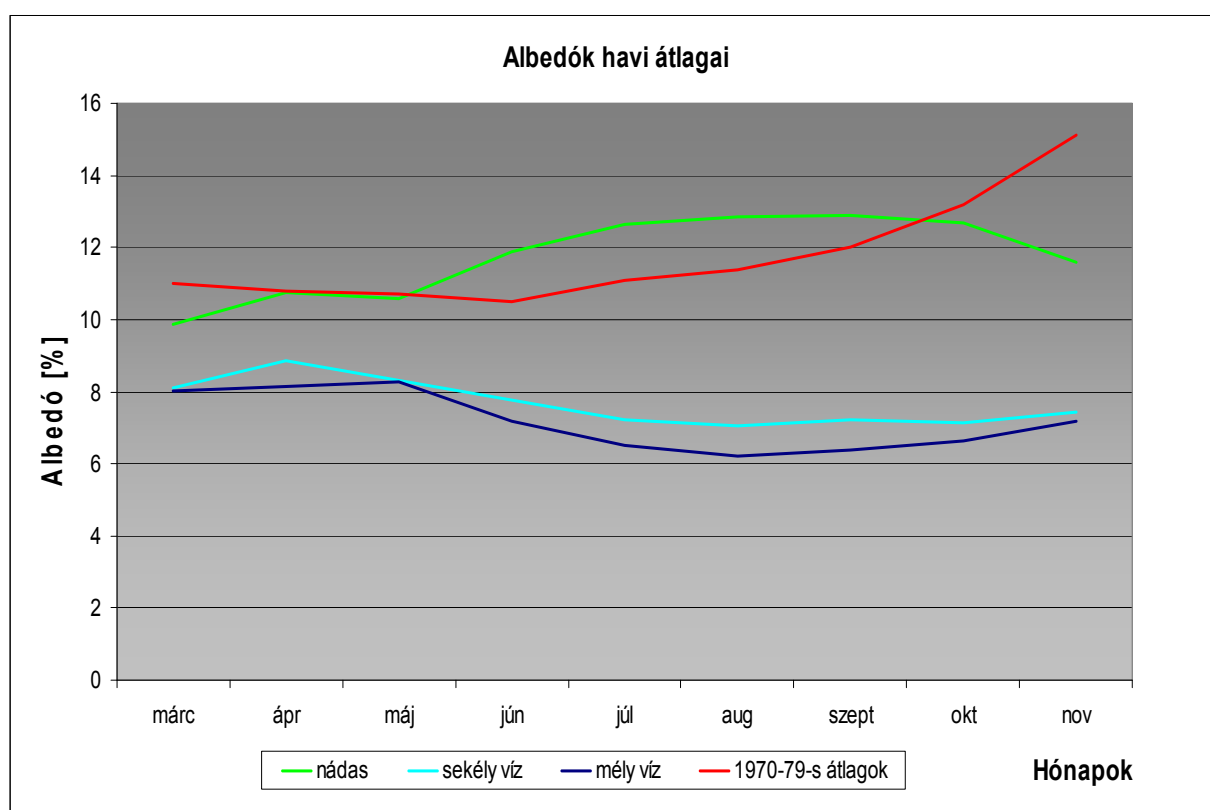


11. ábra: Albedó, 11 éves átlag

A 11 éves átlagon (11. ábra) egyértelműen látszik, hogyan alakulnak az albedók. A parthoz közel a legmagasabbak az értékek (tehát a nádasnál), míg a mélyvíz értékei alacsonyabbak. Az ábrán a legpirosabb részek a Fertő tó leginkább elmocsarasodott, illetve náddal borított területei, szinte abszolút nincs tiszta vízfelület ezeken a részeken.

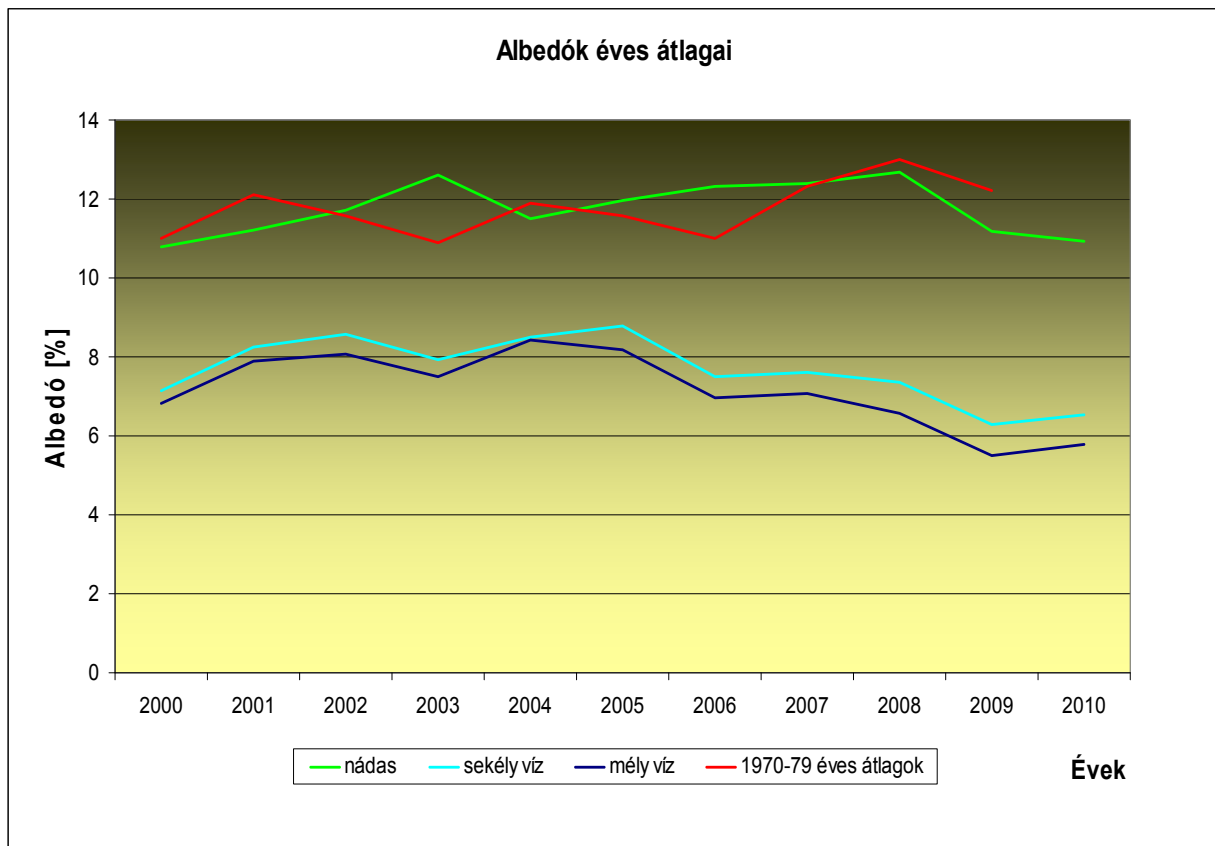
A MODIS műholdképek segítségével egy új irányból lehet megközelíteni az albedók vizsgálatát. Mivel régebbi módszerekkel egyáltalán nem lehet ilyen pontosan vizsgálni, ezért ez a kutatás jó alap az albedók későbbi pontosításához.

Az ábrázolt 1970-79 közti időszakban mért albedó értékek (I.) is csak a teljes tó területére vonatkoznak, nincs elkülönítve vízfelületre, és nádasra. További problémát jelent az is, hogy a közvetlen mérések a technológia fejletlensége miatt, nem tudtak a területre teljes egészében számolni. Az alábbi grafikonon (12. ábra) az albedók havi alakulását mutatjuk be. Megjegyzendő, hogy az 1970-től '79-ig tartó időszakban júniustól jelentős növekedésnek indulnak az albedó értékek. Erre több magyarázat is lehetséges: a már korábban említett mérési pontatlanságok, illetve technológiai fejletlenség hiánya, továbbá az is közrejátszhat, hogy olyan területeken végezték a méréseket, ahol jelentősen nagyobb volt a nádassal borított rész.



12. ábra: Albedó, havi átlag

Sekély víz átlag:	7,68 %
Mély víz átlag:	7,17 %
Nád átlag:	11,75 %
'70-es évek átlaga:	11,76 %



13. ábra: Albedó, éves átlag

'70-es évek, 10 éves átlag:	11,76 %
Nád, 11 éves átlag:	11,76 %
Sekély víz, 11 éves átlag:	7,67 %
Mély víz, 11 éves átlag:	7,16 %

5.3.2. Hidrometeorológiai adatok

Kutatásaink során a különféle párolgásbecslő módszerekhez szükségünk volt más hidrometeorológiai adatokra is a korábban már említett felszíni hőmérsékleteken és albedókon kívül. Az adatokat az ÉDUKÖVÍZIG, valamint az OMSZ szolgáltatta.

Az ÉDUKÖVÍZIG Környezetvédelmi és Vízi Közmű Osztályának Fertő-tavi Hidrometeorológiai Állomása bocsátotta rendelkezésünkre a szükséges adatokat. A mérések a Fertőrákos parti állomáson készültek. A Fertő tóra vonatkozóan 11 év adatait igényeltük majd kaptuk kézhez a 2000-2010-es időintervallumra havi átlagok formájában. Ezek a következők:

- vízfelszín felett 15 m magasságban mért szélesség [m/s]
- vízfelszín (felső 20 cm) hőmérséklete [°C]
- talajfelszín és a vízfelszín felett 2 m-rel mért léghőmérsékletek [°C]

- 2 méterrel a vízfelszín felett mért relatív nedvesség [%]
- talajfelszín feletti 2 m magasságban mért napfénytartam [óra]
- az A-típusú kád párolgása [mm]

Továbbá ugyanerre az időszakra vonatkozóan szükségünk volt a vízmérleg alapján számolt párolgásadatokra, melyhez az ÉDUKÖVÍZIG kétféle párolgást szolgáltatott: a mért párolgás alapján számolt, valamint a vízháztartási egyenlet maradék tagjaként adódó havi átlagpárolgásokat.

Az Országos Meteorológia Szolgálatától az alábbi adatokat kaptuk meg 2008-2010 közötti időszakra:

- 2 méteres havi átlaghőmérséklet [°C]
- 2 méteres havi átlagos relatív nedvesség [%]
- 10 méteres havi átlagos szélesség [m/s]
- havi csapadékösszeg [mm]
- havi átlagos felszíni légnyomás [hPa]

Az OMSZ kizárólagos engedélyével, lehetőséget kaptunk felhasználni Dr. Kovács Ákos párolgásbecslő kutatásaihoz szolgáltatott 2000-2008 közti adatsorokat. (Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai, Kovács Ákos PhD, 2011)

5.3.3. A számítások összefoglalása

A párolgásbecsléshez az ÉDUKÖVÍZIG és az OMSZ által szolgáltatott, valamint a MODIS műholdképek alapján kiértékelt adatokat használtuk fel.

Számításaink során a következő módszereket alkalmaztuk:

- empirikus párolgásképletek
 - osztrák részről (Neuwirth): (4) képlet
 - magyar részről a jelenlegi formula (Kozmáné, 1996): (5) összefüggés
- Morton WREVP programja
- lineáris transzformáció

5.3.3.1. Empirikus képletek

Számításainkat egy osztrák (4) és a jelenleg is az ÉDUKÖVÍZIG által használatos (5) formulákkal végeztük. Mindkettőhöz egyszerű klímaadatok szükségesek, melyek a következők: vízhőmérséklet, szélesség és relatív nedvesség.

Számítások előkészítése:

A telítési páratartalom, valamint a szélesség megfelelő magasságba való átszámításához két újabb összefüggést alkalmaztunk. Mivel a havi közepes szélességeket 15 m

magasságban mérték, ezért ezeket konvertálni kellett a megfelelő – esetünkben 3 illetve 13 m – magasságra (Brutsaert, 2005) [IV.]:

$$u_n = u_r \left(\frac{n}{z_r} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (19)$$

ahol u_r = 15 m magasan mért szélesség m/s-ban

z_r = 15

n = amekkora magasságba szükséges konvertálni a szélességet [m].

A vízfelszín hőmérsékletéhez tartozó telítési párányomás (E_0) az alábbi összefüggésből adódik (T °C-ban behelyettesítendő):

$$E_0 = 6,108 \exp \left[\frac{17,27T}{237,3 + T} \right] \quad (20)$$

A levegő párányomása (e) a relatív páratartalom és a telítési párányomás (levegő hőmérsékletén vett) szorzatából adódik.

Számítások folyamata

Az átalakítások után minden érték megfelelő formában rendelkezésre állt ahhoz, hogy behelyettesítsük őket az empirikus képletekbe. Ezt követően külön-külön az ÉDUKÖVÍZIG, az OMSZ és a MODIS műholdképek adatai alapján meghatároztuk az átlag havi párolgásokat illetve az éves párolgásösszegeket.

Első lépésként csak az ÉDUKÖVÍZIG adataival állapítottuk meg a párolgás mértékét. Ezt követően az OMSZ adataival számoltunk, melyhez az ÉDUKÖVÍZIG által szolgáltatott vízhőmérsékletet használtuk fel, mivel az OMSZ mérései között nem volt vízhőmérséklet érték. Ezután az OMSZ adataihoz a MODIS műholdképekből nyert felszíni hőmérsékletadatokkal határoztuk meg a nádas, a sekély víz és a mély víz párolgásait. A nádas evapotranspirációjának számításához a (6) összefüggést alkalmaztuk.

5.3.3.2. Morton párolgásbecslése

Morton evapotranspiráció becslése, az ún. WREVP program egy globális modell, tehát a Föld minden pontjára képes párolgást számolni. Helyi alkalmazásához nincs szükség semmilyen kalibrálandó paraméterre, így ki lehet zárni az ebből fakadó esetleges hibalehetőségeket [IX.].

A programnak több modulja van, két fő része a CRAE (Complementary Relationship Areal Evapotranspiration) területi párolgásbecslés és CRLE (Complementary Relationship Lake Evaporation) tó párolgásbecslés. Ez utóbbit használtuk fel számításaink során [X.]. A CRLE modell bárhol a világon képes meteorológiai észlelésekből becsülni a sekély tavak párolgását

úgy, hogy nem kell hozzá helyileg meghatározott együttható. Morton tíz tóra kalibrálta a CRLE modellt úgy, hogy az éves becsléseket hasonlította össze a vízmérlegből kapott párolgással.

Ahhoz, hogy párolgást számítsunk ezzel a programmal, meg kell adni néhány állandó paramétert: a tó földrajzi szélességét (é.sz. $47^{\circ} 50' 0''$), a tengerszint feletti magasságát (115,45 m), átlagos vízmélységét (1,1 m) illetve sótartalmát (1700 mg/l).

A mélység és a sótartalom a tó hőtárolása miatt fontos, vagyis ez alapján számolja a program, hogy ősszel, mennyivel később tud lehűlni a tó (és tavasszal, mennyivel később tud felmelegedni). Minél mélyebb a tó, annál nehezebben hűl le a már felmelegedett víztest. Ez csak az éven belüli párolgásra hat, így az éves átlagot, vagy esetleg a többéves párolgást nem befolyásolja. Ezekon kívül meteorológiai adatokra is szükség van: globálsugárzás, vagy napfénytartam (ez utóbbit használtuk fel), átlagos havi léghőmérséklet és relatív páratartalom. Ezek mind havi adatok, mivel a program is havi szinten számol.

Morton különböző feltételek mellett éveken át tesztelte a programot. Ez idő alatt kiküszöbölte azokat a hibákat, melyek a tapasztalati összefüggésekből és feltételezésekből adódtak. A program tesztelését összesen 143 vízgyűjtőterületen végezte Észak-Amerikában, Ausztráliában, Új-Zélandon, Írországbán, valamint Afrikában.

Összefoglalva, Morton WREVP programja azért hasznos, mivel a párolgásra független becslést ad, és ellenőrzésre is kitűnően használható.

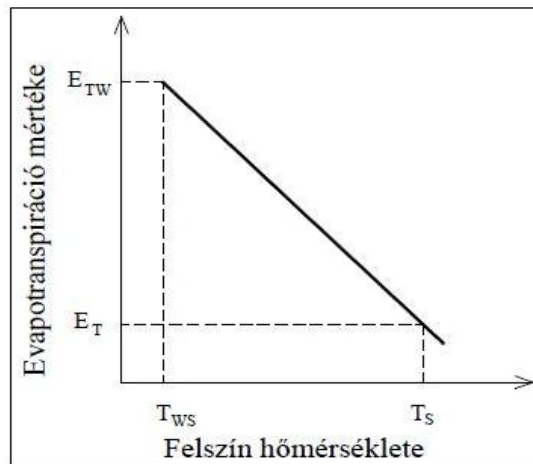
5.3.3.3. Lineáris transzformáció

A területi párolgásmodell (CREMAP) a lineáris transzformáción alapszik. Ehhez két összetartozó pontpár szükséges: a MODIS nappali felszíni hőmérséklet (T_s) és a hozzá tartozó területi párolgás (E_T), amit Morton WREVP módszeréből számítunk, valamint nedves pontok átlaghőmérséklete (T_{ws}), amit a hideg pontokból számolunk – itt feltételezzük, hogy a felszín hideg pontjai egyben nedves pontok is – és a hozzá kapcsolódó nedves környezeti párolgás (E_{TW}), melyet a Priestley-Taylor egyenletből számolunk [VII.]. Ez a pontpár fog meghatározni egy egyenest minden hónapra. Ezek után olvasható le az ábráról a párolgás értéke [XIII.].

Ahhoz, hogy a tó párolgása a lineáris transzformációval meghatározható legyen, a modell egyik feltétele, hogy a tónak elég nagynek kell lennie ahhoz (legalább több száz négyzetméteres területűnek), hogy a horizontális energiatranszport (oázis-hatás) elhanyagolhatóvá váljon a párolgás szempontjából.

A módszer előnye, hogy minden olyan területen, ahol a párolgás komplementáris elmélete érvényes, alkalmazható, csak a nedves pontokat kell pontosan kiválasztanunk, nem

szükséges kalibráció. Felszíni hőmérsékletekkel számol, melyeket a NASA két műholdja, a TERRA és az AQUA a Föld minden pontján mér. A becsléshez Morton WREVP programját is használnunk kell.



14. ábra: Lineáris transzformáció

A lineáris transzformációval a nádas valamint a vízgyűjtőterületnek a tó területével csökkentett magyarországi részének evapotranspirációját határoztuk meg.

5.3.3.4. Korrelációs számítás

A korreláció két (vagy több) véletlen változó közötti lineáris, vagy arra visszavezethető kapcsolat szorosságát méri. A tapasztalati korrelációs együttható (r) -1 és 1 között változhat, teljes függetlenség esetén 0. Minél szorosabb a kapcsolat r abszolút értéke annál közelebb van 1-hez. Ha r pozitív, akkor növekvő, ha negatív, akkor csökkenő a kapcsolat tendenciája [VI.].

Elsőként az ÉDUKÖVÍZIG-től kapott hidrometeorológiai adatokat külön-külön hasonlítottuk össze a szintén általuk küldött párolgáseredményekkel. A mért párolgás a júniusi és júliusi adatsorokkal korrelál a legjobban. A többi adatra valamint a vizsgált hónapokra, változó értéket kapunk, melyek között nem lehet látni különösebb összefüggést. A vízháztartási egyenleg maradék tagjaként kapott párolgás a víz és léghőmérsékletekkel, valamint a tavaszi és nyári hónapokban a napfénytartammal az A-kád párolgásával mutat közepes kapcsolati viszonyt. Havi bontásban a májusi és júniusi víz- és léghőmérsékletek között fedezhető fel kapcsolat. Jó korrelációval rendelkező adatsort vagy hónapot nem igen találtunk. Ez annak lehet a következménye, hogy az ÉDUKÖVÍZIG által számolt párolgások adatsorai között jelentős különbség van. Éves szinten a vízháztartási egyenlet maradék tagjaként számolt párolgás a vízhőmérséklettel a talajszint felett mért léghőmérséklettel és a napfénytartammal áll szorosabb kapcsolatban, de például a szélesebséggel és relatív nedvességgel egyáltalán nem. A mért párolgás alapján számított értékek korrelációja –

szintén éves szinten – kiemelkedően jó eredményt nem hozott, viszont az eredményekből az derül ki, hogy a szélesség, vízfelszín felett mért léghőmérséklet, napfénytartam és A-kád párolgásérték nem korrelálnak ezzel a párolgással.

Következő lépésünk a MODIS műholdképek eredményeiből nyert felszíni hőmérsékletadatok összehasonlítása volt, szintén az ÉDUKÖVÍZIG párolgásaival. Mindhárom hőmérséklettípus (nádas, sekély víz, mély víz) hasonló eredményeket hozott a havi bontásban, de legjobbnak az áprilisi és júniusi adatsorok közti kapcsolat bizonyult. Ennek ellenére más kapcsolati rendszer itt sem fedezhető fel.

A harmadik egyben utolsó lépésünk a korrelációanalízis témakörében az eddig említett párolgásadatok és a MODIS műholdképek albedóértékeinek összehasonlítása volt. Itt csak éves szinten vizsgáltuk meg az adatsorokat, melyben nem láttunk semmilyen komolyabb kapcsolatot a két-két adathalmaz között.

Összefoglalva, a nyári hónapokra kaptunk aránylag jó értékeket – főként a vízhőmérsékleteknél –, amikor a párolgás döntő része zajlik. Emellett azok, az ÉDUKÖVÍZIG által mért adatok (relatív nedvesség, de főként a szélesség) nem adnak jó korrelációt a párolgásértékekkel – legalábbis éves szinten –, melyek a tapasztalati képletben szerepelnek. Ennek vizsgálatára kiemelkedően nagy figyelmet kellene fordítani a jövőben.

Az eredményeket az alábbi táblázatokban láthatjuk:

R ²	mért párolgás alapján számolt párolgás						
	szélséb.	vízhőm.	léghőm.-talaj felett	léghőm.-víz felett	rel.nedv.	napfénytart.	A-kád
jan	0,278	0,057	0,023	0,002	0,182	0,144	
febr	0,375	0,038	0,226	0,246	0,030	0,001	
márc	0,029	0,142	0,143	0,057	0,246	0,039	
ápr	0,328	0,373	0,175	0,167	0,587	0,244	0,167
máj	0,197	0,283	0,231	0,189	0,545	0,368	0,256
jún	0,242	0,781	0,626	0,618	0,529	0,405	0,021
júli	0,189	0,649	0,609	0,553	0,584	0,640	0,139
aug	0,500	0,487	0,335	0,492	0,137	0,371	0,191
szept	0,002	0,300	0,122	0,139	0,499	0,703	0,816
okt	0,012	0,005	0,000	0,002	0,599	0,205	0,163
nov	0,182	0,153	0,039	0,165	0,798	0,017	
dec	0,091	0,011	0,152	0,267	0,016	0,250	
vízháztartási egyenlet maradék tagjaként számolt párolgás							
jan	0,018	0,014	0,001	0,001	0,338	0,448	
febr	0,005	0,058	0,047	0,092	0,216	0,120	
márc	0,007	0,388	0,298	0,290	0,011	0,006	
ápr	0,004	0,415	0,499	0,558	0,068	0,616	0,506
máj	0,000	0,698	0,786	0,543	0,000	0,328	0,786
jún	0,030	0,491	0,582	0,496	0,114	0,636	0,187
júli	0,000	0,035	0,062	0,132	0,051	0,086	0,027
aug	0,147	0,122	0,199	0,148	0,030	0,335	0,157
szept	0,008	0,152	0,302	0,005	0,047	0,384	0,375
okt	0,092	0,019	0,049	0,003	0,138	0,115	0,000
nov	0,092	0,000	0,018	0,059	0,057	0,141	
dec	0,410	0,003	0,003	0,014	0,050	0,219	

2. táblázat: havi szintű korrelációk

R ²	mért párolgás alapján számolt párolgás		
	nádas	sekély víz	mélyvíz
	felszíni hőmérsékletek		
jan	0,060	0,021	0,056
febr	0,136	0,150	0,180
márc	0,390	0,337	0,340
ápr	0,579	0,426	0,240
máj	0,245	0,203	0,116
jún	0,361	0,542	0,568
júl	0,153	0,423	0,363
aug	0,044	0,036	0,129
szept	0,308	0,297	0,470
okt	0,001	0,007	0,001
nov	0,384	0,547	0,622
dec	0,108	0,078	0,173
vízháztartási egyenlet maradék tagjaként			
	nádas	sekély víz	mélyvíz
jan	0,011	0,021	0,001
febr	0,001	0,046	0,099
márc	0,361	0,314	0,258
ápr	0,210	0,196	0,086
máj	0,553	0,546	0,450
jún	0,087	0,139	0,167
júl	0,197	0,150	0,064
aug	0,106	0,221	0,257
szept	0,362	0,409	0,224
okt	0,005	0,057	0,224
nov	0,259	0,190	0,151
dec	0,049	0,021	0,005

3. táblázat: havi szintű korrelációk

R ²	mért párolgásalapján számolt p.	vízháztartási egyenlet maradék tagjaként
szélsebesség	0,048	0,000
vízhőm.	0,306	0,525
léghőm. (talaj)	0,119	0,439
léghőm. (víz)	0,080	0,262
rel. nedvesség	0,312	0,020
napfénytartam	0,085	0,529
A-kád	0,001	0,221

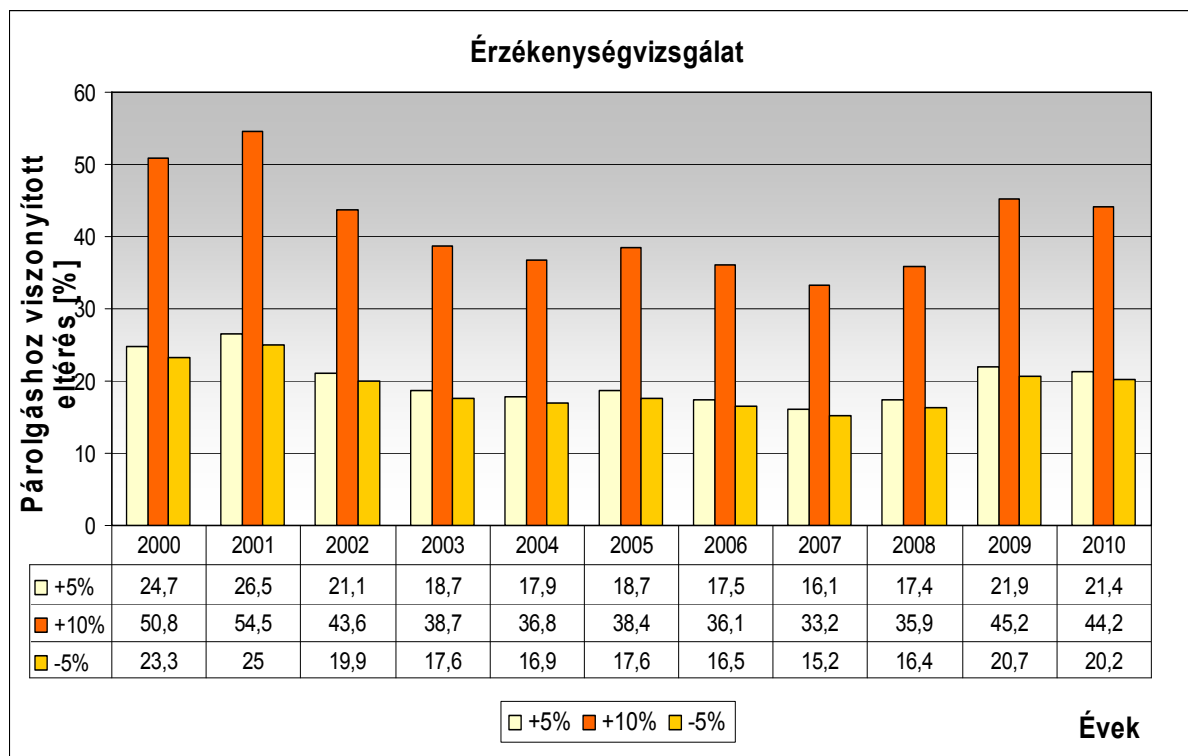
R ²	mért párolgásalapján számolt p.	vízháztartási egyenlet maradék tagjaként
nád albedója	0,398879662	0,230090307
sekély víz albedója	7,57128E-05	0,008770541
mély víz albedója	0,001120455	0,012300608

4. táblázat: éves szintű korrelációk

5.3.3.5. Érzékenységvizsgálat

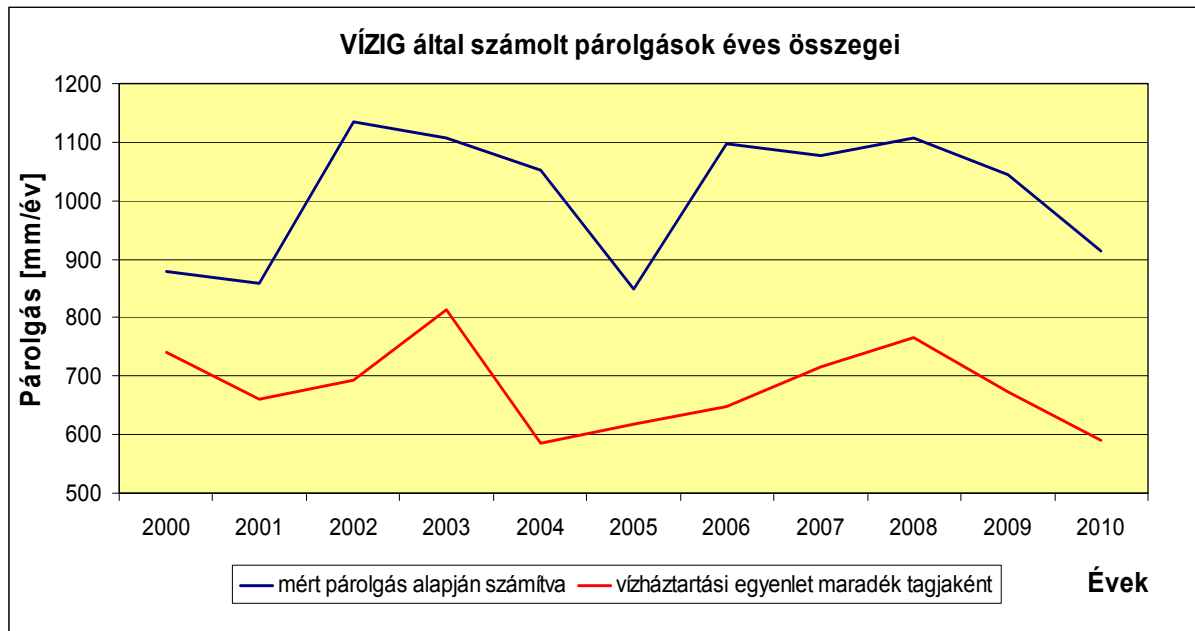
Az érzékenységvizsgálat megmutatja, hogy az adatgyűjtés pontatlansága vagy a bekövetkező változások milyen mértékben befolyásolják a számítások eredményeit. Ezt alkalmaztuk a jelenleg használatos fertő tavi párolgásképletnél (az ÉDUKÖVÍZIG adatait felhasználva). Az érzékenységvizsgálatot a vízhőmérsékletre végeztük el, mivel az egy nemlineáris tag, így arra a legérzékenyebb az egyenlet. Megvizsgáltuk, hogy ha növeljük a vízhőmérséklet értékét 5%-kal, akkor változik-e legalább 5%-kal a párolgás értéke. Pozitív eredményt kaptunk, mivel a havi párolgások változásai a tavaszi és a nyári hónapokban meghaladta az 5%-ot. Mivel 20% körüli eredményeket kaptunk, ezért tovább folytattuk a számításokat.

Elvégeztük 10%-ra, illetve -5%-ra is a vizsgálatot, mely alapján értelemszerűen az lett a konklúzió, hogy a párolgás értéke jelentősen függ a víz hőmérsékletétől. Ennek eredményeit a 15. ábrán mutatjuk be.



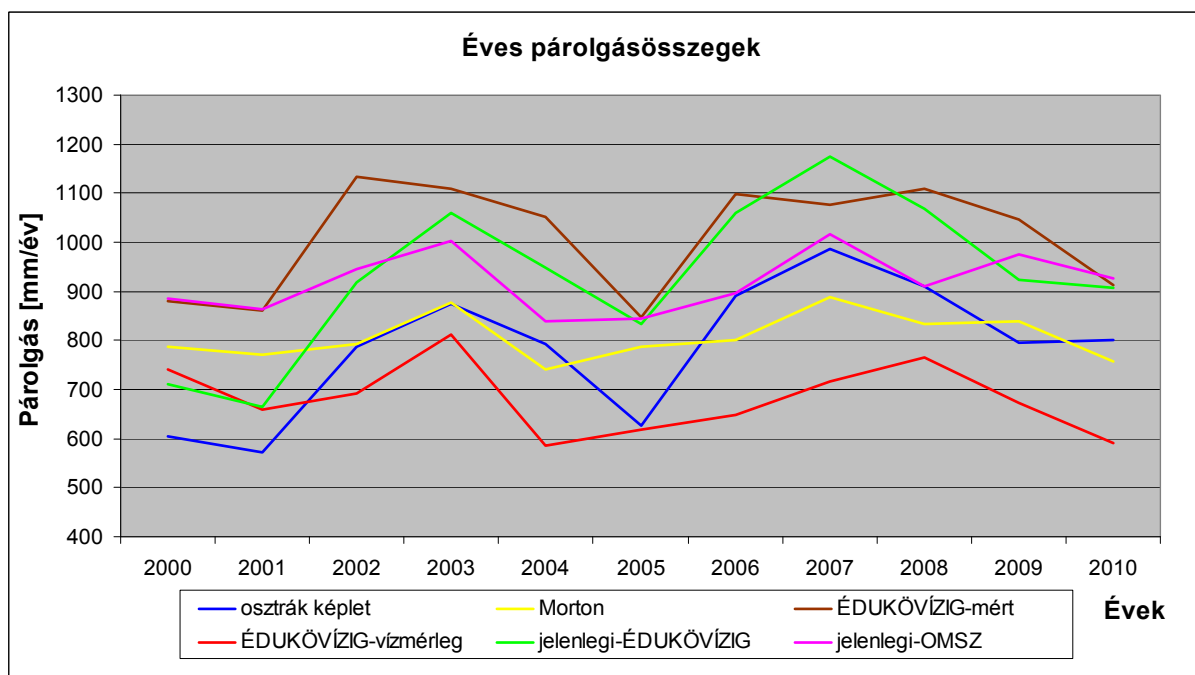
15. ábra: Érzékenységvizsgálat

5.4. Eredmények kiértékelése, elemzése

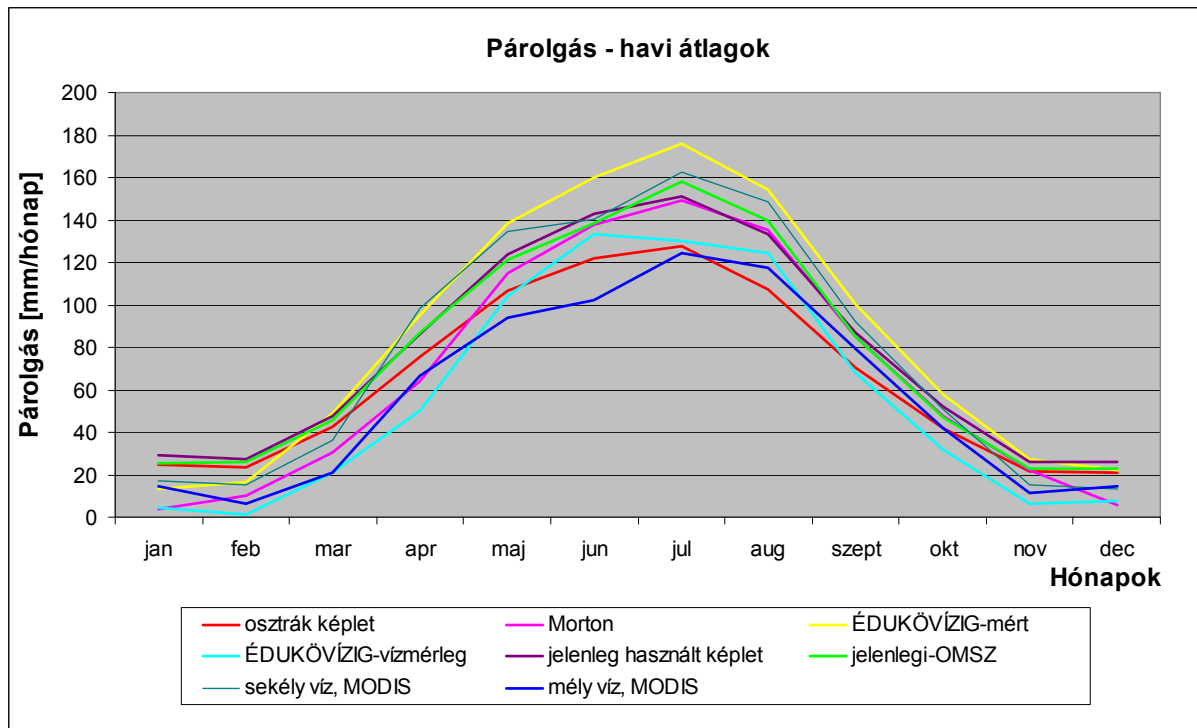


16. ábra: ÉDUKÖVÍZIG által számolt párolgások éves összegei

A havi hőmérsékletek éves alakulása alapján látjuk, hogy a nádas hőmérséklete a legmagasabb. A sekély víz értékei a decemberi hónapot kivéve folyamatosan a mély víz értékei felett maradnak. Ez valószínűleg annak tudható be, hogy eleve egy sekély vizű tóról beszélünk, melynél – alacsony vízmélysége miatt – a hőtározás nem érvényesül olyan szinten, mint egy nagyobb mélységű tónál.



17. ábra: Éves párolgásösszegek



18. ábra: Éves párolgásösszegek

Az éves párolgásösszegek közül jól láthatóan az ÉDUKÖVÍZIG mért párolgás alapján számolt értékei adják a legnagyobb párolgást, a legkisebbet pedig az általuk vízmérleg egyenlet alapján meghatározott párolgás adja. Morton WREVP programjával meghatározott párolgás került az átlaghoz legközelebb. Ennek a módszernek viszonylag kicsi az értéktartománya a többihez képest. Ehhez hasonlóan alakul az OMSZ adatait felhasználó jelenlegi képletessel számolt párolgás is, csak nagyobb értékekkel.

Az év folyamán 4 hónap van (január, február és november, december), amikor a tapasztalatok alapján a vízpárolgás relatíve alacsony – nem éri el a 40 mm/hónapot sem.

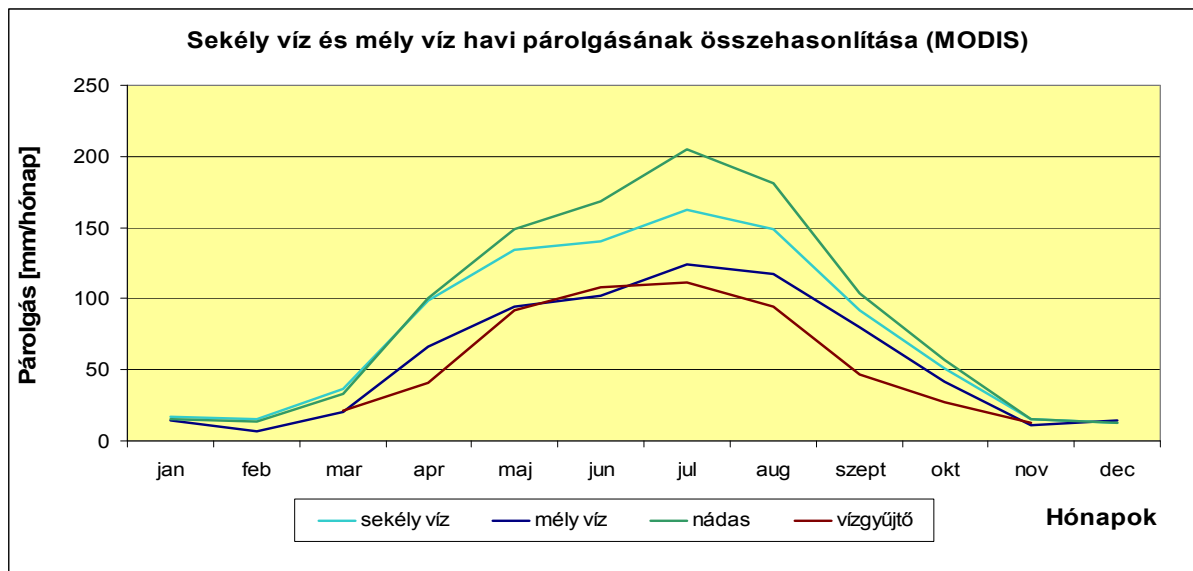
A nyár felé haladva növekvő párolgási értékek tapasztalhatók a tavaszi időszakban (március, április, május). A téli időszak közeledtével csökkenő párolgási értékek tapasztalhatók az őszi hónapokban, tehát szeptember, október hónapokban. Így könnyen belátható, hogy a legnagyobb párolgási értékek, és az átlagot jóval meghaladó párolgási mennyiség a nyári hónapokban tapasztalható. Ennek oka az éves hőmérsékletek alakulása.

A párolgások közül az ÉDUKÖVÍZIG mért adatok alapján számolt párolgásánál tapasztaljuk a legnagyobb párolgást végig az év folyamán. Ez alatt a MODIS műholdképek adatával számolt sekély víz párolgása legmagasabb, de csak a nyári hónapokban.

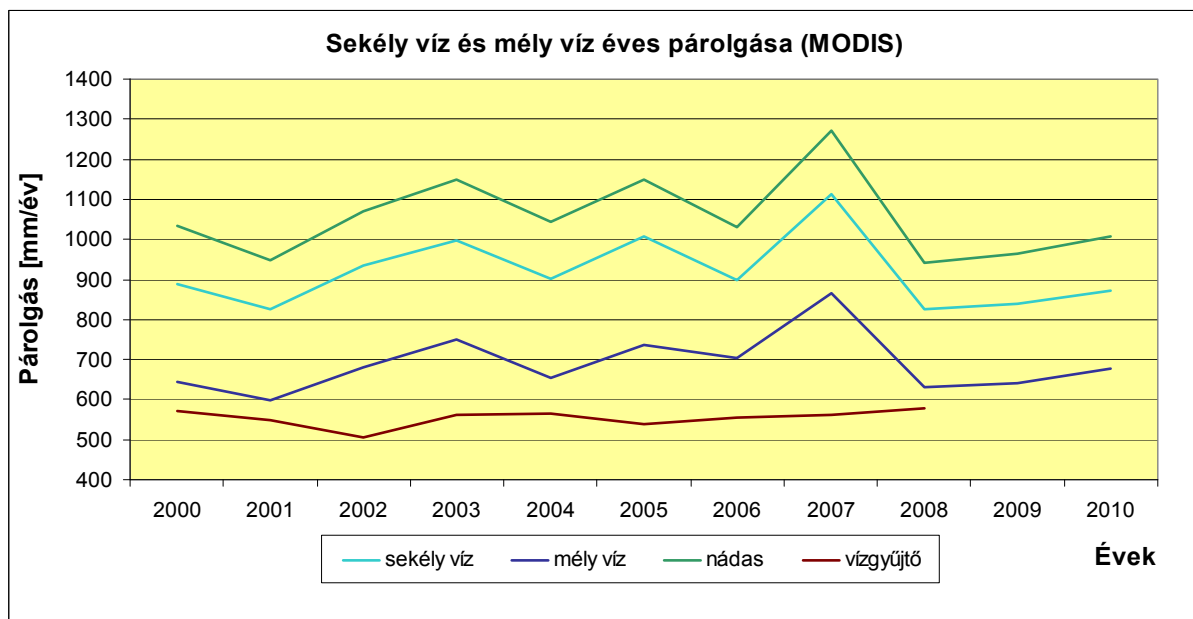
Legkisebb a mély víz párolgása, mivel ennek a legalacsonyabb a hőmérséklete. Ez azért is lehetséges, mivel az empirikus képletekhez felhasznált az ÉDUKÖVÍZIG, illetve az OMSZ által rendelkezésünkre bocsátott vízhőmérsékletek – MODIS műholdképek miatt bekategorizált –

sekély víz adataira vonatkoznak. (Az adatokat a Fertő tó magyarországi részéről szereztük be, ahol csak sekély vízi mérésekről beszélhetünk.)

Április-május határáig Morton párolgásbecslése kisebb értékeket ad az osztrák képlettel számolt párolgásnál, viszont májustól ez megfordul, és egészen decemberig így marad.



19. ábra: Sekély víz és mély víz havi párolgásának összehasonlítása (MODIS)

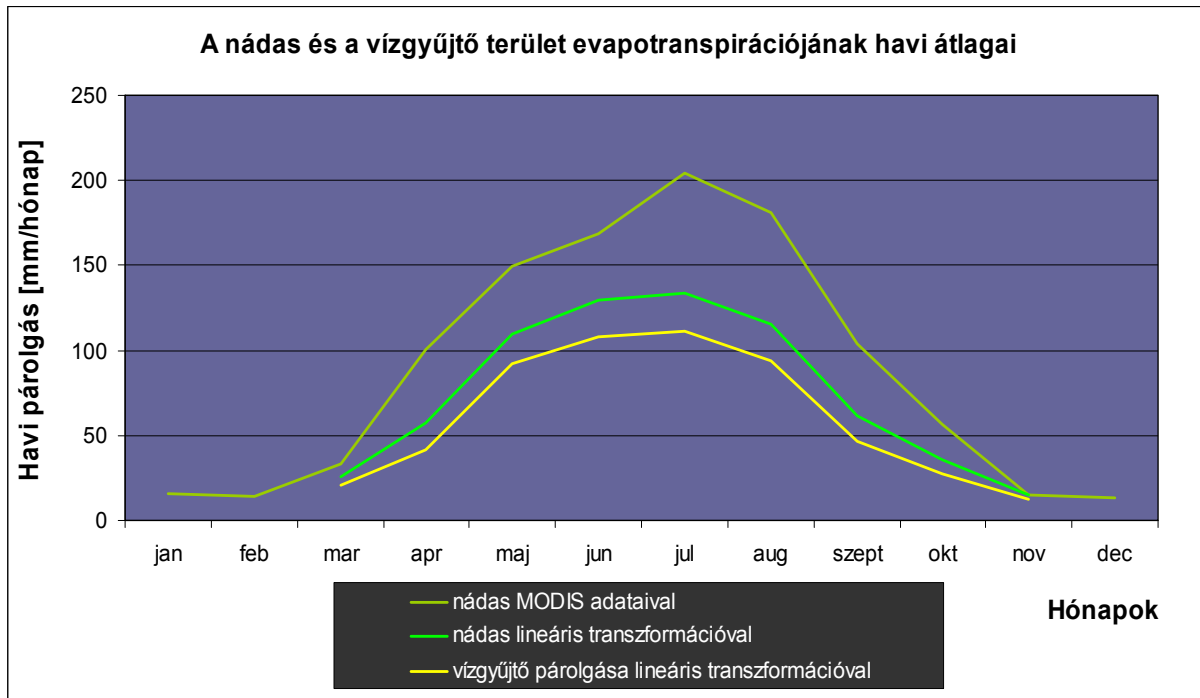


20. ábra: Sekély víz és mély víz éves párolgása (MODIS).

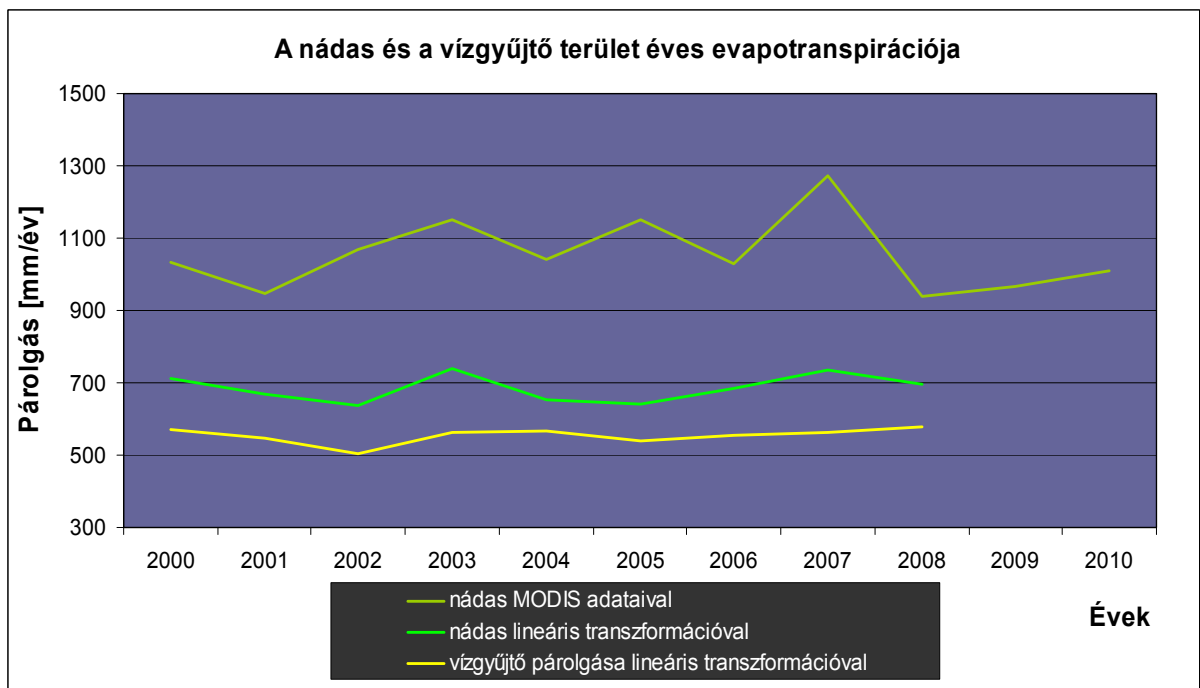
A vízgyűjtő, a magyarországi vízgyűjtőrész tó területével csökkentett területét jelenti!

A párolgásra kapott eredmények alapján is hasonló következtetésre jutunk, mint a hőmérsékletek elemzése során. A mély víz párolgási értékei is folyamatosan a sekély víz értékei alatt maradnak. Ez a hőmérsékletnek tudható be, valamint a tó sekély volta miatti kis hőtárolásnak. A vízgyűjtő területi párolgása végig a vízfelszíni értékei alatt maradnak,

ez azért is lehetséges, mivel a vízgyűjtőnek a tó területével csökkentett magyarországi részét vizsgáltuk.



21. ábra: A nádas és a vízgyűjtő terület evapotranspirációjának havi átlagai



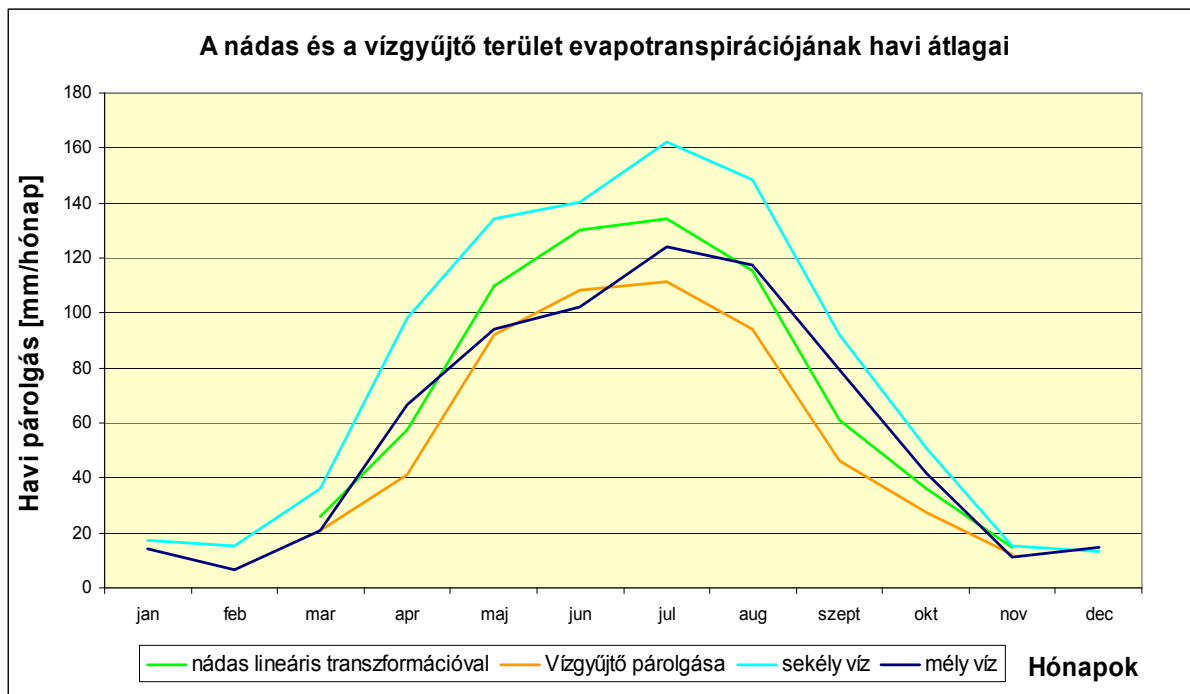
22. ábra: A nádas és a vízgyűjtő terület éves evapotranspirációja

A grafikonokon látható, hogy mind az éves párolgásösszegekben, mind a havi átlagokban lényegesen magasabb értékeket kapunk az empirikus módszerrel számolt nádpárolgásra (nádas MODIS adataival). Ennek több oka is lehet, többek közt az, hogy ebben a számításban

a vízfelület helyett a nádas párolgásának van döntő szerepe. Másik probléma lehet, hogy a tapasztalati képletek igen érzékenyen reagálnak a felszíni hőmérséklet alakulására, mint azt az érzékenységvizsgálat eredményei is mutatták. Emellett gondot okozhat, hogy a MODIS eleve más módszerrel méri a felszíni hőmérsékletet, mint a vízügyi szervek. Mivel a vízre vonatkozó MODIS adatok alapján számolt párolgások reálisnak tűnnek, ezért ez a felvetésünk, csak a nád felszíni hőmérsékletére vonatkozik.

Próbaképpen új nádkonstans értékeket lehetne bevezetni, azonban erre a kutatás keretein belül nincs lehetőségünk, meghatározása mérés- és időigényes feladat.

A lineáris transzformációval becsült nádas és vízgyűjtő párolgására reális értékek adódnak. Az elképzeléseknek megfelelően, hasonlóan alakul mindkét adatsor. A nádas párolgására kapott magasabb érték a tónak a vízgyűjtőterületből való kivágásának a következménye.

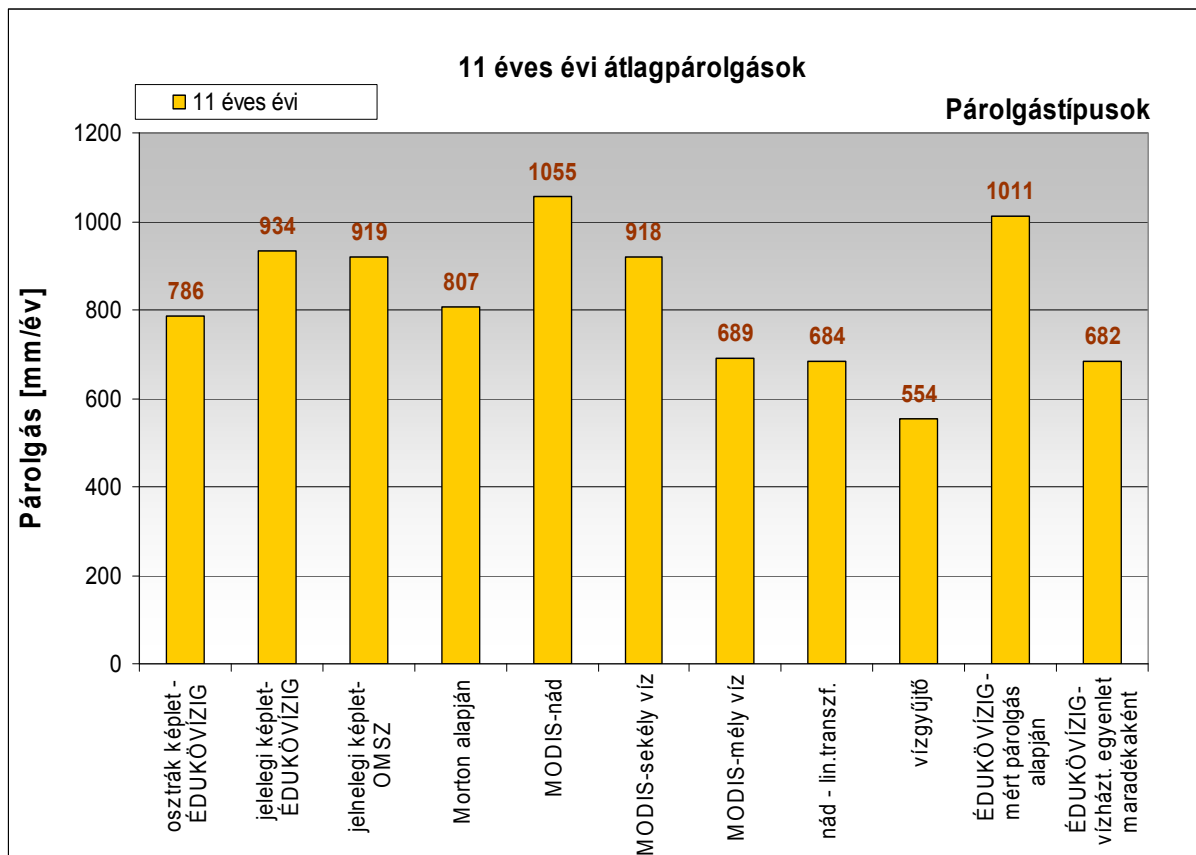


22. ábra: A nádas és vízgyűjtő terület evapotranspirációjának havi átlagai

A továbbiakban a kétféle nádpárolgás közötti viszonylag nagy eltérés, valamint a fentebb említett okok miatt a lineáris transzformációval meghatározott értékeket tekintjük mérvadóknak. Ezek alapján a nádas a sekély víznél kisebb párolgásértékeket ad, valamint a mély víz értékeit is csak a nyári hónapokban haladja meg.

Ha azt vizsgáljuk, hogy a tó védelmében szükséges-e a nádas irtása, annak érdekében, hogy a tó vízszintje ne csökkenjen, a párolgásadatok adnak választ. Mivel a nádas kevesebbet párologtat a tónál, ezért ha csökkentenénk a területét, az nem befolyásolná a tó vízszintjének alakulását.

A 11 éves átlagpárolgások számtani közepe 822 mm/év. Ez alapján Morton WREVP programja bizonyul a legbiztosabbnak, mivel ennek az eredménye közelíti meg a legjobban ezt az átlagot.



23. ábra: 11 éves évi átlagpárolgások

A lineáris transzformációval számolt vízgyűjtőterület párolgása kevesebbnek adódott, mint az átlag éves csapadékmennyiség. Ez is bizonyítja, hogy a lineáris transzformáció jó közelítést ad a vízgyűjtő evapotranspirációjára is. A következő legközelebbi párolgásbecslést a Neuwirth-féle osztrák képlet adja.

KONKLÚZIÓ ÉS JÖVŐBELI KITEKINTÉS

- A kutatás során megállapítást nyert, hogy a párolgás egyik legfontosabb tényezője a vízhőmérséklet, melyet korrelációs számításokkal, és érzékenységvizsgálattal támasztottunk alá. További kutatásokkal párolgás előrejelzést lehetne kidolgozni, melyet leginkább az aktuális párolgásra és a vízhőmérséklet alakulására alapoznánk.
- Tárgyaltuk a tó kiszáradását is, megfogalmazódott a kérdés, hogy milyen mértékben befolyásolják a nádassal borított területek a párolgást. Vizsgáltuk a nádas párolgását, és összehasonlítottuk a vízfelszín párolgásával. Eredményül azt kaptuk, hogy a nádas kevesebbet párologtat, mint a vízfelszín. Tehát a nádas területének esetleges csökkentésével, nem csökkenne a párolgás mértéke.
- Kutatásunk megfelelő alapot szolgáltathat további tavak párolgásbecslésének pontosításához, köztük a magyar tavakra is, pl. Balaton, Kis-Balaton, Velencei-tó. A Kis-Balatonnak és a Velencei tónak szintén jelentős a nádállománya. Távlati cél lenne egy műholdas méréseken alapuló új párolgásbecslő képlet kidolgozása is. Számításaink során, a nádas esetében azt tapasztaltuk, hogy az empirikus képleteket a MODIS adataival alkalmazva, a nádas párolgásértékei magasabbak, mint a lineáris transzformációval számolt értékek. Ennek kiküszöbölésére esetleg új nádkonstans értékek bevezetésére lenne szükség, melyeket a kutatás keretein belül nem tárgyaltuk, megismerésük mérés-, és időigényes feladat.
- Vizsgáltuk a nyílt vízfelszín és parti vízfelületek párolgásértékeinek alakulását. Felmerült a kérdés, hogy abban az esetben, ha jelentős eltérés is előfordulhat az értékek között, az indukálhat-e esetleges áramlásokat a tóban. Eredményül azt kaptuk, hogy a sekély víz hőmérséklete magasabb, illetve az is párologtat többet. Azonban az őszi időszaktól körülbelül azonos hőmérsékletűek ezek a vízfelületek, mivel sekélyvízű tóról beszélünk, így a hőtározása alapvetően alacsony. A vizsgált időszak alatt csak egy rövid időre fordult elő, mikor a sekélyebb vízrészek párolgása alacsonyabb volt, mint a mélyebb, nyílt vízfelszíné, például a Balaton esetében ez hosszabb időtartamot is jelenthetne, ugyanis változatosabban alakulnak a vízmélységek, ezáltal a tó hőtározása is nagyobb, ami pedig indukálhat tavi áramlásokat.
- Tény, hogy egy tó párolgását nem lehet mérni, csak becsülni, ezért az ÉDUKÖVÍZIG párolgásait tekinthetjük hitelesnek. Ezek alapján amelyik – számításainkkor alkalmazott – eljárás a legközelebb áll a mérvadó párolgáshoz, azt vehetjük ténylegesnek. Az ÉDUKÖVÍZIG által számolt párolgások közötti nagy eltérések miatt nem tudjuk melyik párolgáshoz viszonyítsuk a kutatásunk során használt módszereket. Ennek okán vettük az összes párolgástípus 11 éves átlagait – beleértve az ÉDUKÖVÍZIG által számolt párolgásokat is –, és ezek átlagához legközelebb eső általunk használt módszert tekintjük megfelelőnek. Az eljárások közül a Morton-féle párolgásbecslés bizonyult a legpontosabbnak, mivel annak átlaga (807 mm/év) közelíti meg leginkább az összes párolgástípusnak vett számtani közepét (822 mm/év).

Az ÉDUKÖVÍZIG párolgásadatainak 11 éves átlagai közé esik a számítások során felhasznált módszerek eredményeként kapott éves párolgásösszegek összes átlaga. Ezek szerint a kutatásunk során alkalmazott párolgásbecslés-típusok közelebbi eredményt adtak a várhatóan tényleges párolgásértékhez.

A párolgásbecslő módszerek tanulmányozásával elért eredményeink, segítségére lehetnek az ÉDUKÖVÍZIG-nek az általuk számolt két típusú párolgásadatok egymáshoz való közelítéséhez is.

IRODALOMJEGYZÉK

- I. **Antal E., Kalmár I., Kováts Z., Kozma F., Kozmáné Tóth E., Nagyné Dávid A., Pannonhalmi M., Walkovszky A.**, 1982. A Fertő-tó természeti adottságai
- II. **Baranyi Sándor - Domokos Miklós**, A Fertő-tó vízszintszabályozás-fejlesztésének lehetőségei, Vízügyi közlemények, 1985. (67. évf.) 3. sz.
- III. **Bouchet**, 1963. Komplementáris elmélet
- IV. **Brutsaert, W.**, 2005. Hydrology: An Introduction
- V. **Kontur György**, A Fertő-tó új vízháztartása, Vízügyi közlemények, 1975. (57. évf.) 2. sz.
- VI. **Kontur I., Koris K., Winter J.**, 2003. Hidrológiai számítások
- VII. **Kovács Ákos Domonkos**, 2011. Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai
- VIII. **Kozmáné Tóth Erzsébet - Urbán Judit**, A Fertő-tó meteorológiai és hidrológiai jellemzői, Hidrológiai közlöny, 1980. (60. évf.) 7. sz.
- IX. **Morton, F.I.**, 1983. Operational estimates of lake evaporation
- X. **Morton, F.I., Ricard, F., Fogarasi, S.**, 1985. Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation – Program WREVP
- XI. **Pannonhalmi Miklós**, A Fertő-tó vízgazdálkodása, Vízügyi közlemények, 1999. (81. évf.) 2. sz.
- XII. **Pannonhalmi M., Sütő L. (ÉDUKÖVÍZIG)**, 2003. A Fertő tó hidrológiai és vízkémiai állapotának elemzése
- XIII. **Szilágyi, J., Kovács, Á.**, 2011. A calibration-free evapotranspiration mapping technique for spatially-distributed regional-scale hydrologic modeling
- XIV. www.ferto-neusiedlersee.hu
- XV. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
- XVI. http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met_Report_01_online.pdf