



Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Párolgásbecslő módszerek összehasonlító vizsgálata talajvízforgalmi modellezéssel

TDK dolgozat

Készítette:

György Máté

Konzulens:

Dr. Kozma Zsolt

Egyetemi docens, VKKT

Budapest

2021

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
2	Szakirodalmi áttekintés	5
2.1	Az evapotranszspiráció, mint a vízmérleg része	5
2.1.1	Potenciális evapotranszspiráció.....	6
2.2	Potenciális evapotranszspirációt becslő módszerek áttekintése	6
2.2.1	Penman – Monteith formula	6
2.2.2	Priestley – Taylor formula	7
2.2.3	Makkink formula (Jianbiao, et al., 2005).....	7
2.2.4	Hargreaves – Samani formula (Jianbiao, et al., 2005).....	8
2.3	Talajtan	8
2.3.1	Hidrogeológiai változók áttekintése	9
3	Módszertan.....	11
3.1	Adatgyűjtés.....	11
3.2	Projekttek összeállítása talajvízforgalmi modellezéshez.....	13
3.2.1	Vizsgált földrajzi helyszínek.....	13
3.2.2	Vizsgált talajtípusok.....	16
3.2.3	PET becslő módszerek alkalmazása	18
3.3	Talajvízforgalmi modell	21
4	Eredmények, kiértékelés	23
4.1	PET idősorok értékelése	23
4.2	Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése	26
4.2.1	Telítettség.....	27
4.2.2	Talajvíz utánpótlás	28
4.2.3	Tényleges transzpiráció	29
4.3	Statisztikai összehasonlító vizsgálatok a hidrológiai változók segítségével ..	30
4.3.1	Becsülő módszerek és talajok statisztikai összevetése	30

4.3.2	Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése	35
5	Összefoglalás	38
	Köszönetnyilvánítás.....	41
6	Irodalomjegyzék	42

1 Bevezetés

Az éghajlatváltozás szerteágazó kutatási irányjai között jelentős helyet foglal el annak hatáselemzése. Az egyre szélsőségesebb körülmények következtében növekszik az igény a változások minél pontosabb leírására is. Mivel a klíma, illetve annak változása szoros kapcsolatban van a vízkörforgással, ezért úgy gondolom, munkánk hiánypótló lehet a gyakorlatban is.

Tudományos dolgozatomban ezért a földfelszín energiamérlegének és a hidrológiai körforgásnak meghatározó folyamatát, az evapotranszspirációt vizsgálom. Elsősorban a potenciális evapotranszspiráció (PET) becslési módszereit tekintem át, illetve talajvízforgalmi szimulációk segítségével értékelem, ezzel hozzájárulva és elősegítve a légkör-növény-talaj rendszer nehezen előre becsülhető viselkedésének a valósághoz legjobban közelítő leírását. Mint minden jelenség leírását, a PET meghatározás pontosságát is alapvetően a kiinduló adatok és a becslésre használt módszerek befolyásolják. Vizsgálataim során az eltérő adatbázisok és a számítási eljárások különbözőségéből származó eltéréseket értékelem ki, több magyarországi pontra. Ezen helyszínek kiválasztásában az eltérő meteorológiai viszonyok, a nagy talajtani változékonyság és a PET számítási cellák jelenléte kapja a fő szerepet.

Az elmúlt években a Kárpát-medencére több hosszú idejű, szabad hozzáférésű meteorológiai térképes adatbázis is elérhetővé vált. Munkám során ezek közül a FORESEE v3.1, illetve a CARPATCLIM idősorait dolgoztam fel. A CARPATCLIM adatbázis térbeli felbontása nagyobb ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) és az elérhető meteorológiai paraméterek köre is szélesebb, viszont csak a 1961-2010 időszakot fedi le. A FORESEE térbeli felbontása kisebb ($0.16^\circ \times 0.16^\circ$), viszont előnye, hogy a benne szereplő 1951-től induló historikus adatokat 10 klímaprojekcióval harmonizálták, így az adatbázis 2100-ig biztosít előrejelzett idősorokat.

Nincs széleskörűen használt direkt módszer a potenciális ET_0 (PET) és a tényleges ET (AET) mérésére, helyette a szakirodalomban számos indirekt módszer ismert. Ezek egyik fontos csoportját jelentik a PET becslésére használt eljárások, mint például a Hargreaves, a Priestley-Taylor, a Makkink formulák, illetve a leginkább elfogadott és referenciának tekintett Penman-Monteith egyenlet. Ezek alapadat igénye és megbízhatósága is eltérő. A PET és AET értéke térben és időben rendkívül változékonny, és nagymértékben függ a légkör-növény-talaj rendszer helyi és pillanatnyi sajátosságaitól. Céлом volt, hogy a PET hidrológiai hatásait megismerjem, ezért talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámítások segítségével vizsgáltam, hogy az egyes becslési eljárások hogyan módosítanák a talajszelvények vízmérlegét. A folyamatot HYDRUS-1D modellező szoftverben fiktív és valós

talajszelvényekre vizsgáltam. Az egyes környezeti hatásokat lépcsőzetesen építtem a modellbe, hogy ezek befolyását külön tudjam értelmezni. Ennek megfelelően a talajszelvényeket homogénként kezeltem, szabad alsó kifolyással, ahol vegetációt és a vizsgált talajszelvény vastagságát nem módosítottam.

A hatáselemzésnek számos projektben gyakorlati jelentősége lehet, mivel a hidrológiai modellek sikeressége jelentős részben a peremfeltételi idősorok megbízhatóságán múlik. A statisztikai összehasonlító módszerekkel megpróbáltam rávilágítani arra, hogy az egyes eljárások szélsőértékeiben, várható értékeiben vagy egyéb mutatószámaiban térnek-e el. A Penman-Monteith referenciamódszerrel való összevetés lehetőséget adott arra (a múltira vonatkozóan), hogy a módszerek közti eltérésre megfigyeléseket tudtam tenni. Az eredmények hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a klímaprojekciókat tartalmazó adatbázist és a kevesebb paramétert igénylő módszert felhasználva megbízhatóbb becslést (éghajlati hatáselemzést) tudjunk végezni a jövőre.

2 Szakirodalmi áttekintés

A hidrológia a természetes változékonysága és az ismeretek hiánya miatt rendkívül bizonytalan tudományág (*Montanari, et al., 2009*). Nem tudjuk részletesen megfigyelni, és így matematikailag sem tudjuk ábrázolni a hidrológiai szabályozási térfogatok (talajok, víztartó rétegek, folyómedrek, vízgyűjtők) geometriáját, valamint a legtöbb kezdeti és **peremfeltételt**. A hidrológusok jellemzően adathiányos körülmények között dolgoznak.

Mint ahogy a talajvíz úgy az evapotranszpiráció sem mérhető közvetlenül. Az evapotranszpirációs ráta gyakorlatilag mindig jelentős, és nagyon gyakran a vízmérleg fő összetevője. Ezért a hidrológiai tudomány egyik legnagyobb kihívása a regionális párolgás meghatározása (*Dingman, 2015*).

2.1 Az evapotranszpiráció, mint a vízmérleg része

Az evapotranszpiráció mindazon folyamatok gyűjtőfogalma, amelyek során a földfelszínen vagy annak közelében a folyékony vagy szilárd fázisban lévő víz légköri vízgőzzé alakul. A kifejezés tehát magában foglalja a folyókból és tavakból (nyílt víz), a csupasz talajból és a növényzet felszínéről történő párolgást (intercepciós veszteség); a növények leveleiből történő párolgást (transzspiráció); valamint a jég és a hó felszínéről történő szublimációt. Az evapotranszpirációt nagyrészt meteorológiai változók határozzák meg, így mind a csapadék, mind az evapotranszpiráció külsőleg előírt éghajlati "peremfeltételnek" tekinthető. Megjegyzendő, hogy a vízmérleg valamennyi összetevője ki van téve az évközi változékonyságnak, esetleg ciklusoknak és trendeknek, valamint a szezonális változékonyságnak, ezért az egyes összetevők hosszú távú átlagértékének értékelése (akár egyetlen mérőállomáson is) a statisztikai elvek gondos alkalmazását igényli (*Dingman, 2015*).

A **transzspiráció** a víz párolgása a növények erezetéből a légkörbe. A teljes folyamat magában foglalja a talajvíznek a növényi gyökerek általi felszívódását; a gyökerek, a szár és az ágak erezetén keresztül a levelekbe történő folyékony formában történő átjutását; és a levél erezetén keresztül az apró sztómák falába történő elpárolgását, ahol a kipárologtatás történik. Az ezekben az üregekben lévő vízgőz ezután a levél felületén lévő nyílásokon, az úgynevezett sztómákon keresztül a környezeti levegőbe jut. Fontos hangsúlyozni, hogy a transzspiráció fizikai, nem pedig metabolikus folyamat (*Dingman, 2015*).

2.1.1 Potenciális evapotranspiráció

A potenciális evapotranspiráció (PET) az a sebesség, amellyel az evapotranspiráció végbe menne egy nagy, növekvő növényzettel teljesen és egyenletesen borított területen, korlátlan talajvízkészlettel és advekción vagy hőtároló hatások nélkül. Thornthwaite (1948) éghajlati osztályozási rendszerének részeként alakult ki, aki szerint a fogalom alapvetően az éghajlattól vagy az időjárástól függ, függetlenül a felszíni jellemzőktől. Hasznosnak bizonyult a PET fogalmának, mint az éghajlat vagy a környezeti meteorológiai viszonyok "szárítóerejének" indexként való megtartása.

A potenciális evapotranspiráció közvetlen mérése sokkal nehezebb és körülményesebb, mint a csapadék és a patakok vízhozamának (precipitation and streamflow) mérése, és általában nem is kivitelezhető. Ezért a hidrológusok számos olyan módszert dolgoztak ki, amelyek a könnyebben mérhető mennyiségek mérésén alapuló becsléseket adnak a párolgásról.

2.2 Potenciális evapotranszspirációt becsülő módszerek áttekintése

Számítási módszerek osztályozása (Dingman, 2015):

- Sugárzás-alapú: A nettó sugárzást és a levegő hőmérsékletét használja.
- Kombináció: A Penman-féle kombinációs egyenleten alapul; a nettó sugárzást, a levegő hőmérsékletét, a szélesebséget és a relatív páratartalmat használja.
- Hőmérséklet-alapú: Csak a levegő hőmérsékletét (gyakran éghajlati átlagokat) és néha a nap hosszát (a napfelkeltétől napnyugtáig eltelt idő) használja.

A módszerek némelyike nem igényel információt a felszín jellegéről, és úgy tekinthető, hogy a referencia párolgásnak egy változatát adja, mások felszínspecifikusak, és információt igényelnek az albedóról, a növényzet magasságáról, a maximális sztómavezetésről, a levélfelület-indexről és/vagy más tényezőkről (Dingman, 2015).

2.2.1 Penman – Monteith formula

A FAO-56 Penman-Monteith (FAO-56 PM) módszer a következőképpen számítja ki a napi potenciális ET-t (PET_{pm}) (DeJonge & Thorp, 2017):

$$PET = K_{cs}ET_{pm}$$

$$ET_{pm} = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(\frac{r_s}{r_a}\right)}$$

$$K_{cs} = 1 + (EORATIO - 1) \frac{LAI}{6}$$

ahol ET_{pm} a referencia párolgás (mm d^{-1}), R_n a nettó sugárzás ($\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$), G a talaj hőáramlása ($\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$), ρ_a a levegő sűrűsége (kg m^{-3}), c_p a száraz levegő fajhője ($1010 \text{ Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$), $e_s - e_a$ a párányomáshiány (kPa), Δ a párányomás-hőmérséklet görbe meredeksége (kPa °C^{-1}), γ a pszichrometriai állandó (kPa °C^{-1}), r_s a térfogati felületi ellenállás (sm^{-1}), r_a az aerodinamikai ellenállás (s m^{-2}), K_{cs} a terméskoefficiens, LAI a szimulált levélfelület-index, és $EORATIO$ a maximális K_{cs} , ha a LAI nagyobb vagy egyenlő 6.

Jensen és munkatársai (1990) 19 különböző megközelítéssel kiszámított PET-et hasonlítottak össze a referencia-termesztésből származó, 11 különböző szélességi és tengerszint feletti magasságot lefedő helyen, mérő lizimétereken mért evapotranszspirációval. A Penman-Monteith módszer adta a legjobb eredményeket.

2.2.2 Priestley – Taylor formula

A Priestley-Taylor (PT) megközelítés (Priestley & Taylor, 1972) számos éghajlati régióban jó alternatívának bizonyult (Jamieson, 1982); (Pereira & Nova, 1992). Priestley és Taylor (1972) az egyenletet a következőképpen határozták meg:

$$ET_{pt} = \frac{\alpha \Delta (R_n - G)}{\lambda (\Delta + \gamma)}$$

ahol ET_{pt} a párolgás (mm d^{-1}), α egy konstans (=1,26), λ a látens párolgási hő (MJ kg^{-1}), Δ a gőznyomás-hőmérséklet görbe meredeksége (kPa °C^{-1}), R_n a nettó napsugárzás ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G a napi talajhőáram ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) és γ a pszichrometriai állandó (kPa °C^{-1}).

2.2.3 Makkink formula (Jianbiao, et al., 2005)

$$PET = 0,61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_s}{58,5} - 0,12$$

Az egyenletben szereplő változók jelentése és mértékegysége megegyezik a Priestley-Taylor módszernél feltüntetettekkel, R_s a napi napsugárzás mértéke (ly/nap).

2.2.4 Hargreaves – Samani formula (Jianbiao, et al., 2005)

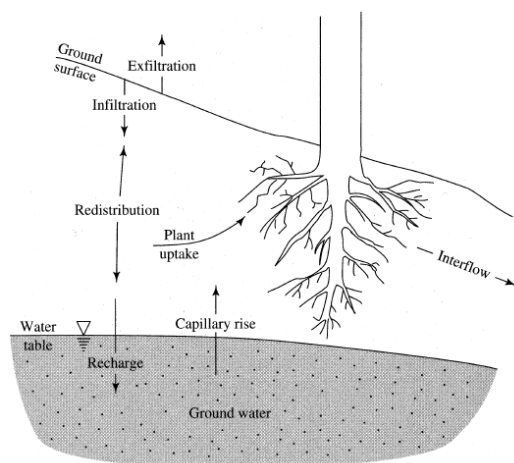
$$PET = 0,0023 \cdot R_a \cdot TD^{0.5} \cdot (T + 17,8)$$

ahol PET a napi PET (mm/nap); λ a látens párolgási hő (MJ/kg); T a napi átlagos léghőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$); R_a a földönkívüli napsugárzás (MJ/m²/nap; és TD a napi különbség a maximális és minimális léghőmérséklet között ($^{\circ}\text{C}$). A formula részletesebb számítási lépéseire a 3.2.3 fejezetben térek ki.

A hidrológiai ciklus működését szimuláló számítógépes modelleket széles körben használják a tudományos vizsgálatok eszközeként, a természeti veszélyek valós idejű előrejelzésének eszközeként, valamint az éghajlatváltozás vagy a javasolt vízkészlet-infrastruktúra hosszabb távú hatásainak értékelésére. Minden alkalmazásban rendkívül fontos a modell kimeneti válaszában bizonytalanságát számszerűsíteni, és a bizonytalanság értékelése egyre nagyobb figyelmet kap a hidrológiai kutatásokban (Montanari, et al., 2009). A bizonytalanság megértése és annak megértése, hogyan terjed a számításokban, a tudomány egyik alapvető szempontja.

2.3 Talajtan

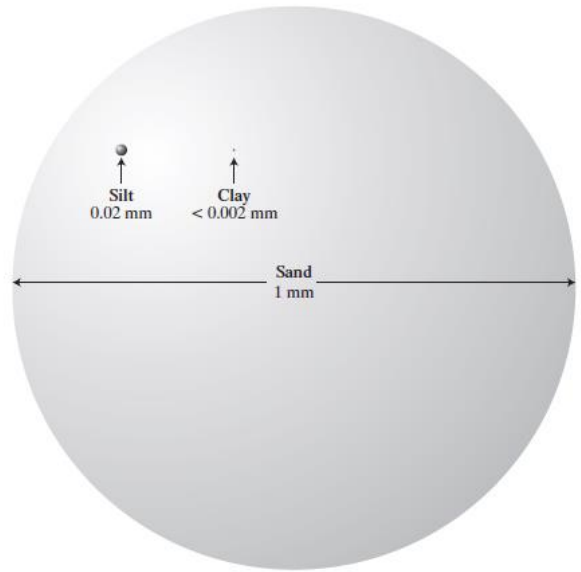
A 1.ábra a porózus felszín alatti anyagokban a víz útját leíró kifejezéseket mutatja. Ha a talaj pórusai a felszínen nincsenek teljesen kitöltve vízzel, az eső és a hóolvadás egy része a beszivárgás folyamatán keresztül jut a talajba, ahol a gravitációs és a nyomóerőknek van kitéve. A gravitáció természetesen mindenütt jelen van, állandó és lefelé irányul. A telítetlen zónában (más néven vadózus zónában) a talajok pórusaiban levegő és víz található; a nyomóerő a felületi feszültségnek köszönhető, és a nyomás kisebb, mint a légköri nyomás (Dingman, 2015).



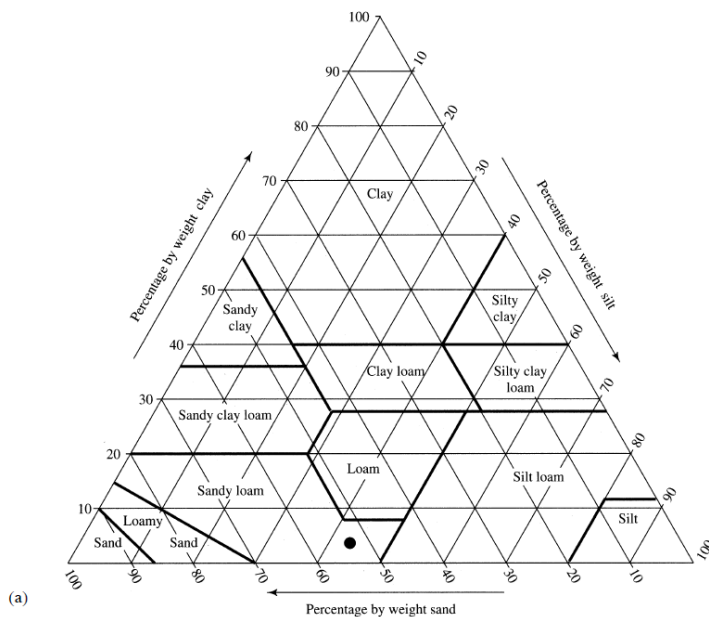
A függőlegesen lefelé mozgó víz talajvíz-utánpótlásként érkezik a telített zónába. A talajvízszint a telített zóna ingadozó felső határa, ahol a nyomás légköri. A telített zónában a talaj pórusai teljesen megteltek vízzel, és a nyomás a felette lévő víz súlya miatt nagyobb, mint a légköri nyomás (Dingman, 2015).

Ábra 1: Vízforgalmat leíró fogalmak definíciója a telítetlen zónában, forrás: (Dingman, 2015)

A pórusok mérete, amelyeken keresztül a víz áramlik, megközelítőleg megegyezik a szemcsemérettel (amelyet a szemcseátmérő, d jellemez), és a pórusméretek eloszlását nagyrészt a szemcseátméret-eloszlás határozza meg. A természetes talajrészecskék átmérőjének tartománya rendkívül nagy (Ábra 2.).



Ábra 2: A homok, iszap és agyag relatív méretei, forrás: (Dingman, 2015)



Ábra 3: USDA talajtextúraháromszög, forrás: (Dingman, 2015)

2.3.1 Hidrogeológiai változók áttekintése

Víztartalom (Dingman, 2015)

A térfogati víztartalom θ (más néven víztartalom vagy talajnedvesség-tartalom) a víz térfogatának és a talaj térfogatának aránya:

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}$$

Az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériuma egy széles körben használt rendszert dolgozott ki, amely az agyag ($d < 0,002$ mm), iszap ($0,002 \leq d < 0,05$ mm) és homok ($0,05 \leq d < 2$ mm) tömegaránya alapján osztja a talajszerkezeti kifejezéseket a talajokra (Ábra 3.) (Dingman, 2015).

A természetes talajok víztartalma jellemzően nagymértékben változik függőlegesen, vízszintesen és az idő függvényében. A θ elméleti tartománya 0 (teljesen száraz) és (telítettség) között van.

Telítettség (Dingman, 2015)

A telítettség vagy nedvességtartalom Θ a vizet tartalmazó pórusok aránya:

$$\Theta = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{\theta}{\phi}$$

A **porozitás** a pórusok aránya a talaj térfogatában:

$$\phi = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$

Ahol V_a – levegőtér fogat V_w – víztér fogat V_v – pórustér fogat

Hidraulikai vezetőképesség (Dingman, 2015)

A hidraulikai vezetőképesség az a sebesség (térfogat egységnyi idő alatt egységnyi területre vetítve), amellyel a víz egy porózus közegen keresztül mozog egységnyi potenciális-energia gradiens mellett ($dh/dx = 1$). Telített körülmények között ezt a sebességet a víz átjutására rendelkezésre álló útvonalak keresztmetszete határozza meg, amely arányos a d^2 -vel. Telítetlen áramlás esetén ezt a területet a szemcseméret és a telítettség mértéke egyaránt meghatározza. A hidraulikus vezetőképesség a közeg és a folyadék jellegétől is függ. Az összefüggés a következő

$$K_h = C \cdot d^2 \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} = C \cdot d^2 \cdot \frac{g}{\nu}$$

ahol d az átlagos szemcseátmérő, g a gravitációs gyorsulás, ρ a folyadék tömegsűrűsége, μ a dinamikus viszkozitás, ν a kinematikus viszkozitás ($\equiv \mu/\rho$), és C egy arányossági paraméter, amely a közeg tulajdonságaitól függ, mint például a szemcsék alakja, méreteloszlása és tömörsége.

3 Módszertan

3.1 Adatgyűjtés

A modellszámítások során az eredmények bizonytalanságának szempontjából kulcskérdés az elérhető és felhasználható adatok mennyisége és minősége. A Kárpát-medence térségére a FORESEE v3.1 és a CARPATCLIM webes adatbázisok szolgáltatnak nyílt meteorológiai adathozzáférést. Célszerűnek láttam mindkettőt belevonni a dolgozatomba, mivel így arra is választ kaphatok, hogy az adatbázisok alapvetően eltérnek-e egymástól. Ha a megfigyelési adatokban nincs olyan szignifikáns különbség, ami a számítási eredményekben jelentős eltérést okozna, akkor az mindkét adatbázis megbízható alkalmazhatóságát bizonyítaná. Az Eötvös Lóránt Tudományegyetem által fejlesztett FORESEE v3.1 (Open Database FOR ClimatE Change-Related Impact Studies in CEntral Europe) a jövőre vonatkozóan, 2100-ig tartalmaz idősorokat napi felbontásban, amelyeket 10 különböző éghajlatelőrejelző modell harmonizálásával állítottak elő (*FORESEE, 2021*). Ennek köszönhetően az adatbázis segítségével a jövőre vonatkozóan is vizsgálatokat lehetne tenni. Ezzel szemben az Országos Meteorológiai Szolgálat által fenntartott CARPATCLIM adatai jelenleg a 1961-2010 időszakot fedik le (*CARPATCLIM, 2021*).

A két adatkészletből származó különbségekhez vezethet, hogy a FORESEE térbeli rácshálójának cellafelbontása $0,16^\circ \times 0,16^\circ$, amíg a CARPATCLIM adatbázisé nagyobb, $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Továbbá, hogy bár a megfigyelési adatok mindkét esetben a lefedett térségen, szórta elhelyezkedő mérőállomásokról („horgonypontokról”) származnak, de a rácsháló többi pontjára eltérő interpolálási eljárással állítottak elő adatokat. A FORESEE-hoz tartozó múltbeli idősorok az E-OBS és CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) adatkészleten alapulnak (*Dobor, et al., 2015*), ahol a hőmérséklet esetében a napi anomáliákat kriging módszerrel interpolálták, csakúgy, mint a csapadékmutató esetében, ahol először a csapadék állapotát (nedves/száraz), majd a "nedves" $0,1$ fokos rácspontokban a csapadékösszeget interpolálták, univerzális kriging alkalmazásával (*Hofstra, et al., 2009*). A napi globális sugárzás térben és időben igen változékony, elsősorban a felhőzet mintázatától függ. A helyszíni sugárzás adatok interpolálása E-OBS esetében, többszörös, adaptív regressziós spline-ok (MARS - Multiple Adaptive Regression Splines) segítségével történt (*ECA&D, 2021*). A CRU-TS adatkészletét szögtávolság súlyozás (ADW - angular distance weighting) interpolációs módszerrel állították elő, amit később háromszögeléses metódusokkal finomítottak (TRIGRID, TRIANGULATE) (*Harris, et al., 2020*).

Mivel a megfelelő interpolációs módszer a meteorológiai elem valószínűségi eloszlásától függ, ezért a CARPATCLIM adatbázisának előállításában is több fajta eljárást alkalmaztak a MISH v1.01 szoftver segítségével. A szoftver – éghajlati elemtől függően - additív (normális eloszlást feltételez, pl. hőmérséklet) vagy multiplikatív (kvázi lognormális eloszlást feltételez, pl. csapadék) interpoláló képlete az éghajlati statisztikai paraméterek modellezéséből származó eredményeket használja fel (Bihari et al., 2013).

Mindkét adatbázisból az **1990 jan. 01. – 1999. dec. 31.** időszakra vonatkozó minimum és maximum napi **hőmérséklet**, valamint **csapadék és sugárzás** adatokat töltöttem le, ami elsősorban a PET számítására alkalmas Hargreaves - Samani formulához volt szükséges. A három további becslő módszer esetében kész PET idősorok voltak elérhetőek az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) nyílt adatbázisában (OMSZ, 2021). Mivel ennek rácshálója és az ahhoz tartozó alapadatai a CARPATCLIM-ével megegyeznek (ugyanaz az adatgazda), ezért a Penman-Monteith, Priestley-Taylor és Makkink módszerek számítási lépéseinek elvégzésétől eltekintettem és csak az OMSZ által számított PET adatokkal dolgoztam tovább. Felhívnom a figyelmet arra, hogy a későbbiekben ezért különböztetem meg az OMSZ jelölést, de a modellek egy részének bementi adataiban a CARPATCLIM-ből származó meteorológiai (csapadék és léghőmérséklet) idősorok az OMSZ-ből származó PET-ekkel közösen lettek alkalmazva. A letöltött adatokat tehát később közvetlenül használtam fel a modellszámításokhoz is, de szükségem volt rájuk például a relatív nedvességtartalom számításához is a FORESEE adatbázis esetében. Az adatbázisok jellemzőit a **Táblázat 1** tartalmazza:

	FORESEE v3.1	CARPATCLIM
Különbségek		
Rácsháló	0,16° x 0,16°	0,1° x 0,1°
Interpolációs módszer	E-OBS, CRU TS: Kriging MARS ADW háromszögelés	MISH v1.01: Additív képlet Multiplikatív képlet (modellezési eredményekből)
Elérhető időszak	1951-2100	1961-2010
Letöltött meteorológiai idősorok (napi felbontás)		
Napi maximális hőmérséklet	[°C]	[°C]
Napi minimális hőmérséklet	[°C]	[°C]

Napi átlaghőmérséklet	[°C]	[°C]
Csapadék	[cm/d]	[mm/d]
Átlag vízgőz nyomás	[Pa]	[hPa]
Rövidhullámú sugárzás fluxussűrűségének átlaga	[W/m ²]	-
Relatív nedvességtartalom	-	[%]
Potenciális evapotranspiráció (OMSZ)	-	[mm]

Táblázat 1: Adatbázisok összesítése és összehasonlítása

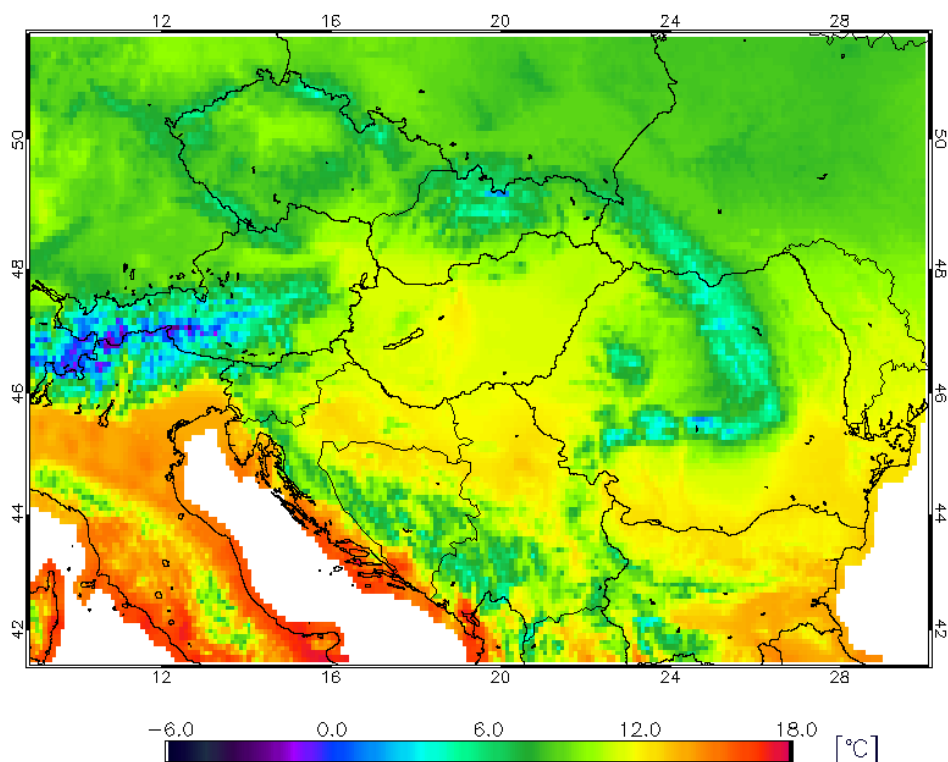
3.2 Projektek összeállítása talajvízforgalmi modellezéshez

A potenciális evapotranspirációt (PET) leíró formulák közti különbségeket, illetve számítási lépéseit a [2.2 fejezetben](#) taglaltam, ami alapján ki lehet jelteni, hogy az egyes becslési módszerek összevetése és alkalmazhatóságának vizsgálata időszerű. Célszerűnek láttam a különböző PET-ek hatását talajszelvény szintű vízforgalmi modelleredményekkel nyomon követni, ezzel feltárni a potenciális párolgás eltérő számítási képleteiből származó bizonytalanságát. Azért lehet ez a megközelítés a legszemléletesebb, mert így a párolgás a vízmérleg egy elemeként van jelen, ami biztosítja, hogy a levegő-talaj-növény rendszer folyamataiban kiváltott közvetett hatása tetten érhető legyen a rendszer hidrológiai válaszában.

Elsősorban a modell futtatásához szükséges bemenő „input” adatok előkészítésére volt szükség. A numerikus modellszámítás eredményeit számos olyan tényező befolyásolhatja, amelyek nagy helyi és időbeli változatosságot mutatnak. Ezeket a jellemző, sajátos hazai viszonyokat minél nagyobb lefedéssel szerettem volna figyelembe venni, ennek megfelelően alakult az eltérő paraméterekkel rendelkező, futtatni kívánt projektek száma. Munkám **során 3 különböző helyszínt** választottam ki, mindegyik helyszínen **5 különböző talajtípust** és ezen belül mindegyik talajtípushoz **5 különböző párolgásbecslő módszert** vettem figyelembe.

3.2.1 Vizsgált földrajzi helyszínek

Magyarországon túlnyomóan a mérsékelt meleg száraz vagy nedves területek alkotják, de ezen belül megkülönböztethetőek jellemző éghajlati adottságok egy-egy térségre (*Csorba, 2021*). A FORESEE klimatológiai térképe (**Ábra 4.**) a Kárpát-medence térségének átlaghőmérsékletét tünteti fel 1991-2020 közti időszakokra, ami a három vizsgálati pont kijelölését segítette.



Ábra 4: Átlaghőmérséklet alakulása 1991-2020 időszakra (FORESEE)
(forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index-maps_v4.0.html)

Ennek megfelelően került kiválasztásra egy forróbb Dél-Dunántúli terület Paks környékéről, ellenpólusként egy hűvösebb Észak-magyarországi terület a Bükk mellől és az átlaghőmérsékletet tekintve, az előző kettő között elhelyezkedő Észak-alföldi terület, a Szamos folyó mentéről, Tyukod magasságában. Az egyes vizsgálati pontokhoz tartozó lokációs jellemzőkre, illetve éghajlati és meteorológiai viszonyainak különbségeire a **Táblázat 2**-ben összessített adatok mutatnak rá:

	Paks	Bükk	Szamos
Megye	Tolna	Heves	Szabolcs-Szatmár-Bereg
Földrajzi középtáj	Mezőföld	Bükk vidék	Felső-Tiszaí síkvidék
Éghajlat típus	Mérsékelt meleg, száraz	Mérsékelt hűvös, mérsékelt nedves	Mérsékelt hűvös és a mérsékelt meleg öv határa
Átlagos évi középhőmérséklet [°C]:	10.7	8.0–8.5	9.6–9.7

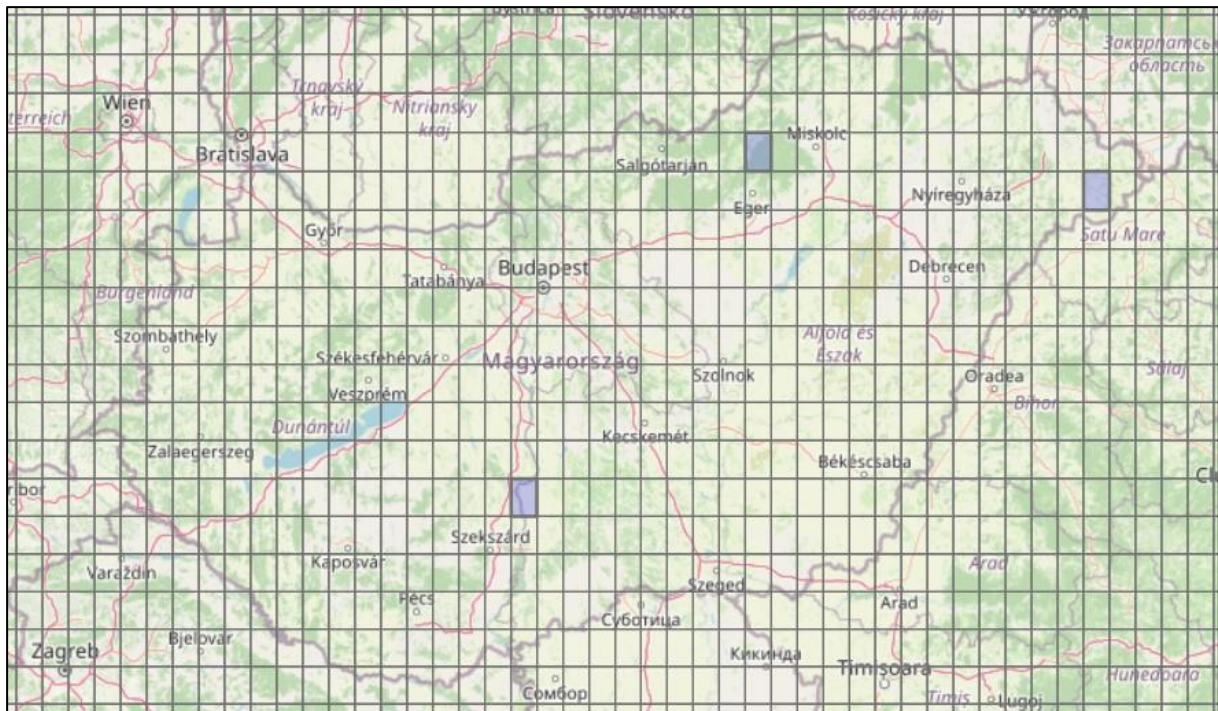
Átlagos évi csapadékösszeg [mm]:	610,5	~750	660
Éves napfénytartam összeg [h]:	2000	1900	1960
Évi átl. tengerszinti légnyomás [hPa]:	1017.5	-	-
Tényleges párolgás éves átlaga [mm]:	~ 30	-	-
Potenciális párolgás éves átlaga [mm]:	~ 60	-	-
Éves átl. talajhőmérséklet 50 cm-n [°C]:	13	-	-
Éves átlagos szélesség [m/s]:	1.6-1.7	2.5-3.0	-

Táblázat 2: Vizsgálati pontok jellemző földrajzi, éghajlati és meteorológiai adatai, forrás: (Csorba, 2021), (MVM Paks II. Zrt, 2012), (Schmotzer, 2017), (Anon., 2015)

A helyszínekhez tartozó meteorológiai adatokat a FORESEE esetében a földrajzi szélességi és hosszúsági fokoknak megfelelő cellából töltöttem le (Ábra 5.). A CARPATCLIM-ből ezek az adatok a teljes Kárpát-medencére vonatkozóan voltak elérhetőek, viszont az adathalmazban a rácsháló egyes cellái egyedi azonosítókkal voltak megkülönböztetve. Bár a két adatbázis esetében a kiválasztott cellák középpontjai nem estek teljesen egybe, de mindkettő esetében a cellaközéppont koordinátáihoz tartozó számkód alapján jól beazonosítható volt a vizsgált területet lefedő, szükséges cella (Táblázat 3):

Helyszín		Paks	Bükk	Szamos
Északi szélesség/lat		46.58°	48.08°	47.91°
Keleti hosszúság/long		18.92°	20.42°	22.58°
Cellaazonosító	FORESEE	2545	3490	3399
	CAPATCLIM	3454	1954	2178

Táblázat 3: Vizsgált területet lefedő cellák középpontjának koordinátái és cellaazonosítója

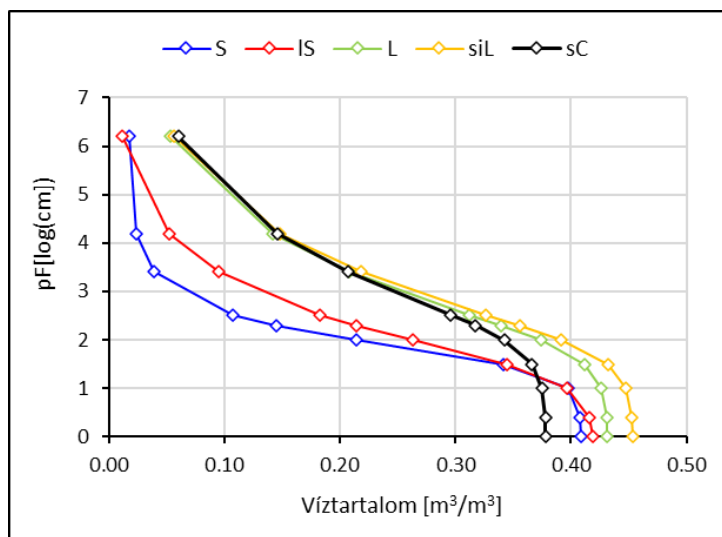


Ábra 5: A rácsháló vizsgált celláinak elhelyezkedése (késsel kiemelt) - FORESEE adatbázis (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map_query/index.html)

A projektekhez felhasználni kívánt meteorológiai idősorok (csapadék, átlaghőmérséklet, relatív nedvességtartalom, vízgőz nyomás, különböző formulákkal számított PET) kilistázását egy erre a célra összeállított „calculator” makró könnyítette meg, ami az ömlesztett adatkészletből cellaazonosító alapján tudta behívni a kiválasztott cellához tartozó adatsorokat, tetszőleges időszakokra. Így lehetett könnyen és gyorsan hozzáférni és másolhatóvá tenni az egyes paraméterek 1990. január 1. – 1999. december 31. időszakra vonatkozó idősorait, bármelyik adatbázisból.

3.2.2 Vizsgált talajtípusok

Mivel elsősorban az egyes talajtípusok hatását szerettem volna látni és elemezni, ezért a projektekbe helyszínenként öt különböző, fiktív, homogén talajszelvényt építettem be. Ehhez a már a 2.3 fejezetben is ismertetett USDA talajtextúra osztályozást használtam fel, melyekhez a van Genuchten-Mualem paramétereket a MARTHA adatbázis talajszelvényeiből származtatták (Kozma, et al., 2014). Az ezekre illesztett görbékkel (víztartóképeségi (Ábra 6.) és vízvezetőképességi görbék) jellemeztem az egyes projektek összeállításánál a textúra típusokat.



Ábra 6: Kiválasztott talajtextúrákhoz tartozó retenciós görbék, forrás: saját

Az USDA osztályozás 12 talajtextúrát különböztet meg. Az öt kiválasztott osztálytípusnál az volt a cél, hogy a hozzájuk tartozó K_{sat} értékek viszonylag egyenletesen fedjenek le minél szélesebb tartományt. Ugyanis ez a fizikai tulajdonság önmagában jelentős hatással van a vízforgalomra (Zhang & Schaap, 2019), ami az eredményeknél is látványos eltérésekhez vezethet. A projektek tehát nevezetesen a **homok (S-Sand)**, **vályogos homok (IS – loamy Sand)**, **vályog (Loam - vályog)**, **iszapos vályog (siL – silty Loam)** és **homokos agyag (sC – sandyClay)** textúra osztályok szerint is meg lettek különböztetve. Ezeket a hozzájuk tartozó van Genuchten-Mualem paraméterekkel együtt a **Táblázat 4**-ben tüntettem fel:

Talajtextúra osztály	Jelölés	θ_r	θ_s	α	n	K_{sat} [cm/d]
Homok (Sand)	S	0.0	0.40935	0.02290	1.72273	246.37
Vályogos homok (loamy Sand)	IS	0.0	0.42072	0.03727	1.32771	94.96
Vályog (Loam)	L	0.0	0.43176	0.01223	1.21164	19.06
Iszapos vályog (silty Loam)	siL	0.0	0.45393	0.01271	1.21059	7.63
Homokos agyag (sandy Clay)	sC	0.0	0.37834	0.00882	1.19311	2.40

Táblázat 4: A projektekben felhasznált talajtextúra osztályok és a hozzájuk tartozó paraméterek

Az egyes talajtextúrákra vonatkozó megfigyelések, segíthetnek megmagyarázni a valós talajszelvény felépítésnél lezajló folyamatokat és jelenségeket, amennyiben későbbi vizsgálatok során ezek beépítésére is sor kerülne.

3.2.3 PET becslő módszerek alkalmazása

A projektek további változatait eredményezte, hogy a helyszínek és talajtípusok mellett újabb változóként vezettem be a különböző becslő képletekkel számított PET idősorokat. Az öt eltérő módszerrel számított idősorból három az OMSZ hozzáférhető adatbázisából biztosított volt. Ezek név szerint a Makkink a Penman-Monteith és a Priestley-Taylor formulák eredményei. További két verzióban az adatsorok a Hargreaves formulával lettek előállítva. Az utóbbi két változatot az különbözteti meg, hogy a számításhoz felhasznált meteorológiai alapadatok eltérő adatbázisból származnak (CARPATCLIM, FORESEE). Bár egyszerűbb lett volna csupán a közvetlenül hozzáférhető PET idősorokkal dolgozni, de ragaszkodtunk a Hargreaves összefüggéshez is, mivel a vizsgált módszerek közül ennek a legkisebb a paraméterigénye. Alkalmazhatóság szempontjából ez mindenképp egy kedvező tulajdonság, kérdéses viszont, hogy ez az egyszerűsítés milyen mértékű torzulásként jelenik meg az eredmények oldalán. A számítás napi minimum, maximum és átlaghőmérsékletet, valamint a légkör külső határára érkező rövidhullámú (más néven extraterresztriális) napsugárzás (R_a) adatokat igényel. További érv a Hargreaves összefüggés mellett az, hogy az alkalmazásához mindkét elérhető adatbázisban elegendő adat állt rendelkezésre, így az eltérő térbeliségű alapadatok számításokra gyakorolt hatását is tesztelhettem.

A „calculator” makró által behívott hőmérsékleti idősorokból a program az alábbi számítási lépéseken végighaladva, minden helyszínre automatizáltan állította elő a szükséges PET értékeket, mindkét adatbázis esetén.

Hargreaves - Samani egyenlet (*Fernandes, et al., 2012*)

$$PET = 0,0023 \cdot T_{\text{átl}} + 17,8 \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \cdot R_a$$

ahol: T_{max} és T_{min} – minimum és maximum hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

R_a – extraterresztriális napsugárzás [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-2}$]

R_a számítás 24 órás periódusra (*Allen, 1996*):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r(\omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s)$$

egyszerűsítés után:

$$R_a = 37,6 \cdot d_r(\omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s)$$

ahol: G_{sc} – napállandó¹ [$\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$] = 0,0820
 d_r – relatív Föld – Nap távolságot [-] leíró egyenlet
 δ – napdeklinációs egyenlet² [rad]
 φ – északi szélesség [rad]
 ω_s – naplemente óraszöge³ - egyenlet [rad]

ω_s számítása:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta)$$

d_r számítása:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) = 1 + 0,033 \cdot \cos(0,0172 \cdot J)$$

δ számítása:

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) = 0,409 \cdot \sin(0,0172 \cdot J - 1,39)$$

ahol: J – nap száma az évben [-]

A bemeneti adatok projektekbe rendezésére azért volt szükség, hogy a modellfuttatások kevesebb manuális munkával járjanak. Ez a bemeneti formátum szükséges ugyanis, annak a BME-VVKT tanszék által fejlesztett keretprogramnak (Decsi, et al., 2020), ami a futtatásokat képes kezelni és szükség esetén korrigálni. A projektmappák legyártását a megfelelő formátumra, egy újabb makró támogatta, amely egyúttal mindegyik változathoz hozzárendelte a megfelelő **talajtextúra** és **szelvényparamétereket**.

A keretprogramot végül az egyes helyszínekhez tartozó meteorológiai paraméterek idősorainak bemeneti adatokhoz való hozzáadásával hoztuk futtatásra kész állapotba. Ezek közül helyszínenként, közvetlenül bemásolható formában voltak kigyűjtve a **csapadékok**, **átlaghőmérsékletek**, a **Makkink (Mk)**, **Priestley-Taylor (Pr-Tlr)**, és **Penman-Monteith (Pn-Mt) formulák PET eredményei**, valamint a CARPATCLIM adatbázis esetén a **relatív nedvességtartalom** idősorok. Az előzőekben ismertetett **Hargreaves-Samani (Hg-Sa) formula PET idősorai** mellett azonban a relatív nedvességtartalom manuális kiszámítására is szükség volt a FORESEE adatbázis esetében. A számítás menete a következő:

¹ a Nap kisugárzott energiámnységének az a része, mely eléri a földi légkört

² deklináció = koordináta, amely az égi egyenlítő (ekvátor) és egy adott pont iránya által bezárt szöget jelenti

³ a nap kelet-nyugati irányú szögeltolódása a poláris tengely körül

Relatív nedvességtartalom

$$RH = 100 \cdot \frac{e_p}{e_s}$$

ahol: e_s – adott hőmérséklethez tartozó telítési gőznyomás [Pa]

e_p – parciális vízgőznyomás [Pa]

e_s számítása (Magnus-Tetens formula):

$$e_s = 6,11 \cdot 10^{\frac{a \cdot t}{b+t}}$$

ahol: a – állandó, értéke vízfelszín felett 7,5, jégfelszín felett 9,5

b – állandó, értéke vízfelszín felett 237,3 °C, jégfelszín felett 265,5 °C

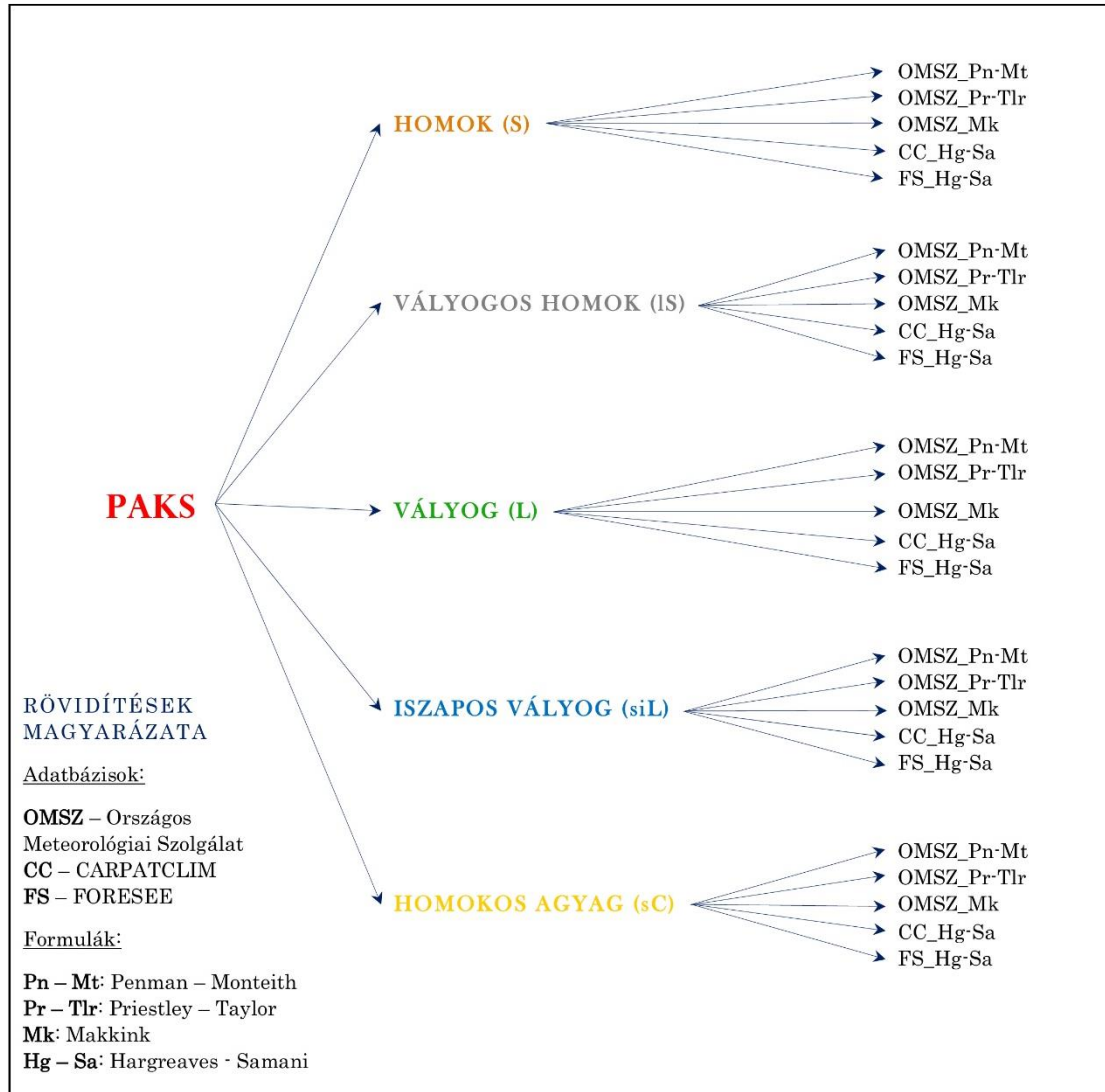
t – hőmérséklet [°C]

e_p számítása:

$$e_p = e_s - vpd$$

ahol: vpd – nappali átlagos gőznyomáshiány [Pa]

Az eltérő meteorológiai adatok (3 helyszínen), adatbázisok, talajtípusok (5 típus) és alkalmazott PET becslő módszerek kombinációjából 75 különböző változat tevődött össze. A projektverziók közti különbségek megértését segíti a **7. ábrán** lévő ágrajz, Paks helyszínére. A másik két helyszínen ugyanezt a struktúrát követtem, így adódik ki a 3x25, vagyis 75 modellezni kívánt projekt.



Ábra 7: Projektváltozatok felépítése – ágrajz (forrás: saját)

3.3 Talajvízforgalmi modell

A vízforgalmi folyamatok érzékenységi vizsgálatához legkézenfekvőbb eszköz a fizikai alapú modellezés. A modelleredmények alapján szemléletes képet kaphatunk az egyes modellparaméterek hatásairól. Elemzésemhez ezért a HYDRUS-1D modellezési környezetet alkalmaztam, amely alkalmas a telítetlen talajprofilokban a víz függőleges mozgásának modellezésére a Richards-egyenlet numerikus megoldásával (Šimůnek, et al., 2009). Megjegyzendő, hogy a talajhidrológiai tulajdonságok jellemzéséhez (víztartó- és vízvezetőképességi görbék leírása) van Genuchten-Mualem hidraulikai modellt alkalmaztam.

A korábbi projektösszeállítás nagyban támogatta a modell konfigurációt, aminek további részeként a számítási időszakot 10 évre állítottam be. Az időszak megválasztásának háttérében leginkább számításigénnyel kapcsolatos megfontolások állnak. A hosszabb idősor nem

feltétlenül vezetett volna pontosabb érzékenységvizsgálati eredményekhez. Nem kizárt viszont, hogy a változó éghajlati viszonyok akár nem várt vízforgalmi viselkedésekben is megjelentek volna a modell eredményeknél, ha a legutolsó 10 éves periódusra végzem a vizsgálatokat.

Mivel a beállított, homogén talajszelvények „fiktívek”, és maga az elemzés érzékenységvizsgálat jellegű, ezért nem történt kalibráció sem. Minden esetben a vizsgált talajszelvény vastagsága 1,5 m volt. A viszonylag vékony szelvényben hamarabb tetten érhetőek az egyes hidrológiai válaszok, persze ez nagyban függ a talajtextúrától is. Egyik ilyen az alsó kifolyás, mivel az alsó peremfeltételként szabad kifolyást állítottam be. Felső peremfeltételnél a vegetációt vettem figyelembe a LAI érték megadásával. A levélfelületi index⁴ időSORA egy jellegzetes éves eloszlást követ, amit bemeneti időSORként alkalmaztam. A vegetáció leírását szolgálja továbbá az extinkciós tényező⁵, melynek értékét szakirodalom alapján a keretprogram 0,3 -nak vette fel, továbbá az intercepció⁶, melynek értékét 0,1 [mm] -re. Mindkét jellemző növényfüggő, de egyik paraméterre sem érzékenyebb különösebben a modell. A meteorológiai paraméterek időSORAI mint időfüggő peremfeltételek lettek megadva a projektösszeállítás során. Ezeket egészíti ki a hCritA időSOR is, ami a talajszelvény legfelső számítási csomópontjában, a kiszáradás a kiszáradás könnyebb numerikus kezeléséhez alkalmazott küszöbszám. Jelen tanulmányban ezt modellérzékenységi szempontból elhanyagolhatónak tekintettem. A talajszelvény menti számítási csomópontok száma 151 (1 cm-ként).

A nagyszámú projektek H1D-vel való futtatását a már említett keretprogram kezelte, aminek nagy előnye, hogy numerikus hiba esetén automatikusan korrigálja a hibát okozó modellbeállításokat az alábbi módszerekkel:

- Iterációs feltételek módosítása
- van Genuchten paraméterek α és n értékének növelése 1% -al
- peremi időSORokat napi bontás helyett három napi átlagolással adja meg

A keretprogram segítségével a H1D környezetben mind a 75 projekt sikeresen lefutott.

⁴ Növényállomány (sugárzást felfogó terület) jellemzése: levélfelület nagysága talajfelszínhez viszonyítva

⁵ Fényextinkcióval (fényességcsökkenés anyagon áthaladva) arányosan veszi figyelembe, hogy a PET-et milyen arányba bontsa szét ET-re és T-re

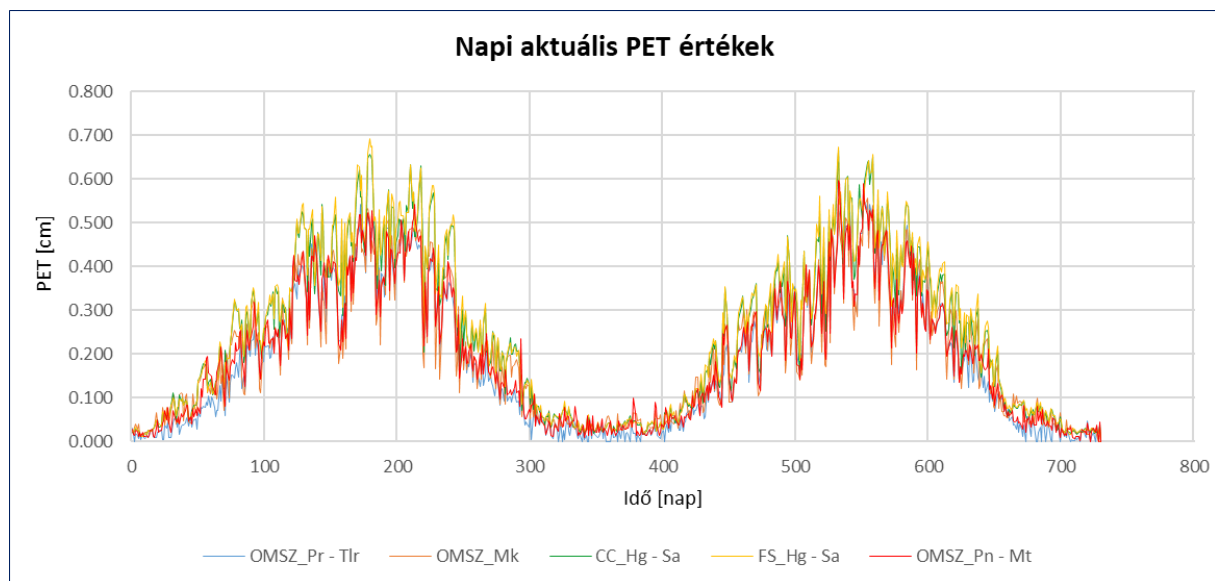
⁶ levélfelületen maximálisan mennyi víz tud pillanatnyilag visszamaradni

4 Eredmények, kiértékelés

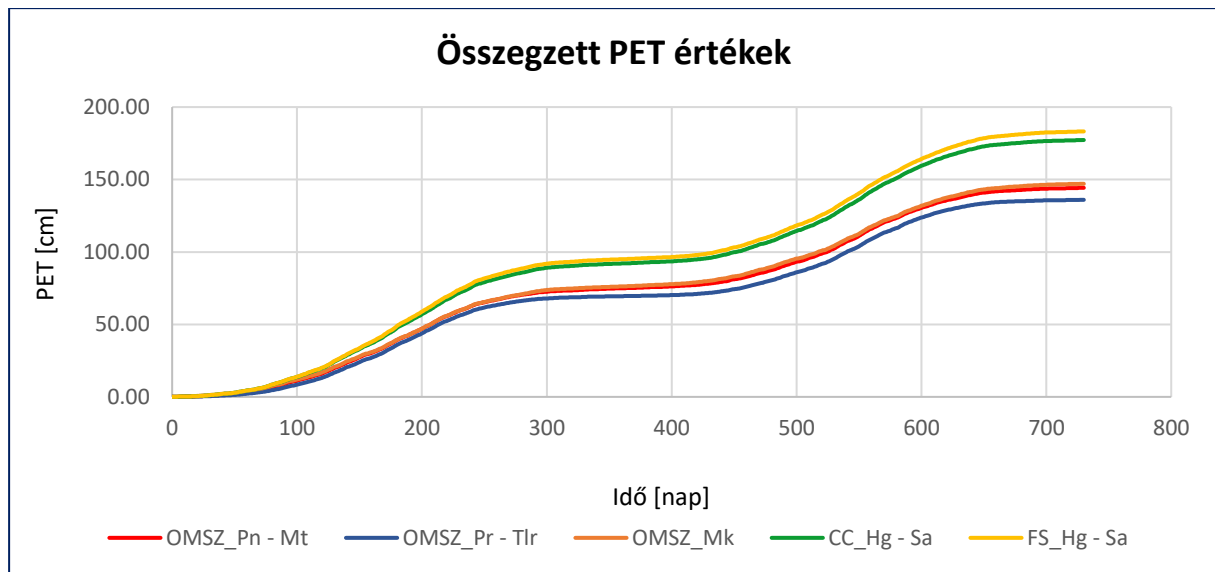
4.1 PET idősorok értékelése

Fontos volt, hogy az alkalmazott PET becselő formulákról önmagukban és egymással összevetve is megállapításokat tegyek. A felhasznált és a becsült eredményeket idősorosan és statisztikai jellemzés segítségével vizsgáltam. Utóbbi azt a fajta box-plot ábrázolást takarja, ami az idősorok fő statisztikai mutatóit (min-max, 25-75% kvantilisok, átlag, medián) szemlélteti (Ábra 11.). Referenciának a Penman-Monteith eredményeket tekintettem, a [2.2.1 fejezetbe](#) foglaltak miatt. A becselő módszerek alapvető jellemzőinek megfigyelésére elsősorban a Szamos cella területén uralkodó, mérsékelt meteorológiai és éghajlati viszonyokat használtam fel.

A PET adatok egymáshoz való viszonya az alábbi, néhány évre kiterjedő idősorokon is látható:



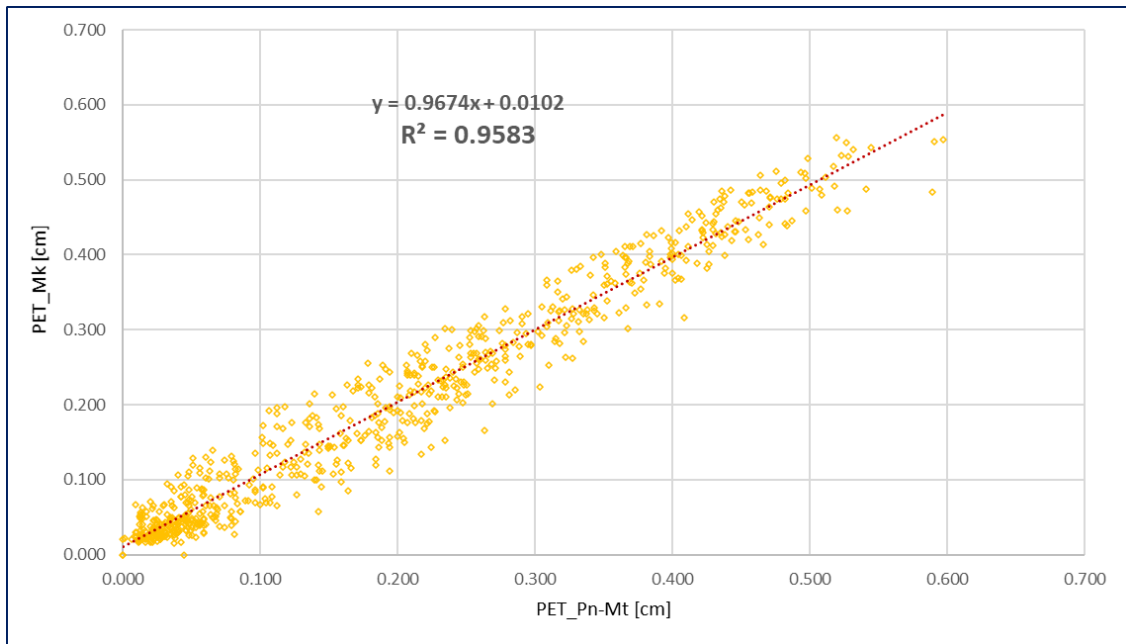
Ábra 8: Napi aktuális PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becselő módszerek esetén, forrás: saját



Ábra 9: Összegzett PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén, forrás: saját

Mindkét grafikon ugyanazt a két évet ábrázolja, az egyes formulák esetén. A **8. ábra** az aktuális napi értékeket, amíg a **9. ábra** ezek összegzett értékeit jeleníti meg. Utóbbinál az idősorok értékei közti eltérések szemléletesebben kirajzolódnak. A két ábra alapján a különböző becslő módszerekről elmondható, hogy:

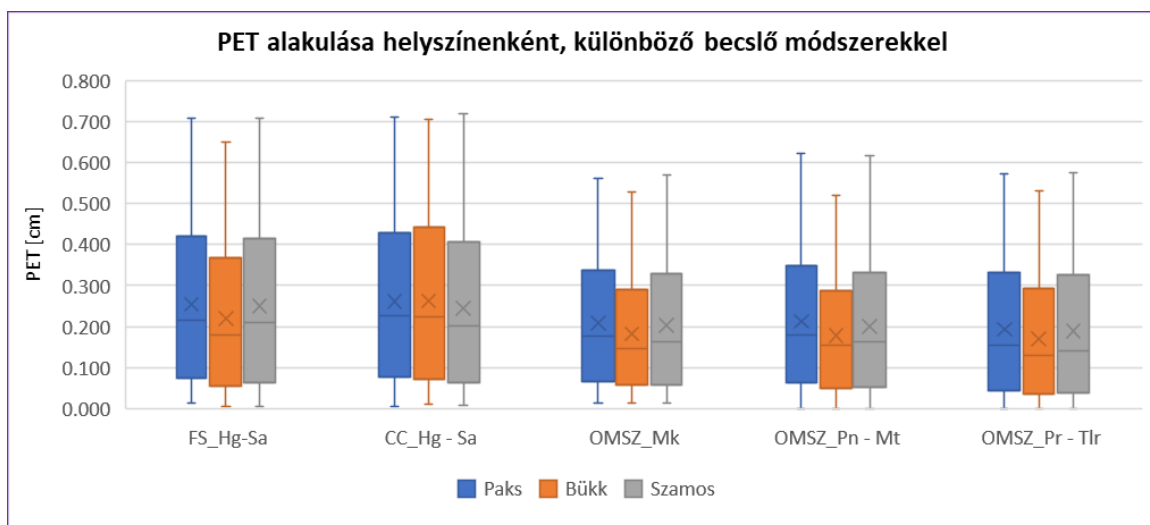
- A napi aktuális görbéken jól kivehetőek a pillanatnyi időjárási körülmények, a csapadékos (RH emelkedik, T csökken) és a melegebb, száraz napok váltakozása.
- Az évjáráthatás nem mutatkozik (az 1. év összegzett PET értéke megközelítőleg megegyezik a 2. év összegzett PET értékével).
- A Hargreaves-Samani képlet mindkét adatbázis esetében jelentősen felülbecsül a referenciához képest, ~ 20%-al. A többi módszer értékei az összesítésben 5%-on belül maradnak.
- A Pearson-féle korrelációs együttható értéke 0.97 körüli, ami azt mutatja, hogy rövid időléptéken nem adnak jelentősen eltérő becslést a különböző módszerek.
- A Penman-Monteith értékeket leginkább a Makkink formula eredményei közelítik meg, a korrelációs együttható értéke esetükben 0.98. A **10. ábrán** látható az R^2 számított értéke: 0,958



Ábra 10: A különböző becselő képletek kapcsolata a referenciának tekintett Penman-Monteith formulával, forrás: saját

- A formulák alkalmazhatóságát bizonyítja, hogy egyik esetben sem látunk kiugró értékeket, viszont kérdéses, hogy melyik közülük a legmegbízhatóbb.

Ebben a fejezetben a **11. ábra** segítségével próbáltam közelebb kerülni annak a megválaszolásához, hogy az eltérő területi és éghajlati jelleg miatt hogyan alakulnak a becsült PET értékek és hogy emiatt vajon érdemes lehet-e helyszínenként más becselő módszert előnyben részesíteni (hasonló megfontolások alapján vizsgálok bővebben a kérdéskört a hidrológiai változók viselkedésén keresztül a [4.3.1 fejezetben](#)). Ezért a mérsékelt Szamos területtől eltérő, szélsőségesebb éghajlati viszonyok között is ábrázoltam a területre jellemző PET értékeket.



Ábra 11: Helyszínek összehasonlítása a PET alakulása szerint, különböző becselő módszerek esetén, forrás: saját

A melegebb Paks és a hűvösebb Bükk esetében is azt vizsgáltam, hogy a földrajzi helyszínenként eltérő meteorológiai és éghajlati viszonyok hogyan alakítják az eltérő becslő módszerekből származó PET statisztikai jellemzőit és egymáshoz való viszonyukat. A **11. ábra** alapján megállapítható, hogy:

- A PET-ek szinte minden formula esetében az éghajlati viszonyoknak megfelelően alakulnak (hidegebb területen alacsonyabb, melegebb területen magasabb értékek).
- Kivételt képez ez alól a Hargreaves-Samani módszer, ami a Bükkben a Carpatclim adatbázis esetén jelentősen felülbecsül. Elképzelhető, hogy változatosabb terepviszonyokra a CC adatbázis interpolációs módszerei a Hg-Sa módszernél ilyen torzításokat eredményeznek.
- Bár a másik két terület szélsőségesebb, de ugyanaz a tendencia jelentkezik a PET értékeiben az egyes becslő módszereket tekintve:
 - a Hargreaves -Samani formuláról általánosan elmondható, hogy a többi becslő módszerhez képest felülbecsül
 - A Makkink, Penman-Monteith, Priestley-Taylor eredményei közel esnek egymáshoz. A Priestley-Taylor átlaga kissé elmarad, a Penmann pedig napi szinten nagyobb maximumokat ad

4.2 Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése

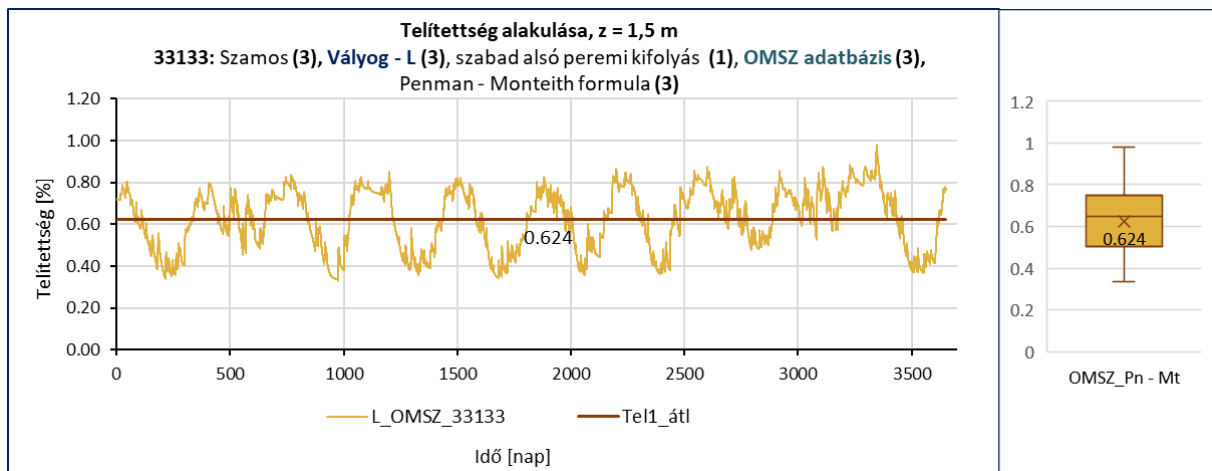
A PET becslő módszerekről, alkalmazhatóságuk szempontjából, további lényeges információkat nyerhetek, ha **hatásukat** talajszelvény szintű vízforgalmi szimulációs eredmények segítségével is figyelembe veszem.

A bemeneti adatokra való érzékenységet a rendszer három eltérő hidrológiai válaszában keresztül vizsgáltam, ezért a modelleredményekből mindhárom helyszín esetén a **telítettség**, a **tényleges transpiráció** és az **alsó peremi fluxus** (talajvíz utánpótlás) idősorokat használtam fel (**Ábra 12-15.**). A változtatott bemeneti adatokból adódó nagy számú kombináció miatt a továbbiakban, a legtöbb esetben, vagy csak az idősoros, vagy csak a box plotos megjelenítést alkalmaztam. A következő alfejezetek:

- általánosan jellemzik a három hidrológiai változót
- egy-egy kiragadott verzió keresztül ábrázolják a mutatók általános időbeli alakulását
- rámutatnak a megjelenítési módszerek közti kapcsolatra

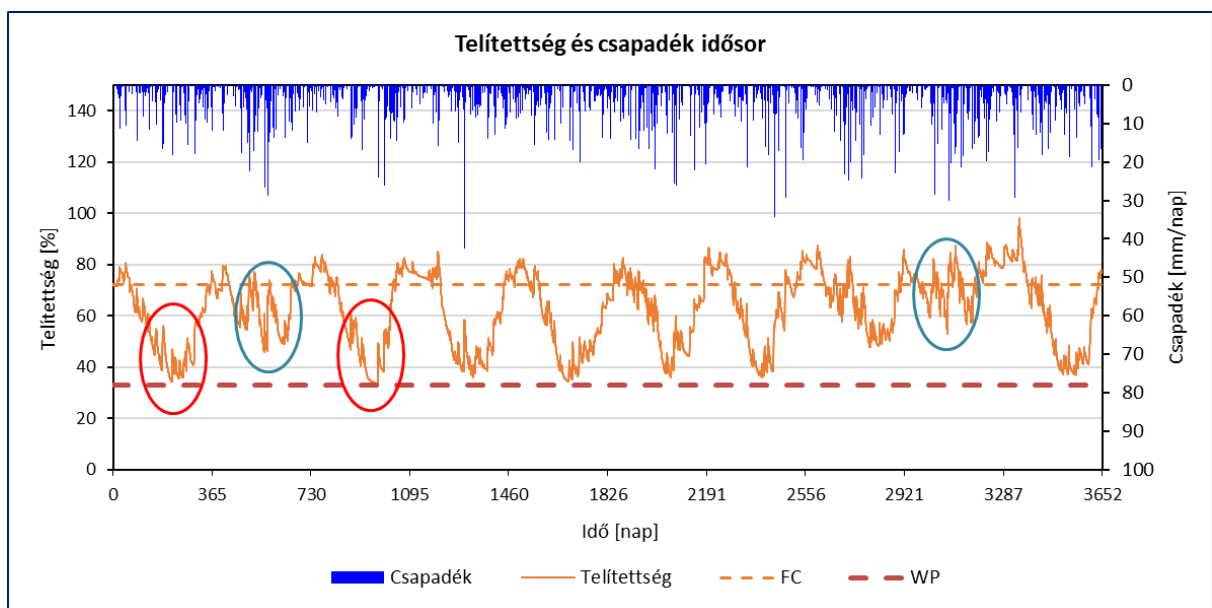
4.2.1 Telítettség

A telítettséget vizsgálataim során úgy értelmeztem, mint a gyökérzónára kiterjedő térbeli tartomány pillanatnyi víztartalmának és a telítési víztartalmának a viszonyozsáma. Azt adja meg, hogy pillanatnyilag a póruster hány százaléka van vízzel telítve. A felhasználó által kijelölt HID-s megfigyelési pontokban (observation node) szimulált víztartalom idősorokra alapul. A telítettségben jól nyomon követhető a meteorológiai változók éves dinamikája (Ábra 12.). A szemléltetésre használt idősort a referenciaként alkalmazott változókra vonatkozik: Szamos, Penman-Monteith formula, vályog talajtextúra.



Ábra 12: Telítettség referencia változókra vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítve, forrás:saját

A csapadékhatásokat a 13. ábra teszi igazán szemléletessé:



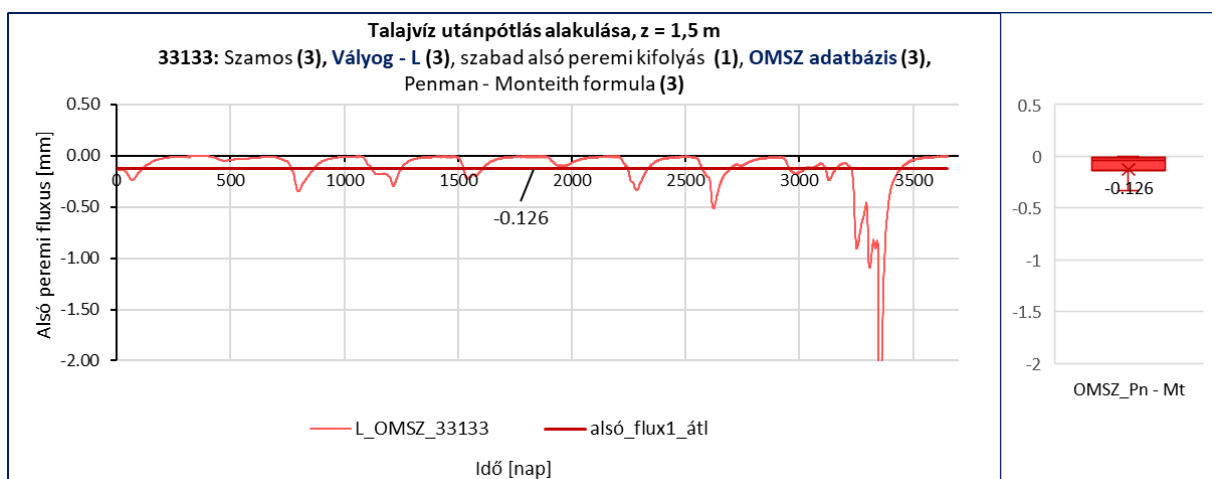
Ábra 13: Csapadékhatások szemléltetése a telítettség idősoron, forrás: saját

Látszik az évről-évre jól elkülönülő téli és nyári hidrológiai félév, a talaj nedvességtartalmának tartósabb feltöltődése (téli) és leürülése (nyári). A nyári időszakban jól kivehető a nagy nyári csapadékok, nagy intenzitású záporok hatása, ami ugyanakkor többnyire csak néhány napig-hétig képes mérsékelni a gyökérszóna vízhiányát (piros karikák). Ez alól persze vannak kivételek (kék karikák), amik jól szemléltetik az évjárat hatást (szárazabb és csapadékosabb évek váltakozva követik egymást).

A grafikonon a telítettség átlagértéke helyett a szabadföldi vízkapacitást (Field Capacity, pF 2.5) és a hervadásponthoz (Wilting Point, pF 4.2) is feltüntettem, természetesen telítettségként. Ez a két pont a növények számára hasznosítható víztartalom felső és alsó korlátjaként definiálható. Segítségükkel könnyebb behatárolni azt is, hogy mikor mennyire volt kiszáradva a talaj. Látható, hogy sokszor FC fölé emelkedik a telítettség szintje, amiből következtethetünk arra is, hogy a talajtípus miatt ilyenkor kevesebb többletvíz szivárog a mélyebb, nem modellezett rétegekbe.

4.2.2 Talajvíz utánpótlás

A nem modellezett térbe való beszivárgást nevezzük az alsó peremi fluxusnak (perkoláció), ami fizikailag a talajvíz utánpótlásnak feleltethető meg. Ennek a bemutatására szintén a referencia változatot használtam, ahol a dinamikák jobb nyomonkövetésének érdekében, a 10.évnél jelentkező kiugró érték megjelenítésétől eltekintettem (Ábra 14.).



Ábra 14: Alsó peremi kifolyás referencia értékekre vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítése, forrás: saját

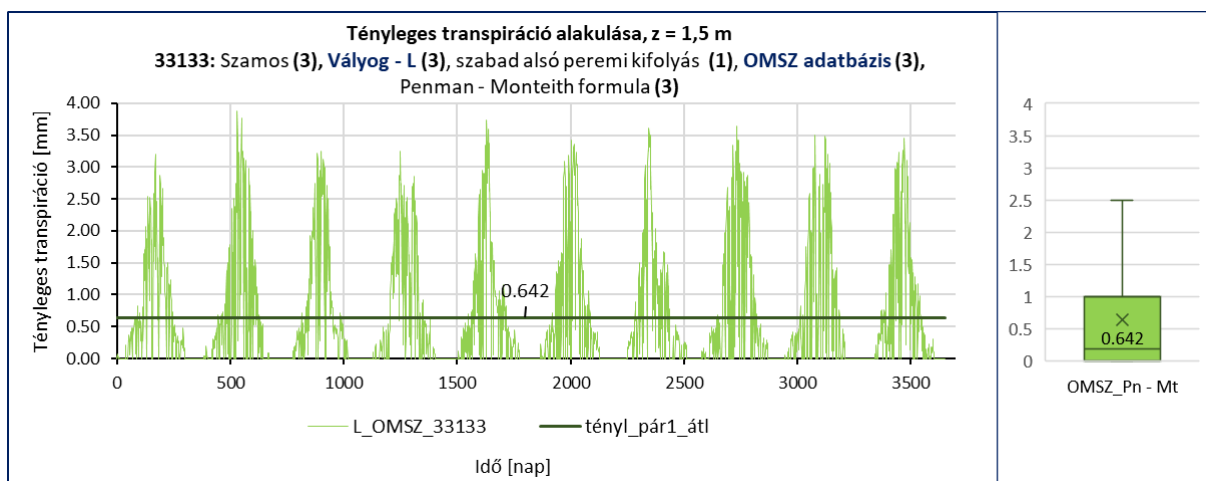
Az idősor jól bemutatja, hogy már egy 150 cm-s szelvényvastagság esetén is jelentkezik a tompító hatás, ami a heves, napi léptékű csapadékok hatását hetekre vagy akár hónapokra is el tudja nyújtani. Persze a leszivárgó víz mennyisége a lehulló csapadéknak csak egy töredéke.

Ha ezt a telítettség idősorral egymás mellé helyezzük, akkor megfigyelhető, hogy ennél a 150 cm-s homogén talajnál sem okoz minden nagyobb csapadék mélybe szivárgást. Előfordulhat, hogy akár teljes évek maradnak ki a talajvíz utánpótlásból. Az is jól kivehető, hogy akkor jelentkeznek mélybeszivárgási csúcs, amikor a telítettség érdemben meghaladja a szabadföldi vízkapacitást (FC). Ezek az eredmények mind alátámasztják a Hydrus 1D modell és a számítások fizikai tartalmának helyességét!

4.2.3 Tényleges transpiráció

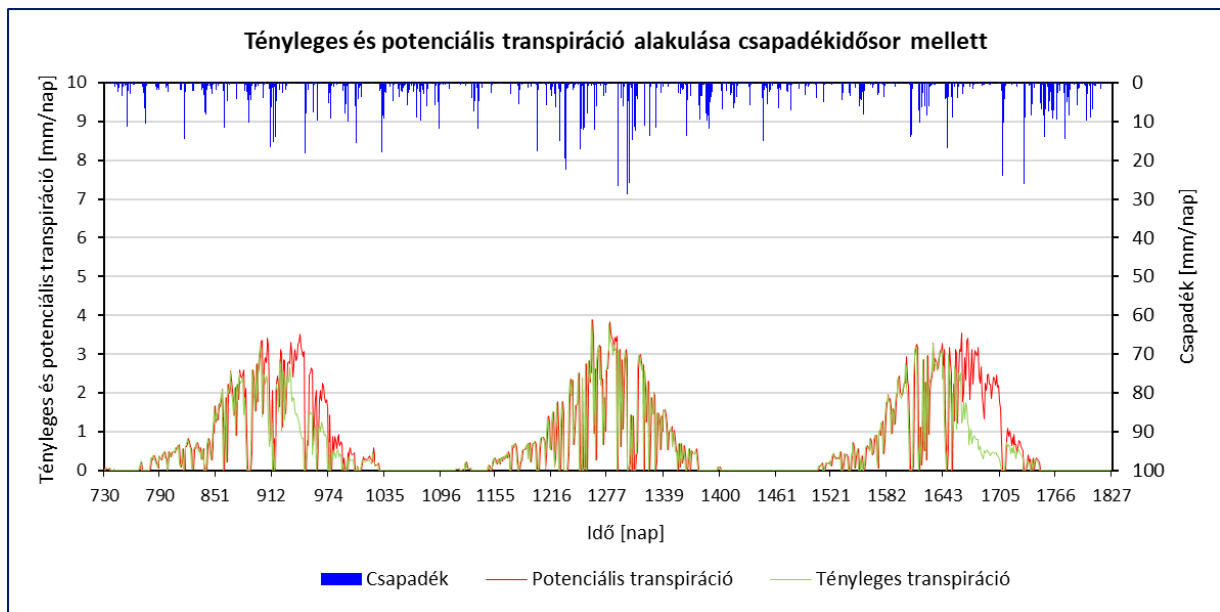
Harmadik változóként a párologásnak a transpiráció részét vontam be a vizsgálataimba, mivel hasznosulás irányából (környezeti, ökológiai és agrár szempontból) az a vízmennyiség a meghatározó, amit a vegetáció fel tud venni és elpárologtat (=transpiráció) (Ábra 15.).

A potenciális transpiráció mellett a víz korlátlan mennyiségben rendelkezésre áll a növényállománynak (Szász, 1995), a növényzet lehetséges (maximális) páraleadást jelenti (Vermes, et al., 2001). Azonban a valóságban, természetes körülmények között a párologás változó mértékét szűkös vagy hiányzó vízkészletek befolyásolják, ezt nevezik tényleges transpirációnak.



Ábra 15: Tényleges transpiráció referencia értékekre vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítése, forrás: saját

A szimulációs eredmények a potenciális transpiráció értékeket is tartalmazták, ezért célszerűnek láttam ezeket is feltüntetni a tényleges párologtatás idősora mellett. A kettő közti különbséget szemléletesebbé tette, ha csak 2-3 évet ábrázoltam (Ábra 16.).



Ábra 16: Tényleges és potenciális transpiráció különbsége, csapadékidősor mellett, forrás: saját

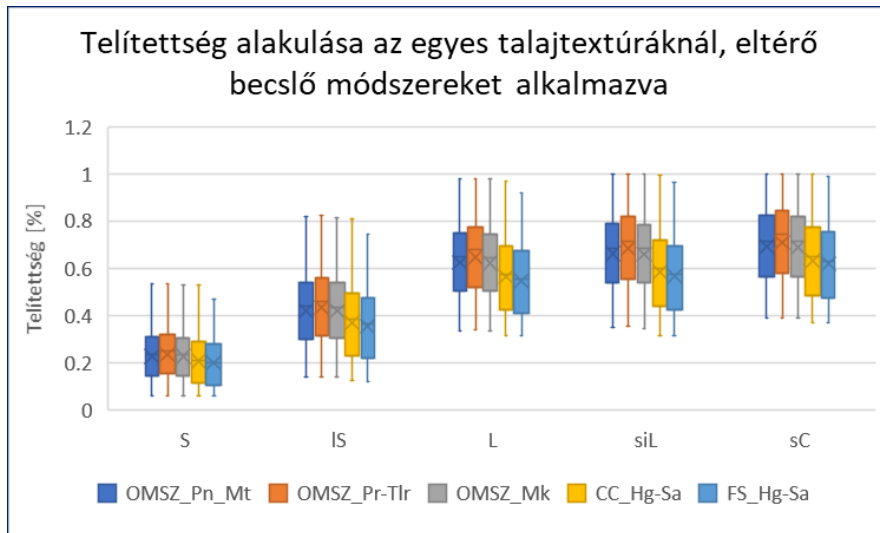
Ilyenkor jól látszik, hogy fogy el a víz a gyökérzónából a nyár végére és hogy tud ezen mérsékelten, ideiglenesen segíteni egy-két nagyobb eső. A tényleges értéke szükségszerűen kisebb, mint a potenciálisé, hisz azt a vízmennyiséget fejezi ki, ami a tényleges rendelkezésre álló vízmennyiség és növényfejltség mellett a növény felületéről elpárolog.

4.3 Statisztikai összehasonlító vizsgálatok a hidrológiai változók segítségével

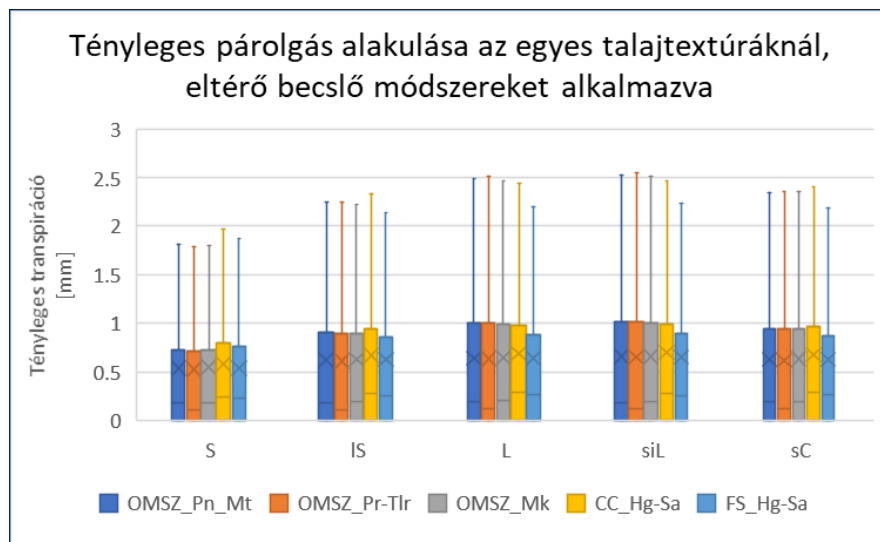
A PET hatásának tágabb értelmezését a különböző talajtextúrák és eltérő éghajlati viszonyok segítették elő. Bár előbbi inkább a hidrológiai változókat, utóbbi pedig a PET becslést befolyásolja közvetlenül, de mindkét esetben ugyanarra a kérdésre kerestem a választ: okozhat-e az eltérő talaj/éghajlat eltérő tendenciát az egyes becslő módszerekből adódó különbségek között? Mindezt statisztikai mutatókon keresztül vizsgáltam, a három eltérő hidrológiai válaszra. A mutatók rávilágíthatnak, hogy az egyes eredmények szélsőértékeiben, várható értékeiben vagy egyéb mutatószámaikban térnek-e el. A különbségek élesebb elhatárolása végett a szemléletes box plotok mellett táblázatos kiértékelést is végeztem.

4.3.1 Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése

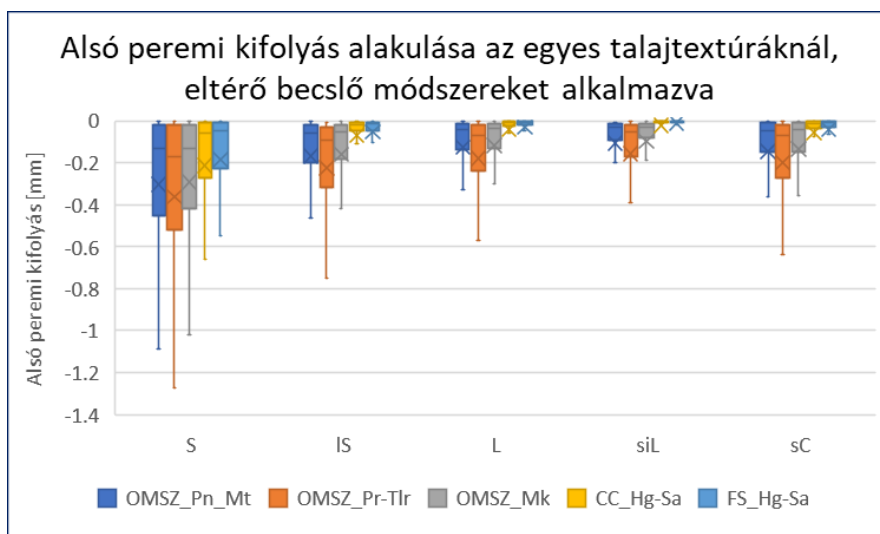
A talaj szerepének megvizsgálását ebben a fejezetben is a referenciaként szolgáló, mérsékelt Szamos helyszínen mutatom be, mindhárom hidrológiai változó esetében. A HYDRUS modellszámítások idősoros eredményeinek statisztikai értelmezését vizuálisan segítik a következő ábrázolások (Ábra 17-19.):



Ábra 17: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját



Ábra 18: Tényleges párolgás alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját



Ábra 19: Perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját

A korábbi megfontolásokhoz hasonlóan a becslő formulák értékelésénél itt is a Penman – Monteith módszert tekintem referenciának. A **17-19. ábrákon** feltüntetett hidrológiai válaszok statisztikai összesítése alapján, a PET becslő módszerekről elmondható, hogy:

- Mindhárom változó és mind az öt talaj esetén a Makkink közelíti leginkább a referenciának tekintett Penman-t
- Itt mutatkozik meg igazán az, hogy a Priestley-Taylor alulbecsül. Elsősorban a telítettségénél látszik, hogy magasabb értékek adódnak rá, de a hatás főleg a perkolációnál jelentkezi, ahol az átlag, a kvantilisek és a maximum érték tekintetében is jelentősen meghaladja a többi becslő módszer eredményeit.
- Szintén az alsó peremi kifolyásnál szembeűnő, hogy a Hargreaves-Samani túlbecsül. Főleg a kötöttebb talajok (siL, sC) példája mutatja ezt, ahol a többi módszertől eltérően kb. zéró a mélybeszivárgás a formulával.
- Ha azt vizsgáljuk, hogy az egyes hidrológiai válaszok a rendszerben lezajló fizikai folyamatoknak megfelelően alakulnak, akkor azok tendenciájában nem lehet jelentős eltérés. A FS_Hg-Sa miatt azonban a tényleges párolgás nem ennek megfelelően alakul. Már a két Hargreaves-becsülés összevetéséből is látható a telítettség és az alsó peremi kifolyás esetén is, hogy a Foresee adatbázis eltérő eredményre vezet. Összességében kisebb PET-et eredményez, viszont elképzelhető, hogy az éven belül az máshogy oszlik el. Magyarázatul szolgálhat tehát, hogy az adatbázis a téli időszakra felülbecsül, ami miatt kisebb a mélybe szivárgás és az egész évre vonatkozó telítettség. Nyáron viszont alulbecsül, amikor viszont a tényleges transpiráció többsége lezajlik, így arra szintén kisebb érték adódik.
- Ha csak a tényleges transpirációs ábrára szorítkoznánk, akkor nem látszódnának ezek a lényegi különbségek. A fentiek alapján megállapítható, hogy a telítettség és különösen az alsó kifolyás ábra nyújtja a legtöbb információt, az választja szét “leghatékonyabban” a becslő módszereket.

Néhány megállapítás, amely kifejezetten a különböző talajtípusok szimulációs eredményeinek köszönhető:

- Összességében elmondható, hogy a három vizsgált hidrológiai jellemző a várakozásnak megfelelően alakult. Ahogy egyre kötöttebb a talaj, úgy válik egyre nagyobbá a telítettség és csökken le az alsó peremi fluxus. A telítettség esetén

jelentős eltérések vannak: míg homokra az átlag 20% körül mozog, addig homokos agyagra 70% fölött. Az alsó peremi kifolyás esetén pedig tízszeres nagyságrendnyi különbség van.

- A tényleges párolgást nézve csak a homok különül el igazán.
- Fontos megállapítás, hogy a talajtípusok közti változásnál nagyobb eltérést jelenthet az, hogy a PET-et milyen módszerrel becsüljük. Pl. a vályog (L) és az iszapos vályog (siL) esetén jól látszik, hogy a Penman-nal becsült PET esetén a L-siL alsó peremi fluxusok között kisebb a különbség, mint a vályog (L) esetén a Pn-Mt-al, a Pr-Tlr-ral vagy Hg-Sa-val becsült perkolációk között.

Számszerűsített táblázatos módszerrel közelítettem meg azt a kérdést, hogy az eltérő talajtípusoknak lehet-e hatása a PET becsülő módszerek alkalmazhatóságára. A becsülő módszerek statisztikai eredményeinek egymáshoz való viszonyát vettem össze talajtípusonként, mert így kiderülhet, hogy minden talajnál ugyanúgy eredményeznek egymáshoz képest felül vagy alulbecslést az egyes képletek, vagy talajtípusonként változhat köztük a tendencia.

A boxplotok tartalmát tehát számszerűsítve összesítettem egy táblázatban (**Táblázat 5**), ahol a referencia módszertől (Penman-Monteith) való százalékos eltérés értékei szerepelnek. A színskála minden sárga keretes tömbön belül az eltérés mértéke szerint alakult. A színezés azt segíti, hogy az egyes oszlopok tömbjeinek összevetésénél könnyen beazonosítható legyen, ha valami változik talajonként. Az egyes tömböket az első oszlop szerinti sárga keretezés szerint kell értelmezni a többi oszlopban is. A kimutatás a Szamos cella meteorológiai viszonyaira vonatkozik.

		Átlag			Max		
		Telítettség [%]	Tényleges pár. [mm]	Alsó kifolyás [mm]	Telítettség [%]	Tényleges pár. [mm]	Alsó kifolyás [mm]
Referencia	OMSZ_Pn - Mt	0.227	0.538	0.304	0.533	3.856	7.500
Homok (S)	OMSZ_Pr - Tlr	3.34%	-2.41%	15.84%	0.53%	-4.37%	6.25%
	OMSZ_Mk	-0.41%	1.96%	-4.37%	-0.97%	-5.17%	-8.07%
	CC_Hg - Sa	-10.39%	7.13%	-42.48%	-1.00%	11.90%	-9.01%
	FS_Hg - Sa	-14.54%	0.32%	-63.20%	-14.16%	9.74%	-150.84%
Referencia	OMSZ_Pn - Mt	0.419	0.619	0.169	0.820	3.881	6.820
Vályogos homok (sL)	OMSZ_Pr - Tlr	3.57%	-1.57%	25.04%	0.35%	-4.37%	8.70%
	OMSZ_Mk	-0.35%	1.15%	-5.78%	-0.62%	-5.98%	-5.41%
	CC_Hg - Sa	-13.84%	7.70%	-138.08%	-1.26%	12.09%	-42.98%
	FS_Hg - Sa	-18.73%	1.05%	-208.50%	-10.28%	13.85%	-262.77%
Referencia	OMSZ_Pn - Mt	0.624	0.642	0.126	0.979	3.881	9.870
Vályog (L)	OMSZ_Pr - Tlr	3.22%	-0.99%	29.78%	0.13%	-4.37%	8.78%
	OMSZ_Mk	-0.39%	0.82%	-7.49%	-0.27%	-5.47%	-7.75%
	CC_Hg - Sa	-11.00%	6.55%	-191.93%	-0.90%	12.00%	-183.21%
	FS_Hg - Sa	-14.20%	0.05%	-317.46%	-6.34%	13.51%	-957.88%
Referencia	OMSZ_Pn - Mt	0.661	0.656	0.106	0.998	3.881	14.310
Izszapos vályog (siL)	OMSZ_Pr - Tlr	3.33%	-0.95%	32.32%	0.00%	-4.37%	5.73%
	OMSZ_Mk	-0.45%	0.54%	-7.50%	0.00%	-5.98%	-4.53%
	CC_Hg - Sa	-13.28%	6.20%	-382.31%	-0.23%	12.09%	-1054.03%
	FS_Hg - Sa	-16.85%	-0.36%	-805.31%	-3.59%	13.85%	-7090.95%
Referencia	OMSZ_Pn - Mt	0.690	0.626	0.145	0.999	3.881	20.060
Homokos agyag (sC)	OMSZ_Pr - Tlr	2.59%	-1.40%	27.32%	0.00%	-4.37%	3.04%
	OMSZ_Mk	-0.27%	1.06%	-7.03%	0.00%	-5.98%	-5.91%
	CC_Hg - Sa	-9.30%	7.11%	-155.87%	0.00%	11.90%	-66.20%
	FS_Hg - Sa	-11.83%	0.63%	-235.24%	-1.05%	13.37%	-680.54%

Táblázat 5: A különböző PET becselő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző talajokra - számszerű összesítés

A legtöbb esetben az idősorok minimum értéke nulla, ami az ilyen típusú elemzésnél nem mutat információtöbbletet. Emiatt ezt a statisztikai mutatót elhanyagoltam. Csak az átlag és maximum értékeket vettem figyelembe, amelyek alapján látható, hogy:

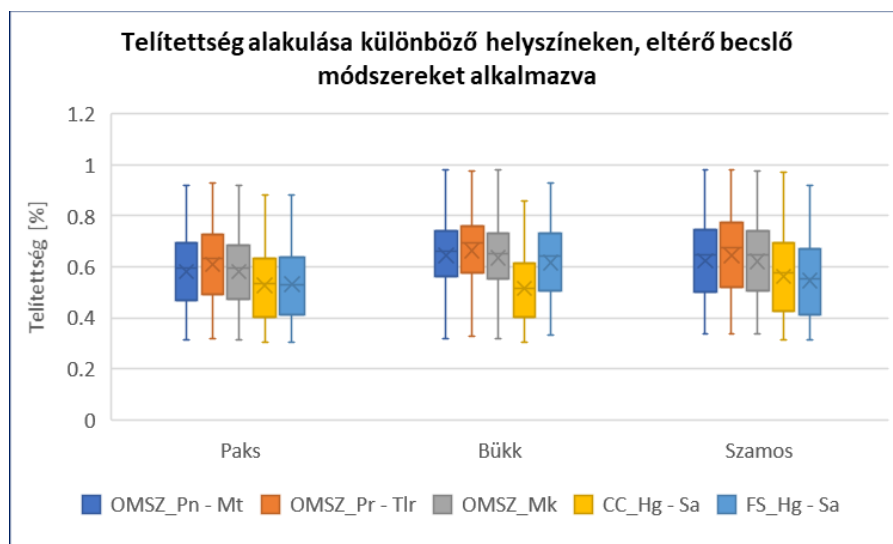
- A számszerű kiértékelés alátámasztja a box plotokon megfigyelt változásokat
- A színezés jól rávilágít arra, hogy az egyes módszerek alkalmazása közti viszonyokat nem módosítja a talajtípus
- Tényleges párolgás esetén itt is feltűnik a kivétel, ahol a Fs_Hg-Sa formulával számított PET idősor felülbecsül a referenciához képest, annak ellenére, hogy a többi talajtípus esetén alulbecsül. Ez az egy anomália azonban még nem indokolja, hogy talajtípusonként esetleg eltérő módon értelmezzük és használjuk fel a PET becselő formulákat

- A számok jól mutatják, hogy ez előző egy esetet kivéve a tendencia sem az átlagnál, sem a szélsőértékeknél nem változik talajtípusonként, viszont a referenciától való eltérés mértéke módosul.
- A Hargreaves-Samani módszernél a perkoláció esetében itt is megmutatkozik a jelentős túlbecslés, ami több nagyságrendbeli %-os eltérést okoz. Ez a nagy mértékű különbség azért sem annyira érzékelhető a box plotokon (főleg a szélsőértékek esetében), mert az nem tartalmazza a kiugró értékeket

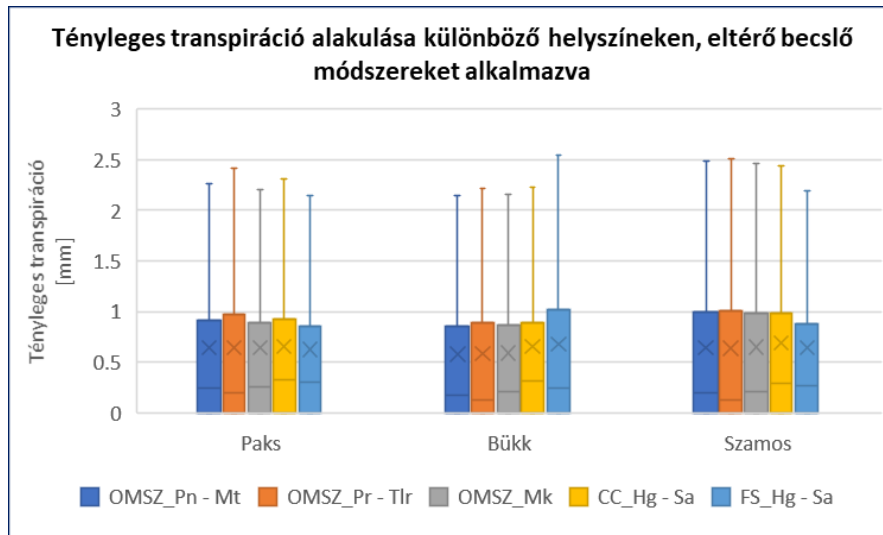
Elmondható tehát, hogy a különböző talajok a felül- vagy alulbecslő viszonyokat nem befolyásolják, legfeljebb annak mértékét. Ez arra utalhat, hogy modellezések során a PET becslő módszerek mutathatnak változást a viselkedésükben talajtípustól függően, viszont az alkalmazható módszerek közötti választást ez aligha befolyásolja, inkább a vizsgálni kívánt hidrológiai változó lesz mérvadó.

4.3.2 *Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése*

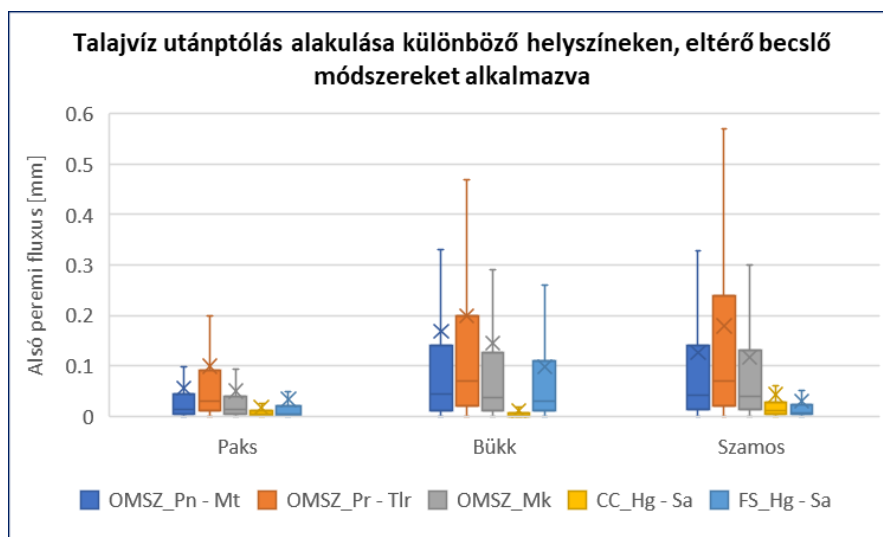
Az előzőekben bemutatott „érzékenységvizsgálat” hasonló formáját választottam amikor az eltérő meteorológiai jellemzőkkel rendelkező helyszínek hatásait vizsgáltam hidrológiai válaszok szintjén. Az ezekhez tartozó kimutatásokat a **20-22. ábrák** tartalmazzák:



Ábra 20: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját



Ábra 21: Tényleges transpiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját



Ábra 22: Talajvíz utánptólás alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját

A korábbi jellegzetességek ennél a kimutatásnál is felfedezhetőek: látszik, hogy ismét a Hargreaves – Samani módszer okoz anomáliákat, de azon belül is méginkább az alkalmazott adatbázisok. A Bükk esetében az FS jelentősen alulbecsli a CC-ből származó eredményeket, viszont a Szamos helyszínen PET tekintetében már túlbecslés van, mindhárom hidrológiai változó esetében. Ebből arra lehet következtetni, hogy az FS adatbázis a változékonyabb terepviszonyoknál torzításokhoz vezethet. Meg kell viszont jegyezni, hogy a módszer a Bükkben a CC esetén sem stabil, azonban itt a viselkedés FS-hez képest ellentétes: nagyobb arányban becsli felé a PET-et, mint a másik két helyszínen. Az arányok pontosabb meghatározáshoz itt is az előző táblázatos módszerrel vizsgáltam a Penman formulát alkalmazó számítási eredményektől való százalékos eltéréseket, a referenciaként tekintett vályog talajra:

		Referencia	Vályog (L)				
			OMSZ_Pn - Mt	OMSZ_Pr - Tlr	OMSZ_Mk	CC_Hg - Sa	FS_Hg - Sa
Átlag	Telítettség [%]	Paks	0.58	4.72%	-0.06%	-10.24%	-9.10%
		Bükk	0.64	2.80%	-1.45%	-25.29%	-4.58%
		Szamos	0.62	3.22%	-0.39%	-11.00%	-14.20%
	Tényleges párologtatás [mm]	Paks	0.64	-0.39%	0.22%	2.11%	-2.47%
		Bükk	0.57	1.15%	2.78%	12.05%	14.98%
		Szamos	0.64	-0.99%	0.82%	6.55%	0.05%
	Alsó kifolyás [mm]	Paks	0.06	44.37%	-10.38%	-219.80%	-67.46%
		Bükk	0.17	15.43%	-15.59%	-1498.99%	-71.54%
		Szamos	0.13	29.78%	-7.49%	-191.93%	-317.46%
Max	Telítettség [%]	Paks	0.92	0.86%	-0.18%	-4.48%	-4.67%
		Bükk	0.98	-0.42%	-0.16%	-14.03%	-5.28%
		Szamos	0.98	0.13%	-0.27%	-0.90%	-6.34%
	Tényleges párologtatás [mm]	Paks	3.86	-5.16%	-7.76%	5.00%	8.61%
		Bükk	3.35	2.68%	1.94%	-413.05%	-395.95%
		Szamos	0.64	-0.99%	0.82%	85.44%	85.69%
	Alsó kifolyás [mm]	Paks	1.39	20.57%	-4.51%	-552.58%	-173.62%
		Bükk	6.01	-12.55%	-3.09%	-4173.93%	-329.29%
		Szamos	9.87	8.78%	-7.75%	-183.21%	-957.88%

Táblázat 6: A különböző PET becselő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző helyszínekre - számszerű összesítés

A vizsgálandó tömböket ebben az esetben a sorok alkotják, amiknek az összevetésével tetten érhető a helyszínenkénti változást. A sorok közötti színezésben itt is elsősorban a Hargreaves – Samani esetén észlelhető a változás, ahogy az a box plotos ábrázolásnál is feltűnt. Itt látszik azonban az is, hogy a tényleges párologtatásnál helyszínenként a többi becselő módszer is eltérően viszonyul a referenciához. Az átlagoknál és a szélsőértékeknél is a Bükknél mutatkozik a legnagyobb számszerű eltérés. A tényleges párologtatás vizsgálatnál tehát indokolt lehet a terület jellege szerint is meggondolni az alkalmazandó PET becselő módszert választását. A többi hidrológiai változó esetében a Penman – Monteith, a Makkink és a Priestley – Taylor megbízhatónak tekinthető, területi éghajlat és jellegtől függetlenül. Az alsó peremi kifolyásnál a több nagyságrendi különbséggel kiugró eredményekért ebben az esetben is a szélsőértékek közötti nagymértékű eltérések a felelősek, illetve, hogy a Hargreaves-Samani módszer esetén nem adódtak kiugró értékek.

5 Összefoglalás

A hidrológusoknak nemcsak az egyes hidrológiai folyamatok működésének megértésére kell képesnek lenniük, hanem a hidrológiai rendszerek viselkedésének szintetizálására és integrálására is, beleértve a változó (azaz nem stacionárius) éghajlat, a talaj, a domborzat, a növényzet és a földhasználat hatásait (*Wagener, et al., 2010*). Munkámban a hidrológiai folyamat és vízmérleg egyik fontos elemét a potenciális evapotranszpiráció (PET) hatását vizsgáltam talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámítások segítségével. Mindezt azért mert a hidrológiai körfolyamatokban egyre nagyobb számban fordulnak elő olyan események, amik nem jellegzetesek. Ezek előrejelzéséhez és jó leírásához a lehető legpontosabb összefüggések alkalmazása szükséges, amiknek viszont csak rendszerszinten hatékony a vizsgálata. Az egyes PET becslő módszerek esetén kerestem a választ, mint hogy mennyire megbízhatóak az egyes formulák a referenciának tekintett Penman-Monteith képlethez képest; hidrológiai válaszok milyen mértékben érzékenyek az eltérő PET értékekre; mely becslő módszerek becsülnek alá és melyek túl; mennyire megbízhatóak az elérhető nyílt adatbázisok; okozhat-e az eltérő talaj/éghajlat eltérő tendenciát a becslő módszerekből adódó különbségek között?

Ezeknek a megválaszolására a kiértékelt eredmények alapján az alábbi állításokat lehet megfogalmazni:

1. A Hargreaves-Samani képlet mindkét adatbázis esetében jelentősen felülbecsül a referenciához képest, ~ 20%-al. A többi módszer értékei az összesítésben 5%-on belül maradnak. A Hargreaves – Samani módszer ígéretesnek tűnt a paraméterigénye alapján, azonban elmondható, hogy hazai viszonyokra megbízhatatlan eredményt ad
2. A Penman-Monteith értékeket leginkább a Makkink formula eredményei közelítik meg, a korrelációs együttható értéke esetünkben 0.98
3. A Priestley-Taylor alulbecsül. Elsősorban a telítettségénél látszik, hogy magasabb értékek adódnak rá, de a hatás főleg a perkolációnál jelentkezik, ahol az átlag, a kvantilisek és a maximum érték tekintetében is jelentősen meghaladja a többi becslő módszer eredményeit.
4. A hidrológiai válaszok eltérő mértékben érzékenyek. Ha csak a tényleges transzpirációs ábrákra szorítkoznánk, nem látszódnának a lényegi különbségek. A fentiek alapján megállapítható, hogy a telítettség és különösen az alsó kifolyás

ábra nyújtja a legtöbb információt, az választja szét “leghatékonyabban” a becselő módszereket.

5. A két Hargreaves-becslés összevetéséből látható, hogy a FORESEE adatbázis eltérő eredményre vezet. Összességében kisebb PET-et eredményez, viszont elképzelhető, hogy az adatbázis a téli időszakra felülbecsül (ami miatt kisebb a mélybe szivárgás és az egész évre vonatkozó telítettség), nyáron viszont alulbecsül, amikor viszont a tényleges transpiráció többsége lezajlik, így arra szintén kisebb érték adódik. A két adatbázis közti különbséget támasztja alá a Bükk esetében az is, hogy az FS jelentősen alulbecsli a CC-ből származó eredményeket, viszont a Szamos helyszínen PET tekintetében már túlbecslés van, mindhárom hidrológiai változó esetében. Ebből arra lehet következtetni, hogy az FS adatbázis a változékonyabb terepviszonyoknál torzításokhoz vezethet. Meg kell viszont jegyezni, hogy a módszer a Bükkben a CC esetén sem stabil, azonban itt a viselkedés FS-hez képest ellentétes: nagyobb arányban becsli túl a PET-et, mint a másik két helyszínen.
6. A Makkink, Penman-Monteith, Priestley-Taylor eredményei viszont nem csak közel esnek egymáshoz, de eltérő talajtextúrák és meteorológiai viszonyok mellett is megbízhatóan viselkednek. A modellezések során a PET becselő módszerek, az egyes talajtextúrák esetében változhatnak nem arányosan, viszont az alkalmazható módszerek közötti választást ez aligha befolyásolja, ha az alul és túlbecslő viszonyok ugyanolyanok maradnak az egyes formulák eredményei között.
7. A várakozásoknak megfelelően a talajtextúrák inkább a hidrológiai válaszok szintjén vezethetnek szignifikáns eltérésekhez. Fontos megállapítás, hogy a talajtípusok közti változásnál nagyobb eltérést jelenthet az, hogy a PET-et milyen módszerrel becsüljük. Egy-egy talajtípuson belül nagyobb eltéréseket adnak az egyes becselő módszerek, mint amilyen eltérés látszódik ugyanazon becselő módszernél, csak más talajtípusnál. Az ehhez tartozó eredmények, valamint az 2. és 3. pont alapján elmondható, hogy leginkább a Pn-Mt és a Mk adják a legmegbízhatóbb eredményeket a különböző talajtípusokra.
8. A terület jellege szerint (ahol a PET-et az éghajlati viszonyok közvetlenül befolyásolják) a tényleges párolgás vizsgálatnál lehet indokolt meggondolni az alkalmazandó PET becselő módszert kiválasztását, ha a valósághoz legközelebb eső eredményeket szeretnénk kapni. Meg kell említeni viszont, hogy nem csak a

területre jellemző éghajlat, de a terepviszonyok is jelentős változók lehetnek (még ha a kettő nem is teljesen független egymástól).

Úgy gondolom, hogy munkám eredményei alapján közelebb kerülhetünk a PET-nek, mint peremfeltételi idősor hatásainak a megértéséhez. A hidrológiai modellek sikeressége ugyanis részben ennek a megbízhatóságán múlik, mivel a megfelelő formulák és adatbázisok alkalmazása elengedhetetlen a valóság minél pontosabb leírásához.

A jövőben, akár a diplomamunka keretein belül, a vizsgálatokat valós talajszelvényekre is ki lehetne terjeszteni, esetleg javasolt lehet az alapadatok szintjén más típusú átlaghőmérséklet számítás (*Dingman, 2015*), vagy havi léptékű idősorok alkalmazása. Újszerű információhoz vezethet akár az is, ha a modellezésbe a talajvizet is beépítenénk és/vagy eltérő növényborításokat is figyelembe vennénk.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a közös munkát Dr. Kozma Zsoltnak, aki témavezetőmként állandó tanácsokkal látott el a dolgozatom minőségének javítása érdekében. Szaktudása, meglátásai és segítőkészsége nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a témát a legjobb tudásomnak megfelelően dolgozzam fel. Annak ellenére, hogy a szakterületen korábbi tapasztalatokkal nem rendelkezttem, türelmes volt, és mindig buzdított a tovább haladásra.

Köszönetet szeretnék mondani továbbá az ELKH ATK TAKI két kutatójának, Dr. Szabó Brigittának és Dr. Makó Andrásnak, akiktől a MARTHA 3.0-s adatbázis és a talajtani adatok származnak.

Köszönettel tartozom továbbá:

A Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék munkatársainak, köztük Ács Tamásnak és Decsi Bencének. Segédprogramjaiknak köszönhetően vált kivitelezhetővé a nagyméretű adatmennyiség kezelése. Ezek nélkül a feldolgozott projekteknek csak egy töredékét tudtam volna futtatni.

6 Irodalomjegyzék

Allen, R. G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, p. 10.

Anon., 2015. <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>. [Online]
Available at: <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>

Bihari et al., Z., 2013. *Annex 3 – Description of MASH and MISH algorithms*,

CARPATCLIM, 2021. *Climate of the Carpathian Region - About*. [Online]
Available at: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/about/>

Csorba, P., 2021. *Magyarország kistájai*. második szerk. Debrecen: Táj- és Környezetföldrajzi Alapítvány.

Decsi, B., Kozma, Z. & Ács, T., 2020. Long-term Water Regime Studies of a Degraded Floating Fen in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Issue 64(4), pp. 951-963.

DeJonge, K. & Thorp, K., 2017. Implementing standardized reference evapotranspiration and dual crop coefficient approach in the DSSAT cropping system model. p. 10.

Dingman, S. L., 2015. *Physical Hydrology - Third Edition*. third szerk. USA: Waveland Press, Inc..

Dobor, L. és mtsai., 2015. Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience data Journal*, p. 11.

ECA&D, 2021. *European Climate Assessment&Dataset*. [Online]
Available at: <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>

Fernandes, L. C., Paiva, C. M. & Filho, O. C. R., 2012. Evaluation of six empirical evapotranspiration equations - case study: Campos dos Goytacazes/RJ. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Szeptember, 27(3), pp. 272-280.

FORESEE, 2021. *Open Database FOR Climate Change-Related Impact Studies in Central Europe*. [Online]
Available at: <http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index.html>

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. & Lister, D., 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 3. április.p. 18.

Hofstra, N., Haylock, M., New, M. & Jones, P. D., 2009. Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature. *AN AGU Journal of Geophysical Research*, 4. november.p. 16.

Jamieson, P., 1982. Comparing of methods of estimating maximum evaporation from a barley crop. *N. Z. J. Sci.*, p. 25:175–181.

Jensen, M., Burman, R. & Allen, R., 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. *Manuals and Reports of Engineering Practice No. 70. New York: American Society of Civil Engineering.*

Jianbiao, L., Sun, G., McNulty, S. G. & Amatya, D., 2005. A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, May.pp. 41: 621-633.

Kozma, Z., Ács, T. & Koncsos, L., 2014. *Unsaturated zone modelling: the role of soil database classification.* hely nélk., ismeretlen szerző, p. 13.

Montanari, A., Shoemaker, C. & van de Giesen, N., 2009. Introduction to special section on uncertainty assessment in surface and subsurface hydrology: An overview of issues and challenges. *Water Resources Research*.

MVM Paks II. Zrt, 2012. *Paks és 30 km sugarú környezetének éghajlati jellemzése*, hely nélk.: ismeretlen szerző

OMSZ, 2021. *Országos Meteorológiai Szolgálat.* [Online] Available at: <https://odp.met.hu/>

Pereira, A. & Nova, N., 1992. Analysis of the Priestley-Taylor parameter. *Agric. For. Meteorol.*, pp. 61:1-9.

Priestley, C. & Taylor, R., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.. *Mon. Weather Rev.*, pp. 100:81-92.

Schmotzer, A., 2017. *A Szilvásváradi Aszaló és Szilvás-patak mente (HUBN20067) kiemelt jelentőségű különleges természetmegőrzési terület Natura 2000 fenntartási terve*, Eger: Natura 2000.

Šimůnek, J. és mtsai., 2009. *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media - Version 4.08*, Riverside, California, USA: ismeretlen szerző

Szász, G., 1995. Főbb termesztett növények természetes vízhasznosulása Magyarországon. *OMSZ Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok*, 3. kötet.

Thornthwaite, C., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, pp. 38:55-94.

Vermes, L. és mtsai., 2001. *Vízgazdálkodás mezőgazdasági, kertész-, tájépítész- és erdőmérnök-hallgatók részére*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó.

Wagner, T., Sivaplan & Troch, P., 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world.. *Water Resources Research*, p. 46:W05301.

Wagner, A., 2009. Literature Study on the Correction of Precipitation Measurements.

Zhang, Y. & Schaap, G. M., 2019. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. *Journal of Hydrology*, August, Issue 575, pp. 1011-1030.

Ábrajegyzék

Ábra 1: Vízforgalmat leíró fogalmak definíciója a teitetlen zónában, forrás: (Dingman, 2015)	8
Ábra 2: A homok, iszap és agyag relatív méretei, forrás: (Dingman, 2015).....	9
Ábra 3: USDA talajtextúraháromszög, forrás: (Dingman, 2015).....	9
Ábra 4: Átlaghőmérséklet alakulása 1991-2020 időszakra (FORESEE) (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index-maps_v4.0.html)	14
Ábra 5: A rácsháló vizsgált celláinak elhelyezkedése (kézzel kiemelt) - FORESEE adatbázis (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map_query/index.html)	16
Ábra 6: Kiválasztott talajtextúrákhoz tartozó retenciós görbék, forrás: saját	17
Ábra 7: Projektváltozatok felépítése – ágrajz (forrás: saját).....	21
Ábra 8: Napi aktuális PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén, forrás: saját	23
Ábra 9: Összegzett PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén, forrás: saját	24
Ábra 10: A különböző becslő képletek kapcsolata a referenciának tekintett Penman-Monteith formulával, forrás: saját	25
Ábra 11: Helyszínek összevetése a PET alakulása szerint, különböző becslő módszerek esetén, forrás:saját	25
Ábra 12: Telítettség referencia változókra vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítve, forrás:saját.....	27

Ábra 13: Csapadékhatások szemléltetése a telítettség idősorán, forrás: saját	27
Ábra 14: Alsó peremi kifolyás referencia értékekre vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítése, forrás: saját.....	28
Ábra 15: Tényleges transpiráció referencia értékekre vonatkozó alakulása, idősorosan és box plotként megjelenítése, forrás: saját.....	29
Ábra 16: Tényleges és potenciális transpiráció különbsége, csapadékidősor mellett, forrás: saját.....	30
Ábra 17: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját .	31
Ábra 18: Tényleges párolgás alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját	31
Ábra 19: Perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját .	31
Ábra 20: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját....	35
Ábra 21: Tényleges transpiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját	36
Ábra 22: Talajvíz utánpótlás alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, forrás: saját	36

Táblázatjegyzék

Táblázat 1: Adatbázisok összesítése és összehasonlítása	13
Táblázat 2: Vizsgálati pontok jellemző földrajzi, éghajlati és meteorológiai adatai, forrás: (Csorba, 2021), (MVM Paks II. Zrt, 2012), (Schmotzer, 2017), (Anon., 2015).....	15
Táblázat 3: Vizsgált területet lefedő cellák középpontjának koordinátái és cellaazonosítója	15
Táblázat 4: A projektekben felhasznált talajtextúra osztályok és a hozzájuk tartozó paraméterek.....	17
Táblázat 5: A különböző PET becslő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző talajokra - számszerű összesítés.....	34
Táblázat 6: A különböző PET becslő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző helyszínekre - számszerű összesítés.....	37