



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Párolgásbecslő módszerek összehasonlító vizsgálata talajvízforgalmi modellezéssel

Készítette:

György Máté

K2K3A6

Konzulens:

Dr. Kozma Zsolt

Egyetemi docens, VKKT

Budapest

2021

Tartalomjegyzék

Absztrakt	3
Abstract	4
1 Bevezetés	5
2 Szakirodalmi áttekintés	7
2.1 Az evapotranszspiráció, mint a vízmérleg része.....	7
2.2 Potenciális evapotranszspirációt becslő módszerek áttekintése	9
2.3 HYDRUS-1D vízforgalmi modellező szoftver.....	14
2.3.1 Talajtani áttekintés	14
3 Módszertan	20
3.1 Adatgyűjtés	20
3.2 Projektek összeállítása talajvízforgalmi modellezéshez	22
3.2.1 Vizsgált földrajzi helyszínek	23
3.2.2 Vizsgált talajtípusok	26
3.2.3 PET becslő módszerek alkalmazása.....	27
3.3 Talajvízforgalmi modell	30
4 Eredmények, kiértékelés	32
4.1 PET idősorok értékelése	32
4.2 Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése	36
4.2.1 Telítettség	36
4.2.2 Talajvíz utánpótlás	38
4.2.3 Tényleges transpiráció	39
4.3 Statisztikai összehasonlító vizsgálatok a hidrológiai változók segítségével ..	40
4.3.1 Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése.....	40
4.3.2 Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése	45
5 Összefoglalás	48
6 Saját munkarész összefoglaló ismertetése	51

Köszönetnyilvánítás	52
7 Irodalomjegyzék	53
8 Függelék	59
8.1 Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése	59
8.1.1 <i>Paks, homok, OMSZ adatbázis, Makkink-formula</i>	59
8.1.2 <i>Bükk, homokos agyag, FORESEE adatbázis, Hargreaves-Samani formula</i> 60	
8.2 Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése hidrológiai változókon keresztül 61	
8.2.1 <i>Melegebb éghajlati viszonyok esetében: Paks cella</i>	61
8.2.2 <i>Hűvösebb éghajlati viszonyok esetében: Bükk cella</i>	63
8.3 Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése hidrológiai változókon keresztül 64	
8.3.1 <i>Homok talajtípus esetén</i>	64
8.3.2 <i>Vályogos homok talajtípus esetén</i>	66
8.3.3 <i>Izapos vályog talajtípus esetén</i>	67
8.3.4 <i>Homokos agyag talajtípus esetén</i>	69

Absztrakt

Építőmérnöki szempontból is jelentős szerepe lehet a talajszelvények hidrológiai szempontú (tényleges párolgás, telítettség, alsó peremi kifolyás, stb.) besorolásának, mivel ezek a tulajdonságok közvetetten olyan problémaköröket is érinthetnek, mint az alapozás, csapadékvízgazdálkodás vagy épp a kármentesítés. Meghatározásukban jelentős szerepe van a vízmérleg szimulációknak, ahol azonban elengedhetetlen, hogy az egyes összetevők értékei a valóságot a legjobban közelítsék. Dolgozatomban ezért a vízforgalmi számítások egyik döntő peremi adatsorára, a potenciális evapotranszpirációra (PET) végeztem érzékenységvizsgálatot. A PET érték becslésére alkalmazott 4 széleskörben elismert formula (Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor) eredményeivel futtattam talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámításokat HYDRUS-1D szoftverben, 5 különböző talajtípusra (homok, vályogos homok, vályog, iszapos vályog, homokos agyag) és 3 eltérő meteorológiai adatokkal rendelkező helyszínre (Paks, Szamos, Bükk). Továbbá a vizsgálatok részét képezte a számításokba bevont, FORESEE v3.1 és CARPATCLIM adatbázisok összehasonlítása is. A szimulációs eredményekből a telítettség, a tényleges transzspiráció és az alsó peremi kifolyás értékeket idősorosan elemeztem és ennek statisztikai mutatószámait box plotokon keresztül is értelmeztem. Referenciaként a Penman-Monteith formula eredményeit alkalmaztam, amelyet a Hargreaves-Samani értékei ~20 % -al felülbecsülnek. A hidrológiai változók vizsgálata közül az alsó peremi fluxus választotta szét leglátványosabban az egyes PET becselő módszereket, itt mutatkozott meg az is, hogy a Priestley-Taylor alulbecsli a PET értékeit a referenciához képest. Elmondható továbbá, hogy a két adatbázisból a FORESEE-nél jelentkeztek bizonytalanságok, elképzelhető, hogy az adatbázis a téli időszakra felülbecsül, a nyárra pedig alul. Az eltérő talajtextúrák és meteorológiai viszonyok nem módosították jelentősen a formulák alul- és felülbecsülő viszonyait a hidrológiai változók esetében, valamint fontos megállapítás az is, hogy a talajtípusok közti változásnál nagyobb eltérést jelenthet az, hogy a PET-et milyen módszerrel becsüljük. A referenciához képest legmegbízhatóbban a kisebb paraméterigényű Makkink formula alkalmazható, melynek Pearson-féle korrelációs együtthatója 0,95 volt.

Úgy gondolom, hogy mindezen eredmények alapján közelebb kerülhetünk a PET-nek, mint peremfeltételi idősor hatásainak a megértéséhez. A homogén talajszelvényekre végzett szimulációs számításoknál alkalmazott módszertan egy keretrendszert is ad a valós talajszelvények jövőbeli vizsgálatához. A végső cél egy új talajtani kategorizálás lehet a talajok hidrológiai szempontú besorolásával.

Abstract

Soil profile classification from a water management point of view can be of great significance also from the aspect of civil engineering, as it considers other important physical properties, too. The quantitative formulation of factorised water balance can help specify these properties through simulations. However, it is important for the boundary conditions to be as close to reality as possible. Therefore, in my thesis I carried out a sensitivity analysis on potential evapotranspiration (PET). Using the results of 4 widely accepted formulas for estimating PET value (Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor), I did soil profile level model calculations in HYDRUS-1D software on 5 different soil types (sand, loamy sand, loam, silty loam, sandy clay) and 3 sites with different meteorological data (Paks, Szamos, Bükk). Furthermore, the comparison of databases FORESEE v3.1 and CARPATCLIM included in the calculations was also part of the analysis. Using the simulation results I did a time series analysis on the values of saturation, actual transpiration and bottom flux. I also interpreted the statistical indicators of the time series through box plots. As reference, I used the results of the Penman-Monteith formula, which is overestimated by ~20% by the Hargreaves-Samani values. Of the hydrological variables analysed, PET estimation methods were most visibly separated by bottom flux. It was here that the Priestley-Taylor was shown to underestimate PET values compared to the reference. We can also conclude that of the two databases, there were uncertainties in FORESEE, as it possibly overestimates for the winter period and underestimates for the summer period. The different soil textures and meteorological conditions did not significantly alter the under- and over-estimation of the formulas for the hydrological variables, and an important finding is that the method used to estimate PET may account for a larger variation in the changes between soil types. The most reliable formula compared to the reference is the Makkink formula, which requires fewer parameters and has a correlation coefficient of 0.95.

I believe that all these results bring us closer to understanding the effects of PET as a boundary condition time series. The methodology used for the simulation calculations on homogeneous soil profiles also provides a framework for future studies of real soil profiles. The ultimate goal can be a new soil categorization where the soils could be classified from a hydrological perspective.

1 Bevezetés

Az éghajlatváltozás szerteágazó kutatási irányai között jelentős helyet foglal el annak hatáselemzése. Az egyre szélsőséesebb 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.

Dolgozatomban ezért a földfelszín energiamérlegének és a hidrológiai körforgásnak meghatározó folyamatát, az evapotranszpirációt 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 evapotranszspiráció (ET_0 , illetve PET) és a tényleges ET (AET) mérésére, helyette a költséges, liziméteres mérések terjedtek el, illetve a szakirodalomból számos indirekt módszer ismert. Ezek egyik fontos csoportját jelentik a PET becslésére használt eljárások, mint például a Hargreaves-Samani, 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 változó, és nagymértékben függ a légkör-növény-talaj rendszer helyi és pillanatnyi sajátosságaitól.

Diplomamunkámban a célom volt, hogy a PET hidrológiai hatásait megismerjem, ezért talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámítások segítségével vizsgáltam, hogy az egyes

becslési eljárások hogyan módosítanak a talajszelvények vízmérlegét. A folyamatot HYDRUS-1D modellező szoftverben fiktív talajszelvényekre vizsgáltam. Az egyes környezeti hatásokat lépcsőzetesen építettem 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. Ez a módszertan később kiterjeszthető a valós talajszelvényekre is, amiknek a hidrológiai szempontú besorolásával új talajkategorizálás hozható létre.

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 múltra vonatkozóan), hogy a módszerek közti eltérésre megfigyeléseket tudtam tenni.

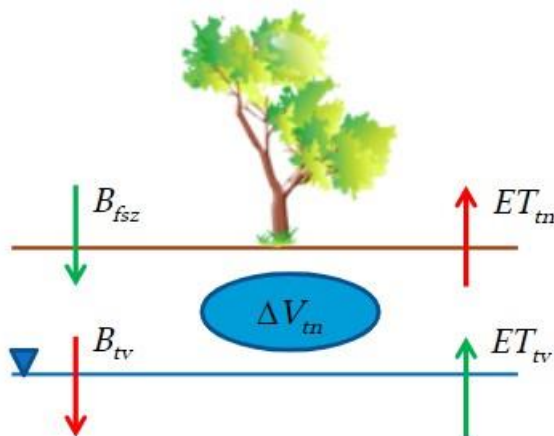
2 Szakirodalmi áttekintés

A jól definiált, pontos fizikai tartalommal bíró, könnyen mérhető, vagy jó közelítéssel számítható, egzakt és kvantitatív talajfizikai, vízgazdálkodási paraméterek iránti igény mennyiségében és sokoldalúságában rohamosan nő. Építőmérnöki és hasznosítási (mezőgazdasági, ökológiai, környezetvédelmi) szempontból is fontos a talaj vízgazdálkodási besorolása, mert többek között ezektől a tulajdonságoktól függ a talaj szilárd, folyadék- és gázfázisban végbemenő változások (szerkezetképződés-leromlás; oxidáció-redukció stb.) e fázisok közötti kölcsönhatások (adszorpció-deszorpció; fixáció-mobilizáció stb.) és fázisátalakulások (oldódás, kicsapódás, párolgás stb.) lehetősége és valószínűsége, továbbá a talajra vagy a talajba jutó oldott, vagy szuszpendált anyagok, szilárd részecskék térbeli mozgása (Várallyay, 1983). Ezek olyan konkrét problémakörökre is lefordíthatóak, mint az alapozás, teherbírás, földművek készítése, csapadékvízgazdálkodás, kármentesítés. Várallyai már 1983-ban megemlíti, hogy az összetevőire bontott vízmérlegek kvantitatív megfogalmazása jelentős, egzakt információkat jelentene egy-egy talajszelvény vízháztartására és nedvességforgalmára. A vízmérleg szimulációk egy hidrológiai folyamatokon alapuló, új talajszelvény kategorizálás megalkotását segítenék elő, amelyek hidrológiai modellezés szempontjából megbízhatóbb bemeneti változók (Kreye, et al., 2019). Az egyes összetevők értékeinek lehető legpontosabb számszerűsítéshez elengedhetetlen, hogy olyan becslő képletekkel határozzuk meg őket, amelyek eredményei a valóságot a legjobban közelítik.

A vízmérleg egyik fő összetevője a párolgás jellemzésére szolgáló **potenciális evapotranszspiráció (PET)** amelyet általában elméleti vagy empirikus egyenletekkel becsülnék (Grismer, et al., 2002).

2.1 Az evapotranszspiráció, mint a vízmérleg része

A **vízmérleg** alkalmas arra, hogy leírja a vizsgált térrész tárolt vízkészletének megváltozását bármely Δt hosszúságú időszakra. A háromfázisú (levegő-víz-talaj) telítetlen zóna vízmérlegét az **1.ábrához** tartozó (1) szerint írható fel (Ács, 2010):



Ábra 1: A telítetlen zóna vízmérlege, forrás: (Ács, 2010)

Bevételi oldal [L/T]:

B_{fsz} : beszivárgás a felszínen

ET_{tv} : felszivárgás (evapotranszpiráció) a talajvízből

Kiadási oldal [L/T]:

ET_{tn} : evapotranszpiráció a talajból

B_{tv} : beszivárgás a talajvízbe

$$\frac{\Delta V_{tn}}{\Delta t} = (B_{fsz} + ET_{tv} - B_{tv} - ET_{tn}) \cdot A \quad (1)$$

$$B_{fsz} = P - L_{fsz} - E_{fsz} \quad (2)$$

Ahol: ΔV_{tn} : tárolt készlet megváltozás a telítetlen zónában [L³/T]

Δt : vizsgált időszak (vízmérleg időszaka) [T]

A : vizsgált térrész horizontális kiterjedése [L²]

P : csapadék [L]

L_{fsz} : felszíni lefolyás [L]

E_{fsz} : evaporáció (fizikai párolgás) felszínről és növényzetről

A kiadási oldalon szereplő **tényleges evapotranszpiráció (AET)** 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 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. A **transzspiráció** teljes folyamata magában foglalja a talajvíznek a növényi gyökök általi felszívódását; a gyökök, a szár és az ágak erezetén keresztül a levelekbe történő folyékony formában történő átjutását; és a levél erezetén keresztül az apró sztómák (levél felületén lévő nyílások) falába történő elpárolgását, ahol a kipárologtatás történik. Ezekben az üregekben lévő vízgőz ezután a sztómákon keresztül a légkörbe jut.

A szimulációk bemeneti adataiban azonban legtöbbször előnyben részesítik a **potenciális evapotranszpirációt (PET)**, mivel ez azt a vízmennyiséget írja le, ami a felszíni evaporáció és a növényzet transzspirációja révén adott éghajlat mellett a légkörbe kerülhet, ha a felszín alatti vízkészlet korlátlan, tehát az evapotranszpiráció az adott légköri viszonyok között

maximális mértékűvé válik (*Thorntwaite, 1948; Jensen, et al., 1990*). Ez a meghatározás Thorntwaite (1948) éghajlati osztályozási rendszerének részeként alakult ki, aki szerint a fogalom alapvetően az éghajlattól vagy az időjárástól függ és a felszíni jellemzőktől nem. Ezzel azonban nem konkretizálja a növényzet típusát, magasságát és más, egyéb tulajdonságait, mint például a felszíni ellenállást. A pontatlanságok elkerülése végett ezért az Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezet (FAO) által szabványosított referencia evapotranszspiráció fogalma terjedt el (*Allen, 1996*). Penman (1956) azt javasolta, hogy a PET fogalmát helyettesítsék a referencia-termesztésből származó evapotranszspirációval: a referencia evapotranszspiráció (ET_0) az a vízmennyiség, amelyet egy rövid, zöld, a talajt teljesen beárnyékoló, egyenletes magasságú, és soha nem vízhiányos alacsony növény transzpirál (*Dingman, 2015*).

A forró, száraz régiókban a potenciális evapotranszspiráció jelentősen meghaladja a csapadékot, így az átlagos tényleges evapotranszspiráció vízkorlátos, és közel azonos az átlagos csapadékmennyiséggel. A minden évszakban bőséges csapadékkal rendelkező régiókban a párolgást a rendelkezésre álló energia korlátozza, így az átlagos párolgás lényegében megegyezik az átlagos potenciális párolgással (*Dingman, 2015*).

A potenciális párolgás közvetlenül is mérhető liziméterekkel, de ezek gyakran drágák, a mérések pontosságát tekintve igényesek, és csak jól képzett személyzet tudja teljes mértékben kihasználni őket (*Fernandes, et al., 2012*). Pont ezért alkalmazzák inkább az elméleti és empirikus megközelítéseket, a számszerűsítés viszont komoly kihívásokat jelent. A PET becslésére körülbelül 50 módszer vagy modell áll rendelkezésre, de ezek a módszerek vagy modellek nem adnak egységes értékeket a különböző feltételezések és bemeneti adatigényeik miatt, illetve azért, mert gyakran csak bizonyos éghajlati régiókra fejlesztették ki őket (*Grismer, et al., 2002*). A világ különböző régióiban a párolgási viselkedés leírások az alkalmazhatóságuk tekintetében korlátozottak (*Fernandes, et al., 2012*).

2.2 Potenciális evapotranszspirációt becslő módszerek áttekintése

Számítási módszerek osztályozása (*Dingman, 2015*):

- Sugárzás-alapú: A nettó sugárzást és a levegő hőmérsékletét használja.
- Kombinációs: 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, mások felszínspecifikusak, és információt igényelnek az albedóról, a növényzet magasságáról, a maximális sztómavezetésről, a levélfelület-indexről és/vagy más tényezőkről (Dingman, 2015).

➤ **Penman – Monteith formula**

A Penman-Monteith (Pn-Mt) (3) módszer alapvetően napi időskálán, rögzített feltételek mellett becsli a fűfelszín potenciális párolgását standard meteorológiai adatok alapján (DeJonge & Thorp, 2017):

$$PET = K_{cs}ET_{pm} \quad (3)$$

$$ET_{pm} = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(\frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (4)$$

$$K_{cs} = 1 + (EORATIO - 1) \frac{LAI}{6} \quad (5)$$

ahol ET_{pm} a referencia párolgás [mm d^{-1}], R_n a nettó sugárzás [$\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$], G a talajba jutó hőáram [$\text{MJm}^2\text{d}^{-1}$], 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 (telítési és aktuális gőznyomás különbsége) [kPa], Δ a telítési gőznyomás és a hőmérséklet exponenciális kapcsolatát leíró görbe meredekségét fejezi ki adott hőmérsékleti értékre vonatkozóan [kPa °C^{-1}], γ a pszichrometriai állandó [kPa °C^{-1}], r_s a térfogati felületi ellenállás [sm^{-1}], r_a az aerodinamikai ellenállás [sm^{-2}], K_{cs} a terméskoefficiens, LAI a szimulált levélfelület-index, és $EORATIO$ a maximális K_{cs} , ha a LAI nagyobb vagy egyenlő 6 (DeJonge & Thorp, 2017). Az r_s nagysága azt fejezi ki, hogy a talaj és a légkör közti vízgőz árammal szemben a növények gázcsere nyílásai (sztómák), levelei és a talajfelszín mekkora ellenállást fejt ki. Ehhez hasonlóan az r_a értéke megadja, hogy a légkörbe irányuló szenzibilis hő és vízgőz árammal szemben mekkora a növényzet felett található levegő ellenállása (Crawford & Bluestein, 2000).

A Stefan - Boltzmann törvény értelmében a felszín hőmérsékletének negyedik hatványával arányosan nő a kisugárzott energia nagysága. A kisugárzás döntően a hosszúhullámú sugárzási tartományban (4 - 100 μm) történik. Napnyugtát követően megszűnik a besugárzás, a hosszúhullámú kisugárzás pedig a felszín erőteljes lehűlését idézi elő. Nappal a felmelegedett felszín molekuláris hővezetés révén melegíti a hozzá közeli 1 mm vastagságú lamináris légköri réteget, amely konvektív hőszállítás révén tovább melegíti a felette található légköri rétegeket. Ezt a folyamatot szenzibilis hőáramnak nevezzük. A felszín és a légkör között

a párolgás és a kondenzáció folyamata révén kialakuló vertikális nedvességszállítást pedig látens hőáramnak. A felszíni energiamérleg lényegében a felszínközeli sugárzási mérleget fejezi ki a szenzibilis-, látens- és talajhőáram segítségével:

$$R_n = H + \lambda \cdot E + G \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

Ahol R_n a sugárzásegyenleg (vagy más néven nettó sugárzás), H a szenzibilis hőáram, $(\lambda \cdot E)$ a látens hőáram, ahol E a vízgőzáram, míg λ a fázisátalakulási hő, G pedig a talajba jutó hőáram. A felszíni energiamérleg egyenlete megadja a sugárzásegyenleg (R_n) által rendelkezésre álló sugárzási energia hőáramok közötti eloszlását (Holtslag & De Bruin, 1988; Holtslag & Van Ulden, 1983).

A Penman-Monteith-egyenletet széles körben használják, és fizikailag megalapozottnak tekintik, de van néhány hiányossága. Először is, intenzív adatbevitt igényel, amelyek a világ számos részén nem feltétlenül állnak rendelkezésre. Másodszor, nagyon nehéz szabványos referenciatételeket fenntartani egy meteorológiai állomáson. A *gyakorlatban* a legtöbb rendelkezésre álló időjárási adatot nem mezőgazdasági jellegű területekről jelentik, mert az állomások repülőtereken, épületek tetején, aszfaltozott felületek felett vagy azok közelében helyezkednek el és így nem szolgálnak referenciaként (Jensen, et al., 1997).

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

➤ Priestley – Taylor formula

A (6) Priestley-Taylor (Pr-Tlr) 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:

$$ET_{pt} = \frac{\alpha \Delta (R_n - G)}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (6)$$

ahol ET_{pt} a párolgás [$mm \cdot d^{-1}$], α egy konstans [=1,26], λ a látens párolgási hő [$MJ \cdot kg^{-1}$], Δ a gőznyomás-hőmérséklet görbe meredeksége [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$], R_n a nettó napsugárzás [$MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$], G a talajba jutó hőáram [$MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$] és γ a pszichometria állandó [$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$].

A Priestley-Taylor-módszer a hőáram és a párolgás közötti összefüggés. Ez az egyenlet akkor alkalmas, ha nem állnak rendelkezésre részletes felszíni és aerodinamikai mérések, különösen, ha nagy területről van szó (Wu, et al., 2021).

➤ **Makkink formula**

Makkink (1957) a (7) sugárzásalapú empirikus megközelítést dolgozta ki, és a potenciális evapotranszpirációt milliméter/napban [mm·nap⁻¹] becsülte meg a következő kifejezéssel:

$$PET = 0,61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_s}{58,5} - 0,12 \quad (7)$$

Az egyenletben szereplő változók jelentése és mértékegysége megegyezik az előző módszerekénél feltüntetettekkel, R_s a napi napsugárzás mértéke [ly/nap] (Jianbiao, et al., 2005).

➤ **Hargreaves – Samani formula**

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

ahol PET a napi potenciális evapotranszpiráció [mm/nap]; λ a látens párolgási hő [MJ/kg]; T a napi átlagos léghőmérséklet [°C]; R_a a földönkívüli napsugárzás [MJ/m²/nap]; és TD a napi különbség a maximális és minimális léghőmérséklet között [°C] (Jianbiao, et al., 2005). A formula részletesebb számítási lépéseire a [3.2.3 fejezetben](#) térek ki.

Hargreaves (1985) összehasonlító vizsgálatai azt mutatták, hogy az egyenlet megfelelő pontossággal használható a potenciális evapotranszpiráció becslésére referenciafelület felett. A referenciafelület fogalmát azért vezették be, mert minden egyes növénykultúrára és növekedési szakaszra egyedi párolgási paramétereket kellett meghatározni. A fű és a takarmánylucerna aerodinamikai és felszíni jellemzőik tekintetében jól tanulmányozott növények, és világszerte elfogadott referenciafelületnek számítanak (Burman & Pochop, 1994). Figyelembe véve a klimatológiai adatok szűkösségét a világ legtöbb részén, valamint az PET becslésére szolgáló kifinomultabb módszerek használatához szükséges ismeretek és lehetőségek hiányát, a hőmérséklet-módszer a referencianövények párolgásának egyszerű és praktikus becslési módszereként ajánlott (Hargreaves & Samani, 1985).

Fernandes et al. (2012) párolgásbecslő módszerek összehasonlító vizsgálata során arra jutottak, hogy a Hargreaves-Samani és a Camargo módszer jelentős különbséget mutatott a FAO56- Penman-Monteith egyenlet alapján becsült napi ET_0 értékekhez képest. Az említett két formula a földön kívüli napsugárzást használja a sugárzási folyamat figyelembevételére.

Egy korábbi kutatásban (Amatya , et al., 1995) három észak-karolinai helyszínen meteorológiai adatainak felhasználásával hat PET-számítási módszert állítottak szembe egymással, amelyek között volt egy kombinált módszer (Penman-Monteith), három sugárzásalapú (Makkink, Priestley- Taylor és Turc) és két hőmérsékletalapú (Thornthwaite és Hargreaves-Samani). Megállapították, hogy a Thornthwaite-módszer teljesített a legrosszabbul, a Makkink- és a Priestley-Taylor-módszer pedig a legjobban az összehasonlításhoz szabványként használt Penman-Monteith-előrejelzésekkel összehasonlítva.

Jianbiao et al. (2005) eredményei számolnak be arról, hogy a kutatás 36 helyszínén a hőmérsékleten alapuló PET-módszerek között nagyobb eltéréseket találtak, mint a sugárzáson alapuló PET-módszerek között. A három sugárzásalapú módszer által előre jelzett PET-értékek hasonló nagyságrendűnek bizonyultak, különösen a Priestley-Taylor- és a Turc-módszer esetében, amelyeknek a korrelációja 0,97-es együtthatót mutatott. A Thornthwaite-módszer adta a legalacsonyabb PET-értékeket, amelyek még a tényleges párolgásnál is valamivel alacsonyabbak voltak, míg a Hargreaves-Samani módszer a legmagasabb PET-becsléseket adta.

Hazai viszonyokra is készültek már hasonló összehasonlítások (Lakatos, et al., 2020), de kevesebb módszer bevonásával és az áttekintett tanulmányok közül egyik sem vizsgálja az eltérő PET becslő módszerek hatását rendszerszinten, azaz szimulációkkal előállított hidrológiai változókon keresztül. Ezzel viszont vizsgálni lehet azt is, hogy különböző talajok és helyszínek esetén mennyire érzékenyek a modellszámítások a PET-re, vagyis a PET százalékos változása milyen mértékben (hány százalékban) alakítja a hidrológiai válaszokat.

A vízmérleg alapú számítógépes modelleket széles körben használják a tudományos vizsgálatok eszközeként (Montanari, et al., 2009). A PET érzékenységvizsgálatához megfelelő segítséget nyújthat a HYDRUS-1D v. 4.17 szoftver, amely alkalmas a telítetlen talajprofilokban a víz függőleges mozgásának modellezésére. A kimenő adatok információt tudnak szolgáltatni arról, hogy az egyes becslő módszerek hogyan módosítanak a talajszelvények vízmérlegét (Šimůnek, et al., 2009).

2.3 HYDRUS-1D vízforgalmi modellező szoftver

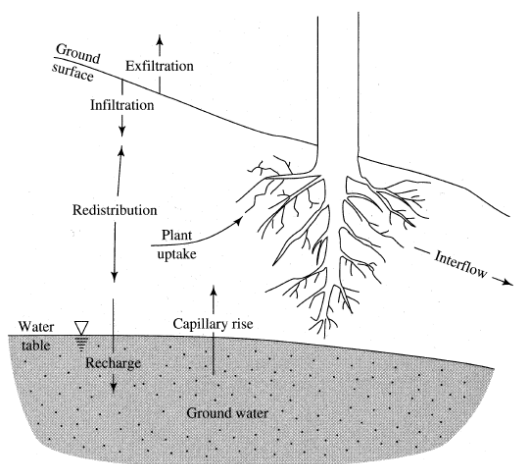
A HYDRUS-1D a HYDRUS algoritmusból és a HYDRUS1D interaktív grafikus felhasználói felületből áll. Az interfész közvetlenül kapcsolódik a HYDRUS számítási programokhoz.

A szoftver a víz és oldott anyagok mozgásának elemzésére használható telítetlen, részben vagy teljesen telített porózus közegekben. Az áramlási régió nem homogén talajokból is állhat. Az áramlás és a transzport történhet függőleges, vízszintes vagy ferde irányban. A modell vízáramlási része egyaránt képes kezelni Dirichlet és Neumann típusú (nyomásszint- és áramlási) peremfeltételeket, légköri viszonyok által szabályozott peremeket, valamint szabad kifolyási peremfeltételeket. Az algoritmus az irányadó áramlási és szállítási egyenleteket numerikusan oldja meg Galerkin- típusú lineáris végelem módszerek segítségével. A HYDRUS tartalmaz egy Marquardt-Levenberg típusú paraméteroptimalizáló algoritmust is a talajhidraulikai és/vagy oldottanyag-transzport és reakció paraméterek inverz becslésére, mért tranziens vagy állandósult áramlási és/vagy szállítási adatokból (*Šimůnek, et al., 2009*).

A megbízható szimulációs eredményekhez elengedhetetlen a modell megfelelő felparaméterezése, amihez a szoftver rendeltetésszerű használatán túl szükséges a valóságot leíró fizikai folyamatok és az abban résztvevő egységek tulajdonságainak megfelelő értelmezése is.

2.3.1 Talajtani áttekintés

A **2.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 háromfázisú vagy 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*).



Ábra 2: Vízforgalmat leíró fogalmak definíciója a telítetlen zónában, forrás: (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 megtelnek vízzel, és a nyomás a felette lévő víz súlya miatt nagyobb, mint a légköri nyomás (Dingman, 2015). A fizikai valóságot jól leíró szimulációk eredményei megbízható információt tudnak szolgáltatni a talajszelvények telítettségének állapotáról is.

A telítettség (S) a vizet tartalmazó pórusok aránya:

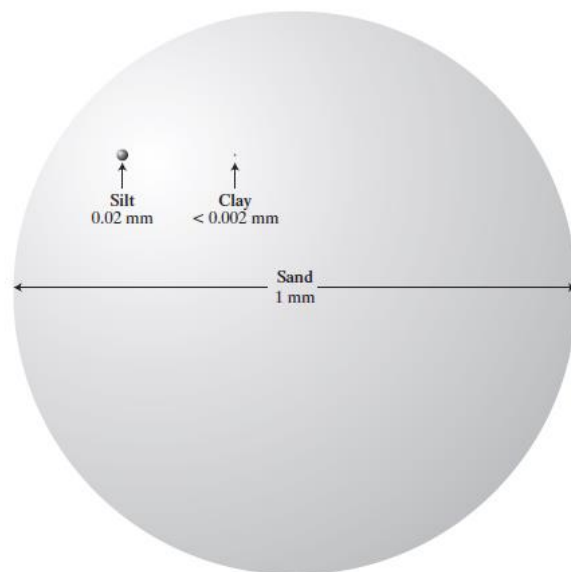
$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{\theta}{\phi} \quad (9)$$

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

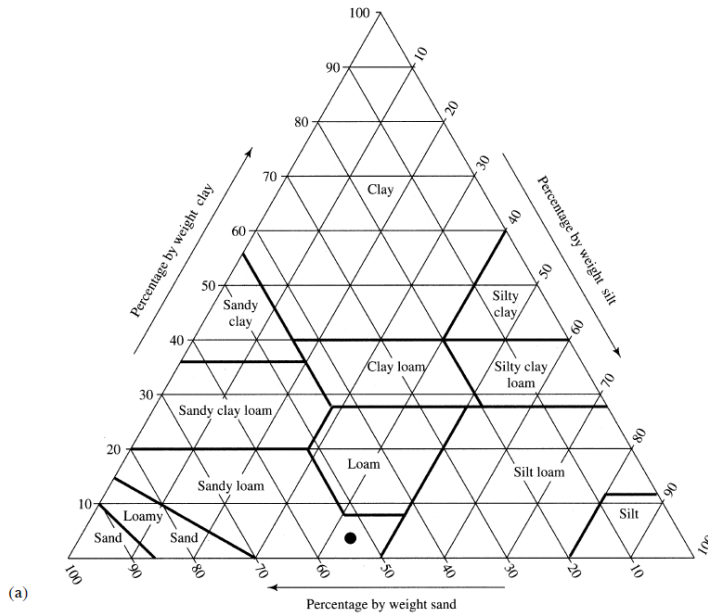
$$\phi = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s} \quad (10)$$

Ahol V_a – levegőtérfogat V_w – víztérfogat V_v – teljes talajtérfogat

A pórusok mérete, amelyeken keresztül a víz áramlik, megközelítőleg megegyezik a szemcsemérettel (amelyet a szemcseátmérő, d jellemez) és a pórusméretek eloszlását nagyrészt a szemcseméret-eloszlás határozza meg. A természetes talajrészecskék átmérőjének tartománya rendkívül nagy (Ábra 3.).



Ábra 3: A homok, iszap és agyag relatív méretei, forrás: (Dingman, 2015)



Ábra 4: USDA talajtextúraháromszög, forrás: (Dingman, 2015)

Az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériuma egy széles körben használt rendszert dolgozott ki, amelyben a talajtextúráját az agyag ($d < 0,002$ mm), iszap ($0,002 \leq d < 0,05$ mm) és homok ($0,05 \leq d < 2$ mm) relatív frakciójaként kifejezett szemcseméret-összetételként határozzák meg (Ábra 4.).

Ennek az osztályozásnak az az előnye, hogy a

szemcseméreték mérhetősége egyszerű és megfizethető (Dingman, 2015; Kreye, et al., 2019). Tanulmányok azt mutatják (Kreye, et al., 2019), hogy a talajok textúra alapú osztályozása nem feltétlenül optimális megoldás a hidrológiai viselkedés leírása és a hidrológiai modellezés szempontjából. Az alternatíva, amely a talajok vízvezető- és víztartóképeségén alapul (ld. lejjebb), vízforgalmi szempontból megbízhatóbb bemeneti adat, mint a szemeloszlás.

A telítetlen talajszelvényekben a víz áramlását a (11) Richards egyenlettel lehet leírni, amelyet a HYDRUS numerikusan old meg (Šimůnek, et al., 2009). Többnyire függőlegesen lefelé irányuló áramlásra alkalmazzák. Egy-dimenziós alakja (Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (11)$$

ahol $\theta(\psi)$ [-] a térfogatos víztartalom, $k(\theta)$ [cm·nap⁻¹] a telítetlen szivárgási tényező a víztartalom függvényében és ψ [cm] a vízfázisban uralkodó nyomás. A legtöbb esetben az egyenletnek nincs zárt analitikus megoldása, ezért általában numerikusan oldják meg. A jelenség erősen nemlineáris jellege miatt a megoldás számításigényes és gyakran instabil.

Az összefüggés szerint három egymással összefüggő változó (ψ , $\theta(\psi)$, $k(\theta)$) szükséges a vízáramlás leírásához, mégis csak egy dinamikai egyenletet adunk meg. Így matematikailag további két összefüggésre van szükség: ezek a talajfüggő statikus hidraulikai összefüggések - nevezetesen a víztartóképeségi görbe és a vízvezetőképességi görbe - kulcsfontosságú bemeneti adatok a Richards-egyenlet megoldásához (Kozma, et al., 2014).

Víztartóképességi (VTK) görbe: megadja, hogy egy adott talaj mekkora vízmennyiséget képes megtartani különböző szívómagasságok mellett. A porózus közegek víztároló képessége a szemcseméret-eloszlással függ össze, így más tényezők mellett a talaj textúrája is erősen befolyásolja a görbe alakját (Ábra 5; ahol $pF = \log(-\psi)$). Gyakorlatilag a VTK görbe meghatározható a mért θ vs. ψ adatpárok halmazával. A ψ [L] **nyomásmagasság** egyenlő a folyadék nyomásával a p [FL⁻²] ponton, osztva a γ [FL⁻³] tömegsűrűségével (Dingman, 2015):

$$\psi = z + \frac{p}{\gamma} \quad (12)$$

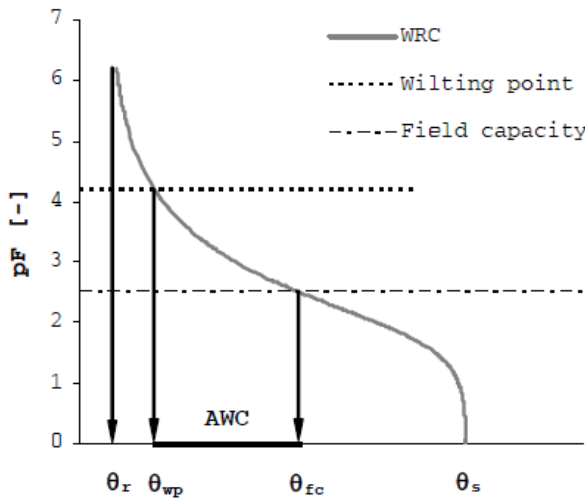
ahol z a viszonyítási sík feletti pont magassága [L].

A térfogatos **víztartalom** θ (más néven víztartalom vagy talajnedvesség-tartalom) a víz térfogatának és a talaj térfogatának aránya (Dingman, 2015):

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (13)$$

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

Az 5. ábra a víztartóképességi görbe fizikailag értelmezhető tartalmát szemlélteti egy tetszőleges, **közepes textúrájú agyagos** talajra (Kozma, et al., 2014):



- reziduális víztartalom: $\theta_r = \theta(pF=6,2)$;
- hervadáspont: $\theta_{wp} = \theta(pF=4,2)$;
- szabadföldi vízkapacitás: $\theta_{fc} = \theta(pF=2,5)$;
- telítési víztartalom: $\theta_s = \theta(pF=0)$
- hasznosítható víztartalom: $AWC = \theta_{fc} - \theta_{wp}$

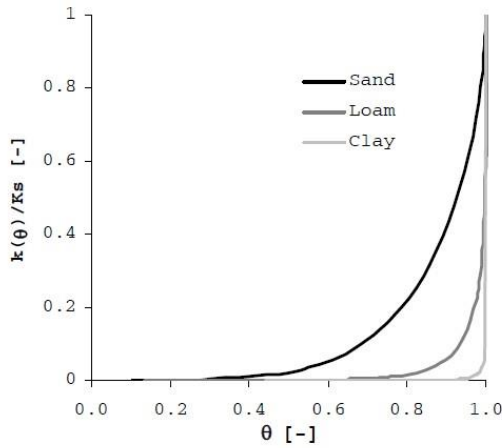
Ábra 5: Víztartóképességi görbe fizikai tartalma
vályogra, forrás: (Kozma, et al., 2014)

A görbe leírására különböző parametrikus analitikus képletek is használhatók. Ezeket a függvényeket a mért diszkrét adatpontokra kell illeszteni. Folytonos jellegük miatt

nagymértékben elősegítik a konvergenciát és a stabilitást a képlet numerikus megoldása során. E formulák közül a legelfogadottabb a (14) van Genuchten-féle függvény (*van Genuchten, 1980*):

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad (14)$$

ahol θ_r és θ_s a víztartalom felső- és alsó korlátja; α és n az alaki paraméterek, míg $m = 1-1/n$.



Ábra 6: Vízvezetőképességi görbe normalizált alakja 3 talajtípusra, forrás: (Kozma, et al., 2014)

Vízvezetőképességi (VVK) görbék: a $k(\theta)/K_s$ [-] arány változását írja le a víztartalom függvényében (Ábra 6.). Itt is különböző empirikus képletek használhatók a mért diszkrét vízvezetőképesség-értékek folyamatos ábrázolására. Van Genuchten (*van Genuchten, 1980*) a Mualem-modell használatát javasolta. A van Genuchten-Mualem (15) talajhidraulikai modell 5 állítható paraméterrel rendelkezik, ami viszonylag nagy rugalmasságot és jó illeszkedést biztosít a modellnek a mért adatokhoz (Kozma, et al., 2014).

$$k(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^1 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (15)$$

A **hidraulikai vezetőképesség** vagy szivárgási tényező (K_{sat}) 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 szemcse méret és a telítettség mértéke egyaránt meghatározza. A hidraulikus vezetőképesség a közeg és a folyadék jellegétől is függ. Telített állapotra az összefüggés a következő:

$$K_h = C \cdot d^2 \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} = C \cdot d^2 \cdot \frac{g}{\nu} \quad (16)$$

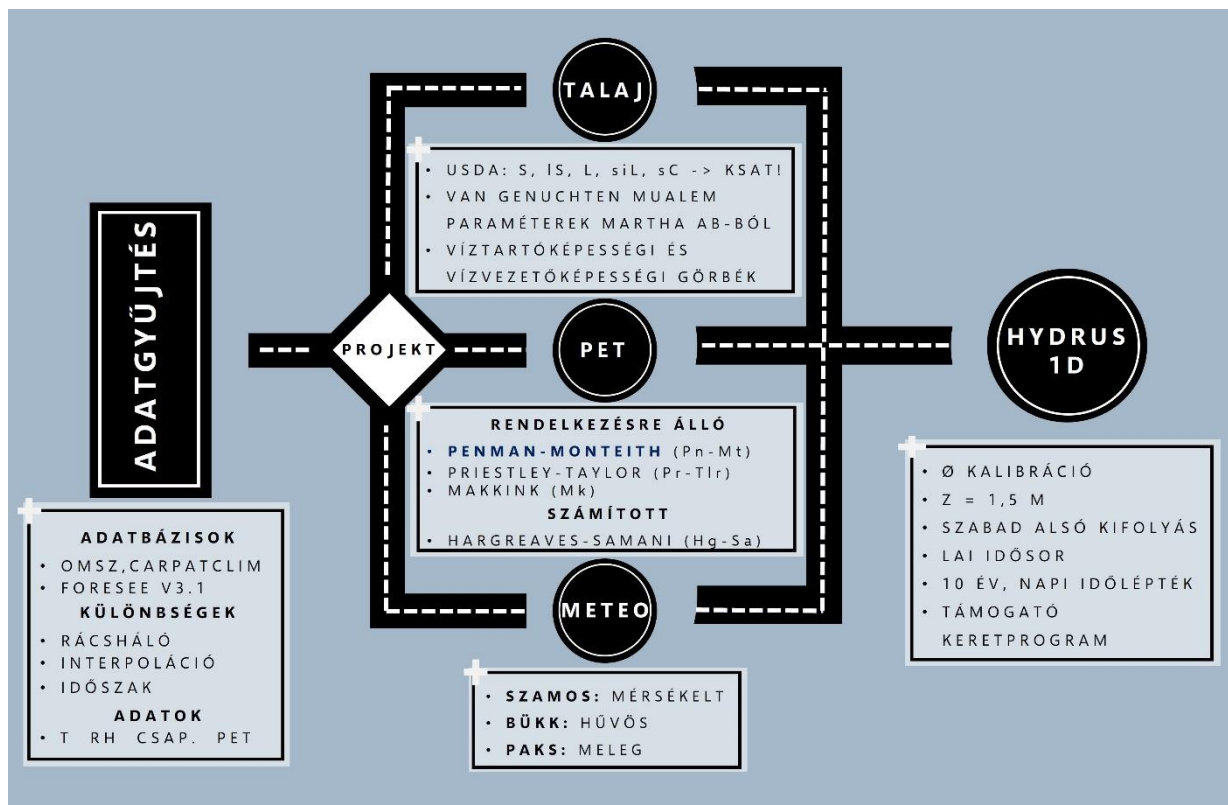
ahol d az átlagos szemcseátmérő, g a gravitációs gyorsulás, ρ a folyadék tömegsűrűsége, μ a dinamikus viszkozitás, ν a kinematikus viszkozitás ($\equiv \mu/\rho$), és C egy arányossági paraméter,

amely a közeg tulajdonságaitól függ, mint például a szemcsék alakja, méreteloszlása és tömörsége (*Dingman, 2015*).

A hidrológiai folyamatok szimulációs vizsgálatai előtt tehát mindig fontos magunkat emlékeztetni arra, hogy a modell előrejelzéseinek hitelességét a modell és a mögöttes rendszer közötti konzisztencia alaposabb diagnosztikai értékelése és a megfigyelt tartományon kívüli viselkedés tesztelése adja (*Wagner, 2009*).

3 Módszertan

A főbb munkafázisokat és azok elvégzésének módszertani megközelítéseit, illetve az egyes részekhez tartozó leglényegesebb információkat a **7. folyamatábra** foglalja össze:



Ábra 7: Módszertan: munkafolyamat összefoglaló ábrája

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 és hosszú időt lefedő 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 éghajlat-előrejelző 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, szórtan 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 rácpontokban 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 adatbázisének 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 becselő módszer esetében kész PET idősorok voltak elérhetőek az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) nyílt adatbáziséban (*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 részénének 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		
Rácsnáló	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 evapotranszspiráció (OMSZ)	-	[mm]

Táblázat 1: Adatbázisok összesítése és összehasonlítása

3.2 Projektek összeállítása talajvízforgalmi modellezéshez

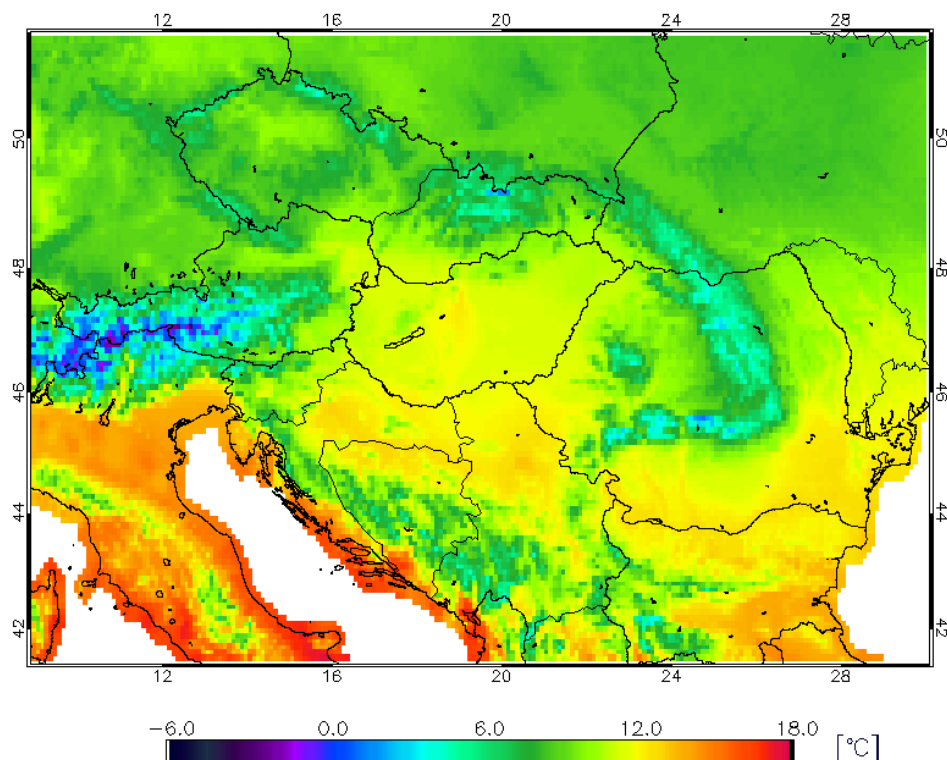
A potenciális evapotranszspirációt leíró formulák közti különbségeket, illetve számítási lépéseit a [2.2 fejezetben](#) taglaltam, ami alapján ki lehet jelteni, hogy az egyes becslési módszerek összevetése és alkalmazhatóságának vizsgálata időszerű. Célszerűnek láttam a különböző PET-ek hatását talajszelvény 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 mérsékelten meleg száraz vagy nedves területek alkotják, de ezen belül megkülönböztethetők jellemző éghajlati adottságok egy-egy térségre (Csorba, 2021). A FORESEE klimatológiai térképe (Ábra 8.) a Kárpát-medence térségének átlaghőmérsékletét tünteti fel 1991-2020 közti időszakra, ami a három vizsgálati pont kijelölését segítette.



Ábra 8: 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	-

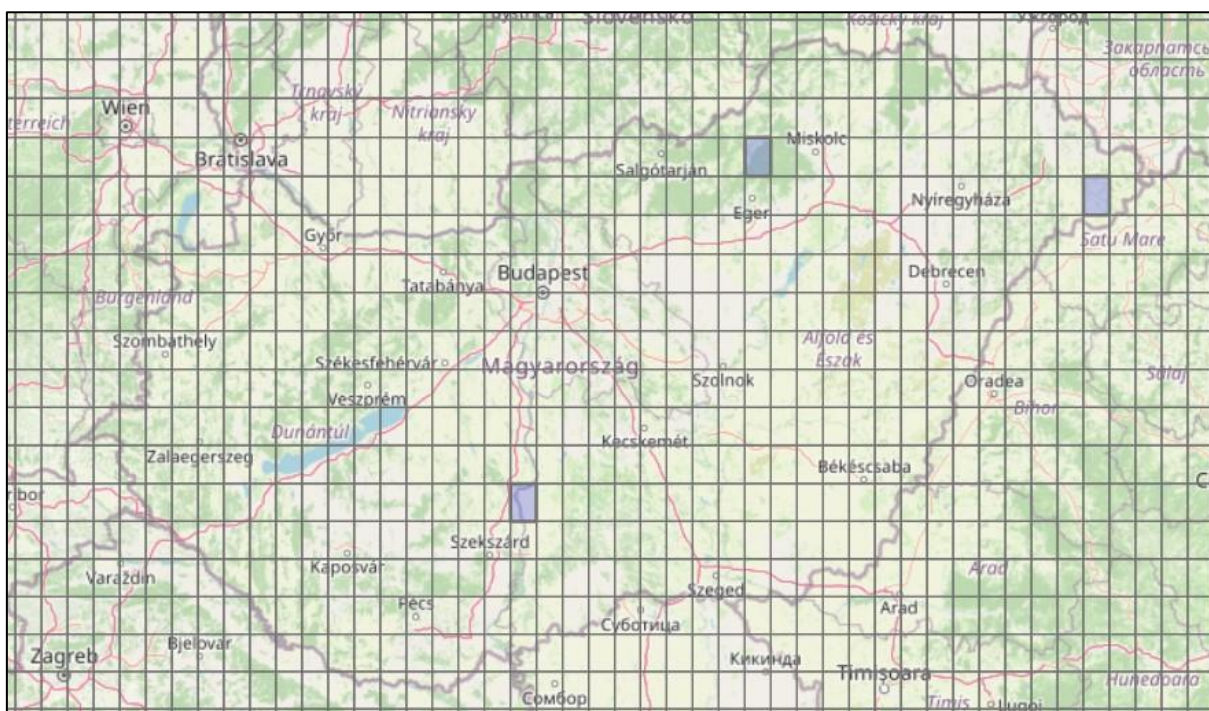
Táblázat 2: Vizsgálati pontok jellemző földrajzi, éghajlati és meteorológiai adatai, forrás: (Csorba, 2021), (MVM Paks II. Zrt, 2012), (Schmotzer, 2017), (Anon., 2015)

A helyszínekhez tartozó meteorológiai adatokat a FORESEE esetében a földrajzi szélességi és hosszúsági fokoknak megfelelő cellából töltöttem le (**Ábra 9.**). 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/lng		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

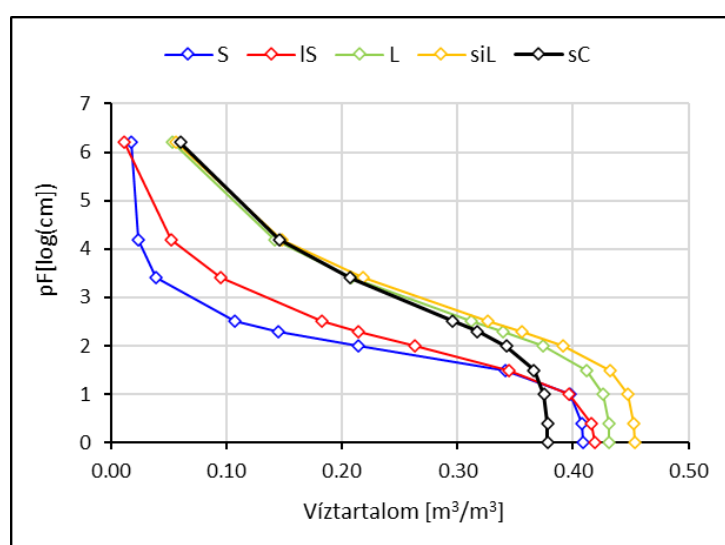


Ábra 9: A rácsháló vizsgált celláinak elhelyezkedése (késsel kiemelt) - FORESEE adatbázis (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map_query/index.html)

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 2.3.1 fejezetben is ismertetett USDA talajtextúra osztályokat használtam fel, melyekhez a van Genuchten-Mualem paramétereket a MARTHA adatbázis talajszelvényeiből származtatták (Kozma, et al., 2014). Az egyes projektek összeállításánál a textúra típusokat a paraméterekre illesztett görbékkel (víztartóképeségi (Ábra 10.) és vízvezetőképességi görbék (ld. 2.3.1 fejezet)) jellemeztem, mivel ezek a másodlagos talajtani jellemzők hidrológiai szimulációkban megbízhatóbb eredményt adnak, mint a szemeloszlás.



Ábra 10: 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)	lS	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-Samani 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 (17-22) lépéseken végighaladva, minden helyszínrre automatizáltan állította elő a szükséges PET értékeket, mindkét adatbázis esetén.

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

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

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):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} \cdot G_{\text{sc}} \cdot d_r (\omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s) \quad (18)$$

egyszerűsítés után:

$$R_a = 37,6 \cdot d_r (\omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s) \quad (19)$$

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:

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (20)$$

d_r számítása:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) = 1 + 0,033 \cdot \cos(0,0172 \cdot J) \quad (21)$$

δ számítása:

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) = 0,409 \cdot \sin(0,0172 \cdot J - 1,39) \quad (22)$$

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**.

¹ a Nap kisugárzott energiamennyiségének 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

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 páratartalom manuális kiszámítására is szükség volt a FORESEE adatbázis esetében. A számítás menete a következő:

Relatív páratartalom

A légkörben lévő vízgőz mennyiségének legismertebb mérőszáma a relatív páratartalom (RH), amely a tényleges gőznyomás e_p , és az uralkodó hőmérsékleten lévő telítési gőznyomás, e_s , hányadosa (általában százalékban kifejezve) (Dingman, 2015):

$$RH = 100 \cdot \frac{e_p}{e_s} \quad (23)$$

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

e_p – parciális vízgőznyomás [Pa]

e_s számítása (Magnus-Tetens formula):

$$e_s = 6,11 \cdot 10^{\frac{a \cdot t}{b+t}} \quad (24)$$

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

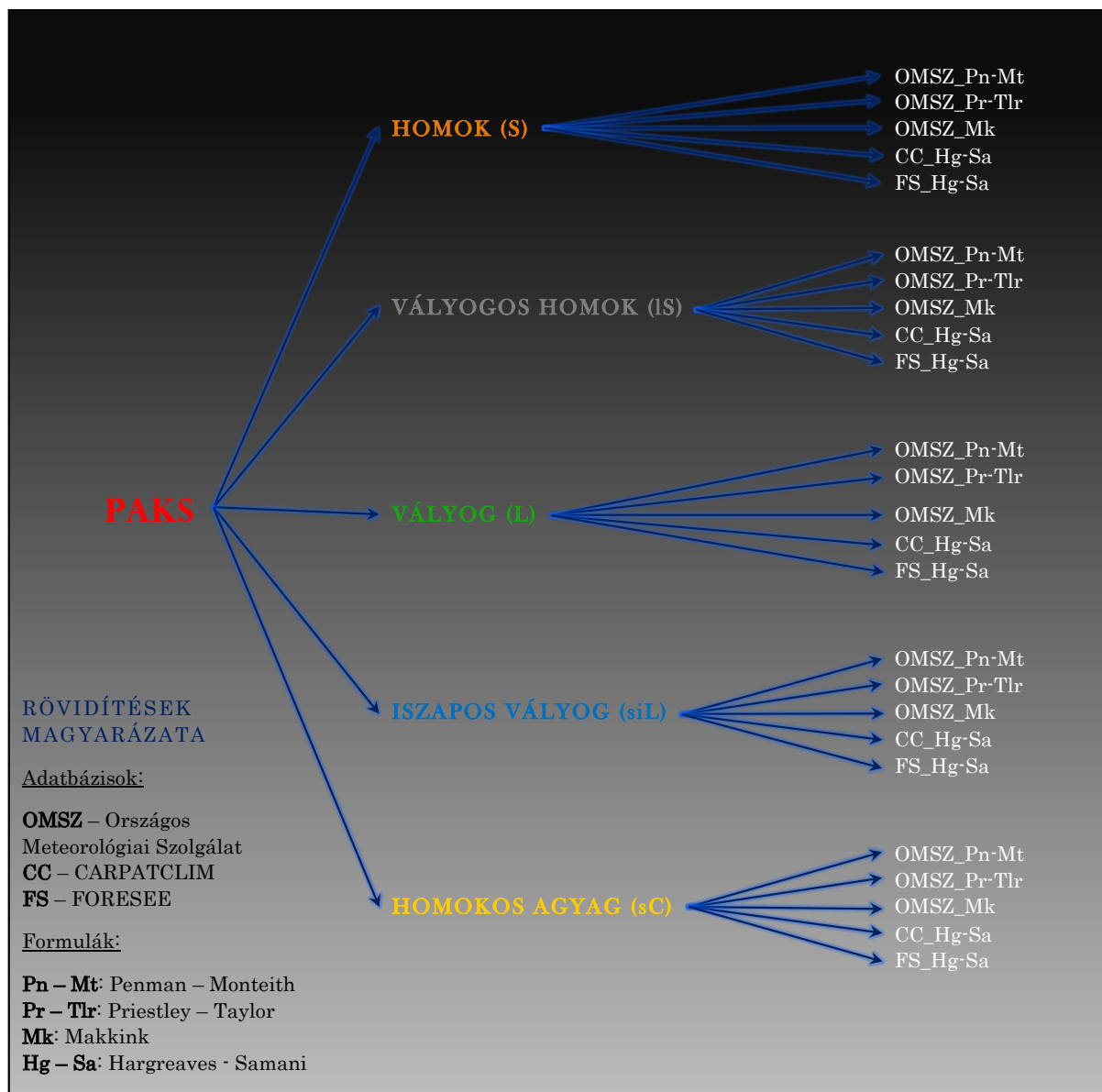
t – hőmérséklet [°C]

e_p számítása:

$$e_p = e_s - vpd \quad (25)$$

ahol: vpd – nappali átlagos gőznyomáshiány [Pa]

Az eltérő meteorológiai adatok (3 helyszín), adatbázisok, talajtípusok (5 típus) és alkalmazott PET becselő módszerek kombinációiból 75 különböző változat tevődött össze. A projektverziók közötti különbségek megértését segíti a **11. ábrán** lévő ágrajz, Paks helyszínére. A másik két helyszínen ugyanezt a struktúrát követtem, így adódik ki a 3x25, vagyis 75 modellezni kívánt projekt.



Ábra 11: Projektváltozatok felépítése – ágrajz (forrás: saját)

3.3 Talajvízforgalmi modell

A vízforgalmi folyamatok érzékenységi vizsgálatához legkézenfekvőbb eszköz a fizikai alapú numerikus 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 egy-dimenziós 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 korábban ismertetett projektösszeállítás nagyban támogatta a modell konfigurációt, aminek további részeként a számítási időszakot 10 évre állítottam be. Az időszak

megválasztásának hátterében 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 légköri viszonyokat és a vegetációt vettem figyelembe, utóbbit a LAI érték megadásával. A levélfelületi index⁴ idősora egy jellegzetes éves eloszlást követ, amit bemeneti idősortként alkalmaztam. A vegetáció leírását szolgálja továbbá az extinkciós tényező⁵, melynek értékét szakirodalom alapján a keretprogram 0,3-nak vette fel, továbbá a maximális 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 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:

- Víztartó-, vízvezetőképességi görbék becslő, explicit kezelése numerikus lépésenként
- Iterációs feltételek és tolerancia küszöbszámok módosítása
- van Genuchten paraméterek α és n értékének növelése/csökkentése 1% -al
- végső esetben a peremi idősorokat napi értékek helyett három napi átlaggal 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 (fényességszökkenés anyagon áthaladva) arányosan veszi figyelembe, hogy a PET-et milyen arányba bontsa szét PET-re és PT-re (potenciális evaporációra és potenciális transzspirációra)

⁶ levélfelületen maximálisan mennyi víz tud pillanatnyilag visszamaradni. A felfogott víz elpárolgó része az intercepció veszteség

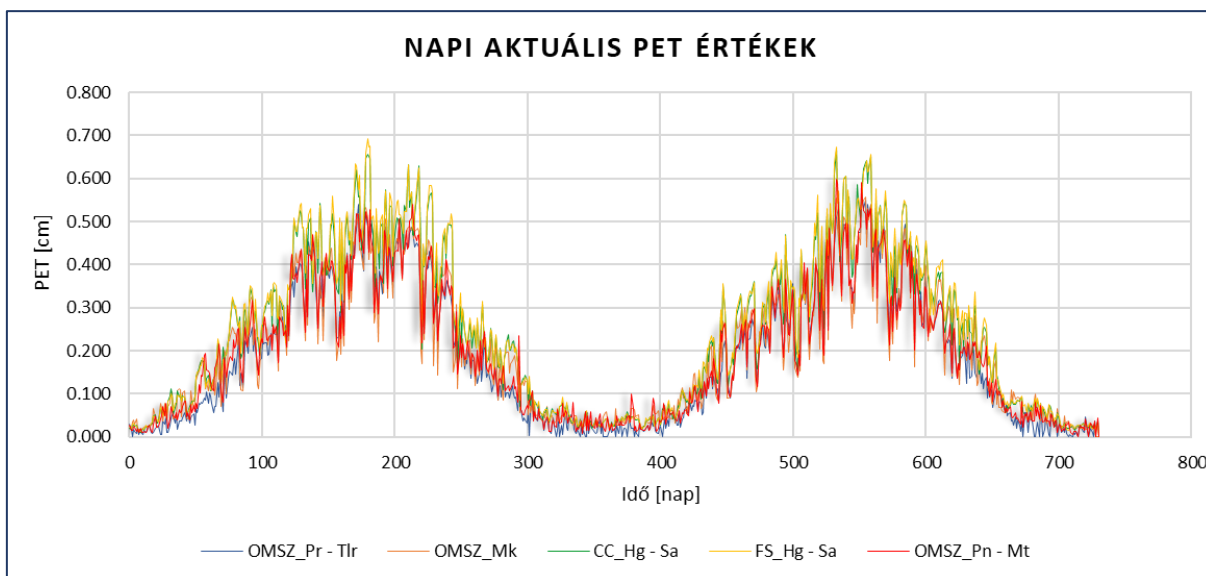
4 Eredmények, kiértékelés

4.1 PET idősorok értékelése

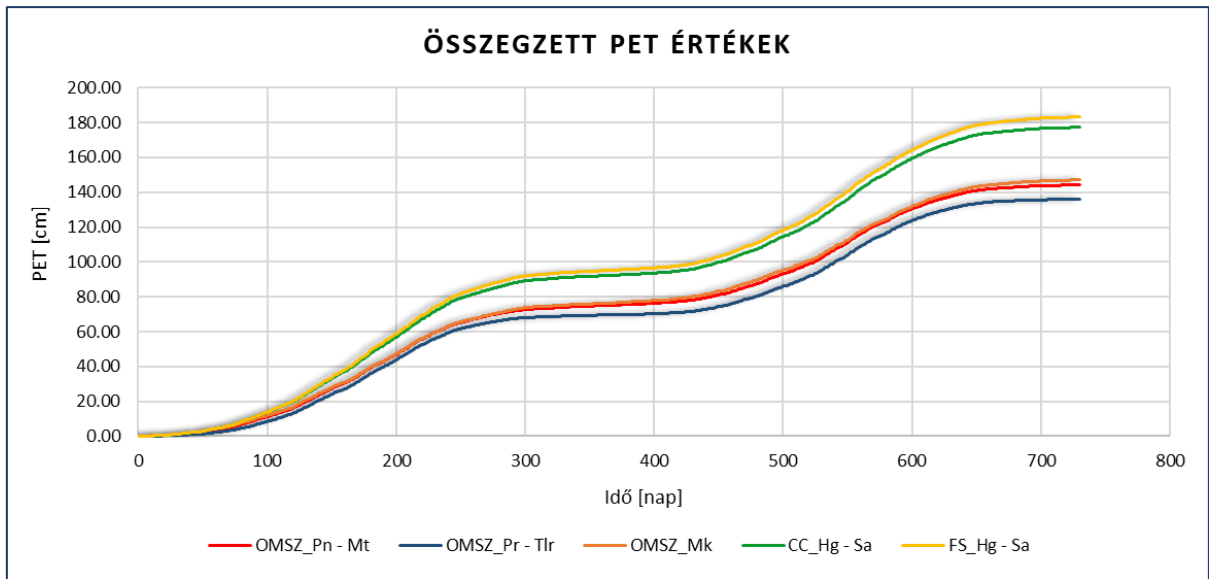
Fontos volt, hogy az alkalmazott PET becslő formulákról önmagukban és egymással összevetve is megállapításokat tegyek. A felhasznált és a becsült eredményeket idősorosan és statisztikai jellemzés segítségével vizsgáltam. Utóbbi azt a fajta box-plot ábrázolást takarja, amelynél a box az adatok 0,25-ös kvantilisától a 0,75-ös kvantilisig (interkvartilis tartomány) terjed, a 0,50-es kvantilis (medián) pedig a dobozon belüli vízszintes vonalként jelenik meg. Jellemzően az eloszlás "csóváit" olyan vonalak mutatják, amelyek a dobozból felfelé a 0,90-es kvantilisig, illetve lefelé a 0,10-es kvantilisig húzódnak (Ábra 12.). A boxplotok jobbak a hisztogramoknál egy mintaeloszlás jellemzésére, különösen a különböző minták gyors vizuális összehasonlítására (Dingman, 2015).

Referenciának a Penman-Monteith eredményeket tekintettem, a 2.2. fejezetbe foglaltak miatt. A becslő 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, két évre kiterjedő idősorokon is látható:



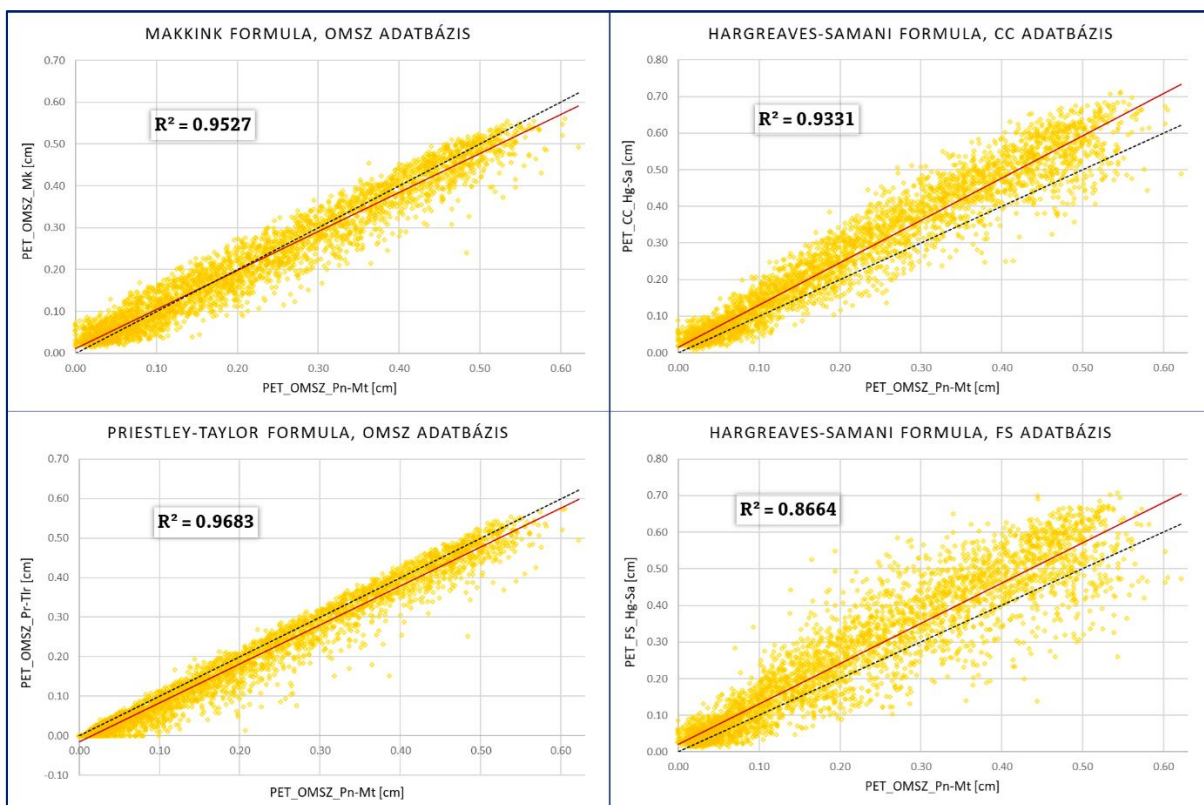
Ábra 12: Napi aktuális PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén (forrás: saját)



Ábra 13: Összegzett PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becselő módszerek esetén (forrás: saját)

Mindkét grafikon ugyanazt a két évet ábrázolja, az egyes formulák esetén. A **12. ábra** az aktuális napi értékeket, amíg a **13. ábra** ezek összegzett értékeit jeleníti meg. Utóbbinál az idősorok értékei közti eltérések szemléletesebben kirajzolódnak. A két ábra alapján a különböző becselő 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 Penman-Monteith értékeket leginkább a Makkink és a Priestley-Taylor formula eredményei közelítik meg. A **14. ábrán** látható R^2 számított értéke az előbbinél ~0,95-re, az utóbbinál ~0,97-re adódott.



Ábra 14: A különböző becslő képletek kapcsolata a referenciának tekintett Penman-Monteith formulával (forrás: saját)

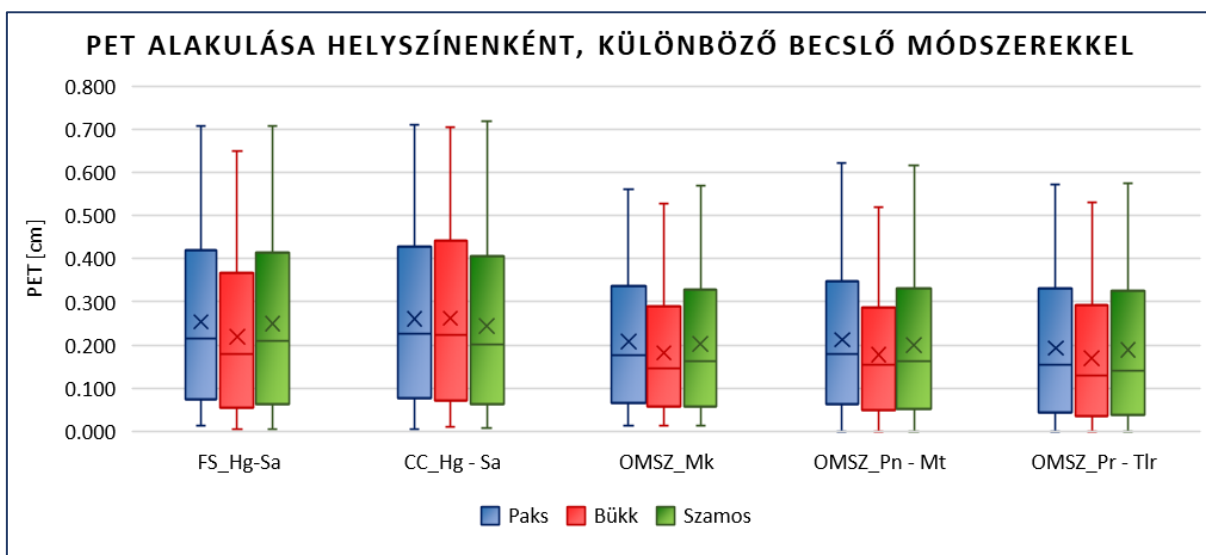
- A Pearson-féle korrelációs együtthatók is hasonló értékeket eredményeztek a korrelációanalízis során (Táblázat 5.). A mátrix alapján az is látszik, hogy rövid időléptéken nem adnak jelentősen eltérő becslést a különböző módszerek. A klímaprojekciókat tartalmazó FS adatbázissal a jövőre vonatkozóan is megbízható becslést lehetett volna végezni, ha megfelelő korrekciós kapcsolatot találunk a referencia OMSZ-Pn-Mt és FS_Hg-Sa között a múltra. Ekkor egy olyan egyenletet lehetett volna felállítani, aminél a kis paraméterigényű Hg-Sa-ból napi léptéken, megbízhatóan becsülhető lett volna a referenciának tekintett érték nem csak a múltra, hanem a jövőre is. Ehhez viszont ennél erősebb regressziós kapcsolat szükséges és pontosabb éves PET összeg becslés.

	OMSZ_Pn - Mt	OMSZ_Pr - Tlr	OMSZ_Mk	CC_Hg - Sa	FS_Hg - Sa
OMSZ_Pn - Mt	1				
OMSZ_Pr - Tlr	0.984	1			
OMSZ_Mk	0.973	0.974	1		
CC_Hg - Sa	0.959	0.964	0.962	1	
FS_Hg - Sa	0.955	0.959	0.965	0.996	1

Táblázat 5: Korrelációs mátrix a Pearson-féle korrelációs együtthatók értékeivel 1990-1999 időszakra, referencia: Penman-Monteith formula

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

Ebben a fejezetben a **15. 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 vizsgálom 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 15: Helyszínek összevetése 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 becselő módszerekből származó PET statisztikai jellemzőit és egymáshoz való viszonyukat. A **15. 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 szélsőséesebb, 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 Penman-Monteith pedig napi szinten nagyobb maximumokat ad, így éves összesítésben szélesebb tartományt fed le.

4.2 Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése

A PET becslő módszerekről - alkalmazhatóságuk szempontjából - úgy akartam további lényeges információkat nyerni, hogy **hatásukat** talajszelvény szintű vízforgalmi szimulációs eredmények segítségével vettem figyelembe.

A bemeneti adatokra való érzékenységet a rendszer három eltérő hidrológiai válaszában keresztül vizsgáltam, ezért a modelleredményekből mindhárom helyszín esetén a **gyökérzóna átlagos telítettség**, a **tényleges transzspiráció** és az **alsó peremi fluxus** (talajvíz utánpótlás) idősorokat használtam fel (**Ábra 16-19.**). 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:

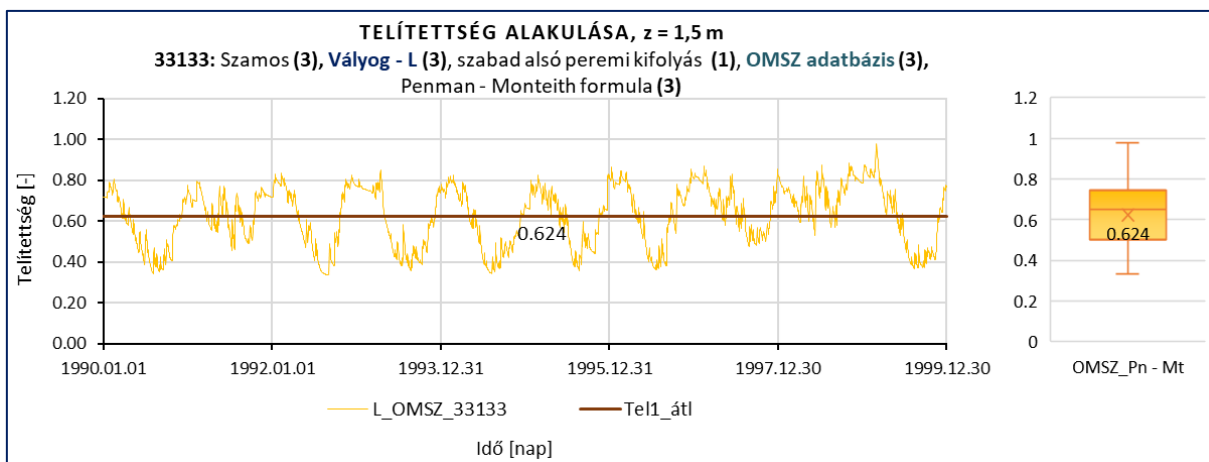
- általánosan jellemzik a három hidrológiai változót
- egy-egy kiragadott verzió keresztül ábrázolják a mutatók általános időbeli alakulását
- rámutatnak a megjelenítési módszerek közti kapcsolatra

A szemléltetésre használt idősorok a referenciaként alkalmazott változókra vonatkoznak: Szamos, Penman-Monteith formula, vályog talajtextúra. A függelék [8.1 fejezetében](#) lévő ábrák alátámasztják, hogy a modellszámítások egyéb futtatási projektek mellett is a valós fizikai folyamatoknak megfelelő eredményeket adnak.

4.2.1 Telítettség

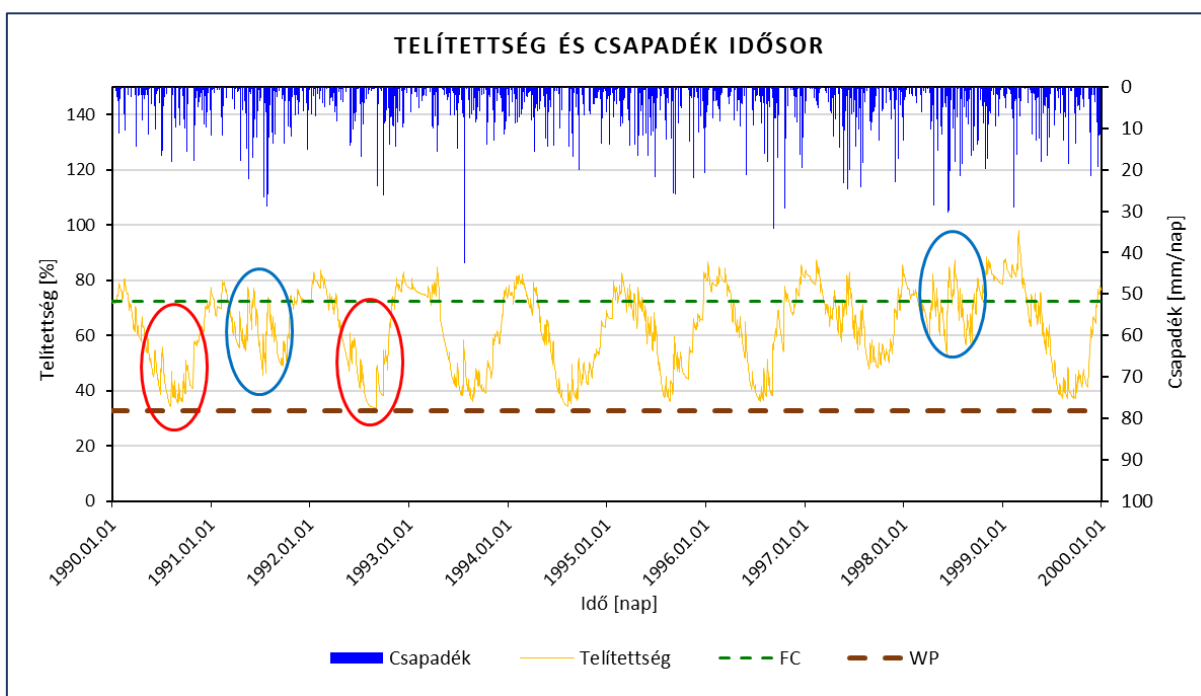
A telítettséget vizsgálataim során úgy értelmeztem, mint a gyökérzónára kiterjedő térbeli tartomány pillanatnyi víztartalmának és a telítési víztartalmának a viszonyszáma. Azt adja meg, hogy pillanatnyilag a póruster hány százaléka van vízzel telítve a gyökérzónában mélység mentén átlagolva. A felhasználó által kijelölt H1D-s megfigyelési pontokban (observation

node) szimulált víztartalom idősorokra alapul. A telítettségben jól nyomon követhető a meteorológiai változók éves dinamikája (Ábra 16.).



Ábra 16: Telítettség referencia változókra vonatkozó alakulása - idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját)

A csapadékhatásokat a 17. ábra teszi igazán szemléletessé:



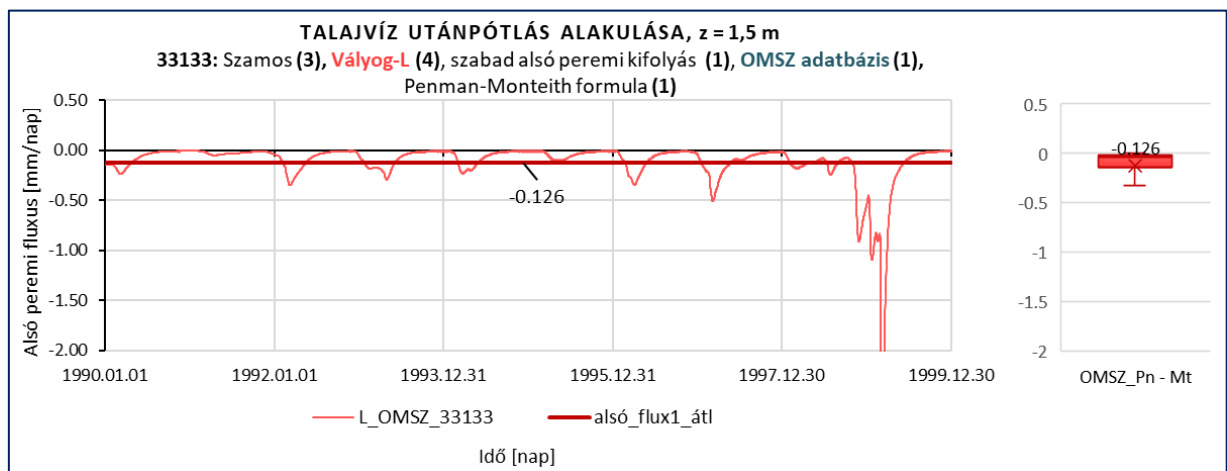
Ábra 17: Csapadékhatások szemléltetése a telítettség idősoron (forrás: saját)

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 napi értéke mellett a szabadföldi vízkapacitást (Field Capacity, pF 2.5) és a hervadásponzt (Wilting Point, pF 4.2) is feltüntettem, természetesen telítettségként. Utóbbi pont a növények számára hasznosítható víztartalom alsó korlátjaként értelmezhető, míg a szabadföldi vízkapacitás közelítőleg jelöli a gravitációs víztartalom határát (az ezt meghaladó víztartalom jellemzően gravitációs úton gyorsan kiürül a vizsgált térrészből). 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 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 leegyszerűsítve a talajvíz utánpótlásnak feleltethető meg. Ennek a bemutatására szintén a referencia változatot használtam, ahol az időbeli változások jobb nyomonkövetésének érdekében, a 10. évnél jelentkező kiugró érték megjelenítésétől eltekintettem mindkét ábrázolási módnál (Ábra 18.).



Ábra 18: Alsó peremi kifolyás referencia értékekre vonatkozó alakulása - idősoros és boxplotos megjelenítés (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.

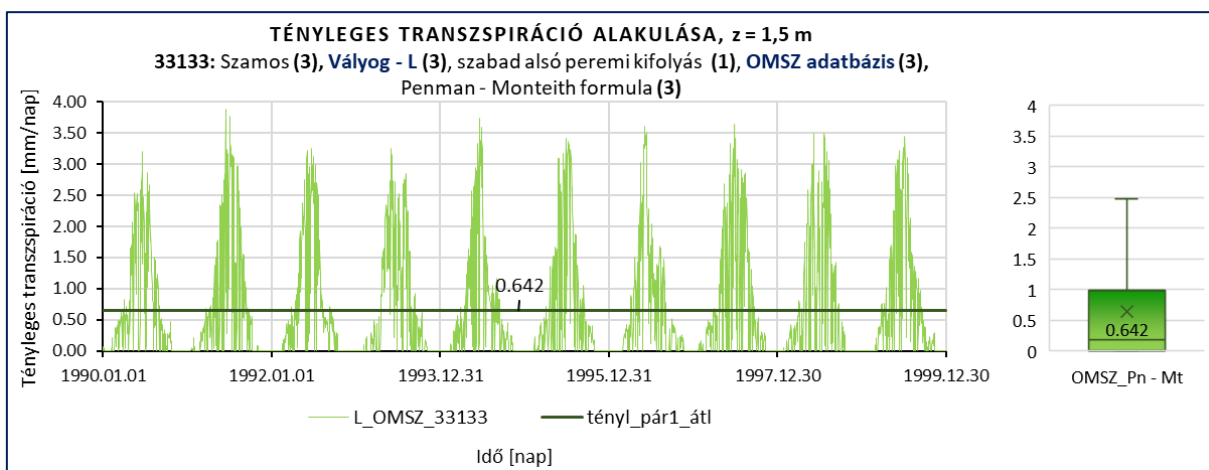
Ha ezt a telítettség idősorral egymás mellé helyezzük, akkor megfigyelhető, hogy ennél a 150 cm-s homogén talajnál sem okoz minden nagyobb csapadék mélybe szivárgást. Előfordulhat, hogy akár teljes évek maradnak ki a talajvíz utánpótlásból. Az is jól kivehető, hogy akkor jelentkezik mélybeszivárgási 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 transzspiráció

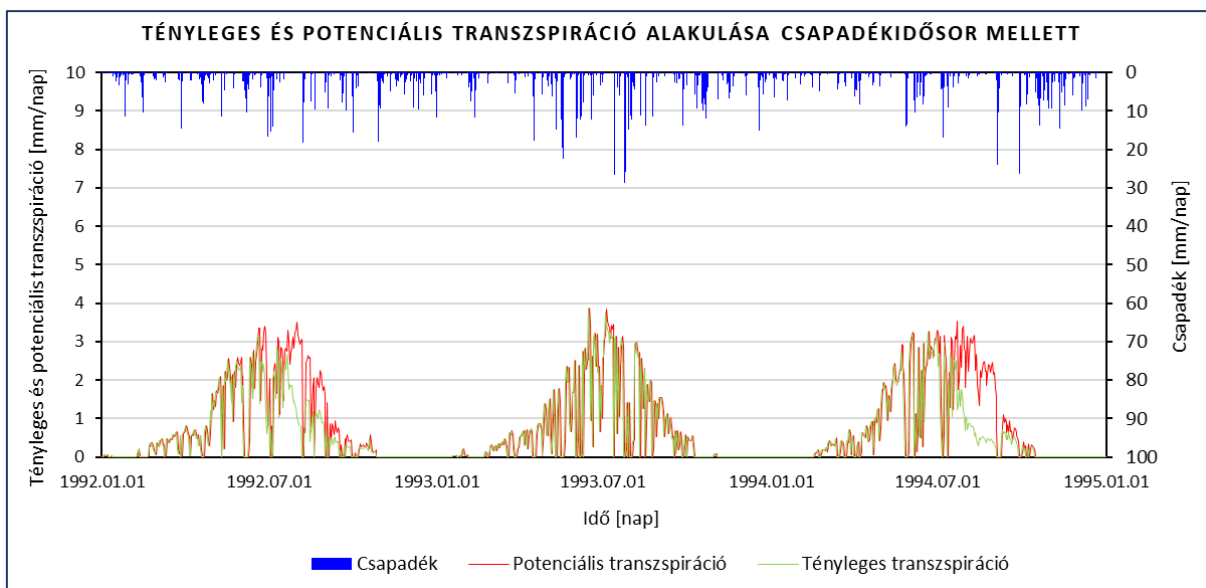
Harmadik változóként a fizikai-biológiai párolgásnak a transzspiráció részét vontam be a vizsgálataimba, mivel hasznosulás irányából (környezeti, ökológiai és agrár szempontból) az a vízmennyiség a meghatározó, amit a vegetáció fel tud venni és elpárologtat (=transzspiráció) (Ábra 19.).

A potenciális transzspiráció feltételezi, hogy a víz korlátlan mennyiségben rendelkezésre áll a növényállománynak (Szász, 1995), így az a növényzet lehetséges (maximális) páraleadását jelenti (Vermes, et al., 2001). Azonban a valóságban a párolgás változó mértékét szűkös vagy hiányzó vízkészletek korlátozzák, amelyek mellett bekövetkező párolgást tényleges transzspirációnak.



Ábra 19: Tényleges transzspiráció referencia értékekre vonatkozó alakulása - idősoros és box plotos megjelenítés (forrás: saját)

A szimulációs eredmények a potenciális transzspiráció 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 20.).



Ábra 20: Tényleges és potenciális transzspiráció 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 párolgás értéke hazai viszonyok között szükségszerűen kisebb-egyenlő, mint a potenciálisé, hisz azt a vízmennyiséget fejezi ki, ami a tényleges rendelkezésre álló vízmennyiség és növényfejltség mellett a növény felületéről elpárolog.

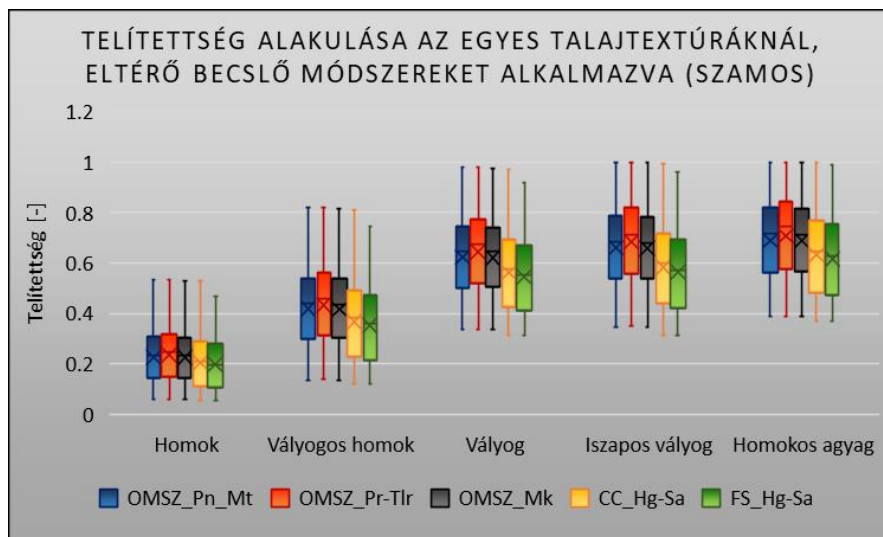
4.3 Statisztikai összehasonlító vizsgálatok a hidrológiai változók segítségével

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 ugyanazokra a kérdésekre kerestem a választ: okozhat-e az eltérő talaj/éghajlat eltérő tendenciát az egyes becslő módszerekből adódó különbségek között? Illetve, hogy hogyan változik a hidrológiai válaszok mértéke a különböző PET becslő módszerek esetén? Mindezt statisztikai mutatókon keresztül vizsgáltam. 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.

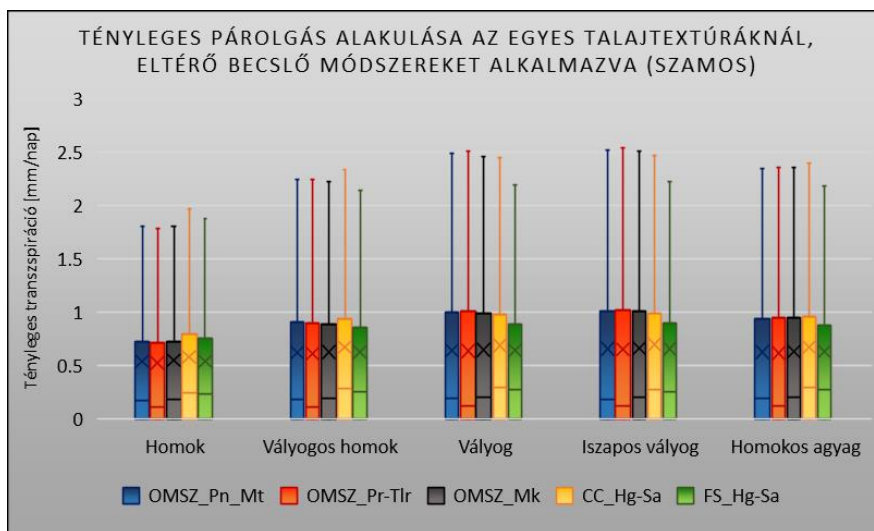
4.3.1 Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése

A talaj szerepének vizsgálatát ebben a fejezetben is a referenciaként szolgáló, mérsékelt Szamos helyszínen mutatom be, mindhárom hidrológiai változó esetében. A referenciától

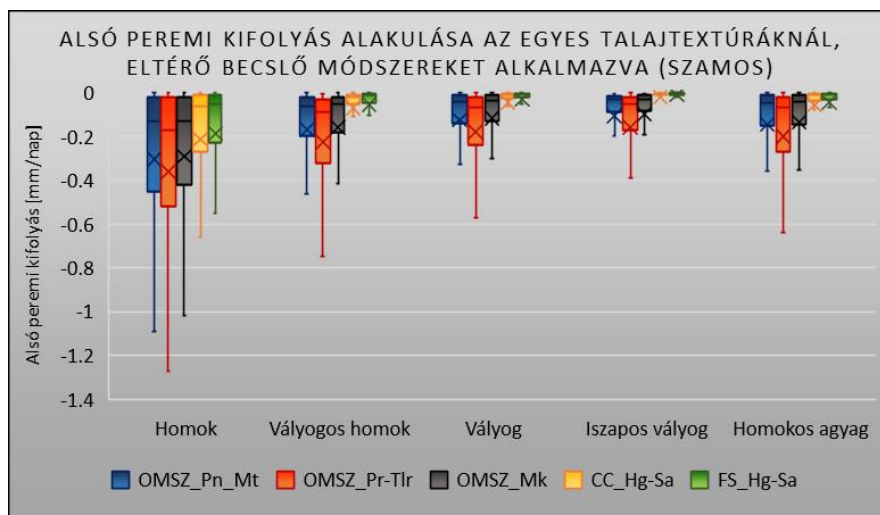
melegebb Paks, valamint a referenciától hűvösebb Bükk meteorológiai viszonyai mellett elvégzett elemzést a függelék [8.2 fejezete](#) tartalmazza. A HYDRUS modellszámítások idősoros eredményeinek statisztikai értelmezését vizuálisan segítik a következő ábrázolások (**Ábra 21-23.**):



Ábra 21: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



Ábra 22: Napi léptékű tényleges párolgás alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



Ábra 23: Napi léptékű 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 **21-23. 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 jelentkezik, ahol az átlag, a kvantilisok 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 transzspiráció többsége lezajlik, így arra szintén kisebb érték adódik.

- Ha csak a tényleges transzspirációs 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 becselő módszereket.

Néhány megállapítás, amely kifejezetten a különböző talajtípusok szimulációs eredményeiből szűrhető le:

- 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% fölé. 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 becselő módszerek alkalmazhatóságára. A becselő módszerek statisztikai eredményeinek egymáshoz való viszonyát vetettem 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 6**), ahol a referencia módszertől (Penman-Monteith) való százalékos eltérés értékei szerepelnek. A színskála minden zöld 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 zöld 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
Iszapos 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 6: A különböző PET becslő 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 szolgáltat 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

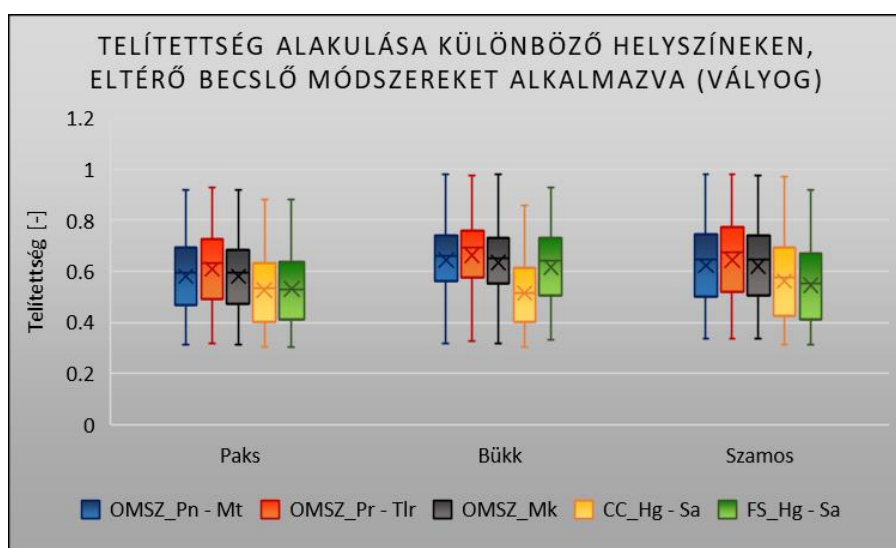
indokolja, hogy talajtípusonként esetleg eltérő módon értelmezzük és használjuk fel a PET becslő formulákat.

- 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 talajról talajra 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.

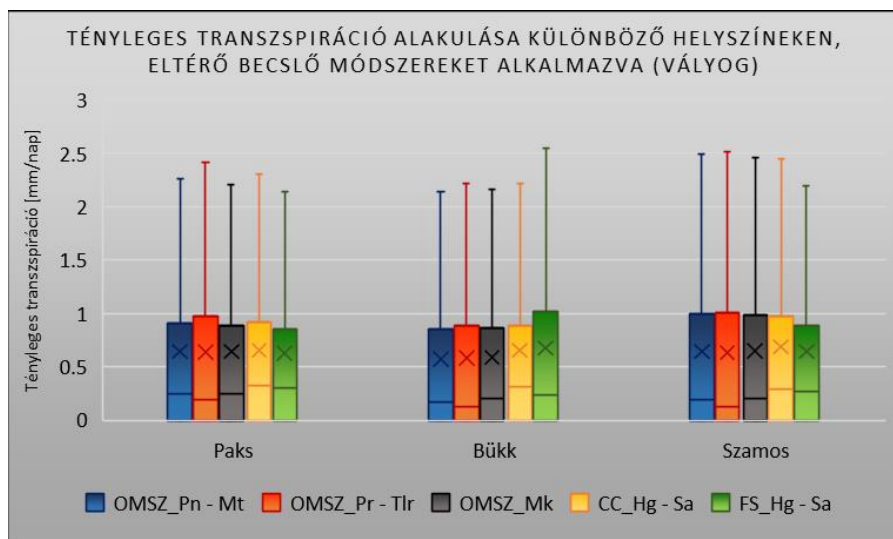
Elmondható tehát, hogy a különböző talajok a felül- vagy alulbecslő viszonyokat nem befolyásolják, legfeljebb annak mértékét. Ez arra utalhat, hogy modellezések során a PET becslő módszerek mutathatnak változást a viselkedésükben talajtípustól függően, viszont az alkalmazható módszerek közötti választást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

4.3.2 *Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése*

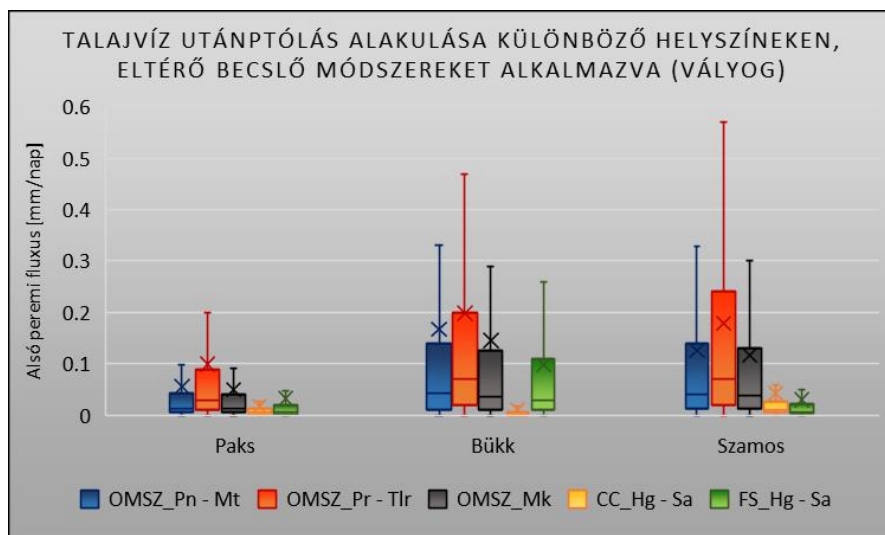
Az előzőekben bemutatott érzékenységvizsgálat hasonló formáját választottam amikor az eltérő meteorológiai jellemzőkkel rendelkező helyszínek hatásait vizsgáltam hidrológiai válaszok szintjén. Minden bemutatott eset a referencia vályog talajtípusra vonatkozik. A négy további talajtípushoz tartozó box plotos eredményfeldolgozást a függelék [8.3 alfejezetei](#) tartalmazzák. A vizsgálatához tartozó kimutatásokat a **24-26. ábrák** mutatják be:



Ábra 24: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



Ábra 25: Napi léptékű tényleges transzpiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



Ábra 26: Napi léptékű talajvíz utánpótlás 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 még inkább az alkalmazott adatbázisok. A Bükk esetében a 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 változékonnyabb 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 7: A különböző PET becslő 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 változás. A sorok közötti színezésben itt is elsősorban a Hargreaves – Samani esetén észlelhető az eltérés, ahogy az a box plotos ábrázolásnál is feltűnt. Itt látszik azonban az is, hogy a tényleges párologtásnál helyszínenként a többi becslő módszer is eltérően viszonyul a referenciához. Az átlagok és a szélsőértékek esetében is a Bükknél mutatkozik a legnagyobb számszerű eltérés. A tényleges párologtás vizsgálatnál tehát indokolt lehet a terület jellege szerint is meggondolni az alkalmazandó PET becslő módszer 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 evapotranszspiráció (PET) hatását vizsgáltam talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámítások segítségével, több meteorológiai adatbázis és talajtípus bevonásával. Az érzékenységvizsgálat ugyanis nagyban hozzájárulhat ahhoz, hogy későbbi hidrológiai modellekben olyan becselő módszert alkalmazzunk, amely a vízmérleg potenciális evapotranszspiráció komponensére a valóságot legjobban közelítő eredményeket adja. Az egyes PET becselő módszerek esetén olyan kérdésekre kerestem a válaszokat mint, hogy mennyire megbízhatóak az egyes formulák a referenciának tekintett Penman-Monteith képlethez képest; hidrológiai válaszok milyen mértékben érzékenyek az eltérő PET értékekre; mely becselő módszerek becsülnek alá és melyek túl; mennyire megbízhatóak az elérhető nyílt adatbázisok; okozhat-e az eltérő talaj/éghajlat eltérő tendenciát a becselő 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 esetükben 0.95 és az éves PET összegek is ezen eljárás esetén állnak a legközelebb a referenciához.
3. A Priestley-Taylor alulbecsül. **Elsősorban** a telítettségnél 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 becselő módszer eredményeit.
4. A hidrológiai válaszok eltérő mértékben érzékenyek. Ha csak a tényleges transzspirációs 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 becslő módszereket.

5. A két meteorológiai adatbázisból származó Hargreaves-becslés összevetéséből látható, hogy a FORESEE adatbázis (FS) 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 transzspiráció 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 CARPATCLIM-ből (CC) 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 klímaprojekciókat tartalmazó FS adatbázissal a jövőre vonatkozóan is megbízható becslést lehetett volna végezni, ha megfelelő korrekciós kapcsolatot találunk a referencia OMSZ-Pn-Mt és FS_Hg-Sa között a múltra. Ekkor egy olyan egyenletet lehetett volna felállítani, aminél a kis paraméterigényű Hg-Sa-ból napi léptéken, megbízhatóan becsülhető lett volna a referenciának tekintett érték nem csak a múltra, hanem a jövőre is. Ehhez viszont ennél erősebb regressziós kapcsolat és pontosabb éves PET összeg becslés szükséges.
7. 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 becslő 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.
8. 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 becslő módszerek, mint amilyen eltérés látszódik ugyanazon becslő módszernél, csak más talajtípusnál. Az ehhez tartozó eredmények, valamint az 2. és 3. pont alapján elmondható, hogy leginkább a Makkink adja a legmegbízhatóbb eredményeket a különböző talajtípusokra, a Penman-Monteith-hez képest.

9. A terület jellege szerint (ahol a PET-et az éghajlati viszonyok közvetlenül befolyásolják) a tényleges párolgás vizsgálatnál lehet indokolt meggondolni az alkalmazandó PET becslő 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 a vizsgálatokat valós talajszelvényekre is ki lehetne terjeszteni, amelyhez a dolgozatban bemutatott, homogén talajra vonatkozó módszertan és megközelítés megfelelő keretrendszerként szolgálhat. Javasolt továbbá az alapadatok szintjén más típusú átlaghőmérséklet számítás, 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. A végső cél egy új talajtani kategorizálás lehet a talajok hidrológiai válasz szempontú besorolásával.

6 Saját munkarész összefoglaló ismertetése

A párolásbecslő módszerek összehasonlító vizsgálatával a BME-VKKT nagyszabású kutatásához járultam hozzá, melynek fő célja a hazai talajtani térképezés megújítása. Ennek következtében számos munkarésznél a tanszék korábbi munkái, illetve a kutatást támogató eszközei is a rendelkezésemre álltak. Ezek közé tartoznak azok a megírt makrók, amelyek a napi léptékű számítást gyorsították vagy a nagyszámú projektek előállítását tették egyszerűbbé, de meg kell említenem azt a tanszéki fejlesztésű keretprogramot is, amely az egyes projektek futtatását kezelte és numerikus hiba esetén azokat automatikusan korrigálta. Készhez kaptam továbbá a MARTHA v3.0 adatbázis adataiból származtatott van Genuchten-Mualem másodlagos talajtani paramétereket és az OMSZ által számított PET idősorokat a Priestley-Taylor, Penman-Monteith és Makkink becslő formulák esetében, így ezek kiszámítása sem az én feladataim közé tartozott. Saját munkarészként az alábbiak elvégzését tüntetném fel:

- Az egyes adatbázisokhoz tartozó adatok áttekintése, begyűjtése a kiválasztott helyszínekre és annak szerkeszthetővé tétele
- Az Fs-Hg-Sa és CC_Hg-Sa módszerekkel számított PET idősorok előállítása a makró segítségével
- A PET becslő módszerek szakirodalmi áttekintése
- Futtatásra szánt projektek előállítása makróval, amihez a különböző meteorológiai, talajtani és modellbeállításhoz tartozó bemeneti adatok megadása volt szükséges
- A legyártott projektek futtatása HYDRUS-1D szoftver segítségével, ahol a nagyszámú futtatási változatot a keretprogram kezelte
- PET becslő módszerek összehasonlító vizsgálata az eredmények idősoros és box plotos feldolgozásával, valamint korrelációanalízis végzése, melyben referenciaként a Pn-Mt idősor szerepelt
- A modelleredmények feldolgozása:
 - Hidrológiai válaszok áttekintése, modelleredmények értelmezése
 - Becslő módszerek és talajok/helyszínek statisztikai összevetése, box plotos és számszerűsített táblázatos vizsgálata a hidrológiai válaszokon keresztül
- Az eredmények kiértékelése

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 kevés korábbi tapasztalattal rendelkeztem, lehetőséget adott a kutatásban való részvételre, türelmes volt és mindig buzdított a tovább haladásra.

Köszönetet szeretnék mondani 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.

7 Irodalomjegyzék

- 1) Ács, T., 2010. *Vízmozgás felszín alatti vizekben*. Budapest: BME-VKKT.
- 2) Allen, R. G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, p. 10.
- 3) Amatya, D., Skaggs, R. & Gregory, J., 1995. Comparison of Methods for Estimating REF-ET. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Issue 121, pp. 427-435.
- 4) Anon., 2015. <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>. [Online]
Available at: <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>
- 5) Bihari et al., Z., 2013. *Annex 3 – Description of MASH and MISH algorithms*, hely nélk.: ismeretlen szerző
- 6) Burman, R. & Pochop, L., 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. *Amsterdam, Elsevier*.
- 7) CARPATCLIM, 2021. *Climate of the Carpathian Region - About*. [Online]
Available at: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/about/>
- 8) Crawford, T. M. & Bluestein, H. B., 2000. An Operational, Diagnostic Surface Energy Budget Model. *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)*, Vol. 39(No. 7.), pp. 1196-1217.
- 9) Csorba, P., 2021. *Magyarország kistájai*. második szerk. Debrecen: Táj- és Környezetföldrajzi Alapítvány.
- 10) 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.
- 11) DeJonge, K. & Thorp, K., 2017. Implementing standardized reference evapotranspiration and dual crop coefficient approach in the DSSAT cropping system model. p. 10.
- 12) Dingman, S. L., 2015. *Physical Hydrology - Third Edition*. third szerk. USA: Waveland Press, Inc..
- 13) Dobor, L. és mtsai., 2015. Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience data Journal*, p. 11.
- 14) ECA&D, 2021. *European Climate Assessment&Dataset*. [Online]
Available at: <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>

- 15) 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.
- 16) FORESEE, 2021. *Open Database FOR ClimatE Change-Related Impact Studies in CEntral Europe*. Available at: <http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index.html>
- 17) Grismer, M., Orang, M., Snyder, R. & Matyac, R., 2002. Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, p. 15.
- 18) Hargreaves, G. & Samani, Z. A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Ambient Air Temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, Issue No. 85-2517, p. 13.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) Holtslag, A. & De Bruin, H., 1988. Applied Modeling of the Nighttime Surface Energy Balance over Land. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 27(6), pp. 689-704.
- 22) Holtslag, A. & Van Ulden, A., 1983. A Simple Scheme for Daytime Estimates of the Surface Fluxes from Routine Weather Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(4), pp. 517-529.
- 23) Jamieson, P., 1982. Comparing of methods of estimating maximum evaporation from a barley crop. *N. Z. J. Sci.*, p. 25:175–181.
- 24) Jensen, D., Hargreaves, G., Temesgen, B. & Allen, R. G., 1997. Computation of ETo under Nonideal Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), p. 7.
- 25) 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..
- 26) 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.
- 27) Kozma, Z., Ács, T. & Koncsos, L., 2014. *Unsaturated zone modelling: the role of soil database classification*. hely nélk., ismeretlen szerző, p. 13.
- 28) Kreye, P., Gelleszun, M., Somasundaram, M. & Meon, G., 2019. Classification of Hydrological Relevant Parameters by Soil Hydraulic Behaviour. *Geosciences*, 5(9), p. 13.

- 29) Lakatos, M. és mtsai., 2020. Computation of daily Penman-Monteith reference evapotranspiration in the Carpathian Region and comparison with Thornthwaite estimates. *Advances in Science and Research*, Issue 16, pp. 251-259.
- 30) Makkink, G., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Ins. Wat. Engrs.*, 11. kötet, pp. 277-288.
- 31) 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*.
- 32) MVM Paks II. Zrt, 2012. *Paks és 30 km sugarú környezetének éghajlati jellemzése*, hely nélkül.: ismeretlen szerző
- 33) OMSZ, 2021. *Országos Meteorológiai Szolgálat*. [Online]
Available at: <https://odp.met.hu/>
- 34) Pereira, A. & Nova, N., 1992. Analysis of the Priestley-Taylor parameter. *Agric. For. Meteorol.*, pp. 61:1-9.
- 35) 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.
- 36) Richards, L., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Journal of Applied Physics*, 1. kötet, pp. 318-333.
- 37) Schmotzer, A., 2017. *A Szilvásvárad Aszaló és Szilvás-patak mente (HUBN20067) kiemelt jelentőségű különleges természetmegőrzési terület Natura 2000 fenntartási terve*, Eger: Natura 2000.
- 38) 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
- 39) Szász, G., 1995. Főbb termesztett növények természetes vízhasznosulása Magyarországon. *OMSZ Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok*, 3. kötet.
- 40) Thornthwaite, C., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, pp. 38:55-94.
- 41) van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Issue 44, pp. 892-898.
- 42) Várallyay, Gy., 1983. *A talaj vízgazdálkodása és a környezetvédelem*. Budapest, Agrokémia és talajtan, p. 10.
- 43) Vermes, L. és mtsai., 2001. *Vízgazdálkodás mezőgazdasági, kertész-, tájépítész- és erdőmérnök-hallgatók részére*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó.

- 44) Wagener, T., Sivaplan & Troch, P., 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world.. *Water Resources Research*, p. 46:W05301.
- 45) Wagner, A., 2009. Literature Study on the Correction of Precipitation Measurements.
- 46) Wu, H., Zhu, W. & Huang, B., 2021. Seasonal variation of evapotranspiration, Priestley-Taylor coefficient and crop coefficient in diverse landscapes. *Geography and Sustainability*, Vol. 2.(Issue 3.), pp. 224-233.
- 47) 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: A telítetlen zóna vízmérlege, forrás: (Ács, 2010)	8
Ábra 2: Vízforgalmat leíró fogalmak definíciója a telítetlen zónában, forrás: (Dingman, 2015)	15
Ábra 3: A homok, iszap és agyag relatív méretei, forrás: (Dingman, 2015).....	15
Ábra 4: USDA talajtextúraháromszög, forrás: (Dingman, 2015).....	16
Ábra 5: Vízretartóképességi görbe fizikai tartalma vályogra , forrás: (Kozma, et al., 2014)	17
Ábra 6: Vízvezetőképességi görbe normalizált alakja 3 talajtípusra, forrás: (Kozma, et al., 2014)	18
Ábra 7: Módszertan: munkafolyamat összefoglaló ábrája	20
Ábra 8: Átlaghőmérséklet alakulása 1991-2020 időszakra (FORESEE) (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index-maps_v4.0.html).....	23
Ábra 9: A rácsból vizsgált celláinak elhelyezkedése (kékkel kiemelt) - FORESEE adatbázis (forrás: http://nimbus.elte.hu/FORESEE/map_query/index.html).....	25
Ábra 10: Kiválasztott talajtextúrákhoz tartozó retenciós görbék, forrás: saját	26
Ábra 11: Projektváltozatok felépítése – ágrajz (forrás: saját)	30
Ábra 12: Napi aktuális PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becselő módszerek esetén (forrás: saját) .	32
Ábra 13: Összegzett PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becselő módszerek esetén (forrás: saját)	33
Ábra 14: A különböző becselő képletek kapcsolata a referenciának tekintett Penman-Monteith formulával (forrás: saját).....	34
Ábra 15: Helyszínek összevetése a PET alakulása szerint, különböző becselő módszerek esetén (forrás:saját)	35
Ábra 16: Telítettség referencia változókra vonatkozó alakulása - idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját).....	37
Ábra 17: Csapadékhatások szemléltetése a telítettség idősoron (forrás: saját)	37
Ábra 18: Alsó peremi kifolyás referencia értékekre vonatkozó alakulása - idősoros és boxplotos megjelenítés (forrás: saját).....	38
Ábra 19: Tényleges transzspiráció referencia értékekre vonatkozó alakulása - idősoros és box plotos megjelenítés (forrás: saját).....	39
Ábra 20: Tényleges és potenciális transzspiráció különbsége, csapadékidősor mellett (forrás: saját)	40

Ábra 21: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)	41
Ábra 22: Napi léptékű tényleges párolgás alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját).....	41
Ábra 23: Napi léptékű perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját).....	42
Ábra 24: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)...	45
Ábra 25: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját).....	46
Ábra 26: Napi léptékű talajvíz utánpótlás alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját).....	46
Ábra 27: A telítettség 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját).....	59
Ábra 28: A tényleges transzspiráció 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját).....	59
Ábra 29: Az alsó peremi kifolyás 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját).....	60
Ábra 30: A telítettség 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját).....	60
Ábra 31: A tényleges transzspiráció 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját).....	60
Ábra 32: Az alsó peremi kifolyás 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját).....	61
Ábra 33: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját).....	61
Ábra 34: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját).....	62
Ábra 35: Napi léptékű perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)	62
Ábra 36: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját).....	63
Ábra 37: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját).....	63
Ábra 38: Napi léptékű perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)	64
Ábra 39: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját).....	64
Ábra 40: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját).....	65

Ábra 41: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját)	65
Ábra 42: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)	66
Ábra 43: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)	66
Ábra 44: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)	67
Ábra 45: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)	67
Ábra 46: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)	68
Ábra 47: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)	68
Ábra 48: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)	69
Ábra 49: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)	69
Ábra 50: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)	70

Táblázatjegyzék

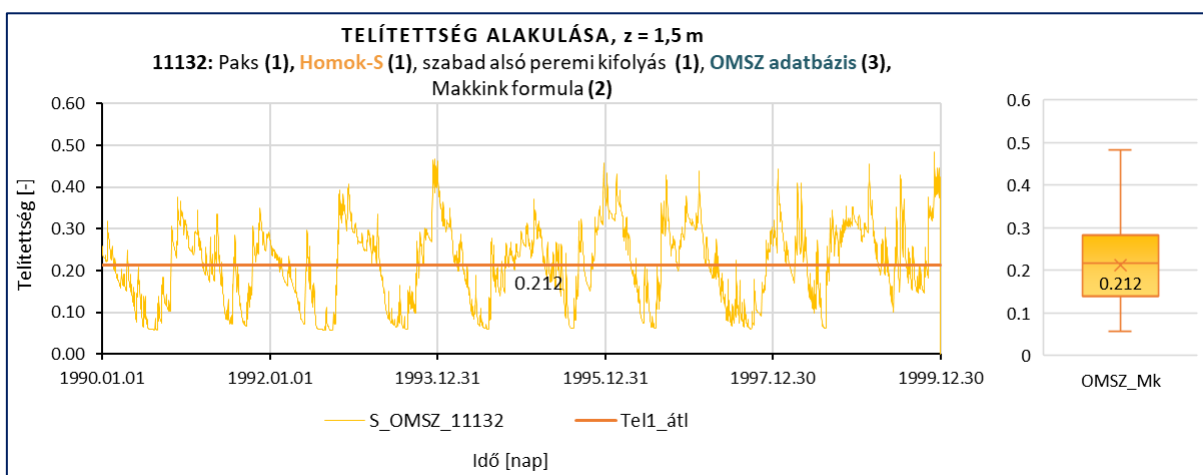
Táblázat 1: Adatbázisok összesítése és összehasonlítása	22
Táblázat 2: Vizsgálati pontok jellemző földrajzi, éghajlati és meteorológiai adatai, forrás: (Csorba, 2021), (MVM Paks II. Zrt, 2012), (Schmotzer, 2017), (Anon., 2015)	24
Táblázat 3: Vizsgált területet lefedő cellák középpontjának koordinátái és cellaazonosítója	25
Táblázat 4: A projektekben felhasznált talajtextúra osztályok és a hozzájuk tartozó paraméterek	27
Táblázat 5: Korrelációs mátrix a Pearson-féle korrelációs együtthatók értékeivel 1990-1999 időszakra, referencia: Penman-Monteith formula	34
Táblázat 6: A különböző PET becslő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző talajokra - számszerű összesítés	44
Táblázat 7: A különböző PET becslő módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérése a referencia Penman-Monteith formulát alkalmazó eredményektől, különböző helyszínekre - számszerű összesítés	47

8 Függelék

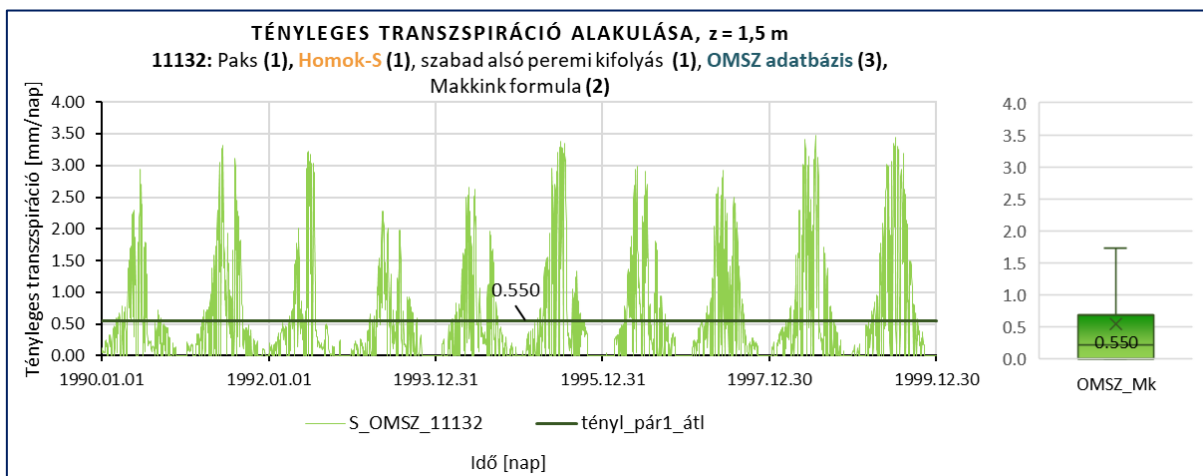
8.1 Szimulált hidrológiai változók idősoros értékelése

A következő alfejezetekben a 75 futtatási projekt modelleredményeiből, a referenciától eltérő, két további helyszínrre és egy-egy talajtextúrára jelenítem meg a vizsgált hidrológiai változók idősorait. Az idősorok mellett a box plotos megjelenítés segít értelmezni az idősorok statisztikai mutatószámainak értelmezését.

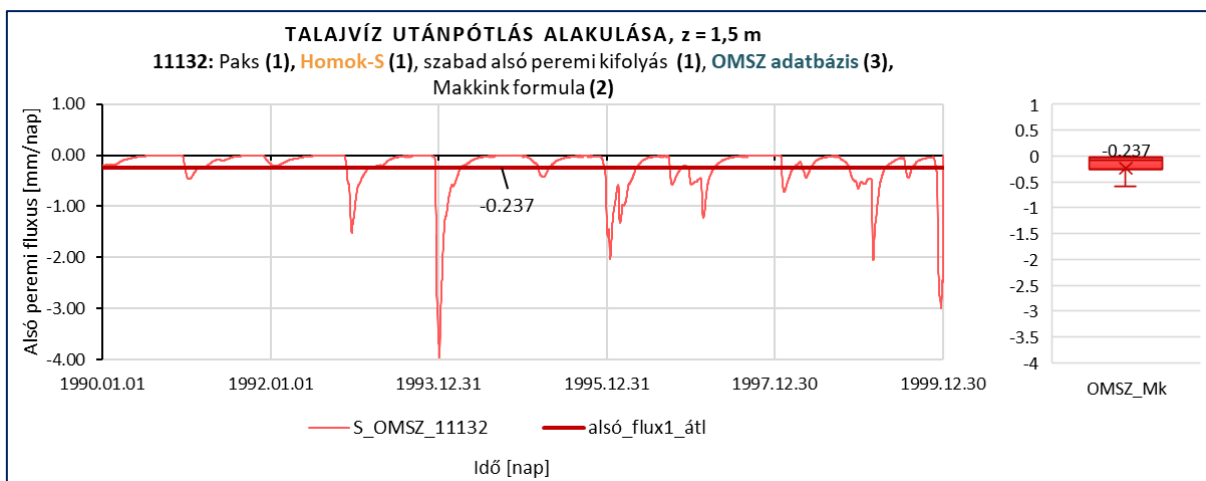
8.1.1 Paks, homok, OMSZ adatbázis, Makkink-formula



Ábra 27: A telítettség 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját)

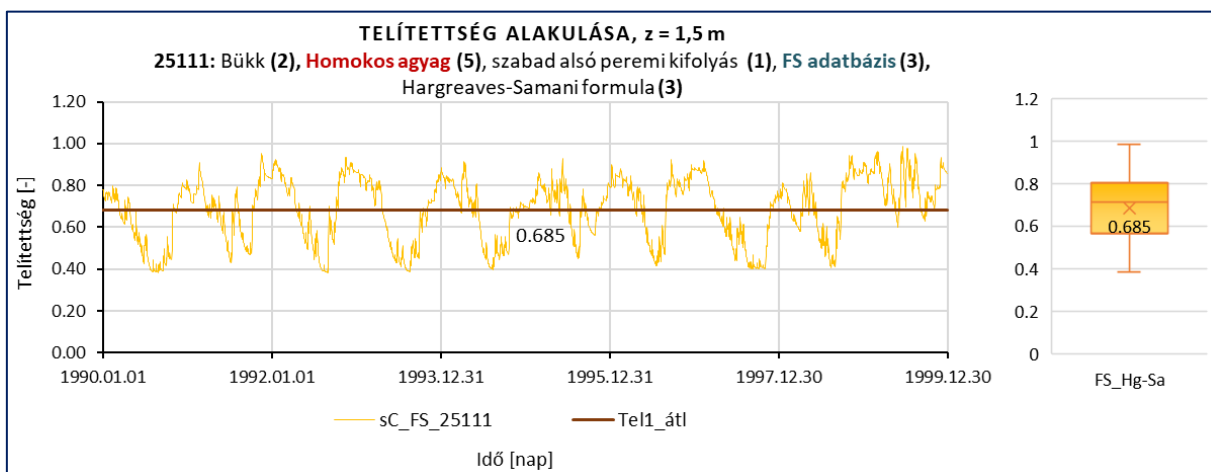


Ábra 28: A tényleges transzspiráció 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját)

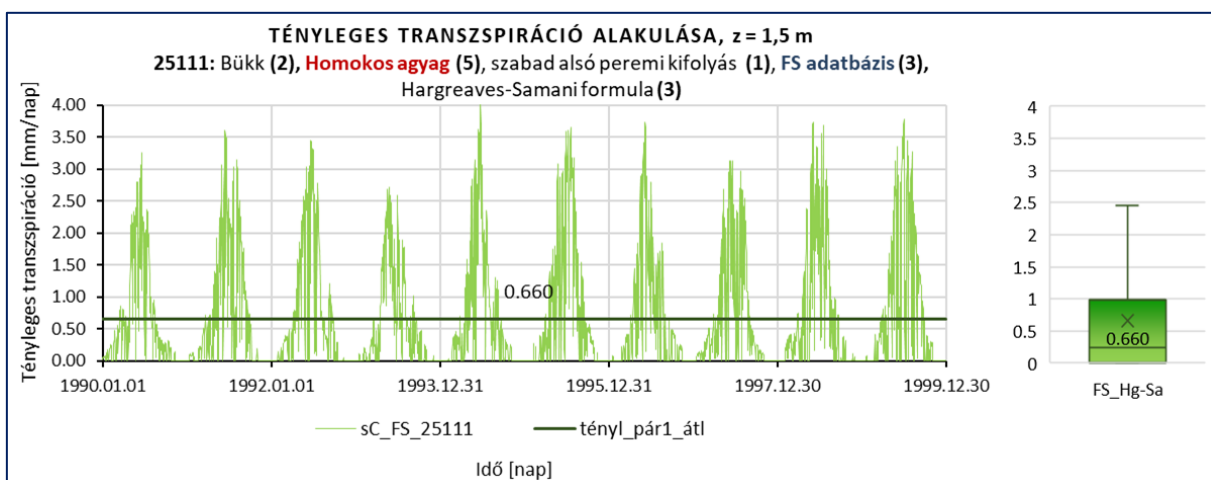


Ábra 29: Az alsó peremi kifolyás 11132 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját)

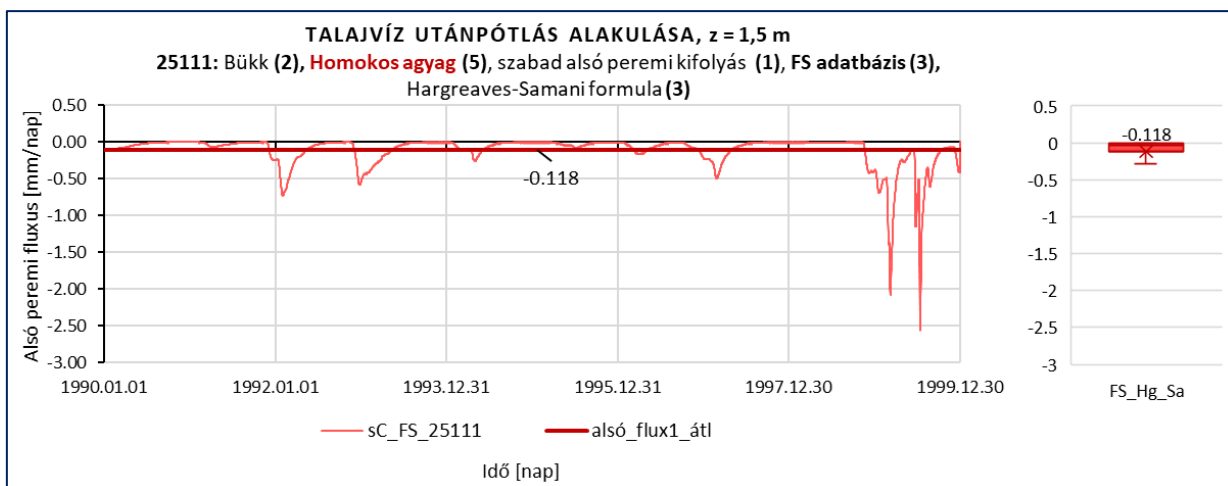
8.1.2 Bükk, homokos agyag, FORESEE adatbázis, Hargreaves-Samani formula



Ábra 30: A telítettség 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés (forrás:saját)



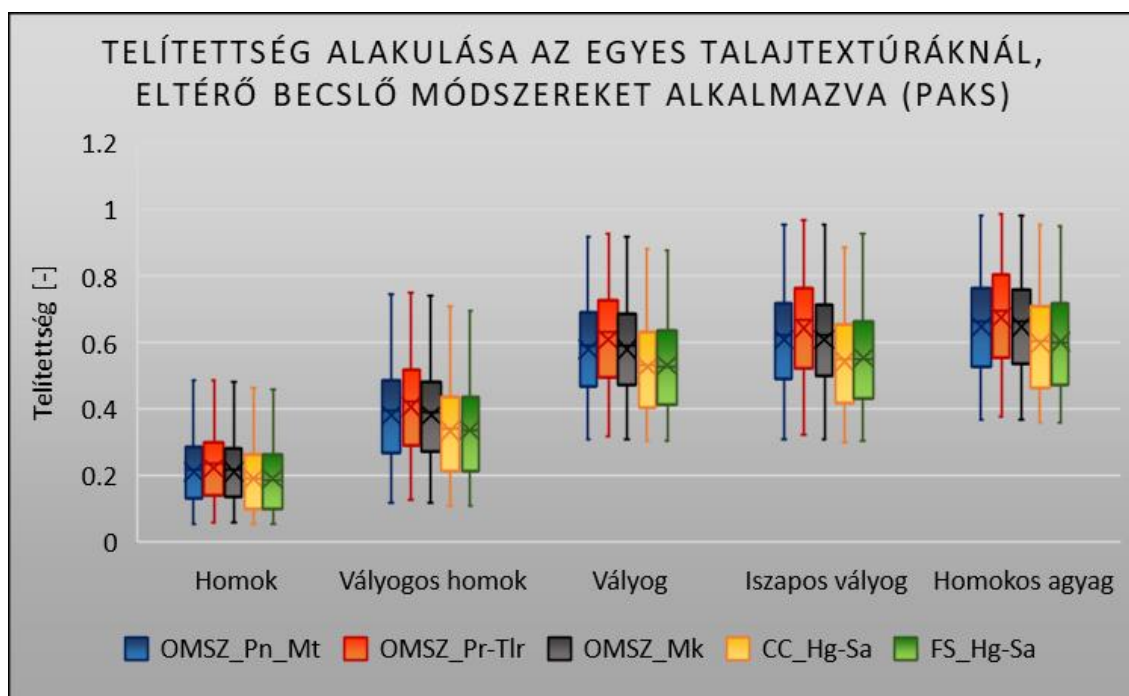
Ábra 31: A tényleges transzspiráció 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás:saját)



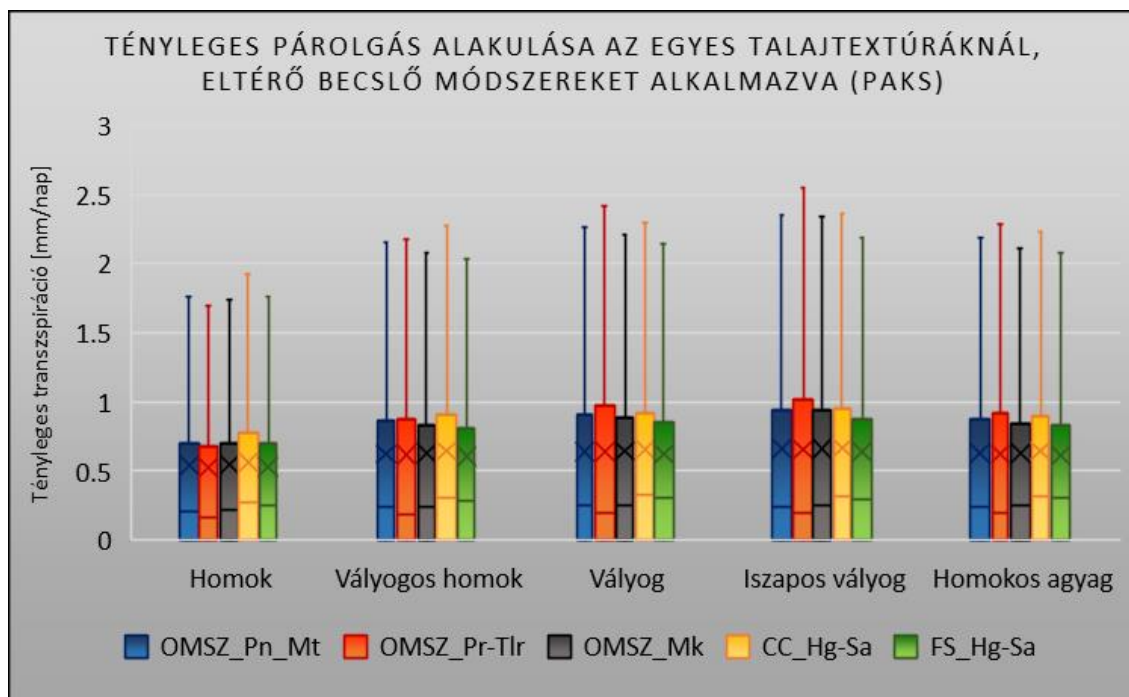
Ábra 32: Az alsó peremi kifolyás 25111 projektváltozatra vonatkozó alakulása- idősoros és box plotos megjelenítés, (forrás: saját)

8.2 Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése hidrológiai változókön keresztül

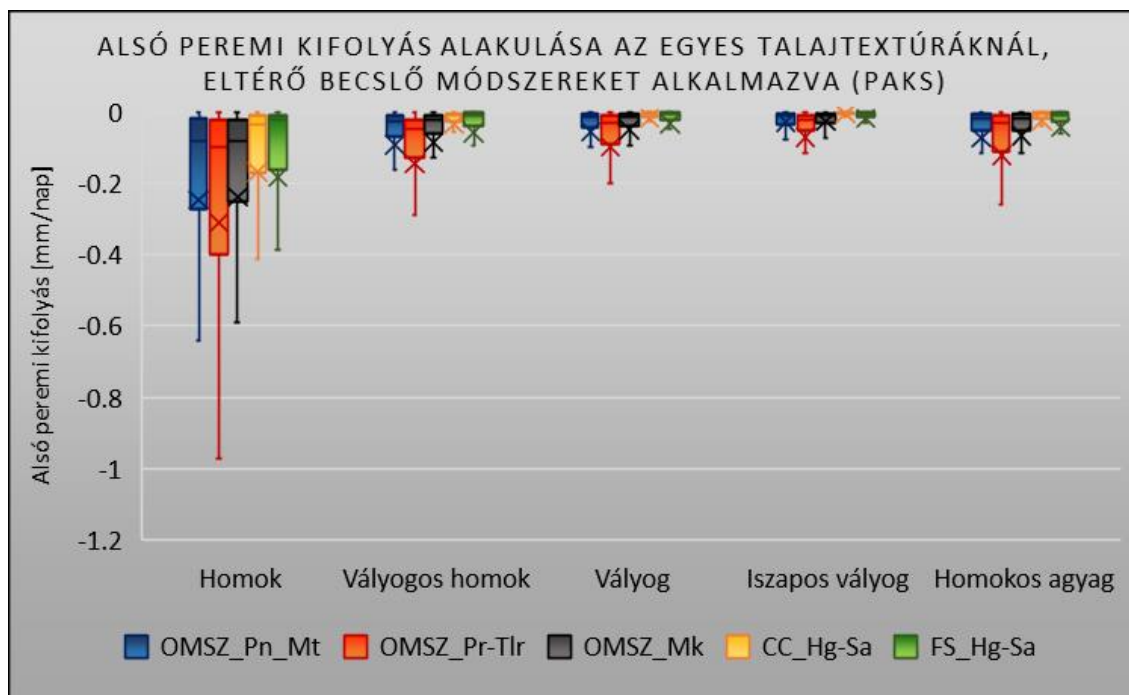
8.2.1 Melegebb éghajlati viszonyok esetében: Paks cella



Ábra 33: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)

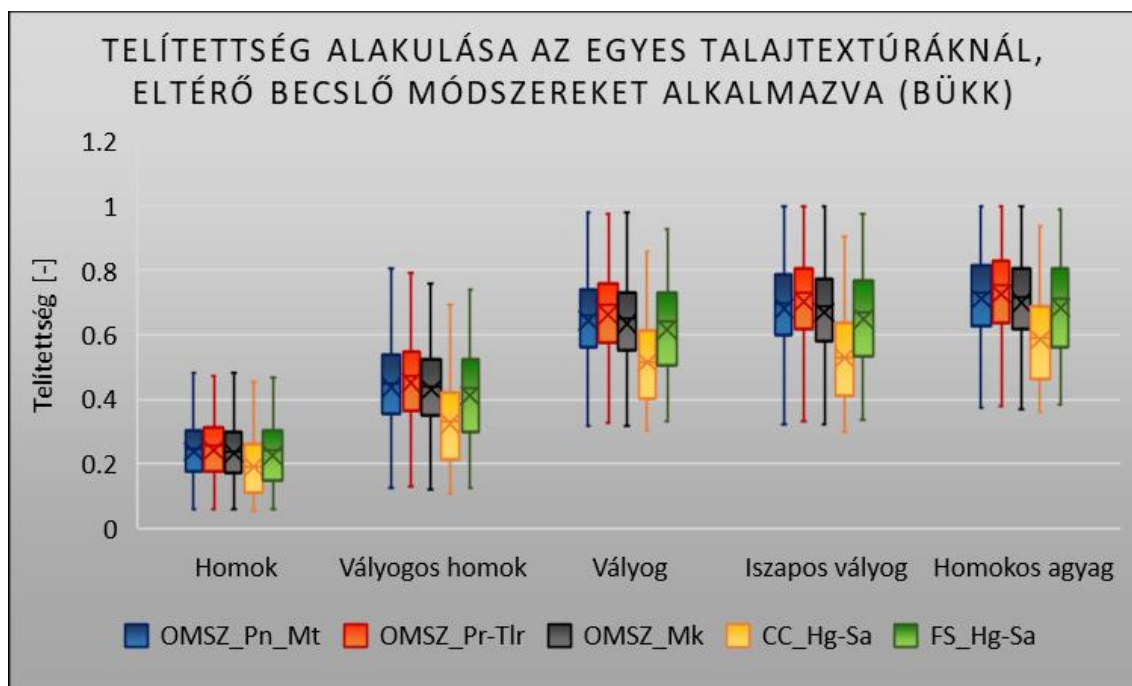


Ábra 34: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becselő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)

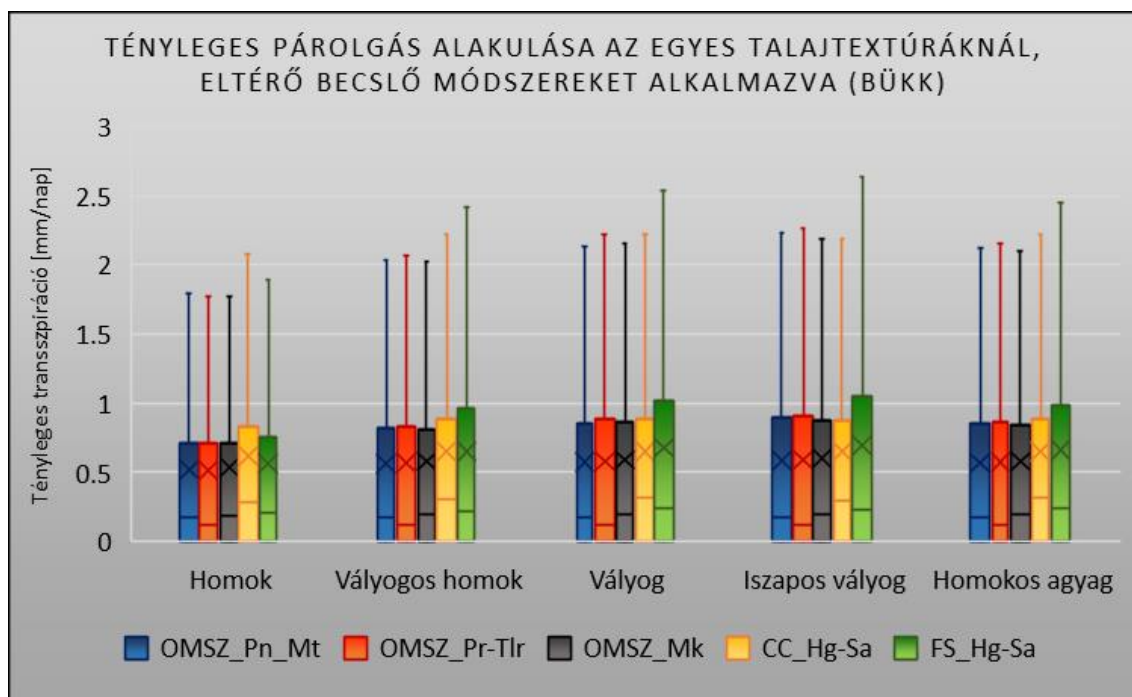


Ábra 35: Napi léptékű perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becselő módszereket alkalmazva, Paks meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)

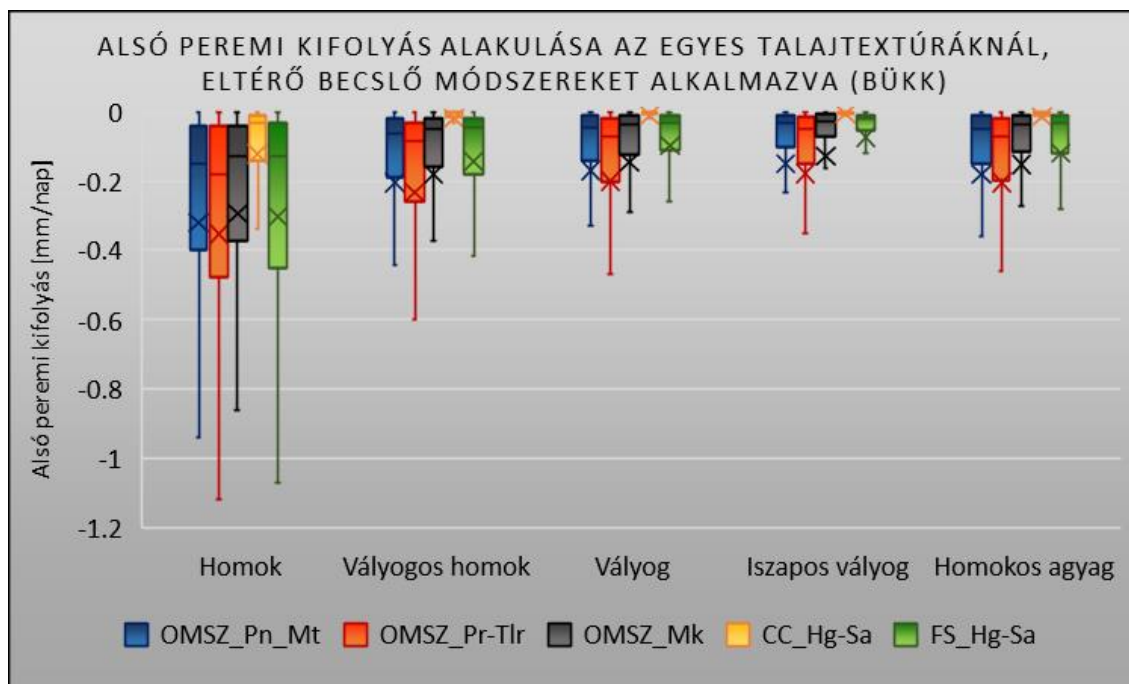
8.2.2 Hűvösebb éghajlati viszonyok esetében: Bükk cella



Ábra 36: Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becselő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)



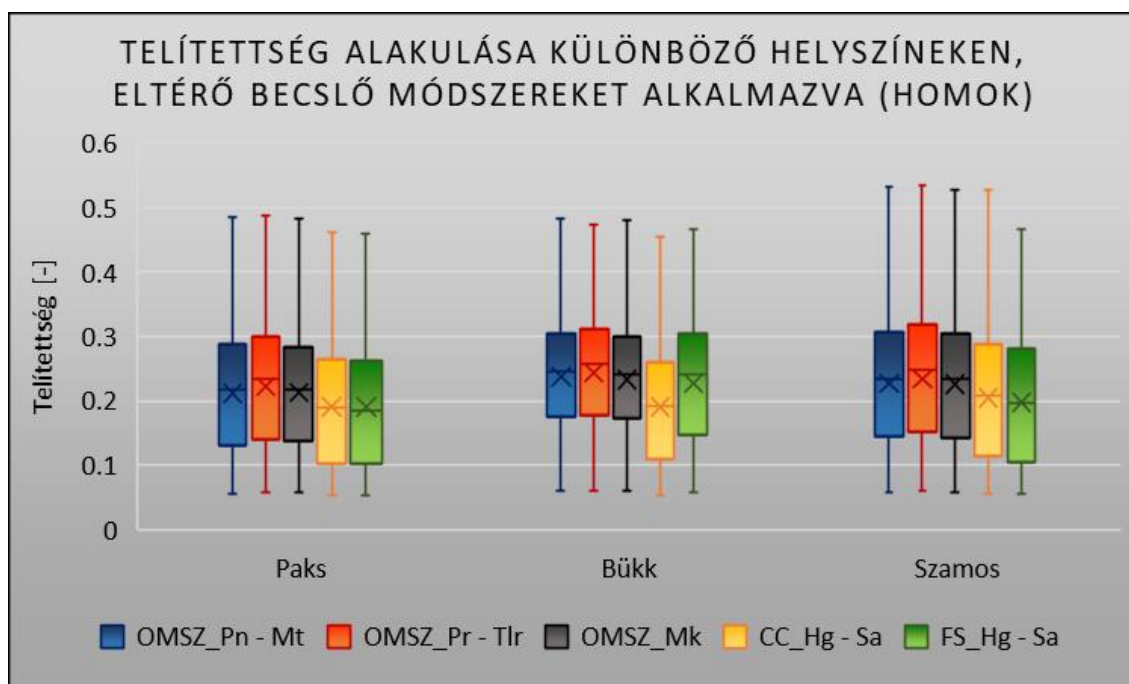
Ábra 37: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becselő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)



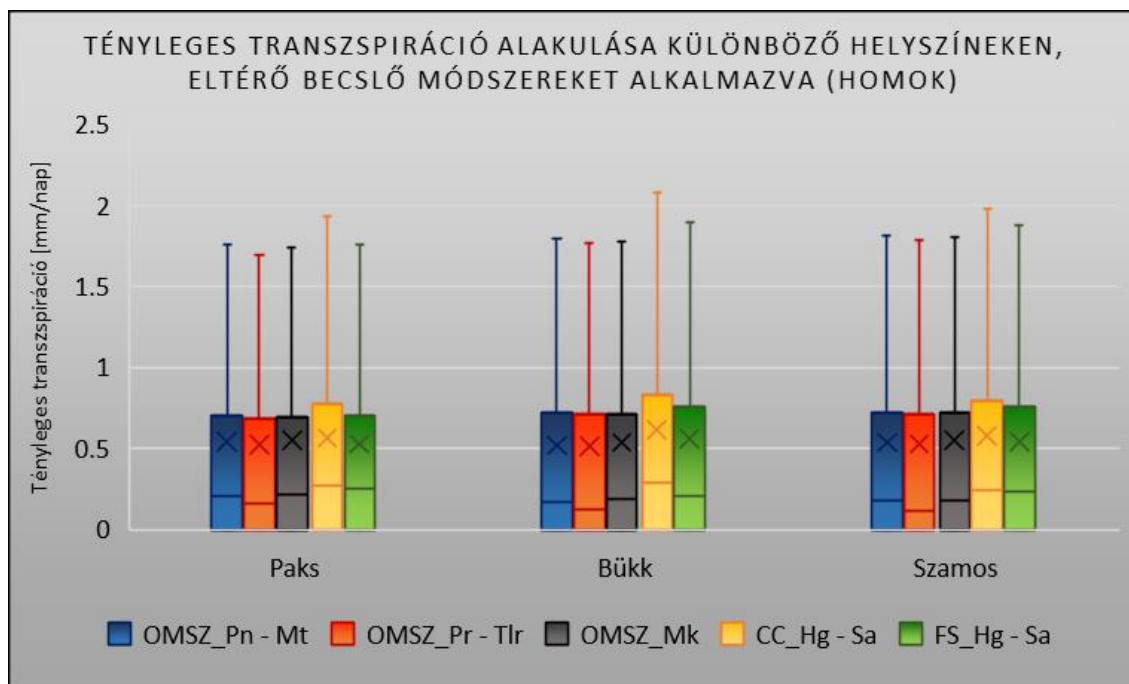
Ábra 38: Napi léptékű perkoláció alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becselő módszereket alkalmazva, Bükk meteorológiai viszonyaira (forrás: saját)

8.3 Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése hidrológiai változókon keresztül

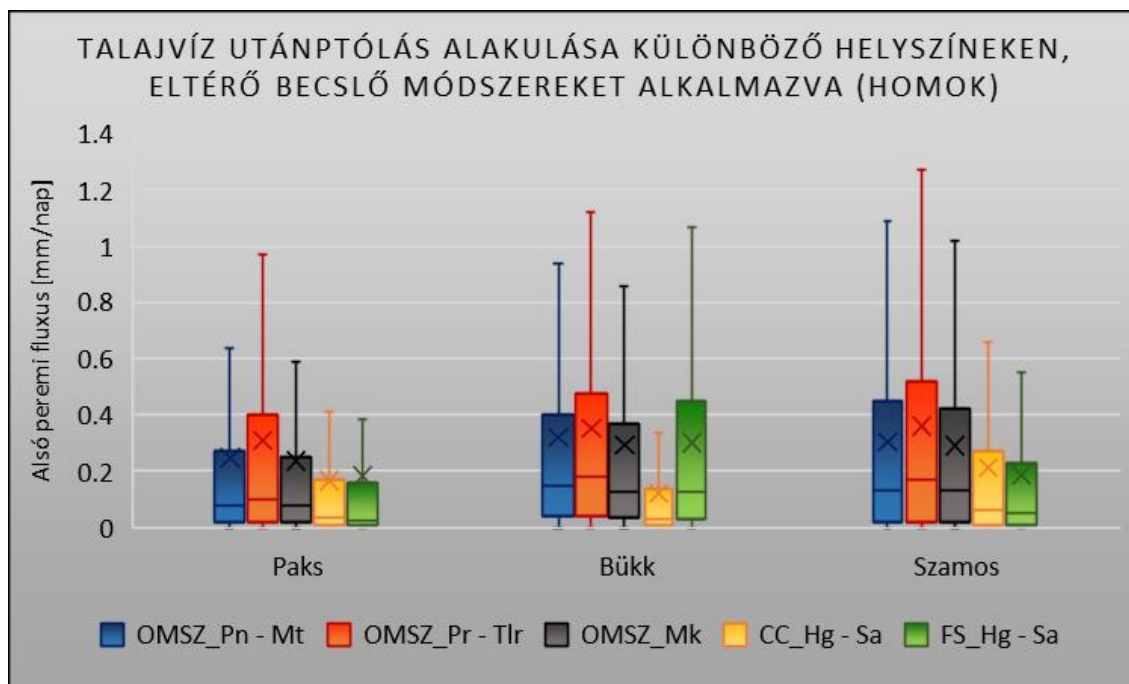
8.3.1 Homok talajtípus esetén



Ábra 39: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becselő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját)

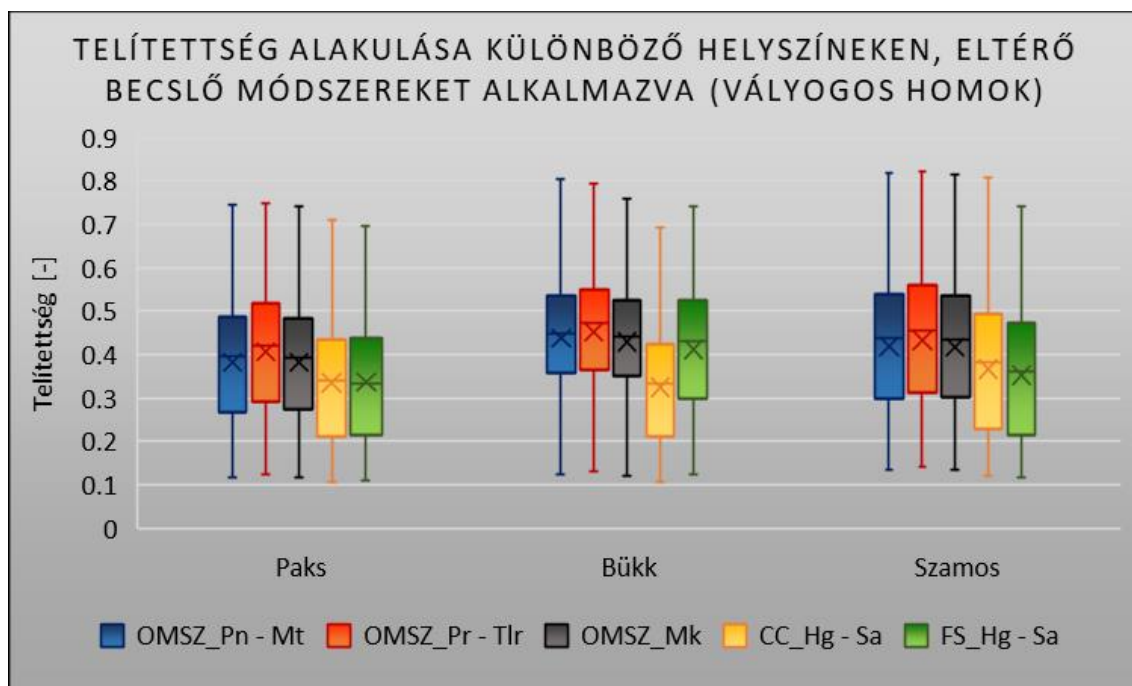


Ábra 40: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját)

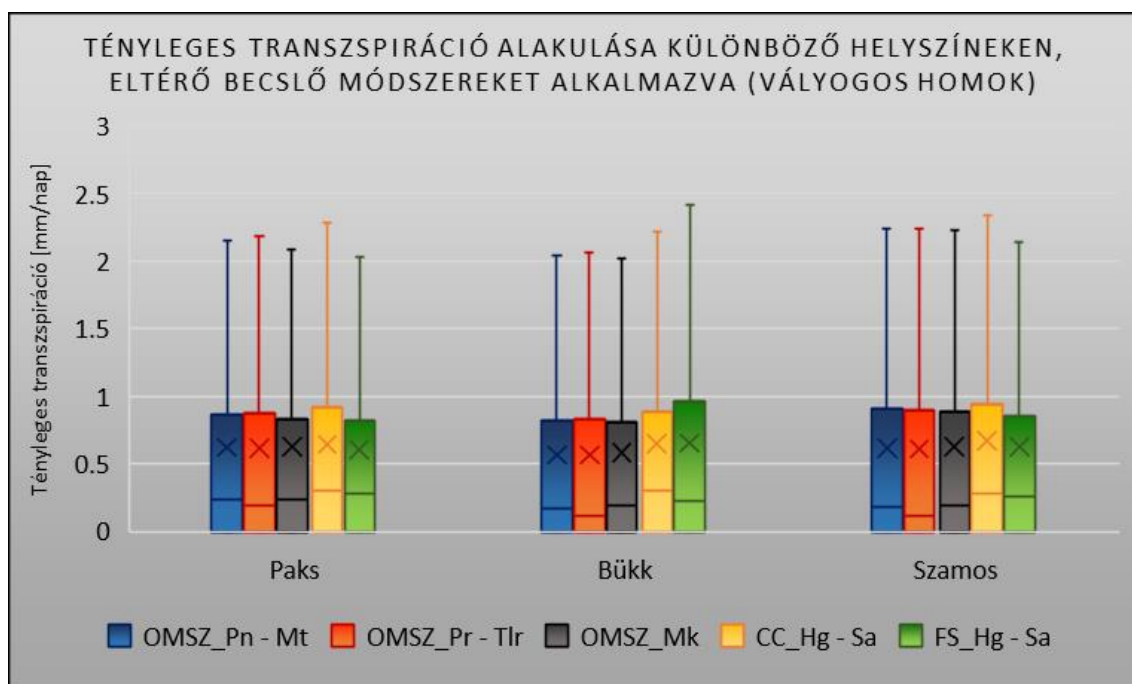


Ábra 41: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos talajra (forrás: saját)

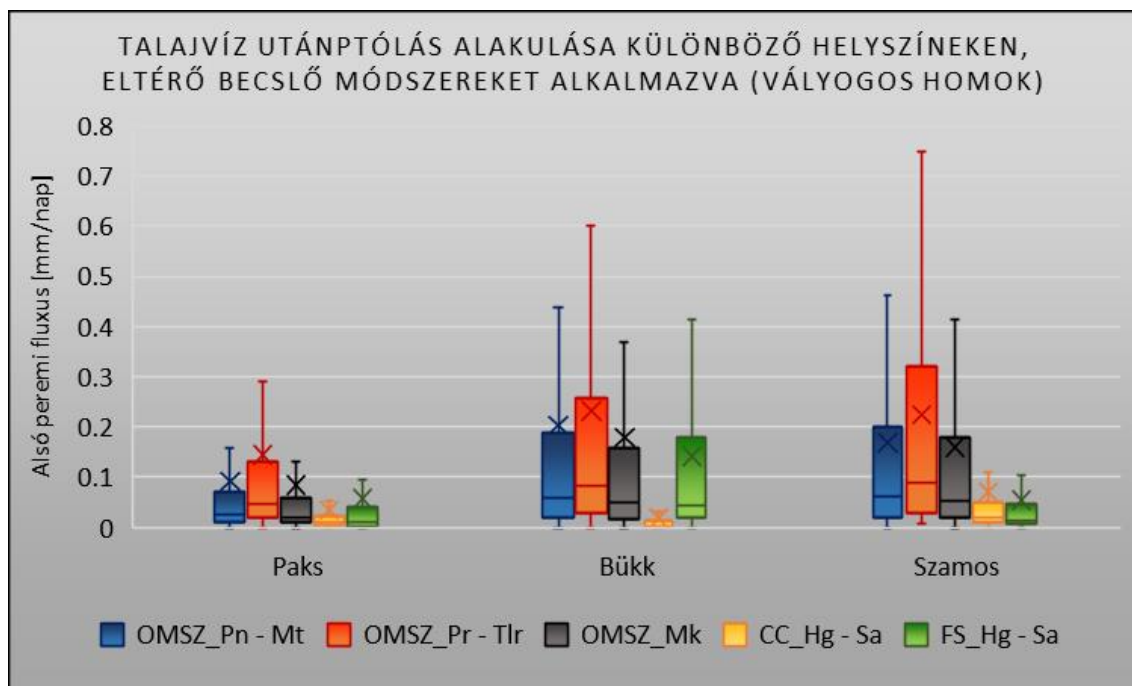
8.3.2 Vályogos homok talajtípus esetén



Ábra 42: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)

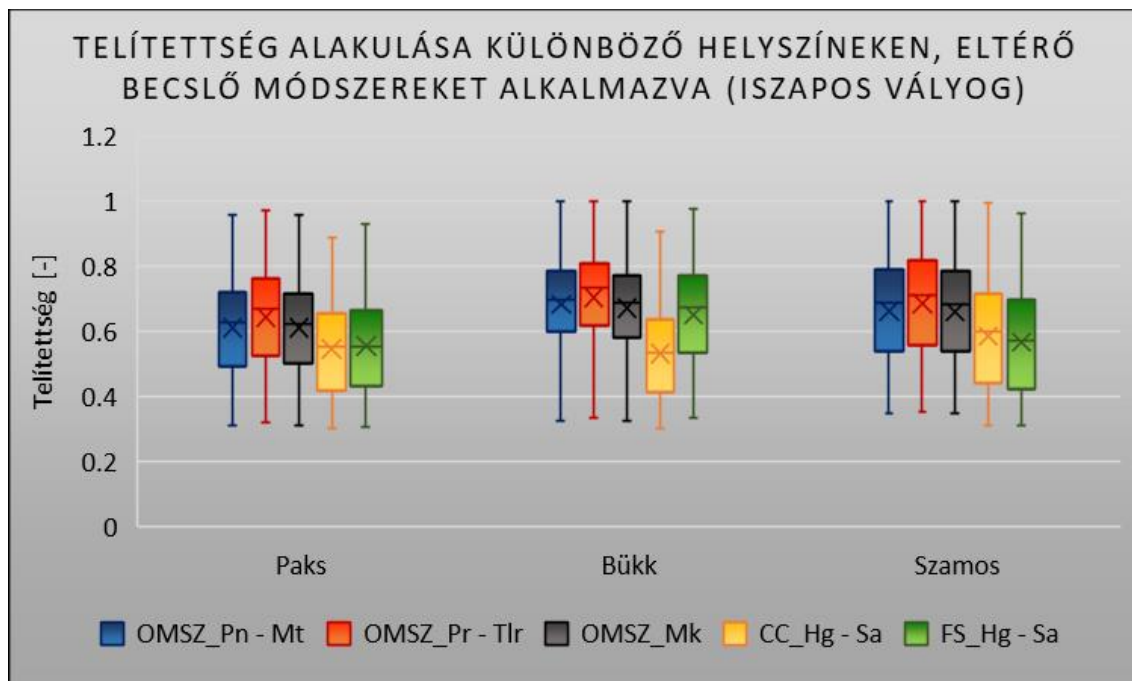


Ábra 43: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)

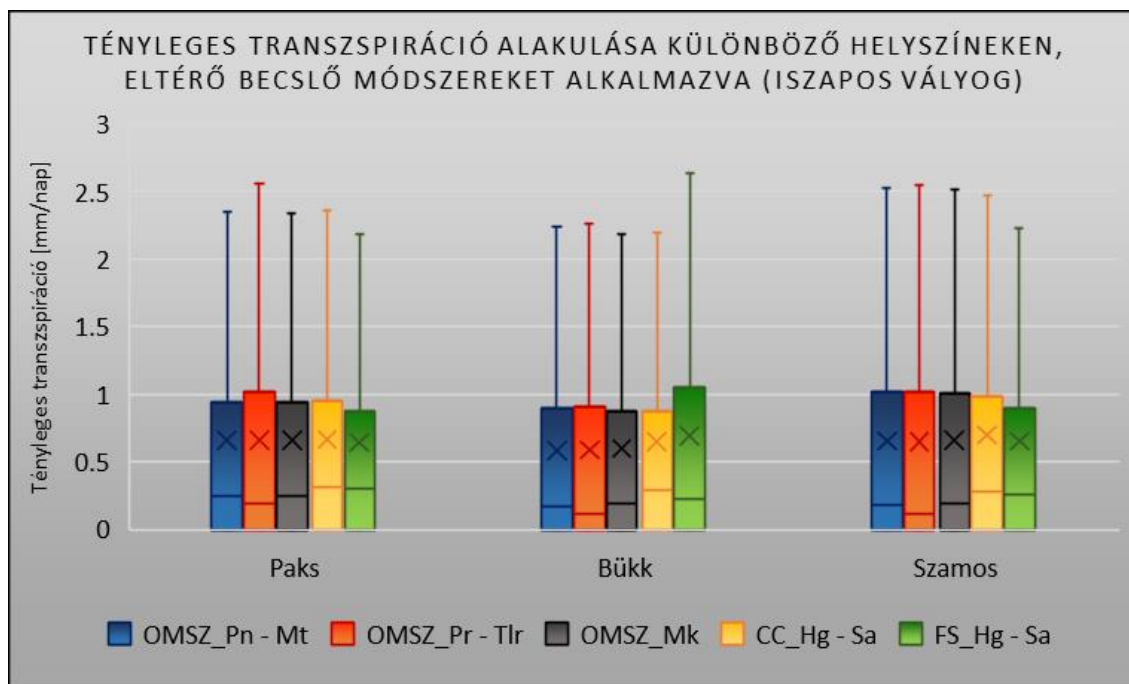


Ábra 44: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, vályogos homok talajra (forrás: saját)

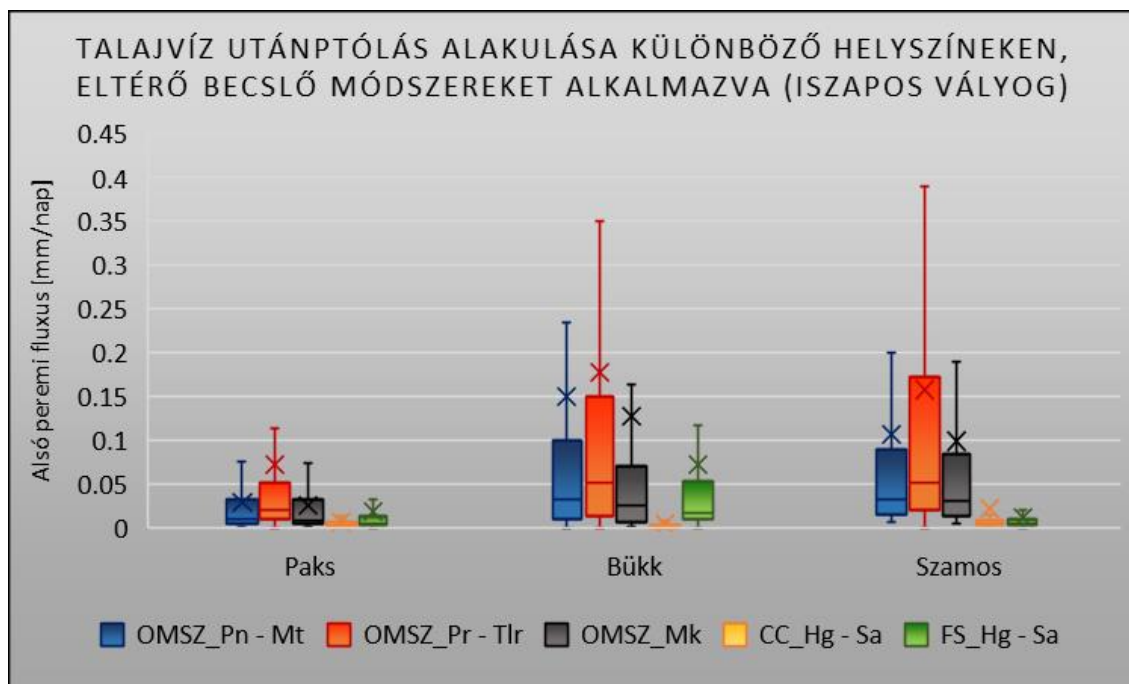
8.3.3 Iszapos vályog talajtípus esetén



Ábra 45: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)

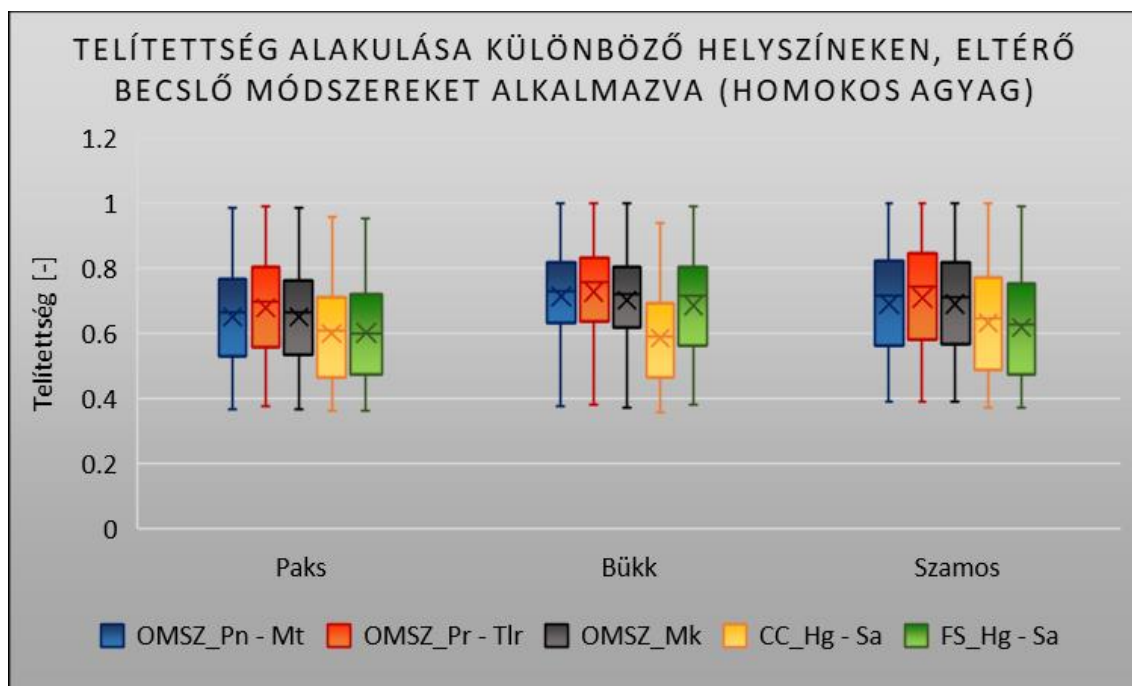


Ábra 46: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)

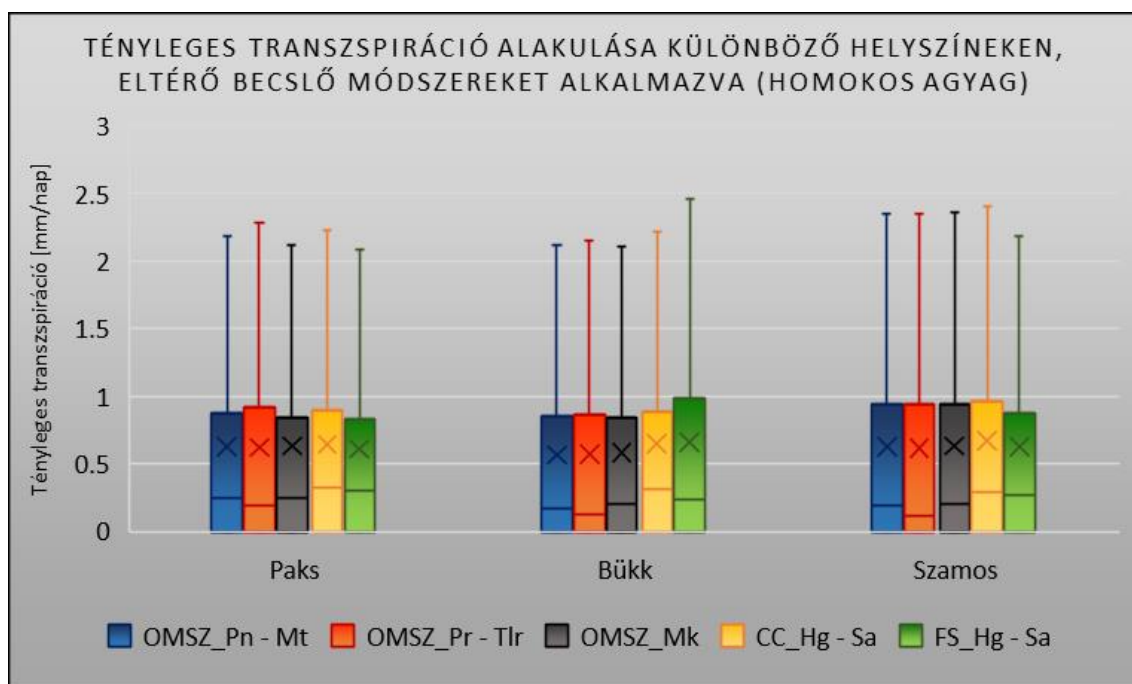


Ábra 47: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, iszapos vályog talajra (forrás: saját)

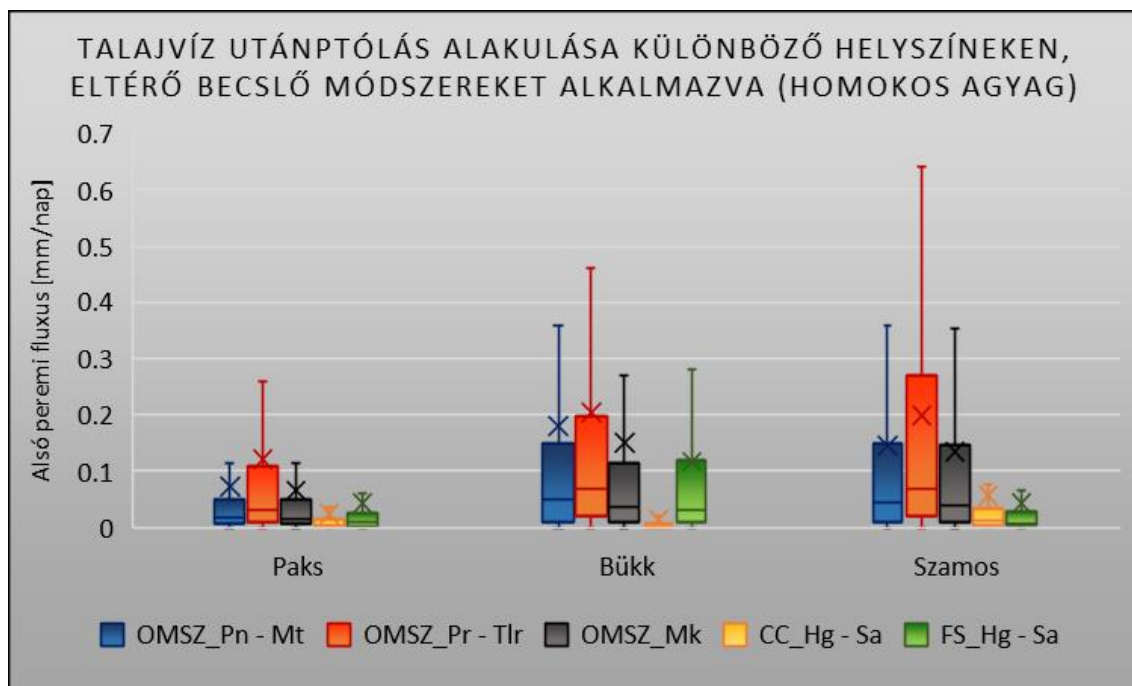
8.3.4 Homokos agyag talajtípus esetén



Ábra 48: Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)



Ábra 49: Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becslő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)



Ábra 50: Napi léptékű perkoláció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becselő módszereket alkalmazva, homokos agyag talajra (forrás: saját)