

PÁROLGÁSBECSLŐ MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA TALAJVÍZFORGALMI MODELLEZÉSEL

György Máté, felszíni vízkészlet-gazdálkodási referens
Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság

Ács Tamás, tudományos segédmunkatárs
Decsi Bence, doktorjelölt

Dr. Kozma Zsolt, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

KIVONAT

A talajszelvények vízgazdálkodási szempontú besorolása olyan hidrológiailag jelentős fizikai jellegzetességekről is adatot tartalmazna, amelyek ma kevesebb figyelmet kapnak, ugyanakkor képesek lehetnek elemzési módszereket és döntéseket megtámogatni. Ezek pontosítását akkor tudják a szimulációk hatékonyan elősegíteni, ha a peremfeltételek a valóságot jól közelítik. Dolgozatomban ezért a potenciális evapotranszspirációra (PET) végeztem érzékenységvizsgálatot. A PET érték becslésére négy különböző számítási formula (Penman-Monteith (Pn-Mt), Makkink (Mk), Priestley-Taylor (Pr-Tlr), Hargreaves-Samani (Hg-Sa)) eredményeivel futtattam talajszelvény szintű vízforgalmi modellszámításokat, öt különböző talajtípusra és három eltérő meteorológiai adottságokkal rendelkező helyszínre, két adatbázisból (FORESEE v.3.1, CARPATCLIM). A szimulációs eredményekből a telítettség, a tényleges transzspiráció és az alsó peremi kifolyás értékeket elemeztem. Referenciaként a Pn-Mt formula eredményeit alkalmaztam, amelyet a Hg-Sa értékei ~20 %-al felülbecsültek (5. ábra). A hidrológiai változók vizsgálata közül az alsó peremi fluxus választotta szét leglátványosabban az egyes PET becslő módszereket, eszerint a Priestley-Taylor alulbecsli a referencia PET értékeket (10-15. ábra). Az eltérő talajtextúrák és meteorológiai viszonyok nem módosították jelentősen a formulák alul- és felülbecslő 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. Elmondható továbbá, hogy a FORESEE adatbázisnál bizonytalanságok jelentkeztek. A referenciához képest legmegbízhatóbban a kisebb paraméterigényű Makkink formula alkalmazható, melynek 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 keretrendszer is ad a valós talajszelvények jövőbeli vizsgálatához. A végső cél egy új talajtani kategorizálás lehet a talajok hidrológiai szempontú besorolásával.

KULCSSZAVAK: potenciális evapotranszspiráció, numerikus módszerek, érzékenységvizsgálat, modellezés, statisztika, adatbázis, homogén talajszelvény, hidrológiai változók

BEVEZETÉS

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

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 változékony, és nagymértékben függ a légkör-növény-talaj rendszer helyi és pillanatnyi sajátosságaitól.

Munkám során 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. A talajszelvényeket homogénként kezeltem, szabad alsó kifolyással, ahol a vegetációt és a vizsgált talajszelvény vastagságát nem módosítottam. Ez a módszertan később kiterjeszhető a valós talajszelvényekre is, amiknek a hidrológiai szempontú besorolásával új talajkategorizálás hozható létre.

Számos külföldi kutatás számol be hasonló jellegű vizsgálatokról (*Amatya, et al., 1995; Jianbiao, et al., 2005; Fernandes, et al., 2012*) és 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. Megfigyeléseket lehet tenni továbbá arra is, hogy különböző talajok és helyszínek esetén mennyire érzékenyek a modellszámítások a PET-re.

A hatáselemzésnek számos projektben gyakorlati jelentősége lehet, mivel a hidrológiai modellek sikeressége jelentős részben a peremfeltételi idősorok megbízhatóságán múlik. Az egyes becslő formulákból adódó eltéréseket statisztikai összehasonlító módszerek segítségével mutatom be.

POTENCIÁLIS EVAPOTRANZSPIRÁCIÓ

A szimulációk bemeneti adataiban legtöbbször előnyben részesítik a **potenciális evapotranszspirációt (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 evapotranszspiráció az adott légköri viszonyok között maximális mértékűvé válik (*Thornthwaite, 1948; Jensen, et al., 1990*). Ez a meghatározás Thornthwaite (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 Élelmiségügyi és Mezőgazdasági Világszervezet (FAO) által szabványosított referencia evapotranszspiráció fogalma terjedt el (*Allen, 1996*).

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 helyi éghajlati viszonyokra fejlesztették ki őket (*Grismer, et al., 2002*). A világ különböző régióiban a párolgási viselkedés leírások az alkalmazhatóságuk tekintetében korlátozottak (*Fernandes, et al., 2012*).

Potenciális evapotranspirációt becslő módszerek áttekintése

➤ Penman – Monteith formula

A Penman-Monteith (Pn-Mt) (1) módszer alapvetően napi időskálán, rögzített feltételek mellett becsli a fűfelszín potenciális párolgását standard meteorológiai adatok alapján (*DeJonge & Thorp, 2017*):

$$PET = K_{cs}ET_{pm} \quad (1)$$

$$ET_{pm} = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(\frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

$$K_{cs} = 1 + (EORATIO - 1) \frac{LAI}{6} \quad (3)$$

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 [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], γ a pszichometriai állandó [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], 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 gázcseré 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 felszíni energiamérleg lényegében a felszínközeli sugárzási mérleget fejezi ki a szenzibilis-, látens- és talajhőáram segítségével:

$$R_n = H + \lambda \cdot E + G \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (4)$$

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 & Van Ulden, 1983; Holtslag & De Bruin, 1988*).

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

➤ Priestley – Taylor formula

A (5) 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:

$$ET_{pt} = \frac{\alpha \Delta (R_n - G)}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (5)$$

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

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 (6) sugárzásalapú empirikus megközelítést dolgozta ki, és a potenciális evapotranszpirációt milliméter/napban [$\text{mm} \cdot \text{nap}^{-1}$] becsülte meg a következő kifejezéssel:

$$PET = 0,61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_s}{58,5} - 0,12 \quad (6)$$

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

➤ Hargreaves – Samani formula

$$PET = 0,0023 \cdot R_a \cdot TD^{0.5} \cdot (T + 17,8) \quad (7)$$

ahol PET a napi potenciális evapotranszpiráció [mm/nap]; λ a látens párolgási hő [MJ/kg]; T a napi átlagos léghőmérséklet [$^\circ\text{C}$]; R_a a földönkívüli napsugárzás [$\text{MJ/m}^2/\text{nap}$]; és TD a napi különbség a maximális és minimális léghőmérséklet között [$^\circ\text{C}$] (Jianbiao, et al., 2005).

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 világszerte elfogadott referenciafelületnek számítanak (Burman & Pochop, 1994). Figyelembe véve a klimatológiai adatok szűkösségét a világ legtöbb részén, valamint a 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).

MÓDSZERTAN

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. 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 (Hofstra, et al., 2009; Bihari et al., 2013; Dobor, et al., 2015; Harris, et al., 2020; ECA&D, 2021).

Az adatbázisokból az **1990 jan. 01. – 1999. dec. 31.** időszakra vonatkozó minimum és maximum napi **hőmérséklet**, valamint **csapadék és sugárzás** adatok kerültek felhasználásra. Három becslő módszer esetében (Pn-Mt, Pr-Tlr, Mk) kész **PET idősorok** voltak elérhetőek az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) nyílt adatbázisában (OMSZ, 2021). Mivel ennek rácshálóját és az ahhoz tartozó alapadatait a CARPATCLIM-ével megegyeznek (ugyanaz az adatgazda), ezért a három módszer esetében a számítási lépések elvégzésétől eltekintettem és csak az OMSZ által számított PET adatokkal dolgoztam tovább. Az adatbázisok jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza:

Különbségek		
	FORESEE v3.1	CARPATCLIM
Rácsháló	$0,16^\circ \times 0,16^\circ$	$0,1^\circ \times 0,1^\circ$
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	-	[%]
PET (OMSZ)	-	[mm]

1. táblázat. Adatbázisok áttekintése és összehasonlítása

Projektek összeállítása talajvízforgalmi modellezéshez

A különböző PET-ek hatását tehát talajszelvény szintű vízforgalmi modelleredményekkel terveztem nyomon követni, ezzel feltárva a potenciális párolgás eltérő számítási képleteiből származó bizonytalanságot. 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. 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.

Vizsgált földrajzi helyszínek

Az egyes vizsgálati cellákhoz tartozó földrajzi jellemzőket, illetve éghajlati és meteorológiai viszonyainak különbségeit a 2. táblázat-ban összesített adatok mutatják be:

	Paks	Bükk	Szamos
Megye	Tolna	Heves	Szabolcs-Szatmár-Bereg
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 átlagos szélesség [m/s]:	1.6-1.7	2.5-3.0	-
Északi szélesség/lat	46.58°	48.08°	47.91°
Keleti hosszúság/long	18.92°	20.42°	22.58°

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

Vizsgált talajtípusok

Mivel elsősorban az egyes talajtípusok hatását szerettem volna látni és elemezni, ezért a projektekbe helyszínenként öt különböző, fiktív, homogén talajszelvényt építettem be. Az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériuma (USDA) egy széles körben használt rendszert dolgozott ki, amelyben a talajtextúráját az agyag, iszap és homok relatív frakciójaként kifejezett szemcseméret-összetételként határozzák meg (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 (lásd. lejjebb), vízforgalmi szempontból megbízhatóbb bemeneti adat, mint a szemeloszlás.

Ezt figyelembe véve a talaj jellemzésénél az USDA talaj textúra 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 (1. ábra) és vízvezetőképeségi (2. ábra) görbék) jellemeztem.

A görbék értelmezéséhez fontos tudnunk, hogy a telítetlen talajszelvényekben a víz áramlását a (8) 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):

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (8)$$

ahol $\vartheta(\psi)$ [-] a térfogatos víztartalom, $k(\vartheta)$ [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 , $\vartheta(\psi)$, $k(\vartheta)$) szükséges a vízáramlás leírásához, mégis csak egy dinamikai egyenlet 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).

Víztartóképeségi (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 (1. ábra; ahol $pF = \log(-\psi)$). Gyakorlatilag a VTK görbe meghatározható a mért ϑ vs. ψ adatpárok halmazával. A ψ [m] **nyomásmagasság** egyenlő a folyadék nyomásával a p [kg·m⁻²] ponton, osztva a γ [kg·m⁻³] tömegsűrűségével (Dingman, 2015):

$$\psi = z + \frac{p}{\gamma} \quad (9)$$

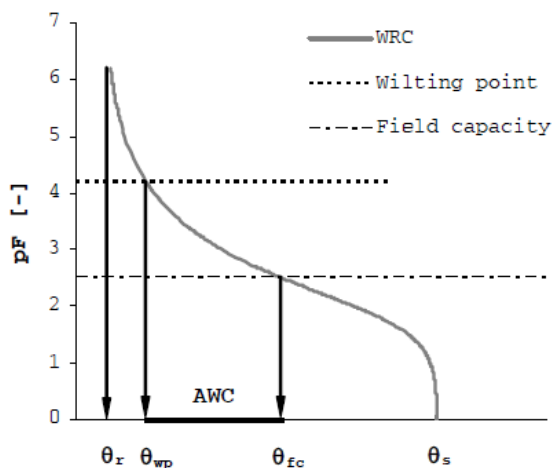
ahol z a viszonyítási sík feletti pont magassága [m].

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

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} \quad (10)$$

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 1. ábra a víztartóképeségi görbe fizikailag értelmezhető tartalmát szemlélteti egy tetszőleges, közepes textúrájú agyagos talajra (Kozma, et al., 2014):



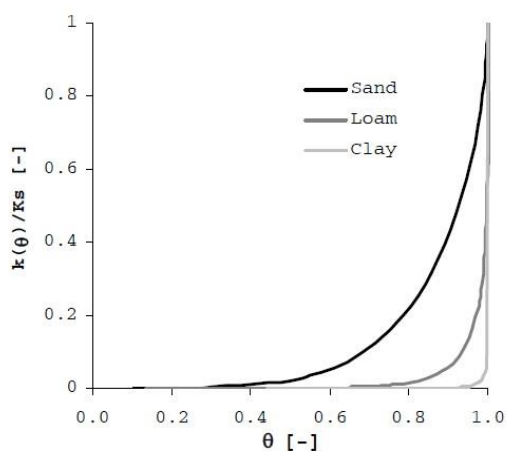
1. ábra. Víztartóképeségi görbe fizikai tartalma **vályogra**, forrás: (Kozma, et al., 2014)

- reziduális víztartalom: $\vartheta_r = \vartheta(pF=6,2)$;
- hervadáspon: $\vartheta_{wp} = \vartheta(pF=4,2)$;
- szabadföldi vízkapacitás: $\vartheta_{fc} = \vartheta(pF=2,5)$;
- telítési víztartalom: $\vartheta_s = \vartheta(pF=0)$
- hasznosítható víztartalom: $AWC = \vartheta_{fc} - \vartheta_{wp}$

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 (11) van Genuchten-féle függvény (van Genuchten, 1980):

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad (11)$$

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



2. ábra. 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 (2. ábra). 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 (12) talajhidraulikai modell 5 állítható paraméterrel rendelkezik, ami viszonylag nagy rugalmasságot és jó illeszkedést biztosít a modellnek a mért adatokhoz (Kozma, et al., 2014).

$$k(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (12)$$

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 3.táblázatban tüntettem fel:

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

3. táblázat. A projektekben felhasznált talajtextúra o.-ok 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.

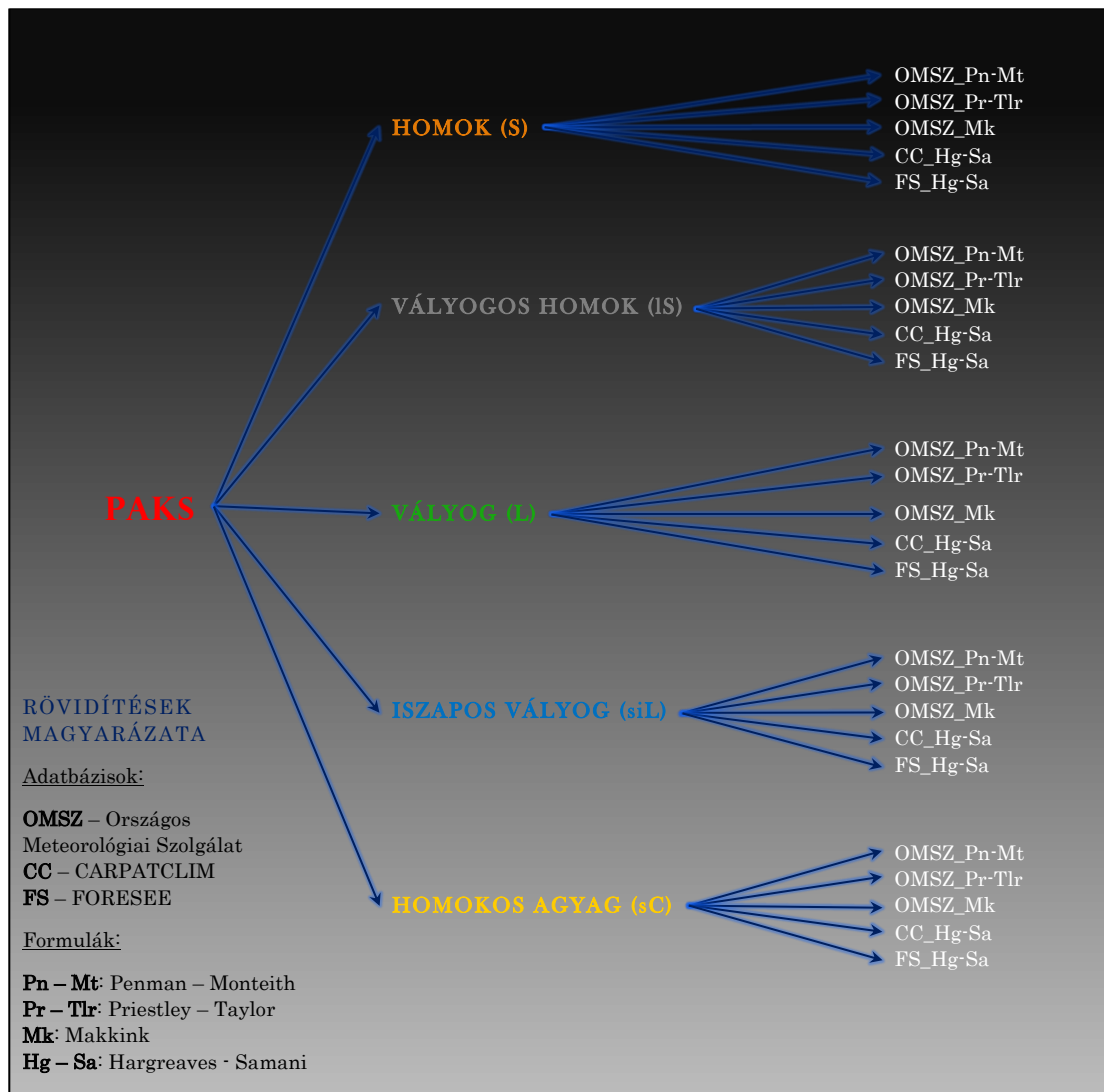
PET becslő módszerek alkalmazása

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-Samani 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-Samani összefüggés mellett az, hogy az alkalmazásához mindkét elérhető adatbázisban elegendő adat állt rendelkezésre, így az eltérő térbeliségű alapadatok számításokra gyakorolt hatását is tesztelhettem.

A modellfuttatásokat a BME-VKKT tanszék által fejlesztett keretprogram (Decsi, et al., 2020), támogatta meg, ami a projektváltozatokat képes együtt kezelni és szükség esetén korrigálni.

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



3. ábra. Projektváltozatok felépítése – ágrajz (forrás: saját)

Talajvízforgalmi modell

A vízmérleg alapú számítógépes modelleket széles körben használják a tudományos vizsgálatok eszközeként (Montanari, et al., 2009). A PET érzékenységvizsgálatához megfelelő segítséget nyújtott a HYDRUS-1D v. 4.17 szoftver, amely alkalmas a telítetlen talajprofilokban a víz függőleges mozgásának modellezésére (Šimůnek, et al., 2009). A modellszámítások 10 éves időszakot fedtek le. Az időszak megválasztásának háttérében leginkább számításigénnyel kapcsolatos megfontolások állnak. A hosszabb idősor nem feltétlenül vezetett volna pontosabb érzékenységvizsgálati eredményekhez.

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 index¹ idősora egy jellegzetes éves eloszlást követ, amit bemeneti idősortként alkalmaztam. A vegetáció leírását szolgálja továbbá az extinkciós tényező², melynek értékét szakirodalom alapján a keretprogram 0,3-nak vette fel, továbbá a maximális intercepció³, melynek értékét 0,1 [mm]-re. Mindkét jellemző növényfüggő, de egyik paraméterre sem érzékenyebb különösen a modell. A meteorológiai paraméterek idősorai mint időfüggő peremfeltételek lettek megadva a projektösszeállítás során. 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 lépésként
- 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.

EREDMÉNYEK, KIÉRTÉKELÉS

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 kvantilisétől 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 "csóvát" olyan vonalak mutatják, amelyek a dobozból felfelé a 0,90-es kvantilisig, illetve lefelé a 0,10-es kvantilisig húzódnak (10. ábra). A boxplotok jobbák a hisztogramoknál egy mintaeloszlás jellemzésére, különösen a különböző minták gyors vizuális összehasonlítására (Dingman, 2015).

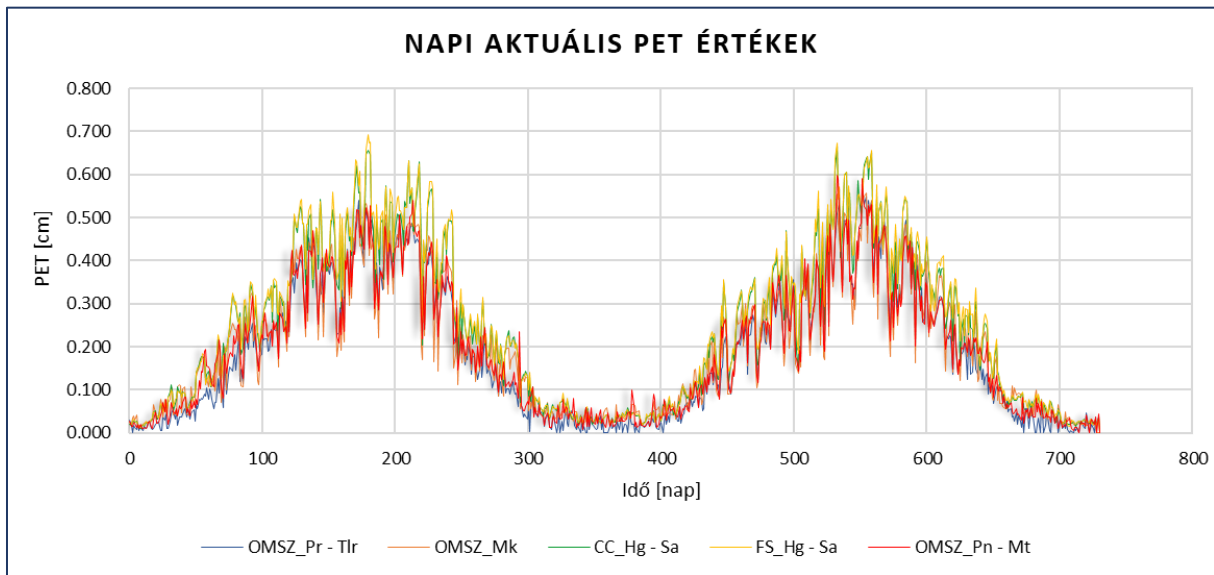
¹ Növényállomány (sugárzást felfogó terület) jellemzése: levélfelület nagysága talajfelszínhez viszonyítva

² Fényextinkcióval (fényességcsökkenés anyagon áthaladva) arányosan veszi figyelembe, hogy a PET-et milyen arányba bontsa szét PE-re és PT-re (potenciális evaporációra és potenciális transzspirációra)

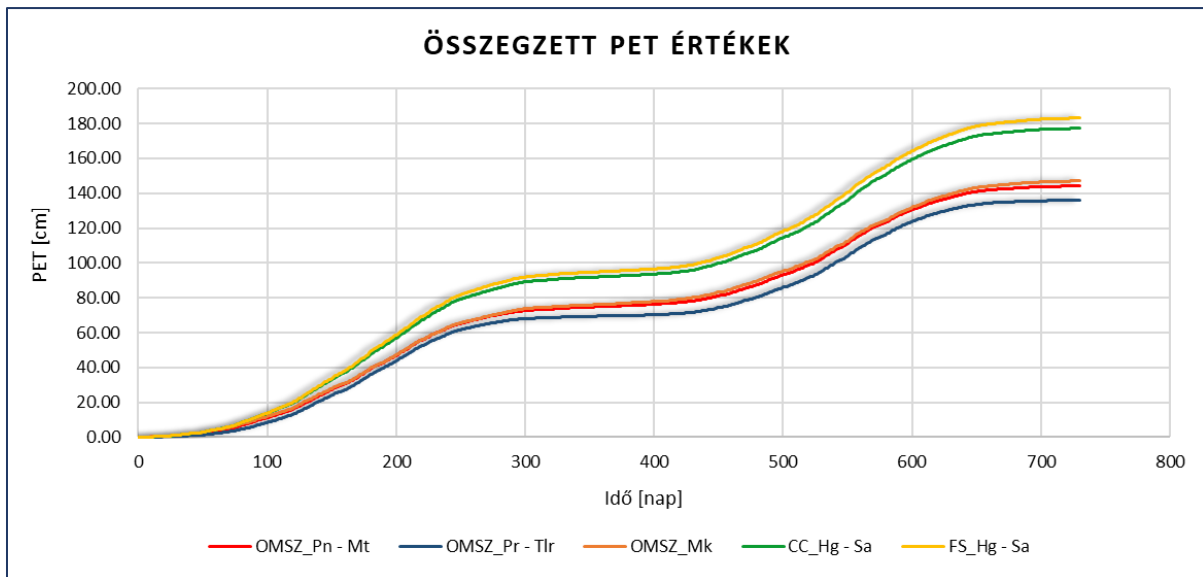
³ levélfelületen maximálisan mennyi víz tud pillanatnyilag visszamaradni. A felfogott víz elpárolgó része az intercepció veszteség

Referenciának a Penman-Monteith eredményeket tekintetem. 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 látható:



4. ábra. Napi aktuális PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén (forrás: saját)

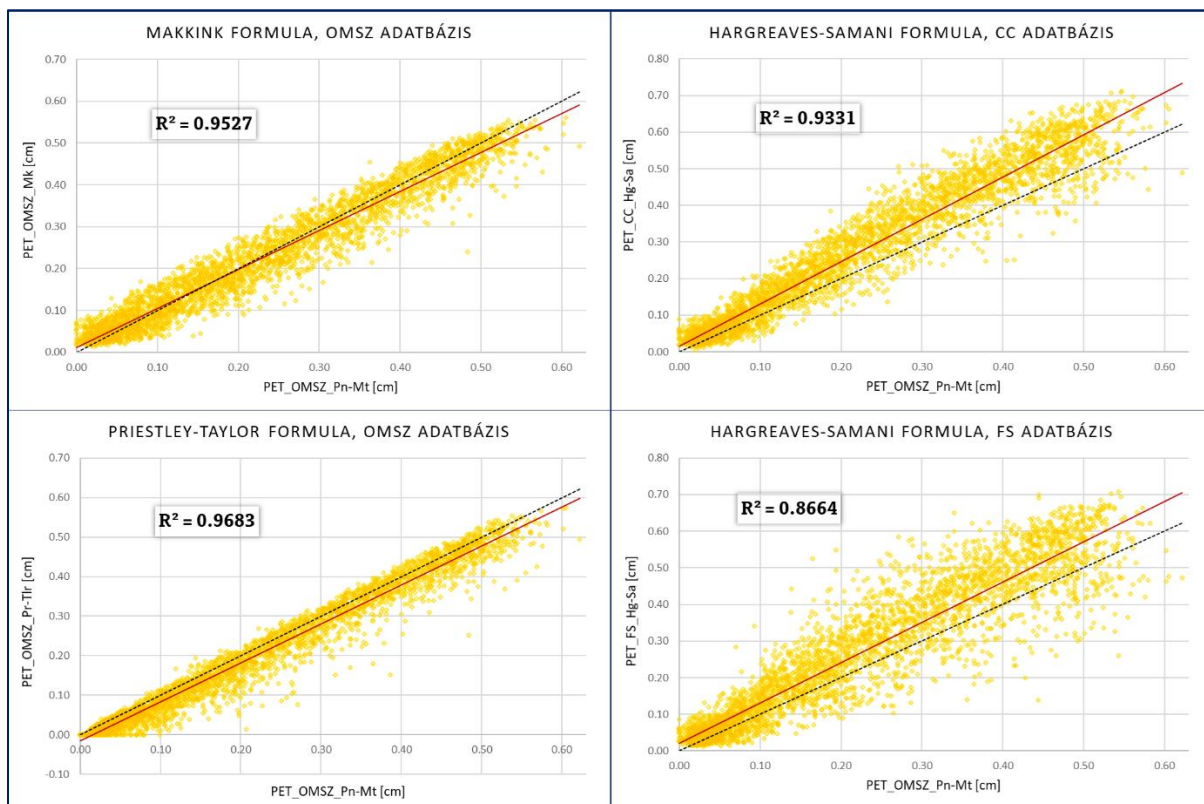


5. ábra. Összegzett PET értékek időbeli alakulása a különböző PET becslő módszerek esetén (forrás: saját)

Mindkét grafikon ugyanazt a két évet ábrázolja, az egyes formulák esetén. A 4. ábra az aktuális napi értékeket, amíg az 5. ábra ezek összegzett értékeit jeleníti meg. Utóbbinál az idősorok értékei közti eltérések szemléletesebben kirajzolódnak. A két ábra alapján a különböző becslő módszerekről elmondható, hogy:

- A 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 6. ábrán látható R^2 számított értéke az előbbinél $\sim 0,95$ -re, az utóbbinál $\sim 0,97$ -re adódott.



6. ábra. 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 (4. táblázat). 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

4. táblázat. 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.

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.

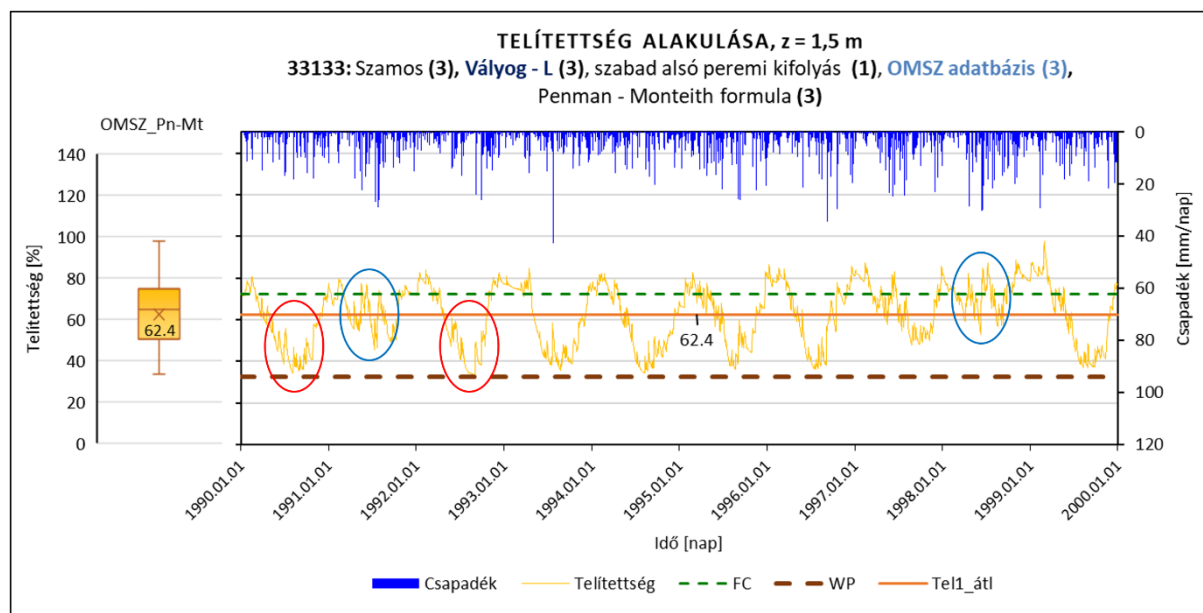
A bemeneti adatokra való érzékenységet a rendszer három eltérő hidrológiai válaszában keresztül vizsgáltam, ezért a modelleredményekből mindhárom helyszín esetén a **gyökérszóna átlagos telítettség**, a **tényleges transzspiráció** és az **alsó peremi fluxus** (talajvíz utánpótlás) idősorokat használtam fel (7-9. ábra). A következő alfejezetek:

- általánosan jellemzik a három hidrológiai változót
- egy-egy kiragadott verzión 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.

Telítettség

A telítettséget vizsgálataim során úgy értelmeztem, mint a gyökérszónára kiterjedő térbeli tartomány pillanatnyi víztartalmának és a telítési víztartalmának a viszonyszáma. Azt adja meg, hogy pillanatnyilag a pórustér hány százaléka van vízzel telítve a gyökérszónában 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 és a csapadékhatások (7. ábra):



7. ábra. Csapadékhatások szemléltetése a telítettség idősoron (forrás: saját)

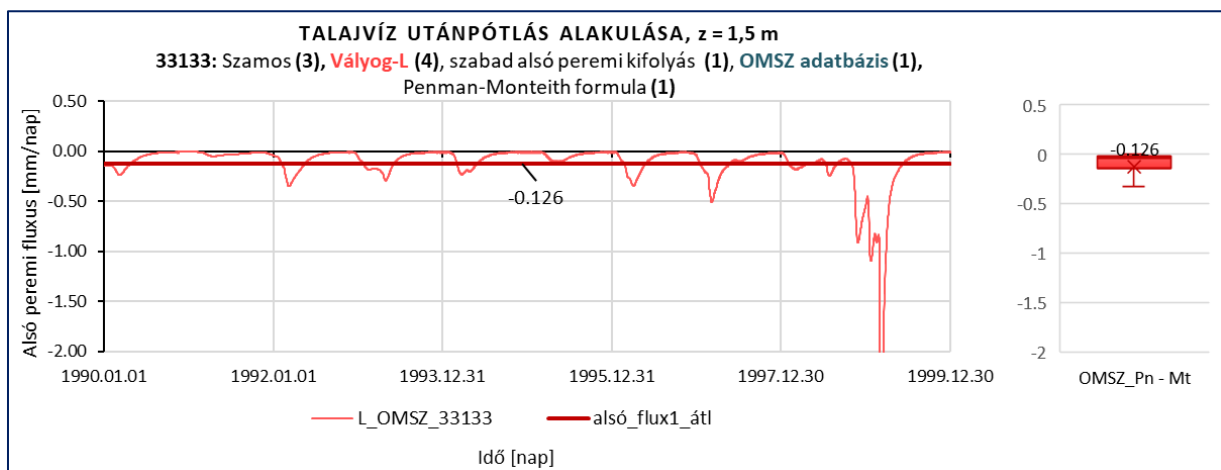
Látszik az évről-évre jól elkülönülő téli és nyári hidrológiai félév, a talaj nedvességtartalmának tartósabb feltöltődése (téli) és leürülése (nyári). A nyári időszakban jól kivehető a nagy nyári csapadékok, nagy intenzitású záporok hatása, ami ugyanakkor többnyire csak néhány napig-hétig képes mérsékelni 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 hervadásponot (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.

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 nyomkövetésének érdekében, a 10. évnél jelentkező kiugró érték megjelenítésétől eltekintettem mindkét ábrázolási módnál (8.ábra).



8. ábra. 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.

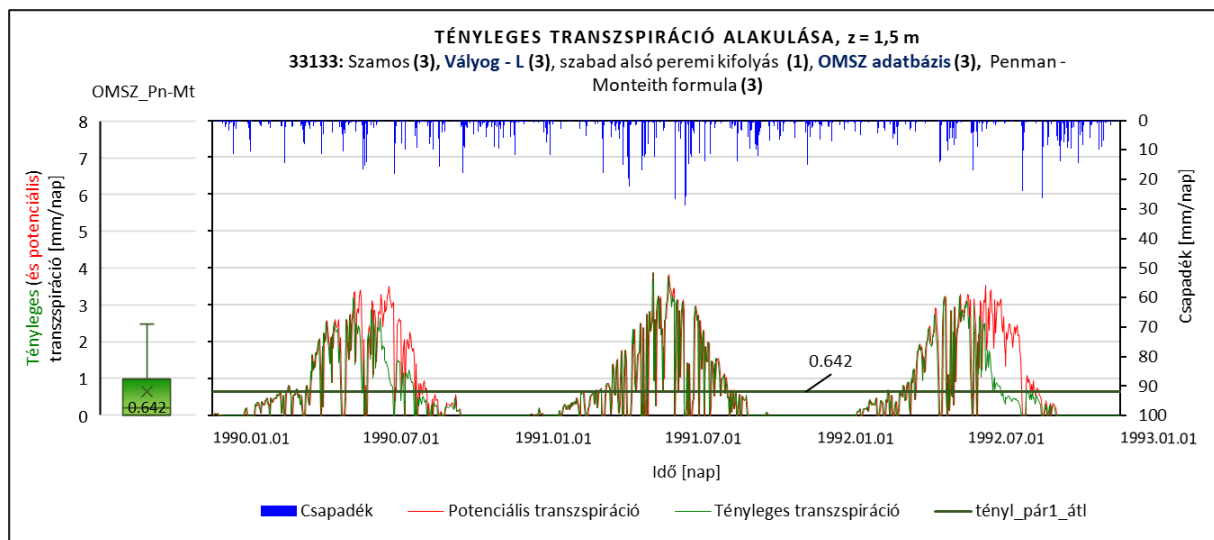
Ha ezt a telítettség idősorral egymás mellé helyezzük, akkor megfigyelhető, hogy ennél a 150 cm-s homogén talajnál sem okoz minden nagyobb csapadék mélybe szivárgást. Előfordulhat, hogy akár teljes évek maradnak ki a talajvíz utánpótlásból. Az is jól kivehető, hogy akkor jelentkezik mélybeszivárgási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

Tényleges transzspiráció

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

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

A szimulációs eredmények a potenciális transzspiráció értékeket is tartalmazták, ezért célszerűnek láttam ezeket is feltüntetni a tényleges párolgás időszora mellett. A kettő közti különbséget szemléletesebbé tette, ha csak 3 évet ábrázoltam (9.ábra).



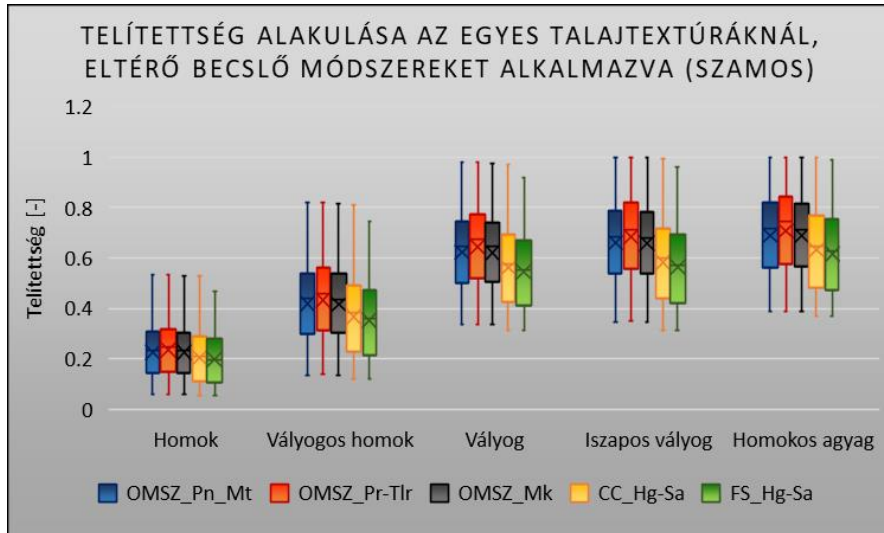
9. ábra. Tényleges és potenciális transzsp. különbsége, csapadékidőszak mellett (forrás: saját) Ilyenkor jól látszik, hogy fogy el a víz a gyökérszínéről a nyár végére és hogy tud ezen mérsékelten, ideiglenesen segíteni egy-két nagyobb eső. A tényleges párolgás értéke hazai viszonyok között szükségszerűen kisebb-egyenlő, mint a potenciálisé, hisz azt a vízmennyiséget fejezi ki, ami a tényleges rendelkezésre álló vízmennyiség és növényfejltség mellett a növény felületéről elpárolog.

Statisztikai összehasonlító vizsgálatok a hidrológiai változók segítségével

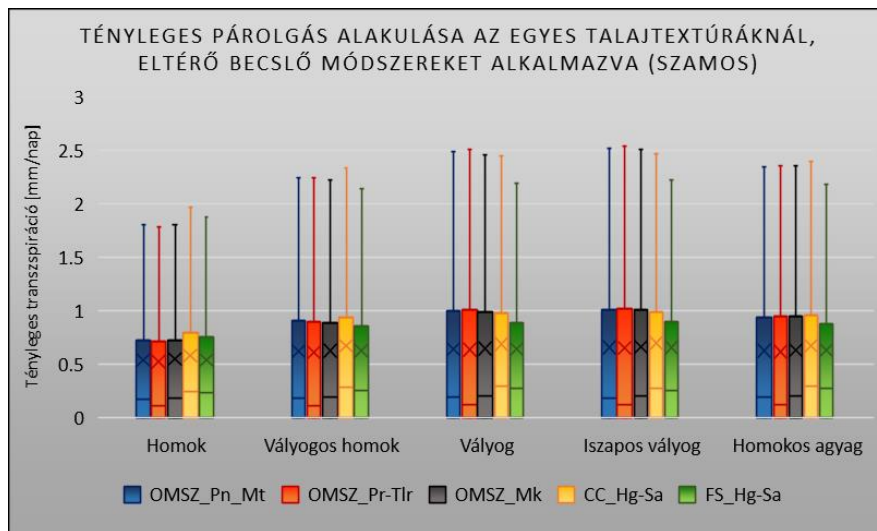
A PET hatásának tágabb értelmezését a különböző talajtextúrák és eltérő éghajlati viszonyok segítették elő. Bár előbbi inkább a hidrológiai változókat, utóbbi pedig a PET becslést befolyásolja közvetlenül, de mindkét esetben ugyanazokra a kérdésekre kerestem a választ: okozhat-e az eltérő talaj/éghajlat 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.

Becslő módszerek és talajok statisztikai összevetése

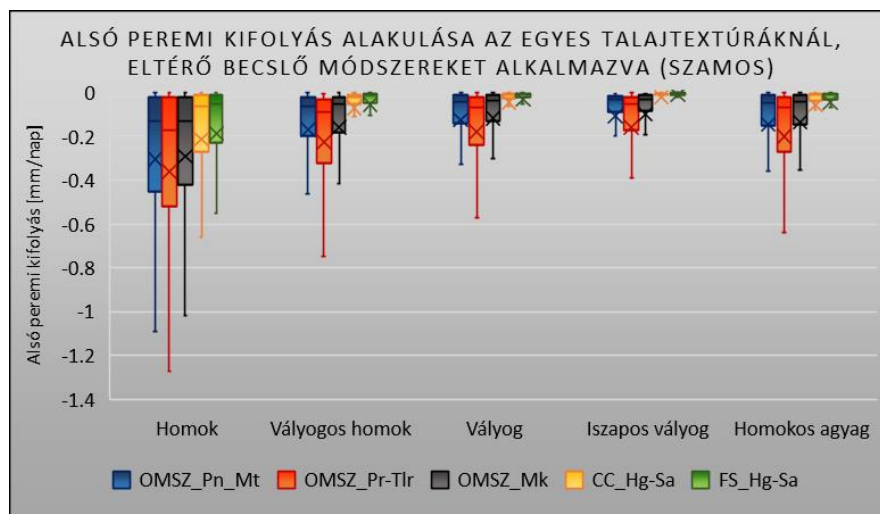
A talaj szerepének vizsgálatát ebben a fejezetben is a referenciaként szolgáló, mérsékelt Szamos helyszínen mutatom be, mindhárom hidrológiai változó esetében. A HYDRUS modellszámítások időszoros eredményeinek statisztikai értelmezését segítik a következő box plot ábrázolások (10-12.ábra):



10. ábra. Telítettség alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



11. ábra. Napi léptékű tényleges párolgás alakulása az egyes talajtextúráknál, eltérő becslő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



12. ábra. 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 10-12. ábrákon feltüntetett hidrológiai válaszok vizsgálata 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 szembetűnő, 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.
- A FS_Hg-Sa-nál a tényleges párolgás nem megfelelően alakul. Már a két Hargreaves-becslés 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. Magyarán szólhat tehát, hogy az adatbázis a téli időszakra felülbecsül, ami miatt kisebb a mélybeszivárgás 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 becslő módszereket.

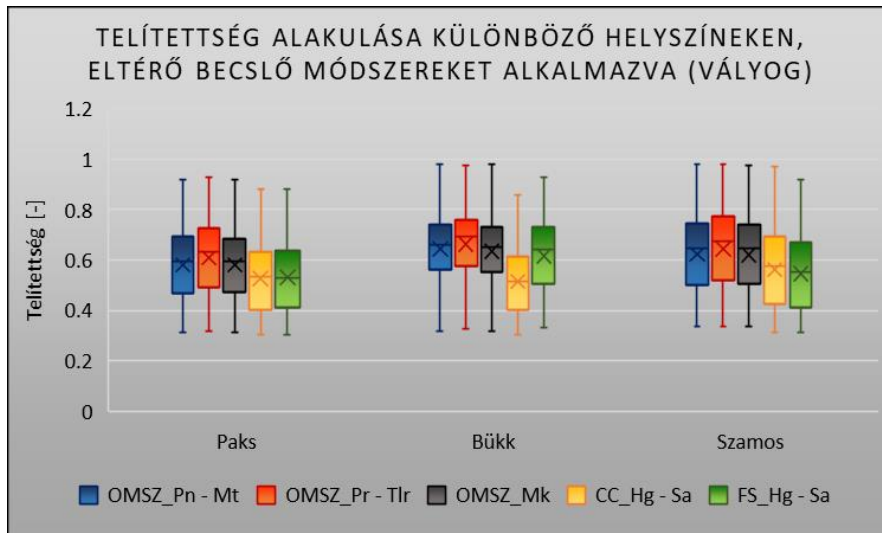
Néhány megállapítás, amely kifejezetten a különböző talajtípusok szimulációs eredményeiből szűrhető le:

- 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.

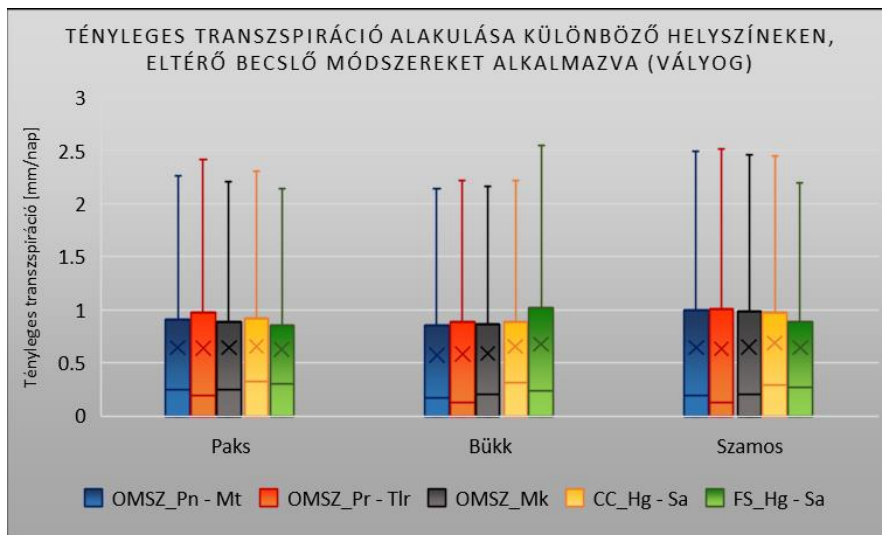
PET becslő módszerek mutathatnak változást a viselkedésükben talajtípustól függően, viszont az alkalmazható módszerek közötti választást ez aligha befolyásolja, inkább a vizsgálni kívánt hidrológiai változó lesz mérvadó.

Becslő módszerek és helyszínek statisztikai összevetése

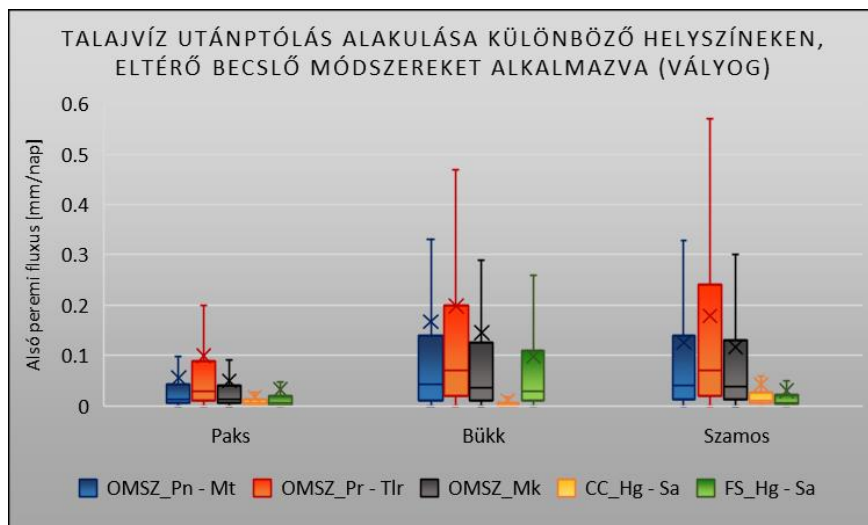
Az előzőekben bemutatott érzékenységvizsgálat hasonló formáját választottam, amikor az eltérő meteorológiai jellemzőkkel rendelkező helyszínek hatásait vizsgáltam hidrológiai válaszok szintjén. Minden bemutatott eset a referencia vályog talajtípusra vonatkozik. A vizsgálathoz tartozó kimutatásokat a 13-15. ábrák mutatják be:



13. ábra. Telítettség alakulása különböző helyszíneken, eltérő becselő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



14. ábra. Napi léptékű tényleges transzspiráció alakulása különböző helyszíneken, eltérő becselő módszereket alkalmazva (forrás: saját)



15. ábra. Napi léptékű talajvíz utánpótlás alakulása különböző helyszíneken, eltérő becselő 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 változékonyabb terepviszonyoknál is torzításokhoz vezethet. Meg kell viszont jegyezni, hogy a módszer a Bükkben a CC esetén sem stabil.

ÖSSZEFOGLALÁS

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 becslő módszert alkalmazzunk, amely a vízmérleg potenciális evapotranszspiráció komponensére a valóságot legjobban közelítő eredményeket adja. Az egyes PET becslő 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 becslő módszerek becsülnek alá és melyek túl; mennyire megbízhatóak az elérhető nyílt adatbázisok; okozhat-e az eltérő talaj/ég-hajlat eltérő tendenciát a becslő módszerekből adódó különbségek között?

Ezek 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 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.
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.

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 múltira. 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 múltira, 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.

Úgy gondolom, hogy munkánk 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.

IRODALOMJEGYZÉK

- 1) Allen, R. G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, p. 10.
- 2) 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.
- 3) Anon., 2015. <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>. [Online] Available at: <http://www.hermanszeg.hu/magunkrol.html>
- 4) Bihari et al., Z., 2013. *Annex 3 – Description of MASH and MISH algorithms*
- 5) Burman, R. & Pochop, L., 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. *Amsterdam, Elsevier*.
- 6) CARPATCLIM, 2021. *Climate of the Carpathian Region - About*. [Online] Available at: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/about/>
- 7) 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.
- 8) Csorba, P., 2021. *Magyarország kistájai*. második szerk. Debrecen: Táj- és Környezetföldrajzi Alapítvány.
- 9) 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.

- 10) DeJonge, K. & Thorp, K., 2017. Implementing standardized reference evapotranspiration and dual crop coefficient approach in the DSSAT cropping system model. p. 10.
- 11) Dingman, S. L., 2015. *Physical Hydrology - Third Edition*. third szerk. USA: Waveland Press
- 12) Dobor, L. és mtsai., 2015. Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE Database. *Geoscience data Journal*, p. 11.
- 13) ECA&D, 2021. *European Climate Assessment&Dataset*. [Online] Available at: <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>
- 14) 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.
- 15) FORESEE, 2021. *Open Database FOR Climate Change-Related Impact Studies in Central Europe*. [Online] Available at: <http://nimbus.elte.hu/FORESEE/index.html>
- 16) Grismer, M., Orang, M., Snyder, R. & Matyac, R., 2002. Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, p. 15.
- 17) Hargreaves, G. & Samani, Z. A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Ambient Air Temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, Issue No. 85-2517, p. 13.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) Jamieson, P., 1982. Comparing of methods of estimating maximum evaporation from a barley crop. *N. Z. J. Sci.*, p. 25:175-181.
- 23) 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.
- 24) 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..
- 25) 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.
- 26) Kozma, Z., Ács, T. & Koncsos, L., 2014. *Unsaturated zone modelling: the role of soil database classification*. p. 13.
- 27) Kreye, P., Gelleszun, M., Somasundaram, M. & Meon, G., 2019. Classification of Hydrological Relevant Parameters by Soil Hydraulic Behaviour. *Geosciences*, 5(9), p. 13.
- 28) 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.
- 29) Makkink, G., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Ins. Wat. Engrs.*, 11. kötet, pp. 277-288.
- 30) 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*.
- 31) MVM Paks II. Zrt, 2012. *Paks és 30 km sugarú környezetének éghajlati jellemzése, hely nélkül.: ismeretlen szerző*
- 32) OMSZ, 2021. *Országos Meteorológiai Szolgálat*. [Online] Available at: <https://odp.met.hu/>
- 33) Pereira, A. & Nova, N., 1992. Analysis of the Priestley-Taylor parameter. *Agric. For. Meteorol.*, pp. 61:1-9.

- 34) 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.
- 35) Richards, L., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Journal of Applied Physics*, 1. kötet, pp. 318-333.
- 36) Schmotzer, A., 2017. *A Szilvásvárad Aszaló és Szilvás-patak mente (HUBN20067) kiemelt jelentőségű különleges természetmegőrzési terület Natura 2000 fenntartási terve*, Eger: Natura 2000.
- 37) 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
- 38) Szász, G., 1995. Főbb termesztett növények természetes vízhasznosulása Magyarországon. *OMSZ Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok*, 3. kötet.
- 39) Thornthwaite, C., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, pp. 38:55-94.
- 40) 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.
- 41) Vermes, L. és mtsai., 2001. *Vízgazdálkodás mezőgazdasági, kertész-, tájépítész- és erdőmérnök-hallgatók részére*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó.
- 42) 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.
- 43) 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.