

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET

**POTENCIÁLIS EVAPOTRANSZPIRÁCIÓS MODELLEK
ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA MAGYARORSZÁGON**



Témavezetők: Dr. CZIGÁNY SZABOLCS
egyetemi docens

Dr. SARKADI NOÉMI
egyetemi adjunktus

Készítette: IMRE MARCELL
osztatlan tanárszakos
hallgató

PÉCS, 2024

Mirának és Martinnak

Tartalomjegyzék

Absztrakt	4
1. Bevezetés.....	5
1.1. Magyarország éghajlati és környezeti adottságai.....	5
1.2. A párolgás és az evapotranszspiráció mértékének leírására szolgáló fogalmak	5
1.3. A dolgozat célkitűzései	7
2. Eszközök és módszerek.....	7
2.1. A vizsgálati terület	7
2.2. A dolgozatban felhasznált meteorológiai és kádpárolgási adatsorok forrása.....	8
2.3. A modellek rangsorolása	10
3. Eredmények.....	11
3.1. A modellek összehasonlítása.....	11
3.2. Országos összesített rangsor.....	18
4. Diskusszió.....	20
5. Következtetések	22
Köszönetnyilvánítás	25
Irodalomjegyzék.....	26
Ábrajegyzék	29

Absztrakt

A hidrometeorológia egyik legnagyobb kihívást jelentő problémája a potenciális evapotranszpiráció (PET) számszerűsítése. Ugyanakkor a PET-értékek és trendek megértése rendkívül fontos információkat hordozhat egy terület aszályérzékenységről. A 2010 és 2022 közötti meteorológiai adatokat felhasználva 19 PET-modell teljesítményét elemeztem Magyarországra vonatkozóan, majd azonosítottam és rangsoroltam a legalkalmasabbakat. A PET-értékeket 16 meteorológiai állomás tekintetében számoltam ki különböző modellek segítségével, majd hat különböző statisztikai mutató alapján rangsoroltam őket. Összehasonlítási alapként a legközelebbi kádpárolgásmérő állomás adatait és a HungaroMet által kiszámított FAO Penman-Monteith (FAO-PM) értékeket használtam. A modellek teljesítményét 1-120 pont közötti skálán értékeltem. Eredményeink azt mutatták, hogy a hőmérséklet-alapú Oudin-modell teljesítménye volt a legjobb, de általánosságban a sugárzás-alapú modellek mutatkoztak a legmegbízhatóbbnak. Az adatok területi eloszlása azt mutatja, hogy a PET-modellek teljesítménye az ország keleti és nyugati szélein némileg gyengébb, mint a középső területeken. Az eredmények rávilágítottak, hogy adathiányos esetekben a megbízható és széles körben elterjedt, de rendkívül magas bemeneti adatigényű FAO-PM modell jelentősebb pontosságvesztés nélkül helyettesíthető alacsonyabb bemeneti adatigényű modellekkel. Az eredmények elsősorban a Magyarországhoz hasonló szubhumid kontinentális éghajlaton alkalmazhatók.

1. Bevezetés

1.1. Magyarország éghajlati és környezeti adottságai

A kontinentális éghajlat kimondottan hajlamos arra, hogy időjárási szélsőségeket produkáljon. Ezeket az extrémításokat a globális éghajlatváltozás hatásai tovább fokozhatják. Mindazonáltal, mint minden éghajlat, Magyarország éghajlata is folyamatos változásban van. Erre országunkban a tavaszi és őszi átmeneti évszakok rövidülése is rámutat (Loksa, 2014).

Az éghajlatváltozás nem kívánt hatásait, különösen a kontinentális és félszáraz éghajlaton tovább súlyosbítja a hőmérséklet emelkedése miatt növekvő párolgás. A maximális párolgás időtartamát jelentősen növelte a telek hosszának csökkenése és a nyári napok számának növekedése. Az északi féltekén a telek 1976 és 2012 között átlagosan 20 nappal rövidültek, míg a nyarak 13 nappal hosszabbodtak (Kutta & Hubbard, 2016).

A kontinentális éghajlat a mezőgazdasági szektor elé is számos kihívást állít, hiszen felváltva állhatnak elő vízhiányos időszakok, illetve víztöbblettel járó belvizek, árvizek és villámárvizek. Magyarországon ezen két abiotikus időjárási veszélyforrás előfordulása a leggyakoribb (Szabó et al. 2007, 2015). E szélsőségek érzékeltetésére érdemes megvizsgálni az 1901 és 2014 közötti időszakban az országos éves csapadékösszegeket. Míg a 2010-es év 959 mm csapadékkal a legcsapadékosabb év volt, addig a rákövetkező 2011-es esztendő 407,4 mm-rel a legszárazabbnak bizonyult (Gácsér, 2014).

A 2022. évi UNCCD jelentésben megjelent adatok alapján 2006 és 2021 között tíz olyan év is volt, amikor Magyarország területének legkevesebb 30 %-át aszály sújtotta. A súlyos aszályal sújtott területek részaránya 2000., 2003., 2011. és 2022. években volt a legmagasabb (UNCCD, 2022). Az éves párolgásösszeg és az aszályok növekvő tendenciáját már több szerző is feltárta (pl.: Blanka et al. 2013; Mezősi et al. 2016; Szabó et al. 2019).

1.2. A párolgás és az evapotranszpiráció mértékének leírására szolgáló fogalmak

A párolgás és az evapotranszpiráció (ET) a hidrológiai ciklus rendkívül fontos elemei, és számszerűsítésük kiemelten fontos a vízmérlegszámítások (pl. mezőgazdasági és környezettudományi vizsgálatokban), valamint a hidrológiai modellek, lefolyási modellek és a talajnedvesség becslésére használt numerikus modellek (pl.: HYDRUS) számára. Az ET pontos kiszámításának nehézsége abból adódik, hogy az ET egy olyan összetett fizikai folyamat, amely a légkör és számos egyéb változó, például a talaj, a rendelkezésre álló víztartalék, a felszínhasználat, páradeficit közötti állandóan változó kölcsönhatás eredménye. A referencia evapotranszpiráció (ET_0) nagyon fontos konzisztens referenciaérték a hidrológiai, mezőgazdasági és környezetvédelmi vizsgálatokban. Értéke egy hipotetikus, adott felületi

ellenállású és albedójú, a talajt teljesen árnyékoló, bőséges vízellátású zöld fűfelület párolgását és párologtatását adja meg. Becslésére a legszélesebb körben elterjedt és elfogadott módszer az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezete (FAO) által egyszerűsített Penman-Monteith-egyenlet (FAO-PM), melynek segítségével az ET_0 igen pontosan becsülhető különböző éghajlati körülmények között. A FAO-PM egyenlet rendkívül magas adatigénye miatt azonban igény van további modellek vizsgálatára, melyek adathiányos esetekben alternatív megoldást jelenthetnek. Fontos megjegyezni, hogy a párolgást elsősorban nyílt vízfelületeken értelmezik. A pontosabb becsléshez a fizikai és fiziológiai folyamatokat egységes rendszerként kell vizsgálni. A talajból történő párolgást, amely függ többek között a víztározástól, a talajtextúrától, a felszínhasználattól, a határfelületi légréteg meteorológiai tulajdonságaitól és a hőháztartástól, ki kell egészíteni a növények és más élőlények transzspirációjával. Breuer és Ács (2010) kimutatták, hogy az ET sebességét jelentősen befolyásolja a növényfelületek ellenállása, azaz a talaj felett elhelyezkedő növényzet páravisszatartó képessége. Kutatásukban rávilágítottak, hogy Magyarországon a nyári hónapokban a legmagasabb a növények felületi ellenállása, és ugyanebben az időszakban a legnagyobb az ellenállás változékonysága is.

El kell különíteni a valódi evapotranszspiráció (AET) fogalmát is, amely a ténylegesen realizálódott párolgást és párologtatást jelzi abban az esetben, ha a rendelkezésre álló vízutánpótlás véges. Az AET értékének pontos meghatározása méréssel és becsléssel is szinte lehetetlen (Antal, 1968; Bouchet, 1963; Glenn, 2011).

Mínthogy a valódi párolgás pontos számszerűsítése az említett okok miatt igen problémás feladat, szükségessé vált egy új megközelítés bevezetése. Az AET helyettesítésére szolgáló potenciális evapotranszspiráció (PET) fogalmának definiálására számos kutató tett kísérletet (pl.: Brutsaert & Stricker 1979; Oldekop, 1911). A klasszikus definíció Charles Warren Thornthwaite amerikai klimatológus nevéhez fűződik. Meghatározásában szerepel a „korlátlan vízutánpótlás” kifejezés, azaz ebben az esetben a párolgás mértéke nem függ a talaj vízkészletétől. A valódi párolgás esetéhez képest a PET a növények számára elérhető vízkészlet elpárolgása után is információt szolgáltat a hőstressz mértékéről. A talaj víztartaléka tehát nem korlátozó tényezője a vizsgálatnak. A valódi és a potenciális evapotranszspiráció között évszakonként változó összefüggés áll fenn, de minden esetben igaz, hogy az $AET \leq PET$ (Thornthwaite, 1931, 1933, 1948; McMahon et al. 2016).

A PET becslésére használatos modellek négy kategóriába sorolhatók: aerodinamikai, hőmérséklet-alapú, sugárzás-alapú és kombinált modellek. Az ezen modellek közötti különbséget a szükséges bemeneti adatok határozzák meg. Az aerodinamikai modellek ugyan

figyelembe veszik az anyagáramlást, ennek ellenére hibahatárunk meglehetősen nagy. A hőmérséklet-alapú modellek, mint például a Thornthwaite-módszer is, viszonylag egyszerűen parametrizálhatók, és a szakirodalomban széles körben használják őket (Blaney & Criddle, 1950; Baier & Robertson, 1965; Kharrufa, 1985; Oudin et al. 2005). A sugárzáson alapuló modellek empirikus adatokat és a sugárzási egyenletet integrálják, ami különböző régiókban eltérő mértékű alkalmazhatóságot eredményezhet. A kombinált modellek több meteorológiai paramétert vesznek figyelembe egyidejűleg. A FAO az ET_0 becslésére a kombinált típusú FAO-PM egyenletet javasolja (Allen et al. 1998), azonban a módszer alkalmazása bonyolult és gyakran ellentmondásos, mivel egyidejűleg írja le az ET_0 -t és a PET-et is.

A numerikus PET-modellek validálására többféle módszer is használatos, köztük a liziméterek, a szcintillációs módszer (Xu et al. 2013), a Bowen-féle aránymódszer (Douglas et al. 2009) és a kádpárolgás (Brouwer & Heibloem 1986). A párolgásmérő kádak és evaporiméterek a legtöbb éghajlaton alkalmasak a PET mérésére, bár ezen eszközök száma viszonylag alacsony, és csak az ET helyszínspecifikus viszonyait tükrözik. Ennek a korlátosságnak az áthidalására egy lehetséges megoldás a PET-modellek használata, amelyek mért meteorológiai bemeneti adatokon alapulnak. Napjainkban a PET-modellek széles skálája ismert. Az éghajlati övezetek és felszínhasználati módok tág spektrumára kellett modelleket kidolgozni, amelyeknek általános használhatósága nagymértékben függ a rendelkezésre álló meteorológiai adatoktól. Számos tanulmány vizsgálta a PET-modellek alkalmazhatóságát különböző éghajlati feltételek mellett (pl.: Bormann, 2011; Li et al. 2024).

1.3. A dolgozat célkitűzései

Dolgozatom célja, hogy Magyarország területén különböző típusú PET-modellek alkalmazhatóságát vizsgáljam. Ehhez az alábbi részcélokat tűztem ki:

- 18 PET-modell pontosságának vizsgálata és rangsorolása statisztikai módszerekkel
- A legpontosabb modellek területi sajátosságainak és szabályszerűségeinek a feltárása
- A magas bemeneti adatigényű modellek alacsonyabb bemeneti adatigényű modellekkel történő helyettesíthetőségének vizsgálata

2. Eszközök és módszerek

2.1. A vizsgálati terület

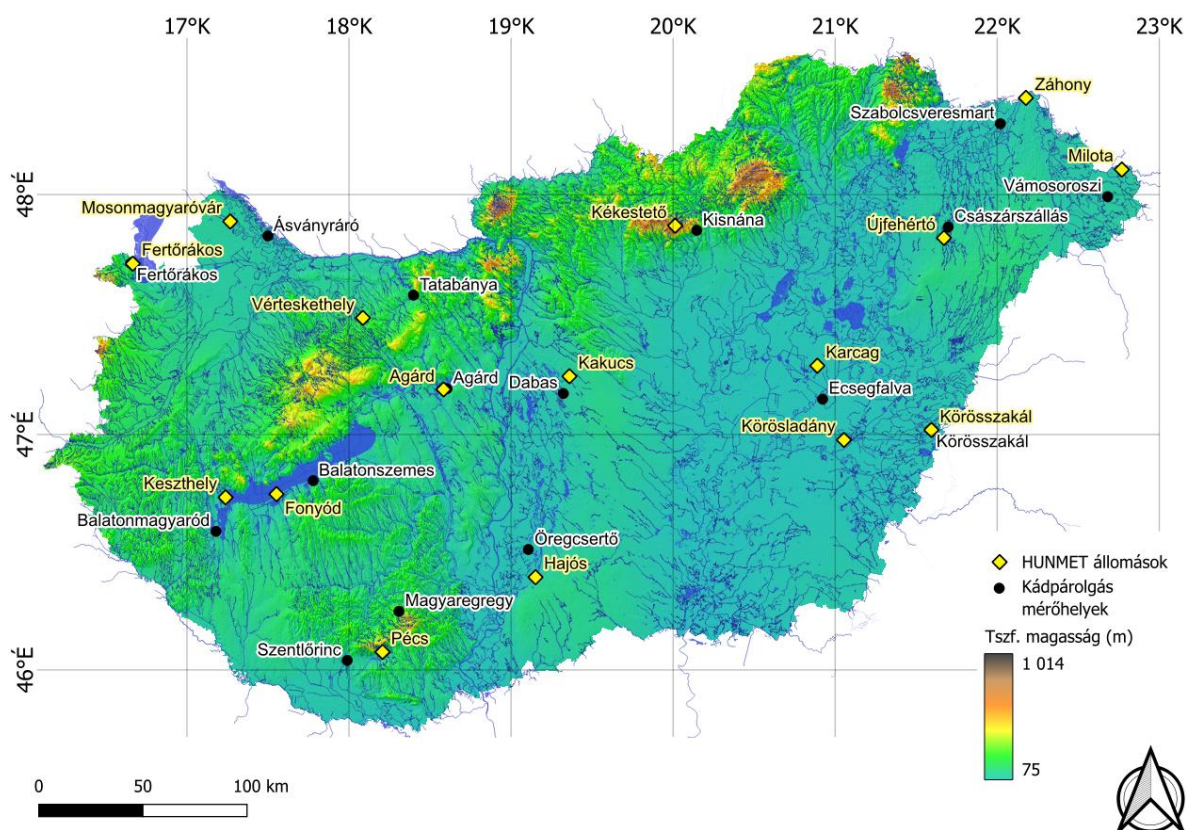
Magyarország domborzatát az északi és nyugati hegységi és dombsági területek kivételével főleg alluviális síkságok alkotják. Az uralkodó szubhumid kontinentális éghajlatot időnként délről érkező mediterrán, valamint nyugatról érkező óceáni hatások módosítják. Az ország éghajlati viszonyai közel sem homogének. Kelet-nyugati irányban, valamint a hegyvidéki és

alföldi területek között jelentős különbségek mutatkozhatnak. Péczely (2002) Magyarországot a csapadék és a hőmérséklet területi adottságai alapján 16 éghajlati övezetre osztotta fel, melyek közül 12 realizálódik csak a valóságban.

A 30 éves átlagos éves csapadékösszegek 1981 és 2010 között 500 és 800 mm között mozogtak. A csapadékmaximum május és június hónapokra tehető, míg a minimum a februártól ápriliséig tartó időszakban jelentkezik. Az évi középhőmérséklet 9-12 °C között mozog, de az elmúlt években ezt meg is haladta. Ez egyfelől az éghajlatváltozásnak tudható be, valamint az El Niño-jelenség hatása is tükröződik az átlagtól való eltérésben. Az uralkodó szélirány az ország területén nyugati és északnyugati irányú (Bihari et al. 2024).

2.2. A dolgozatban felhasznált meteorológiai és kádpárolgási adatsorok forrása

A 16 vizsgált meteorológiai állomás adatai, valamint a kontrolladatsorként felhasznált FAO-PM értékek a HungaroMet Zrt. nyilvános adatbázisából kerültek letöltésre. A referenciaként használt 15 kádpárolgási mérőhely adatait az Országos Vízügyi Főigazgatóság bocsátotta rendelkezésemre.



1. ábra: A kutatásban felhasznált meteorológiai és kádpárolgásmérő állomások földrajzi elhelyezkedése (saját szerkesztés)

1. táblázat
A vizsgált potenciális evapotranszspirációs modellek

	PET modell neve	Egyenlet	Hivatkozás
aerodinamikai	Albrecht (ALBRCT)	$PET = (0.1005 + 0.297u_2) \times (e_s - e_a)$	Albrecht, 1950; Bormann, 2011
	Brockamp- Wenner (BRWENR)	$PET = (0.543u_2^{0.456}) \times (e_s - e_a)$	Brockamp & Wenner 1963; Bormann, 2011
	Harbeck (HARBEC)	$PET = (0.0578u_8) \times (e_s - e_a) \times 25.4$	Harbeck, 1966; Singh & Xu, 1997
	Rohwer (ROHWER)	$PET = 0.44 \times (1 + 0.27u_2) \times (e_s - e_a)$	Rohwer, 1931; Xu & Singh, 2002
hőmérséklet-alapú	Baier- Robertson (BAROBR)	$PET = 0.157T_x + 0.158(T_x - T_n) + 0.109R_a - 5.39$	Baier & Robertson, 1965
	Hamon (HAMON)	$PET = \left(\frac{N}{12}\right)^2 \times \exp\left(\frac{T_a}{16}\right)$	Hamon, 1961; Oudin et al., 2005
	Romanenko (ROMANE)	$PET = 4.5 \times \left(1 + \frac{T_a}{25}\right)^2 \times \left(1 - \frac{e_a}{e_s}\right)$	Romanenko, 1961
	Schendel (SCHEND)	$PET = 16 \frac{T_a}{RH}$	Schendel, 1967; Bormann, 2011
	Oudin (OUDIN)	$\begin{cases} PET = (\lambda\rho)^{-1} \times R_a \left(\frac{T_a + 5}{100}\right) & T_a > -5^\circ\text{C} \\ PET = 0 & T_a \leq -5^\circ\text{C} \end{cases}$	Oudin et al., 2005
sugárzás-alapú	Turc (TURC)	$\begin{cases} PET = 0.013 \times \left(\frac{T_a}{T_a + 15}\right) \times (R_s + 50) \times \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) & RH < 50\% \\ PET = 0.013 \times \left(\frac{T_a}{T_a + 15}\right) \times (R_s + 50) & RH \geq 50\% \end{cases}$	Turc, 1955; 1961; Lu et al., 2005
	Jensen- Haise (JENHAI)	$PET = 25.4 \times (0.014T_a - 0.37) \times (0.000673R_s)$	Jensen & Haise, 1963; Zheng et al., 2017
	Stephens- Stewart (STESTW)	$PET = 25.4 \times (0.0082T_a - 0.19) \times \left(\frac{R_s}{1500}\right)$	Stephens & Stewart, 1963; Zheng et al., 2017
	Hargreaves (HARGRE)	$PET = 0.0135R_s \times \frac{T_a + 17.8}{\lambda}$	Hargreaves, 1975
	Milly- Dunne (MILDUN)	$PET = \frac{0.8 \times (R_n - G)}{\lambda}$	Milly & Dunne, 2016
	Priestley- Taylor (PRITAY)	$PET = \alpha \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{(R_n - G)}{\lambda}$	Priestley & Taylor, 1972
kombinált	Rijtema (RIJTEM)	$PET = \frac{\frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda} + \gamma ru_2^{0.75} \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$	Rijtema, 1965; Bormann, 2011
	Wright- Jensen (WRIJEN)	$PET = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times 2.63 \times (0.75 + 0.993u_2) \times (e_s - e_a)$	Jensen & Wright, 1978; Allen, 1986
	Penman (PENMAN)	$PET = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times \frac{6.43(1 + 0.536u_2) \times (e_s - e_a)}{\lambda}$	Penman, 1948; Shuttleworth, 1992

PET	potenciális evapotranszpiráció	mm/day	
u_2, u_8	szélsebesség 2 és 8 méteren	m/s	
e_s, e_a	telített és valós vízgőznyomás	kPa	hPa az Albrecht és Brockamp-Wenner, inch Hg a Harbeck, mm Hg a Rohwer modellek esetében
T_a	napi középhőmérséklet	°C	°F a Jensen-Haise és Stephens-Stewart modellek esetében
T_n, T_x	napi minimum és maximum hőmérséklet	°C	
R_a	extraterresztriális sugárzás	MJ/m ² /day	
N	napsütéses órák	h	
RH	relatív páratartalom	%	
λ	látens párolgáshő	MJ/kg	2.45
ρ	a víz sűrűsége	kg/m ³	
R_s	beérkező napsugárzás	MJ/m ² /day	cal/cm ² /day a Turc, Jensen-Haise és Stephens-Stewart modellek esetében
R_n	nettó sugárzás	MJ/m ² /day	
G	a talaj hőáramsűrűsége	MJ/m ² /day	napi időskálán értéke nullának tekinthető
α	Priestley-Taylor együttható	-	1.26
Δ	a gőznyomás-görbe meredeksége	kPa/°C	
γ	pszichrometrikus állandó	kPa/°C	

2.3. A modellek rangsorolása

A numerikus modellszámítások adatait a kádpárolgási értékekkel vettem össze. A meteorológiai állomások és kádpárolgás mérők a földrajzi közelségük alapján lettek párosítva. A kádpárolgási adatok mérése csak az április 1. és október 31. közötti időszakban történik, így a vizsgálatomat is erre az időszakra kellett szűkítenem. Emiatt, az egyértelműsítés érdekében az általam számolt PET értékeket a továbbiakban PET_{A-O}-ként fogom jelölni.

A kiszámított adatokat QGIS 3.38.0 szoftverrel ábrázoltam térképeken, míg az adatfeldolgozási folyamat MS Excel és MATLAB R2023b szoftverekkel történt.

A 18 PET-modell értékeléséhez felhasznált statisztikai mutatók a következők voltak:

1. átlagos abszolút hiba (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$

ahol n a minta elemszáma, y_i a modellezett érték, x_i a mért érték

2. átlagos százalékos hiba (MPE)

$$MPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{x_i}$$

ahol n a minta elemszáma, y_i a modellezett érték, x_i a mért érték

3. átlagos torzítási eltérés (MBD)

$$MBD = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - y_i}{y_i}$$

ahol n a minta elemszáma, y_i a modellezett érték, x_i a mért érték

4. átlagos torzítási hiba (MBE)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)$$

ahol n a minta elemszáma, y_i a modellezett érték, x_i a mért érték

5. Nash-Sutcliffe modellhatékonysági együttható (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

ahol n a minta elemszáma, y_i a modellezett érték, x_i a mért érték

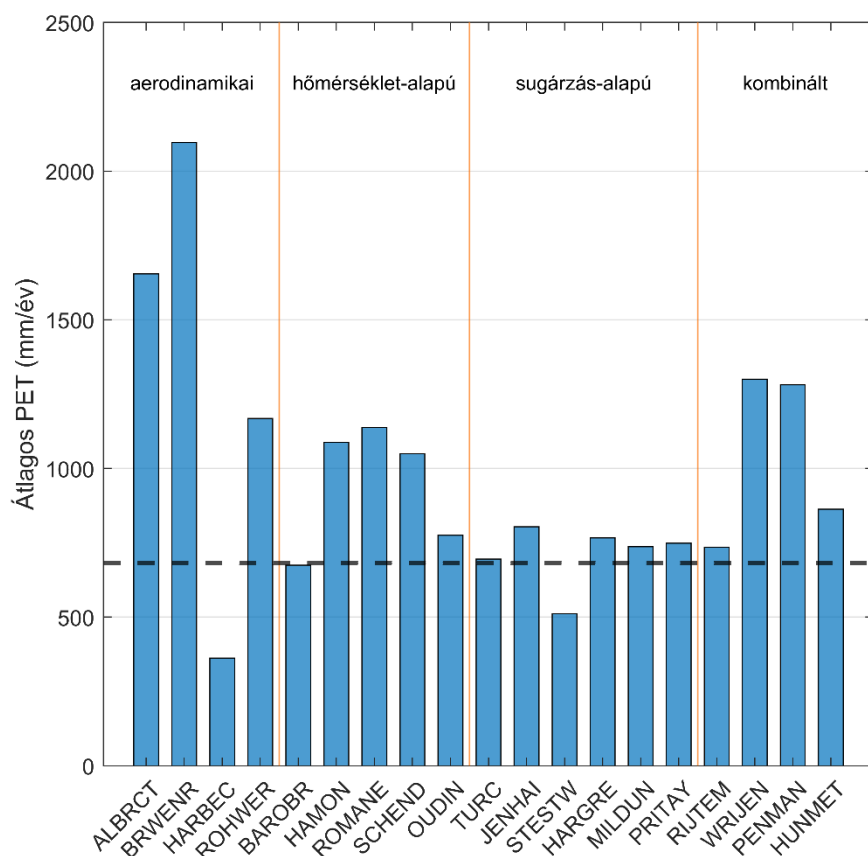
6. lineáris regresszió korrelációs együtthatója (R^2)

Egy kumulatív pontozási rendszert dolgoztam ki. Az összes modellt, köztük a FAO-PM-t is rangsoroltam minden állomáson a 6 statisztikai mutató alapján. Ennek megfelelően minden modell egy 1 és 19 közé eső pontszámot kapott minden mutató esetében. Szerettem volna, ha a pontozási módszer reprezentálja a szélesebb területen pontosan működő modelleket, ezért korrekciós pontokat is bevezettem. Így 6, 3, illetve 1 korrekciós pontot kaptak azok a modellek, amelyek az állomásokon leggyakrabban szerepeltek az 1-3., 4-6. és 7-9. helyeken. A pontozási rendszerben ennek megfelelően egy modell legfeljebb 120 pontot szerezhethet. Fontos megjegyezni, hogy az összehasonlítás alapját minden esetben a kádpárolgási adatsorokkal (PANEVA) történő összevetés jelentette, a FAO-PM (HUNMET) adatsorok csak referenciaként szolgáltak (pl. az R^2 értékek szórásdiagramja esetében).

3. Eredmények

3.1. A modellek összehasonlítása

A 18 vizsgált PET-modell átlagos PET_{A-O} értékei 362 és 2096 mm között mozogtak a 2010 és 2022 közötti időszakban (2. ábra). A legalacsonyabb érték a Harbeck-modellhez, a legmagasabb a Brockamp-Wenner-modellhez tartozik. Az átlagos érték 976,7 mm, az adatsor összesített mediánja pedig 789,5 mm. Átlagosan a hőmérsékleten és a sugárzáson alapuló modellek értékei voltak legközelebb a kádpárolgás értékeihez, az aerodinamikai modellek értékei pedig a legtávolabb.

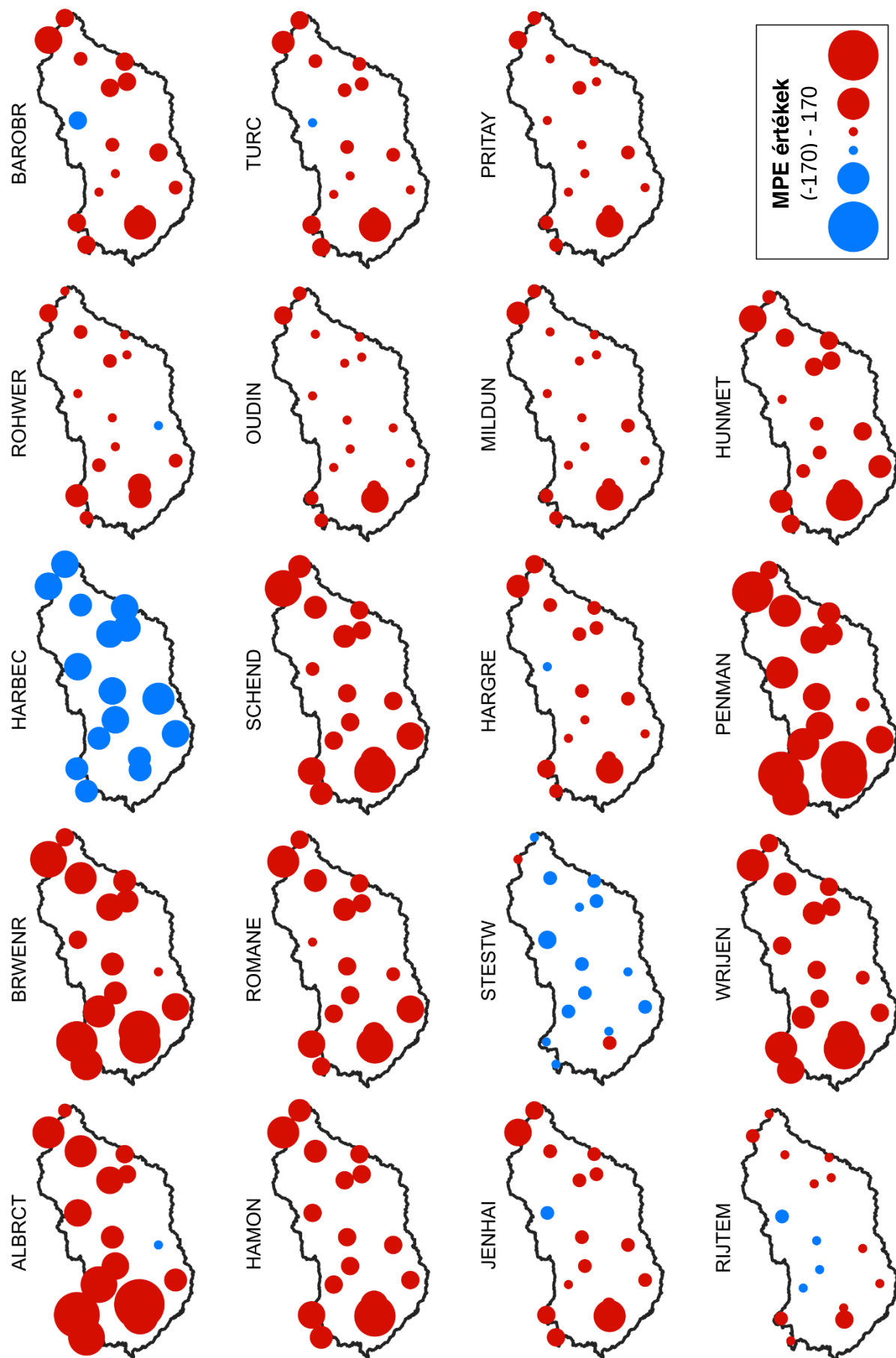


2. ábra: Átlagos éves PET_{A-O} összegek 2010-2022 között

A MAE értékek az ország területének középső kétharmadán voltak a legkedvezőbbek, különösen a sugárzásalapú modellek esetében. A MAE értékek kedvezőbbek voltak az ország középső kétharmadában, különösen a sugárzási alapú modellekkel számított adatok esetében. A hőmérsékletalapú Oudin és a kombinációs típusú Rijtema-modellek egyaránt kedvező MAE értékeket produkáltak. A MAE tekintetében a legoptimálisabb illeszkedést Vérteskethely állomáson az Oudin-moddellel számított értékek mutatták ($MAE = 0,617$ mm/nap). Az ország keleti és nyugati pereméhez közeledve a modellek MAE értékei általánosn romlottak. Tekintettel a MAE sajátosságaira, nem jelzi az eltérések irányát, így az alul- vagy túlbecslés nem állapítható meg belőle.

Az alul- és túlbecslés kimutatásának képessége miatt az MPE értékeket térképen is ábrázoltam (3. ábra). A modellek közül a Harbeck- és a Stephens-Stewart-modellek nettó alulbecslőnek, a többi modell pedig nettó túlbecslőnek bizonyult. A Rijtema-modell vegyes képet mutatott. A területi sajátosságok közül figyelemre méltó, hogy a Baier-Robertson-, Turc-, Jensen-Haise- és Hargreaves-modellek alulbecsülték a PET_{A-O} értékeket a legmagasabban fekvő Kékestető állomáson, míg az összes többi állomás túlbecsült értékeket produkáltak. Az is megállapítható, hogy a túlbecslő modellek az ország legkeletibb és legnyugatibb részein

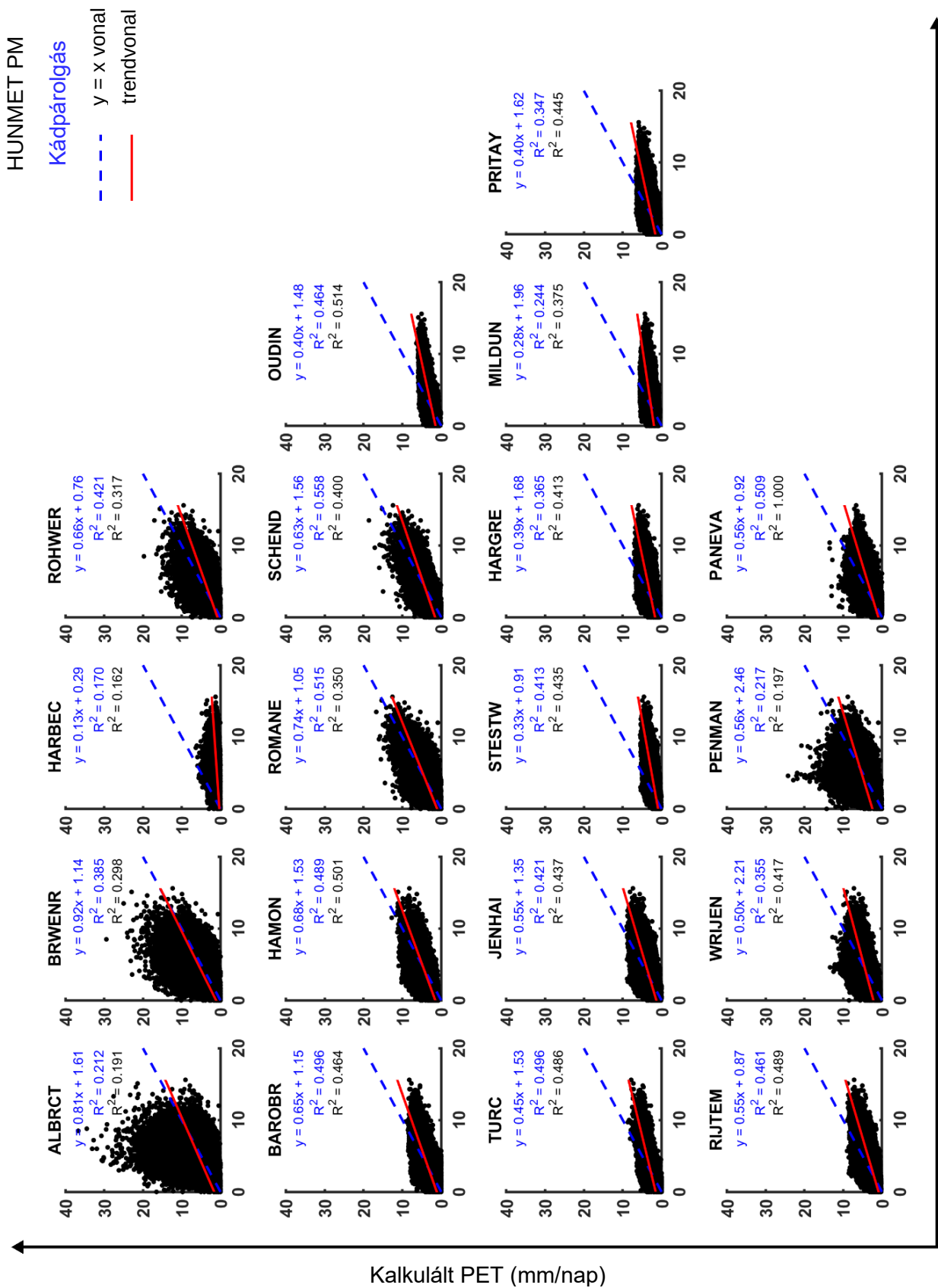
hajlamosak voltak kiugró MPE értékeket produkálni. Az individuális sajátosságok esetében látható, hogy a Rijtema-modell általánosságban alulbecsülte a PET_{A-O} értékét az Északi-középhegységben és a Dunántúlon, míg az ország többi részén túlbecsülte azt. Az Oudin- és a Rijtema-modell esetében a területi különbségek szórása alacsony volt. A Rijtema (MPE = 8,4%), Stephens-Stewart (MPE = -15,7%) és Oudin (MPE = 18,3%) modellek mutatták a legkisebb százalékpontos eltéréseket. A modellek közül a Penman-modellnek van a legjelentősebb hibája, jelesül 89,1%. Megvizsgáltam, hogy van-e összefüggés az egyes állomásokon legjobban teljesítő modellek és az állomás helyének Péczely-féle klímaosztálya között, de összefüggést nem találtam.



3. ábra: A PET modellek MPE értékei állomásonként Magyarország térképén (saját szerkesztés)

Az MBD és MBE értékek megerősítették az MPE által jelzett alul- és túlbecslési tendenciákat. A Harbeck- és Stephens-Stewart-modellek alulbecslése is megmutatkozott a mutatók esetében. Területileg jelentős túlbecslést mértem az északnyugati állomásokon és a legmagasabb ponton, a Kékestető állomáson. Az aerodinamikai és a sugárzásalapú modellek produkálták a legtöbb kiugró értéket.

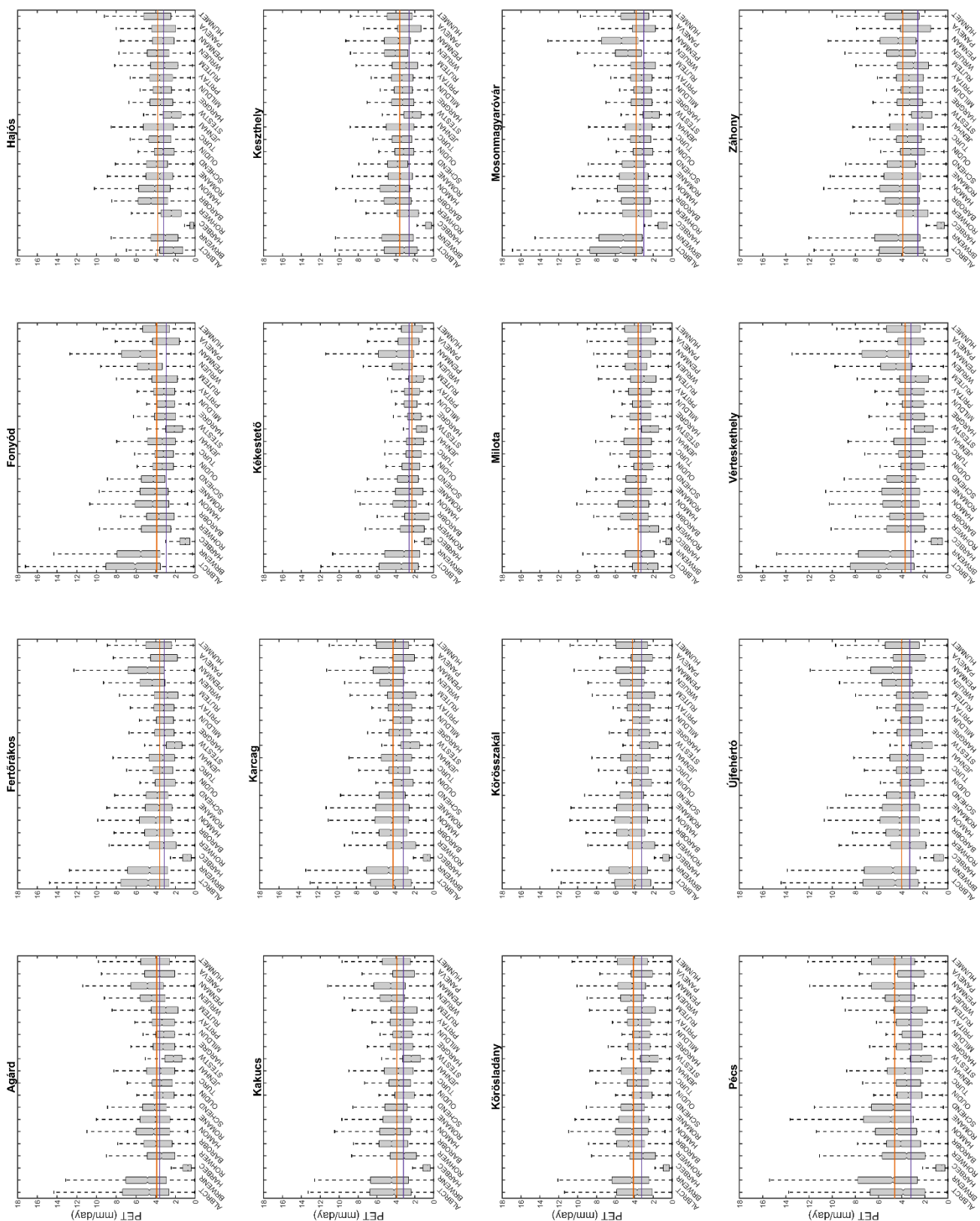
Az NSE mutató egy gyakran számított mutató a hidrológiai modellszámításokban, ezért használtam fel a kutatásban. Az Oudin-, a Turc- és a Stephens-Stewart-modellek adták a legjobban egyhez közelítő értékeket, azaz a számított értékek jól illeszkedtek a mért adatsorokhoz. Általánosságban elmondható, hogy az NSE értékek a hőmérséklet- és sugárzásalapú modellek esetében voltak a legmagasabbak, az aerodinamikai típusú modellek esetében pedig a legalacsonyabbak. Ez utóbbi csoportban emellett jelentős gyakorisággal negatív NSE értékek is megfigyelhetők voltak, ami különösen nagyfokú pontatlanságot jelez.



4. ábra: A lineáris regresszió eredményeinek szórásdiagramja

A modellezett és a mért PET adatsorokon két lineáris regressziós vizsgálatot végeztem el, melyek eredményét szórásdiagramon ábrázoltam (4. ábra). Először a PANEVA adatsorral (R^2_P), majd a HungaroMet Zrt. által számított HUNMET adatokkal (R^2_H) végeztem el az elemzést. Mindkét esetben a hőmérséklet alapú modellek mutatták a legmagasabb értékeket (R^2_H átlag = 0,504, R^2_P átlag = 0,446), míg az aerodinamikai modellek a legalacsonyabb értékeket (R^2_H átlag = 0,297, R^2_P átlag = 0,242). A PANEVA-adatokkal összehasonlítva az Oudin-modell mutatta a legjobb illeszkedést, míg a HUNMET-adatokkal összevetve a Schendel-modell bizonyult a legpontosabbnak. Megfigyelhető, hogy a két különböző bázison elvégzett lineáris regressziós elemzések R^2 értékei között nincsenek számottevő különbségek. Az is megállapítható, hogy a HUNMET adatsor szórása és terjedelme általánosságban nagyobb volt, mint a modellezett adatsoroké.

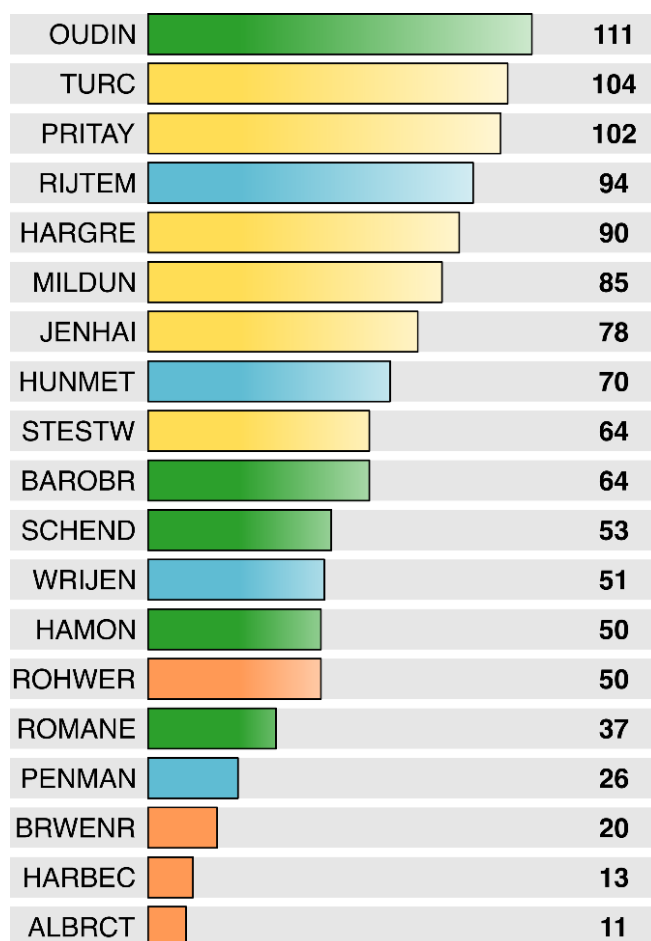
Az adatokat állomásonként boxplot-diagramokon ábrázolva (5. ábra) látható, hogy a PANEVA és a HUNMET adatsorok mediánjai csak a legmagasabban fekvő Kékestető, illetve a legkeletebbi Milota állomáson térnek el némileg egymástól. A vizsgált PET modellek terjedelme is szűkebb ezeken a szélsőségesnek tekinthető állomásokon, mint az ország átlagán. A Baier-Robertson-modell következetesen a legkisebb terjedelmet produkálta az állomásokon, egyben azonban jelentős alulbecslőként is viselkedett. Az is látható, hogy az aerodinamikai modellek jellemzően nagy szórással és terjedelemmel rendelkeznek, bár ez a tendencia nem figyelhető meg Hajós és Milota állomásokon. Az interkvartilis tartomány a sugárzási alapú modellek esetében volt a legalacsonyabb mind országosan, mind állomásonként.



5. ábra: Napi PET_{A-O} értékek 2010 és 2022 között. A lila vonal a PANEVA, a narancssárga vonal pedig a HUNMET adatsor mediánját ábrázolja

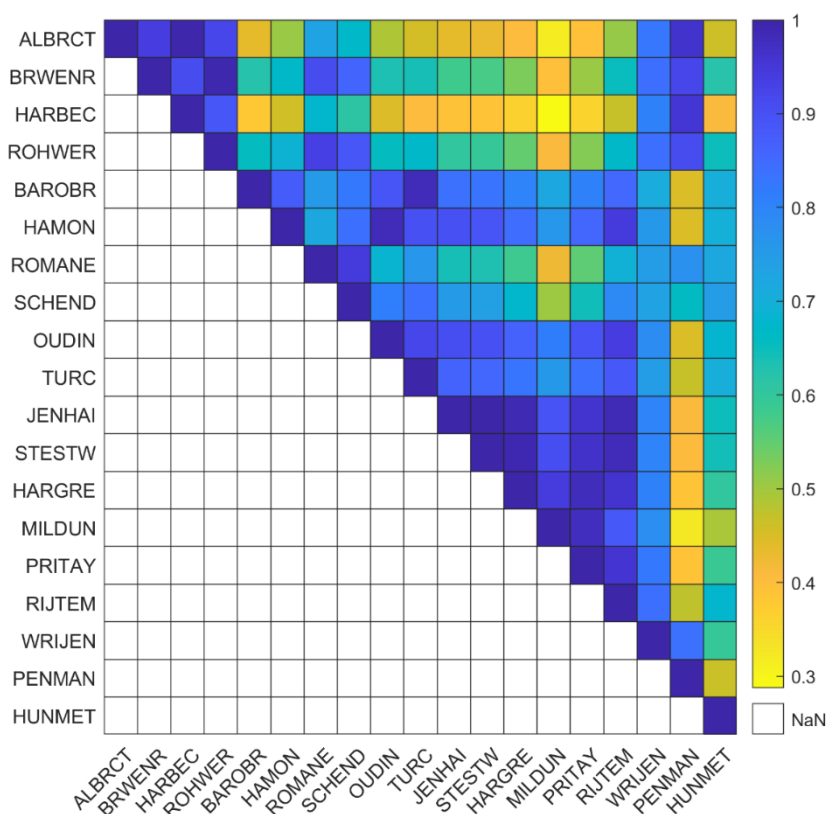
3.2. Országos összesített rangsor

A 19 PET modell a hat statisztikai módszer (MAE, MPE, MBD, MBE, MBE, NSE, R^2) alapján került rangsorolásra. A négy PET modell kategória országos összesített statisztikai rangsorolásakor a hőmérsékleten alapuló modellek teljesítettek a legjobban, az aerodinamikai modellek pedig a leggyengébben. Az egyes PET modellek tekintetében a legmagasabb pontszámot az Oudin- (111 pont), a Turc- (104 pont) és a Priestley-Taylor-modellek (102 pont) érték el (6. ábra). A MAE, NSE és R^2 mutatók esetében a hőmérsékletalapú modellek érték el a legmagasabb pontszámot, az MBD és MBE mutatók esetében pedig a sugárzásalapú modellek szerezték a legmagasabb pontszámokat. Az aerodinamikai modellek kapták a legalacsonyabb pontszámokat valamennyi statisztikai mutató esetében, ezért korrekciós pontokat nem kaptak. A legtöbb korrekciós pontot a hőmérsékletalapú modellek csoportja kapta, ami arra utal, hogy ez a modelltípus a legszélesebb területen ad hiteles PET_{A-O} értékeket. Bár a kombinált modellek általában nem teljesítettek jól, a Rijtema-modell a negyedik helyre került. Az aerodinamikai modellek mutatták a legalacsonyabb pontosságot, és közülük az Albrecht-modell volt a legpontatlanabb.



6. ábra: Az egyes PET modellek rangsora a kutatásban alkalmazott pontozási rendszer alapján

Abban az esetben, ha a legoptimálisabb PET modell helyettesítésére van szükség, például a szükséges adatok rendelkezésre állásának hiányában, alternatív modellek kiválasztására lehet szükség. A magyarországi viszonyok esetében a Rijtema-modell az Oudin-modell legoptimálisabb helyettesítőjének bizonyult, melyet a Turc- és a Jensen-Haise-modellek követnek (7. ábra).



7. ábra: Az egyes PET modellek közötti korreláción alapuló hő térkép a helyettesíthetőség reprezentálására

4. Diskusszió

Varga et al. (2018) tanulmányukban kimutatták, hogy Magyarország éves vízmérlegében a valódi evapotranszpiráció mennyisége átlagosan az éves csapadékösszeg 85,9%-a. Az országban a csapadékesemények legnagyobb része május és október között jelentkezik, ami egybeesik a kádpárolgás-mérések időszakával. Az ebben az időszakban realizálódó csapadékmennyiség az évi 500-800 mm-es csapadékmennyiség 68-70%-át teszi ki (Bihari et al., 2024).

Hasonló vizsgálatot végzett Kínában Li et al. (2024). Kína hatalmas földrajzi kiterjedése miatt területén számos éghajlati zóna megtalálható. A mérsékelt övi kontinentális éghajlaton a

Penman-modell bizonyult a leghatékosabbnak, míg az aerodinamikai alapú Rohwer- és a hőmérsékletalapú Romanenko-modell is kielégítő teljesítményt produkált, de általánosságban a kombinált modellek adták a legpontosabb eredményeket.

Magyarországon a 16 meteorológiai állomásból 13 esetében a hőmérsékletalapú Oudin-modell mutatta a legnagyobb pontosságot a kádpárolgási adatsorokhoz való illeszkedésben, míg a másik három állomáson, nevezetesen Agárdon, Milotán és Újfehértón a sugárzásalapú Turc-modell mutatta a legjobb illeszkedést. Milota és Újfehértó állomások az ország legkeletibb részén, míg Agárd közvetlenül a Velencei-tó partján helyezkedik el. A vízfelszín közelsége és a szélviszonyok azonban nem indokolnák a mért 803 mm-es átlagos éves kádpárolgást. Feltételezhető, hogy ez a szélsőséges érték mérési hiba következménye ezen a mérési ponton. Az eltérés Kína és Magyarország között annak tudható be, hogy a kontinentális Kína éghajlati viszonyai szárazabbak, mint Magyarországon, így a relatív páratartalom értékek jelentős különbséget mutathatnak. Következésképpen az eltérő relatív páratartalom és páradeficit értékek megmagyarázhatják az optimális teljesítményt nyújtó modellek közötti eltéréseket a két ország esetében. Ebből arra lehet következtetni, hogy a páratartalom és a páradeficit jelentős befolyást gyakorol a Magyarországon hatékonyan működő modellekre.

Yang et al. (2021) tizenhét különböző empirikus modellel számították ki az ET_0 -t Kína főbb éghajlati régióira, és arra a következtetésre jutottak, hogy a kombinációs modellek teljesítettek a legjobban, melyeket a sugárzásalapú modellek követtek. A leggyengébb teljesítményt hőmérsékletalapú modellek mutatták.

Jelen tanulmány a számított PET_{A-O} -t a legközelebbi kádpárolgásmérő-állomások adataival hasonlítja össze. A PET-et azonban számos tényező befolyásolja, ezért a legközelebbi állomás nem biztos, hogy a legalkalmasabb összehasonlítási alapot jelenti. Amennyiben például a párolgásmérő kád magasabban helyezkedik el, mint a legközelebbi meteorológiai állomás, érdemes lehet egy távolabbi, de hasonló tengerszint feletti magasságon telepített állomás adatait használni. Azt is meg kell jegyezni, hogy amint azt korábban említettem, a PET modellekkel történő kiszámítása az egyik legnagyobb kihívást jelentő feladat a meteorológiában, tekintettel a szükséges bemeneti adatok sokféleségére. A párolgás számos egymással kölcsönhatásban lévő jelenség eredménye. Feltételezhető, hogy a PET-et előidéző meteorológiai és környezeti hatások olyan összetett rendszert alkotnak, amely nem vizsgálható egyetlen statisztikai mutató segítségével. Javasolt a lehető legtöbb statisztikai paraméter vizsgálata, ezért használtam komplex pontozási rendszert az értékeléshez a vizsgálatomban. Ha csak az R^2 és az MPE értékeket vennénk figyelembe, a vizsgálatunkban szereplő bizonyos PET-modellek

teljesítménye meglehetősen pontatlannak tűnne. A MAE, MBD és MBE értékek azonban még a pontrendszerben legrosszabbul teljesítő modellek esetében is nagy pontosságot mutattak.

Bormann (2011) szintén a négy fő PET számítási módszer hatékonyságát vizsgálta hat, egymástól jelentősen eltérő éghajlaton lévő németországi meteorológiai állomásról származó adatok alapján. Az eredmények azt mutatták, hogy a megfelelő PET modell kiválasztásakor azonos klimatológiai és földrajzi körülményekre validált modelleket érdemes választani. Továbbá igazolta, hogy azokban a régiókban, ahol az éghajlatváltozás és a felmelegedés hatásai kifejezettebbek, a PET modellek megbízhatósága csökken, ami szükségessé teszi azok korrekcióját.

Seiller & Anctil (2016) is megerősítette, hogy a megfelelő PET modell kiválasztása kulcsfontosságú a szimulált éghajlati forgatókönyvekben, mivel a PET nagy hatással van az egyes szimulált globális éghajlatváltozási kimenetekre.

A megfelelő meteorológiai állomások kiválasztása a párolgásmérő kádakhoz szintén kulcsfontosságú kérdés volt a jelen tanulmányban. Bár a legközelebbi állomás látszólag megfelelő választásnak tűnhet, ez a megközelítés figyelmen kívül hagyja többek között az orográfiai jellemzőket, valamint a mikroklimatikus (pl.: uralkodó szélirány) és mikrokörnyezeti (pl.: felszínhasználat, kitettség és domborzat) változók hatását. Hasonlóképpen, a térbeli lineáris interpolációt és a Kriging-módszert is körültekintéssel kell alkalmazni, mivel a PET értékét befolyásoló számos változó miatt e módszerekkel nehéz pontos eredményeket elérni.

5. Következtetések

A PET számszerűsítése a hidrometeorológia egyik legnagyobb kihívást jelentő feladata. A modellek többsége csak bizonyos meteorológiai és mikrokörnyezeti feltételek mellett pontos, és csak viszonylag kis területen megbízható. Ezért olyan PET modelleket kell alkalmazni, amelyeket előzetesen validáltak az adott földrajzi valamint mikro- és mezoklimatikus viszonyokra. E tanulmány célja a Magyarországon legjobban alkalmazható modellek kiválasztása volt. Ennek érdekében 18 PET modell magyarországi alkalmazhatóságát vizsgáltam. Eredményeim igazolják, hogy a magas bemeneti adat-igényű modellek megfelelő feltételek mellett alacsonyabb adatigényű modellekkel jelentős pontosságvesztés nélkül helyettesíthetők. Ez azt is jelenti, hogy olyan monitoring pontokat is be lehet vonni az országos mérési hálózatba, ahol a szenzorok minősége vagy rendelkezésre állása korlátozott. A jelenleg használt FAO-PM egyenlet nemzetközileg elismert, megbízható és pontos modell, de a bemeneti adatigénye rendkívül magas, a számítása pedig bonyolult. A tanulmányomban többször pozitívan értékelt Oudin-modell pontossága hasonló a FAO-PM módszeréhez,

ugyanakkor csak a napi átlaghőmérsékletet és a besugárzást igényli bemeneti adatként. A hőmérséklet mérése egyszerű, költséghatékony, és gyakorlatilag bármely meteorológiai állomáson elérhető, míg a sugárzás a mérési hely földrajzi elhelyezkedése alapján matematikailag is kiszámítható. A pontos értékeket szolgáltató modelleket érdemes helyszínspecifikusan parametrizálni. Ezeket a módszereket úgy kell korrigálni, hogy tükrözzék a vizsgált helyszín földrajzi sajátosságait, éghajlati, domborzati és egyéb környezeti-meteorológiai jellemzőit. Ez jelentős kihívást jelenthet, mert térbeli összefüggést a modellteljesítmények és a Péczely-osztályok között nem tudtam kimutatni.

A kutatás legfőbb megállapításai:

- Országosan a sugárzásalapú modellek voltak a legpontosabbak, de a rangsorban a hőmérsékletalapú Oudin-modell kapta a legmagasabb pontszámot. Ez annak tudható be, hogy az Oudin-egyenletben a besugárzás együtthatóként szerepel. Feltehetően a magyarországi kontinentális éghajlaton a hőmérséklet önmagában nem reprezentálja a párolgás viszonyait.
- Az aerodinamikai modellek mutatták a legkevésbé hatékony teljesítményt a vizsgálatban. Ez nem azt jelenti, hogy ezek a modellek eredendően alkalmatlanok lennének a PET becslésére, az azonban nyilvánvaló, hogy nem alkalmazhatók következetesen a szélsőségektől nem mentes Magyarország éghajlati dinamikájának lekövetésére. Az aerodinamikai modellek figyelmen kívül hagyják a mikrokörnyezeti és kis térskálájú meteorológiai tényezők sokaságát (pl.: szélfolyosók, talajmenti köd, növényzet, felszíni albedó, lejtőhelyzet), amelyek jelentős hatást gyakorolnak a PET dinamikájára.
- A területi eloszlás azt mutatja, hogy a PET modellek kevésbé hatékonyak az ország legkeletibb és legnyugatibb területein. E jelenség egyik lehetséges magyarázata a csapadék egyenlőtlen térbeli eloszlása az országban. Az ország nyugati és keleti peremén magasabb az átlagos éves csapadékösszeg, mint a középső területeken.
- Tanulmányom bebizonyította, hogy a nagy megbízhatósága miatt széles körben használt, de nagyon magas bemeneti adatigénnyel rendelkező FAO-PM egyenletet alacsonyabb bemeneti adatigényű modellekkel (pl. Oudin, Turc) lehet helyettesíteni adathiányos esetekben anélkül, hogy a PET-kalkulációk pontossága számottevően romlana. A kádpárolgás a gyakori mérési hibák miatt nem mindig a legmegfelelőbb referencia, és emellett nem is feltétlenül mérhető az év minden időszakában. A modelleknek a HungaroMet által számított FAO-PM értékekkel való

összehasonlításakor a korreláció erősebb volt, mint a kádpárolgással való összevetéskor. Ez azonban annak is betudható, hogy a vizsgált modellekhez hasonlóan a FAO-PM is egy matematikai módszer, amely nyilvánvalóan erősebb korrelációt mutat más matematikai módszerekkel, mint egy megfigyelésen és mérésen alapuló módszer eredményeivel. Várhatóan ez a tanulmány értékes alapot nyújt a mezőgazdaság és a meteorológiai kutatások számára a potenciális evapotranszspiráció, mint az aszálykockázat egyik indikátorának számszerűsítéséhez. Hangsúlyozandó, hogy eredményeim elsősorban a Magyarországhoz hasonló szubhumid kontinentális éghajlaton, az áprilistól októberig terjedő időszakban alkalmazhatók.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőimnek, akik tudásuk és energiájuk legjavát adva segítették a dolgozatom elkészítését, és hasznos tanácsokkal láttak el a munkám során.

Köszönöm a szüleimnek, testvéreimnek a támogatásukat, és nagyszüleimnek, akik már nem lehetnek velem, de nagy szerepük van abban, hogy azzá váltam, aki ma vagyok.

Szintén köszönet illeti a PTE TTK Földrajzi és Földtudományi Intézetét, hogy a pályamunkám elkészítését minden eszközzel támogatták.

Végül köszönöm a barátaimnak, különösen Attilának és Tibornak, akik emberileg és szakmailag is hozzájárultak a dolgozat megszületéséhez.

Irodalomjegyzék

1. ALBRECHT, F. 1950. Die Methoden zur Bestimmung Der Verdunstung Der natürlichen Erdoberfläche. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, 2(1-2), 1-38. <https://doi.org/10.1007/bf02242718>
2. ALLEN, R. G., and PRUITT, W. O. (1986). Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(2), 139-155. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1986\)112:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1986)112:2(139))
3. ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., and SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56.
4. ANTAL, E. 1968. Az öntözés előrejelzése meteorológiai adatok alapján. *CSc Thesis*, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest. (in Hungarian)
5. BAIER, W., and ROBERTSON, G. W. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Science*, 45(3), 276-284. <https://doi.org/10.4141/cjps65-051>
6. BIHARI, Z., BABOLCSAI, GY., BARTHOLY, J., FERENCZI, Z., GERHÁTNÉ KERÉNYI, J., HASZPRA, L., HOMOKINÉ UJVÁRY, K., KOVÁCS, T., LAKATOS, M., NÉMETH, Á., PONGRÁCZ, R., PUTSAY, M., SZABÓ, P., and SZÉPSZÓ, G. 2024. Éghajlat. In K. KOCIS (Ed.), *Magyarország nemzeti atlasza: természeti környezet. 2., átdolg. kiad.* (pp. 58-69). MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. (in Hungarian)
7. BLANEY, H. F., and CRIDDLE, W. D. 1950. Determining Requirements Water in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. *USDA Soil Conservation Service Tech Paper*, 96, 48.
8. BLANKA, V., MEZŐSI, G. and MEYER, B. 2013. Projected changes in the drought hazard in Hungary due to climate change. *Időjárás* 117. 219–237.
9. BORMANN, H. 2011. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Climatic Change*, 104(3-4), 729-753. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9869-7>
10. BOUCHET, R. J. 1963. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. [Actual and Potential Evaporation, Climatic Significant.]. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ*, 62, 134-142.
11. BREUER, H., and ÁCS, F. 2010. Surface resistance estimation of some crops using different climate, soil-, and vegetation-specific data. *Időjárás*, 114(3), 203-215.
12. BROCKAMP, B., and WENNER, H. 1963. Verdunstungsmessungen auf den Steiner See bei Munster. *Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen*, 7, 149-154. (in German)
13. BROUWER C., and HEIBLOEM M. 1986 Irrigation water management: irrigation water needs. FAO, Rome
14. BRUTSAERT, W., and STRICKER, H. 1979. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resources Research*, 15(2), 443-450. <https://doi.org/10.1029/wr015i002p00443>
15. DOUGLAS, E. M., JACOBS, J. M., SUMNER, D. M., and RAY, R. L. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.029>
16. GÁCSE, V., LAKATOS, M., and MOLNÁR, Á. 2014. Változik-e éghajlatunk? Magyarországi trendek, szélsőségek. *Iskolakultúra*, 24(11-12), 13-27. <https://doi.org/10.2307/209372> (in Hungarian)
17. Glenn, E.P., Doody, T.M., Guerschman, J.P., Huete, A.R., King, E.A., McVicar, T.R., Van Dijk, A.I.J.M., Van Niel, T.G., Yebra, M. and Zhang, Y. (2011), Actual evapotranspiration estimation by ground and remote sensing methods: the Australian experience. *Hydrol. Process.*, 25: 4103-4116. <https://doi.org/10.1002/hyp.8391>
18. HAMON, W. R. 1961. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3), 107-120. <https://doi.org/10.1061/jyceaj.0000599>
19. HARBECK, G. E. 1966 Annual variability in lake evaporation. *Hydrology of Lakes*, pp. 294-303; IAHS Publ. No. 70.
20. HARGREAVES, G. H. 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980-984. <https://doi.org/10.13031/2013.36722>
21. JENSEN, M. E., and HAISE, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15-41. <https://doi.org/10.1061/jrcea4.0000287>
22. JENSEN, M. E., and WRIGHT, J. L. 1978. The role of evapotranspiration models in irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 21(1), 82-87. <https://doi.org/10.13031/2013.35254>
23. KHARRUFA, N. S. 1985. Simplified equation for evapotranspiration in arid region. *Beiträge zur Hydrologie*, 5(1), 39-47.
24. KUTTA, E., and HUBBART, J. A. 2016. Reconsidering meteorological seasons in a changing climate. *Climatic Change*, 137(3-4), 511-524. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1704-3>

25. LI, Z., LI, Y., YU, X., JIA, G., CHEN, P., ZHENG, P., WANG, Y., and DING, B. 2024. Applicability and improvement of different potential evapotranspiration models in different climate zones of China. *Ecological Processes*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00488-7>
26. LOKSA, G. 2014. Az éghajlatváltozás értelmezése a Kárpát-medencében. *Tájkölögiai Lapok*, 12(2), 383-390. <https://doi.org/10.56617/tl.3723> (in Hungarian)
27. LU, J., SUN, G., McNULTY, S. G., and AMATYA, D. M. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 621-633. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x>
28. MCMAHON, T. A., FINLAYSON, B. L., and PEEL, M. C. 2016. Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *WIREs Water*, 3(6), 788-818. <https://doi.org/10.1002/wat2.1172>
29. MEZŐSI, G., BLANKA, V., LADÁNYI, Z., BATA, T., URDEA, P., FRANK, A. and MEYER, B.C. 2016. Expected mid- and long-term changes in drought hazard for the South-Eastern Carpathian Basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 11. 355–366.
30. MILLY, P. C., and DUNNE, K. A. 2016. Potential evapotranspiration and continental drying. *Nature Climate Change*, 6(10), 946-949. <https://doi.org/10.1038/nclimate3046>
31. NASH, J. E., and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
32. OLDEKOP, E. M. 1911. Evaporation from the Surface of River Basins. *Transactions on Meteorological Observations*, 4, 209. (in Russian)
33. OUDIN, L., MICHEL, C., and ANCTIL, F. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 275-289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.025>
34. PÉCZELY, GY. 2002. *Éghajlattan* (6th ed.). Nemzeti Tankönyvkiadó (in Hungarian).
35. PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
36. PRIESTLEY, C. H., and TAYLOR, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)
37. RIJTEMA, P. E. 1965. An Analysis of Actual Evapotranspiration. *Agricultural Research Reports*, 659.
38. ROHWER, C. 1931. Evaporation from Free Water Surfaces. *Technical Bulletin No. 271*, 1-96.
39. ROMANENKO, V. A. 1961. Computation of the Autumn Soil Moisture Using a Universal Relationship for a Large Area. *Ukrainian Hydrometeorological Research Institute*, 3.
40. SCHENDEL, U. 1967. *Vegetationswasserverbrauch und-wasserbedarf*. Kiel: Habilitation.
41. SEILLER, G., and ANCTIL, F. 2016. How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections? *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), 2249-2266. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1100302>
42. SHUTTLEWORTH, W.J. 1992. Evaporation. In: D.R. MAIDMENT (ed.), *Handbook of hydrology*. McGraw Hill, New York, pp. 4.1-4.53
43. SINGH, V. P., and XU, C. 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, 11(3), 311-323. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19970315\)11:3<311::aid-hyp446>3.3.co;2-p](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19970315)11:3<311::aid-hyp446>3.3.co;2-p)
44. STEPHENS, J. C., and STEWART, E. H. 1963. A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration: *Publication 62 of Intern. Assoc. of Scientific Hydrology*, 123-133.
45. SZABÓ, J., LÓKI, J., TÓTH, C., and SZABÓ, G. 2007. Természeti veszélyek Magyarországon. *Földrajzi Értesítő*, 56(1-2), 15-37.
46. SZABÓ, J., JAKAB, G. and SZABÓ, B. 2015. Spatial and temporal heterogeneity of runoff and soil loss dynamics under simulated rainfall. *Hungarian Geographical Bulletin* 64. (1): 25–34.
47. SZABÓ, S., SZOPOS, N. M., BERTALAN-BALÁZS, B., LÁSZLÓ, E., MILOŠEVIĆ, D. D., CONOSCENTI, C., and LÁZÁR, I. 2019. Geospatial analysis of drought tendencies in the Carpathians as reflected in a 50-year time series. *Hungarian Geographical Bulletin*, 269-282. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.68.3.5>
48. THORNTHWAITE, C. W. 1931. The climates of North America: According to a new classification. *Geographical Review*, 21(4), 633-655. <https://doi.org/10.2307/209372>
49. THORNTHWAITE, C. W. 1933. The climates of the earth. *Geographical Review*, 23(3), 433-440. <https://doi.org/10.2307/209629>
50. THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>

51. TURC, L. 1955. Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Journées de l'hydraulique*, 3(1), 36-44. (in French)
52. TURC, L. 1961. Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
53. UNCCD. 2022. *Report from Hungary*. United Nations Convention to Combat Desertification. <https://reporting.unccd.int/api/country/HUN/report/official/pdf/>
54. VARGA, GY., ALFÖLDI, L., GÁBRIS, GY., HORVÁTH, G., KOCSIS, K., LÁZÁR, I., MAGINECZ, J., SZALAI, J., and SZALAY, M. 2018. Vizek. In K. KOCSIS (Ed.), *Magyarország Nemzeti Atlasza - Természeti környezet* (p. 70). MTA CSFK Földrajztudományi Intézet.
55. XU, C. Y., and SINGH, V. P. 2002. Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16, 197-219. <https://doi.org/10.1023/A:1020282515975>
56. XU, Z., LIU, S., LI, X., SHI, S., WANG, J., ZHU, Z., XU, T., WANG, W., and MA, M. 2013. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23). <https://doi.org/10.1002/2013jd020260>
57. YANG, Y., CHEN, R., HAN, C., and LIU, Z. 2021. Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. *Agricultural Water Management*, 244, 2-19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106545>
58. ZHENG, H., YU, G., WANG, Q., ZHU, X., YAN, J., WANG, H., SHI, P., ZHAO, F., LI, Y., ZHAO, L., ZHANG, J., and WANG, Y. 2017. Assessing the ability of potential evapotranspiration models in capturing dynamics of evaporative demand across various biomes and climatic regimes with ChinaFLUX measurements. *Journal of Hydrology*, 551, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.056>

Ábrajegyzék

1. ábra: A kutatásban felhasznált meteorológiai és kádpárolgásmérő állomások földrajzi elhelyezkedése (saját szerkesztés).....	8
2. ábra: Átlagos éves PET_{A-O} összegek 2010-2022 között.....	12
3. ábra: A PET modellek MPE értékei állomásonként Magyarország térképén (saját szerkesztés).....	14
4. ábra: A lineáris regresszió eredményeinek szórásdiagramja.....	16
5. ábra: Napi PET_{A-O} értékek 2010 és 2022 között. A lila vonal a PANEVA, a narancssárga vonal pedig a HUNMET adatsor mediánját ábrázolja	18
6. ábra: Az egyes PET modellek rangsora a kutatásban alkalmazott pontozási rendszer alapján	19
7. ábra: Az egyes PET modellek közötti korreláción alapuló hőtérkép a helyettesíthetőség reprezentálására	20