

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# **Globálsugárzás-becslő modellek alkalmazhatóságának vizsgálata**

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

**Sürge Evelin**

Meteorológus mesterszak,  
Előrejelző szakirány

Témavezető:

**dr. habil. Barcza Zoltán**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018

## Tartalomjegyzék

|  |    |
|--|----|
| 1. Bevezetés.....  | 3  |
| 2. Irodalmi áttekintés.....                                    | 6  |
| 2.1. Alapfogalmak .....  | 6  |
| 2.2. Globálsugárzás-becslő módszerek a szakirodalomban.....    | 8  |
| 3. Felhasznált adatok és módszerek .....                       | 12 |
| 3.1. Adatok .....  | 12 |
| 3.2. A globálsugárzás modellezése.....                         | 14 |
| 3.2.1. Bristow - Campbell modell .....                         | 15 |
| 3.2.2. A RadEst program.....                                   | 16 |
| 3.2.2.1. A BCR modell.....                                     | 19 |
| 3.2.2.2. A CD modell .....                                     | 19 |
| 3.2.2.3. A DB modell .....                                     | 20 |
| 3.2.2.4. A DCBB modell.....                                    | 20 |
| 3.2.3. Az MTCLim modell .....                                  | 21 |
| 3.3. Elemzési módszerek .....                                  | 24 |
| 3.4. Adatfeldolgozás és modellszimuláció .....                 | 26 |
| 3.4.1. Modellszimulációk a BC84 modellel.....                  | 26 |
| 3.4.2. Modellszimulációk a RadEst szoftverrel.....             | 27 |
| 3.4.3. Modellszimuláció az MTCLim modellel .....               | 27 |
| 4. Eredmények.....   | 28 |
| 4.1. A BC84 modell paraméterezése .....                        | 28 |
| 4.2. RadEst modellparaméterek vizsgálata.....                  | 33 |
| 4.3. A modellezett globálsugárzás statisztikai értékelése..... | 35 |
| 4.3.1. Napi szintű statisztikai elemzés.....                   | 35 |
| 4.3.1.1. Napi szintű vizsgálatok összegzése .....              | 51 |
| 4.3.2. Havi szintű statisztikai elemzés.....                   | 54 |
| 4.3.2.1. Havi szintű elemzések összegzése .....                | 60 |
| 4.4. Az eredmények diszkussziója.....                          | 61 |
| 5. Összefoglalás.....  | 63 |
| Köszönetnyilvánítás .....                                      | 65 |
| Irodalomjegyzék.....   | 66 |

## *1. Bevezetés*

A Nap által kibocsátott elektromágneses sugárzás az elsődleges energiaforrás a felszín fizikai, kémiai és biológiai folyamatai számára. A felszín és a légkör felmelegítésén túl az élet fenntartása, az időjárási jelenségek kialakítása, a légköri cirkuláció, illetve az óceánok áramlási rendszereinek fennmaradása is a napsugárzásból származó energia függvénye. Jelentősége meghatározó a növényi fotoszintézis, az evapotranszspiráció és a felszín-légkör kölcsönhatások szempontjából (Huang et al., 2016).

Definíció szerint a globálsugárzás (angolul „global radiation”, rövidítve GR) a felső féltérből a földfelszínre érkező összes rövidhullámú sugárzás (Mészáros, 2013), melynek ismerete a klimatológiai, illetve ökológiai témájú kutatások kapcsán is alapvető fontosságú. Biogeokémiai, illetve mezőgazdasági termésbecslő modelleket (Fodor, 2012; Asseng et al., 2013; Bassu et al., 2014; Hlásny et al., 2014; Martre et al., 2015; Sándor et al., 2016) széles körben alkalmaznak a növényi produkció, szén- illetve nitrogénmérleg számszerűsítésére, valamint a növényi folyamatok és az éghajlatváltozás kölcsönhatásának becslésére. Többségüknek elengedhetetlen bemenő adata a maximum- és minimumhőmérséklet, illetve a csapadékmennyiség mellett a GR is. Ökológiai modellek, globális cirkulációs modellek és hidrológiai modellek alkalmazása szempontjából is fontos a GR adatsorok hozzáférhetősége, és annak minősége.

A GR-adatok iránti növekvő igény ellenére a globálsugárzást világszerte viszonylag kevés mérőállomáson regisztrálják (Fodor and Mika, 2011). Ez a gyakorlatban annyit jelent, hogy a Föld egészét tekintve 500 mérőállomásból mindössze 1 mérőhely rendelkezik mért GR adatsorral (természetesen az egyes országokra vonatkozó lefedettség eltérő) (Thornton and Running, 1999). A problémát fokozza, hogy a mérőhelyekről származó adatsorok nem teljesekek, s akár többéves adathiánnyal is találkozhatunk. A hosszú távú és megfelelő minőségű GR adatok hiánya a fent említett modellek alkalmazásának egyik fő korlátja. Annak érdekében, hogy a modellek használhatók legyenek közvetlen GR mérési adatok nélkül is, olyan módszerek fejlesztésébe kezdtek, melyek különböző meteorológiai paraméterek ismeretében becsülni tudják a globálsugárzást (Rivington et al., 2005; Woli and Paz, 2012; Sürge, 2016; Sürge, 2017). Az egyes módszerek becslési pontossága viszont eltérő.

A GR modellezése Magyarországon kevésbé elterjedt kutatási terület. Szakirodalmi kutatásaink során csupán néhány publikációval találkoztunk, melyek globálsugárzás modellezésével kapcsolatos eredményeket közöltek. A GR becslésével kapcsolatos

magyarországi tanulmányt eddigi kutatásaink során legkorábban az 1957-es évből találtunk Dr. Dobosi Zoltán munkája kapcsán (Dobosi, 1957). A GR műholdas információk felhasználásával történő előrejelzésével foglalkozott Paál Anikó 1981-es munkájában (Paál, 1981). Napjaink egyik legújabb globálsugárzás-becsülő modelljének megalkotása Fodor Nándor és Mika János nevéhez köthető (Fodor and Mika, 2011; Fodor, 2012), ám modellfuttatásaikat nem hazai, hanem amerikai állomások adatai alapján végezték. Abból adódóan, hogy Magyarországra vonatkozó GR modellezéssel kapcsolatos kutatást a korábbiakban még nem végeztek, célul tűztük ki a különböző, szakirodalomban leggyakrabban említett globálsugárzás-becsülő módszerek magyarországi alkalmazhatóságának vizsgálatát.

A GR-rel kapcsolatos kutatásaink már régebbre nyúlnak. BSc szakdolgozatom kapcsán (Sürge, 2016) a Bristow-Campbell modell (Bristow and Campbell, 1984) alkalmazhatóságát vizsgáltuk a magyarországi Hegyhátsál kutatóállomás adatai alapján. A munka az eredeti modell, illetve a módszer kétféle paraméterbeállítású változatának vizsgálatából állt. Tudományos Diákköri Dolgozatomban (Sürge, 2017) a Bristow-Campbell modell mellett az MTCLim modellel (Thornton and Running, 1999) is foglalkoztunk, és a RadEst program (Donatelli et al., 2003) segítségével további négy eljárás alapján becsülhettük a GR értékét. A hegyhátsáli állomás adatait felhasználva optimalizálatlan és optimalizált modellfuttatásokat is végeztünk összesen 13 szimulált adatsorhoz jutva. Vizsgálatainkból kiderült, hogy megfelelő minőségű adatsorokat optimalizálás nélkül is elérhetünk, így adatsoraink származtatásánál a továbbiakban a kalibrációtól eltekintettünk. Munkánk legjelentősebb eredménye a 8 optimalizálatlan modellfuttatásunk átlagolásával kapott ún. Ensemble modell megalkotása volt, mely a hegyhátsáli állomást vizsgálva egyértelműen jobbnak bizonyult a többi eljáráshoz képest. A napi és havi szintű hibastatisztikák esetén is (a szisztematikus hibától eltekintve) az Ensemble modell bizonyult a legmegfelelőbbnek. A dolgozatban beláttuk, hogy hasonlóan jó eredményeket legkevesebb 4 kalibrálatlan modell átlagával kaphatunk, de ezen modellkombinációk egyikével sem érhető el jobb eredmény a 8 modell átlagából származtatott adatsor hibastatisztikáinál.

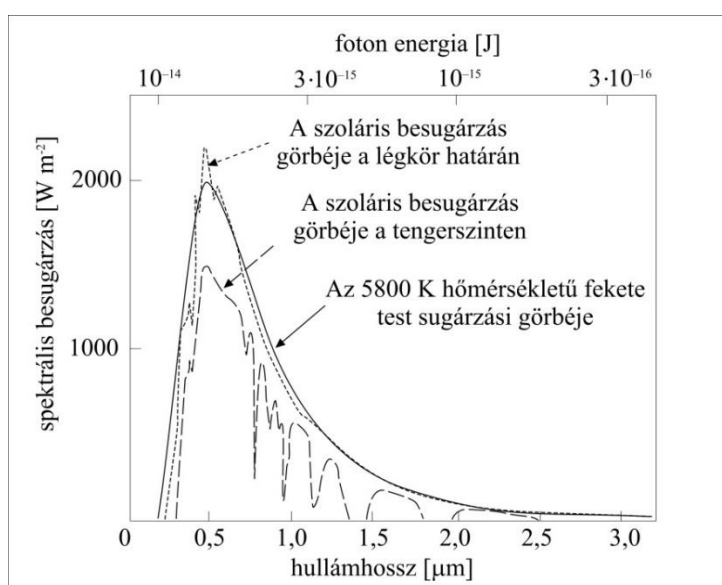
Az új módszer szükségszerűvé tette az országhatáron túlmenő vizsgálatok elvégzését is. Ezen vizsgálatok bemutatásával már a jelenlegi dolgozat foglalkozik. A kapott adatok minőségének vizsgálata globálisan, a lehető legkülönbözőbb éghajlatú és topográfiajú állomások kiválasztásával történt (amennyire ezt a globálsugárzás-mérő állomások területi eloszlása és az adatokhoz való hozzáférés megengedte), rámutatva az esetleges klíma és domborzat okozta különbségekre.

A dolgozatban ismertetjük a legfontosabb GR-becselő módszereket. Áttekintést adunk a globálsugárzással kapcsolatos hazai és nemzetközi kutatásokról. Bemutatjuk a munkánkhoz használt modelleket, a RadEst programot, valamint rövid ismertetést adunk az adatsorokat szolgáltató mérőállomásokról és a felhasznált adatokról. Eredményeinket napi és havi léptékű statisztikai vizsgálatnak vetettük alá, melyek ismertetésével a dolgozat második fele foglalkozik. A hibastatisztikák megfelelő értelmezéséhez azok nemzetközi viszonylatban elfoglalt helyzetét is megvizsgáltuk, nevezetesen más kutatók ugyanezen modellek felhasználásával származtatott értékeinek összehasonlításával.

## 2. Irodalmi áttekintés

### 2.1. Alapfogalmak

A Napból ultraibolya, látható és infravörös sugárzás formájában érkező energia a Föld éghajlati rendszerének irányítója. A sugárzási spektrum  $4\ \mu\text{m}$  alatti része a rövidhullámú sugárzási tartomány, s a beérkező sugárzás ( $0,15 - 4\ \mu\text{m}$ ) döntően erre a hullámhossztartományra koncentrálódik (1. ábra).



1. ábra. A Nap sugárzási spektruma, és gyengülése a légkörön való áthaladás során.

(Bartholy et al., 2011)

A felszínre érkező sugárzás mennyiségét számos tényező befolyásolja: elsődlegesen csillagászati tényezők (nappalok hossza, Nap beesési szöge), míg a sugárzás légkörön való áthaladása során a légköri gázok, a felhőzet és az aeroszol részecskék. A légkör felső határán a napsugárzás közel 30%-a visszaverődik, s a légkör peremét elérő sugárzásnak is csak egy része jut el a felszínre (1. ábra). A Napból származó sugárzás azon hányadát, amely elnyelődés és szóródás nélkül éri el a felszínt, direkt- vagy közvetlen sugárzásnak, míg a levegő molekuláival és különböző szennyező anyagok részecskéivel ütközve, ezáltal eltérülve a felszínt elérő részét diffúz vagy szórt sugárzásnak nevezzük (Tar, 2006). E kettő összegét a meteorológiai

szakirodalom globálsugárzásként ( $GR$ ) definiálja, s nagyságát a légkör felső határára érkező potenciális sugárzás ( $POT$ ), illetve a légköri transzmittancia ( $t_t$ ), azaz áteresztőképesség szorzataként származtatja:

$$GR = t_t \cdot POT \quad . \quad (1)$$

A potenciális sugárzás az az energiamennyiség, amely a Föld felszínét ténylegesen elnéve, ha az akadálytalanul, szóródás, visszaverődés és elnyelés nélkül haladna át a légkörön. Feltételezve, hogy a Nap sugárzása stacionárius, a Földre érkező sugárzási energia egyedül a Nap-Föld távolság függvényében változik. A Föld excentricitása nem jelentős: napközben (147 millió km) és naptávolban (152 millió km) egyaránt 3-3%-kal tér el az átlagtól (149,5 millió km; Bencze et al., 1982). Számításához a 2. egyenlet alkalmazható:

$$dd2 = 1 + 0,0334 \cdot \cos(0,01721 \cdot n - 0,0552) \quad , \quad (2)$$

ahol  $dd2$  a pillanatnyi és az átlagos Nap-Föld távolság négyzetes arányát kifejező tag,  $n$  pedig az időpont meghatározására szolgáló változó, nevezetesen az év napjának száma (január 1-jén 1, december 31-én 365).

Az elméletileg lehetséges felszínre érkező sugárzás mennyiségét az is befolyásolja, hogy a Föld felszínének különböző pontjain a Nap helyzete napi és éves szinten hogyan változik. Ezt a változást két szöggel jellemezhetjük. Az egyik a deklináció ( $\delta$ ), amely a forgástengely ferdeségéből adódóan  $-23,4^\circ$  és  $23,4^\circ$  között változik az év folyamán, a másik pedig az óraszög ( $h_s$ ), melyet nyugat-keleti irányban tekintünk pozitívnak. Számításuk egyaránt radiánban történik:

$$\delta = \phi_R \cos \left[ \frac{2\pi(n - n_r)}{n_y} \right] \quad , \quad (3)$$

$$h_s = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \phi) \quad . \quad (4)$$

A fenti egyenletekben szereplő  $\phi_R$  a Ráktérítő földrajzi szélessége ( $23,45^\circ = 0,409$  rad),  $n_r$  a nyári napforduló (június 21.) január 1-jétől számított sorszám ( $n_r = 173$ ),  $n_y$  az év napjainak átlagos száma ( $n_y = 365,25$ ),  $\phi$  pedig a földrajzi szélesség (Stull, 1988).

Mindezek alapján az *I.* egyenletben szereplő, a légkör tetejére érkező potenciális sugárzás a következő egyenlettel becsülhető:

$$POT = 117,5 \cdot dd2 \cdot (h_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(h_s)) / \pi \quad . \quad (5)$$

A felszín felé haladva az energia nem jut el akadálytalanul a talajra, veszteséget szenved (Bartholy et al., 2011). A sugárzásnak a földfelszín ténylegesen elérő hányadát a légkör sugárzásáteresztő képessége, azaz a légköri transzmittancia határozza meg.

A légkörön való áthaladás során elnyelés, szóródás és visszaverődés hatására a sugárzás gyengül. A legjelentősebb abszorpciós és reflexiós tényezők a különböző felszínek, de a levegőt alkotó gázok (oxigén, nitrogén, argon, ózon, vízgőz, szén-dioxid stb.) és lebegő szilárd vagy cseppfolyós aeroszol részecskék is egyaránt képesek a bejövő sugárzás elnyelésére és eltérítésére.

A vízcseppekből, jégkristályokból, illetve vegyes halmazállapotú graupelekből álló felhőzet a sugárzás legnagyobb befolyásoló tényezője, mely magas szóróképességével jelentősen módosítja a beérkező sugárzás mennyiségét.

A légköri gázok szelektív abszorpciójuk révén eltérően módosítják a bejövő sugárzást. Ez azt jelenti, hogy az egyes alkotók a sugárzás más és más hullámhossztartományának elnyelésére képesek. A rövidhullámú sugárzás szempontjából aktív molekulák a vízgőz és az ózon, kisebb szerepet játszik az oxigén, a metán és a szén-dioxid. A gázok nem csak elnyelésre képesek, a rajtuk való szóródás sem elhanyagolható. A rövidhullámú sugárzás mintegy 10 %-a szóródik a különböző molekulákon.

A légköri aeroszol részecskék a felhőelemekhez hasonlóan szórhatják és elnyelhetik a beérkező rövidhullámú sugárzást. A két folyamat közül az elnyelés a meghatározó, melynek mértéke szoros kapcsolatban áll az aeroszol részecskék méretével, illetve kémiai összetételével.

## 2.2. *Globálsugárzás-becslő módszerek a szakirodalomban*

A mezőgazdasági, biogeokémiai, hidrológiai illetve egyéb modellek használhatósága szempontjából alapvető fontosságú GR adatsorok csak korlátozott számú mérőállomásra vonatkozóan állnak rendelkezésre. Ezt súlyosbítja, hogy az elérhető adatsorok többsége sem teljes (Thornton and Running, 1999; Liu and Scott, 2001; Liu et al., 2009; Woli and Paz, 2012).



Éppen ezért a GR számszerű becslése meghatározó jelentőséggel bír. Származtatására az egyszerű empirikus kapcsolat feltételezésétől a bonyolult sugárzásátviteli sémák alkalmazásáig számos módszer született (Liu et al., 2009; Woli and Paz, 2012).

Általánosan alkalmazott eljárás a globálsugárzás sztochasztikus módszerek segítségével történő becslése. A sztochasztikus modellek alapja, hogy az adatok közti várható eltérések statisztikai átlagát a lehető legkedvezőbbre állítsák (pl. Nicks and Harp, 1980; Richardson and Wright, 1984; Hansen, 1999). Az állapothatározók (pl. napi hőmérséklet, vagy globálsugárzás (Nicks and Harp, 1980)) értékét sztochasztikus, véletlenszerű folyamatok révén, normális eloszlást feltételezve generálják. Ezek, bár a hosszabb időszakra vonatkozó átlagra jó közelítést adnak, nem determinisztikus modellek révén adott napra vonatkozó becsült értékeik nem megbízhatók (Goodin et al., 1999).

A legtöbb GR-becslő modell egyszerű gyakorlati megfontolások alapján a rendszeresen regisztrált meteorológiai állapothatározók felhasználásával származtatja a GR-t. Ezeket többek között a bemenő paraméterek szerint is csoportokba sorolhatjuk (Rivington et al., 2005; Liu et al., 2009; Woli and Paz, 2012). Megkülönböztethetünk hőmérséklet- és csapadékalapú, vagy e kettőt egyaránt bemenő paraméterként kezelő modelleket, de napfénytartamot igénylő módszerek is fellelhetők meteorológiai alkalmazásban (Rivington et al., 2005; Rivington et al., 2006; Trnka, 2007; Woli and Paz, 2012).

Széles körben alkalmazott módszer a GR hőmérsékleti adatok felhasználásával történő becslése. A globálsugárzás, a felhőborítottság és a hőmérséklet közötti szoros kapcsolat adja a hőmérséklet-alapú globálsugárzás-becslő módszerek alapfeltételezését, miszerint a maximum- és minimumhőmérsékletek felhasználásával becsülhető a légköri transzmittancia, így a GR értéke. A globálsugárzás területi eloszlását alapvetően két tényező befolyásolja: a földrajzi elhelyezkedés és a felhőzet mennyisége. A borultság és a napsugárzás kapcsolatával számos kutató foglalkozott, pl. Wagner (1927), Grunow (1958), Lauscher (1957), Takács and Zách (1960), vagy Nathan (1986). A két paraméter között alapvető fizikai kapcsolat van, mely közvetett módon a hőmérséklet napi menetével is összefügg. A felhőzet mennyisége és minősége érzékenyen befolyásolja a hőmérséklet napi menetét. Különösen nyáron nagy ez az érzékenység, mivel az eleve nagy besugárzás a felhőzet megjelenésekor lecsökken, ami hőmérséklet-csökkenést okoz. A hőmérséklet napi minimuma általában közvetlenül napkelte előtt jelentkezik, míg maximumát a Nap delelésétől számított 2 - 3 órán belül veszi fel. A megfigyelések alátámasztják, hogy felhőzet jelenléte esetén alacsonyabb a napi maximumhőmérséklet, és sok esetben magasabb a minimum, mint felhőmentes esetekben. Ennek oka, hogy mivel nagyobb a felhőborítás, kisebb a felszínre érkező sugárzásmennyiség.

Emiatt a felszín melegedése mérséklődik, amely a maximumhőmérséklet csökkenését eredményezi. Felhőzet jelenlétében az éjszakai hosszuhullámú sugárzás a visszaverődés miatt nem tud távozni, s az így visszamaradt energia a levegő melegítésére fordítódik. A felszínközeli levegő ebben az esteben nem tud annyira lehűlni, mint derült éjszakák során, s ezáltal a hajnali minimumhőmérséklet aránylag magasán marad.

Az egyik legkorábban megalkotott és leggyakrabban alkalmazott hőmérséklet-alapú módszer a Bristow and Campbell (1984) (továbbiakban BC84) modell. Ez a módszer képezi a későbbiekben megalkotott eljárások jelentős részének alapját. A BC84 modellt felhasználva létrehozott módszerek pl. a Ratkowsky (1990), a Donatelli and Campbell (1998), Goodin et al. (1999), a Meza and Varas (2000), vagy a Donatelli and Bellocchi (2001) modell, de szintén a hőmérséklet alapú módszerekhez sorolható a Hargreaves and Samani (1982), a Richardson (1985), vagy a Mahmood and Hubbart (2002) modell is.

A globálsugárzás-becslő modellek egy másik csoportja csapadékatatok segítségével becsli a globálsugárzást (pl. McCaskill, 1990), míg szintén nagyobb osztályt alkotnak a hőmérséklet- és csapadékatokat egyaránt felhasználó modellek. Ide sorolható pl. a De Jong and Stewart (1993), a Hunt et al. (1998), a Liu and Scott (2001), vagy a Wu et al. (2007) modell. Utóbbi kivételével mindegyik eljárás alapját a Richardson (1985) módszer képezi (Woli and Paz, 2012).

A napfénytartam felhasználásával alkotott módszerek kevésbé elterjedtek, és számuk sem meghatározó. A legrégebben kifejlesztett modell Ångström nevéhez köthető (Ångström, 1924), mely módszer szakirodalmi hivatkozása jelentős. A BC84 modellhez hasonlóan számos későbbi modell alapját képezi úgy, mint a Bahel et al. (1987), a Sen (2001), a Woodward et al. (2001), vagy a Rivington et al. (2002) tanulmányokban leírt módszerek.

Az összes előbbieken felsorolt, eltérő paraméterigényű modell közös jellemzője, hogy a GR nagyságát a légkör felső határára érkező potenciális sugárzás, illetve a légköri transzmittancia szorzataként származtatják az előző fejezetben ismertetett eljárás alapján (*I* - 5. egyenlet). A modellek különbözősége a transzmittancia származtatásában rejlik. Az egyes módszerek különböző hatások figyelembevételével más-más függvénykapcsolatot alkalmaznak a légköri transzmittancia meghatározására (*I. táblázat*). Ezek a modellek a napi maximum- és minimumhőmérséklet segítségével származtatják a légköri transzmittanciát, abból pedig a GR nagyságát (az *I.* egyenlet alapján). Más bemenő adatra sok esetben nincs is szükség, ami komoly előnyt jelent a komplexebb modellekkel szemben.

1. táblázat. A különböző paraméterigényű globálsugárzás-becslő modellek.

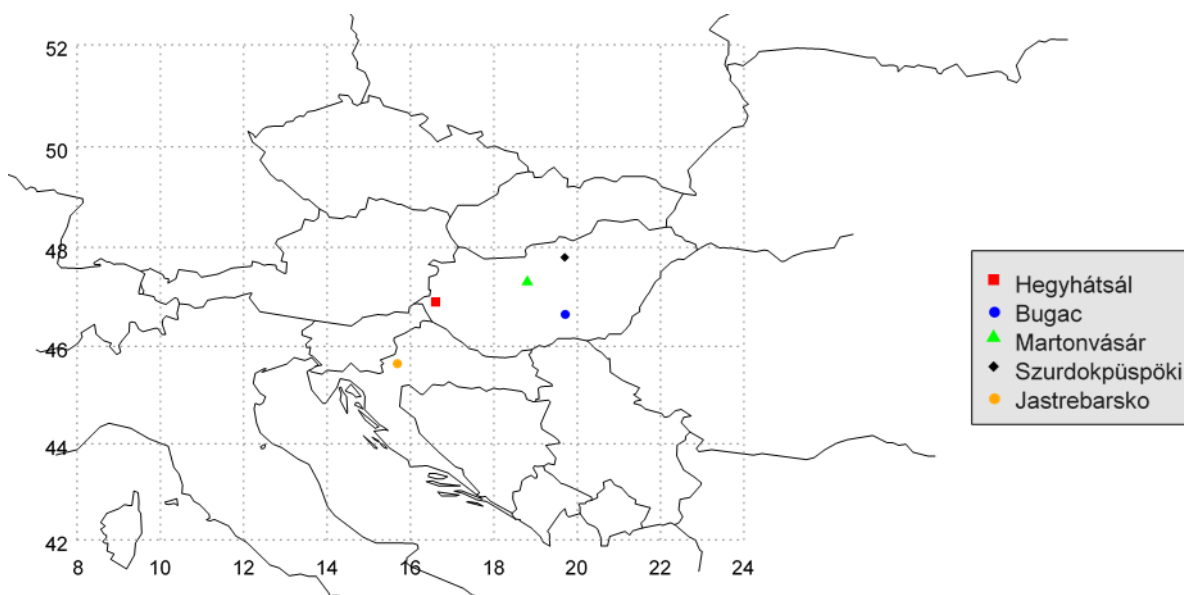
| Modell                         | Egyenlet<br>( $GR = t_t \cdot POT$ )   |      |
|--------------------------------|--|------|
| Bristow and Campbell (1984)    | $GR = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot \Delta T^c)) \cdot POT$   | (6)  |
| Ratkowsky (1990)               | $GR = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot \Delta T^{0.5} - c \cdot \Delta T - d \cdot \Delta T^2)) \cdot POT$                                       | (7)  |
| Donatelli and Campbell (1998)  | $GR = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot f(\bar{T}) \cdot \Delta T^2 \cdot f(T_{min}))) \cdot POT$   | (8)  |
|                                | $f(\bar{T}) = 0.017 \cdot \exp(\exp(-0,053 \cdot \bar{T}))$  | (9)  |
|                                | $f(T_{min}) = \exp\left(\frac{T_{min}}{T_{nc}}\right)$   | (10) |
|                                | $\bar{T} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2}$  | (11) |
| Goodin et al. (1999)           | $GR = a \cdot \left(1 - \exp\left(-b \cdot \frac{\Delta T^c}{POT}\right)\right) \cdot POT$   | (12) |
| Meza and Varas (2000)          | $GR = 0.75 \cdot (1 - \exp(-b \cdot \Delta T^2)) \cdot POT$  | (13) |
| Donatelli and Bellocchi (2001) | $GR = a \cdot (1 + f(i)) \left[1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T^2}{\Delta T_{week}}\right)\right] \cdot POT$                          | (14) |
|                                | $f(i) = C_1 \cdot \left[\sin\left(i \cdot C_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left(i \cdot f(C_2) \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right]$ | (15) |
|                                | $f(C_2) = 1 - 1,9 \cdot C_3 + 3,83 \cdot C_3^2$  | (16) |
|                                | $C_3 = C_2 - \text{integer}(C_2)$  | (17) |
| DCBB                           | $GR = a \cdot (1 + f(i)) \left[1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T^2 \cdot f(T_{min})}{\bar{\Delta T}}\right)\right] \cdot POT$          | (18) |
| Hargraves and Samani (1982)    | $GR = a + b \cdot \sqrt{\Delta T} \cdot POT$   | (19) |
| Richardson (1985)              | $GR = a \cdot \Delta T^b \cdot POT$  | (20) |
| Mahmood and Hubbard (2002)     | $GR = a \cdot \Delta T^b \cdot POT^c$  | (21) |
| McCaskill (1990)               | $GR = a \cdot POT + b \cdot P'_{i-1} + c \cdot P'_i + d \cdot P'_{i+1}$  | (22) |
| De Jong and Stewart (1993)     | $GR = a \cdot \Delta T^b (1 + c \cdot P + d \cdot P^2) \cdot POT$  | (23) |
| Hunt et al. (1998)             | $GR = a \cdot \sqrt{\Delta T} \cdot POT + b$   | (24) |
| Liu and Scott (2001)           | $GR = d + a(1 - \exp(-b \cdot \Delta T^c)) \cdot (1 + eP'_{i-1} + fP'_i + gP'_{i+1}) \cdot POT$  | (25) |
| Wu et al. (2007)               | $GR = (a + b \cdot \sqrt{\Delta T} + c \cdot \bar{T} + d \cdot P') \cdot POT$  | (26) |

$\Delta T$  – napi hőingás [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_{max}$  – napi maximumhőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_{min}$  – napi minimumhőmérséklet;  $\bar{T}$  – napi átlaghőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\bar{\Delta T}$  – napi hőingás havi átlaga [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\Delta T_{week}$  – napi hőingás heti átlaga [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $P$  – csapadék [mm];  $P'$  - esős nap (igen/nem), ha  $P' = 0$ , akkor  $P = 0$ , ha  $P' = 1$ , akkor  $P > 0$ ;  $i$  – időpont index;  $a, b, c, d, e, f, g, C_1, C_2, C_3, T_{nc}$  - modellparaméterek

### 3. Felhasznált adatok és módszerek

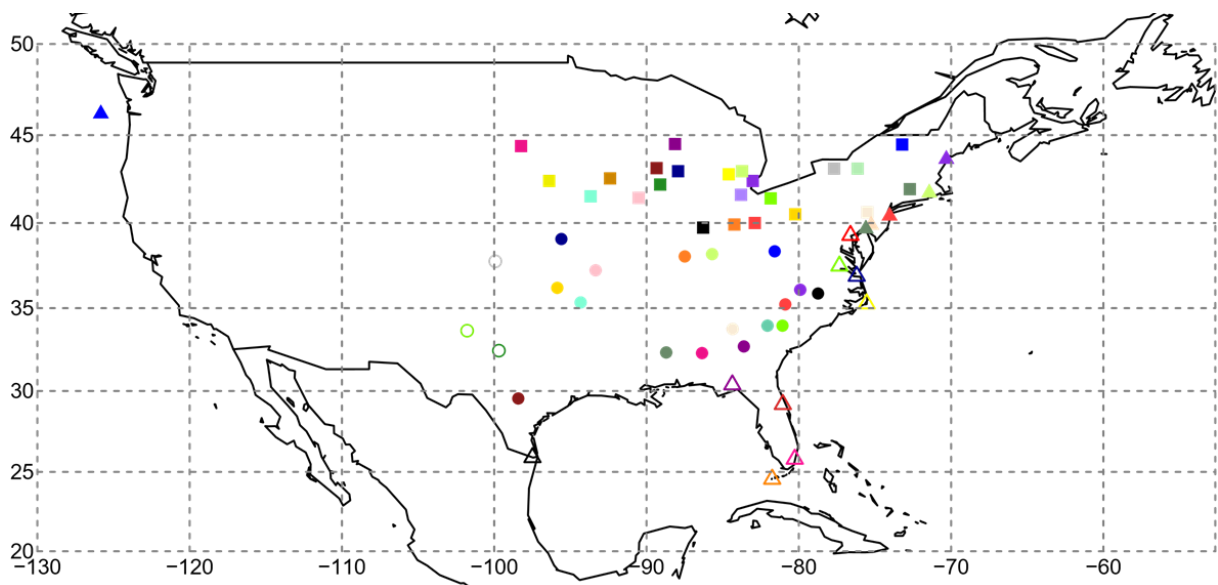
#### 3.1. Adatok

Munkánk során magyar, horvát és amerikai mérőállomások adatait vizsgáltuk. Magyarországon a globálsugárzás-mérés területi lefedettsége nem túl sűrű, s a hosszú időszakot felölelő adatsorokhoz való hozzáférés sem egyszerűen megvalósítható. 4 állomás (2. ábra) adataival dolgoztunk, nevezetesen Hegyhátsál, Martonvásár, Bugac és Szurdokpüspöki hőmérséklet, csapadék és globálsugárzás napi léptékű értékeivel. A vizsgált időszakok az egyes mérőállomások esetén eltérőek voltak. Modellfuttatásainkat Hegyhátsál 1997-2015, Martonvásár 2008-2016, Bugac 2003-2016, míg Szurdokpüspöki 2004-2015 között regisztrált adataival végeztük. Az adatsorok egyike sem volt teljes. A hiányzó értékeket a FORESEE adatbázis értékeivel pótoltuk, és ugyanezt az adatbázist alkalmaztuk a horvát mérőhely hiányzó értékei esetén is. Jastrebarskora vonatkozóan 9 év napi adatai lettek hozzáférhetők számunkra 2008-tól 2016-ig. Az adatbázis napi szintű maximum- és minimumhőmérséklet, illetve csapadékadatokat közöl.



2. ábra. A vizsgált európai állomások földrajzi elhelyezkedése.

Az USA esetén az állomások kiválasztásához a SAMSON adatbázist (SAMSON, 2009) használtuk. Az eredetileg 238 amerikai állomást tartalmazó adatbázis (Fodor and Mika, 2011) 58 mérőhelyével dolgoztunk. Kiválasztásuk legfőbb szempontja, hogy számításainkhoz kellő hosszúságú, lehetőleg hiánytalan adatsorokat biztosítsunk. Vizsgálatainkat az állomások mindegyikénél az 1961-1990 közötti időszak maximum- és minimumhőmérséklet, csapadék, valamint globálsugárzás adatainak felhasználásával végeztük. Az adatbázis kiváló adatforrás a becslési eljárás és az azt követő vizsgálatok elvégzésére. A különböző klímájú és földrajzi kitettségű területekről származó információ lehetővé tette az éghajlati összehasonlítást, s az erre vonatkozó következtetések felállítását.



3. ábra. A vizsgált amerikai állomások földrajzi elhelyezkedése.

Az amerikai állomások földrajzi elhelyezkedését a 3. ábra szemlélteti. A mérőhelyek az általunk definiált csoportoknak megfelelően külön jelöléssel lettek feltüntetve. A telt négyzetek a 40° szélességi kör felett, 400 méter tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő, 500-1000 mm átlagos éves csapadékösszeggel rendelkező állomásokat jelölik. Ezen állomások hasonlítanak klimatikus szempontból leginkább az európai mérőhelyekhez. Telt körökkel láttuk el azokat a pontokat, amelyek a 40° szélességi kör és 400 méter tengerszint feletti magasság alatt helyezkednek el, éves csapadékösszegük pedig 1000-1500 mm-re tehető. Az üres körök az utóbbival megegyező szélességi körhöz kötve, 400 métert meghaladó tengerszint feletti magassággal rendelkező városokat jelölik. Az előbbi csoportok mindegyikéből külön kiemeltük a tengerparti városokat, melyeket a háromszögek jelölnek. A telt és üres megkülönböztetés a 40° szélességi körtől vett elhelyezkedés függvényében történt.

A későbbi fejezetben bemutatott vizsgálatainkat az itt felállított csoportoknak megfelelően végeztük. A hibastatisztikákat az állomások egészét tekintve és azokat a definiált kategóriákra vonatkozóan, külön-külön is vizsgáltuk.

### 3.2. *A globálsugárzás modellezése*

A vizsgálatainkhoz használt modellek kiválasztásánál fontos szerepet játszott az adott modell széleskörű alkalmazhatósága, nemzetközi viszonylatban elfoglalt helyzete, valamint hazai vonatkozásai. Munkánk célja olyan modellek alkalmazása volt, melyek a legtöbb mérőállomást illetően viszonylag pontos értékeket becsülnek a GR-ra vonatkozóan. A 2.2. fejezetben ismertetett módszerek közül minimális adatigényük miatt a hőmérséklet alapú GR-becslő modellekre esett a választásunk. A hőmérséklet olyan meteorológiai alapparaméter, melyet minden mérőállomáson regisztrálnak, így becsült GR adatsorok előállítására minden állomás, valamint szabályos rácson közzétett interpolált adatbázis esetén is lehetséges.

A BC84 modell az egyik legkorábban megalkotott GR-becslő módszer, melyet széles körben alkalmaznak, és a hőmérséklet alapú modellek jelentős részének ez a modell képezi az alapját. Munkánkhoz tehát ésszerűnek tűnt ezen modell választása, amelynek vizsgálatára az ún. RadEst programon belül további három modellel (Donatelli and Campbell (1998), Donatelli and Bellocchi (2001), DCBB modell) együtt is lehetőségünk nyílt.

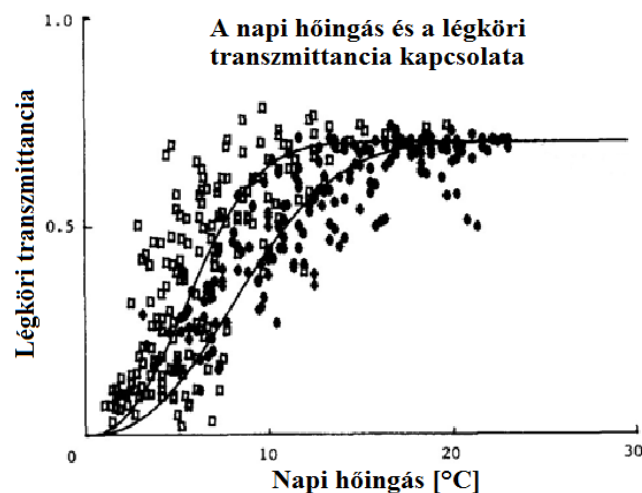
Hazai viszonylatban az MTCLim modell használata terjedt el, melyet főleg biogeokémiai folyamatok modellezésére alkalmaznak. Mivel az MTCLim modell itthoni alkalmazása meghatározó, vizsgálataink során ezt a módszert is felhasználtuk.

### 3.2.1. Bristow - Campbell modell

A BC84 modell célja egy jól definiálható függvénykapcsolat felállítása a transzmittancia és a napi hőingás között (4.ábra). A munka fő eredménye a légköri transzmittancia és a napi hőingás közti függvénykapcsolat meghatározása, melynek alakját az 1. táblázat (6. egyenlet) tartalmazza. Az transzmittancia egyenletben szereplő napi hőingás számításához a maximum- ( $T_{max}$ ) és minimumhőmérséklet ( $T_{min}$ ) felhasználásával a következő közelítéssel dolgoztak:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad . \quad (27)$$

Az ilyen módon meghatározható transzmittancia értéke az  $a$  paraméteren keresztül változik magasság és a levegő szennyezőanyag koncentrációja függvényében,  $b$  és  $c$  együtthatók segítségével pedig a formula figyelembe veszi levegő nedvességtartalmának változását is.  $a$  és  $c$  értékét a számítások során megfelelőnek tartották állandónak tekinteni, nagyságuk rendre 0,7 és 2,4.



4. ábra. A légköri transzmittancia és a napi hőingás éves kapcsolata a BC84 tanulmány szerint (Bristow and Campbell, 1984, a tanulmány 1. ábrája alapján).

A  $b$  paraméter a transzmittancia évszakos változékonyságát számszerűsíti, melynek ingadozásait a havi átlagos hőingással ( $\overline{\Delta T}$ ) hozták összefüggésbe:

$$b = 0,03 \cdot \exp(-0,154 \cdot \overline{\Delta T}) . \quad (28)$$

$b$  értékének meghatározásához a vizsgált időszakot a számításoknál két részre bontották: egy májustól októberig tartó „nyári”, valamint a megmaradt hónapokból álló „téli” időszakra. Ennek oka, hogy a két időszakot eltérő hőingás értékek jellemeznék: nyáron a rövid és meleg éjszakák miatt kisebb értékek jelentkeznek, míg a téli időszakban nagyobbak. Ez alapján  $b$  nagyságát a két periódusra vonatkozóan rendre 0,004-re és 0,01-ra állították.

A modell a GR-t a légkör tetejére érkező potenciális sugárzás és a légköri áteresztőképesség szorzataként származtatja, a 2.1. fejezetben már ismertetett eljárás alapján (1-5. egyenlet).

### 3.2.2. A RadEst program

A RadEst program egy, a GR becslésére használható Windows alkalmazás, melynek segítségével adott földrajzi szélességen, napi időléptékű adatok felhasználásával készíthetünk becslést a GR-ra vonatkozóan. A RadEst program lényegében a BC84 módszer továbbfejlesztésének tekinthető. Ebben az értelemben a GR nagyságát a légkör külső határára érkező potenciális sugárzás és a transzmittancia szorzataként származtatja a 2.1. fejezetben leírtaknak megfelelően (1 - 5. egyenlet). A légköri áteresztés meghatározására négy különböző módszer áll rendelkezésünkre a RadEst-en belül (Donatelli et al., 2003; Mavromatis and Jagtap, 2005), melyek mindegyike a BC84 módszerhez hasonlóan napi hőingás értékek felhasználásával számítja a transzmittancia értékét.

A program adott állomásra történő használatához szükséges a mérőhely földrajzi helyzetének (szélesség, hosszúság) és tengerszint feletti magasságának ismerete. A bemenő fájlok formátuma adott. A program fejléc nélküli, egy év napi adatait tartalmazó, 3, 4 vagy 7 változót szerepeltető ASCII formátumú fájlok beolvasását engedi. A RadEst megfigyelt GR-adatok nélkül, mindössze a napi maximum- és minimumhőmérsékletek, valamint csapadékadatok megadásával is hatékonyan működtethető. Abban az esetben, ha rendelkezésre állnak megfigyelések a GR-ra vonatkozóan, lehetőség van a mért és a becsült adatsorok

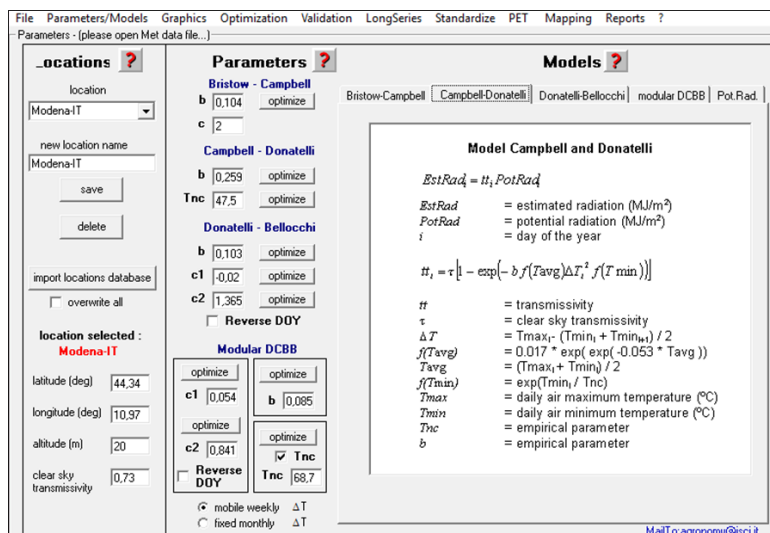


statisztikai összehasonlításra és grafikus megjelenítésére egyaránt. További változóként különböző nedvességkarakterisztikák (napi maximum és minimum relatív nedvesség értékek), illetve a szélesség adatok is megadhatók.

A felhasználóbarát felület (5. ábra) lehetővé teszi a beolvasott fájlok egyszerű kezelését, a modellparaméterek kalibrációját, potenciális evapotranszspiráció származtatását, illetve a kimenő adatok különböző formátummá exportálását (Donatelli et al., 2003). Az ablak tartalmazza a kiválasztott mérőhely legfontosabb adatait, a használandó módszerek leírásait és az adott állomásra illesztett paraméterek értékeit.

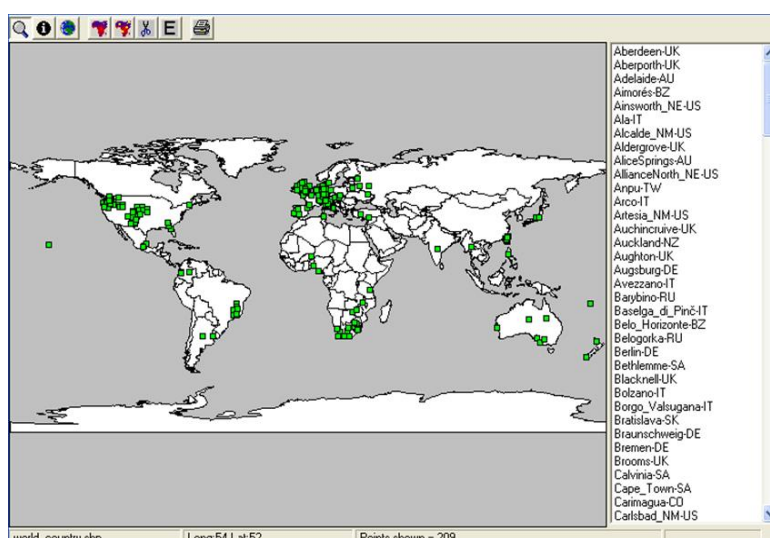
A RadEst által kínált GR-becslő módszerek a BC84 modell, a Campbell-Donatelli modell (továbbiakban CD; Donatelli and Campbell, 1998), a Donatelli-Bellocchi modell (továbbiakban DB; Donatelli and Bellocchi, 2001), illetve a Bristow-Campbell, valamint a Donatelli-Bellocchi modell ötvözéséből létrehozott DCBB modell (Donatelli et al., 2003; Mavromatis and Jagtap, 2005). Mind a CD, a DB és a DCBB modell transzmittanciára vonatkozó képletében fellelhetők a BC84 modelléhez hasonló elemek, ám különböző függvénykapcsolatok bevezetésével mindegyik másképp képes a légköri áteresztés becslésére (1. táblázat; 6., 8-11., 14-17., 18. egyenlet). Az egyes eljárások módszertana a következő fejezetekben (3.2.2.1. – 3.2.2.4. fejezet) kerülnek bemutatásra.

Ha rendelkezésre állnak megfigyelt GR adatok, úgy az egyes modellparaméterek értékei iteratív eljárással az adatsorhoz illeszthetők (ez a modellkalibráció, vagy más szóval paraméter optimalizáció). A programon belül több mint 200 mérőhely (6. ábra) földrajzi helyzetére vonatkozó információ (földrajzi szélesség és hosszúság, tengerszint feletti magasság, maximális transzmittancia), valamint állomásra kalibrált modellparaméter érhető el. Mindezek megadásával saját állomás létrehozására is van lehetőség. A becsült GR-adatsorok segítségével statisztikai mérőszámok származtathatók és jeleníthetők meg, melyek segítséget nyújtanak a becslés minőségének meghatározásához. A program segítségével az evapotranszspiráció is becsülhető, melyhez a Penman-Monteith (Monteith, 1965), vagy a Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972; Steiner et al., 1991) módszert használhatjuk a megfigyelt és becsült sugárzásadatok felhasználásával. A számított adatsorokat ASCII fájlként menthetjük, vagy további számítások elvégzéséhez Microsoft Excel formátumra is konvertálhatjuk.



5. ábra. A RadEst szoftver felhasználói felülete.

A RadEst szoftver bárki számára elérhető és interneten keresztül letölthető. A program használatához szükséges angol nyelvű részletes leírást a programcsomag tartalmazza. A négy felsorolt modell RadEst programon belüli alkalmazása egyszerű módja a GR adatsorok előállításának. A program egyetlen korlátja, hogy egyszerre csak egy év adataival képes dolgozni, így hosszabb időszakot felölelő adatsorok vizsgálata a RadEst-ben valamelyest időigényesebb. Emiatt a munkánk megkönnyítése érdekében a RadEst egyenleteit Fortran nyelven írt programmal rekonstruáltuk, és a továbbiakban ezzel dolgoztunk.



6. ábra. A RadEst regisztrált mérőhelyeinek földrajzi elhelyezkedése.

### 3.2.2.1. A BCR modell

Az eredeti BC84 tanulmányban kifejlesztett transzmittancia egyenlettől (1. táblázat; 6. egyenlet) eltérve a RadEst a  $\Delta T$  napi hőingás értékek adott hónapra vett átlagával bővíti az formula exponenciális tagját:

$$t_t = a \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-b \cdot \Delta T^c}{\Delta T}\right)\right) . \quad (29)$$

Míg a BC84 tanulmány a napi hőingás egyszerű maximum- és minimumhőmérsékletek különbségét tartalmazó közelítését javasolja (27. egyenlet), addig a RadEst program a maximumhőmérséklet és a két egymást követő nap hőmérsékleti minimumának átlagát felhasználva származtatja a  $\Delta T$  értékeit:

$$\Delta T = T_{max} - \frac{(T_{min,i} - T_{min,i+1})}{2} . \quad (30)$$

A  $b$  paraméter becslése megegyezik mindkét esetben (28. egyenlet), viszont a RadEst programban a tapasztalati együttható értékére  $c = 2$ -t javasolnak az eredeti BC84 modellben szereplővel ( $c = 2,4$ ) szemben. A különbségekből adódóan ezt a módszert a BC84 modelltől eltérő módszerként kezeltük, a dolgozatban a továbbiakban BCR jelöléssel használjuk

### 3.2.2.2. A CD modell

A CD modell a BC84 módszerhez hasonlóan a légköri transzmittancia nagyságát a napi hőingás értékek felhasználásával származtatja, viszont eltérő függvénykapcsolatok bevezetésével finomít annak értékén (1. táblázat; 8-11. egyenlet).

Új paraméterként bevezették a  $T_{nc}$  („summer night temperature factor”) együtthatót, amit a GR nyári alulbecslésének kiküszöbölésére állítottak fel (Bechini et al., 2000). Segítségével korrigálható a korábban kapott transzmittancia értéke, s így a globálsugárzás is. Magas  $T_{nc}$  értékek csökkentik a  $T_{min}$  hatását és fordítva. A paraméternek abban az esetben van jelentősége, ha a  $T_{min}$  értéke magas. Előfordulhat ugyanis, hogy nyáron a nagy besugárzás miatt a nappali erőteljes felmelegedést az éjszaka folyamán sem követ jelentős hőmérsékletcsökkenés, így a

$T_{min}$  is magas marad alacsony hőingást eredményezve. A modell viszont a kis hőingás miatt kevésbé hatékony légköri áteresztést feltételez (felhőzet jelenlétét érzékeli), és így habár a besugárzás jelentős volt, mégis alacsony GR értéket kapunk. Ha  $T_{min}$  alacsony, a  $T_{nc}$  paraméternek nincs jelentősége, ebben az esetben  $f(T_{min}) = 0$  (lásd. *1. táblázat*, *10.* egyenlet).

$b$  és  $T_{nc}$  paraméterek becslése a mért értékek felhasználásával egy kétlépcsős iteratív eljárás, melyeket a  $\Delta T_J$  júniusi, illetve a  $\Delta T_Y$  éves átlagos hőingás felhasználásával becsülhetünk. Számításukhoz egyaránt több éves adatsor szükségeltetik:

$$T_{nc} = 3,286 \cdot \exp\left(1,81 \cdot \frac{\Delta T_J}{\Delta T_Y}\right) , \quad (31)$$

$$b = -0,0134 \cdot \Delta T_J + 0,0063 \cdot T_{nc} + 0,26 . \quad (32)$$

### 3.2.2.3. A DB modell

A DB modell a transzmittancia és a napi hőingás közti évszakos eltérések figyelembevételével tér el az előző módszerektől, mely hatást a  $C_1$ ,  $C_2$ , és  $C_3$  évszakos változékonyságot reprezentáló tagok felhasználásával trigonometrikus egyenlet segítségével illesztettek a transzmittancia-képletbe. A módszer által leírt függvénykapcsolatokat az *1. táblázat 14-17.* egyenletei szemléltetik. A szezonális változás  $C_1 = 0$  beállítással elhagyható. A napi hőingás számítása megegyezik ez előző két modell által javasolt *30.* egyenlettel.

### 3.2.2.4. A DCBB modell

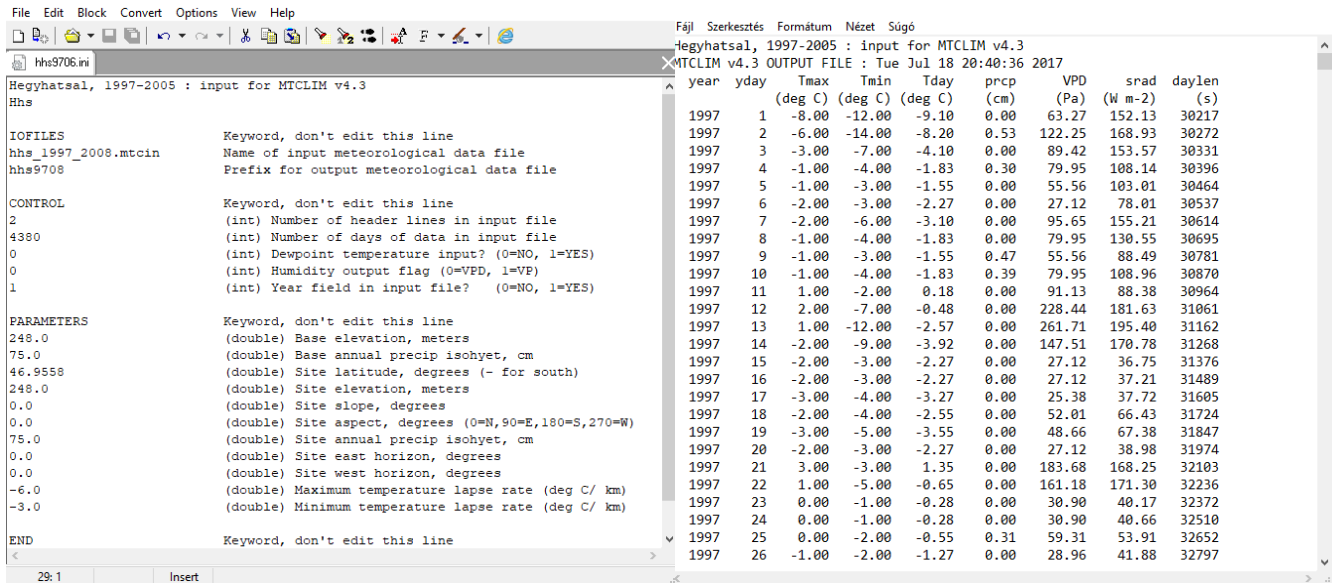
A DCBB módszerben a BCR, CD és DB modell elemei is egyaránt fellelhetők. A BCR módszerből kiindulva a DB modellben alkalmazott függvénykapcsolatok felhasználásával egy új transzmittancia-képletet alkottak (*1. táblázat; 18.* egyenlet). Felhasználja a CD modellben alkalmazott újítást, miszerint egy új függvénykapcsolat (*31.* egyenlet) bevezetésével csökkenthető a GR nyári alulbecslése, illetve fellelhetők a DB modellben felhasznált évszakos változékonyságot figyelembe vevő paraméterek is (*1. táblázat; 15 – 17.* egyenlet).

### 3.2.3. Az MTCLim modell

Az MTCLim modell alkalmazásának célja a meteorológiai állapotátározók adott állomásra vonatkozó értékeinek közelítése. A becslést extrapolációs eljárás segítségével, a mért adatok felhasználásával végzi a mérőhely karakterisztikáinak figyelembevételével (földrajzi elhelyezkedés, tengerszint feletti magasság, lejtőkiettség). Alapját a Thornton-Running modell (Thornton and Running, 1999; Thornton et al., 2000) képezi, melynek módszertana szintén a BC84 modelltől eredeztethető.

A modell bemenő paraméterként napi szintű maximum- és minimumhőmérsékleti, illetve csapadékadatokat igényel. Ezen felül az állomás földrajzi helyzetére és kiettségére vonatkozó információ megadása is elengedhetetlen. Az adatsor előállításánál fontos tudni, hogy a modell kizárólag 365 naptól álló évekkel számol. Szökőévek esetén ez számunkra az év utolsó napjának figyelmen kívül hagyását jelentette. A futtatásokhoz két fájl előállítása szükséges: az egyik az input fájl, amely tartalmazza a program futtatásához szükséges meteorológiai állapotátározók adott állomáson regisztrált értékeit. A másik pedig az inicializációs állomány, vagy INI fájl, amely a program legfontosabb beállításait tartalmazza. Ezen felhasználó által szerkeszthető fájjal készítjük fel a programot a mérőhelyre vonatkozó számítások elvégzésére. A program az itt megadott adatok felhasználásával működik, melyek az állomást és az input adatokat tartalmazó fájl egyaránt jellemzik. Az INI fájl egyszerű szövegszerkesztő programmal szerkeszthető.

A konfigurációs fájl felépítését a 7. ábrán keresztül mutatjuk be. A fájl szerkezetileg négy részre osztható: a fejlécre, a bemenő adatsor és az output fájl azonosítására szolgáló sorokra, az input fájlra vonatkozó információs szakaszra, illetve az állomás legfontosabb jellemzőit tartalmazó részre. Utóbbi három az, ami a program szempontjából a leglényegesebb információt hordozza. A bemenő fájl megfelelő kezeléséhez meg kell adnunk a fejléc és a tényleges adatsor hosszát, illetve rögzítenünk kell, hogy az adatsor tartalmaz-e harmadpontra és nedvességre vonatkozó adatokat. A legutolsó szakaszban az állomás tengerszint feletti magasságának, hosszabb időszakra átlagolt éves csapadékmennyiségének és földrajzi szélességének megadása szükséges. Ezen adatok leírásával az INI fájl futtatásra alkalmas.



7. ábra. Bal oldal: Az MTCLim modell futtatásához szüksége INI fájl felépítése.

Jobb oldal: A MTCLim modell output fájljának szerkezete.

A modell első lépésként a bemenő maximum- és minimumhőmérsékletek felhasználásával a napi transzmittancia értékeket származtatja. Mindezt a korábban bemutatott BC84 módszertanának megfelelően végzi. A Thornton-Running és a BC84 módszer közti hasonlóságot mutatja, hogy a légköri transzmittancia, valamint a napi hőingás meghatározása megegyezik (6. és 27. egyenlet). A modell figyelembe veszi a felhőzet mennyiségét, valamint a légkör vízgőz- és szennyezőanyag-tartalmát. A maximális áteresztőképesség minél jobb fizikai parametrizálása érdekében a módszer a légköri transzmittancia tér- és időbeli változékonyságának úgy, mint a légköri áteresztés földrajzi szélesség és magasságfüggésének vizsgálatát javasolja. A potenciális sugárzás, a hőmérséklet, a légköri vízgőztartalom és a csapadék figyelembevételével új függvénykapcsolatot alkottak a 6. egyenlet  $a$ -val jelölt, tiszta égbolt esetén tapasztalható maximális transzmittancia értékének meghatározására a légköri áteresztés minél pontosabb becslése érdekében. Ennek meghatározására szolgáló egyenlet alakja a következő:

$$a = \left[ \frac{\sum_{S=SR}^{SS} R_{POT,S} \cdot t_{z,\vartheta,wet}}{\sum_{S=SR}^{SS} R_{POT,S}} \right] + \alpha e \quad (33)$$

A 22. egyenlet számlálójának második tagja tartalmazza a pillanatnyi transzmittancia ( $t$ ) tengersiz feletti magasság ( $z$ ), földrajzi szélesség ( $\vartheta$ ), valamint a légköri nedvességtartalom

(wet) változásából adódó eltéréseit. Az egyenlet tartalmazza a felszín közeli gőznyomás nagyságát ( $e$ ) [Pa], melynek transzmittanciával való kapcsolatát az  $\alpha$  [Pa<sup>-1</sup>] együttható fejezi ki. A számlálóban és a nevezőben is szereplő összegzés adott  $s$  időpontban vett pillanatnyi potenciális sugárzás értékét jelöli ( $sr$  és  $ss$  a napkelte illetve napnyugta jelölése).

A BC84 modellben szereplő, a napi hőingás függvényében becsült  $t_t$  helyett egy új alakot definiáltak az áteresztőképesség kifejezésére. A légköri transzmittancia, illetve ennek adott napra vonatkozó maximumának arányát a  $t_f$  jelölés szimbolizálja. Számítása az alábbi egyenlettel történik:

$$t_f = \frac{t_t}{a} \quad . \quad (34)$$

$t_f$  alakja  $b$  és  $c$  empirikus paraméterek, valamint a napi hőingás felhasználásával exponenciális egyenletként a következő formában fejezhető ki:

$$t_f = 1 - 0,9 \cdot \exp(-b \cdot \Delta T^c) \quad . \quad (35)$$

A BC84 módszer gondolatmenetét követve a  $b$  együttható becslése a napi hőingás értékek havi átlagának  $\overline{\Delta T}$  felhasználásával történik. A  $b$  és  $\overline{\Delta T}$  közti kapcsolat  $b_0$ ,  $b_1$  és  $b_2$  tapasztalati együtthatók segítségével az alábbi egyenlet formájában áll elő:

$$b = b_0 + b_1 \cdot \exp(-b_2 \cdot \overline{\Delta T}) \quad . \quad (36)$$

$b$  és  $t_f$  parametrizálásához szükséges  $c$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  és  $b_2$  együtthatók egyaránt állandók.

A program következő lépésként a potenciális sugárzás számítását végzi az INI fájlban szerepeltetett állomásinformációk felhasználásával. Végül az ezek alapján kapott napi léptékű légköri transzmittancia és a potenciális sugárzás együttesével eljutunk a globálsugárzás számításához. A GR meghatározására szolgáló végleges formula a légkör tetejére érkező potenciális sugárzás, a maximális transzmittancia, illetve az adott napra vonatkozó átlagos és a maximális áteresztés hányadosaként kifejezett  $t_f$  felhasználásával írható fel:

$$RG = POT \cdot a \cdot t_f \quad . \quad (37)$$

A két modell közti különbség ott is megmutatkozik, hogy míg a BC84 módszer adott helyre vonatkozóan meghatározott paraméterek alapján becsli a globálsugárzást, addig a Thornton-Running modell a paraméterek helyről helyre történő kalibrálása nélkül is viszonylag pontos eredményt szolgáltat különböző éghajlatú területek mérőállomásai esetén

Az MTCLim modell nem csupán GR értékeket szolgáltat (6. ábra). A globálsugárzáson túl az output fájl a nappali átlaghőmérsékletet ( $T_{day}$ ), a gőznyomás deficitet ( $VPD$ ) és másodpercekre alakítva a nap hosszát is kiszámítja.

### 3.3. Elemzési módszerek

A megfigyelések és az alkalmazott modellek alapján becsült eredmények közötti kapcsolat számszerűsítésére különböző statisztikai módszereket használtunk. Mindegyik modellkísérlet esetén származtattuk a lineáris korrelációs együttható négyzetét ( $R^2$ ), az átlagos hibát (*bias*), a négyzetes középérték hibát (*RMSE*), illetve a modelling efficiency (*ME*) értékét (Janssen and Heuberger, 1995).

Az átlagos hiba, más néven *bias* vagy szisztematikus hiba a mért és a modellezett értékpárok különbségének átlagaként állítható elő. Számítása a következő egyenlettel történik:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i). \quad (38)$$

Az egyenletben szereplő  $x_i$  a becsléssel meghatározott,  $y_i$  a mérésből származó értékeket,  $n$  pedig az adatpárok számát jelöli. A modellezett érték átlagos pontosságát adhatjuk meg a metrikával. Felülbecslés esetén pozitív, míg alulbecslés esetén negatív értéket vesz fel. A mért és becsült adatsorok tökéletes egyezésekor értéke nulla.

Az átlagos négyzetes hiba (angolul "mean squared error", *MSE*) a mért és modellezett értékpárok különbségének, azok négyzetes összegének az adatpárok számával vett hányadosaként számolható. Vizsgálataink során ennek négyzetgyökét, a négyzetes középértékhibát (angolul "root mean squared error", *RMSE*) származtattuk (lásd pl. Ma et al., 2011):



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (39)$$

Értéke nulla és plusz végtelen között változhat, és az előzőekhez hasonlóan nullát ad tökéletes modell esetén.

Két adatsor közötti lineáris kapcsolat szemléltetésének egyik lehetséges módja az  $R^2$  értékének meghatározása. A lineáris korrelációs együttható az adatsorok közötti szóráson alapszik, ennek négyzetre emelésével számítható az  $R^2$ :

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2, \quad (40)$$

ahol  $\bar{x}$  és  $\bar{y}$  a becült és mért értékek átlagát jelöli. Az együttható értéke 0 és 1 közötti szám lehet. Minél jobban közelít az értéke 1-hez, annál nagyobb a két adatsor közti lineáris összefüggés. Az  $R^2$  alapján számított százalékkérték megmutatja, hogy a modell milyen arányban tudja magyarázni a megfigyelésekben lévő változékonyságot (angolul „explained variance”).

A modellhatékonyság a Nash-Sutcliffe-féle modeling efficiency ( $ME$ ) számításával adható meg. Az  $ME$  mínusz végtelen és 1 közötti értéket vehet fel. Minél közelebb van 1-hez, annál jobb a modell:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (41)$$

Az  $ME$  érdekessége, hogy ha az értéke nulla, akkor a megfigyelések átlaga pont olyan jó prediktora az adott mennyiségnek, mint a modell. Negatív  $ME$  esetén a megfigyelések átlaga jobb prediktor, mint a modell.

### 3.4. Adatfeldolgozás és modellszimuláció

Vizsgálataink során magyar, horvát és amerikai állomások adatsoraival dolgoztunk. Hőmérséklet, csapadék és globálsugárzás adatokat felhasználva célunk, hogy a rendelkezésre álló adatsorok segítségével becslést adjunk a globálsugárzásra vonatkozóan, majd a modellfuttatások eredményeit a referenciaként használt mért GR adatsorokkal összevetve számszerűsítsük a becslés hatékonyságát.

Munkánk során 9 modellfuttatást végeztünk, melyekhez az előzőekben bemutatott BC84 és MTCLim modelleket, valamint a RadEst program által kínált módszereket alkalmaztuk. Szimulációinkat Fortran programnyelv, valamint Microsoft Excel segítségével futtattuk és vizsgáltuk. Az MTCLim modell becslés adatsorait az MTCLim 4.3-as verziójával készítettük.

#### 3.4.1. Modellszimulációk a BC84 modellel

A 3.2.1. fejezetben leírt módszertan alapján a BC84 modellt felhasználva három modellfuttatást végeztünk a 6. egyenletben szereplő  $b$  paraméter becslésének függvényében. Az első esetben az eredeti tanulmányban javasolt  $b$  értékekkel számoltunk. Ehhez a teljes adatsort két részre osztva egy téli (november-április) és egy nyári (május-október) időszakkal számoltunk. A tanulmány alapján a téli hónapokban 0,01-et, a nyári időszakban pedig 0,004-et helyettesítettünk transzmittancia egyenlet  $b$  együtthatójának helyére, s ezeket az értékeket alkalmaztuk minden állomás esetén. Az így származtatott GR adatsorokat a továbbiakban BC84/1 jelöléssel használjuk.

A BC84 modell további futtatásai a 28. egyenlet  $\overline{\Delta T}$  értékének származtatásában tértek el egymástól. A második modellfuttatás esetén is alkalmaztuk az adatsorok két időszakra való felosztását, de a paraméter értékét a mérőállomás hőmérsékleti adatainak felhasználásával, a két időszakra jellemző átlagos hőingás számításával becsültük. Az egyes állomások esetén így értelemszerűen eltérő értékeket kaptunk, de a BC84/1 futtatáshoz hasonlóan a kapott két darab  $b$  értékkel számoltunk minden év esetén az időszakos felosztás figyelembevételével. A módszerrel becsült GR adatsorok a későbbiekben BC84/2 jelöléssel szerepelnek.

A BC84 modell harmadik futtatásához havi szinten vizsgáltuk a 6. egyenlet  $b$  paraméterének változását. A vizsgált időszak egyes hónapjait együtt kezelve meghatároztuk a teljes időszak alatt az adott hónapra jellemző átlagos hőingást. Ezzel a  $b$  paraméterre 12 becsült

érték adódott. Az ezek felhasználásával végzett modellfuttatások eredményét a továbbiakban BC84/3 jelöli.

A BC84 modellel történő számítások mindegyikénél  $a = 0,7$ , illetve  $c = 2,4$  értékeket használtuk a transzmittancia, majd abból a GR adott napra vonatkozó értékének meghatározásához.

### *3.4.2. Modellszimulációk a RadEst szoftverrel*

A RadEst program által kínált GR-becslő módszerek felhasználásával további becült adatsorokat gyártottunk. Korábbi munkámban (Sürge, 2016) Hegyhátsál paramétereinek megadásával a programon belül kalibrálatlan és kalibrált modellfuttatásokat is végeztünk. Az ehhez köthető vizsgálataink, melyről a dolgozatban részletesen olvashatunk, rámutattak, hogy optimalizálás nélkül is megfelelő minőségű adatokhoz juthatunk, így az újabb számolások esetén ettől eltekintettük.

A RadEst programról szóló fejezetben (3.2.2. fejezet) megemlítettük, hogy a programon belül a világ számos mérőállomására vonatkozóan optimalizált paraméterértékek állnak rendelkezésünkre (lásd. 4. ábra). Kalibrálatlan futtatásainkhoz az egyes modellek együttthathóinak regisztrált állomásokhoz tartozó értékeit vizsgáltuk. A célunk az volt, hogy az egyes modellek esetén globálisan használható, általánosított paraméterezés adjunk (ennek eredményével bővebben a 4.1. fejezetben foglalkozunk). A kapott értékek felhasználásával minden állomás esetén négy becült GR adatsorhoz jutottunk. Ezek a későbbiekben BCR, CD, DB és DCBB jelöléssel szerepelnek az alkalmazott modelleknek megfelelően.

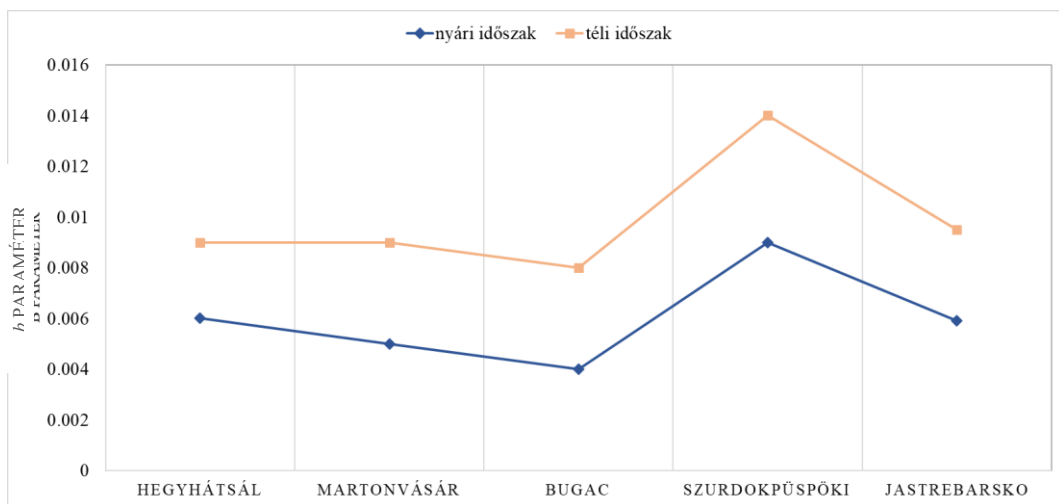
### *3.4.3. Modellszimuláció az MTCLim modellel*

Az MTCLim modellt a 3.2.3. fejezetben leírt módszertan alapján futtattuk. Az MTCLim modell 4.3-as verzióját használtuk, ami felhasználja az adott állomásra vonatkozó napi léptékű hőmérséklet- és csapadékadatokat. A modellszimuláció eredményeként kapott adatsort MTCLim jelöli.

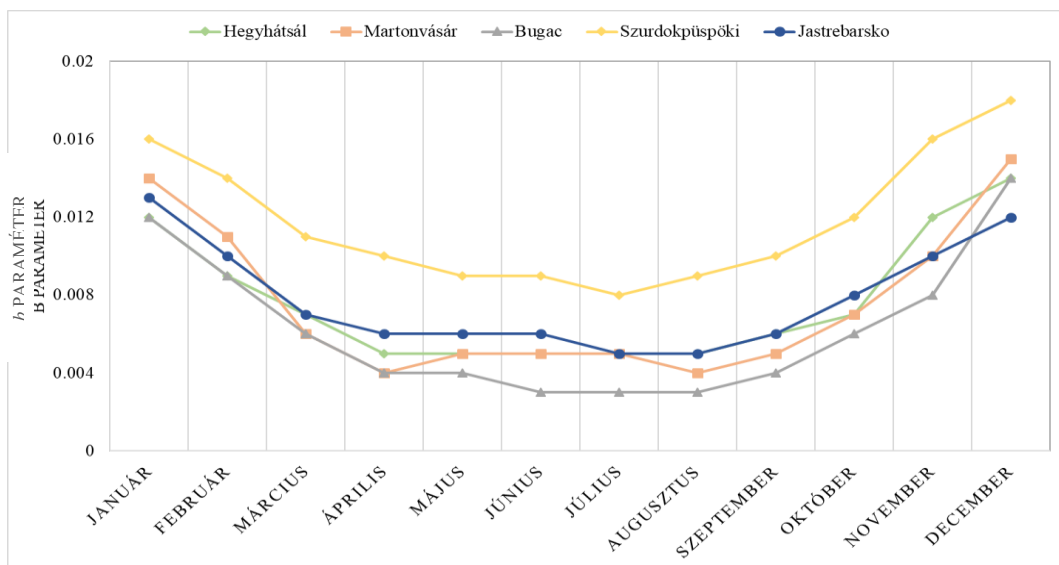
## 4. Eredmények

### 4.1. A BC84 modell paraméterezése

A 3.4.1. fejezetben ismertetett BC84/2 módszerrel történő modellfuttatások paraméterezésének európai állomásokra vonatkozó eredményeit a 8. ábra szemlélteti. A két időszakra való bontás kapcsán a mérőhelyek közti eltérés nem volt számottevő, egyedül Szurdokpüspöki esetén tapasztaltunk kissé magasabb időszakos  $b$  paramétereket.



8. ábra. A BC84/2 modell közép-európai állomásokra vonatkozó  $b$  paraméterértékei



9. ábra. A BC84/3 modell közép-európai állomásokra vonatkozó  $b$  paraméterértékei.

A 9. ábrán a közép-európai állomások BC84/3 modellfuttatások esetén alkalmazott  $b$  paraméter havi értékei láthatók. Megfigyelhető, hogy a mérőhelyek mindegyikénél a téli hónapokban adódtak magasabb paraméterértékek, míg a nyári hónapokat a legkisebb értékek jellemezték. Mint ahogy a két időszakos bontás ábráján is megfigyelhető volt (8. ábra) úgy itt is elmondható, hogy Szurdokpüspöki adatsora az egész évre vonatkozóan minden állomásnál magasabb értékeket mutatott.

Az amerikai állomások meghatározott  $b$  paramétereit táblázatos formában mutatjuk be. A BC84/2 modell esetén alkalmazott értékeket a 2. táblázat szerepelteti, a 3.1. fejezetben bemutatott állomáscsoportoknak megfelelően (lásd 3. ábra).

2. táblázat. A BC84/2 modell amerikai állomásokra vonatkozó  $b$  paraméterértékei.

| Földrajzi szélesség > 40°<br>Tengerszint feletti magasság < 400 m |               |              | Földrajzi szélesség < 40°<br>Tengerszint feletti magasság < 400 m |               |              | Óceánparti városok<br>Földrajzi szélesség > 40° |               |              |
|---|---------------|--------------|---|---------------|--------------|---|---------------|--------------|
|   | Nyári időszak | Téli időszak |   | Nyári időszak | Téli időszak |   | Nyári időszak | Téli időszak |
| Allentown   | 0,007         | 0,009        | Athens  | 0,007         | 0,006        | Astoria   | 0,011         | 0,013        |
| Burlington  | 0,008         | 0,010        | Atlanta   | 0,008         | 0,007        | Atlantic City                                   | 0,006         | 0,007        |
| Columbus  | 0,006         | 0,009        | Charleston  | 0,006         | 0,007        | Portland  | 0,007         | 0,009        |
| Cleveland   | 0,008         | 0,010        | Charlotte   | 0,007         | 0,007        | Providence                                      | 0,008         | 0,009        |
| Dayton  | 0,007         | 0,009        | Columbia  | 0,006         | 0,005        | Philadelphia                                    | 0,008         | 0,009        |
| Des Moines  | 0,007         | 0,008        | Evansville  | 0,006         | 0,008        | Wilmington                                      | 0,008         | 0,009        |
| Detroit   | 0,006         | 0,010        | Forth Smith   | 0,005         | 0,006        | Földrajzi szélesség < 40°                       |               |              |
| Flint   | 0,006         | 0,010        | Greensboro  | 0,007         | 0,006        | Baltimore                                       | 0,006         | 0,005        |
| Green Bay   | 0,006         | 0,010        | Louisville  | 0,007         | 0,008        | Brownsville                                     | 0,006         | 0,009        |
| Hartford  | 0,006         | 0,008        | Macon Lewis   | 0,006         | 0,005        | Cape Hatteras                                   | 0,013         | 0,011        |
| Huron   | 0,004         | 0,007        | Meridian  | 0,005         | 0,005        | Daytona Beach                                   | 0,01          | 0,007        |
| Indianapolis  | 0,006         | 0,009        | Montgomery  | 0,006         | 0,006        | Key West  | 0,019         | 0,018        |
| Lansing   | 0,006         | 0,010        | Raleigh Durham  | 0,007         | 0,006        | Miami   | 0,013         | 0,011        |
| Madison   | 0,005         | 0,008        | San Antonio   | 0,007         | 0,006        | Norfolk   | 0,010         | 0,009        |
| Moline  | 0,006         | 0,008        | Springfield   | 0,006         | 0,007        | Richmond  | 0,006         | 0,006        |
| Milwaukee   | 0,008         | 0,011        | Topeka  | 0,006         | 0,006        | Tallahassee                                     | 0,006         | 0,004        |
| Pittsburgh  | 0,007         | 0,009        | Tulsa   | 0,007         | 0,006        |   |               |              |
| Rockford  | 0,006         | 0,009        | Tengerszint feletti magasság > 400 m                              |               |              |   |               |              |
| Rochester   | 0,007         | 0,010        | Abeline   | 0,006         | 0,005        |   |               |              |
| Sioux City  | 0,006         | 0,007        | Dodge City  | 0,005         | 0,005        |   |               |              |
| Syracuse  | 0,007         | 0,010        | Lubbock   | 0,005         | 0,004        |   |               |              |
| Toledo  | 0,006         | 0,009        |   |               |              |   |               |              |
| Waterloo  | 0,006         | 0,008        |   |               |              |   |               |              |

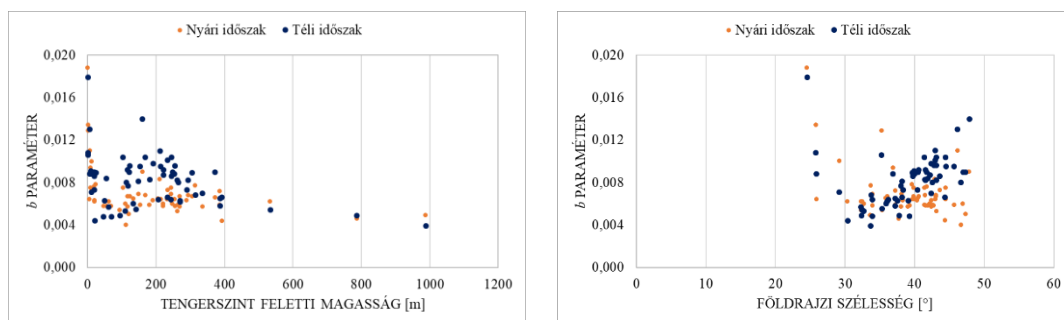
3. táblázat. A BC84/3 modell amerikai állomásokra vonatkozó b paraméterértékei.

|                     | Január  | Február | Március | Április | Május | Június | Július | Augusztus | Szeptember | Október | November | December |
|---------------------|---|---------|---------|---------|-------|--------|--------|-----------|------------|---------|----------|----------|
|                     | Földrajzi szélesség > 40°; tengerszint feletti magasság < 400 m |         |         |         |       |        |        |           |            |         |          |          |
| <b>Allentown</b>    | 0,011   | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,007  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,007   | 0,009    | 0,011    |
| <b>Burlington</b>   | 0,009   | 0,008   | 0,009   | 0,007   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,007     | 0,007      | 0,008   | 0,012    | 0,011    |
| <b>Columbus</b>     | 0,01  | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,011    |
| <b>Cleveland</b>    | 0,011   | 0,011   | 0,009   | 0,008   | 0,007 | 0,007  | 0,007  | 0,008     | 0,008      | 0,008   | 0,011    | 0,013    |
| <b>Dayton</b>       | 0,01  | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,007   | 0,009    | 0,011    |
| <b>Des Moines</b>   | 0,009   | 0,008   | 0,008   | 0,006   | 0,007 | 0,007  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,006   | 0,009    | 0,01     |
| <b>Detroit</b>      | 0,011   | 0,01    | 0,009   | 0,007   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,007      | 0,007   | 0,01     | 0,012    |
| <b>Flint</b>        | 0,011   | 0,01    | 0,009   | 0,007   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,007      | 0,008   | 0,011    | 0,013    |
| <b>Green Bay</b>    | 0,01  | 0,009   | 0,007   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,007      | 0,008   | 0,011    | 0,011    |
| <b>Harthford</b>    | 0,009   | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,005 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,01     |
| <b>Huron</b>        | 0,006   | 0,007   | 0,007   | 0,005   | 0,005 | 0,005  | 0,004  | 0,004     | 0,004      | 0,004   | 0,007    | 0,007    |
| <b>Indianapolis</b> | 0,009   | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,011    |
| <b>Lausling</b>     | 0,011   | 0,01    | 0,009   | 0,007   | 0,005 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,007   | 0,011    | 0,012    |
| <b>Madison</b>      | 0,009   | 0,008   | 0,008   | 0,006   | 0,005 | 0,005  | 0,005  | 0,005     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,01     |
| <b>Moline</b>       | 0,009   | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,01     |
| <b>Milwaukee</b>    | 0,011   | 0,011   | 0,011   | 0,009   | 0,007 | 0,007  | 0,009  | 0,009     | 0,009      | 0,009   | 0,011    | 0,012    |
| <b>Pittsburgh</b>   | 0,011   | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,007   | 0,01     | 0,011    |
| <b>Rockford</b>     | 0,009   | 0,009   | 0,009   | 0,006   | 0,005 | 0,006  | 0,007  | 0,006     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,01     |
| <b>Rochester</b>    | 0,012   | 0,01    | 0,009   | 0,007   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,007     | 0,007      | 0,008   | 0,011    | 0,013    |
| <b>Sioux City</b>   | 0,007   | 0,008   | 0,007   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,005   | 0,007    | 0,008    |
| <b>Syracuse</b>     | 0,01  | 0,009   | 0,009   | 0,007   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,007     | 0,007      | 0,008   | 0,011    | 0,012    |
| <b>Toledo</b>       | 0,011   | 0,01    | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,005  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,006   | 0,009    | 0,012    |
| <b>Waterloo</b>     | 0,008   | 0,008   | 0,008   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,006   | 0,008    | 0,009    |

4. táblázat. A BC84/3 modell amerikai állomásokra vonatkozó b paraméterértékei.

|                | Január  | Február | Március | Április | Május | Június | Július | Augusztus | Szeptember | Október | November | December |
|----------------|---|---------|---------|---------|-------|--------|--------|-----------|------------|---------|----------|----------|
|                | <b>Földrajzi szélesség &lt; 40°; tengersizint feletti magasság &lt; 400 m</b> |         |         |         |       |        |        |           |            |         |          |          |
| Athens         | 0,007   | 0,006   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,007  | 0,008  | 0,008     | 0,008      | 0,006   | 0,006    | 0,007    |
| Atlanta        | 0,008   | 0,007   | 0,006   | 0,006   | 0,007 | 0,008  | 0,008  | 0,009     | 0,008      | 0,007   | 0,007    | 0,008    |
| Charleston     | 0,009   | 0,008   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,006   | 0,007    | 0,009    |
| Charlotte      | 0,008   | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,007  | 0,008  | 0,008     | 0,008      | 0,006   | 0,006    | 0,008    |
| Columbia       | 0,006   | 0,005   | 0,004   | 0,004   | 0,005 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,006      | 0,004   | 0,004    | 0,005    |
| Evansville     | 0,009   | 0,008   | 0,007   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,006     | 0,006      | 0,005   | 0,008    | 0,009    |
| Forth Smith    | 0,006   | 0,006   | 0,005   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,005     | 0,006      | 0,004   | 0,005    | 0,006    |
| Greensboro     | 0,007   | 0,006   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,007  | 0,007  | 0,008     | 0,007      | 0,006   | 0,006    | 0,007    |
| Louisville     | 0,009   | 0,008   | 0,007   | 0,006   | 0,007 | 0,007  | 0,008  | 0,007     | 0,007      | 0,006   | 0,008    | 0,01     |
| Macon Lewis    | 0,006   | 0,005   | 0,005   | 0,005   | 0,005 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,005   | 0,005    | 0,006    |
| Meridian       | 0,006   | 0,005   | 0,005   | 0,004   | 0,005 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,004   | 0,005    | 0,006    |
| Montgomery     | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,005   | 0,005    | 0,006    |
| Raleigh Durham | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,008     | 0,007      | 0,005   | 0,006    | 0,007    |
| Springfield    | 0,007   | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,005   | 0,007    | 0,008    |
| San Antonio    | 0,006   | 0,005   | 0,006   | 0,006   | 0,008 | 0,008  | 0,008  | 0,007     | 0,007      | 0,006   | 0,006    | 0,006    |
| Topeka         | 0,007   | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,007  | 0,006  | 0,006     | 0,005      | 0,005   | 0,006    | 0,008    |
| Tulsa          | 0,007   | 0,006   | 0,006   | 0,006   | 0,007 | 0,007  | 0,007  | 0,006     | 0,007      | 0,005   | 0,007    | 0,007    |
|                | <b>Földrajzi szélesség &lt; 40°; tengersizint feletti magasság &gt; 400 m</b> |         |         |         |       |        |        |           |            |         |          |          |
| Abeline        | 0,005   | 0,005   | 0,005   | 0,006   | 0,006 | 0,006  | 0,006  | 0,006     | 0,007      | 0,006   | 0,006    | 0,006    |
| Dodge City     | 0,005   | 0,005   | 0,004   | 0,004   | 0,005 | 0,005  | 0,004  | 0,005     | 0,005      | 0,004   | 0,005    | 0,006    |
| Lubbock        | 0,004   | 0,004   | 0,003   | 0,004   | 0,004 | 0,005  | 0,006  | 0,006     | 0,006      | 0,004   | 0,004    | 0,004    |
|                | <b>Földrajzi szélesség &gt; 40°; óceánparti városok</b>                       |         |         |         |       |        |        |           |            |         |          |          |
| Astoria        | 0,015   | 0,013   | 0,011   | 0,011   | 0,011 | 0,012  | 0,011  | 0,011     | 0,009      | 0,01    | 0,013    | 0,015    |
| Atlantic City  | 0,008   | 0,008   | 0,007   | 0,007   | 0,007 | 0,007  | 0,008  | 0,008     | 0,007      | 0,006   | 0,007    | 0,008    |
| Portland       | 0,008   | 0,008   | 0,009   | 0,008   | 0,007 | 0,007  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,007   | 0,01     | 0,009    |
| Providence     | 0,009   | 0,009   | 0,009   | 0,008   | 0,007 | 0,007  | 0,008  | 0,008     | 0,008      | 0,007   | 0,009    | 0,01     |
| Philadelphia   | 0,011   | 0,01    | 0,008   | 0,007   | 0,007 | 0,007  | 0,008  | 0,008     | 0,008      | 0,007   | 0,009    | 0,011    |
| Wilmington     | 0,01  | 0,009   | 0,008   | 0,007   | 0,007 | 0,008  | 0,008  | 0,009     | 0,008      | 0,007   | 0,009    | 0,01     |
|                | <b>Földrajzi szélesség &lt; 40°; óceánparti városok</b>                       |         |         |         |       |        |        |           |            |         |          |          |
| Brownsville    | 0,008   | 0,008   | 0,008   | 0,009   | 0,011 | 0,01   | 0,009  | 0,009     | 0,01       | 0,008   | 0,008    | 0,008    |
| Baltimore      | 0,01  | 0,009   | 0,007   | 0,006   | 0,006 | 0,007  | 0,007  | 0,008     | 0,007      | 0,006   | 0,008    | 0,009    |
| Cape Hatteras  | 0,011   | 0,01    | 0,01    | 0,01    | 0,012 | 0,013  | 0,014  | 0,014     | 0,013      | 0,012   | 0,011    | 0,011    |
| Daytona Beach  | 0,007   | 0,007   | 0,007   | 0,007   | 0,008 | 0,01   | 0,01   | 0,011     | 0,012      | 0,01    | 0,008    | 0,007    |
| Key West       | 0,017   | 0,017   | 0,018   | 0,018   | 0,019 | 0,019  | 0,019  | 0,018     | 0,019      | 0,019   | 0,019    | 0,018    |
| Miami          | 0,01  | 0,01    | 0,011   | 0,011   | 0,013 | 0,014  | 0,013  | 0,014     | 0,014      | 0,013   | 0,012    | 0,011    |
| Norfolk        | 0,01  | 0,009   | 0,008   | 0,007   | 0,008 | 0,009  | 0,01   | 0,01      | 0,01       | 0,009   | 0,009    | 0,01     |
| Richmond       | 0,007   | 0,007   | 0,006   | 0,005   | 0,006 | 0,006  | 0,007  | 0,007     | 0,007      | 0,005   | 0,006    | 0,007    |
| Tallahassee    | 0,005   | 0,004   | 0,004   | 0,004   | 0,005 | 0,006  | 0,008  | 0,008     | 0,007      | 0,005   | 0,004    | 0,005    |

Az amerikai mérőhelyek esetén a közép-európai állomásokkal ellentétben már nagyobb eltérések tapasztalhatók a paraméterértékek között. Míg az előző esetben hozzávetőleg hasonló éghajlati területeken fekvő, így éves hőmérsékleti menettel rendelkező állomásokról volt szó, addig az USA esetén kiválasztott mérőhelyek ennél változatosabb klímával rendelkeztek. A közép-európai állomásokhoz hasonló földrajzi elhelyezkedésű és kitettségű, nevezetesen a  $40^\circ$  szélességi öv felett és 400 m tengerszinti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások paraméterei jól láthatóan összeegyeztethetők, ám ahogy eltérünk ettől vagy a  $b$  paraméter értékeinek nagyságrendjében, vagy a nyári és téli időszak értékeinek közelségében változás tapasztalható (10. ábra). Az egyenlítő felé haladva a két időszak értékei egyre inkább összemosódnak, s ha emellé a tengerszint feletti magasságot is növeljük, akár csökkenés is tapasztalható. Az óceánparti városok esetén a paraméter értéke növekszik, ami a  $40^\circ$  alatt fekvő állomások esetén markánsabb.



10. ábra. Baloldal: A  $b$  paraméter és a tengerszint feletti magasság kapcsolata a két időszak esetén.  
 Jobb oldal: A  $b$  paraméter függése a földrajzi szélességtől a két időszak esetén.

Mindez elmondható a havi szintű vizsgálat esetén is, melyek eredményeit a 3. és 4. táblázat segítségével mutatjuk be. Ahogy az időszakos vizsgálatnál is megállapítottuk, úgy ebben az esetben is belátható, hogy a hónapok paraméterei közötti különbség a  $40^\circ$  szélességi körtől lefelé haladva már kevésbé számottevő, a magassággal pedig valamelyest csökkenés tapasztalható. A parti régiók  $b$  értékei magasabbak, amely legkifejezöbben a kitűzött szélességi kör alatt mutatkozik.



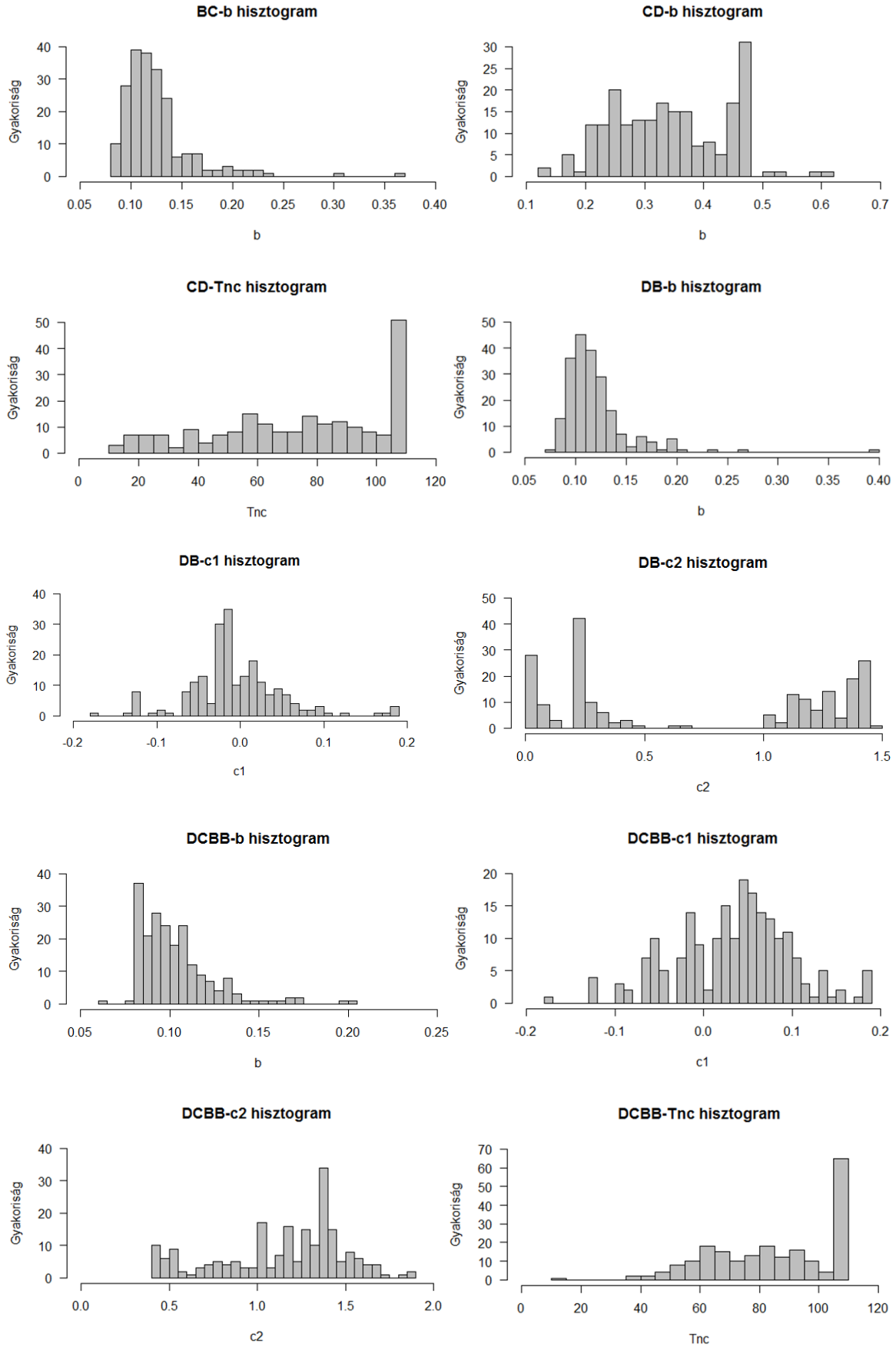
## 4.2. RadEst modellparaméterek vizsgálata

A RadEst programban történő modellfuttatásokhoz az egyes modellek esetén alkalmazott empirikus paraméterek meghatározása volt az elsődleges célunk. Ehhez a programban már regisztrált állomások illesztett értékeit vizsgáltuk. Az elgondolásunk az volt, hogy a négy módszer összes paraméterének eloszlása alapján, a relatív gyakoriságukat figyelembe véve adjunk az egyes együtthetőkra vonatkozóan egy általánosan alkalmazható értéket. Az R programnyelv segítségével meghatároztuk a paraméterek átlagát (5. táblázat) és szórását, majd hisztogramon ábrázoltuk az együtthetők eloszlását (11. ábra).

Vizsgálataink rámutattak, hogy míg a BC és DB modellek  $b$ , valamint a DB és DCBB modellek  $C_1$  paramétere közelítően Gauss-eloszlást követnek, azonban több más együtthető esetén nem ez tapasztalható, sőt erős aszimmetria figyelhető meg néhány modellparaméter eloszlását szemléltető ábrán is. Bár sok esetben a hisztogramok az átlagra nem szimmetrikus eloszlást mutatnak, az egyszerűség kedvéért a kalibrálatlan futtatásainkat az 5. táblázatban meghatározott átlagok felhasználásával végeztük.

5. táblázat. A RadEst modellek paramétereinek átlaga a programban regisztrált állomások adatai alapján.

|                  | <b>BC modell</b> | <b>CD modell</b> |          | <b>DB modell</b> |        |       | <b>DCBB modell</b> |       |       |          |
|------------------|------------------|------------------|----------|------------------|--------|-------|--------------------|-------|-------|----------|
| <b>Paraméter</b> | $b$              | $b$              | $T_{nc}$ | $b$              | $C_1$  | $C_2$ | $b$                | $C_1$ | $C_2$ | $T_{nc}$ |
| <b>Átlag</b>     | 0,125            | 0,343            | 73,83    | 0,120            | -0,005 | 0,724 | 0,104              | 0,035 | 1,154 | 84,40    |



11. ábra. A RadEst modellparaméterek relatív gyakoriságának eloszlása.

### 4.3. A modellezett globálsugárzás statisztikai értékelése

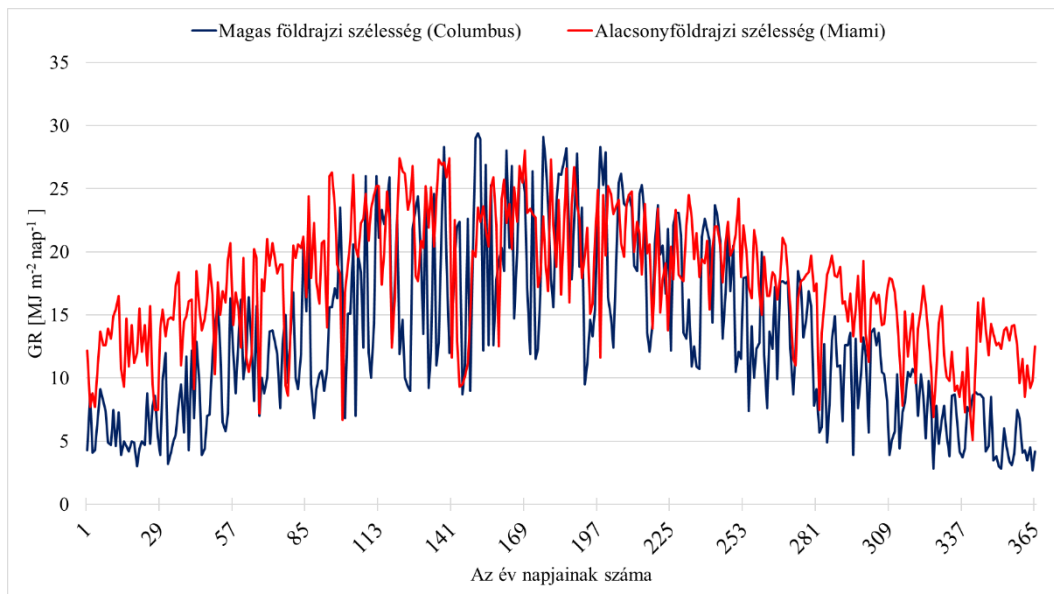
Korábbi munkáimban (Sürge, 2016; 2017) Hegyhátsálra vonatkozó modellfuttatások statisztikai elemzését végeztem. A vizsgálat fő konklúziója, hogy a modellfuttatások mindegyike viszonylag jól közelíti a megfigyelt adatsort, viszont a legjobb becslés a több optimalizálatlan modell átlagolásával előállított Ensemble modellel érhető el.

Az eredmények tükrében célunk annak belátása, hogy különböző földrajzi kiterjedésű területek vizsgálatával hasonló következtetésre juthatunk-e, vagyis mennyire mondható stabilnak az Ensemble modell becslési pontossága, esetlegesen az állomások heterogenitása befolyásolja-e, mely modell teljesít a legjobban? Vizsgáljuk, hogy amint a bejövő sugárzás mennyiségét, úgy meghatározza-e az állomás földrajzi szélessége, tengerszint feletti magassága a becslés hatékonyságát, s a különböző módszerek érzékenységet mutatnak-e a tengerek, óceánok közelségére. Ennek fényében felállítható-e konkrét javaslat arra vonatkozóan, hogy az egyes területek esetén mely modell alkalmazható a legpontosabb eredménnyel?

A modellezés eredményeinek értékelése a mérési adatok alapján történt, napi illetve havi szinten. A mért és becsült GR adatsorok származtatott hibastatisztikáit pontdiagramok segítségével szemléltetjük. A különböző kontinensek állomásainak statisztikai értékelése külön ábrákon, az amerikai állomások esetén a 3.1. fejezetben meghatározott kategóriáknak megfelelően történik. A különböző modellesládokat eltérő színnel láttuk el a 3.4. fejezetben meghatározott jelölésrendszert alkalmazva.

#### 4.3.1. Napi szintű statisztikai elemzés

Ahhoz, hogy a modellek jóságát kvantitatív módon értékelni tudjuk, vagyis a modellhiba nagyságrendjét jellemezhesük, szükséges annak ismerete, hogy a globálsugárzás az év folyamán milyen szélsőértékek között változik. A beérkező sugárzás értéke (más faktorok mellett) a szélességi körök függvényében is eltér csillagászati okokból. Az általunk vizsgált állomások földrajzi szélessége közt akár 20°-os különbség is adódik, mely 30 évre átlagolt GR éves összegeket tekintve akár  $1300 \text{ MJ m}^{-2} \text{ év}^{-1}$  különbséget is jelenthet. A mérőhelyek közti eltérést egy, a vizsgált időszakból kiemelt év napi értékeinek példáján keresztül mutatjuk be (12. ábra).

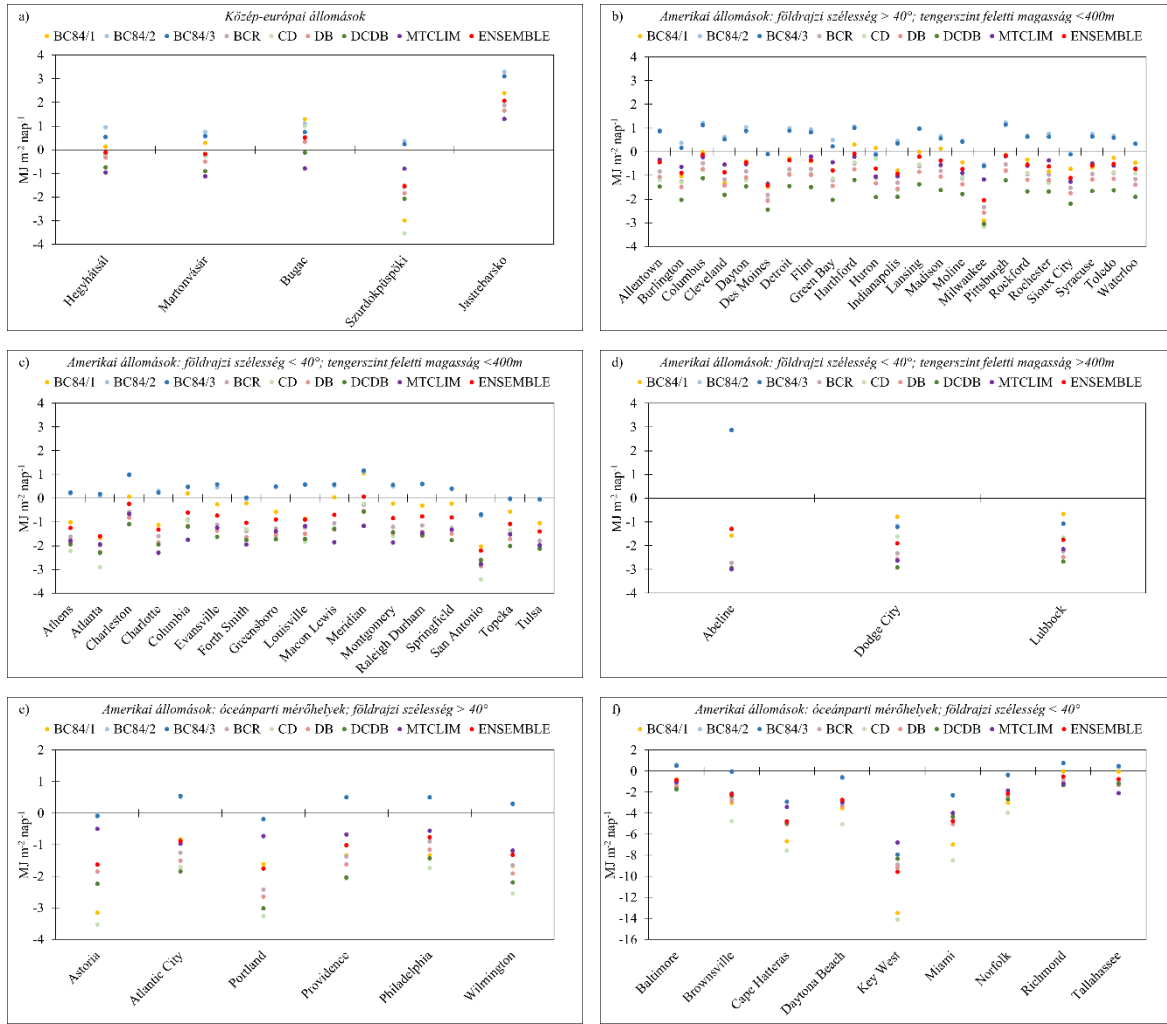


12. ábra. Mért globálsugárzás évi menet 1990-ben különböző földrajzi szélességeken.

Egy tipikusnak mondható évben a GR mind alacsony, mind magas földrajzi szélességeken jellemzően 2 és 30 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> érték között változik. Az éves menet kihangsúlyozza, hogy az Egyenlítőhöz közelebb eső területek sugárzásbevétele nagyobb, mely főleg a téli időszak magasabb értékeinek tulajdonítható.

Ismerve a GR jellemző nagyságrendjét a mértékegységgel rendelkező hibaértékek (*bias*, *RMSE*) segítségével következtetni tudunk a modell pontosságára. A 13. ábra a napi szintű adatok alapján származtatott *bias* értékeket mutatja az egyes állomások és modellfuttatások esetén, a 3.1. fejezetben ismertetett csoportosításnak megfelelően.

A 13/a) ábra a közép-európai állomások szisztematikus hiba értékeit ábrázolja. Elmondható, hogy a mérőhelyek esetén a hiba nagysága nem haladta meg a  $\pm 4$  MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> értéket, sőt Hegyhátsál, Martonvásár és Bugac kapcsán a modellek mindegyike  $\pm 2$  MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup>-on belül teljesített. Az európai állomások esetén a felül- és alulbecslés aránya a BC84/1 és a BC84/2 módszerektől eltekintve - melyek egyértelmű felülbecsléssel számoltak - megoszlik a modellek között. A többi módszer esetén nem egységes a méréstől vett átlagos eltérés iránya, így ezeknél Európára vonatkozó általánosítás nem adható. Az állomásokra számolt átlagok alapján (6. táblázat) viszont annyi elmondható, hogy a CD, DB, DCBB és MTCLim modellek átlagosan alul, míg a többi módszer felülbecsüli a mért adatokat. Az állomások közül mindössze kettő, Hegyhátsál és Martonvásár statisztikai adták - ha csak egy leheletnyivel is - az Ensemble modellt legjobbnak. A mérőhelyek további részénél kapott eredmény más-más modellt mutatott kedvezőnek.



13. ábra. A mérőhelyek becsült adatsorainak napi szintű származtatott bias hibastatisztikái az egyes modellek esetén.

6. táblázat. A közép-európai állomásokra vonatkozó bias értékek átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,23   | 0,30   | 1,04   | 0,08  | -0,28 | -0,13 | -0,50 | -0,47  | 0,16     |
| <b>Medián</b> | 0.30   | 0.97   | 0.57   | -0.19 | -0.26 | -0.32 | -0.74 | -0.79  | -0.11    |

A 400 méter tengerszint feletti magasság alatt, és a 40° földrajzi szélességtől északra és délre fekvő amerikai mérőhelyeket vizsgálva (13/b) - c) ábra) az szintén egyértelműsíthető, hogy a BC84/2 és a BC84/3 egy-egy kivételtől eltekintve jellemzően felülbecsüli a GR nagyságát, s hogy ennek mértéke 2 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> alatti. Ugyanakkor az is elmondható, hogy az

előbb említetteken kívül mindegyik módszer átlagosan kisebb értéket származtat (7 - 8. táblázat) a megfigyeltnél.

A 40° szélesség felett fekvő városok esetén, a legalacsonyabb hibaértékeket a BC84 modell futtatásai, valamint az MTCLim és Ensemble modellek felváltva mutatták, közülük azonban konkrétan legjobbnak mondható modell nem emelhető ki. Az állomási adatokat tekintve ezek átlagosan  $\pm 0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  alatti hibával számoltak (7. táblázat). A módszerek közül stabilan a legnagyobb hibát a DCBB modell mutatta. Összességében azonban egyik modell sem eredményezett kiugróan nagy *bias* hibát.

7. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások *bias* átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | -0,57  | 0,61   | 0,52   | -1,03 | -1,12 | -1,27 | -1,74 | -0,60  | -0,65    |
| <b>Medián</b> | -0,43  | 0,68   | 0,59   | -0,94 | -1,08 | -1,18 | -1,67 | -0,54  | -0,58    |

A 40° földrajzi szélességtől délre húzódó városokat vizsgálva (13/c) - d) ábra) a BC84 modellfuttatások *bias* értékei ugyancsak a legalacsonyabbnak bizonyultak, az MTCLim és az Ensemble modell viszont pár esettől eltekintve már elmaradt ezektől. Előbbi módszerek állomásokra átlagolt értékei  $\pm 0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -ot nem meghaladó, míg a többi modell átlagosan  $-1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -nál nagyobb hibát eredményeztek (8. táblázat).

A tengerszint feletti magasság növekedésével egy esetet leszámítva érzékelhető a modellek egyöntetű alulbecslése (13/d) ábra). Ennek mértéke eltérő, viszont a  $\pm 4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  nagyságú hibahatár itt is érvényes. Az állomások kis száma miatt egyértelmű következtetés nem hozható, viszont a meglévő adatok alapján átlagosan csekély növekedés tapasztalható a modellek átlagos hibaértékeiben. Az adatok alapján a tengerszint növekedéséből adódó változást a BC84 modell 1. futtatása képes a legjobban követni, az átlagok tekintetében (8. táblázat) viszont a BC84 módszer 2. és 3. futtatásai emelhetők ki. Az Ensemble módszer csupán egy állomás esetén adta a legkedvezőbb eredményt.

8. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások bias átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben kifejezve.

|         |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTclim | Ensemble |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| < 400 m | Átlag  | -0,51  | 0,35   | 0,38   | -1,32 | -1,63 | -1,58 | -1,68 | -1,65  | -0,95    |
|         | Medián | -0,30  | 0,45   | 0,48   | -1,24 | -1,42 | -1,50 | -1,72 | -1,74  | -0,89    |
| > 400 m | Átlag  | -1,00  | 0,21   | 0,20   | -2,42 | -2,05 | -2,68 | -2,84 | -2,58  | -1,64    |
|         | Medián | -0,78  | -1,07  | -1,06  | -2,32 | -1,65 | -2,56 | -2,91 | -2,63  | -1,74    |

Míg a tengerszint feletti magasság növekedése alig eredményezett látványos romlást a szisztematikus hiba értékében, addig a 40° szélességtől délre fekvő part menti városok értékei már élesen elkülönültek az eddig tapasztalt hiba nagyságától (13/e) - f) ábra). A modellek nyilvánvaló alulbecslése akár 14 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> értéket is felvehet. A legkevésbé markáns hibát ismét a BC84/2 és BC84/3 modellfuttatások nyújtották, melyek esetén - Key West állomást leszámítva - a szisztematikus hiba nagysága a ±3 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> értéket nem haladta meg. A mérésektől vett legjelentősebb eltérést a CD modell mutatta, az állomásokra számított bias átlaga ez esetben -5 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup>-ra nőtt. Érdekesség, hogy míg a kijelölt szélességtől délre fekvő városok hibaértékeinek mértéke jelentős volt, ugyanez a növekedés a 40° szélességi körtől északra a partok mentén nem figyelhető meg. Szinte ugyanolyan nagyságú szisztematikus hiba tapasztalható a kontinens belsejében fekvő városok esetén, mint ami a partok felé haladva tapasztalható, s a modellek teljesítésében sem történt számottevő változás. A legjobb módszernek ez esetben is a BC84 modell 2. és 3. futtatása bizonyult. A modellek állomásra átlagolt értékeit és mediánjait a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások bias átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben megadva.

|       |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTclim | Ensemble |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| > 40° | Átlag  | -1,65  | 0,27   | 0,27   | -1,53 | -2,47 | -1,78 | -2,12 | -0,76  | -1,22    |
|       | Medián | -1,47  | 0,41   | 0,40   | -1,50 | -2,30 | -1,73 | -2,11 | -0,70  | -1,16    |
| < 40° | Átlag  | -4,16  | -1,38  | -1,37  | -3,26 | -5,32 | -3,53 | -3,29 | -2,82  | -3,14    |
|       | Medián | -3,03  | -0,33  | -0,37  | -2,53 | -4,76 | -2,84 | -2,66 | -2,13  | -2,21    |

A mérőhelyek összességét tekintve az állomások döntő többségénél a modellek  $\pm 4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  hibaküszöbön belül dolgoztak. Különösebb hibaértékbeli növekedést vagy csökkenést a földrajzi szélesség szerinti megkülönböztetés, és a tengerszint feletti magasság szerinti tagolás sem eredményezett. Egyértelmű viszont az óceánok negatív befolyása a becsült globálsugárzás értékére, mely a  $40^\circ$  földrajzi szélesség felett még kevésbé jelentős, az Egyenlítőhöz közeledve azonban már kétségtelenül szignifikáns.

A szisztematikus hiba legalacsonyabb értékeit a BC84/2 és a BC84/3 modellek esetén kaptuk. Hasonlóan alacsony értékek adódtak az MTclim és Ensemble modellek alkalmazásakor is, viszont alacsonyabb földrajzi szélességek felé haladva, valamint a tengerszint feletti magasság emelkedésével a mért értékektől vett eltérés kisebb növekedést mutatott. A legkevésbé hatékony modellnek a DCBB módszer bizonyult nem sokkal felülmúlva a CD modell esetén kapott *bias* értékeket.

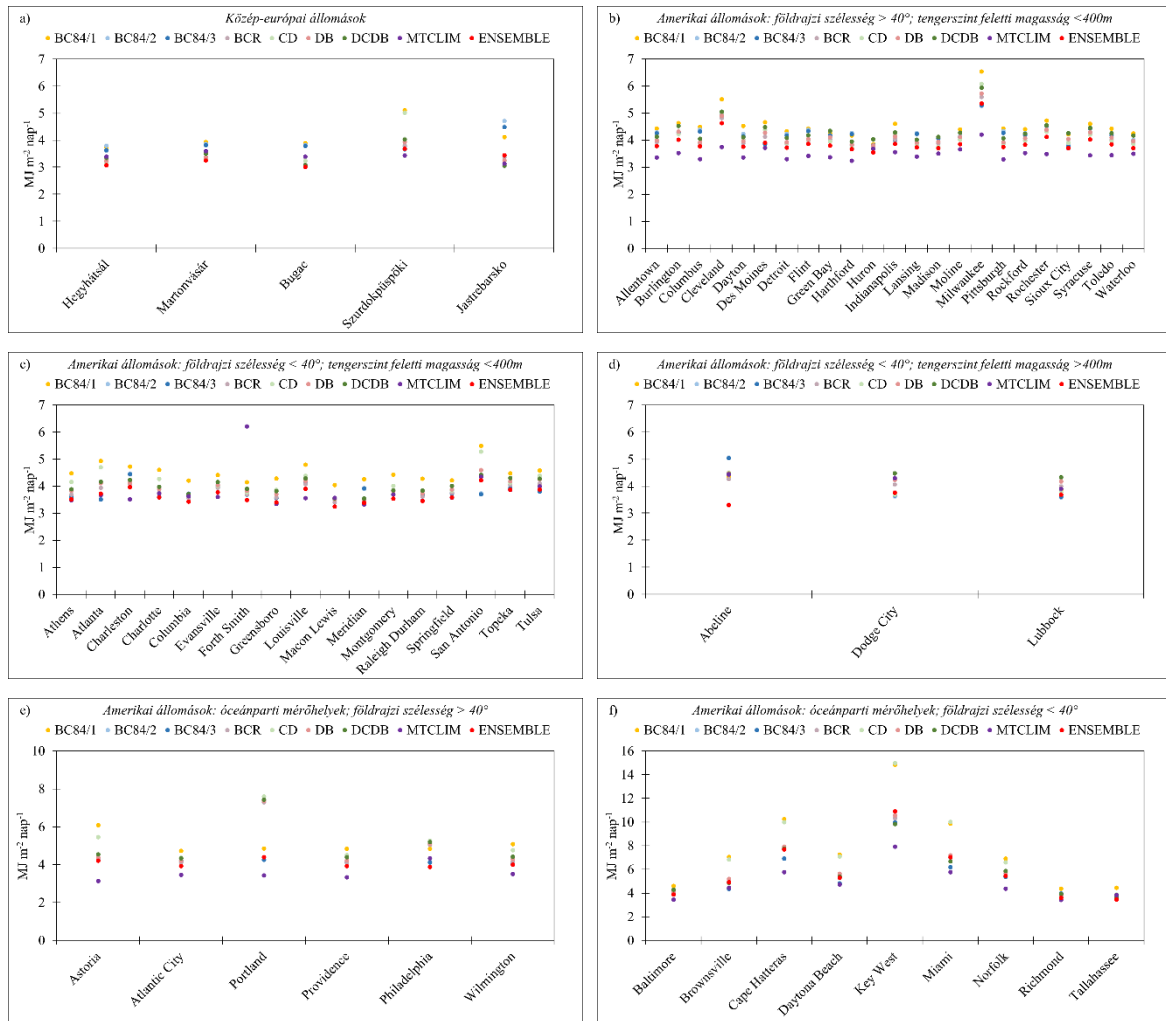
Az alacsony szisztematikus hibaérték önmagában nem enged következtetni a modell jóságára. A statisztika negatívuma, hogy bár a 0-hoz közeli *bias* a modell pontosságára utal, az alacsony érték elfedheti az azonos nagyságú, de ellentétes előjelű átlagos hibát. Ebből következően a korrekt értékelés eléréséhez más statisztikák felhasználására is szükség van.

A 14. ábra a napi szintű adatok alapján származtatott *RMSE* értékeket szemlélteti az egyes állomások és modellfuttatások esetén. A közép-európai mérőhelyek ábráját tekintve (14/a ábra) látható, hogy a hiba nagysága  $3 - 5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  között mozgott, s nagy különbség a modellek között nem adódott. Jastrebarsko kivételével a módszerek közti eltérés nem haladta meg az  $1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -ot. A magyarországi mérőhelyek többségénél az Ensemble modell, míg a határon túli állomások esetén az MTclim modell mutatta a legkedvezőbb *RMSE* statisztikát. Az állomási átlagokat tekintve (10. táblázat) viszont a RadEst modellek is mindenképp kiemelendők.

10. táblázat. A közép-európai állomások *RMSE* átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén  $\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  mértékegységben kifejezve.

|        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| Átlag  | 4,16   | 4,00   | 3,88   | 3,37 | 3,60 | 3,38 | 3,41 | 3,40   | 3,30     |
| Medián | 3,94   | 3,83   | 3,79   | 3,34 | 3,24 | 3,26 | 3,35 | 3,40   | 3,26     |





14. ábra. Az mérőhelyek becsült adatsorainak napi szintű származtatott RMSE hibastatisztikái az egyes modellek esetén.

A 40° földrajzi szélesség felett fekvő amerikai állomások esetén az európai mérőhelyekhez hasonló értékeket kaptunk (14/b) ábra), az állomásokra vett átlagokat tekintve csekély eltéréssel (11. táblázat). Az MTCLIM modell látványosan a többi módszernél alacsonyabb értékeket eredményezett, a hiba nagysága egy esetben sem haladta meg a 4 MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup>-os értéket. A mérőhelyekre számolt RMSE átlagok tekintetében viszont az Ensemble módszerrel is ehhez közeli megoldás kapható. Az állomások esetén két kiugró esettel találkoztunk, nevezetesen Cleveland és Milwaukee kapcsán. Az eltérés már a bias értékeiben is kis mértékben mutatkozott, az RMSE esetén azonban a különbség hangsúlyosabb. A hibastatisztikában vett eltérés nagy valószínűséggel annak köszönhető, hogy a két állomás tavak mentén fekszik, amely hatással lehet a becsült sugárzás értékére.

11. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén MJ m<sup>2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben kifejezve.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 4,54   | 4,28   | 4,25   | 4,09 | 4,13 | 4,17 | 4,34 | 3,52   | 3,92     |
| <b>Medián</b> | 4,44   | 4,26   | 4,20   | 4,00 | 3,99 | 4,05 | 4,25 | 3,49   | 3,81     |

A 40° földrajzi szélességtől délre fekvő amerikai állomások esetén (14/c) - d) ábra) az MTclim modell mellett az Ensemble módszer szintén hasonlóképpen jól működött, sőt az esetek bizonyos részében még jobbnak is bizonyult. A legmagasabb RMSE hibaértékek a BC84/1 modellfuttatás esetén mutatkoztak, de a BC84 módszer további két futtatását is egyaránt magas értékek jellemezték. Összességében a modellek itt sem eredményeztek kiugróan magas hibaértékeket.

A tengerszint feletti magasság növekedésével a hibaértékek nagyságrendje nem változott. Az Ensemble módszer, bár nem sokkal, de a legalacsonyabb RMSE hibát mutatta, a 12. táblázat átlagos értékeit tekintve viszont egyértelmű a modell elsőbbsége. A 14/d) ábra, illetve a 12. táblázat értékeiből némiképp kivehető, hogy a modellek egyetértése a hiba nagyságát illetően aránylag egységesebb, mint ami az eddigi vizsgált mérőhelyek többségénél látszott.

12. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében MJ m<sup>2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben kifejezve.

|         |               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| < 400 m | <b>Átlag</b>  | 4,47   | 3,79   | 3,77   | 3,79 | 4,06 | 3,92 | 3,98 | 3,79   | 3,63     |
|         | <b>Medián</b> | 4,42   | 3,71   | 3,70   | 3,73 | 4,01 | 3,84 | 3,92 | 3,61   | 3,59     |
| > 400 m | <b>Átlag</b>  | 3,99   | 4,10   | 4,11   | 4,11 | 3,99 | 4,30 | 4,43 | 4,22   | 3,59     |
|         | <b>Medián</b> | 3,87   | 3,63   | 3,68   | 4,07 | 3,78 | 4,25 | 4,45 | 4,31   | 3,69     |

A part mentén fekvő állomások RMSE hibáinak vizsgálata a bias-hoz hasonlóan nagymértékű eltérést mutatott a mérőhelyek többségétől (14/e) - f) ábra). Megfigyelhető, hogy míg a bias esetén a 40° szélességi kör feletti partmenti városok jelentősebb kiugró értékeket nem produkáltak, addig a négyzetes hiba kapcsán amellet, hogy a modellek közti szórás

növekedett, a hibák nagyságát tekintve is némiképp jobban elkülönülnek a többi mérőhely származtatott értékeitől. A legszembetűnőbb eltérést viszont egyértelműen az Egyenlítőhöz közelebb eső partmenti városok mutatták. A hiba nagysága minden esetben  $3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  értéket meghaladó, olykor  $14 - 15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  mértékű volt, s az állomásokra vett átlagok (13. táblázat) is élesen eltérnek az eddig tapasztaltaktól. A legjobb becsléshez ebben az esetben is az MTCLim modellel juthattunk, ám ezekre az állomásokra a BC84 modell 2. és 3. futtatása ismét csak hasonlóan jónak bizonyult. Az Ensemble módszer hatékonyságában a part menti állomások esetén csökkenés tapasztalhattunk.

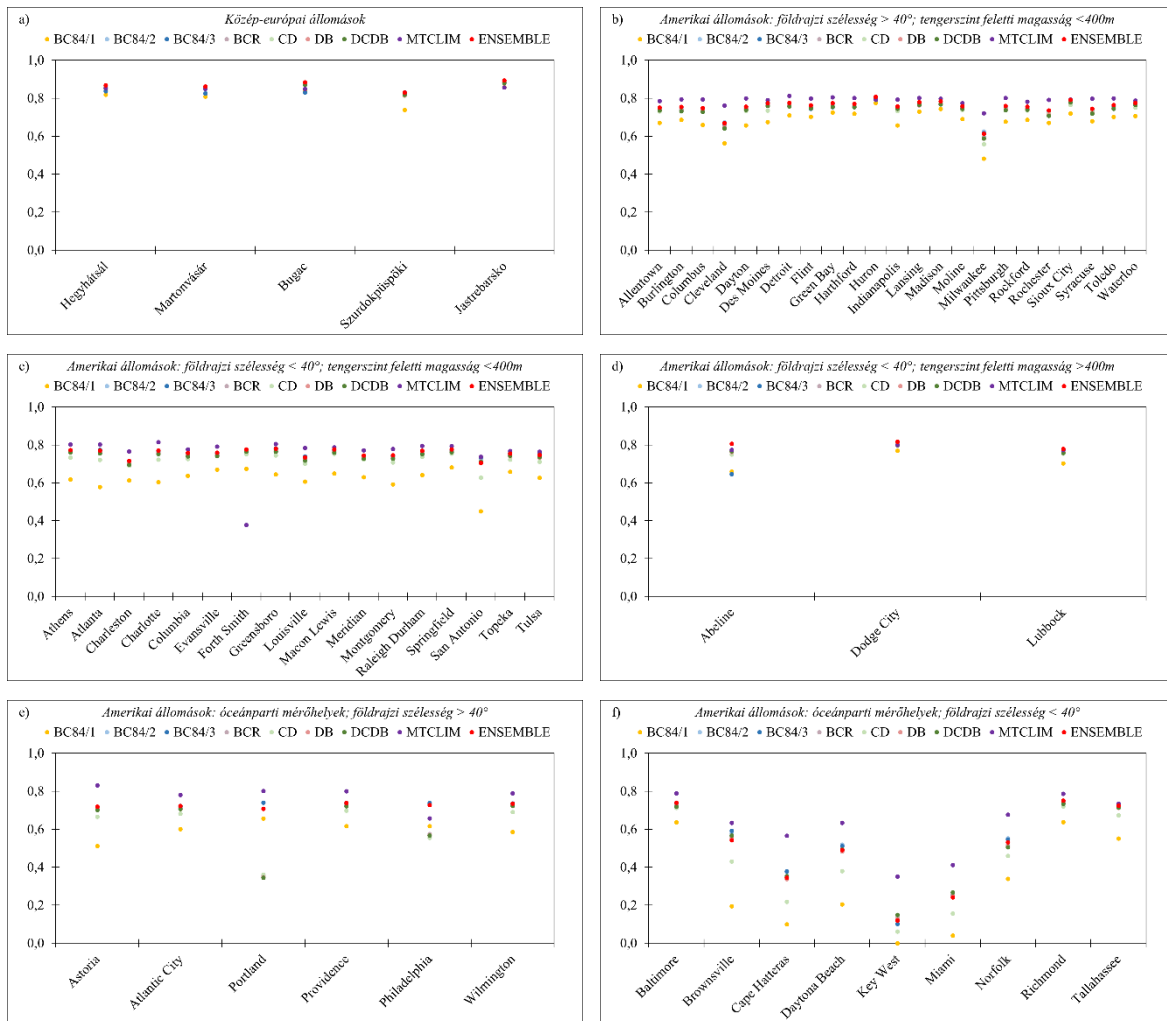
13. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében  $\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  mértékegységben megadva.

|          |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|----------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| 40°<br>^ | Átlag  | 5,08   | 4,20   | 4,17   | 4,84 | 5,33 | 4,94 | 5,06 | 3,54   | 4,07     |
|          | Medián | 4,85   | 4,18   | 4,16   | 4,22 | 5,02 | 4,34 | 4,49 | 3,45   | 3,97     |
| 40°<br>v | Átlag  | 7,74   | 5,52   | 5,50   | 5,85 | 7,51 | 6,01 | 5,81 | 4,87   | 5,82     |
|          | Medián | 7,06   | 4,83   | 4,83   | 5,44 | 6,85 | 5,64 | 5,40 | 4,47   | 5,30     |

Az RMSE vizsgálata alapján tehát beláttuk, hogy az MTCLim és Ensemble modellek becsülték legpontosabban a megfigyelt adatsort, míg a legmagasabb hibaértékeket a BC84 modell 1. modellfuttatása mutatta. Megállapítottuk, hogy a tengerszint feletti magasság növekedésével a modellek becsült adatsorai kiegyenlítettebb hibát eredményezhetnek. A tengerparti városok esetén az RMSE értéke jelentősen megnőtt, s ez a növekedés az Egyenlítő felé növekvő tendenciát mutat. Az ábrák alapján következtetésünk az volt, hogy a mérőhelyek jelentős részénél a hiba nagysága nem haladja meg a  $3 - 6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  közötti értéket, s ettől számottevő eltérést, ahogy a szisztematikus hiba esetén is tapasztalhattuk, az óceánpart mentén fekvő városok mutatnak ( $3 - 15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ).

A bias-tól vett legjelentősebb különbség, hogy míg előző esetén a BC84/2 és BC84/3 modellfuttatások egyértelműen a legalacsonyabb hibaértékeket mutatták, addig az RMSE vizsgálatokor ettől eltérő eredményekhez juthattunk. A legtöbb mérőhelyre vonatkozóan az MTCLim modell hibaértékei bizonyultak a legkedvezőbbnek, mely egyértelműen az európai állomások Magyarországon kívül eső mérőhelyei, illetve a 40° földrajzi szélességtől északra fekvő, és a part mentén elhelyezkedő amerikai állomások esetén teljesült.

A magyarázott variancia napi szintű származtatott értékei a 15. ábrán láthatók.



15. ábra. A mérőhelyek becsült adatsorainak napi szintű származtatott  $R^2$  hibastatisztikái az egyes modellek esetén.

Az európai állomások esetén (15/a) ábra) a modellek kiemelkedően jó értékeket eredményeztek. A 0,8–0,9-es  $R^2$  statisztika a mért és becsült adatsorok közötti szoros kapcsolat meglétére utal, mely a módszerek mindegyikére - leszámítva a BC84/1 modell Szurdokpüspökre kapott értékét - teljesül. Az említett módszer az állomások többsége esetén viszonylag elmarad a többi modell  $R^2$  statisztikáitól, ám ez az eltérés Szurdokpüspöki kivételével nem számottevő. Míg az előzőekben tárgyalt hibastatisztikák esetén az Ensemble modell az európai állomásokra vonatkozóan nem minden esetben volt a legkedvezőbb, addig a magyarázott variancia vizsgálatánál már egyértelmű a módszer fölénye. Ezt mutatják a

14. táblázat értékei is. A változékonyság átlagos 87%-os magyarázata a legjobbnak mondható a modellek között.

14. táblázat. A közép-európai állomások  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,81   | 0,85   | 0,84   | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,85 | 0,85   | 0,87     |
| <b>Medián</b> | 0,82   | 0,84   | 0,83   | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,85 | 0,85   | 0,87     |

Ahogy azt a 15. ábra is mutatja az európai mérőhelyekkel összevetve az amerikai állomások esetén csökkenést tapasztaltunk az  $R^2$  értékében. A kontinens belsejében elhelyezkedő mérőhelyekre kapott értékek (15/b) ábra) jellemzően 0.5 - 0.8 közöttinek adódtak, s emellett a modellek közötti szórás is erőteljesebben megmutatkozott az európai állomásokéhoz képest. A módszerek közül az MTCLim modell bizonyult a leghatékonyabbnak, mely az állomási értékek átlagát tekintve a változékonyság 79 %-ára magyarázatot adott (15. táblázat). Az Ensemble módszer ehhez képest némileg alacsonyabb, átlagosan 0,76-os  $R^2$  nagysággal jellemezhető. A többi modell szorosan követi az előbbieket, ám a BC84/1 modellfuttatás élesen elkülönül az összes közül. A modell az összes többinél alacsonyabb  $R^2$  értéket mutatott.

Az RMSE elemzése kapcsán kihangsúlyoztuk Cleveland és Milwaukee értékeinek a szélességen előforduló hibákhoz képesti szembetűnő eltérését, mely az  $R^2$  vizsgálatokor is kimutatható. Bár az MTCLim modell ezen állomások esetén sem eredményezett nagymértékű romlást, a modellek mindegyike 0,15 – 0,2 közötti csökkenést mutatott, ezzel kihangsúlyozva a tavi hatások nem elhanyagolható befolyását a becsült értékekre.

15. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,68   | 0,75   | 0,74   | 0,74 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,79   | 0,76     |
| <b>Medián</b> | 0,69   | 0,75   | 0,75   | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,79   | 0,76     |

Ahogy azt a *bias* és *RMSE* kapcsán is beláttuk, a földrajzi szélesség függvényében tett megkülönböztetés nem mutat lényeges különbséget a statisztika értékében. Nagyságrendjükben megegyező értékeket kaptunk a szélességi körtől északra fekvő állomások esetén is (15/c ábra). Bár a modellfuttatások közül ismét csak az MTCLim módszernél adódtak a legmagasabb magyarázott variancia értékek, jelentős különbség nem adódott a modellek közt. Egyedül a BC84/1 módszer esetén kaptunk alacsonyabb  $R^2$  statisztikát (16. táblázat).

A 400 m tengerszint feletti magassággal jellemzett állomások értékeinek vizsgálata ismét csak a módszerek közti különbség csökkenésére enged következtetni (15/d ábra). Míg a fentiekben tárgyalt állomások modellfuttatásainak  $R^2$  értékei közt akár 0.4-os eltérés is adódott, addig a magasabban fekvő városok kapcsán a maximális eltérés mindössze 0.15 volt. Ezt tükrözik a 16. táblázat az állomások átlagolt értékei is. A legjobb statisztikát az említett állomások esetén az Ensemble módszer nyújtotta nem sokkal felülmúlva az MTCLim modellre számolt értékeket.

16. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében.

|         |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| < 400 m | Átlag  | 0,62   | 0,75   | 0,76   | 0,75 | 0,72 | 0,74 | 0,74 | 0,76   | 0,76     |
|         | Medián | 0,63   | 0,75   | 0,76   | 0,75 | 0,72 | 0,74 | 0,74 | 0,78   | 0,76     |
| > 400 m | Átlag  | 0,71   | 0,74   | 0,74   | 0,78 | 0,77 | 0,78 | 0,77 | 0,78   | 0,80     |
|         | Medián | 0,70   | 0,78   | 0,78   | 0,77 | 0,75 | 0,76 | 0,77 | 0,77   | 0,81     |

Az óceán partján fekvő városok magyarázott variancia értékei élesen elkülönültek az állomások zömétől (15/e) - f) ábra), és a korábbiaknak megfelelően a part menti mérőhelyek szórása a földrajzi szélesség csökkenésével egyre nagyobb mértékű lett. A 40° szélességi körtől északra fekvő városok esetén 0,34 – 0,83 közötti  $R^2$  értékeket számoltunk, mely jelentős különbségnek számít a korábban vizsgált állomásokéhoz képest. A modellek közti szórás is jelentősnek adódott, egyes mérőhelyek esetén akár 0.46-os eltérést is tapasztaltunk a modellfuttatások  $R^2$  értékeinek összehasonlítása során. Ebben az esetben egyértelműen az MTCLim modell mutatta a legmagasabb magyarázott variancia értékeket, mely 0,78-as átlagos teljesítményével kiemelkedett a módszerek közül. Kedvező értékek adódtak a BC84 módszer 2. és 3. futtatása, valamint Ensemble modell esetén is, ám ezek a változékonyság átlagosan

72 - 73%-ára tudtak magyarázatot adni. A legkedvezőtlenebb  $R^2$  értékeket minden esetben a BC84/1, illetve a CD modellek adták, melyek átlagos hatékonysága 0,60 körüli.

A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő part menti állomások minden eddiginél alacsonyabb magyarázott variancia értékeket eredményeztek (15/f) ábra). Az óceánok közelsége oly mértékben befolyásolja a GR becslés hatékonyságát, hogy egyes modellek esetén a mért és becsült adatsorok között szinte semmi kapcsolat nem mutatható ki. Ezt mutatja a BC84/1 modell Key West állomásra származtatott  $R^2$  értéke is. A módszerek közti nagymértékű szórás szemmel látható, és amellet, hogy az alkalmazott eljárások között jelentős különbség adódott, szinte minden módszer teljesítménye számottevően csökkent. A korábbiakban jól teljesítő MTCLim modell esetén, bár a modellek közül most is a legjobb eredményeket mutatta, 20%-os romlás tapasztalható. Előbbi módszertől eltekintve az összes modell állomásokra átlagolt értéke 0,51 alatti. A legrosszabb statisztikával ismét csak a BC84/1 modell jellemezhető, mely átlagosan a változékonyság mindösszesen 30%-ára tudott magyarázatot adni (17. táblázat).

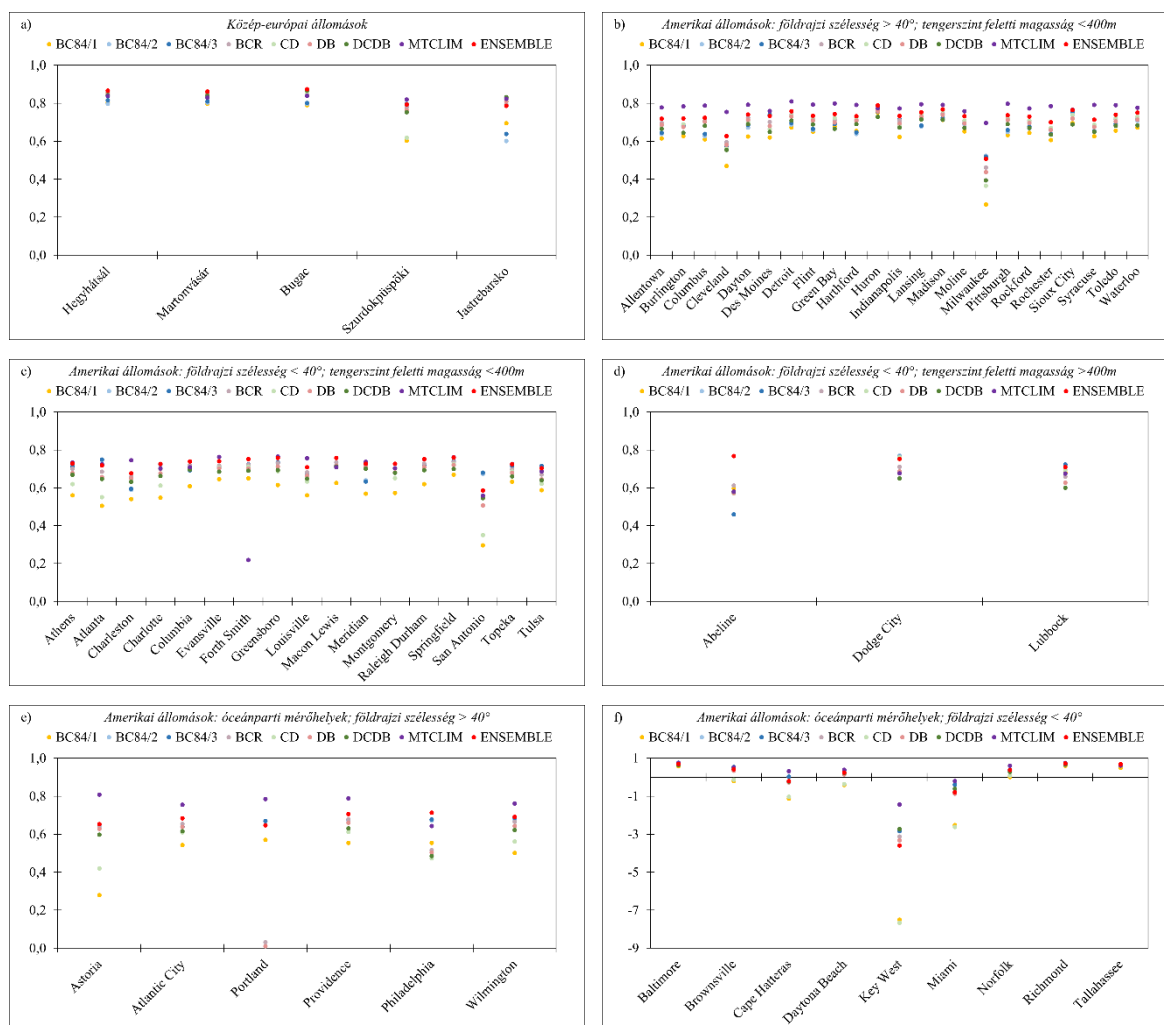
Az  $R^2$  statisztika vizsgálata alapján megállapítható, hogy az európai állomások esetén magasabb, míg az amerikai mérőhelyek esetén jellemzően alacsonyabb magyarázott variancia értékekkel számolhatunk. Ahogy az az RMSE esetén is látható volt, a modellfuttatások közül az MTCLim és az Ensemble modellek hatékonysága emelhető ki. A BC84/1 modell ismét a legalacsonyabb értékeket mutatta. A part menti városok minden eddigi mérőszámnál rosszabb eredményeket mutattak. A becsült adatsor egyes modellek esetén élesen különbözhet a megfigyelt értékektől.

17. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében.

|          |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|----------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| 40°<br>> | Átlag  | 0,60   | 0,73   | 0,73   | 0,64 | 0,61 | 0,63 | 0,63 | 0,78   | 0,72     |
|          | Medián | 0,61   | 0,73   | 0,74   | 0,71 | 0,67 | 0,71 | 0,70 | 0,79   | 0,72     |
| 40°<br>< | Átlag  | 0,30   | 0,51   | 0,51   | 0,50 | 0,42 | 0,49 | 0,50 | 0,62   | 0,50     |
|          | Medián | 0,20   | 0,55   | 0,55   | 0,52 | 0,43 | 0,51 | 0,51 | 0,63   | 0,53     |

A mért és becslt adatsorok jellemzésére a *bias*, az *RMSE* és az  $R^2$  statisztikákon kívül a modeling efficiency, azaz az *ME* értékét is meghatároztuk minden egyes állomás és módszer esetén. Ennek eredményét a 16. ábrán keresztül mutatjuk be.

Az 16/a) ábra alapján látható, hogy az európai állomások esetén az  $R^2$  statisztikával teljesen megegyező eredményre jutottunk. Ennek mintájára elmondható, hogy a modellhatékonyság értékeit külön-külön szemügyre véve a mérőhelyek több mint felénél, az állomásokra vett átlagolt értékeket vizsgálva (18. táblázat) pedig egyértelműen az Ensemble modell bizonyult a legmegfelelőbbnek. Egyébiránt a modellek származtatott értékei többnyire nagyon közel helyezkedtek el egymáshoz, Szurdokpüspöki, illetve Jastrebarsko esetén végzett futtatások viszont kissé nagyobb különbséget eredményeztek az *ME* értékében.



16. ábra. A mérőhelyek becslt adatsorainak napi szintű származtatott *ME* hibastatisztikái az egyes modellek esetén.



18. táblázat. A közép-európai állomások ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,74   | 0,76   | 0,77   | 0,83 | 0,80 | 0,83 | 0,83 | 0,83   | 0,84     |
| <b>Medián</b> | 0,79   | 0,80   | 0,80   | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,84 | 0,83   | 0,86     |

A 40° földrajzi szélességtől északra fekvő amerikai állomások esetén is az MTclim modell hatékonysága emelhető ki (16/b) ábra). Szinte minden állomás esetén a legmagasabb értékeket mutatta két kivételtől eltekintve, amikor is az Ensemble modell teljesítménye bizonyult jobbnak. Itt is megfigyelhetők a két tóparti állomás (Cleveland, Milwaukee) kiugró pontjai, melyek - az MTclim modellt leszámítva - akár 0,4-del alacsonyabb értékeket is mutathatnak más állomások értékeihez képest. A legrosszabb statisztikával a BC84 módszer 1. futtatása rendelkezett, melynek a mérőhelyekre vett átlagos értéke is némileg elmarad a többi modelltől (19. táblázat).

19. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,63   | 0,67   | 0,68   | 0,70 | 0,69 | 0,69 | 0,66 | 0,78   | 0,72     |
| <b>Medián</b> | 0,64   | 0,68   | 0,68   | 0,71 | 0,71 | 0,70 | 0,68 | 0,79   | 0,73     |

A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő állomások ME értékeinek vizsgálata során a legtöbb modell egymáshoz képesti eltérése csekélynek bizonyult (16/c) ábra). A 400 m alatti tengerszint feletti magassággal jellemzett állomások esetén nagyobb különbségek csak a BC84/1 módszer esetén adódtak, melynek állomásokra vett ME átlaga is a legalacsonyabb értékeket mutatta (20. táblázat). A modellhatékonyság szempontjából az Ensemble módszer teljesített a legjobban, de a 20. táblázat átlagait tekintve hasonlóan jó eredményeket kaptunk a többi módszer esetén is.

A tengerszint emelkedése a vizsgált szélességen nem befolyásolta az Ensemble módszer hatékonyságát, itt is a legkedvezőbb ME eredményeket mutatta (16/d) ábra). Ahogy azt az alacsonyabban fekvő állomások esetén láttuk, úgy itt is csak minimális különbséget tapasztalhattunk a modellekre kapott értékeknél. Látványos különbség viszont, hogy a korábbiakkal ellentétben a BC84/1 modell esetén már határozottan jobb értékeket

származtattunk, amit az állomásokra vett átlag 0,1-es növekedése is alátámaszt (20. táblázat). A legalacsonyabb *ME* statisztikát ebben az esetben a DCBB módszer mutatta.

20. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások *ME* átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében.

|         |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| < 400 m | Átlag  | 0,58   | 0,70   | 0,70   | 0,70 | 0,65 | 0,68 | 0,67 | 0,69   | 0,72     |
|         | Medián | 0,59   | 0,71   | 0,72   | 0,70 | 0,69 | 0,68 | 0,68 | 0,73   | 0,73     |
| > 400 m | Átlag  | 0,68   | 0,65   | 0,65   | 0,66 | 0,68 | 0,63 | 0,61 | 0,64   | 0,74     |
|         | Medián | 0,68   | 0,72   | 0,72   | 0,66 | 0,70 | 0,63 | 0,60 | 0,68   | 0,75     |

Mint ahogy azt az eddig vizsgált mérőszámoknál is tapasztaltuk, a part mentén fekvő állomások esetén a modellek hatékonysága lényegesen lecsökkent. Ez a visszaesés az  $R^2$ -hez hasonlóan már a 40° szélességi kör felett is megjelent, de szignifikánssá az Egyenlítőhöz közelebb eső állomások esetén vált (16/e) - f) ábra). 40°-tól északra az állomásokra kapott értékek 0 és 0,8 közé estek. Az MTCLim modell hatékonysága kiemelendő. Bár a korábbi vizsgálatok kapcsán tapasztalt értékeknél az említett modell esetén is alacsonyabb *ME* értékeket kaptunk, 0,76-os átlagos modellhatékonysága így is több mint 0,1-del magasabb a többi módszeréhez képest (21. táblázat).

Az modellek eddigi vizsgálata során az *ME* értékei jellemzően a 0 és 1 közötti intervallumba estek. A 40° szélességi körtől délre fekvő, part menti mérőhelyekre kapott értékek többsége viszont kívül esett ebből a tartományból. Olyannyira, hogy egyes modellfuttatások értékei akár -8-hoz közeli modellhatékonyságot is elértek. Ez azt jelenti, hogy esetenként a modell által származtatott becült értékek helyett korrektebb eredményhez jutunk, ha a mérésekből képzett átlaggal dolgozunk. Key West és Miami esetén ez az összes modellre teljesült, míg az állomások másik részénél pozitív és negatív értékek egyaránt előfordultak. A modellek állomásokra vett átlaga azonban minden esetben 0 alatti (21. táblázat).

A modellhatékonyság vizsgálata alapján tehát belátható, hogy az európai állomásokra vonatkozó modellfuttatások eredményei különösen magas értékeket mutattak. Az amerikai mérőhelyek esetén, a part menti városoktól eltekintve, kis különbségek adódtak *ME* értékében, ám nagyságukat tekintve alacsonyabbnak bizonyultak, mint az európai állomásoknál tapasztaltak. Az MTCLim és Ensemble modellek hatásossága kétségtelenül a legjobb, de a többi

módszer mindegyike esetén az előbbiekhöz nagyon közeli értékeket számoltunk. Az Egyenlítő felé haladva a modellhatékonyság csökkenése jelentős mértékű, s sok esetben negatív értéket is felvehet az egyes modellek származtatott *ME* értéke.

21. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások *ME* átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében.

|       |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTClim | Ensemble |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| > 40° | Átlag  | 0,50   | 0,66   | 0,67   | 0,53  | 0,44  | 0,51  | 0,49  | 0,76   | 0,68     |
|       | Medián | 0,55   | 0,67   | 0,67   | 0,65  | 0,52  | 0,63  | 0,61  | 0,77   | 0,69     |
| < 40° | Átlag  | -1,12  | 0,01   | 0,01   | -0,12 | -1,08 | -0,18 | -0,07 | 0,26   | -0,16    |
|       | Medián | -0,19  | 0,40   | 0,40   | 0,33  | -0,12 | 0,30  | 0,29  | 0,52   | 0,38     |

#### 4.3.1.1. Napi szintű vizsgálatok összegzése

A különböző földrajzi szélességen elhelyezkedő és tengerszint feletti magassággal jellemezhető állomásainkat napi szintű vizsgálatnak vetettük alá, mely során a mért és becsült adatsorok közti *bias*, *RMSE*,  $R^2$  és *ME* statisztikákat származtattunk. Állomásainkat a 40° földrajzi szélességi körtől vett helyzet, a tengerszint feletti magasság, valamint az óceántól vett távolság függvényében osztályokba soroltuk, s elemzéseinket ennek megfelelően végeztük.

A napi szintű vizsgálat alapján elmondhatjuk, hogy a szisztematikus hiba tekintetében az európai állomásokon kívül minden esetben a BC84 módszer 2. és 3. futtatásai bizonyultak a legjobbnak. Az *RMSE*, az  $R^2$ , illetve az *ME* esetén, bár az előbbieket is kedvező eredményeket mutattak, a mért és becsült adatsorok közti legszorosabb kapcsolat az MTClim és az Ensemble módszer adatsorai esetén volt megfigyelhető.

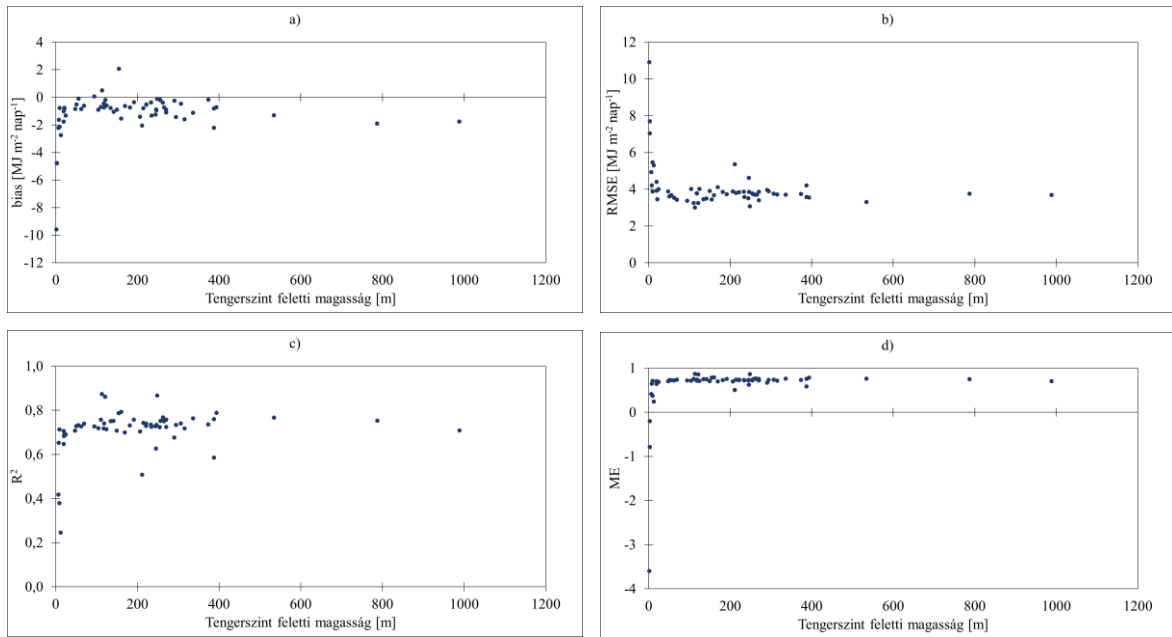
Az európai állomások, illetve a 40° szélességi körtől délre elhelyezkedő, és 400 m-nél magasabban fekvő mérőhelyek esetén az Ensemble modell alkalmazása bizonyult a leghatékonyabbnak. Az part menti állomások vizsgálata szélességi körtől függetlenül az MTClim modellt mutatta a legoptimálisabbnak, bár a hiba nagysága egyes mérőszámok esetén a módszer alkalmazása mellett is magas volt. Szintén az MTClim modell mutatta a legkedvezőbb értékeket a 40° szélességtől északra fekvő állomások esetén, de az Ensemble

módszerrel együtt ugyancsak hatékonyak bizonyult a kijelölt szélességtől délre, 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő mérőhelyek vizsgálata során is.

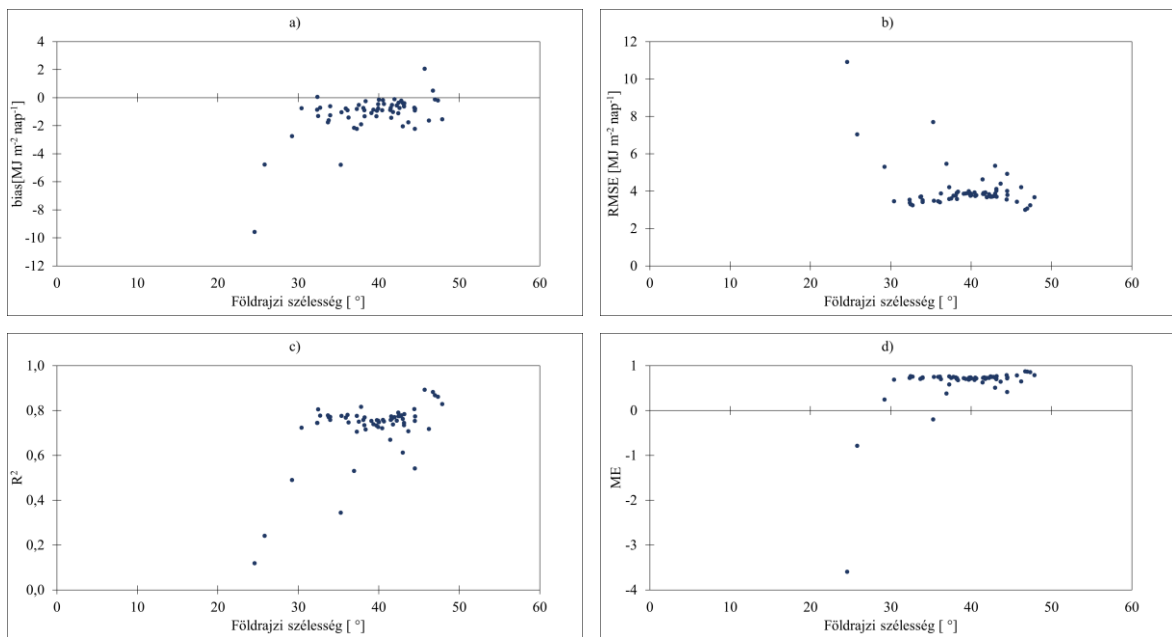
A mérőszámok összességét tekintve az MTCLim modell alkalmazása tűnt a legmegfelelőbbnek. Az Ensemble módszer annak ellenére, hogy sok esetben a legkedvezőbb értékekkel szolgált, a hibastatisztikák egészét tekintve az MTCLim modelltől némileg gyengébb, de korrekt eredményt mutatott. Mindemellett elmondható, hogy a szisztematikus hiba csökkentése szempontjából a BC84/2 és BC84/3 futtatások alkalmazása a legcélravezetőbb.

Napi szintű vizsgálataink kapcsán arra vonatkozóan is kerestük a választ, hogy vajon fennáll-e bármilyen kapcsolat a származtatott hibastatisztikák, illetőleg a földrajzi szélesség, és a tengerszint feletti magasság között. Az esetlegesen fennálló összefüggés meglétére a 17. és 18. ábra segítségével próbálunk választ adni. A vizsgálat az Ensemble módszer esetén származtatott statisztikák alapján történt.

A *bias* (17/a) és 18/a) ábra), és az *RMSE* (17/b) és 18/b) ábra) esetén elmondható, hogy a magas hibaértékek az alacsonyabb tengerszint feletti magassággal és alacsony földrajzi szélességgel jellemzett állomások esetén fordulnak elő, majd a hiba értéke állandósul, s sem a magasság, sem az Egyenlítőtől vett távolság további növekedése nem eredményez tendenciabeli eltérést. Az  $R^2$  (17/c) és 18/c) ábra) és az *ME* (17/d) és 18/d) ábra) esetén is látszik, hogy kapcsolat egyedül az alacsonyan fekvő állomások esetén válik jelentőssé, a többi mérőhelyre vonatkozóan ennek értéke csupán kissé ingadozik. A hiba nagysága tehát nem hozható összefüggésbe sem a tengerszint feletti magasság, sem a földrajzi szélesség változásával. Az óceánparti állomásokat nem számítva a hiba mértéke szűk tartományon belül változik.



17. ábra. A származtatott hibastatisztikák függése a tengerszint feletti magasságtól.



18. ábra. A származtatott hibastatisztikák függése a földrajzi szélességtől.

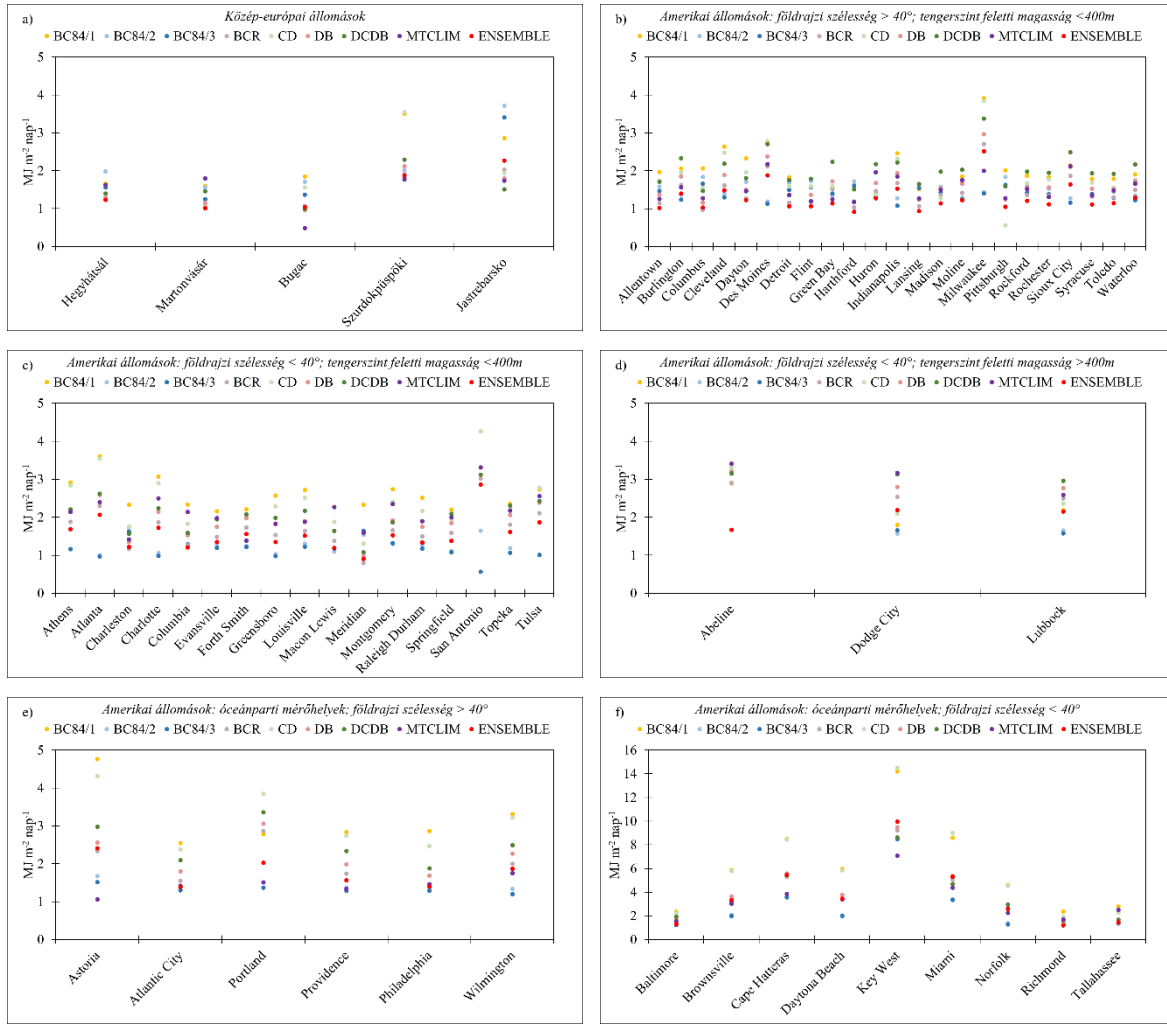
#### 4.3.2. Havi szintű statisztikai elemzés

A modellezéssel előállított adatsorainkat havi bontásban is vizsgáltuk. A vizsgálat motivációja az volt, hogy több olyan modellt is használnak operatívan, amelyek havi szintű meteorológiai paramétereket - köztük a globálsugárzást - használnak. Emiatt fontos annak ismerete is, hogy a havi átlagok alapján meghatározott statisztikák mennyire mutatnak szoros kapcsolatot a mért és becsült adatsorok között. A vizsgálatokat a napi elemzésnek megfelelően, az állomások 3.1. fejezetben leírásra kerülő csoportosítása szerint végeztük.

A mért és becsült adatsorok havi *bias* statisztikáinak származtatásánál a napi összehasonlítással teljesen megegyező eredményre jutottunk (lásd. 13. ábra). Ennek elemzésével így ebben a fejezetben nem foglalkozunk.

A 19. ábra a mérőhelyek becsült adatsorainak havi szintű származtatott *RMSE* statisztikáit mutatja. Az *RMSE* kapcsán a korábban tapasztaltakhoz képest nagyobb különbséget figyelhettünk meg. A négyzetes hiba értéke szinte minden esetben csökkent, mely leghatározottabban a közép-európai mérőhelyek esetén volt megfigyelhető (19/a ábra). Néhol a hiba nagysága akár a felére is lecsökken a napi szintű statisztikákhoz képest. Az amerikai állomások esetén az *RMSE* nagysága szintén hangsúlyos mérséklődést mutatott, de az európai állomásokéhoz képest ennek mértéke valamelyest kisebb mértékű volt. A mérőhelyek közül egyedül Key West hibái nem mutattak semminemű javulást, az *RMSE* nagysárendje a napi összehasonlításnak megfelelően alakult (19/f ábra).

A négyzetes hiba havi vizsgálata során amellet, hogy az állomások esetén a hiba nagyságának csökkenését láttuk megfigyelhető, hogy a korábban legjobbnak bizonyuló MTCLim modell helyett átlagosan a BC84 módszer 2. és 3. futtatásai mutatták a legkedvezőbb *RMSE* statisztikákat (22 - 25. táblázat). Az állomásokat külön-külön vizsgálva (19. ábra) az európai mérőhelyek, illetve a 40° földrajzi szélesség felett, 400 m alatt fekvő városok esetén az Ensemble módszer tűnt a legmegfelelőbbnek, a városok további részénél viszont a BC84/1 és BC84/2 modellek adták a legalacsonyabb hibaértékeket.



19. ábra. A mérőhelyek becstelt adatsorainak havi szintű származtatott RMSE statisztikái az egyes modellek esetén.

22. táblázat. A közép-európai állomások havi szintű RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén  $MJ m^{-2} nap^{-1}$  mértékegységben kifejezve.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 2,30   | 2,20   | 1,88   | 1,46 | 189  | 1,46 | 1,53 | 1,49   | 1,49     |
| <b>Medián</b> | 1,85   | 1,98   | 1,56   | 1,27 | 1,56 | 1,28 | 1,46 | 1,74   | 1,24     |

23. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben kifejezve.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 2,03   | 1,51   | 1,38   | 1,44 | 1,80 | 1,66 | 2,04 | 1,53   | 1,28     |
| <b>Medián</b> | 1,87   | 1,53   | 1,40   | 1,36 | 1,69 | 1,56 | 1,98 | 1,48   | 1,15     |

24. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben kifejezve.

|                   |               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|-------------------|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>&lt; 400 m</b> | <b>Átlag</b>  | 2,67   | 1,25   | 1,16   | 1,69 | 2,39 | 1,95 | 2,05 | 2,11   | 1,55     |
|                   | <b>Medián</b> | 2,52   | 1,24   | 1,18   | 1,64 | 2,20 | 1,90 | 2,08 | 2,14   | 1,52     |
| <b>&gt; 400 m</b> | <b>Átlag</b>  | 2,29   | 2,12   | 2,13   | 2,65 | 2,59 | 2,93 | 3,08 | 3,06   | 2,00     |
|                   | <b>Medián</b> | 2,19   | 1,65   | 1,66   | 2,54 | 2,36 | 2,80 | 3,13 | 3,17   | 2,15     |

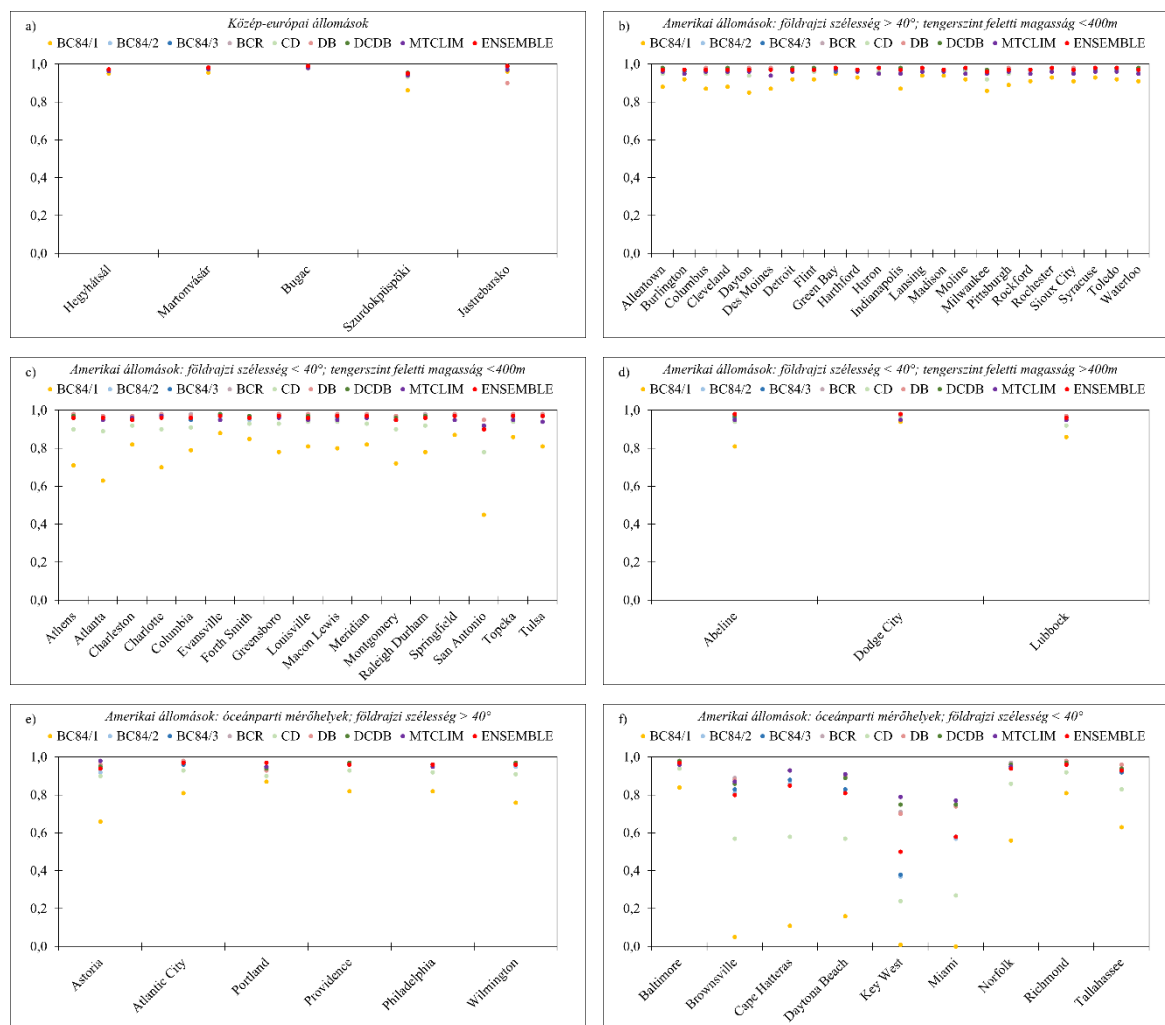
25. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű RMSE átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében MJ m<sup>-2</sup> nap<sup>-1</sup> mértékegységben megadva.

|                 |               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>^ 40°</b>    | <b>Átlag</b>  | 3,19   | 1,41   | 1,33   | 1,99 | 3,16 | 2,23 | 2,53 | 1,42   | 1,78     |
|                 | <b>Medián</b> | 2,86   | 1,37   | 1,30   | 1,87 | 2,98 | 2,13 | 2,42 | 1,44   | 1,72     |
| <b>&lt; 40°</b> | <b>Átlag</b>  | 6,14   | 2,80   | 2,74   | 3,70 | 6,07 | 3,97 | 3,74 | 3,31   | 3,79     |
|                 | <b>Medián</b> | 5,87   | 2,03   | 1,99   | 3,35 | 5,79 | 3,65 | 3,22 | 3,05   | 3,35     |

A magyarázott variancia állomásokra vonatkozó értékei a 20. ábrán láthatók, az állomásokra vonatkozó átlagos értékeket pedig a 26 - 29. táblázatok tartalmazzák. A napi szintű vizsgálattal összevetve minden állomás és modellfuttatás esetén magasabb  $R^2$  értékeket tapasztaltunk. A mérőhelyek szinte minden esetben 90% feletti változékonyságra adott magyarázata mellett a modellek közül csupán a BC84/1 módszer futtatása, az állomások tekintetében pedig a 40° földrajzi szélességtől délre eső partmenti városok esetén adódott ennél alacsonyabb, utóbbi vizsgálatokor olykor rendkívül alacsony  $R^2$  érték. A többnyire szoros eredmény következtén legjobban teljesítő modellt kiemelni a havi elemzés során nem érdemes,



ám ha a kis különbségek ellenére is a lehető legmagasabb havi magyarázott variancia értéket szeretnénk elérni, akkor a BCR módszer alkalmazása a legcélravezetőbb.



20. ábra. A mérőhelyek becsült adatsorainak havi szintű származtatott  $R^2$  statisztikái az egyes modellek esetén.

26. táblázat. A közép-európai állomások havi szintű  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,94   | 0,97   | 0,97   | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,98 | 0,97   | 0,98     |
| <b>Medián</b> | 0,95   | 0,97   | 0,98   | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,98 | 0,97   | 0,98     |

27. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| Átlag  | 0,91   | 0,97   | 0,97   | 0,98 | 0,95 | 0,98 | 0,98 | 0,96   | 0,97     |
| Medián | 0,92   | 0,97   | 0,97   | 0,98 | 0,95 | 0,98 | 0,98 | 0,96   | 0,97     |

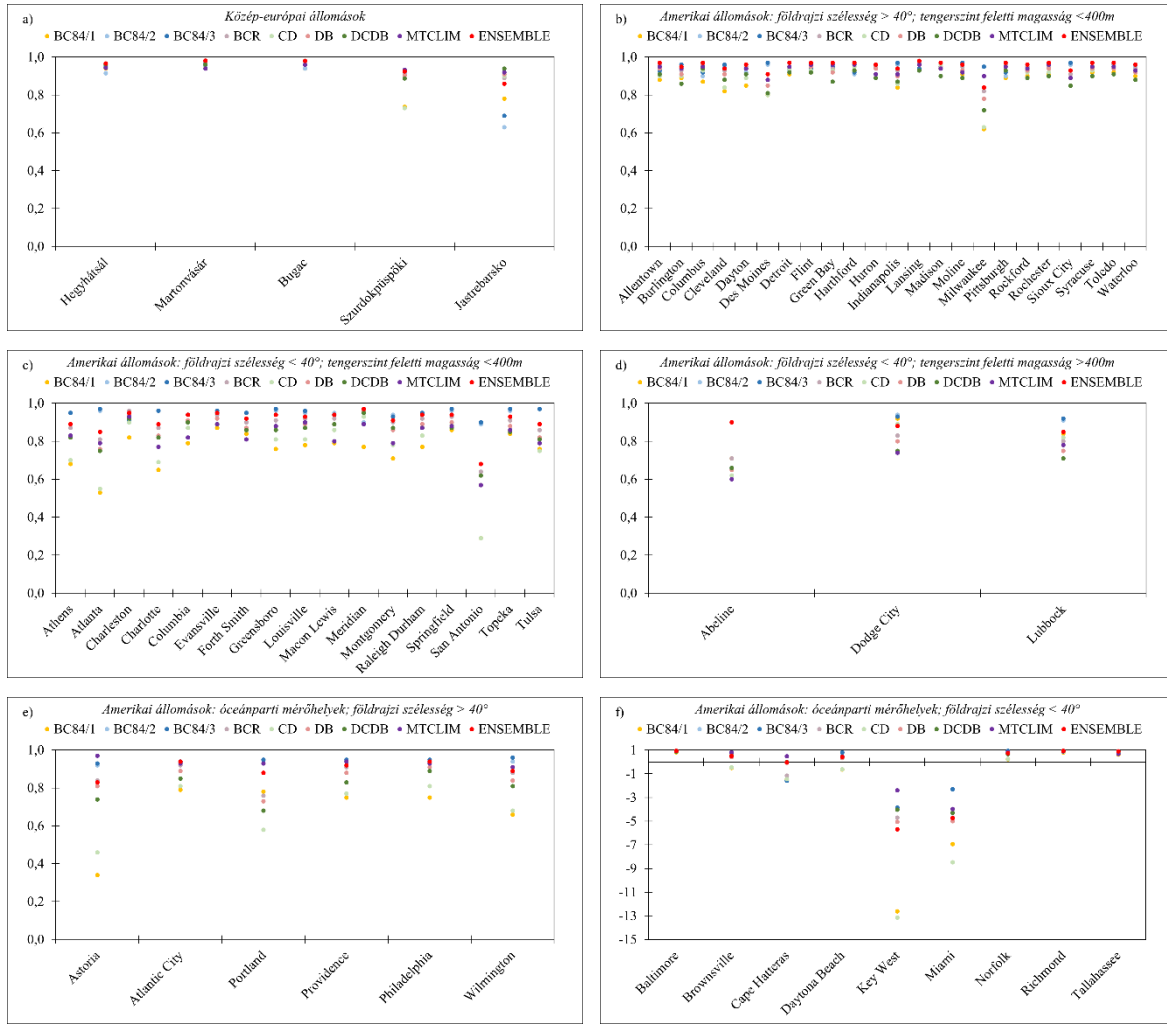
28. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében.

|         |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|---------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| < 400 m | Átlag  | 0,77   | 0,96   | 0,96   | 0,98 | 0,92 | 0,97 | 0,97 | 0,95   | 0,96     |
|         | Medián | 0,80   | 0,96   | 0,97   | 0,97 | 0,93 | 0,98 | 0,97 | 0,95   | 0,96     |
| > 400 m | Átlag  | 0,87   | 0,96   | 0,96   | 0,98 | 0,94 | 0,98 | 0,97 | 0,95   | 0,97     |
|         | Medián | 0,86   | 0,96   | 0,96   | 0,98 | 0,94 | 0,98 | 0,97 | 0,95   | 0,97     |

29. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű  $R^2$  átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében.

|       |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTclim | Ensemble |
|-------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| > 40° | Átlag  | 0,79   | 0,95   | 0,96   | 0,96 | 0,92 | 0,96 | 0,96 | 0,96   | 0,96     |
|       | Medián | 0,82   | 0,96   | 0,96   | 0,97 | 0,92 | 0,97 | 0,97 | 0,96   | 0,96     |
| < 40° | Átlag  | 0,35   | 0,80   | 0,81   | 0,90 | 0,64 | 0,89 | 0,89 | 0,90   | 0,82     |
|       | Medián | 0,16   | 0,86   | 0,88   | 0,93 | 0,58 | 0,93 | 0,93 | 0,93   | 0,85     |

A havi szintű vizsgálatok származtatott  $ME$  értékeit a 21. ábra szemlélteti. A havi vizsgálatok az  $RMSE$  és az  $R^2$  mellett az  $ME$  esetén is többnyire jelentős javulást mutattak. A napi vizsgálatok eredményeihez képest átlagosan 0-25%-kal növekedett a modellhatékonyság értéke, mely alól egyedül a 40° szélesség alatt elhelyezkedő partmenti városok kivételek. Ezek esetén az egyes modellfuttatáshoz tartozó havi átlagos érték akár a hatékonyság csökkenését is mutatta. A legalacsonyabb  $ME$  a havi elemzések kapcsán is a BC84 módszer 1. futtatása, valamint a CD modell esetén jelentkezett. Általánosan legjobbnak mondható modell viszont ez esetben sem emelhető ki. Ahogy azt a 30 - 33. táblázatok átlagos értékei is mutatják, az állomáscsoportok mindegyikében más-más módszer mutatta a legkedvezőbb eredményt.



21. ábra. A mérőhelyek becsült adatsorainak havi szintű származtatott ME statisztikái az egyes modellek esetén.

30. táblázat. A közép-európai állomások havi szintű ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,87   | 0,87   | 0,90   | 0,95 | 0,91 | 0,95 | 0,95 | 0,94   | 0,94     |
| <b>Medián</b> | 0,94   | 0,91   | 0,95   | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,94   | 0,97     |

31. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől északra, valamint 400 m tengerszint feletti magasság alatt elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén.

|               | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTCLim | Ensemble |
|---------------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| <b>Átlag</b>  | 0,88   | 0,94   | 0,95   | 0,94 | 0,90 | 0,92 | 0,89 | 0,94   | 0,95     |
| <b>Medián</b> | 0,90   | 0,94   | 0,95   | 0,95 | 0,92 | 0,94 | 0,90 | 0,94   | 0,97     |

32. táblázat. A 40° földrajzi szélességtől délre elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a tengerszint feletti magasság függvényében.

|         |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR  | CD   | DB   | DCBB | MTClim | Ensemble |
|---------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|------|--------|----------|
| < 400 m | Átlag  | 0,73   | 0,94   | 0,95   | 0,89 | 0,78 | 0,86 | 0,85 | 0,83   | 0,91     |
|         | Medián | 0,77   | 0,95   | 0,95   | 0,91 | 0,83 | 0,88 | 0,87 | 0,83   | 0,93     |
| > 400 m | Átlag  | 0,82   | 0,84   | 0,84   | 0,78 | 0,78 | 0,73 | 0,71 | 0,71   | 0,88     |
|         | Medián | 0,84   | 0,91   | 0,92   | 0,80 | 0,82 | 0,75 | 0,71 | 0,74   | 0,88     |

33. táblázat. A part mentén elhelyezkedő amerikai állomások havi szintű ME átlaga és mediánja az egyes módszerek esetén a földrajzi szélesség függvényében.

|       |        | BC84/1 | BC84/2 | BC84/3 | BCR   | CD    | DB    | DCBB  | MTClim | Ensemble |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| > 40° | Átlag  | 0,68   | 0,94   | 0,95   | 0,87  | 0,69  | 0,84  | 0,80  | 0,94   | 0,90     |
|       | Medián | 0,75   | 0,94   | 0,95   | 0,90  | 0,73  | 0,86  | 0,82  | 0,93   | 0,91     |
| < 40° | Átlag  | -2,18  | -0,27  | -0,26  | -0,67 | -2,37 | -0,67 | -0,44 | -0,14  | -0,66    |
|       | Medián | -0,49  | 0,81   | 0,83   | 0,51  | -0,45 | 0,42  | 0,55  | 0,69   | 0,51     |

#### 4.3.2.1. Havi szintű elemzések összegzése

A havi szintű vizsgálatok esetén elmondható, hogy a *bias* a napi értékekhez képest nem változott. Az *RMSE*, az  $R^2$ , illetve az *ME* értékek a modellek többségénél javulást mutatott, az Egyenlítőhöz közelebb eső partmenti városok esetén azonban változást nem tapasztaltunk. A napi szintű vizsgálatokhoz hasonlóan elmondható, hogy a kontinens belsejében fekvő városok esetén sem a földrajzi szélesség szerinti megkülönböztetés, sem a tengerszint feletti magasság növekedése nem okozott nagy különbséget a statisztikák értékében. A legrosszabb statisztikával a BC84/1 és a CD modellek jellemezhetők, legjobb modellt azonban a szoros értékek miatt nem tudtunk kiemelni.

#### 4.4. Az eredmények diszkussziója

Ahhoz, hogy a modellfuttatásaink során kapott eredményeket nemzetközi kontextusban is értelmezni tudjuk, az általunk felhasznált modellek más kutatók által kapott eredményeit is összevetettük az eredményeinkkel. Szerencsére számos tanulmány foglalkozik az alkalmazott eljárások vizsgálatával, így az összevetés viszonylag könnyen megvalósítható volt. A fejezetben ezek közül csak néhányat ismertetünk, melyek kiválasztásánál arra törekedtünk, hogy amellett, hogy az általunk vizsgált térségéről származzon az információ, az itt használt modellek mindegyikéhez mutassunk be összevethető eredményt. A közölt adatok általában több mérőállomás átlagolt értékeit tartalmazzák. Általában véve az egyes tanulmányok több hibastatisztika értékét is közlik, az ismertetésük során viszont csak az általunk is alkalmazott hibastatisztikák értékét szerepeltettük.

Az MTCLim modell alapját leíró Thornton and Running (1999) tanulmányban a modell vizsgálatát az USA területének 40 mérőállomására vonatkozóan végezték el. A modell hibáinak jellemzésére egyéb mérőszámok mellett *bias* értékeket is közöltek. A szisztematikus hiba tanulmányban vizsgált állomásokra vonatkozó értékére  $-3,24 - 2,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  között alakult. A tengerparti állomásokat figyelmen kívül hagyva az általunk származtatott hiba nagysága hasonlóan  $-3,39$  és  $1,30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  közé esett, ami tehát összevethető a tanulmányban közöltekkel.

A Mavromatis and Jagtap (2005) tanulmányban szintén az Egyesült Államok GR adatainak vizsgálatával foglalkoztak. Florida állam 15 állomásának GR becslését a RadEst program módszereinek felhasználásával végezték. A mért és becsült adatsorok közelségét többek közt *RMSE* és  $R^2$  értékek származtatásával jellemezték. A DB modell mérőhelyekre vonatkozó átlagos *RMSE* nagysága  $4,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -nak, az  $R^2$ -é pedig 0,7-nek adódott. Mindez egy az egyben megfeleltethető az általunk vizsgált állomásokra vett átlagos értékekkel. A származtatott négyzetes hiba a mi esetünkben  $4,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , a magyarázott variancia nagysága pedig 0,71-nek bizonyult. Ahogy azt a dolgozatban megállapítottuk, úgy a tanulmány is alátámasztja, hogy a tengerparti városok esetén a mért és becsült adatsorok közti kapcsolat romlik. A cikk ezt Miami és Palm Beach állomások példáján keresztül érzékelteti, amelyek esetén a vizsgált időszakot tekintve 0,5 alatti  $R^2$  értékeket kaptak.

A CD és DB modell angliai alkalmazhatóságának vizsgálatával a Rivington et al. (2005) tanulmányban találkozhatunk. 24 állomás adatainak felhasználásával a becsült GR adatsorok *RMSE* hibáit is vizsgálták, mely a mérőállomásokra vonatkozó átlagos értékei a CD modell

esetén  $4,28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , a DB modell esetén pedig  $4,37 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ . Ezek egyaránt megfelelnek a vizsgálataink során kapott átlagos  $4,66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  (CD modell) és  $4,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  (DB modell) értékeknek.

Kínában a GR vizsgálata népszerű kutatási terület, így a GR becslések eredményének bemutatásával számos cikk foglalkozik. A Liu et al. (2009) tanulmány kifejezetten hőmérséklet-alapú modellek alkalmazhatóságát vizsgálja. 16 módszerrel együtt a BC84, és a CD modell eredményeiről is beszámoltak. Az  $R^2$  értékeit származtatva  $0,69 - 0,77$  közötti kapcsolatot kaptak. Az általunk vizsgált állomások esetén a modellekre kapott értékek ennél kicsit tágabb intervallumban mozogtak. A BC84/1 modell esetén  $0,45 - 0,86$ , a CD modell esetén pedig  $0,56 - 0,89$  közötti értékeket kaptunk. Az *RMSE* kapcsán viszont a hiba nagysága egyaránt  $3$  és  $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$  közötti volt.

Magyarországon Fodor Nándor és Mika János nevéhez köthető egy fontosabb tanulmány a témakörben (Fodor and Mika, 2011). Vizsgálataikat az USA-ra vonatkozóan végezték azon állomások alapján, amit itt is bemutattunk. Újjonnan megalkotott módszerüket a CD modellel összevetve ellenőrizték. Többek között származtatták a modellek és a mért adatok közti *RMSE* és  $R^2$  értékeit. Számításaik a CD módszert alkalmazva az *RMSE* esetén az egyes állomásokra vonatkozóan  $3,51$  és  $4,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ , míg  $R^2$  esetén  $0,672$  és  $0,757$  közötti értékeket eredményeztek, melyek mindegyike összevethető az általunk kapott hiba nagyságrendjével.

Az előzőekben bemutatott adatok alapján elmondható, hogy a modellfuttatásaink hibastatisztikai összevethetők a világ különböző területein kapott értékekkel, és az eredmények ezzel konzisztensek.

## 5. Összefoglalás

A dolgozat közép-európai és amerikai állomások mérési adatainak felhasználásával történő globálsugárzás becsléssel, illetve a szimulált adatok minőségének vizsgálatával foglalkozik. Becsült adatsoraink előállításához 6 módszert alkalmaztunk: a Bristow-Campbell modellt, az MTCLim modellt, illetve az ún. RadEst program felhasználásával további négy módszert, nevezetesen a Bristow-Campbell módszer egy speciális változatát, a Campbell-Donatelli, a Donatelli-Bellocchi, és előbbieik ötvözésével megalkotott DCBB módszert. A Bristow-Campbell módszer három különböző paraméterbeállításával, és ennek alapján a 8 becsült adatsor átlagolásával kapott ún. Ensemble módszerrel együtt összességében 9 becsült adatsorhoz jutottunk. Vizsgálataink során amellyel, hogy a különböző módszerek, legfőképpen az Ensemble modell hatékonyságáról információt kapjunk célunk volt azon feltételezés igazolása/elvetése is, miszerint a becsült adatsorok alapján származtatott hiba nagysága függ a földrajzi szélesség, illetve a tengerszint feletti magasság megválasztásától. Ennek megfelelően állomásainkat önkényesen megszabott feltételek szerint csoportokra osztottuk. Elemzéseinket napi és havi szinten is elvégeztük, s a kapcsolat szorosságát *bias*, *RMSE*,  $R^2$ , illetve *ME* statisztikák származtatásával jellemeztük.

A napi szintű vizsgálat során a modellhibát jellemző statisztikai mérőszámok összességét tekintve az MTCLim modell alkalmazása tűnt a legmegfelelőbbnek, bár amennyiben a cél a lehető legkisebb szisztematikus hiba elérése, a BC84/2 és BC84/3 módszer alkalmazása a leginkább célravezető. Az Ensemble módszer a hibastatisztikák egészét tekintve az MTCLim modelltől némileg gyengébb, de szintén igen jó eredményt mutatott. Az európai és az amerikai állomások között bár a *bias* és *RMSE* értékek kapcsán különbség nem mutatkozott, a magyarázott variancia és modellhatékonyság mértéke a közép-európai mérőhelyek esetén magasabbnak bizonyult. Megállapítottuk, hogy a hiba nagysága a tengerszint feletti magasság növekedésével nem mutat változást, de a modellek közötti egyetértés a hiba nagyságát illetően nagyobb lett. Vizsgálataink során felfigyeltünk arra is, hogy tavak közelsége érzékenyen hat a becsléseink minőségére. A vízfelszín befolyása a hőingásra gyengítheti a transzmittanciával fennálló erős kapcsolatot, emiatt a hiba nagysága becsült adatsoraink származtatása során megnőhet. Ezt támasztja alá a partmenti állomások esetén tapasztalt romlás a statisztikák értékében, mely különösképp az Egyenlítőhöz közelebb eső városok kapcsán volt megfigyelhető. Mivel az ugyanezen szélességen, de a kontinens belsejében fekvő, valamint szintén a part mentén, de északabbra elhelyezkedő állomások esetén is az átlagnak megfelelő

hiba adódott, arra következtethettünk, hogy önmagában a földrajzi szélesség változása a hiba értékében nem eredményez változást, az óceánok közelsége azonban olykor jelentősen befolyásolja a becsült értékek helyességét.

A havi szintű vizsgálatok esetén a szisztematikus hibától eltekintve jelentős javulást kaptunk a statisztikák értékében. A napi vizsgálatok eredményeihez képest akár átlagosan 0-25%-kal is növekedett a modellhatékonyság illetve a magyarázott variancia értéke, s a havi értékek származtatásával az *RMSE* hiba akár a felére is csökkenhet. Ez valószínűleg annak köszönhető, hogy a napi léptékű véletlenszerű hibák képesek kioltani egymást havi szinten. A napi elemzés során tapasztalt különbség az európai és amerikai állomások értékei közt a havi vizsgálat során már nem volt megfigyelhető. A BC84/1 és a CD modelleken kívül az összes módszer jól teljesített, a kis különbségek miatt legjobbnak tartott modell a havi elemzés során nem emelhető ki.

Vizsgálataink során a modellek hatékonysága az egyes állomáscsoportok esetén nem volt egyöntetű. Az Ensemble módszer jósága az európai vizsgálatok kapcsán egyértelmű mind a napi, mind a havi elemzések esetén is. Itteni becsléseinkhez tehát célszerű ezen modell választása. Tudomásunk szerint hasonló következtetést más még nem volt le, ezért ez új tudományos eredmény. Az amerikai állomások esetén a napi és havi vizsgálatok során más-más eredményre jutottunk. A havi statisztikák egybehangzóan a BC84 módszer 2. és 3. futtatását mutatták a legjobbnak, ezzel szemben a napi elemzés során egyetlen modell kiemelése sem lenne helytálló. A kontinens belsejében 400 m tengerszint feletti magasság alatt fekvő állomások esetén az MTCLim módszer teljesítménye a legmeggyőzőbb, a tengerszint feletti magasság növekedésével viszont az Ensemble módszer válik hatékonyabbá. Az óceánparti területek vizsgálata során a statisztikák szintén az MTCLim módszert mutatják a legjobbnak, de ez esetben közel hasonló eredménnyel alkalmazhatók a BC84/2 és BC84/2 modellek is.



## *Köszönetnyilvánítás*

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, dr. Barcza Zoltánnak a diplomamunkám megírásában nyújtott áldozatos munkájáért. Köszönöm a rengeteg segítséget és útmutatást, amivel hozzásegített a dolgozat elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom Ihász Istvánnak az irodalmi áttekintés megírásában nyújtott segítségéért, illetve Marcello Donatellinek és Gianni Bellocchinak a RadEst szoftver használatát segítő tanácsokért. Szeretném megköszönni Fodor Nándornak, hogy az amerikai állomások mérési adatait elérhetővé tette számunkra.

Köszönöm a Numerical Terradynamic Simulation Group-nak, hogy az MTCLim 4.3 modellt rendelkezésünkre bocsátotta.

## *Irodalomjegyzék*

Ångström, A., 1924: Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50, 121-125. DOI: 10.1002/qj.49705021008

Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L. A., Ingwersen, J., Izaurralde, R. C., Kersebaum, K. C., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Oelsen, J. E., Osborne, T. M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J. W., Williams, J. R., Wolf, J., 2013: Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change, 3, 827-832. DOI: 10.1038/NCLIMATE1916

Bahel, V., Bakhsh, H., Srinivasan, R., 1987: A correlation for estimation of global solar radiation. Energy 12, 131-135. DOI: 10.1016/0360-5442(87)90117-4

Bartholy, J., Geresdi, I., Matyasovszky, I., Mészáros, R., Pongrácz, R., 2011: A meteorológia alapjai. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 176p.

Bassu, S., Brisson, N., Durand, J. L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J. W., Rosenzweig, C., Ruane, A. C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurralde, C., Jongschaap, R., Kemanian, A. R., Kersebaum, K. C., Kim, S. H., Kumar, N. S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M. V., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D., Waha, K., 2014: How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? Global Change Biology, 20, 2301-2320. DOI: 10.1111/gcb.12520

Bechini, L., Ducco, G., Donatelli, M., Stein, A., 2000: Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. Agriculture, Ecosystems and Environment, 80, 29-42. DOI: 10.1016/S0167-8809(00)00170-5

Bencze, P., Major, Gy., Mészáros, E., 1982: A meteorológiai sugárzástan alapjai. In: Fizikai meteorológia (szerk.: Major, Gy.). Akadémiai Kiadó, Budapest. 33-108.

Bristow, K. L., Campbell, G. S., 1984: On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, 159-166. DOI: 10.1016/0168-1923(84)90017-0

De Jong, R., Stewart, D. W., 1993: Estimating of daily global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 73, 509-518. DOI: 10.4141/cjps93-068

Dobosi, Z., 1957: A napfénytartam és a globális sugárzás összefüggése Magyarországon. *Időjárás*, 61, 347-356.

Donatelli, M., Bellocchi, G., 2001: Estimate of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst 3.00. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems*, 16-18 July, Florence, Italy, 213-214.

Donatelli, M., Bellocchi, G., Fontana, F., 2003: RadEst3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *European Journal of Agronomy*, 18, 363-367. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00130-2

Donatelli, M., Campbell, G. S., 1998: A simple model to estimate global solar radiation. In: *Proceedings of the Fifth European Society of Agronomy Congress*, vol. 2, The Slovak Agriculture University, Nitra, Slovak Republic, 133-134.

Fodor, N., 2012: Improving the S-Shape solar radiation estimation method for supporting crop models. *The Scientific World Journal*, 2012, Article ID 768530, 10p. DOI: 10.1100/2012/768530

Fodor, N., Mika, J., 2011: Using analogies from soil science for estimating solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 78-86. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.09.006

Goodin, D. G., Hutchinson, J. M. S., Vanderlip, R. L., Knapp, M. C., 1999: Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. *Agronomy Journal*, 91, 845-851. DOI: 10.2134/agronj1999.915845x

Grunow, J., 1958: Über die Beziehungen zwischen Sonnenscheindauer und Bewölkung. *Meteorologische Rundschau*, 11, 127-131.

Hansen, J. W., 1999: Stochastic daily solar irradiance for biological modelling applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 53-63. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00003-9

Hargreaves, G. H., Samani, G. A., 1982: Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 225-230. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1983)109:3(343)

Hlásny, T., Barcza, Z., Barka, I., Merganičová, K., Sedmák, R., Kern, A., Pajtík, J., Balázs, B., Fabrika, M., Churkina, G., 2014: Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management*, 328, 55-68. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.04.038

Huang, G., Li, X., Ma, M., Li, H., Huang, C., 2016: High resolution surface radiation products for studies of regional energy, hydrological and ecological processes over Heihe river basin, northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231, 67-78. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.04.007

Hunt, L. A., Kuchar, L., Swanton, C. J., 1998: Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 293-300. DOI: 10.1016/S0168-1923(98)00055-0

Janssen, P. H. M., Heuberger, P. S. C., 1995: Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling*, 83, 55-66. DOI: 10.1016/0304-3800(95)00084-9

Lauscher, F., 1957: Zur Frage: „Sonnenschein + Bewölkung = 100%?“. *Wetter und Leben*, 9, 143-146.

Liu, D. L., Scott, B. J., 2001: Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 41-59. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00173-8

Liu, X. Y., Mei, X. R., Li, Y. Z., Zhang, Y. G., Wang, Q. S., Jensen, J. R., Porter, J. R., 2009: Calibration of the Ångström-Prescott coefficients (a, b) under different timescales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 697-710. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.10.027

Ma, S., Churkina, G., Wieland, R., Gessler, A., 2011: Optimization and evaluation of the ANTHRO-BGC model for winter crops in Europe. *Ecological Modelling*, 222, 3662-3679. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.08.025

Mahmood, R., Hubbard, K. G., 2002: Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the northern Great Plains, USA. *Agronomy Journal*, 94, 723-733. DOI: 10.2134/agronj2002.0723

Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J. W., Rötter, R. P., Boote, K. J., Ruane, A. C., Thorburn, P. J., Cammarano, D., Hatfield, J. L., Rosenzweig, C., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A. J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R. F., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L. A., Ingwersen, J., Izaurralde, R. C., Kersebaum, K. C., Müller, C., Kumar, S. N., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J. E., Osborne, T. M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche,

D., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C. O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., White, J. W., Wolf, J., 2015: Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology*, 21, 911-925. DOI: 10.1111/gcb.12768

Mavromatis, T., Jagtap, S. S., 2005: Estimating solar radiation for crop modeling using temperature data from urban and rural stations. *Climate Research*, 29, 233-243. DOI: 10.3354/cr029233

McCaskill, M. R., 1990: Prediction of solar radiation from rainy day information using regionally stable coefficients. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 247-255. DOI: 10.1016/0168-1923(90)90111-I

Mészáros, R., 2013: *Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest. 210p

Meza, F., Varas, E., 2000: Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 231-241. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00090-8

Monteith, J., 1965: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 281, 277-329. DOI: 10.1098/rstb.1977.0140

Nathan, K. K., 1986: A note on the relationship between photosynthetically active radiation and cloud amount. *Időjárás*, 90, 10-13.

Nicks, A. D., Harp, J. F., 1980: Stochastic generation of temperature and solar radiation data. *Journal of Hydrology*, 48, 1-17. DOI: 10.1016/0022-1694(80)90062-1

Paál, A., 1981: A globálsugárzás meghatározása műholdképek alapján. *Időjárás*, 85, 27-32.

Priestley, C. H. B., Taylor, R. J., 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-82. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

Ratkowsky, D. A., 1990: *Handbook of Nonlinear Regression Models*. Marcel Dekker, 241 pp.

Richardson, C. W., 1985: Weather simulation for crop management models. *Transactions of the ASABE*, 28, 1602-1606. DOI: 10.13031/2013.32484

Richardson, C.W. and Wright, D.A., 1984: A model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service ARS-8, 83p.

Rivington, M., Bellocchi, G., Matthews, K. B., Buchan, K., 2005: Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 228-243. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.07.013

Rivington, M., Matthews, K. B., Buchan, K., 2002: A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. *International Environmental Modelling and Software Society*, 3, 193-198.

Rivington, M., Matthews, K.B., Bellocchi, G., Buchan, K., 2006: Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data. *Agricultural Systems*, 88, 451–471. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.07.004

SAMSON. NOAA/NREL Solar and Meteorological Surface Observational Network 3-volume CD ROM. 2009, <http://ols.nndc.noaa.gov>

Sándor, R., Barcza, Z., Hidy, D., Lellei-Kovács, E., Ma, S., Bellocchi, G., 2016: Modelling of grassland fluxes in Europe: evaluation of two biogeochemical models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 215, 1-19. DOI: 10.1016/j.agee.2015.09.001

Sen, Z., 2001: Ångström equation parameter estimation by unrestricted method. *Solar Energy*, 71, 95-107. DOI: 10.1016/S0038-092X(01)00008-1

Steiner, J. L., Howell, T. A., Schneider, A., D., 1991: Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum. *Agronomy Journal*, 83, 240-247. DOI: 10.1029/96WR00801

Stull, R. B., 1988: Boundary Conditions and Surface Forcings. In: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 250-294.

Sürge, E., 2016: A globálsugárzás modellezése a Bristow Campbell módszer alapján. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: dr. Barcza Zoltán). 44p

Sürge, E., 2017: A globálsugárzás modellezése Magyarországon. Tudományos Diákköri Dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: dr. Barcza Zoltán). 45p

Takács, L., Zách, A., 1960: A borultság és a napsütés óraértékeinek kapcsolata. *Időjárás*, 64, 21-27.

Tar, K., 2006: *Általános meteorológia*. Kossuth Egyetemi kiadó, Debrecen. 142p.

Thornton, P. E., Hasenauer, H., White, M. A., 2000: Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 255-271. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00170-2

Thornton, P. E., Running S. W., 1999: An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 211-228. DOI: 10.1016/S0168-1923(98)00126-9

Trnka, M., Eitzinger, J., Kapler, P., Dubrovsky, M., Semerádová, D., Žalud, Z., Formayer, H., 2007: Effect of estimated daily global solar radiation data on the result of crop growth models. *Sensors*, 7, 2330-2362. DOI: 10.3390/s7102330

Wagner, A., 1927: Beziehung zwischen Sonnenschein und Bewölkung in Wien. *Meteorologische Zeitschrift*, 54, 161.

Woli, P., Paz, J. O., 2012: Evaluation of various methods for estimating global solar radiation in the southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 972-985. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0141.1

Woodward, S. J. R., Barker, D. J., Zyskowski, R. F., 2001: A practical model for predicting soil water deficit in New Zealand pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 44, 91-109. DOI: 10.1080/00288233.2001.9513464

Wu, G., Liu, Y., Wang, T., 2007: Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data: a case study in Nanchang station, China. *Energy Conversion and Management*, 48, 2447-2452. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.04.011

# NYILATKOZAT

**Név:**

**ELTE Természettudományi Kar, szak:**

**NEPTUN azonosító:**

**Szakedolgozat címe:**

A **szakedolgozat** szerzőjeként feyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2018

---

*a hallgató aláírása*