

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A globálsugárzás modellezése a Bristow-Campbell módszer alapján

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

Sürge Evelin

Témavezető:

dr. habil. Barcza Zoltán

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	Irodalmi áttekintés	5
2.1.	Globálsugárzás-becslő módszerek a szakirodalomban	5
2.1.1.	Sztochasztikus módszerek	6
2.1.2.	Bristow and Campbell (1984) modell	8
2.1.3.	Thornton and Running (1999) modell	8
2.1.4.	Fodor and Mika (2011) modell	11
2.1.5.	A RadEst program	12
3.	Felhasznált adatok és módszerek	15
3.1.	A BC84 modell részletes leírása	15
3.2.	A mérőhely bemutatása – Hegyhátsál	19
3.3.	Adatfeldolgozás és modellszimuláció	21
3.4.	Elemzési módszerek	22
4.	Eredmények	24
4.1.	A BC84 modell kalibrációjának eredményei	24
4.2.	A modellezett globálsugárzás statisztikai értékelése	25
4.2.1.	Éves statisztikai elemzés	25
4.2.2.	Havi szintű statisztikai elemzés	30
4.2.3.	Az éves és havi statisztikák eredményeinek értékelése	36
5.	Összefoglalás	37
	Köszönetnyilvánítás	39
	Irodalomjegyzék	40

1. Bevezetés

Földünk felszíni és légköri folyamatainak legfőbb energiaforrása a Naptól érkező elektromágneses sugárzás. 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. A geotermikus energia vagy egyéb energiaforrások mindezeknek csak elhanyagolható részéért felelnek (*Máhr and Varga-Haszonits, 1978*).

A Naptól érkező és a Föld légkörének peremét elérő sugárzás egy része jut csupán el a felszínre. A légkör felső határán a napsugárzás közel 30%-a visszaverődik, majd a felszín felé haladva az energia megmaradt része további veszteséget szenved (*Bartholy et al., 2011*). A légkörön való áthaladás során elnyelés 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 Naptól származó sugárzás azon hányadát, amely elnyelődés és szóródás nélkül éri el a felszínt, direkt-, vagy közvetlen sugárzásnak, míg másik részét, amely a levegő molekuláival és különböző szennyező anyagok részecskéivel ütközve eltérül, diffúz vagy szórt sugárzásnak nevezzük. E kettő együttese adja a globálsugárzást (*Tar, 2006*).

A globálsugárzást világszerte viszonylag kevés mérőállomáson regisztrálják. Magyarországon megközelítőleg 40 meteorológiai állomás rendelkezik globálsugárzást regisztráló műszerrel (*Pátkainé Rusznyák, 2014*). Ezek a berendezések (pl. piranométerek) meglehetősen költségesek, rendszeres kalibrációjuk és karbantartásuk elengedhetetlen helyes működésükhöz (*Fodor and Mika, 2011*). Ezen felül az egyes mérőhelyek adatsorainak megfelelő dokumentációja valamint archiválása is sok munkát és időt felemészt.

A globálsugárzás többek között a felszíni energiamérleg, és a földi ökoszisztémák működése szempontjából meghatározó jelentőségű. A globálsugárzás 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 növényi folyamatok és az éghajlatváltozás kölcsönhatásának becslésére. Többségüknek elengedhetetlen bemenő adata a maximum- és minimumhőmérséklet, illetve a csapadékmennyiség mellett a globálsugárzás is.

A hosszútávú és megfelelő minőségű globálsugárzás adatok hiánya az egyik fő korlátja e modellek alkalmazásának. Annak érdekében, hogy használhatók legyenek közvetlen mérési adatok nélkül is, globálsugárzás-becslő módszerek kifejlesztésébe kezdtek. A modellek közös jellemzője, hogy különböző meteorológiai adatok ismeretében becsülni tudják a globálsugárzást. Az egyes módszerek becslési pontossága viszont eltérő.

Szakedolgozatom célja az egyik legismertebb globálsugárzás-becslő módszer, a *Bristow and Cambell* (1984) modell bemutatása, valamint a módszer segítségével a globálsugárzás becslése és a modellezett adatok minőségének számszerűsítése a nyugat-magyarországi Hegyhátsál kutatóállomás adatai alapján. Munkánk során összegyűjtöttünk néhány fontosabb sugárzásbecslő módszert, melyek jellemzésével bemutatjuk az egyes modellek közötti eltéréseket is.

A dolgozat első részében a globálsugárzás-becslő modellek bemutatásával és összehasonlításával foglalkozunk, majd ezt követően a *Bristow and Campbell* (1984) módszer részletes leírása kerül sorra. Külön fejezetben lesz szó a hegyhátsáli mérőállomásról és az ott végzett mérésekről, végül pedig a *Bristow and Campbell* (1984) módszer alkalmazásával kapott eredmények ismertetése következik.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Globálsugárzás-becslő módszerek a szakirodalomban

A mezőgazdasági, ökológiai, biogeokémiai (és különböző egyéb) modellek működéséhez nélkülözhetetlen hőmérséklet és csapadékadatokkal ellentétben a globálsugárzás adatok erősen korlátozott számú mérőállomásra vonatkozóan állnak rendelkezésre. Mért információk hiányában szükségszerűvé vált a globálsugárzás számítógépes modellek segítségével történő becslése.

A globálsugárzás modellezésére számos módszer ismert a szakirodalomból. Általánosan alkalmazott eljárás a globálsugárzás sztochasztikus módszerek segítségével történő becslése, mely modellek alapja, hogy az adatok közti várható eltérések statisztikai átlagát a lehető legkedvezőbbre állítsák (pl. *Nicks and Harp*, 1980).

A legtöbb globálsugárzás-becslő modell a rendszeresen regisztrált meteorológiai állapothatározók felhasználásával származtatja a globálsugárzást, melyeket pl. a bemenő paraméterek szerint csoportokba sorolhatunk (*Woli and Paz*, 2012). Széles körben alkalmazott eljárás a globálsugárzás hőmérsékleti adatok felhasználásával történő becslése. Ezek a modellek a napi maximum- és minimumhőmérséklet segítségével származtatják a légköri transzmittancia, abból pedig a globálsugárzás nagyságát. Számos későbbi módszer alapjául szolgált a *Hargraves and Samani* (1982), a *Bristow and Campbell* (1984), valamint a *Richardson* (1985) által megalkotott módszer, melyek mindegyike a napi hőingás értékek felhasználásával, de más-más eljárást alkalmazva számítják a légköri áteresztés értékét. A *Bristow and Campbell* (1984) modell alapján készített módszert a későbbiekben pl. *Ratkowsky* (1990), *Campbell and Donatelli* (1998), *Thornton and Running* (1999), vagy *Donatelli and Belloccchi* (2001), míg a *Richardson* (1985) modellt felhasználva alkotott hőmérséklet alapú modellt pl. *Mahmood and Hubbart* (2002).

A globálsugárzás-becslő modellek egy másik csoportja csapadékadatok segítségével becsüli a globálsugárzást (pl. *McCaskill* (1990)), míg szintén nagyobb osztályt alkotnak az előbbi kettő ötvözésével, azaz mind a hőmérséklet, mind a csapadékadatok felhasználásával készített modellek. Ezen csoportba sorolható pl. a *De Jong and Stewart* (1993), a *Hunt et al.* (1998), a *Hodges et al.* (1985), a *Liu and Scott* (2001), vagy a *Fodor and Mika* (2011) modell. Utóbbi kettő kivételével mindegyik eljárás alapját a *Richardson* (1985) módszer képezi (*Woli and Paz*, 2012).

Ezek közül az elterjedtséget és hazai vonatkozásokat figyelembe véve a *Bristow and Campbell* (1984), a *Thornton and Running* (1999), illetve a *Fodor and Mika* (2011) sugárzásbecslő modellt érdemes kiemelni, melyeket az alábbiakban részletesen elemzünk. A *Nicks and Harp* (1980) módszeren keresztül bemutatjuk a globálisugárzás sztochasztikus módon történő becslését. A fejezet végén a RadEst program rövid bemutatásával és alkalmazásával foglalkozunk, mellyel négy különböző módszert összevetve készíthetünk becslést a globálisugárzásra (*Donatelli et al.*, 2003; *Mavromatis and Jagtap*, 2005).

2.1.1. Sztochasztikus módszerek

A mezőgazdasági, hidrológiai és biogeokémiai modellek eredményei alapvetően függenek a meteorológiai paraméterek értékeitől, köztük a globálisugárzás adatoktól. Előfordul azonban, hogy a modell számára nehéz bemenő adatot találni. A hiányzó információt sztochasztikus időjárás-generátorokkal is elő lehet állítani, melyre különböző eljárásokat fejlesztettek ki.

Kifejezetten hőmérséklet és sugárzás értékek előállítására használható *Nicks and Harp* (1980) módszere, mely alapján a globálisugárzás a következőképpen becsülhető:

$$R_{gh,i} = \overline{R_{gh}} + R(R_{gh,i-1} - \overline{R_{gh}}) + k\sigma_s(1 - R^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Az egyenletben szereplő R_{gh} a globálisugárzást, míg $\overline{R_{gh}}$ az előbbi adott napra vett átlagát jelöli $\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ mértékegységben kifejezve, R eltolt korreláció, k standard, véletlenszerű változó, i a napok sorszámának, míg σ_s a sugárzás napi szórásának jelölése.

Ahhoz, hogy a modell figyelembe vegye a csapadékos és csapadékmentes napok egymásutánosságát, illetve az évszakok váltakozását, az 1. egyenleten további módosításokat hajtottak végre. Négy esetet különítettek el egymástól: 1) száraz napot száraz nap követ; 2) nedves napot nedves nap követ; 3) nedves napot száraz nap követ; 4) száraz napot nedves nap követ. Mindezeket számításba véve az egyenlet a következő alakot ölti:

$$R_{gh}(K, M) = \overline{R_{gh}}(K, M) + R(K, M)[R_{gh, i-1}(K, M) - \overline{R_{gh}}(K, M)] + k\sigma_s(K, M)[1 - R^2(K, M)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

ahol $K=1, 2, 3, 4$ a négy figyelembe vett eset, valamint $M=1, 2, \dots, 12$ a hónapok sorszámja.

A hőmérsékleti értékek becslése ugyanezen eljárással történik, azzal a különbséggel, hogy a napi maximum- és minimumhőmérséklet feltűntetésére külön változót szerepeltetnek:

$$T_i = \overline{T} + R(T_{i-1} - \overline{T}) + k\sigma_T(1 - R^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$T_i(K, M, N) = \overline{T}(K, M, N) + R(K, M, N)[T_{i-1}(K, M, N) - \overline{T}(K, M, N)] + k\sigma_T(K, M, N)[1 - R^2(K, M, N)]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

ahol T a hőmérséklet, \overline{T} a napi átlaghőmérséklet (mindkettő Celsius fokban kifejezve), i a napok sorszámja, R eltolt korreláció, k standardizált, független változó, σ_T a hőmérséklet napi szórása, $K=1, 2, 3, 4$ a négy figyelembe vett eset, $M=1, 2, \dots, 12$ a hónapok sorszámja, $N=1, 2$ a maximum- és minimum hőmérséklet jelölése.

A száraz és nedves napok időbeli eloszlását az úgynevezett Markov-lánccal tanulmányozták. A Markov-lánc olyan folyamatot jelöl, amely Markov-tulajdonságú. Ez azt jelenti, hogy a rendszer pillanatnyi állapota tartalmaz minden olyan információt, ami hatással lehet a jövőbeli állapotára, vagyis a rendszer későbbi helyzete adott jelen mellett független a múltbeli eseményektől (Böjthy, 2013).

A modell által generált hőmérséklet és sugárzásértékeket két különböző módszerrel tesztelték. A mért és megfigyelt adatok közötti eltérést kétmintás t-próbával, az eloszlásbeli különbségeket pedig Kolmogorov-Szmirnov próbával számszerűsítették. A 11 éves időszakra előállított adatok vizsgálatánál arra az eredményre jutottak, hogy a modellezett globálsugárzás, a decemberi átlagértékek kivételével, sehol sem különbözik szignifikánsan a megfigyelttől, valamint a hőmérséklet esetén is csak a januári adatoknál tapasztaltak jelentékeny eltérést.

Ezt követően, további ellenőrzésképpen, a kapott hőmérsékleti és sugárzásértékeket felhasználták az evapotranszspiráció kiszámításához. A sztochasztikusan generált, valamint a rendelkezésre álló hőmérsékleti és sugárzási adatokból kapott havi evapotranszspiráció értékek összehasonlítása szintén az eljárás helyességét igazolta.

2.1.2. Bristow and Campbell (1984) modell

Azt a százalékos arányt, amely kifejezi, hogy a napsugárzás hányad része jut el a földfelszínre, transzmittanciának, azaz légköri áteresztésnek nevezzük, mely a felszínen mért, illetve a világürből érkező sugárzás hányadosaként írható fel. A *Bristow and Campbell* (1984) (a továbbiakban BC84) modell a napi hőingás és a légköri transzmittancia között fennálló kapcsolat segítségével származtatja a globálsugárzást. A napi hőingás és a globálsugárzás között fennálló, megfigyelés alapú (empirikus) kapcsolat képezi az alapját sok más sugárzásbecslő modellnek is, ezért a módszer bemutatása munkánk szempontjából alapvető fontosságú. A BC84 modell összefoglaló leírására a 3.1. fejezetben kerül sor.

2.1.3. Thornton and Running (1999) modell

A BC84 modell adott helyre vonatkozóan, meghatározott paraméterek alapján becsüli a globálsugárzást. Értelemszerűnek tűnt egy olyan módszer megalkotása, mely különböző éghajlatú területek mérőállomásai esetén is viszonylag pontos eredményt szolgáltat a paraméterek helyről helyre történő javítása nélkül. Ezen modell megalkotása Peter E. Thornton és Steven W. Running nevéhez köthető, akik a BC84 módszert felhasználva készítettek modellt a globálsugárzás becslésére. Kiindulási egyenletként az alábbi képlet szolgált:

$$R_{gh} = t_t \cdot R_{pot} \quad . \quad (5)$$

Az egyenletben szereplő R_{pot} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$) a lehetséges sugárzás mennyiségét jelöli, ami a légköri transzmittancia (t_t) hatására már gyengítve érkezik a földfelszínre (R_{gh}). Az

áteresztőképesség a napi hőingás (ΔT) és a tiszta égbolt esetén tapasztalt maximális áteresztés ($t_{t,max}$) függvényében változik. Az ezek között fennálló kapcsolatot B és C tapasztalati együtthatók szabályozzák (6. egyenlet).

$$t_t = t_{t,max} (1 - \exp(-B \cdot \Delta T^C)) \quad (6)$$

A globálsugárzás számítása a következőképpen történt:

$$R_{gh} = R_{pot} \cdot t_{t,max} \cdot t_{f,max} , \quad (7)$$

ahol

$$t_{t,max} = \left[\frac{\sum_{s=sr}^{ss} R_{pot,s} \cdot t_{0,nadir,dry}^{(p_z / p_0) \cdot m_\theta}}{\sum_{s=sr}^{ss} R_{pot,s}} \right] + \alpha e \quad (8)$$

$$t_{f,max} = \frac{t_t}{t_{t,max}} \quad (9)$$

$$t_{f,max} = 1 - 0,9 \cdot \exp(-B \cdot \Delta T^C) \quad (10)$$

$$B = b_0 + b_1 \cdot \exp(-b_2 \cdot \overline{\Delta T}) , \quad (11)$$

ahol $R_{pot,s}$ az s időpillanatban lehetséges sugárzás $\text{MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ mértékegységben megadva, $t_{f,max}$ a transzmittancia és ennek adott napra vett maximum értékének aránya, sr és ss a napkelte illetve napnyugta jelölése, θ a Nap zenitszöge, $t_{0,nadir,dry}$ a $z = 0$ referenciaszinten, $\theta = 0$ napállás (nadír) és száraz atmoszféra esetén fellépő pillanatnyi transzmittancia, p_0 és p_z a tengerszinten illetve z magasságban mért nyomásérték [Pa], m_θ a rétegvastagság ($m_\theta = 1 / \cos\theta$), e a gőznyomás [Pa], α a transzmittancia és a gőznyomás közötti kapcsolatot leíró mennyiség [Pa^{-1}], $\overline{\Delta T}$ a napi hőingás értékek havi átlaga [$^\circ\text{C}$], b_0 , b_1 és b_2 pedig tapasztalati együtthatók.

$t_{t,max}$ parametrizálásához figyelembe vették a transzmittancia térbeli és időbeli változását. Megvizsgálták a légköri áteresztés magasságfüggését, majd a zenitszög, illetve a légköri vízgőztartalom szerinti eltérését. Mindezt felhasználva létrehoztak egy általános formulát, melyet a 8. egyenlet szemléltet.

Bevezették a légköri transzmittancia, illetve ennek adott napra vonatkozó maximumának arányát, melyet $t_{f,max}$ jelöléssel definiáltak (9. egyenlet). Alakját B és C empirikus paraméterek felhasználásával a 10. egyenlet formájában fejezték ki. Míg utóbbit a napi hőingással hozták összefüggésbe, addig B együttható becsléséhez a napi hőingás értékek havi átlagát találták megfelelőnek. B és $\overline{\Delta T}$ közti kapcsolatot b_0 , b_1 és b_2 tapasztalati együtthatók segítségével szabályozták (11. egyenlet).

A modell által becsült B paraméter vizsgálatakor összefüggést fedeztek fel az együttható és a csapadék éves eloszlása között. Azokon a megfigyelési területeken, ahol a téli csapadék jellemző, B nagyobb értéket vett fel, míg főként nyáron előforduló csapadéktevékenység esetén kisebb mennyiséget tapasztaltak. Az első esetben felül-, míg utóbbi esetén a modell alulbecsülte a transzmittancia, és ezáltal a globálsugárzás nagyságát.

Az eljárás helyességének igazolásához előállították a mért, illetve az előrejelzett értékek közötti átlagos (ME), valamint átlagos abszolút hibát (MAE), melyet összehasonlítottak a BC84 modell becslési hibájával. (A hibastatisztikák leírásáról a 3.4. fejezetben lesz szó.) A transzmittancia zenitszög, tengerszint feletti magasság, valamint gőznyomás segítségével történő becslése a BC84 modellben szereplő közelítéshez képest pontosabbnak bizonyult, ugyanis az új módszer alkalmazásával csökkent az eljárás átlagos hibája. A részletesebb vizsgálat azonban rámutatott a modell hiányosságaira, amely az egyes mérőállomások közötti különböző légköri szennyezőanyag-koncentráció, a felszín orográfiai akadályai miatt változó sugárzásmennyiség, illetve az eltérő hóborítottság hatásaként magyaráztak. A napsugárzás topográfiai akadály miatti eltéréseinek, illetve a felszíni hóborítottság végett fellépő többszörös visszaverődés hatásának szemléltetésére Peter Thornton későbbi cikkében további korrekciós tagokkal egészítette ki a fent részletezett sugárzásbecslő modellt (Thornton *et al.*, 2000).

2.1.4. Fodor and Mika (2011) modell

Az egyik legfrissebb globálsugárzás-becslő modell megalkotása Fodor Nándor és Mika János magyar kutatók nevéhez köthető. Eljárásukkal a sugárzás becslésén túl igazolták, hogy a csapadékértékeket felhasználva, illetve a rendelkezésre álló megfigyelt adatokat csoportosítva hatékonyabban képesek meghatározni a sugárzás nagyságát. Modelljüket a *Campbell and Donatelli* (1998) módszerrel összevetve ellenőrizték.

A *Campbell and Donatelli* (1998) modell a BC84 módszer alapján az áteresztőképesség és a légkör tetejére érkező potenciális sugárzás szorzataként becsüli a globálsugárzást. A transzmittancia kiszámításához a napi átlaghőmérséklet exponenciális alakját használja, így a légköri áteresztést a 14. egyenlet formájában határozták meg. A modell egy megbízható módja a globálsugárzás számításának.

A globálsugárzás kiszámítására az 5. egyenletet alkalmazták, ahonnan a transzmittancia értékét a következő alakban fejezték ki:

$$t_i = 1 - \frac{1 - A}{(1 + (B \cdot \Delta T)^C)^D}, \quad (12)$$

ahol A , B , C és D tapasztalati együtthatókat jelölnek.

Kutatásuk meghatározó tényezője a $t_i - \Delta T$ kapcsolat vizsgálata, melyet különböző feltételek figyelembevételével elemeztek. A BC84 modellhez hasonlóan követték azt az elgondolást, miszerint a csapadékos, és ezáltal alacsonyabb sugárzásértékkel jellemzett napokon rendszerint kisebb a napi hőingás a magasabb sugárzással regisztrált napokhoz képest. Az adatsor vizsgálata rámutatott, hogy a $t_i - \Delta T$ kapcsolat évszakos, és havi szinten is változékonyságot mutat. Mindezt összevetve a rendelkezésre álló adatsort csapadék szerinti, szezonális, valamint havi bontásban is vizsgálat alá vetették. A becsléssel kapott adatsort különböző hibastatisztikákat alkalmazva összehasonlították a megfigyelt, majd a *Campbell and Donatelli* (1998) módszerrel kapott értékekkel. Ennek eredményét 1. táblázat szemlélteti.

Az adatsor csapadék szerinti felosztásával mindkét módszer hibastatisztikája csökkent, majd az ezt követő évszakos és havi finomítással is tovább tudták növelni modelljük pontosságát. A *Fodor and Mika* (2011) módszer átlagosan 27%-kal növelte a globálsugárzás becslési hatékonyságát a *Campbell and Donatelli* (1998) módszerhez képest.

1. táblázat. A becsült és megfigyelt adatsorok összehasonlítása különböző hibamutatók alapján. A táblázatban szereplő értékek R^2 kivételével $MJ\ m^{-2}\ nap^{-1}$ mértékegységgel szerepelnek.

(Fodor and Mika, 2011; 3. táblázat)

Módszer Hibamutató	Donatelli–Campbell				Fodor-Mika			
	R^2 ¹	MAE ²	MSE ³	RMSE ⁴	R^2	MAE	MSE	RMSE
Felbontás nélküli összehasonlítás	0,724	2,95	0,020	3,87	0,760	2,73	-0,046	3,44
Száraz és csapadékos napok szerinti felbontás	0,763	2,803	0,060	3,682	0,809	2,37	-0,074	3,06
Száraz és csapadékos napok & évszakos felbontás	0,771	2,767	0,071	3,637	0,827	2,22	0,007	2,89
Száraz és csapadékos napok & havi felbontás	0,772	2,751	0,067	3,619	0,834	2,16	0,017	2,83

2.1.5. A RadEst program

A RadEst program egy, a globálsugárzás becslésére használható alkalmazás, melyben négy különböző eljárás segítségével határozhatjuk meg a sugárzás értékét (Donatelli et al., 2003; Mavromatis and Jagtap, 2005). Olyan modellekkel számolhatunk, mint a BC84, Campbell and Donatelli (1998), Donatelli and Bellocchi (2001) vagy a DCBB módszer (utóbbi a BC84 illetve a Donatelli and Bellocchi (2001) modell ötvözéséből származik). A modellek közös tulajdonsága, hogy a BC84 modellhez hasonlóan a megfigyelt hőmérsékleti értékek felhasználásával adott helyre vonatkozóan tudunk becslést adni a globálsugárzás értékére. A globálsugárzás mindegyik modell esetén a légköri áteresztőképesség és a potenciális sugárzás segítségével számítható. Az egyes

^{1, 2, 3, 4} Leírás a 3.4. fejezetben

modellek esetén alkalmazott, az áteresztőképesség meghatározására szolgáló formulákat a 13-20. egyenletek reprezentálják:

$$\text{Bristow - Campbell: } t_i = A(1 - \exp(-B\Delta T^2)) \quad (13)$$

$$\text{Campbell - Donatelli: } t_i = A\left[1 - \exp\left(-B\{0,017 \cdot \exp[\exp(-0,053 + \bar{T})]\} \cdot \Delta T^2 [f(T_{\min})]\right)\right] \quad (14)$$

$$f(T_{\min}) = \exp\left(\frac{T_{\min}}{Tnc}\right) \quad (15)$$

$$\text{Donatelli - Bellocchi: } t_i = A[1 + f(i)] \left[1 - \exp\left(\frac{-B\Delta T^2}{\Delta T_{week}}\right)\right] \quad (16)$$

$$f(i) = C1 \cdot \left[\sin\left(i \cdot C2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \cos\left(i \cdot f(C2) \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right] \quad (17)$$

$$f(C2) = 1 - 1,9 \cdot C3 + 3,83 \cdot C3^2 \quad (18)$$

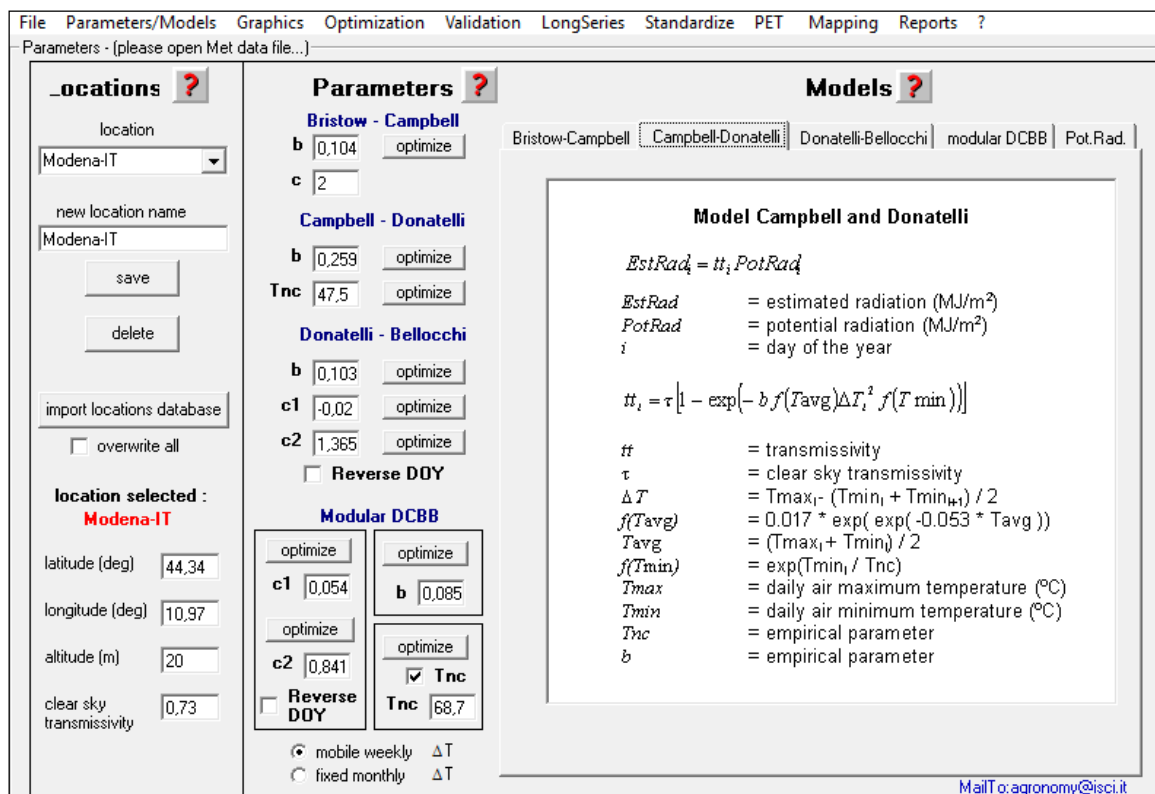
$$C3 = C2 - \text{integer}(C2) \quad (19)$$

$$\text{DCBB: } t_i = A[1 + f(i)] \left[1 - \exp\left(\frac{-B\Delta T^2 f(T_{\min})}{\Delta T}\right)\right] \quad (20)$$

ahol T_{\min} a minimumhőmérséklet, ΔT_{week} a napi hőingás értékek heti átlagának jelölése, Tnc , $C1$ és $C2$ pedig a modellre jellemző együtthatók.

A RadEst program felhasználói felületét az 1. ábra szemlélteti. A szoftver használatához legelőször a megfigyelési terület megadása szükséges. A célterület kijelölhetjük egy felsorolt lista alapján, vagy ha a lehetőségek közt nem szerepel a vizsgálni kívánt régió, a földrajzi szélesség és hosszúság, valamint a tengerszint feletti magasság megadásával azonosítani tudjuk a megfigyelési területet. Ezt követően a

mérőállomáson regisztrált meteorológiai adatsor bevitelével becsülni tudjuk a korábban felsorolt módszerek segítségével a globálsugárzás mennyiségét. Ha rendelkezésre állnak megfigyelt sugárzásadatok, lehetőség van a mért és a becsült adatsor statisztikai összehasonlításra és grafikus megjelenítésére egyaránt. A becsült globálsugárzás adatokat ASCII fájlként elmenthetjük, vagy további számítások elvégzéséhez konvertálhatjuk Microsoft Excel programba (Donatelli et al., 2003).



1. ábra. A RadEst szoftver felhasználói felülete.

3. Felhasznált adatok és módszerek

3.1. A BC84 modell részletes leírása

A BC84 modell az egyik legkorábban megalkotott eljárás a globálsugárzás becslésére, mely számos későbbi módszer alapjául szolgált (pl. *Campbell and Donatelli, 1998; Thornton and Running, 1999; Donatelli and Bellocchi, 2001; Liu et al., 2009*).

A vizsgálatuk során a napi hőingás és a légköri transzmittancia között találtak összefüggést és az ezt leíró függvénykapcsolat jelentette a módszer kiindulópontját. A munkájukhoz szükséges adatokat Pullman mérőállomás szolgáltatta az 1980. június 1-je és 1981. május 31-e közötti időszakra vonatkozóan.

Kiindulásként a már korábban használt 5. egyenletet alkalmazták, melyből a potenciális sugárzást az alábbi képlettel számították:

$$R_{pot} = \frac{86400 \cdot S_0 \left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2 (h_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin h_s)}{\pi}, \quad (21)$$

ahol S_0 a napállandó, vagy más néven szoláris állandó, melynek értéke 1360 W m^{-2} . d a pillanatnyi, \bar{d} pedig az átlagos Nap-Föld távolság jelölése, mivel azonban a $(\bar{d}/d)^2$ értéke sosem tér el szignifikánsan az egységnyitől, ezért az egyszerűsítés céljából egynek tekintették. h_s az óraszög ($h_s = -\tan \phi \tan \delta$), ϕ pedig a földrajzi szélesség, mindkettő radiánban megadva. Az egyenletben szereplő δ a deklinációt jelöli, mely az alábbi formulával számítható:

$$\delta = \phi_R \cos \left[\frac{2\pi(n - n_r)}{n_y} \right], \quad (22)$$

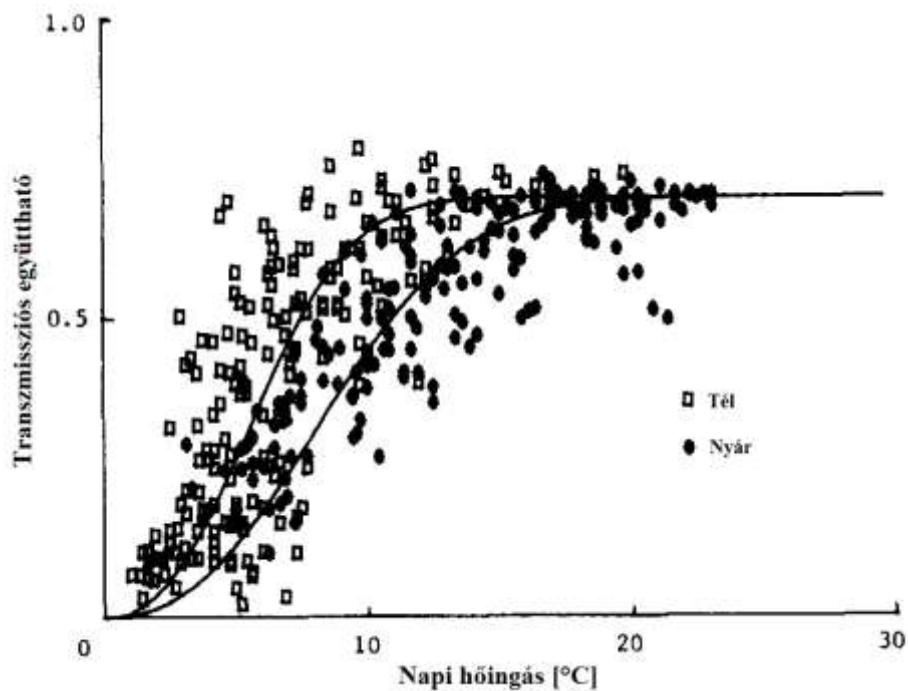
ahol ϕ_R a Ráktérítő földrajzi szélessége, értéke 23.45° ($= 0,409$ radián). n az év napjainak, míg n_r a nyári napforduló (június 21.) január 1-jétől számított sorszámát ($n_r = 173$), n_y pedig az átlagos évi napszámot jelöli ($n_y = 365,25$) (*Stull, 1988*).

A transzmittancia vizsgálatához a napi hőingás meghatározása volt elsődleges, amely a napi maximum- (T_{max}) és minimumhőmérséklet (T_{min}) felhasználásával a következőképpen írható fel:

$$\Delta T(J) = T_{max}(J) - \left(\frac{T_{min}(J) + T_{min}(J+1)}{2} \right) \quad (23)$$

A 23. egyenletben szereplő J jelölés a vizsgált nap január 1-jétől számított sorszámát fejezi ki. Az ugyanebben az egyenletben fellépő két napra vett minimum hőmérsékleti átlag feladata a vizsgált területen áthaladó nagyskálájú meleg, illetve hideg légtömegek hatásának gyengítése. A vizsgálati területen ilyen advekciós helyzetek csak ritkán fordulnak elő, így az előző egyenletet a következő alakra egyszerűsítették:

$$\Delta T(J) = T_{max}(J) - T_{min}(J) \quad (24)$$

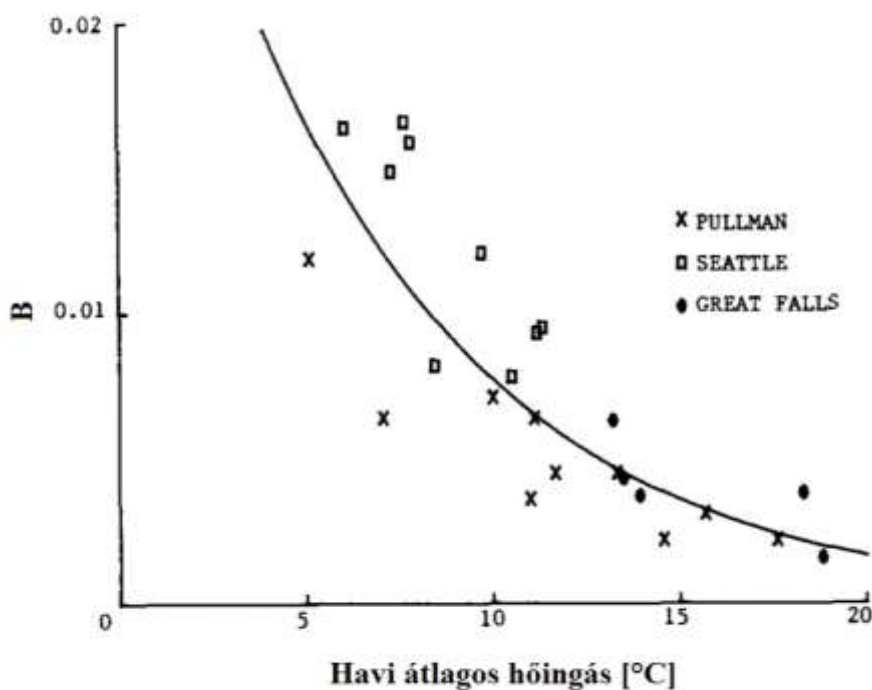


2. ábra. A légköri áteresztés és a napi hőingás éves kapcsolata.

(Bristow and Campbell, 1984; 1. ábra)

A napi hőingás és a légköri transzmittancia viszonyának éves változását a 2. ábra szemlélteti. A pontokra illesztett függvényt leíró egyenletet a RadEst program bemutatásával foglalkozó fejezetben már ismertetett 13. képlet szemlélteti. A a vizsgált területen, tiszta égbolt esetén fellépő maximális transzmittancia értékét reprezentáló mennyiség, B és C pedig a légköri áteresztés, illetve a napi hőingás viszonyát meghatározó tapasztalati együtthatók. A és C paraméterek értéke állandó, melyek nagyságát a vizsgált területre vonatkozóan 0,7-ben, illetve 2,4-ben állapították meg. B tényező esetén havi ingadozást tapasztaltak. A B együttható havi átlagos hőingás függvényében történő változását a 3. ábra illusztrálja, a közöttük levő kapcsolatot pedig a 25. egyenlet fejezi ki.

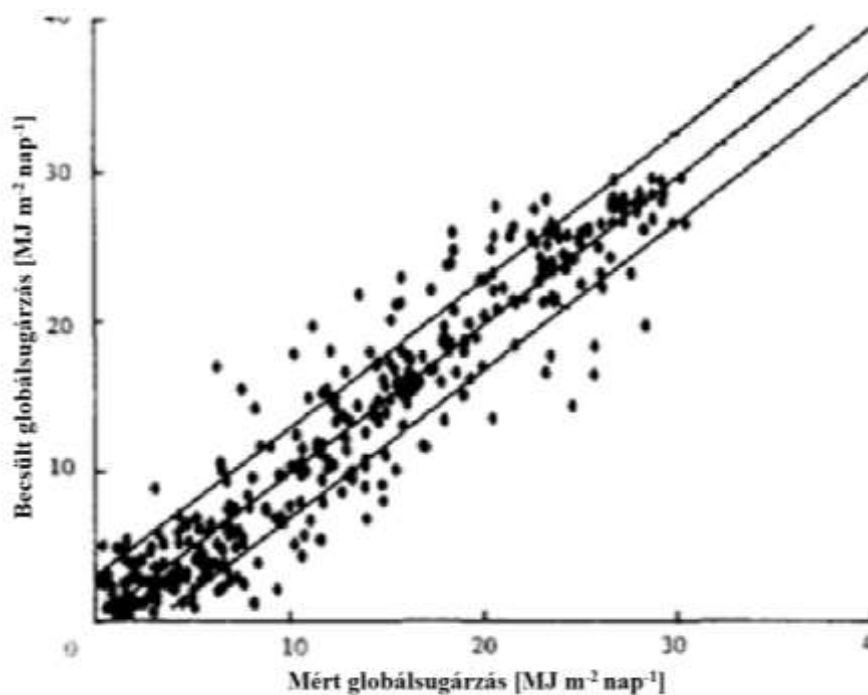
$$B = 0,03 \exp(-0,154 \overline{\Delta T}) \quad (25)$$



3. ábra. B paraméter változása $\overline{\Delta T}$ függvényében.
(Bristow and Campbell, 1984; 2. ábra)

B értékét a számításoknál két évszakra bontották, egy májustól októberig tartó nyári, valamint a megmaradt hónapokból álló téli időszakra. Ez alapján B nagyságát 0,004-re és 0,01-ra átlagolták.

A 13. egyenlettel kapott transzmittancia, illetve a 21. egyenlettel számított potenciális sugárzás értékeket az 5. egyenletbe helyettesítve megkapták a becsült globálsugárzást. A mért és a becsült globálsugárzás értékek kapcsolatát a 4. ábra szemlélteti. A koordináta-rendszer pontjaira illesztett trendvonal segítségével vizsgálták az ezek között fennálló relációt. A vonal meredeksége ($m = 0,99$), és az y -tengellyel vett metszéspontja a globálsugárzás értékek szoros viszonyáról árulkodik. A két adatsor közötti lineáris korrelációs együtthatót vizsgálva ($r = 0,95$) szintén erős összefüggést tapasztaltak.

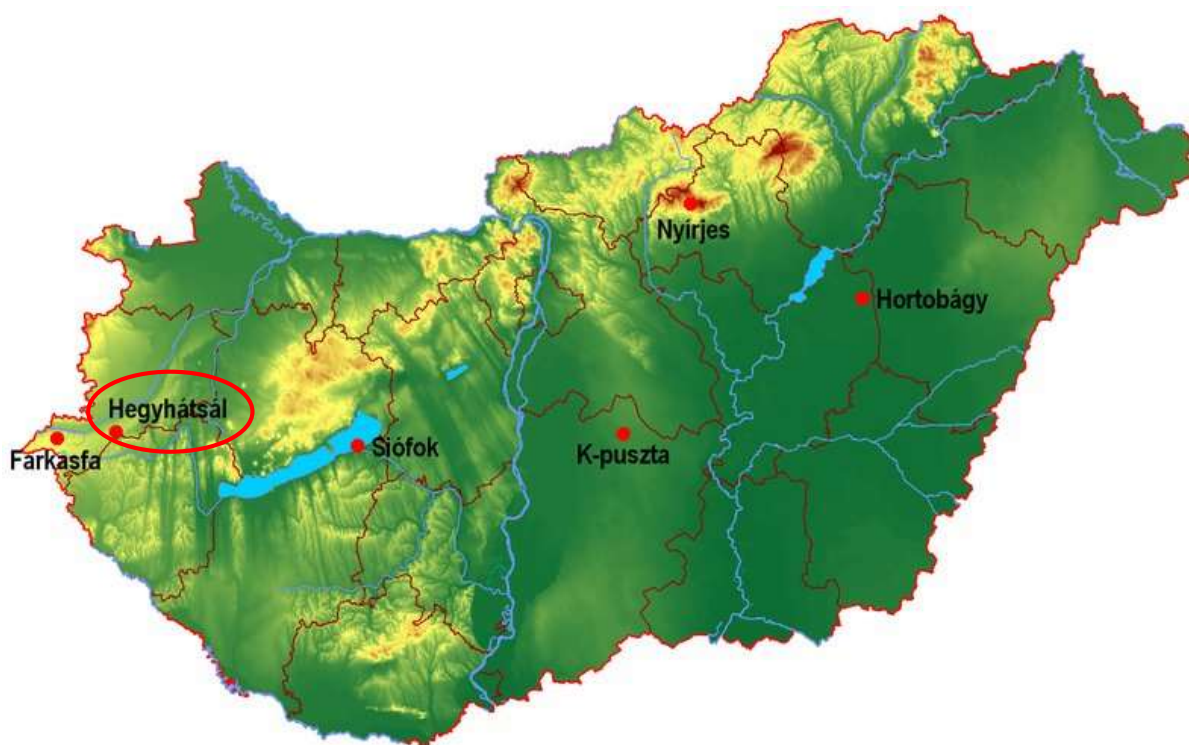


4. ábra. A becsült és a mért napi globálsugárzás értékek kapcsolata.

(Bristow and Campbell, 1983; 3. ábra)

3.2. A mérőhely bemutatása – Hegyhátsál

Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőhálózata körülbelül 110 mérőállomást foglal magába, amelyből mintegy 40 állomáson regisztrálják a globálsugárzást (Pátkainé Ruzsnyák, 2014). Ugyan a hegyhátsáli mérőállomás (46° 57' É, 16° 39' K, 248 m) nem része a megfigyelőhálózatnak, itt is rendszeresen rögzítik a globálsugárzás értékét. A nyugat-magyarországi régióban, azon belül is Vas megyében elhelyezkedő település mérőtornya 1994 óta üzemel, és azóta Farkasfa, Hortobágy, K-puszta, Nyírjes és Siófok községekkel egyetemben a magyarországi levegőszennyezettség mérési hálózat szerves részét képezi (5. ábra).



5. ábra. A magyarországi levegőszennyezettség-mérő hálózat.

(Forrás: met.hu)

A legfontosabb meteorológiai állapotjelzők (hőmérséklet, szél, légnedvesség) mellett számos más paramétert is mérnek. 1994-től az Országos Meteorológiai Szolgálat és az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatalának (National Oceanic and Atmospheric Administration) együttműködésével lehetővé vált a légköri szén-

dioxid-koncentráció nagy pontosságú mérése, mely különböző magasságokban, 10 m, 48 m, 82 m és 115 m-es magassági szinteken történik (Haszpra, 2012). 1997-ben eddy-kovariancia mérés technika alkalmazásához megfelelő műszert helyeztek üzembe a torony 82 m-es szintjén, amely a felszín és a légkör közti szén-dioxid kicserélődésről nyújt regionális léptékű információt (Barcza *et al.*, 2009).

2004-től szintén külföldi közreműködéssel, az Európai Unió 5. Kutatási – Fejlesztési Keretprogram CHIOTTO (Continuous High-precision Tall Tower Observations of greenhouse gases) programjának támogatásával indult el a szén-dioxid mellett a légkörben jelenlévő üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, kén-hexafluorid) koncentrációjának mérése, mellyel az Antenna Hungária Rt. hegyhátsági adótornya (6. ábra) a 9 mérőtoronyból álló európai hálózat részévé vált (Haszpra and Barcza, 2005). Ugyanúgy a fejlesztési program kezdeményezésével, de már az AEROCARB (Airborne European Regional Observations of the Carbon Balance) projekt keretein belül kezdődött meg a keverési arány repülőgépes mérésére, melyet 2001-től havi rendszerességgel, 2005-től kezdve pedig heti két felszállással regisztrálnak.



6. ábra. Az Antenna Hungária Rt. Hegyhátsálon üzemelő adótornya.
(Hegyhátsági mérések honlapja: nimbus.elte.hu/hhs)

Több évnyi fejlesztés eredményeként számos légköri-és talajparaméter mérése vált lehetővé Hegyhátsálon: a fotoszintetikusan aktív sugárzás mellett, a sugárzási mérleg, a talajhőmérséklet, a talajnedvesség és a globálsugárzás rögzítése is. Hegyhátsálon a globálsugárzás mérése 1994. október 21-e óta zajlik, és piranométer (model CM2, Kipp & Zonen B.V., Delft, the Netherlands) segítségével napi szintű adatokat szolgáltatnak.

3.3. Adatfeldolgozás és modellszimuláció

Munkánk során a hegyhátsáli mérőállomás hőmérséklet és globálsugárzás adatait használtuk fel az 1997. január 1. és 2014. december 31. közötti időszakra vonatkozóan napi időléptékben. Célunk az volt, hogy a rendelkezésre álló adatsor felhasználásával becslést adjunk a globálsugárzásra, majd a modellfuttatások eredményeit a referenciaként használt hegyhátsáli globálsugárzás adatsorral összevetve számszerűsítsük a becslési hatékonyságot. Ehhez a BC84 módszert használtuk fel, és a 3.1. fejezetben leírt módszertan alapján becsültük a globálsugárzást.

Három modellfuttatást végeztünk a globálsugárzás meghatározására a B paraméter becslésének függvényében.

Az első esetben az eredeti BC84 tanulmányban javasolt értékekkel számoltunk. Az adatsorunkat egy téli (január, február, március, április, november, december) és egy nyári (május, június, július, augusztus, szeptember, október) időszakra osztottuk fel. A téli évszakhoz sorolt hónapok esetén a $B = 0,01$, míg a nyári hónapokban $B = 0,004$ értékekkel dolgoztunk.

A második kísérletben a Hegyhátsál kutatóállomáson regisztrált mérési adatok alapján becsültük a B paraméter értékét (a 25. egyenlet segítségével). Minden évet felosztva egy téli és egy nyári évszakra kiszámoltuk az arra az időszakra jellemző B értéket.

A harmadik esetben havi bontásban vizsgáltuk a paraméter értékét, amelyet minden év hónapjára meghatároztunk, ezzel 12 becsült értékhez jutva. Mindhárom esetben a kapott B értékeket felhasználva becslést adtunk a transzmittancia, majd a globálsugárzás mennyiségére.

A különböző modellfuttatások globálsugárzás eredményeit EstRad1, EstRad2 és EstRad3 jelöléssel láttuk el. Az így megkapott adatsorainkat a hegyhátsáli

sugárzásadatokkal (ObsRad) összevetve, és kapcsolatukat ábrázolva jellemezni tudtuk a becsült adatsorok, illetve a mért globálsugárzás között fennálló statisztikai kapcsolatot.

3.4. Elemzési módszerek

Az alkalmazott modellek hibáinak számszerűsítésére különböző statisztikai módszereket használtunk. Mindhárom modellkísérlet esetén származtattuk a Pearson-féle korrelációs együtthatót (R), illetve ennek négyzetét, az átlagos hibát (Mean Error, ME), az átlagos abszolút hibát (Mean Absolute Error, MAE), az átlagos négyzetes hibát (Mean Squared Error, MSE), és a négyzetes középérték hibát (Root Mean Squared Error, $RMSE$).

Két adatsor közötti lineáris kapcsolat szemléltetésének egyik lehetséges módja a korrelációs számítás, melynek értéke az adatsorok közötti szóráson alapszik:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} . \quad (26)$$

Az egyenletben szereplő x_i a becsléssel meghatározott, míg y_i a mérésből származó értékeket, \bar{x} és \bar{y} ezek átlagait, n pedig a megfigyelések számát jelöli. A korrelációs együttható értéke -1 és 1 közötti szám lehet. Minél közelebb van az értéke 1-hez, annál nagyobb a két adatsor közti lineáris összefüggés. -1-hez közeli szám is szoros viszonyról árulkodik, viszont ezesetben a változók között fordított arányosság van.

A korrelációs együttható négyzetre emeléséből származtatható a determinációs együttható (R^2). Az adatsorra illesztett függvény illeszkedésének mérőszámaként definiálhatjuk, mely információt szolgáltat a vizsgált adatsorok összefüggőségéről. Tökéletes egyezés esetén értéke 1.

Az átlagos hiba, más néven *bias* vagy szisztematikus hiba a mért és a modellezett értékpárok különbségének átlagaként állítható elő. Számítása a következő egyenlettel történik (Tajti, 2011):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i). \quad (27)$$

A modellezett érték pontosságát adhatjuk meg a metrikával. Nagysága pozitív és negatív egyaránt lehet. Tökéletes modell esetén nullát vesz fel.

A *ME* értéke akkor is közel lehet a nullához, ha a nagy eltérések ellentétes előjellel szerepelnek. Ennek kiküszöbölésére a *bias*-t érdemes az átlagos abszolút hibával együtt vizsgálni. A *MAE* a mért és a becsült értékpárok különbségének abszolút átlagaként állítható elő (28. egyenlet) (Tajti, 2011).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (28)$$

Nagysága nullától plusz végtelenig terjedhet. Ideális modelleredmény esetén értéke szintén nullához közelít.

Az átlagos négyzetes hiba a mért és előrejelzett értékpárok különbségének négyzete és a darabszám hányadosaként adható meg, mely képletben a következő alakot ölti:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)^2. \quad (29)$$

Ennek négyzetgyökéből számítható a négyzetes középértékhiba (lásd pl. Ma et al., 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (30)$$

Mindkettő nulla és plusz végtelen közötti értéket vehetnek fel, és az előzőekhez hasonlóan nullát adnak tökéletes prognózis esetén. A négyzetre emelésnek köszönhetően érzékenyebbek a nagyobb hibákra, mint korábban felsorolt *ME* és *MAE*.

4. Eredmények

4.1. A BC84 modell kalibrációjának eredményei

Vizsgálataink során három modellszimulációt vizsgáltunk, amelyek a 13. egyenletben szereplő B érték beállításában különböztek. Az első modellfuttatás az eredeti BC84 tanulmány megadott paraméterértékeivel történt. (2. táblázat). A második és harmadik szimuláció B együtthatóit a hegyhátsáli adatok alapján becsléssel állítottuk elő. A második esetben a számítások során az adatsorunkat két évszakra osztva téli illetve nyári hónapokban számoltunk (2. táblázat).

2. táblázat. B paraméter értékei az első és második modellfuttatás esetén.

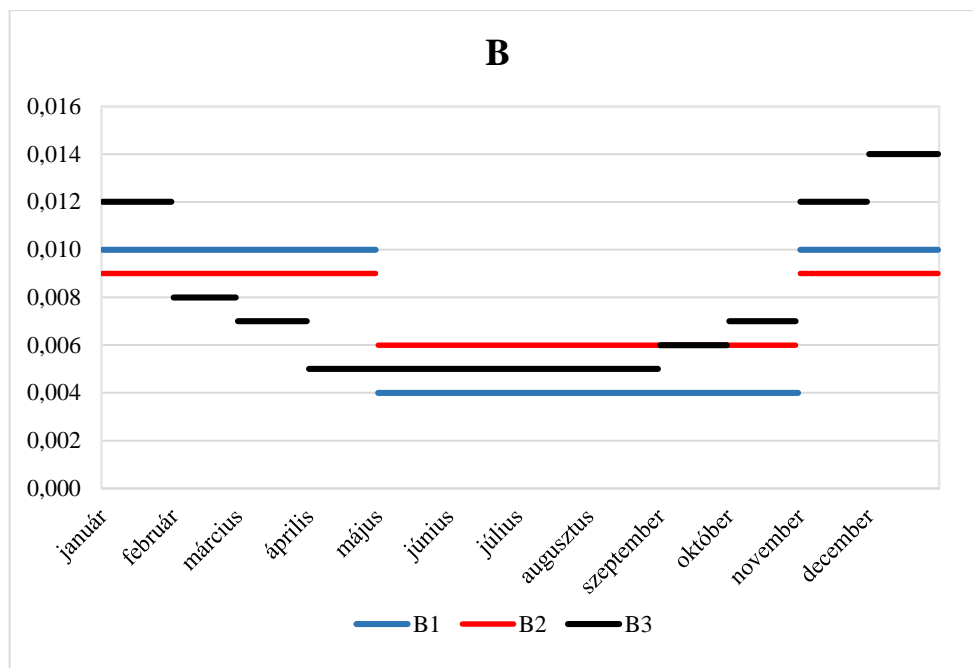
	1. futtatás	2. futtatás
Téli évszak	0,01	0,009
Nyári évszak	0,004	0,006

A harmadik modellfuttatás a B paraméter havi szintű becslésével történt, mellyel 12 becsült értékhez jutottunk. (3. táblázat).

B paraméter értékeinek a modellszimuláció függvényében történő éves változását a 7. ábra szemlélteti.

3. táblázat. B paraméter becsült értékei a harmadik modellfuttatás esetén.

	Jan.	Febr.	Márc.	Ápr.	Máj.	Jún.	Júl.	Aug.	Szept.	Okt.	Nov.	Dec.
3.futtatás	0,012	0,008	0,007	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,007	0,012	0,014

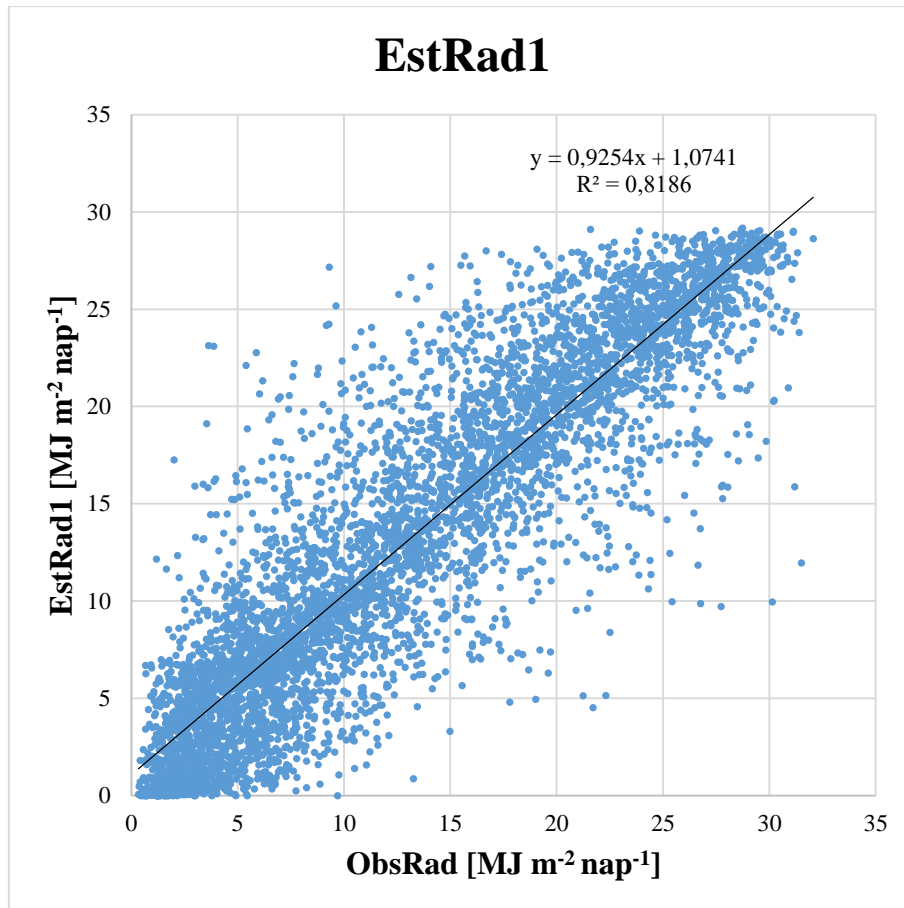


7. ábra. Az ez egyes modellfuttatások során alkalmazott B értékek. $B1$ az első, $B2$ a második, $B3$ pedig a harmadik szimulációt jelöli.

4.2. A modellezett globálsugárzás statisztikai értékelése

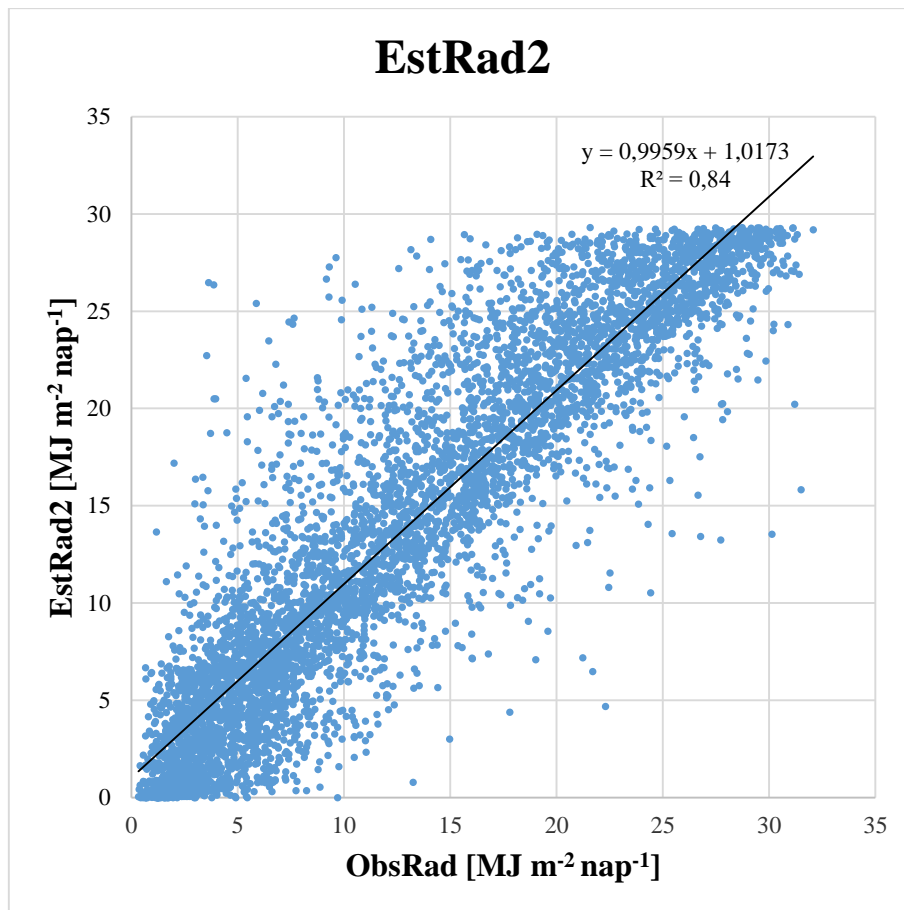
4.2.1. Éves statisztikai elemzés

A modellezés eredményeinek értékelése a mérési adatok alapján történt, napi időléptékben. A BC84 tanulmány által megadott B értékekkel számított globálsugárzás és a mért adatsor összehasonlítását a 8. ábra mutatja. Az adatsorok közti reláció szemléltetésére lineáris egyenest illesztettünk a ponthalmazra Microsoft Excel segítségével. Tökéletes illeszkedés esetén az egységfüggvényt kapnánk eredményül. A függvény vizsgálatánál jó lineáris illeszkedést tapasztaltunk, melyet az egyenes meredeksége ($m = 0,92$) és az y -tengellyel vett metszéspontja ($c = 1,07$) is igazolt. A determinációs együttható ($R^2 = 0,82$), mely a trendvonal becsült értékei és a valós adatok közelségét jellemzi, erős statisztikai kapcsolatot mutatott a két adatsor között. Ez azt mutatja, hogy a modell a mért adatokban lévő változékonyság 82%-át tudja megmagyarázni.



8. ábra. EstRad1 és ObsRad között fennálló kapcsolat. ObsRad a megfigyeléseket, míg EstRad1 az első módszerrel meghatározott modelleredményeket jelöli.

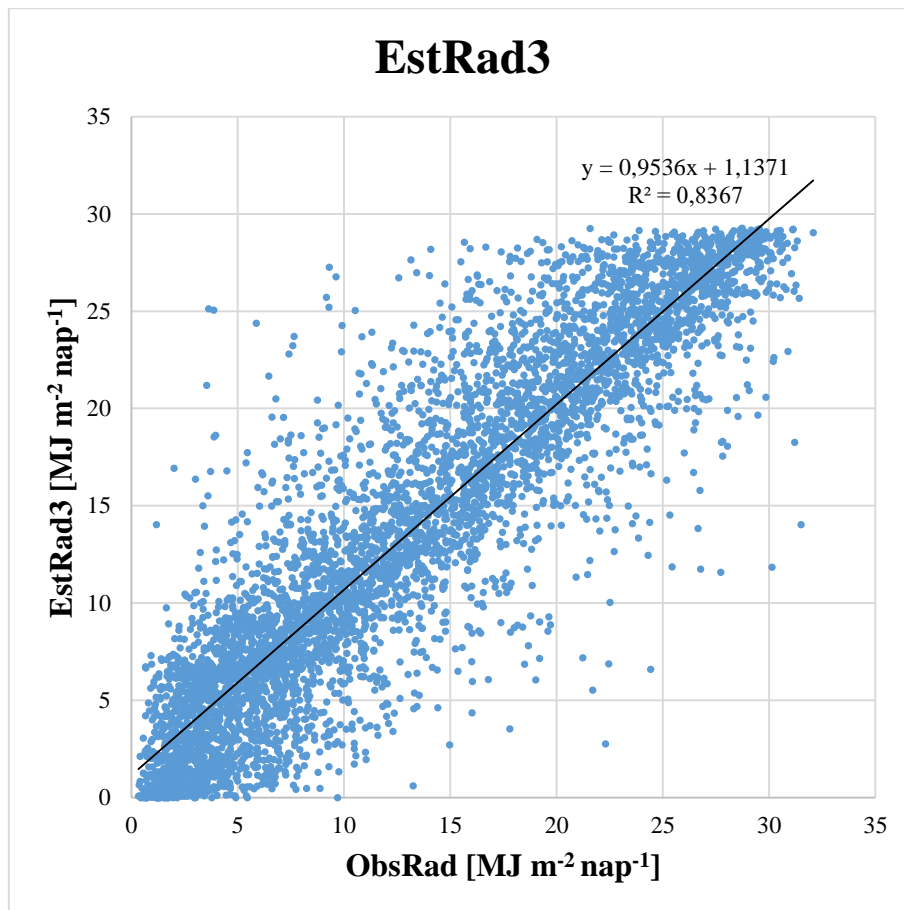
A hegyhátsáli adatok alapján becsült évszakos B értékekből származtatott globálsugárzás és a rendelkezésre álló adatsor viszonyát a 9. ábra illusztrálja. A három különböző szimuláció pontjaira illesztett egyenest leíró függvény ebben az esetben volt a legközelebb az egységfüggvényhez. A ponthalmazra illesztett egyenes meredeksége ($m = 0,99$) és az y-tengellyel vett metszéspontja ($c = 1,02$) az előző futtatás eredményénél szorosabb kapcsolatot írt le. A determinációs együttható értéke ($R^2 = 0,84$) szintén kisebb javulást mutatott a modell hibáját illetően.



9. ábra. EstRad2 és ObsRad között fennálló kapcsolat. ObsRad a megfigyeléseket, míg EstRad2 a második módszerrel meghatározott modelleredményeket jelöli.

A B paraméter havi szintű származtatásából nyert sugárzásadatok és a hegyhátsági mérőállomás adatai közt az előző futtatás eredményéhez képest minimális gyengülést tapasztaltunk az adatsorra illesztett függvény vizsgálatánál, amely a meredekséget ($m = 0,95$), illetve a metszéspontot ($c = 1,14$) illetőleg is megmutatkozott (10. ábra). Az R^2 értéke viszont a második szimulációhoz hasonlóan erős viszonyt jelzett, értéke ez esetben is 0,84 volt.

A megfigyelt és becsült globálsugárzás értékek közti kapcsolatot szemléltető ábrák elemzésével elmondható, hogy mindhárom futás hasonló pontossággal közelítette a hegyhátsági adatsort, ám a leghatékonyabbnak a második szimuláció bizonyult. Az adatsoraink ellenőrzésére további vizsgálatokat végeztünk.



10. ábra. EstRad3 és ObsRad között fennálló kapcsolat. ObsRad a megfigyeléseket, míg EstRad3 a harmadik módszerrel meghatározott modelleredményeket jelöli.

A modellfuttatások által becsült globálsugárzás adatsorok és a hegyhátsági állomás mért értékei között fennálló relációt különböző hibastatisztika segítségével jellemeztük. A vizsgált hibastatisztika értékek közlése hasznos lehet más kutatók számára, és segíthet kiválasztani a lehetséges módszerek közül az optimálisat.

Megvizsgáltuk a mért és becsléssel előállított adatsorok korrelációját, átlagos, átlagos abszolút, átlagos négyzetes és négyzetes középérték hibáját, melyeket a 3.4. fejezetben leírt módszerek alapján számítottunk. Számításunk eredményét a 4. táblázat mutatja.

A modell által becsült és a megfigyelt adatsorok közti korreláció a vizsgálat alapján a B paraméter hegyhátsági adatok alapján két évszakra történő becslése esetén bizonyult a legerősebbnek. Hasonlóan szoros kapcsolatot tapasztaltunk a harmadik modellfuttatás eredménye és a mért adatok összehasonlítása esetén is. Az értékpárok közötti átlagos hibát meghatározva az eredeti BC84 módszer B értékeiből származtatott globálsugárzás adatsor

mutatkozott a legmegfelelőbbnek, szemben a másik két futtatás értékeivel. Érdekes megjegyezni, hogy bár az éves szintű *ME* statisztika alapján mindhárom modell esetén alacsony értéket kaptunk, ez elfedi a nagyobb, de ellentétes előjelű szisztematikus hibákat. A további hibastatisztikákat vizsgálva mind a *MAE*, mind a *MSE*, és mind a *RMSE* esetén a *B* paraméter havi szintű becslésével számított globálsugárzás adatsort találtuk a mért adatokkal szembeni legkisebb hibával terheltnek. Az átlagos abszolút hiba és a négyzetes középérték hiba az egyes futtatásokat összevetve nagyon kis különbséget mutattak. Az első futtatás eredményeként kapott adatsorból számított globálsugárzás átlag 21%-a, míg a második és harmadik szimuláció átlagának 20%-a volt az átlagos négyzetes hiba értéke. Az *MSE* vizsgálatánál a hibaértékek közti különbség valamelyest nagyobb volt, itt a legnagyobb eltérést a második modell mutatta.

4. táblázat. Az egyes modellszimulációk hibastatisztikái (1997-2014).

	<i>ME</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>
1. futtatás	-0.13	2.69	14.00	3.74	0.905
2. futtatás	-0.97	2.69	14.46	3.80	0.916
3. futtatás	-0.55	2.60	13.16	3.63	0.915

4.2.2. Havi szintű statisztikai elemzés

A modellezéssel előállított adatsorainkat havi bontásban is vizsgáltuk. Arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a globálsugárzás becslésének pontossága mutat-e évszakos változékonyságot? A kérdés amiatt lényeges, mivel pl. növénymodellek esetén a vegetációs időszakban fontosabb a globálsugárzás (vagy az abból származó fotoszintetikusán aktív sugárzás) értékek pontos becslése, így az évszakos menet ismerete mindenképp meghatározó információt hordoz.

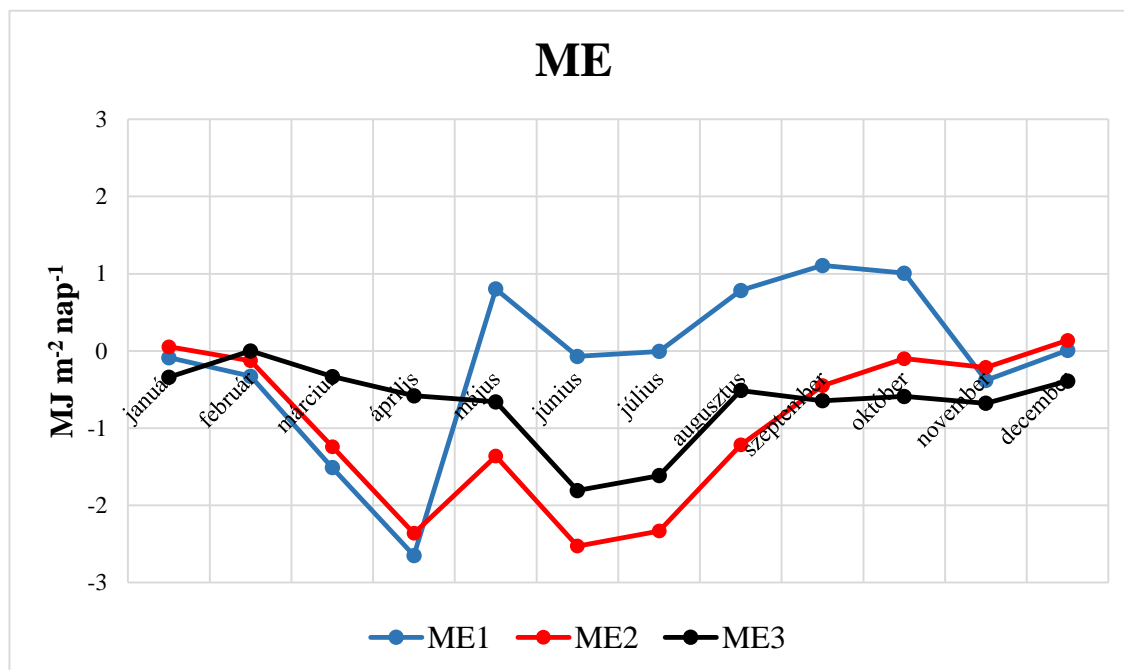
Minden hónapra meghatároztuk a *ME*, a *MAE*, a *MSE*, a *RMSE* és az R^2 értékeit, melyek havi léptékű éves menetet grafikonon ábrázoltuk. Ennek segítségével tanulmányoztuk az egyes hónapok közti statisztikai eltérést.

A modellfuttatások átlagos (vagy szisztematikus) hibáinak éves változását a 11. ábra mutatja. A három szimuláció *ME* hibáinak vizsgálata során a futtatások közti legkisebb különbség január, február, november és december hónapokban volt megfigyelhető, ahol a szélsőértékek közti maximális eltérés nem haladta meg a $0,53 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -ot. A modellek közti eltérés a tavaszi hónapokban, illetve augusztusban, szeptemberben és októberben már nagyobb volt, a legjelentősebb különbséggel pedig júniusban és júliusban talákoztunk, vagyis a napforduló közelében. *ME* júniusban az első szimuláció esetén $-0,07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$, júliusban pedig $-0,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ nagysággal a futások közül a legjobbnak bizonyult, míg a második modellfuttatás júniusban $-2,53 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -pal, júliusban pedig $-2,33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -pal az egész év értékeit figyelembe véve a legnagyobb hibát eredményezte.

A hibaértékek alapján az első modellfuttatás által kapott globálsugárzás adatsor januártól áprilisig, valamint június, július, és november hónapokban a mért adatokhoz képest alulbecsülte a sugárzás nagyságát. A második modell átlagos hibája csupán január, és december hónapokban mutatott felülbecslést, míg a harmadik szimuláció eredményei az egész évre nézve alulbecsülik a megfigyelt globálsugárzást.

Az éves menetet tekintve a harmadik modell által kapott globálsugárzás adatsor szisztematikus hibájának görbéje volt a legkiegyenlítettebb, és 5 hónap átlagát tekintve mutatott pontosabb becslést a másik két modellhez képest. Júniusban, júliusban és decemberben az első modellfuttatás eredményei bizonyultak a legközelebbinek a hegyhátsági adatsorhoz, míg januárban, illetve szeptember és november között a második szimuláció eredményezte a legkisebb hibát. Habár az éves hibaátlagot tekintve az első

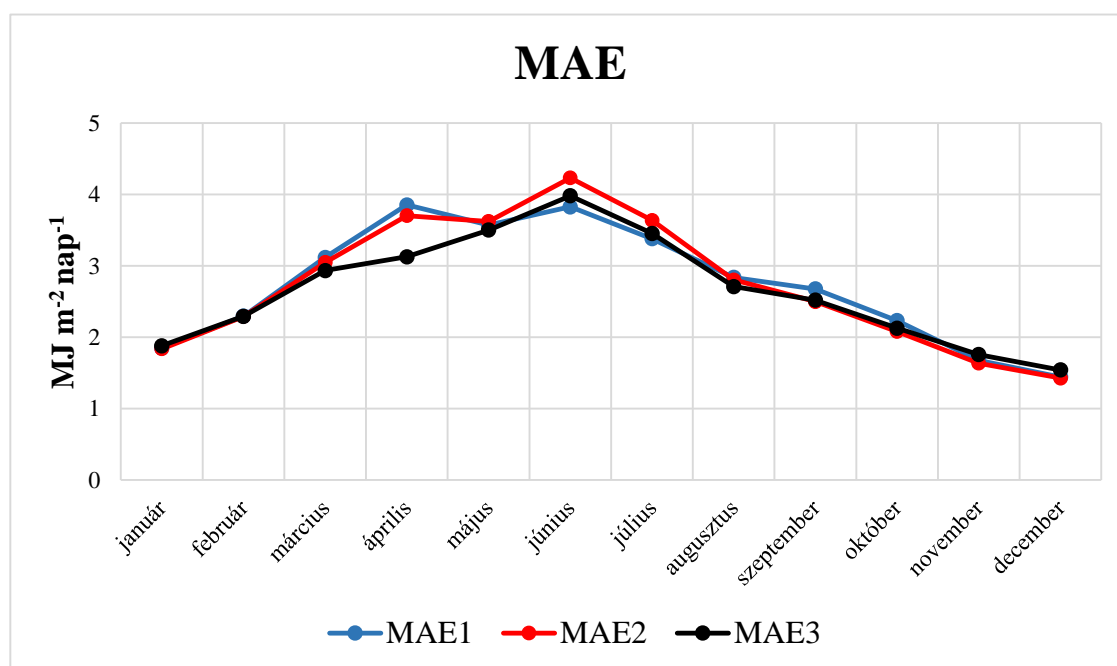
szimuláció *ME* értéke volt a legalacsonyabb (4. táblázat), a havi értékek közötti szórás ez esetben bizonyult a legmagasabbnak.



11. ábra. A modellfuttatások havi átlagos hibáinak éves alakulása. ME1 az első, ME2 a második, míg ME3 a harmadik modellszimuláció jelölése.

A 12. ábra a három modellfuttatás átlagos abszolút hibájának havi szintű éves változását szemlélteti. *MAE* görbéi január és február hónapokat tekintve megközelítőleg együtt haladtak, a modellszimulációk eredményei ezek esetén minimális különbséget mutattak. Kiseb kiugrást tapasztaltunk a modellek átlagos abszolút hibáinak értékei közt március, május, július, augusztus, szeptember, október, november és december hónapokban, de az egyes modellek közti eltérés itt sem volt jelentősebb 0,26 MJ m⁻² nap⁻¹-nál. Márciusban, májusban és augusztusban a harmadik modellfuttatás, szeptembertől decemberig a második, júliusban pedig az első módszerrel becsült adatsor átlagos abszolút hibája mutatott a másik két szimulációhoz viszonyítva jobb közelítést. Egyedül áprilisban és júniusban adódott nagyobb kilengés a *MAE* értékében. Áprilisban 0,73 MJ m⁻² nap⁻¹, júniusban pedig 0,41 MJ m⁻² nap⁻¹ különbség mutatkozott a modellfuttatások eredményei között.

Az átlagos abszolút hiba esetén is a harmadik modellfuttatás görbéje mutatta a legegyszerűsebb éves menetet, a hibaértékeket tekintve viszont a második modellel származtatott globálsugárzás adatsor is hasonlóan kis eltéréseket adott a mért adatokhoz képest. A második és a harmadik szimuláció is egyaránt 5-5 hónap esetén bizonyult pontosabbnak a többi futáshoz képest. Az első modell mindössze 2 hónapban teljesített jobban. A legkisebb hiba a decemberi értékeknél fordult elő, ahol a második modell $1,43 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ nagyságú hibát eredményezett, ami a becsült globálsugárzás adatsor átlagának 41%-a. Ezzel szemben a legmagasabb hibaértékeket mutató hónapokban, áprilisban, májusban, júniusban és júliusban az átlagos abszolút hiba a globálsugárzás értékek átlagának 15-18%-a volt.

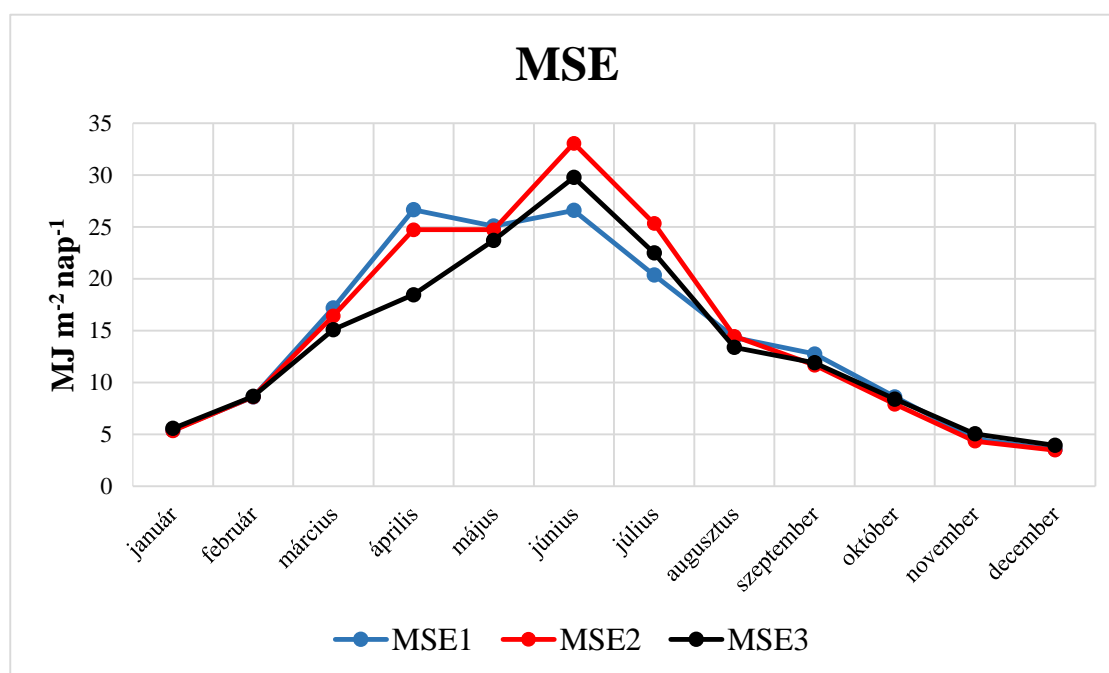


12. ábra. A modellfuttatások havi átlagos abszolút hibáinak éves alakulása. MAE1 az első, MAE2 a második, míg MAE3 a harmadik modellszimulációt jelöli.

Az átlagos négyzetes hiba havi értékeinek éves alakulását a 13. ábra mutatja. A ME hibastatisztikához hasonlóan a három modellfuttatás görbéi több hónapban (január, február, október, november, december) hozzávetőleg együtt haladtak. Ezekben a hónapokban a modellszimulációk közötti legkisebb eltérés februárban ($0,06 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$),

míg a legnagyobb októberben ($0,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$) adódott. Kisebb különbséget márciusban, májusban, augusztusban és szeptemberben tapasztaltunk. Az első három hónap esetén a harmadik, míg utóbbi során az második modell eredményei utaltak a többi szimulációhoz képest kisebb hibára. Nagy kilengéssel április, június és július hónapokban találkoztunk. Áprilisban az első szimuláció $8,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -pal magasabb MSE hibaértéket mutatott a harmadik futás $18,47 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ értékéhez képest. Június és július esetén is nagyobb szórást tapasztaltunk: júniusban $6,48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -os, míg júliusban $4,97 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -os különbséget figyeltünk meg a modellek legnagyobb és legkisebb hibaértékei között.

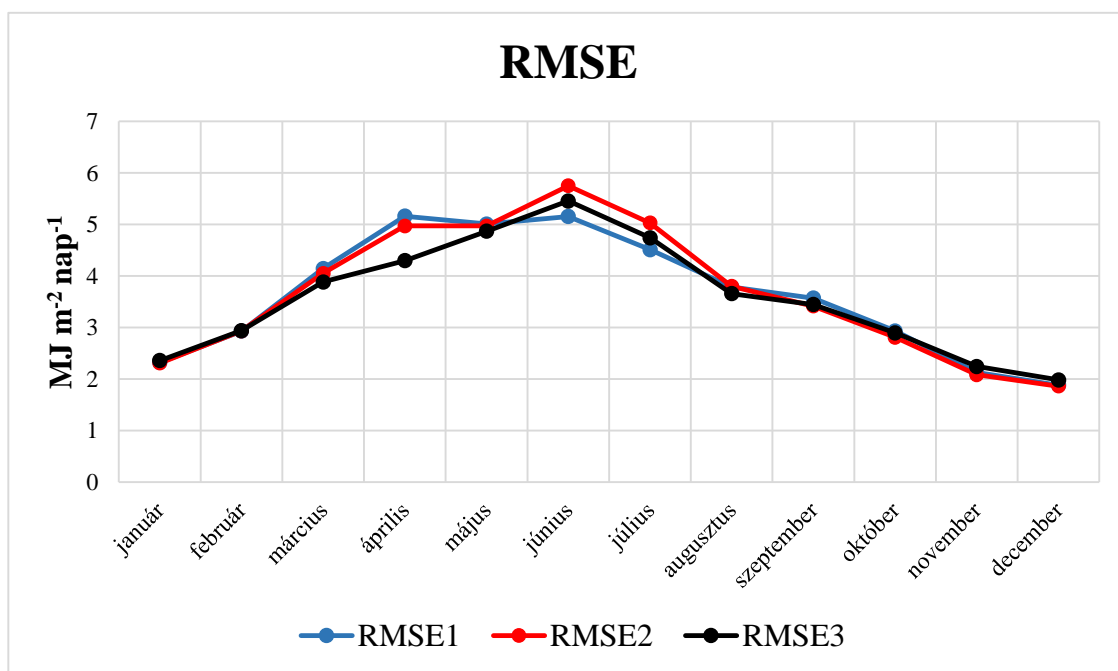
A teljes évet tekintve az átlagos négyzetes hiba esetén a második modellszimuláció bizonyult a legpontosabbnak. 5 hónap vizsgálata mutatta a második futtatás MSE értékét a legalacsonyabbnak az első futtatás 3, és a harmadik modell 4 hónapjához képest.



13. ábra. A modellfuttatások havi átlagos négyzetes hibáinak éves alakulása. MSE1 az első, MSE2 a második, míg MSE3 a harmadik modellszimulációt jelenti.

A négyzetes középérték hiba az egyes modellekre számított havi eredményeit a 14. ábra szemlélteti. A görbék futása megegyezik a 13. ábrán ábrázoltakkal, ami nem

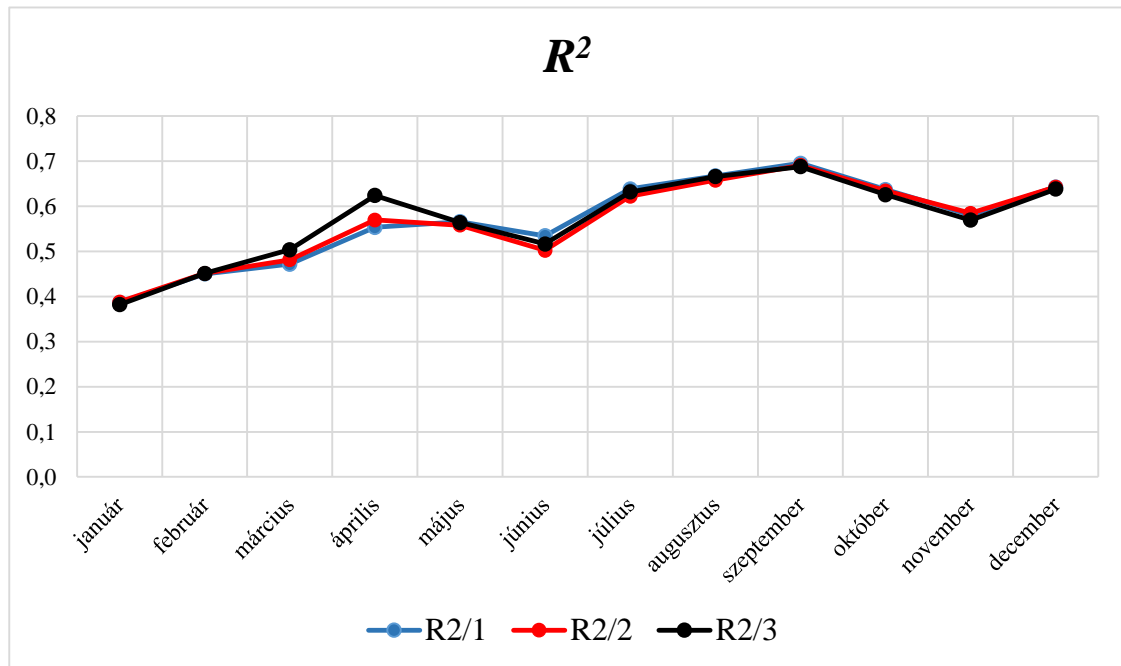
meglepő, mivel a $RMSE$ a MSE négyzetgyöke. A hibaértékeket elemezve júniusban $0,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$, júliusban $0,52 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$, míg a legnagyobb eltérést mutató áprilist tekintve $0,87 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -os különbség adódott a modellszimulációk hibaértékei között. A MSE statisztikához hasonlóan a havi négyzetes középérték hiba esetén is a hónapok többségében a második szimuláció bizonyult a legjobbnak.



14. ábra. A modellfuttatások havi négyzetes középérték hibáinak éves alakulása. RMSE1 az első, RMSE2 a második, míg RMSE3 a harmadik modellszimuláció görbéjének jelölése.

A havi R^2 hibastatisztika adott modellfuttatásokhoz tartozó éves alakulását a 15. ábra illusztrálja. A három szimuláció havi értékei meglehetősen hasonlóan egymáshoz, az eredmények között pár századnyi eltérést tapasztaltunk. Februárban az egyes futások értékei mindössze 0,001-del tértek el egymástól. Nagyobb különbséget március, június, július valamint november esetén figyeltük meg. Az első két hónapban 0,03, míg utóbbiak vizsgálatánál 0,02 legnagyobb eltérést számoltunk az egyes modellek közt. A legnagyobb különbség áprilisban volt megfigyelhető 0,07-os nagysággal.

Az R^2 értéke a modellfuttatások szeptemberében bizonyult a legmagasabbnak 0,7-es értékkel, ami azt jelenti, hogy ebben a hónapban a modellek a mérések 70%-át tudták magyarázni. A legalacsonyabb értékeket januárban tapasztaltuk, ahol mindegyik futtatás R^2 értéke 0,39 volt. A legpontosabbnak ebben az esetben az első modellszimuláció bizonyult, mely 6 hónapban is a legmagasabb R^2 értéket mutatta.



15. ábra. A modellfuttatások havi R^2 hibáinak éves alakulása. R2/1 az első, R2/2 a második, míg R2/3 a harmadik modellszimuláció görbéjének jelölése.

4.2.3. Az éves és havi statisztikák eredményeinek értékelése

A modelladatok felhasználásánál több szempont is érvényesülhet. Ha a megmagyarázott változékonyság a fő szempont, akkor értelemszerűen az R^2 alapján érdemes kiválasztani a megfelelő modellt. Éves szinten a második és harmadik szimuláció esetén volt a legmagasabb a determinációs együttható értéke. Havi szinten a hónapok többségében az első futás R^2 értéke bizonyult a legmagasabbnak, ám a havi adatok átlaga alapján szintén a harmadik modellszimuláció esetén volt a legnagyobb a megmagyarázott variancia értéke.

Ha a lehető legkisebb szisztematikus hibával terhelt futtatást szeretnénk használni, akkor a havi szintű adatsorral kalibrált modell használata javasolt. Bár az éves érték és a havi statisztika vizsgálata alapján az első modell tükrözte a mért adatokhoz képesti legkisebb eltérést, a havi értékek közti szórás ez esetben volt a legnagyobb. A havi futásokat vizsgálva a harmadik görbe tükrözte a legkiegyenlítettebb éves menetet, ám ha a modellezés során nincs mód kalibrációra, akkor az eredeti BC84 modell is kielégítő becslést nyújt.

A MAE , a MSE és a $RMSE$ havi statisztikái alapján szintén a harmadik modell görbéje mutatta a legkisebb ingadozásokat az év folyamán. Az egyes hónapok adatainak vizsgálata során a hónapok többségében a második és harmadik modellfuttatás nyújtotta a legalacsonyabb hibaértéket, éves szinten viszont egyértelműen a harmadik szimuláció adatsora közelítette legpontosabban a hegyhátsáli megfigyeléseket.

Az éves és havi bontású vizsgálat alapján megállapítható, hogy a hegyhátsáli adatok felhasználásával számított, havi szinten meghatározott B paraméter értékekből származó globálsugárzás adatsor eredményezte a mért adatokkal szembeni legmegbízhatóbb becslést.

5. Összefoglalás

A globálsugárzás a mezőgazdasági, ökológiai és biogeokémiai modellek elengedhetetlen bemenő paramétere. A globálsugárzás esetében a legfontosabb meteorológiai állapotjelzőkkel szemben hosszútávú és hiánytalan adatsorok csak korlátozott számú mérőállomásra vonatkozóan állnak rendelkezésünkre. Emiatt olyan számítógépes modellek születtek, amelyekkel képesek lehetünk a globálsugárzás számszerű és viszonylag pontos becslésére. A dolgozat célja az egyik legismertebb globálsugárzás-becslő módszer, a *Bristow and Campbell* (1984) modell bemutatása, valamint alkalmazása volt a hegyhátsáli mérési adatok felhasználásával.

Munkánk meghatározó eleme a BC84 modell B paraméterének becslése volt. Három modellszimuláció eredményeit vetettük össze: az első futtatás során az eredeti BC84 tanulmányban alkalmazott B értékek felhasználásával alkottuk meg globálsugárzás adatsorunkat, a második futtatás a hegyhátsáli adatokból származtatott, két évszakra előállított B értékekkel történt, míg a harmadik szimuláció B -nek a Hegyhátsálon regisztrált adatokból havi szinten becsült értékeivel zajlott. A modellfuttatások által előállított adatsorokat összevetettük a megfigyelt értékekkel, az eltéréseket pedig hibastatisztikák segítségével (ME , MAE , MSE , $RMSE$, R^2) jellemeztük.

Éves szinten a vizsgált időszakra számított szisztematikus hiba esetén az első, a MAE , a MSE és a $RMSE$ esetén a harmadik, míg az R^2 vizsgálatánál a második modellfuttatás globálsugárzás adatsora bizonyult a legközelebbinek a megfigyelt értékekhez.

A hibamutatók havi szintű változékonyságát is megvizsgáltuk, melynek eredményét grafikusán ábrázoltuk. Mindegyik hibastatisztika esetén a harmadik modellfuttatás görbéje mutatta a legegyenletesebb éves menetet. A legtöbb hónap ME , MAE , MSE és $RMSE$ értékei a második és harmadik szimuláció esetén voltak a legalacsonyabbak, míg R^2 értékeit tekintve a hónapok többségében az első futtatás adatsora tűnt a legpontosabbnak.

A becsléshez szükséges modell kiválasztásánál több szempont is szerepet játszhat. Abban az esetben, ha a variancia minél jobb magyarázata az elsődleges számunkra, akkor az R^2 értéke szerint javasolt a módszer kijelölése. Ez esetben a második vagy a harmadik modell használata a legcélszerűbb. A szisztematikus hiba szempontjából szintén a harmadik futtatás alkalmazásával kaphatjuk a legjobb eredményt, ám ha nincs lehetőség a modellparaméterek kalibrálására, akkor az eredeti tanulmány használata is megfelelő adatsort szolgáltat.

Ahhoz, hogy a modell alkalmazhatóságát széles körben vizsgálni tudjuk, a módszer több mérőállomásra vonatkozó validálása szükséges. Emellett jövőbeli terveink között szerepel a BC84 modell klímaprojekciók alapján történő használhatóságának vizsgálata is.

Köszönetnyilvánítás

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

Köszönettel tartozom családomnak, és szobatársaimnak, akik biztos háttérrel teremtettek a nyugodt munkához. Nekik és barátaimnak is hálás vagyok, hogy mindvégig lelkesítettek és támogattak a dolgozat megírásában.

Irodalomjegyzék

- 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*
- Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Lovas, K., Churkina, G., Horváth, L., 2009: Estimation of the biospheric carbon dioxide balance of Hungary using the BIOME-BGC model. *Időjárás*, 113, 203-219.*
- 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*
- Böjthy, B. A., 2013: Sztochasztikus mátrixok és Markov-láncok. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Fialowski Alice). 38p.*
- 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.
- 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.
- 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
- 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
- Hargreaves, G. H., Samani, G. A.*, 1982: Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 225-230.
- Haszpra, L.*, 2012: A magyarországi légköri széndioxid-mérések harminc éve. *Magyar Tudomány*, 2, 184-191.
- Haszpra, L., Barcza, Z.*, 2005: Légköri szén-dioxid-mérések Magyarországon. *Magyar Tudomány*, 1, 104-110.
- 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

- Hodges, T., French, V., LeDuc, S. K.*, 1985: Estimating solar radiation for plant simulation models. AgRISTARS Tech. Rep. JSC-202339, 21 pp.
- 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
- Liu, D. L., Scott, B. J.*, 2001: Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 41-49. doi:10.1016/S0168-1923(00)00173-8
- Liu, X., Mei, X., Li, Y., Wang, Q., Jensen, J. R., Zhang, Y., Porter, J. R.*, 2009: Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1433-1446. doi:10.1016/j.agrformet.2009.03.012
- 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.
- Máhr, J., Varga-Haszonits, Z.*, 1978: Az időjárás előrejelzése és a mindennapi élet. Gondolat Könyvkiadó, Budapest. 212p.
- 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.
- 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
- 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
- Pátkainé Ruzsnyák, R.*, 2014: EUMETSAT CM-SAF sugárzás produktumok validálása felszíni globálsugárzás adatokkal. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezető: Wantuchné dr. Dobi Ildikó, dr. Kerényi Judit). 52p.
- 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.
- 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
- Stull, R. B.*, 1988: Boundary Conditions and Surface Forcings. In: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 250-294.
- Tajti, D.*, 2011: Ensemble vertikális profilok sajátosságainak vizsgálata. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezető: Ihász István). 53p.
- 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

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

Internetes források:

[1 - met.hu]

<http://www.met.hu/levegokornyezet/hatterszennyezettseg/merohalozat/hegyhatsal/>

[2 – nimbus.elte.hu/hhs]

http://nimbus.elte.hu/hhs/aircraft_01.html