

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A WRF modellre alapozott napenergia előrejelzések fejlesztése

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Bán Beatrix

Meteorológus mesterszak,

Előrejelző szakirány

Témavezetők:

Dr. Weidinger Tamás, egyetemi docens

Gyöngyösi András Zénó, doktorjelölt

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	5
2.	Szakirodalmi áttekintés.....	6
2.1.	A napenergia	6
2.2.	Rövidhullámú sugárzási parametrizációk	10
4.	Anyag és módszer.....	15
4.1.	Szabványmódszer a globálsugárzás számításához	15
4.2.	Adatok.....	18
4.3.	A WRF modell	18
4.3.1.	A modell bemutatása	18
4.3.2.	Alkalmazott beállítások, sugárzási parametrizációs sémák.....	20
4.4.	Módszer	21
5.	Eredmények	23
5.1.	Érzékenységvizsgálat.....	23
5.2.	Vizsgálat féléves időtartamra (2017. március-augusztus)	29
5.3.	„Kvázi-ensemble”	39
6.	Összegzés	48
	Köszönetnyilvánítás	50
	Irodalomjegyzék	51

1. Bevezetés

A Nap az élet egyik forrása. A felszínre érkező napsugárzás energiája hozzávetőlegesen négy nagyságrenddel haladja meg az emberiség energiaszükségletét. A Föld-légkör rendszer külső határára érkező energia közepes Nap-Föld távolság esetén 1367 W m^{-2} , amit $\sim 1 \text{ W m}^{-2}$ pontossággal ismerünk műholdas mérések alapján (Major, 2010). A napsugárzás a légkörön áthatolva különböző gyengüléseket szenved (Czelnai, 1995). A vízszintes felszínre jutó globálsugárzás két összetevője a direkt és a diffúz sugárzás, ami a felhőzet és a légkör sugárzásáteresztő képességének ismeretében parametrizálható (Kasten, 1989; Práger et al., 1999). Ezzel már egyszerűen számítható egy napelem felületére jutó napsugárzás, ami alapján becsülhetjük a rendelkezésre álló napenergiát, vagy egy-egy naperőmű termelését.

A fosszilis energiahordozók meghatározó szerepet játszanak az emberiség energiaellátásában, készletük azonban véges. Bányászatuk és elégetésük szennyezi a környezetet, így a légkört is. Ismert tény, hogy az üvegházhatású gázok (ÜHG) jelentős hányada a fosszilis energiahordozókon alapuló energiatermeléssel és fogyasztással kapcsolatban keletkezik (Farkas, 2017). Ezért is kapnak egyre nagyobb szerepet a megújuló energiaforrások. Ezek közül a Nap sugárzása az egyik fő, emberi léptékben kimeríthetetlen energiaforrás. Így nem véletlen, hogy napjainkban a felszínre érkező napenergia direkt és indirekt módon történő hasznosítása egyre nagyobb szerepet kap az energiatermelésben (Bartók, 2013; Jerez et al., 2015). A napenergia-technológiák térhódítása hazánkra is jellemző, gondoljunk csak a 2015-ben a Mátrai Erőmű Zrt. által üzembe helyezett, vagy a 2016-ban átadott pécsi állami nagy-teljesítményű naperőműre, illetve a 2013 és 2016 óta működő kisteleki és sajóbábonyi naperőműre. A Magyar Villamos Művek (MVM) tervei is ambiciózusok. Az építés alatt álló naperőmű-parkok hozzávetőlegesen 50 000 háztartás számára elegendő energiát fognak termelni. Ezek a beruházások indokoltá teszik a témával való foglalkozást. Továbbá, a napenergia-hasznosítás vizsgálatakor lényeges szempont a földrajzi helyzet, a hasznosítás módja, és sok más mellett a meteorológiai tényezők (Farkas, 2017), így a felszínre érkező napsugárzás modellezése és előrejelzése a meteorológusok számára is fontos kutatási terület.

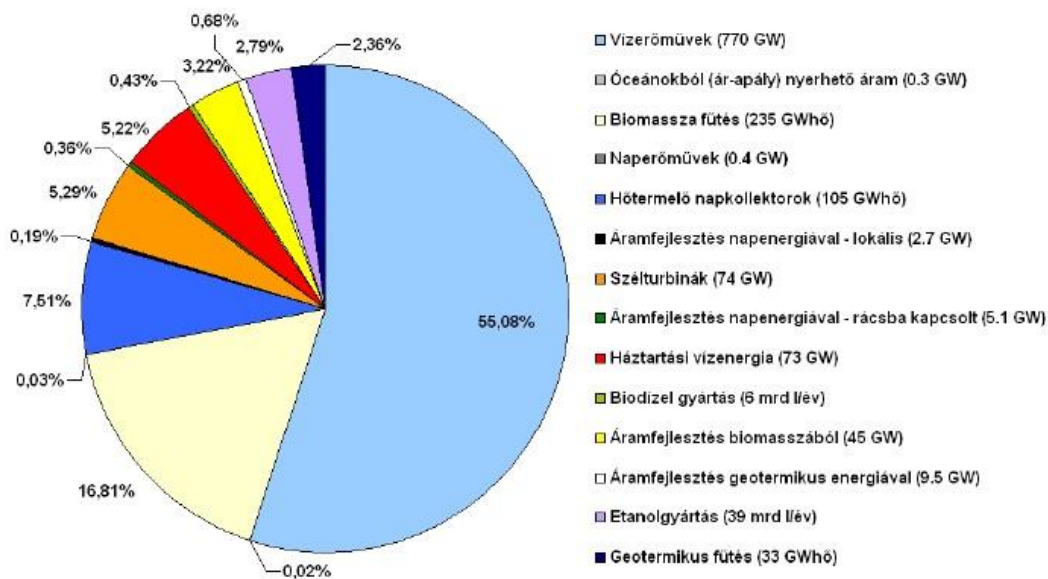
A dolgozat egyik célja a WRF modell különböző rövidhullámú sugárzási parametrizációs sémáinak az összehasonlítása, más szóval egy érzékenységvizsgálat, ami korábbi kutatásaink folytatása (Bán, 2015; Molnár, 2015; Weidinger et al., 2015; Bán, 2016; Bán et al., 2018). Elkészítettem egy fél éves futtatás-sorozatot, így lehetővé vált a napsugárzás előrejelzések hosszabb időszakra történő kiterjesztésére (2017. március-augusztus). Harmadikként elkészítettem egy kvázi-ensemble vizsgálatot 2017 augusztusára, ahol a WRF modellt 72 órára futtattam. Így minden napra 3 előrejelzési adatsor áll rendelkezésre (a különböző modellindításokból származó első, második és harmadik napi), ami lehetővé teszi valószínűségi előrejelzések készítését, illetve a sugárzási előrejelzések pontosságának vizsgálatát az előrejelzési idő függvényében.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A napenergia

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük a természeti folyamatok során folyamatosan rendelkezésre álló vagy maximum néhány éven belül újratermelődő energiaforrásokat: a nap-, szél- és vízenergiát, a biomasszából nyert energiát, valamint a geotermikus energiát. Ezek az energiaforrások a földrajzi adottságoktól függően állnak rendelkezésre. Jelenleg a megújuló energiák közül a vízenergia a legelterjedtebb a világon, több mint 55%-ot tesz ki (1. ábra). Ezt követi a biomassza égetés: gondoljunk csak a fűtésre, a fatüzelésre.

A Magyarországon rendelkezésre álló megújuló „zöldelőművi” kapacitás 4,2%-a (~35 MW (megawatt)) származik közvetlenül napenergiából. Hazánk 2020-ra 14,65%-os megújuló energia részarányt tűzött ki célul a teljes bruttó energiafelhasználáson belül, amelynek a tervek szerint kb. 10%-át napenergiából fedezi majd (a teljes energia-termelésünk ~1,6%-a). Ez (mármint a 10%-os napenergia hányad) sokkal nagyobb részarányban valósult meg: míg a terv 2015-ben 8,3% volt, addig a tényleges részarány 14,47%-ra jött ki (Szabó, 2017). A 14,65%-os arány önkéntes magyar vállalat, ugyanis 2020-ra a megújuló energiaforrásból előállított energia felhasználás vállalt aránya 13% (Szabó, 2017).



1. ábra: A megújuló energiaforrások felhasználásának globális megoszlása.
(Forrás: *Bartholy et al.*, 2013)

A Föld különböző régióiban más és más megújuló energiaforrások hasznosításához kedvezőek az adottságok. Hazánkban ezek közül a biomassza és a szélenergia felhasználása mellett a legkézenfekvőbb, és hosszú távon is biztos forrást a napenergia jelenti. A hazai napenergia potenciál felmérésében meghatározó szerepet játszik az Országos Meteorológiai Szolgálat (Major György akadémikus és munkatársai, *Major*, 1985; *Major et al.*, 2002; *Tóth et al.*, 2017), illetve más kutatóhelyek (*Tóth et al.*, 2011; *Farkas*, 2010, *Farkas*, 2017).

A napenergia a Nap rövidhullámú, Földünket érő elektromágneses sugárzásából kinyerhető energia. Aktív (*napelem, napkollektor*) és passzív (*épületek tájolása, felhasznált építőanyagok*) hasznosítása során fotovoltaiikus módon villamos energiát, illetve hőenergiát termelhetünk. „A napelem vagy fotovillamos elem, a Nap sugárzási energiáját közvetlenül alakítja át villamos energiává” (*Pálfy*, 2005). Így tehát megkülönböztetünk fotovillamos és napkollektoros (hőenergiát adó) naperőműveket. A hazai számított fotovillamos potenciál hozzávetőlegesen 1750 PJ év^{-1} , ami az éves villamosenergia-fogyasztás több mint 12-szerese (*Farkas*, 2010). A legjelentősebb korlátozó tényező a berendezések magas árához kapcsolódóan a rendelkezésre álló támogatási keret. Mindazonáltal a magyarországi napsütéses órák számát tekintve i) a termikus napenergia-hasznosítására kifejlesztett technológia kiváló eszköz a megújuló energiaforrások elterjesztésében, míg ii) a fotovoltaiikus napenergia rendszereket a felgyorsult, gyakorlatorientált kutatás-fejlesztési munka és a megtérülési idő csökkenése (10 év körüli) teszi versenyképessé (*NFM*, 2010).

Napjainkban számos országban, így hazánkban is folyamatban vannak a napenergiával, naperőművekkel kapcsolatos fejlesztések (Varga, 2014; Farkas, 2017). Ezek közül az egyik legelső erőmű a Csongrád megyei Kisteleken működik 2013 őszétől. Az elmúlt években robbanásszerűen nőtt a hazánkban telepített naperőművek száma. A fejlesztésekbe a Mátrai Erőmű Zrt. (Farkas, 2017) mellett a Magyar Villamos Művek, azaz az MVM (1 – Világgazdaság; László, 2018) is „beszállt”. Hírlevelük szerint (László, 2018), előálltak egy kormányzati agrár napenergia-hasznosítási programmal is. Ebben olyan újfajta naperőműveket kívánnak telepíteni, amelyekkel egy adott földterület egyszerre termelhet villamos energiát és mezőgazdasági termékeket. A napelemeket hagyományos módon, a talajszintre elhelyezve, illetve az új, a mezőgazdasági termelést az energiatermeléssel ötvöző módszerrel is a termőföldekre lehet telepíteni (megemelt tartók). Ez annyira új, hogy még Németországban is tesztelés alatt áll. Ez az úgynevezett agrofotovoltaikus hasznosítási módszer azt jelenti, hogy a napelemek körülbelül öt méter magas lábakon állnak, alattuk pedig aktív növénytermesztés és legeltetés folytatható. Bár ebben az esetben az árnyékoló és egyéb hatások miatt a mezőgazdasági termelés hatékonysága 5–20%-kal elmaradt a szokásostól, a megtermelt energia összességében 60 százalékkal javította a terület megtérülési mutatóit (László, 2018).

A *Világgazdaságban* megjelent interjú szerint az MVM olyan fotovoltaikus erőművek létesítésén is dolgozik, amelyek összkapacitása eléri a 100 megawatt (MW) teljesítményt. Ez több projektet jelent: az MVM csoporthoz tartozó MVM Hungarowind Kft. hét önálló napelemeserőmű-projektre készül. Ezen belül két nagyobb beruházás során egy-egy 20 MW teljesítményű fotovoltaikus erőmű létesül, további öt során pedig az ország különböző régióiban építenek ilyen erőműveket 60 MW összteljesítménnyel. A tervek szerint ez 108 helyszínt jelent, és mindegyiken 0,5–0,6 MW teljesítményt. A két legnagyobb erőmű a tervek szerint Felsőzsolcán és Oroszlányban épül. A létesülő fotovoltaikus erőművekben megtermelt energia több mint 50 ezer háztartás éves villamosenergia-szükségletét fedezi majd. A projektek megvalósulása azonban nem csupán az energiaellátás biztonsága és folyamatos fenntartása miatt lényeges, hanem a hazai energiatermelésnek az EU-s és nemzetközi éghajlatvédelmi célkitűzésekkel való összhangja miatt is [1 – *Világgazdaság*].

Az EU-s célkitűzésekről és azok alakulásáról a 2. ábra ad összefoglalót. A fentebb leírt 2020-ra kitűzött célok mellett már léteznek a 2030-ra datált tervek is: az Európai Bizottság 2014 januárjában publikálta a 2020–2030-as időszakra szóló éghajlat- és energiapolitikai kereteket (EB, 2014). Ebben két új, 2030-ig elérendő célt határozott meg:

40%-kal kívánják csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását az 1990-es szinthez képest, illetve 27%-ra tervezik növelni a megújuló energiaforrásokból előállított energia arányát a végső energiafelhasználásban (*Sebestyén Szép, 2016*).

Dokumentum	Teljesítőképeség/célkitűzés	Céldátum
Energy for the future: renewable sources of energy (EC [1997])	A megújuló energia 12 százalékos részaránya a végső felhasználásban.	2010
Az energiahatékonyságról, avagy többlet kevesebbel (EB [2005])	20 százalékos energiahatékonysági teljesítőképeség.	–
Energiahatékonysági cselekvési terv (EB [2006b])	20 százalékos energiahatékonysági teljesítőképeség.	–
Európai stratégia az energiaellátás fenntarthatóságáért, versenyképességéért és biztonságáért (EB [2006a])	A megújuló energia 21 százalékos részarányának megvalósítása az elektromosenergia-termelésben.	2010
Európai energiapolitika (EB [2007b])	Az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest, a megújuló energia 20 százalékos részarányának megvalósítása a teljes energiafelhasználásban.	2020
Energia 2020 (EB [2010])	20 százalékos energiahatékonyság-javulás; a megújuló energia 20 százalékos részarányának megvalósítása a végső energiafelhasználásban; az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest.	2020
Éghajlat- és energiapolitikai keret a 2020–2030-as időszakra (EB [2014])	Az üvegházhatású gázok kibocsátásának 40 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest; a megújuló energia 27 százalékos részarányának megvalósítása a végső energiafelhasználásban; 25 százalékos energiahatékonyság-javulás.	2030
A 2030-ig tartó időszakra vonatkozó éghajlat- és energiapolitikai keret (ET [2014])	Az üvegházhatású gázok kibocsátásának 40 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest; a megújuló energia 27 százalékos részarányának megvalósítása a végső energiafelhasználásban; 27 százalékos energiahatékonyság-javulás.	2030

2. ábra: A 20–20–20-as európai energiapolitikai célok fontosabb mérföldkövei.
(Forrás: *Sebestyén Szép, 2016*)

A fentiekre és az elmúlt évek gyors technikai fejlesztéseire, a Németországban és Ausztriában egyre nagyobb számban épített fotovoltaikus erőművekre és a rohamosan bővülő hazai beruházásokra hivatkozva indokolt a témakörrel való foglalkozás. A felszínre jutó napsugárzás modellezése és előrejelzése pedig tipikusan meteorológus feladat.

2.2. Rövidhullámú sugárzási parametrizációk

A fejezetben a WRF (Weather Research and Forecasting) modellben beállított rövidhullámú sugárzási parametrizációs sémák elméleti hátterével foglalkozunk. A modell V3.7.1-es verzióját használjuk, melyben többféle parametrizáció közül választhatunk. Ezt úgy kell érteni, hogy minden parametrizációs csoport esetén többféle módszert választhatunk ki a modell beállításán (namelist) keresztül (1. táblázat).

1. táblázat: A lehetséges rövidhullámú sugárzási parametrizációs sémák a WRF modellben.

WRF kód (ra_sw_physics)	Séma	Forrás	Hozzáadva
1	Dudhia	<i>Dudhia</i> (1989, JAS)	2000
2	Goddard	<i>Chou és Suarez</i> (1994, NASA Tech Memo)	2000
3	CAM	<i>Collins et al.</i> (2004, NCAR Tech Note)	2006
4	RRTMG	<i>Iacono et al.</i> (2008, JGR)	2009
5	New (frissített) Goddard	<i>Chou és Suarez</i> (1999, NASA TM)	2011
7	FLG (UCLA)	<i>Gu et al.</i> (2011, JGR), <i>Fu és Liou</i> (1992, JAS)	2012
99	GFDL	<i>Fels és Schwarzkopf</i> (1981, JGR)	2004

A kutatásunk során a fentiekből három leggyakrabban alkalmazott sémát választottunk ki, hogy összehasonlítsuk a velük kapott eredményeket. Ez a három a Dudhia, a frissített Goddard (New Goddard) és az RRTMG séma volt. A Dudhia séma volt a legkorábbi, az RRTMG pedig a használt modellverziónk alapbeállítása. A következőkben ennek a három sémának a hátterével, tulajdonságaival foglalkozunk.

Elsőként a Dudhia sémát (*Dudhia*, 1989) ismertetjük. Ez a legegyszerűbb és a legkorábban elkészült mind közül. A rövidhullámú sugárzási és egyéb (például: konvekció, jégfázis fejlődése, stb.) parametrizációkat egy borneói esettanulmányra alapozva fejlesztette ki a szerző. Kétdimenziós mezoskálájú modellt alkalmazott a téli monszon kísérletek (Winter Monsoon Experiment) adataira azért, hogy az éjszaka előforduló konvekciót szimulálja a Dél-kínai-tenger felett. 2000-ben ezt a sémát integrálálták bele a WRF modellbe. Egyszerű lefelé irányuló rövidhullámú sugárzási fluxust számol szóródásból és abszorpcióból. Alapja, hogy minden modellszintre kiszámolja a sugárzás-átvitelt. A szoláris sugárzás tartalmazza a reflektált és a visszaszórt komponenseket. A tiszta levegő elnyelése elsősorban a vízgőzből származik. Minden felhőt és csapadékot úgy kezel, mintha egy fajta felhő lenne. Az albedó és az elnyelés elméleti értékei *Stephens* (1978) munkáján alapulnak.

Nézzük meg részletesebben, hogyan adódik a *Dudhia séma* rövidhullámú sugárzása! A rövidhullámú fluxus lefelé irányuló komponensénél számításba vették a zenitszög hatását. (Növekvő úthossz, csökkenő lefelé irányuló sugárzási komponens). Minden hatást figyelembe véve: a felhőzetnél az albedót (S_{cs}) és az abszorpciót (S_{ca}), tiszta levegő mellett a szóródást (S_s) és a vízgőz abszorpcióját (S_a), a lefelé irányuló sugárzás:

$$S_d(z) = \theta_0 S_0 - \int_z^{top} (dS_{cs} + dS_{ca} + dS_s + dS_a), \quad (1)$$

ahol θ_0 a zenitszög koszinusza és S_0 a szoláris állandó.

Adott rácspont feletti légoszlopban, az egymás feletti „rác dobozokban” a felhőzet 0 vagy 1 értéket vesz fel. A felhőzet visszasugárzása illetve az albedó és az abszorpció bilineárisan interpolált értékeit a zenitszög és $\ln(w/\theta_0)$ alapján kapjuk meg (*Stephens, 1978*). A számításnál figyelembe vesszük a Nap helyzetét. (Itt w az integrált folyékony víztartalom). A módszer alkalmas többrétegű felhőzet hatásának számszerűsítésére is. Minden rétegre külön-külön számolja a sugárzási komponenseket.

A tiszta levegő szórása függ a bejövő sugárzás légköri útjától (zenitszög) és a levegő sűrűségének magasságszerinti változásától. A vízgőz-abszorpcióját a vízgőz eloszlás függvényének ismeretében számolja, ami szintén függ a zenitszögtől. Az abszorpciós függvény *Lacis és Hanssen (1974)* munkájából származik.

A másik választott séma a *frissített Goddard séma* (röviden, a szakirodalom CLIRAD-SW-nek is nevezi) (*Chou és Suarez, 1999*), melyet az amerikai NASA/Goddard Űrrepülési Központjának Klíma és Sugárzás Csoportja fejlesztette ki. Tartalmazza a vízgőz, ózon, felhőzet, aeroszolok abszorpcióját. Ózon esetén 5 lehetőség közül választhatunk a különböző klimatológiai profilok alapján. Többek között számításba vették i) a felhőzet, ii) az aeroszol részecskék, iii) a molekulák Rayleigh-szórás és a felszín szórásának és abszorpciójának a hatását. Más-más sugárzási spektrumra más-más megközelítést használ. Ez a séma már nemcsak a lefelé irányuló sugárzást, hanem a felfelé irányulót (reflexív) is figyelembe veszi (két-áramú összegzéses közelítés). Az algoritmust azzal a felvetéssel fejlesztették, hogy a légköri rétegek sík-párhuzamosak (plánparalelek), és csak felhőmentesek (0) vagy teljesen borultak (1) lehetnek. Ahhoz, hogy közelítse a részlegesen felhős égboltot, összeadja ezeket a különböző rétegek felhőzetét és random, illetve maximális átfedést alkalmaz rájuk. Az égbolt ekkor több részre, szektorokra van osztva. Minden egyes részben a felhőzet homogén egy rétegben: azaz vagy 0 vagy 1 az értéke. A rövidhullámú sugárzás minden részben külön adódik és súlyozva van a

felhőmennyiséggel ahhoz, hogy megkaphassuk a teljes sugárzási fluxust (*Chou et al.*, 1997).

A frissített Goddard sémában maximum-random átfedéses közelítést alkalmaznak a felhőzetre (*Chou and Suarez*, 1999). Először is, elkülönítik a három réteget (magas, közepes, alacsony) a 400 hPa és a 700 hPa szintek szerint. Egy-egy ilyen csoportban a felhőrétegek valószínűleg kapcsolódnak egymáshoz, ezáltal a három magassági csoport mindegyikében maximális átfedéses felhőzetet, míg a három magassági csoport között véletlenszerű (random) átfedést feltételeznek. Tehát minden magassági csoportban a felhőzet „szétkenődik”, a maximális felhőzetmennyiség értékét (f_m) veszi fel, amit még a τ optikai vastagsággal is súlyoznak a szétkenés miatt. Példaként, a tiszta régió borítottsági hányada (A_{clr}):

$$A_{clr} = (1 - f_{m,1})(1 - f_{m,2})(1 - f_{m,3}) \quad (2)$$

ahol az 1,2 és 3 a kitevőkben a magas, közepes, és alacsony szintű felhőzeti csoportot jelöli.

A sugárzási fluxusokat a séma 11 sugárzási spektrális sávban számolja. Az IR (infravörös) tartományt kivéve a különböző gázok elnyelési együtthatóit és a részecske egyszer-szórását (single-scattering) használja fel a séma (*Chou és Suarez*, 1999). A reflektivitást és a transzmisszivitást minden légköri rétegben a δ -Eddington közelítést használva számolja (*Joseph et al.*, 1976). A rétegekre összetett fluxusok számolása két-áramú összegzéses módszerrel történnek ezek után. A teljes fluxus minden nyomási szintre és a felszínre ezeknek a fluxusoknak a súlyozott összege,

$$F(p) = \sum_{i=1}^{38} \psi_i F_i(p) \quad (3)$$

ahol ψ_i az extraterresztriális szoláris fluxus hányada, amely az említett 11 spektrális sávban. Mindegyik légköri rétegnek és spektrális sávnak az effektív optikai vastagsága (τ), részecske egyszer-szórása (ω), és aszimmetriai faktora (g) következőképpen áll elő:

$$\tau = \sum_i \tau_i, \quad (4)$$

$$\bar{\omega} = \sum_i \omega_i \tau_i / \sum_i \tau_i, \quad (5)$$

$$\bar{g} = \sum_i g_i \omega_i \tau_i / \sum_i \omega_i \tau_i, \quad (6)$$

ahol a szumma az összes gázra és részecskére vonatkozik (i). Ezek részletesebb számolásáról bővebben *Chou és Suarez* (1999) munkájában lehet olvasni. Tartalmazzák az ózont, a vízgőzt, a felhőzetet, az aeroszolókat és az atmoszférikus gázokat (Rayleigh-szórás).

Most pedig rátérünk a fluxusok kiszámítására. Mint már korábban is említettük, a séma két-áramú összegzéses közelítést használ, tehát nem csak lefelé irányuló fluxust számol, hanem felfelé irányulót is. *Chou és Suarez* (1999) alapján a felfelé ($F\uparrow$) és a lefelé ($F\downarrow$) irányuló fluxusok számítása az $i + 1/2$ szinten (az i -edik réteg alsó határa a légkörben) a következőképpen adódik:

$$F_{i+1/2} \uparrow = S\{e^{-\tau_{1,i}/\mu_0} R_{i+1,k}(\mu_0) + [T_{1,i}(\mu_0) - e^{-\tau_{1,i}/\mu_0}] \bar{R}_{1+1,k}\} / (1 - \bar{\bar{R}}_{1,i} \bar{R}_{i+1,k}) \quad (7)$$

$$F_{i+1/2} \downarrow = S e^{-\tau_{1,i}/\mu_0} + S\{e^{-\tau_{1,i}/\mu_0} \bar{\bar{R}}_{1,i} R_{i+1,k}(\mu_0) + [T_{1,i}(\mu_0) - e^{-\tau_{1,i}/\mu_0}]\} / (1 - \bar{\bar{R}}_{1,i} \bar{R}_{i+1,k}) \quad (8)$$

ahol S a besugárzás a légkör tetején, a k index jelöli a felszínt, az $(1, i)$ és az $(i+1, k)$ kitevő jelöli az $i+1/2$ szint alatti és feletti régiót. $T_{1,i}$ a transzmissziót, R a direkt sugárzás visszaverődését jelöli. \bar{R} az $i+1/2$ szint alatti régió diffúz sugárzásának visszaverődését, $\bar{\bar{R}}$ az $i+1/2$ szint feletti régió diffúz sugárzásának visszaverődését jelenti.

A harmadik sugárzási séma, amiről szó esik, az úgynevezett RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Model for GCMs*) séma (*Iacono et al.*, 2008). Először csak RRTM-ként létezett a szélessávú (broadband) sugárzás átviteli modell, melynek fejlesztése a hosszuhullámú (LW) és a rövidhullámú (SW) tartományra is kitért. A különböző molekulák abszorpciós együtthatójához a korrelált k-eloszlás módszere szükséges. Az RRTM a következő abszorbereket veszi figyelembe a rövidhullámú sugárzásnál: vízgőz, szén-dioxid, ózon, metán, oxigén. Az aeroszol részecskék és a felhőzet gyengítő hatását, valamint a Rayleigh-szórást is számításba veszi a séma. A többirányú szórás (multiple

scattering) kiszámításához a DISORT elnevezésű diszkrét koordinátájú algoritmust használja (*Stamnes et al.*, 1988; *Iacono et al.*, 2008). A felhőzetet és a légkör optikai tulajdonságait az RRTM a rövidhullámú sugárzás tekintetében tiszta vagy borult égboltként tudja kezelni. Az RRTM később lett tovább fejlesztve RRTMG-vé (*Iacono et al.*, 2000, 2003; *Iacono et al.*, 2008) a GCM-ekhez kapcsolódó nagyobb pontosság érdekében. Amíg az RRTMG ugyanazzal a fizikai alappal és elnyelési (abszorpciós) együtthatókkal rendelkezik, mint az RRTM, addig számos olyan módosítás kapott benne helyet, ami például növeli a számítási hatékonyságot, illetve reprezentálja a rácshálózaton belüli (szubgrid-skálájú) felhőzeti változékonyságot. Továbbá a DISORT algoritmust is lecserélték, az RRTMG_SW-ben már egy két-áramú sugárzási átviteli megoldó módszert (*Oreopoulos and Baker*, 1999) használnak. A felhőzeti rétegződés bonyolultsága miatt, amiben a többszörös szóródás is közrejátszik, az RRTM_SW a DISORT algoritmust használva csak tiszta vagy teljesen borult állapotokkal tudott dolgozni. Ezt a korlátot érintette az RRTMG_SW-ben (és mellesleg az LW-ben is) az McICA, a Monte Carlo független oszlop közelítés (*Barker et al.*, 2002; *Pincus et al.*, 2003). Ez egy statisztikai technika a rácshálózaton belüli (szubgrid-skálájú) skálájú felhőzeti változékonyságra, beleértve az átfedést (random) is. A módszer a skalár felhőzet mennyiségi értékeiket egy véletlenszerűen mintavételezett bináris tömbbel (egy adott g ponton méretezve) helyettesíti (*Iacono et al.*, 2008).

Bemutattuk a három alkalmazott sugárzási parametrizációt. A felszíni sugárzási fluxusok esetén a sémák közötti különbségek az alábbiak lehetnek:

- tiszta égbolt esetben az algoritmusok (sémák) máshogy kezelik a gázoknál az abszorpciót, emissziót és gyengülést a sugárzásban,
- különbségek vannak a kezdeti nyomgázok koncentrációjában,
- különbségek vannak a felhőzet kezelésében is.

A legfejlettebbnek a legkésőbbi, azaz az RRTMG séma mondható. Ez megmutatkozik a felhőzeti rétegződés számításba vételének összetettségében, illetve abban, hogy más parametrizációs eljárásokkal összehasonlítva több spektrális rétegre osztja fel a sugárzást (14 sáv).

3. Anyag és módszer

Célunk a numerikus modell kísérletek elméleti hátterének bemutatása. Kitérünk i) a hazai és a német sugárzásszámítási környezeti szabványokra (szabványmódszer), majd a WRF numerikus modellel foglalkozunk (Weather Research and Forecasting, jelentése tükörfordításban: „időjárás kutatás és előrejelzés”). Bemutatjuk a felhasznált adatokat, ismertetjük a modell szerkezetét, majd a modell- beállításokat részletezzük.

3.1. Szabványmódszer a globálsugárzás számításához

E részben megismerkedünk a vízszintes felszínre érkező rövidhullámú sugárzás egyszerű számításával. A globálsugárzás definíció szerint nem más, mint a vízszintes síkra érkező teljes rövidhullámú sugárzás, ami a felszínen a 0,286–4 μm hullámhosszúságú sugárzást jelenti (Mészáros, 2013). A globálsugárzás (G) a direkt (S) és a diffúz (D) sugárzás összege.

$$G = S + D. \quad (9)$$

A direkt, vagy más néven közvetlen sugárzás (S) a Nap irányából a vízszintes felületre jutó rövidhullámú sugárzás. A diffúz, vagy más néven szórt sugárzás (D) a beérkező összes rövidhullámú sugárzásnak az a része, ami nem a Nap irányából érkezik. Tehát olyan sugárzás, ami szóródik (Rayleigh- és Mie-féle) és visszaverődik, beleértve a felszín és légkör közti visszaverődést is. A reflex, azaz a visszavert sugárzás (R) definíció szerint a vízszintes síkról, azaz a felszínről a légkörbe jutó rövidhullámú sugárzás.

Ezen tagok közül számunkra a globálsugárzás (G) a legfontosabb, amelyet különböző eszközökkel és módszerekkel energetikai célokra kívánunk felhasználni.

A standard meteorológiai mérésekre alapozott direkt, diffúz és globálsugárzást számító modellt a magyarországi (Práger *et al.*, 1999), illetve a németországi (Kasten, 1989) szabvány módszerek alapján készítettük el Excel környezetben, Basic nyelven írt makrók segítségével. Első lépésben nézzünk egy egyszerű módszert a globálsugárzás kiszámítására standard meteorológiai adatok alapján (Práger *et al.*, 1999):

$$G = (a_1 \cdot \sin \phi + a_2) \cdot (1 + b_1 \cdot N^{b_2}), \quad (10)$$

ahol ϕ a napmagasság, N a borultság (0 és 1 közötti értéket vehet fel \rightarrow 0: derült égbolt, 1: teljes borultság), a és b földrajzi helytől és felhőzetétől függő empirikus állandók, melyek Magyarországra:

$$a_1 = 990 \text{ Wm}^{-2}, \quad a_2 = -30 \text{ Wm}^{-2},$$

$$b_1 = -0,75, \quad b_2 = 3,4.$$

A napmagasság (ϕ) kiszámítása:

$$\phi = \arcsin(\sin \delta \cdot \sin \varphi_{rad} + \cos \delta \cdot \cos \varphi_{rad} \cdot \cos h), \quad (11)$$

ahol φ_{rad} a szélességi kör, δ a Nap deklinációja. A csillagászatban a deklináció az égi egyenlítőtől a pólusok felé mért szögtávolság, értéke az égi egyenlítőn 0° , az északi égi póluson $+90^\circ$, a délin pedig -90° . A Nap deklinációja tehát a Nap és az égi egyenlítő közötti szögtávolság, amely a földrajzi szélesség éggömbi megfelelője. A képletben szereplő h a Nap óraszöge.

Fontos a zenitszög (θ_0) ismerete is. Ennek kiszámítása:

$$\cos \theta_0 = \sin \delta \cdot \sin \varphi_{rad} + \cos \delta \cdot \cos \varphi_{rad} \cdot \cos h. \quad (12)$$

A zenitszög az a szög, amely a lokális zenit (helyi függőleges), valamint a Nap és a megfigyelő által meghatározott egyenes egymással bezár. Ez a szög 0° és 90° között változhat. Teljesül, hogy:

$$\cos \theta_0 = \sin \phi, \quad (13)$$

hiszen a napmagasság (ϕ) és a zenitszög (θ_0) 90° -ra egészítik ki egymást (*Barótfi, 2000*).

δ a Nap deklinációja:

$$\delta = \arcsin(0,398 \sin \varepsilon). \quad (14)$$

ε a szoláris hosszúság:

$$\varepsilon = 4,871 + 0,0175d + 0,033 \sin(0,0175 d), \quad (15)$$

ahol d az év adott napja.

h a Nap óraszöge:

$$h = \lambda_{rad} + 0,043 \sin(2\varepsilon) - 0,033 \sin(0,0175d) + 0,262t_{UTC} - \pi, \quad (16)$$

ahol t_{UTC} az év adott napjának időpontja. A Nap delelésekor $h = 0$. Az egyenletekben λ_{rad} a földrajzi hosszúságot jelöli (itt is radiánban megadva).

A német környezetvédelmi szabványban (*Kasten*, 1989) a felhőzet mellett a homályossági tényezőt is figyelembe kell venni. Ott a következő parametrizációt alkalmazzák:

$$G = G_0 \cdot \left[1 - a \cdot \left(\frac{N}{8} \right)^b \right], \quad (17)$$

ahol $a = 0,72$ $b = 3,2$.

Itt és a következő képletekben is az N borultság már oktában értendő.

$$G_0 = I \cdot \sin \phi \cdot A \cdot \exp \left(-B \cdot \frac{T_m}{\sin \phi} \right), \quad (18)$$

ahol I a Föld-légkör rendszer külső határára érkező napsugárzás, azaz az aktuális napállandó, ami függ az aktuális (r) és a közepes (r_0) Nap-Föld távolságtól:

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^2. \quad (19)$$

$I_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$, a légkör külső határára közepes Nap-Föld távolság (149 600 000 km) esetén, a Nap sugárzására merőleges egységnyi felületre időegység alatt bejövő energia. A fenti (18) képletben alkalmazott állandók: $A = 0,84$ és $B = 0,027 \text{ K}^{-1}$. T_m a homályossági tényező, ami a levegőben lévő gázok pl. vízgőz, ózon, szén-dioxid molekuláin, illetve a különböző aeroszol részecskéken történő szóródás és elnyelődés által keltett, a tiszta levegőhöz viszonyított fénygyengítést mutató szám. Ez megadja, hogy hány tiszta és száraz légkört kellene egymás fölé helyezni, hogy ugyanazt a sugárzásgyengítést adja, mint a valóságos légkör.

Az Excel makróban ennek a két (magyar és német szabványmódszer) parametrizációnak az átlagát vettük és a továbbiakban ezzel dolgozunk.

3.2. Adatok

Az órás sugárzási adatokat 2017. márciusától augusztusáig határoztam meg a kisteleki naperóműhöz legközelebb eső, szegedi szinoptikus állomás (WMO kódja: 12982) felhőzeti adatai alapján. Rendelkezésre álltak továbbá a kisteleki naperómű órás termelési adatai is. A munka első szakaszában csak a fent említett adatok voltak elérhetőek számunkra.

Később a Szegeden mért globálsugárzás adatokat is megkaptuk az Országos Meteorológiai Szolgálatától (OMSZ) 2017. márciustól augusztusig órás összegekben. Így Szegedre már nemcsak a szabványmódszerrel kapott globálsugárzást használhattuk a WRF modellszámításokkal való összevetésre, hanem a mértet is. Ennek mértékegysége $\text{J cm}^{-2} \text{óra}^{-1}$, amit átszámoltunk W m^{-2} egységekre ($1 \text{ J cm}^{-2} \text{óra}^{-1} = 2,778 \text{ W m}^{-2}$).

3.3. A WRF modell

3.3.1. A modell bemutatása

A WRF egy sokoldalúan felhasználható numerikus időjárás előrejelző modell, amelyet az amerikai Nemzeti Légkörkutató Központ (NCAR), az amerikai Nemzeti Óceáni és Meteorológiai Szolgálat (NOAA) továbbá több egyetem és kutatóintézet együttes munkájával fejleszt és a világban sokfelé alkalmaznak kutatásra és operatív előrejelzésre egyaránt. Hazánkban többek között használják a balatoni viharjelzésben [2 – *met.hu*], a Szegedi Tudományegyetemen folyó városklíma kutatásokban (*Skarbit*, 2018), vagy a Nemzeti Közzolgálati egyetemen a pilótánélküli repülőeszközök időjárás-biztosítására (*Bottyán*, 2016).

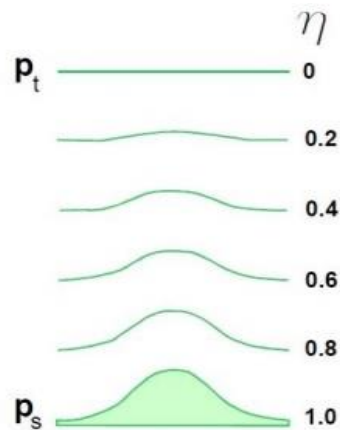
A modellnek alapvetően két változata van. Az „Advanced Research WRF” vagy WRF-ARW („professzionális kutatási WRF”) változatot főleg kutatási célokra, míg a „Nonhydrostatic Mesoscale Model” vagy WRF-NMM („nemhidrosztatikus mezoskálájú modell”) változatot rendszeres időjárás előrejelzések készítésre alkalmazzák. Mivel a modell mezoskálájú, ezért nem az egész Földre, hanem csak egy beállított régióra futtatják. Korlátos tartományú, nem-hidrosztatikus mezoskálájú modell révén a 100 km-es horizontális rácsfelbontástól – többszörös beágyazással – akár az egy kilométeresig képes a

légköri folyamatok vizsgálatára.

A modell a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer integrálását végzi (Skamarock *et al.*, 2008). Öt különböző parametrizációs csoportot tartalmaz, melyek a modellrácsnál kisebb folyamatok számszerűsítésére szolgálnak. Ezek a folyamatok: i) a felhő- és csapadékképződés mikrofizikája, ii) a planetáris határreteg turbulens folyamatai, iii) felszíni energiamérleget meghatározó hatások, vi) a konvekció, és v) a légköri sugárzásátvitel. A modell nem-hidrosztatikus közelítést alkalmaz, a légkör összenyomható, a dinamikai egyenletek leírása Euler-módszerrel történik. A modell η felszínkövető vertikális koordináta-rendszert használ (3. ábra), melyet a nyomás hidrosztatikus komponense alapján számít. Ez a következőképpen írható fel:

$$\eta = \frac{p-p_t}{p_s-p_t}, \quad (20)$$

ahol p_s a legalsó szint (praktikusan a felszín), amit a domborzat határoz meg. A vertikális szintvonalak követik a domborzatot, de a magasság növekedésével egyre jobban kisimulnak egészen addig, amíg eléri a legfelső, állandó nyomású szintet (p_t). Ebből könnyen belátható, hogy η értéke 1 és 0 között változik (a felszínen 1, a modell felső szintjén 0).



4. ábra: Felszínkövető koordináta-rendszer. (Skamarock *et al.*, 2008)

Az ARW horizontálisan az Arakawa C rácsot használja (Mesinger és Arakawa, 1976). Itt a skalárok a rács közepén vannak megadva. A vertikális felbontás és az időlépcső hossza is módosítható a modellben, azonban minden esetben szem előtt kell tartani az úgynevezett Courant–Friedrichs–Lewy-kritériumot (CFL), mely kimondja, hogy a ráctávolság és az időlépcső hányadosának kisebbnek kell lennie, mint a leggyorsabban terjedő mozgásforma sebessége. Erre a numerikus stabilitás megtartása miatt van szükség.

4.1.1. Alkalmazott beállítások, sugárzási parametrizációs sémák

A Kárpát-medencére (4. ábra) vonatkozó futtatásokat 10 km-es rácsfelbontással végeztem el, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékének számítógépes környezetében. A WRF modell V3.7.1-es verzióját futtattam 2017. március-augusztus hónapokra naponta 00 UTC-s indítással, 48 órás integrálási idővel, valamint 2017 augusztusára 72 órás integrálásokkal is. Kezdeti- és peremfeltételként az NCEP globális előrejelző modelljét, a GFS modell analízis és előrejelzett mezőit használtam. A globálsugárzás, a direkt sugárzás és a diffúz sugárzás értékeit két pontra írtam ki, órás felbontásban: Kistelek (É. sz.: 46,46° és K. h.: 20°) és Szeged (É. sz.: 46,25° és K. h.: 20,08°) földrajzi koordinátáihoz legközelebb eső rácspontra. Az alkalmazott modell beállításokat az 2. táblázat foglalja össze. A három alkalmazott sugárzási sémák (lásd 2.2. fejezetet):

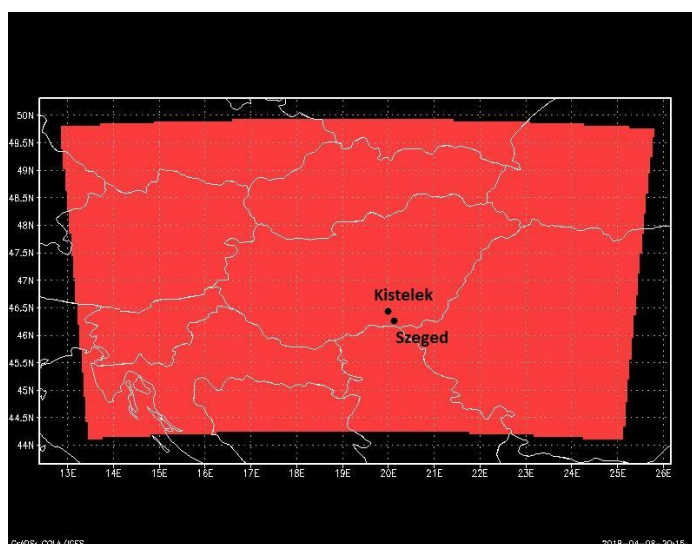
1. Dudhia séma (*Dudhia, 1989*),
2. Rapid Radiative Transfer Model for GCMs, vagy röviden: RRTMG (*Iacono et al., 2008*),
3. frissített (New) Goddard séma (*Chou and Suarez, 1999*).

Így tehát minden nap 3 előrejelzést futtattunk (3 különböző sugárzási parametrizációval). Ezek alapján végeztük el az érzékenységi vizsgálatot mind a szabványmódszerrel számolt globálsugárzást, mind az OMSZ mért szegedi globálsugárzást referenciának véve egy-egy hónapos időintervallumra, 2017 augusztusára.

2. táblázat: a WRF modellkísérletek főbb beállításai.

Modell, verziószám	WRF V3.7.1
Kezdeti- és peremfeltétel	GFS analízis és előrejelzett mezői
Futtatások ideje	2017. március-augusztus (6 hónap) 2017. augusztus (júl. 31–aug. 31)
Futtatások kezdete	minden nap 00 UTC
Futtatások időtartama	48 óra, augusztusra 72 óra is
Outputok időbeli felbontása	1 óra
Rácsfelbontás	10 km
Vertikális szintek száma	44, utófeldolgozásban 14
Modell tartomány	Kárpát-medence
Idősor kiírások	Szeged, Kistelek
RRTMG-séma	namelist.input →ra_sw_physics:4
Dudhia-séma	namelist.input →ra_sw_physics:1
Frissített Goddard-séma	namelist.input →ra_sw_physics:5

Itt is fontos megjegyezni, hogy a munka elején még nem állt rendelkezésre mért globálsugárzás, így az érzékenységvizsgálatot először a szabványmódszerrel számolt globálsugárzással végeztük el. Ennek eredményeképpen választottunk ki a beállításokban szereplő RRTMG rövidhullámú sugárzási sémát, amellyel azután elkészítettük a féléves 48 órás futtatásokat, valamint a 2017. augusztusi 72 órás futtatásokat a valószínűségi vizsgálatokhoz.



4. ábra: A WRF mezoskálájú modell futtatás területe, valamint a két vizsgált hely (Kistelek és Szeged).

4.2. Módszer

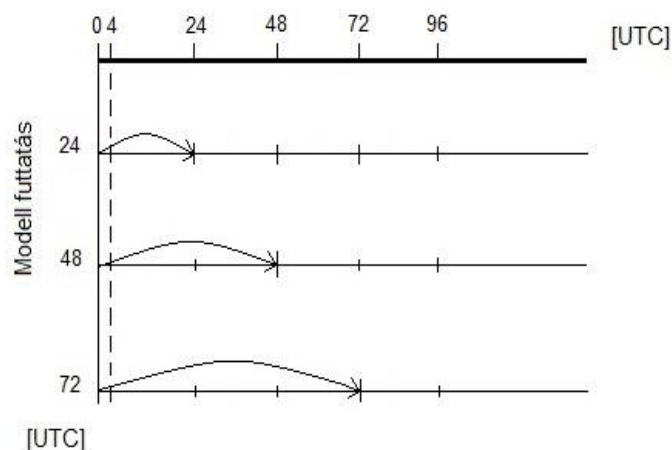
A 2017 augusztusi 48 órás WRF számítási eredményeket összevetettük az általunk fejlesztett (Bán, 2015) globálsugárzás-számító program outputjával Szegedre, és így választottuk ki a legjobb determinációs együtthatóval rendelkező sémát (RRTMG). A globálsugárzást Kistelekre is kiírtattuk a WRF modellből, amit az ottani naperómű teljesítményadataival vetettünk össze. Itt is az RRTMG sugárzási sémát alkalmaztuk. A leírt összehasonlításokat elvégeztük tiszta égbolt (clear-sky) esetekre is, mely során csak a 0 okta megfigyelt felhőzettel, azaz a teljesen derült égbolttal (Szeged, 12982) rendelkező órákat vettük figyelembe. Megjegyzendő, hogy a Szeged-Kistelek távolság 27 km. Később az érzékenységi vizsgálatot elvégeztük Szegedre is az OMSZ-től kapott globálsugárzás adatokkal. Az eredményeket az 5.1. fejezetben részletezzük.

Összehasonlítottuk a WRF-ből kinyert globálsugárzást a mért globálsugárzással Szegedre, illetve a WRF modellből származó globálsugárzást a kisteleki naperómű termelési adataival. Különböző statisztikai módszerekkel vizsgáltuk a WRF modell jószágát. Az eredményeket az 5.2. fejezetben mutatjuk majd be.

A féléves futtatások kiértékelése után került sor a 72 órás futtatásokra. 2017 augusztusát választottuk ki. Így előállt egy 24 órás, egy 48 órás és egy 72 órás előrejelzés az adott napra. Ezeket is összevetettük a mért globálsugárzással Szegedre, valamint a naperőmű termelési adataival Kistelekre.

Az összevetések során a 48 órás futtatásoknál mindig az előző nap éjféltől (00 UTC) indított WRF modellfuttatás adatait hasonlítottuk össze egy adott nap méréseivel, vagy a mérésekből (szegedi felhőzet) származtatott sugárzási adatokkal. A 72 órás futtatásoknál ugyanezen analógia alapján mindig a harmadik nap (48–72 óra) WRF modell eredményeket szemlélünk. Ennek megértéséhez a 5. ábra szolgáltat magyarázatot. Ezáltal nemcsak elegendően hosszú felpörgési időt (spin up) hagyunk a modellnek, de a megtermelt napenergia átvételi ára szempontjából is fontos, termelési terv készítéséhez szükséges, operatív előrejelzéshez hasonló feltételek mellett vizsgálhattuk a modell használhatóságát.

Megjegyezzük, hogy a modell futása ugyan 00 UTC-től kezdődik, de a tényleges számítások minden nap 04 UTC-kor indulnak (spin up time). Ennyi idő kell a globális modelleredmények letöltéséhez, a regionális futtatások előkészítéséhez. Ezt a feladatot az ELTE Meteorológiai Tanszék számítógépes rendszere automatikusan végzi.



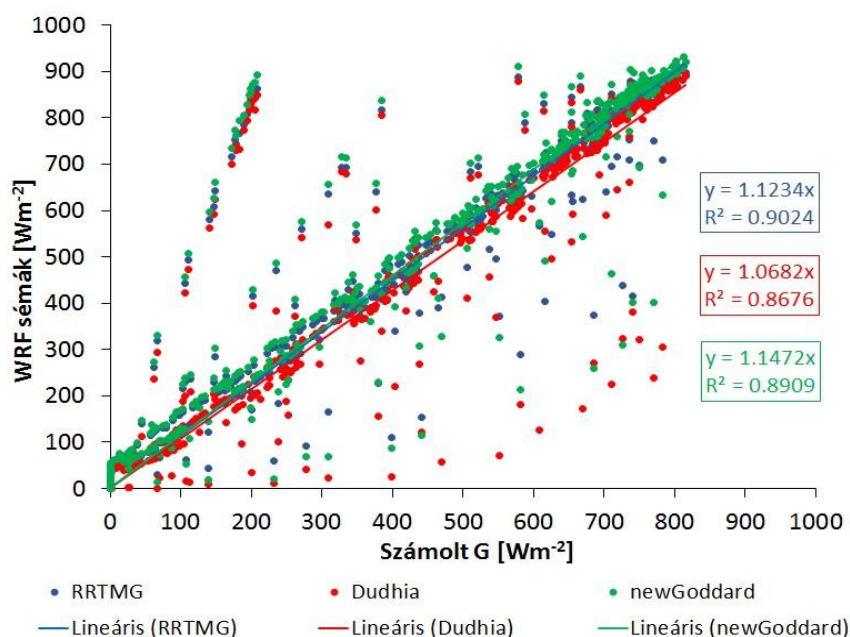
5. ábra: A WRF modellfuttatás sematikus képe az ELTE Meteorológiai Tanszék meteor9 számítógépén. Felül a meteorológiai mérések (kezdeti mezők), alatta a 24 órás, illetve a 48 és 72 órás modellfuttatások.

5. Eredmények

A következő három alfejezetben az eredmények kerülnek bemutatásra. Elsőként az általunk alkalmazott szabványmodellekkel számolt globálsugárzás és a WRF különböző rövidhullámú sugárzási sémáinak beállításával kapott globálsugárzási adatok kapcsolatát számszerűsítettük.

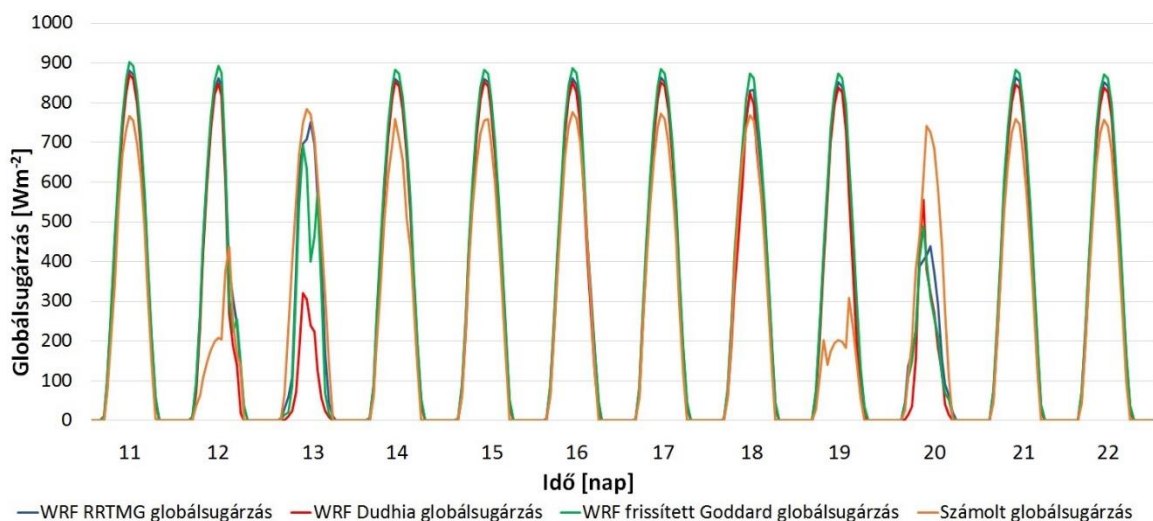
5.1.Érzékenységvizsgálat

A számolt globálsugárzást a szegedi szinoptikus állomás felhőzeti adataiból határoztuk meg a magyar és a német szabvány módszer átlagaként, így a WRF futtatásból is erre, a „szegedi rácspontra” írtam ki a globálsugárzást. Ekkor még mért adatok híján voltunk. A WRF futtatások közül az RRTMG séma használatával kaptuk a legjobb kapcsolatot. Itt a determinációs együttható 0,90-nek adódott (6. ábra). A három különböző parametizáció alkalmazásával kapott eredmények között azonban csekély eltérés mutatkozott: a kapott determinációs együtthatók (R^2) 0,90 és 0,87 között alakulnak. Jól látszik a felhőzet, s így a globálsugárzás alul- és felülbecsléséből származó hiba is.



6. ábra: A felhőzeti adatokat felhasználó magyar és német szabványmodell átlagaként számolt órás globálsugárzás és a WRF modell három rövidhullámú sugárzási parametizációjával kapott órás globálsugárzás adatok összehasonlítása Szegedre 2017 augusztusára.

A 7. ábrán a szabványmódszer alapján és a WRF modellből számított globálsugárzás napi meneteit ábrázoltuk 2017. augusztus 11–22 között. Úgy választottuk az időszakot, hogy legyen benne teljesen derült és felhős nap is. Jól látható a WRF és az általunk alkalmazott szabványmodell közötti „összhang” és „ellentmondás” is. A viszonylag jó egyezés mellett is szembevetendő, hogy a WRF által szolgáltatott globálsugárzás adatok magasabbak a referenciaként vett globálsugárzásnál, különösen kis felhőzetrel rendelkező napokon (augusztus 11, 14–18, 21, 22). Más esetekben (felhős napokon), például augusztus 12-én és 19-én, a WRF modelleredmények olyan haranggörbét írnak le, mint a felhőmentes, vagy gyengén felhős esetekkor, pedig az ekkor megfigyelt felhőzet 7–8 okta körül alakult. Mindez jól látszódik a felhőzet alapján számolt globálsugárzás menetében is. Ezeken a napokon a modell „rosszul teljesített”. Pontatlanul írta le a helyi felhőképződést. Továbbá, ha megnézzük augusztus 13-át és 20-át, arra láthatunk példát, hogy a megfigyelt felhőzet, ebből fakadóan a belőle számolt globálsugárzás magasabb értékeket produkál, mint a WRF modellből kapott. Különösen augusztus 13-án figyelhető meg érdekes ellentmondás magán a WRF-en belül is: a különböző sugárzási parametrizációk egymástól lényegesen eltérő eredményeket adtak. Az eltérések fizikai hátterének magyarázata, hogy i) tiszta égbolt esetben az algoritmusok (sémák) máshogy kezelik a gázoknál az abszorpciót, emissziót és a sugárzás gyengülését, ii) különbségek vannak a kezdeti nyomgázok koncentrációjában, iii) különbségek vannak a felhőzet kezelésében is.

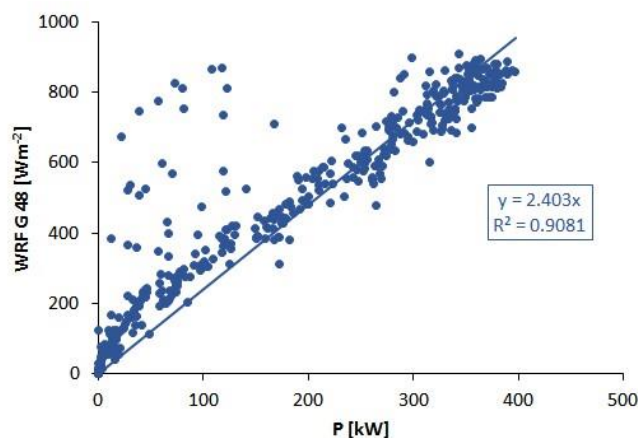


7. ábra: A felhőzeti adatokat felhasználó szabványmodellel számolt órás globálsugárzás és a WRF három vizsgált rövidhullámú sugárzási parametrizációjával kapott órás globálsugárzás adatok napi meneteinek összehasonlítása (Szeged, 2017. augusztus 11–22.).

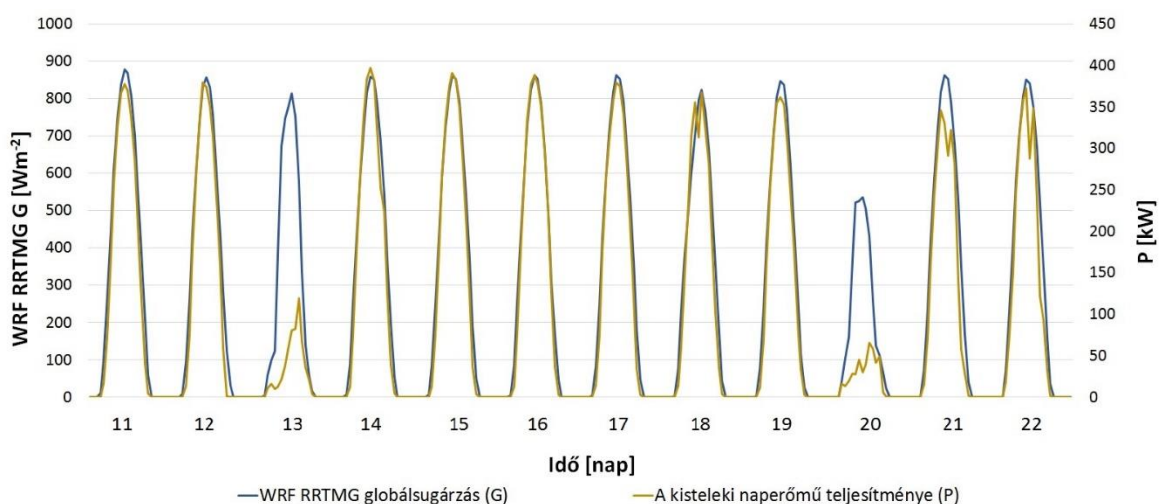
Ahogy korábban is említettük, a fenti összehasonlítások alapján választottuk ki a további vizsgálatokhoz a három parametrizációs módszer közül a WRF RRTMG rövidhullámú sugárzás parametrizációs sémáját. Az így számolt órás kisteleki rácsponti WRF globálsugárzás adatokat vetettük össze az ottani 500 kW névleges összteljesítménnyel rendelkező naperómű termelési adataival.

A termelési adatok korábban nyíltan elérhetőek voltak a fenntartó projekt cég honlapján [3 – *solargate.hu*], azonban mára már hozzáférést kell igényelni. Az eredményeket a 8. ábrán szemléltetjük. A determinációs együttható 0,91-nek adódott, ami kiváló egyezésre utal. Fellelhető azonban több olyan adatpont-pár, ahol magas globálsugárzás értékekhez alacsony termelési értékek párosulnak. Itt vehető észre, hogy a WRF gyakran túlbecsli a globálsugárzást, így a valóságosnál nagyobb termelési adatokat valószínűsít (ponthalmaz a regressziós görbe felett). A globálsugárzás előrejelzése a nagy skálájú folyamatok mellett a lokális hatásoktól is függ, ami megnehezíti a modellezést. Ennek tükrében kell értékelni a 0,91-es R^2 értéket. Látszik továbbá az is, hogy kis termelési adatok (kis besugárzás) esetén jobban növekszik az energiatermelés, mint nagy besugárzások esetén. Az optimális regressziós görbék, intervallumok kialakítása a későbbi kutatások feladata – megfelelő igény esetén.

Következő lépésként a kisteleki naperómű termelési adatait és a WRF modellből számított globálsugárzás napi meneteit ábrázoltuk a 9. ábrán 2017. augusztus 11. és 22. között. Ha figyelmesen megnézzük az ábrát, számottevő eltérést látunk a görbék menetében augusztus 13-án és 20-án. Ekkor a naperómű termelése alacsony volt. A WRF modell viszont kis felhőzetet (1–3 okta) és így nagy globálsugárzást adott különösen augusztus 13-án. Mindezt, valószínűsíthetően egy konvektív kis skálájú légköri képződmény okozhatta, amit a WRF modell „nem fogott meg” pontosan.

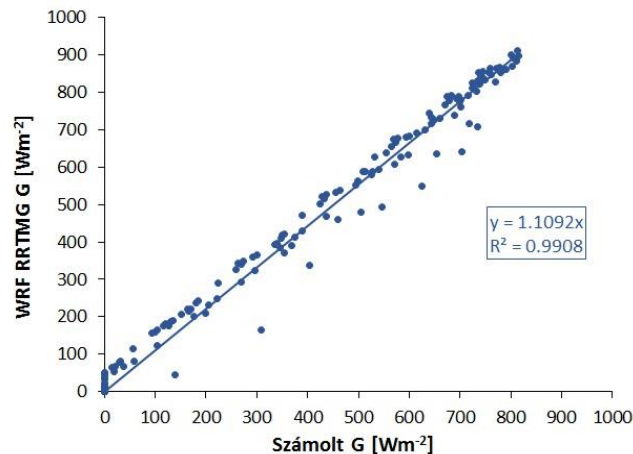


8. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak és a WRF modellből az RRTMG séma beállításával nyert kisteleki globálsugárzás (G 48 – 48 órás eredmény, vagyis a második napra kapott előrejelzések) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.



9. ábra: A kisteleki naperőmű órás teljesítményének és a WRF modellből az RRTMG séma beállításával kinyert kisteleki globálsugárzás adatok összehasonlítása a 2017. 08. 11–22. közötti időszakra, órás felbontásban.

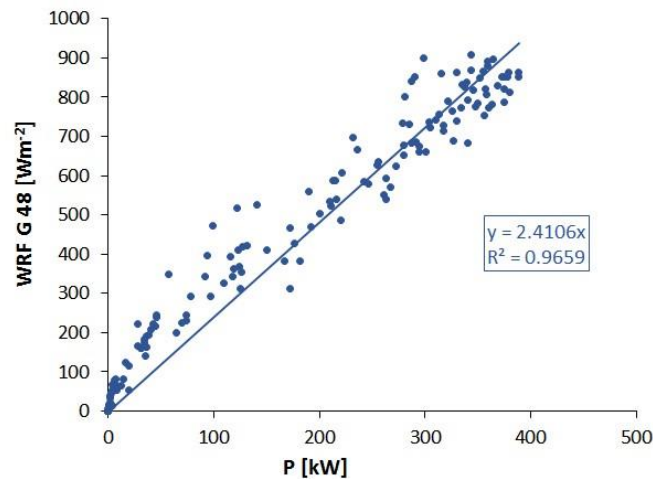
Kutatásunk során az a kérdés is felmerült, hogy vajon milyen a kapcsolat az előrejelzett globálsugárzás és a naperőmű termelési adatai között, ha csak tiszta égbolt, angol szakkifejezéssel élve „clear-sky” esetekben vizsgálódunk (itt a szegedi mérésekre hagyatkozhatunk). Ennek okán kiválogattuk az órás adatsorunkból azokat az órákat, amikor nem volt felhő a szegedi szinoptikus állomás térségében (0 okta a SYNOP táviratban). Ezekre az órákra kiszámítottuk a szabványmódszerrel a globálsugárzást Szegedre, illetve kiírtattuk a WRF RRTMG rövidhullámú sugárzási parametrizációs séma alapján kapott globálsugárzás adatokat is. (10. ábra), továbbá érdekességképpen ezekben az órákban megnéztük a kisteleki teljesítményadatokat és a Kistelekre kapott WRF modell RRTMG sémájával számított globálsugárzás adatok közötti kapcsolatot is (11. ábra).



10. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a szegedi szinoptikus állomás felhőzeti adatai alapján számolt globálisugrás és a WRF modellből az RRTMG séma beállításával kinyert globálisugrás összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

A szegedi összehasonlítások kiemelkedően jó eredménnyel szolgáltak (10. ábra), habár néhány adatpont-pár esetén a regressziós egyenes alatt megfigyelhető a WRF-ből származó globálisugrás alulbecslése a szabványmódszerrel számolt globálisugráshoz képest. Ez a helyi hatások következménye: a modell akkor is felhőképződést adott (pl. 1–1 órával hamarabb), amikor a valóságban még nem volt. Az alulbecslések maximális értéke kb. 100 W m^{-2} . Ezek azok az esetek, amikor az általunk fejlesztett modellel (a megfigyelt felhőzeti adatok alapján) számolt globálisugrás magasabb értékeket produkál a WRF globálisugrásánál, tehát amikor a WRF nem „fogta meg” a megfigyelt felhőzetet. Ez természetesen nem is várható el mindig a modelltől (lokális hatások).

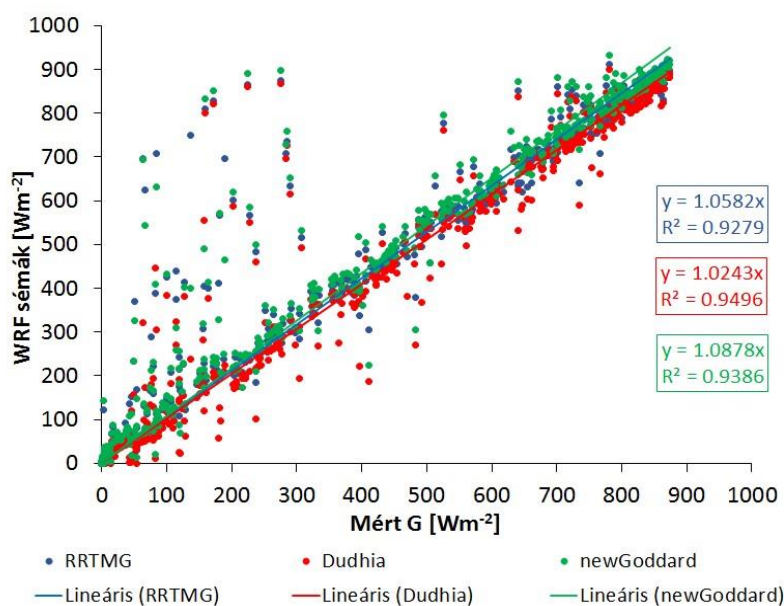
A 11. ábra alapján a WRF több alkalommal – elsősorban kis előrejelzett globálisugrás esetén – nagyobb termelési értékeket valószínűsít, mint azt az erőmű adatsora indokolná lineáris görbeillesztéssel. Ez ismét aláhúzza a besugárzási intervallumok szerinti regressziós görbék alkalmazását gyakorlati alkalmazás esetén. Természetesen a lokális hatások, mint a felhőképződés, és a Szeged-Kistelek távolság szintén szerepet játszik a modellezett globálisugrás és a termelési adatok közötti eltérésekben (alul- és felül becslések). Az adatok kiválogatása a szegedi szinoptikus állomáson észlelt derült esetekre történt, viszont a termelési adatok és a WRF előrejelzett globálisugrása Kistelekre vonatkozik. Itt csupán arra voltunk kíváncsiak milyen a kapcsolat nem teljesen azonos földrajzi helyek esetén. A 0,96-os R^2 érték önmagában is figyelemre méltó.



11. ábra: Tiszta égbolt (szegedi SYNOP észlelések) esetén a kisteleki naperőmű óras teljesítményadatainak és a WRF modellből az RRTMG séma beállításával kapott kisteleki globálsugárzás összehasonlítása óras időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

A következő ábrán (12. ábra) a megismételt érzékenységi vizsgálat eredménye látható az Országos Meteorológiai Szolgálattól kapott mért globálsugárzást referenciának véve. Ezt a fenti eredmények után tudtuk csak elvégezni, ugyanis a mért globálsugárzás adatok csak később kerültek birtokunkba. Mint az ábráról is leolvasható, ez a vizsgálat más parametризációt adott jobbnak (Dudhia), mint az alapbeállítás (RRTMG). Ez bizonyítja, hogy az érzékenységi vizsgálatot is érdemes hosszabb időtávra elvégezni, nem csak egy hónapra. Fontos továbbá, hogy a különböző parametризációk között itt is kicsi a különbség: a kapott determinációs együtthatók (R^2) az RRTMG séma esetén 0,93, a Dudhia séma esetén 0,95 és a frissített Goddard séma esetén 0,94. A WRF modell felülbecslése itt egyértelműbb, mint az 1. ábrán: szembetűnően kevesebb adatpont pár helyezkedik el a trendvonal alatt.

A fél éves 48 órás futtatásokat az első, azaz a szabványmódszert használó érzékenységvizsgálat alapján kiválasztott sémával készítettük el (*nem állt rendelkezésre sugárzásmérés*). Így, a továbbiakban az RRTMG sémával kapott globálsugárzást tekintjük a WRF globálsugárzásának.



12. ábra: A szegedi mérőállomásról (12982) származó globálsugárzás adatok és a WRF modell három vizsgált rövidhullámú sugárzási parametizációjával kapott órás globálsugárzás adatok összehasonlítása 2017 augusztusára.

5.2. Vizsgálat féléves időtartamra (2017. március-augusztus)

Ebben a fejezetben a WRF modell hosszabb időtávon történő futtatásának eredményeit értékeljük ki. Mint ahogy azt a korábbi fejezetekben is említettük, a szimulációk során a rövidhullámú sugárzás parametizálására az RRTMG sémát használtuk és 48 órás előrejelzéseket készítettünk, órás felbontásban. Ez is a teljes Kárpát-medencére készült. A szükséges eredményeket kiirattuk Szegedre és Kistelekre.

Először a Szegedre vonatkozó eredményeket mutatjuk be. A 13. ábrán a szegedi mérőállomásról (12982) származó globálsugárzás adatok és a WRF modelltől kinyert globálsugárzás kapcsolatát számszerűsítjük. Itt is egyértelműen észrevehető a WRF modell felülbecslése: nagyobb értékeket valószínűsít, mint amennyi a mérés szerint ténylegesen volt. A mért és a modellezett adatok abszolút eltérések szórása $126,2 \text{ W m}^{-2}$ (3. táblázat). Megkerestük az abszolút eltérések maximumát is, tehát az előforduló legnagyobb abszolút hibát. Ennek értéke $833,8 \text{ W m}^{-2}$ -nek adódott. Az átlagos hiba a mért globálsugárzás és a WRF modell 48 órás globálsugárzása között $95,2 \text{ W m}^{-2}$ volt. Ami a trendvonal alatti adatpont párokat illeti (itt a WRF globálsugárzása alulmaradt a ténylegesen mért globálsugárzás mellett) a helyi hatások következménye lehet: a modell akkor is

felhőképződést adott, amikor a valóságban még nem volt. Ezek azok az esetek, amikor a mért globálisugárzás magasabb értékeket mutat a WRF globálisugárzásánál, tehát amikor a WRF nem „fogta meg” a megfigyelt felhőzetet. Azonban a 0,88-as R^2 érték biztató egyezést mutat.

A fenti számításokban alkalmazott abszolút hiba, az abszolút hiba maximuma (max norma), az abszolút hiba szórása, és az átlagos hiba képlete rendre:

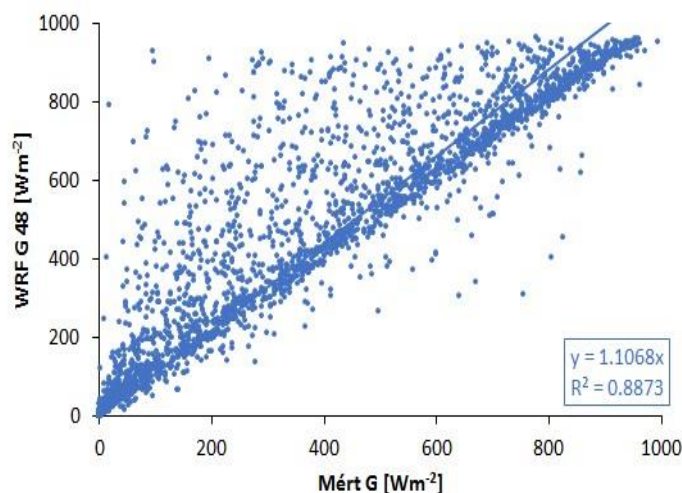
Abszolút hiba:
$$X_i = |G_{Fi} - G_{Mi}|. \quad (21)$$

Abszolút hiba maximuma:
$$\text{MAX}(X_i). \quad (22)$$

Abszolút hiba szórása:
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}{(n-1)}}. \quad (23)$$

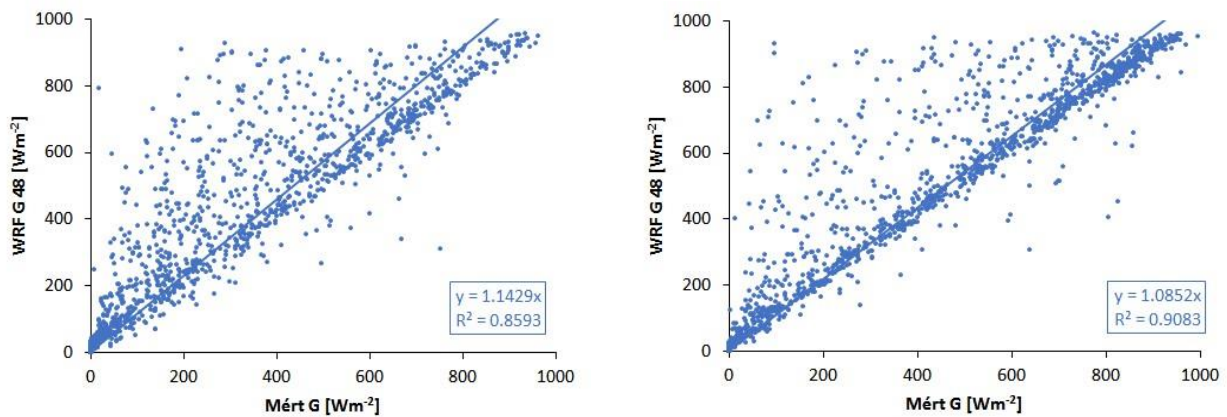
Átlagos hiba:
$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (24)$$

ahol G_F az előrejelzett globálisugárzás W m^{-2} -ben, G_M pedig a mért globálisugárzás szintén W m^{-2} -ben, n a mintadarabszám (az órák adatainak darabszáma, amivel dolgozunk).

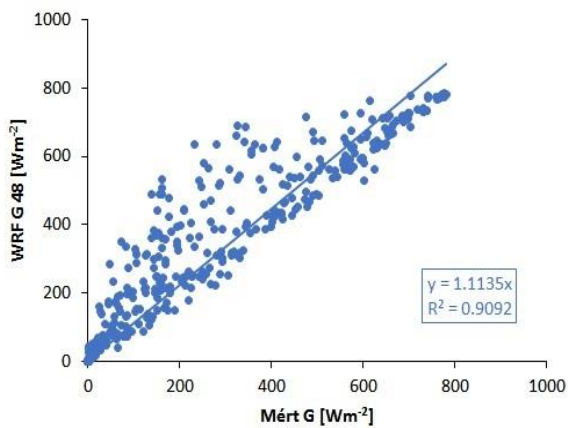


13. ábra: A szegedi mérőállomásról (12982) származó globálisugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálisugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén (2017. március-augusztus, lineáris illesztéssel).

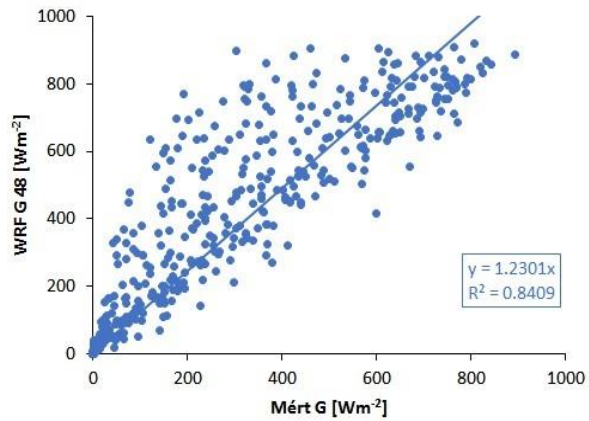
Következő lépésként a vizsgált fél évet szétbontottuk kisebb intervallumokra. 2017 tavasza látható a *14. ábra* bal oldalán, nyara pedig a jobb oldalán. Ha megnézzük a *14. ábrát*, látható, hogy a tavaszi időszak nagyobb bizonytalanságot hordoz, mint a nyári. Ekkor a determinációs együttható (R^2) 0,86-nak adódott, míg a nyári 0,90-nek. De még így is túl nagy a trendvonal feletti pontok szóródása. Nézzük az eredményeket havi bontásban (*15. ábra*)!



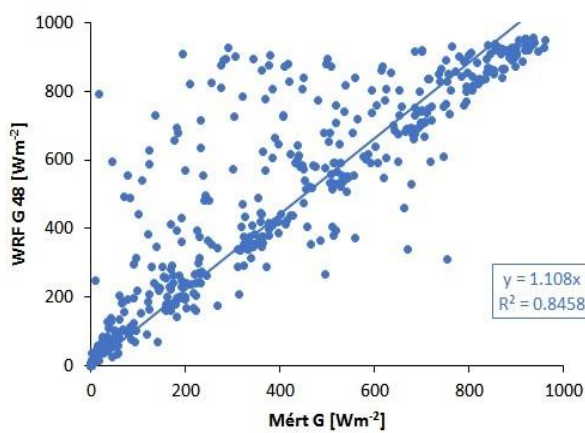
14. ábra: A szegedi (12982) mérőállomásról származó globálsugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálsugárzás (48 órás futtatás) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 tavaszára (balra) és nyarára (jobbra), lineáris illesztéssel.



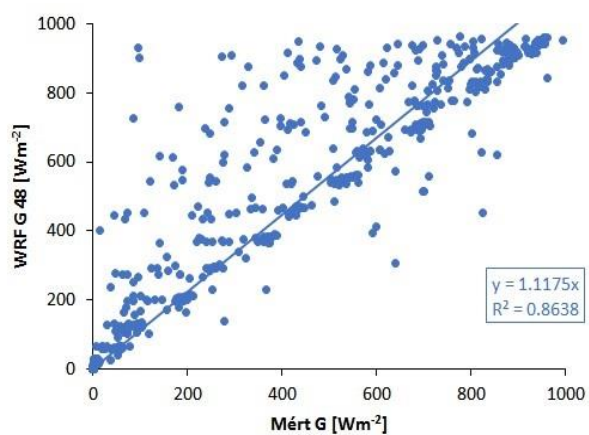
március



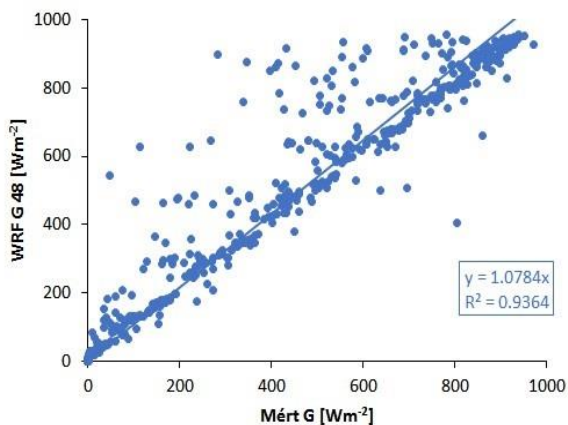
április



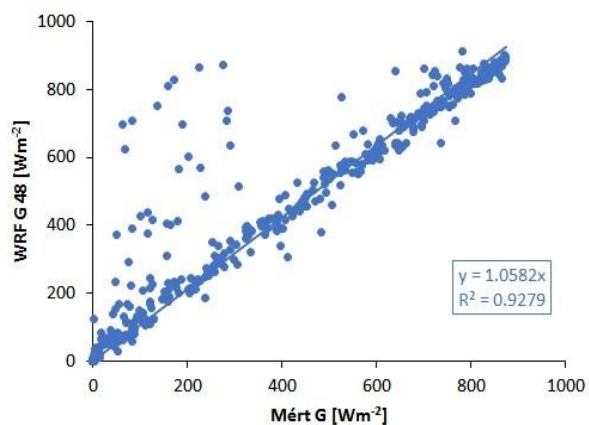
május



június



július



augusztus

15. ábra: A szegedi mérőállomásról származó globálsugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálsugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017. március-augusztus (balról jobbra, fentről le), lineáris illesztéssel.

Ha megnézzük a 15. ábrát, láthatjuk, hogy a legkisebb R^2 értékkel a hat hónap közül április (0,84), május (0,85) és június (0,86) rendelkezik. Emellett ebben a három hónapban a legnagyobb az abszolút hibák szórása is (3. táblázat). A legkisebb szórással és a legnagyobb determinációs együtthatóval (R^2) március rendelkezik, azonban a júliusra ($R^2 = 0,94$) és az augusztusra ($R^2 = 0,93$) kapott értékek is alig maradnak el mögötte. Ennek magyarázata lehet, hogy a hat hónapból április, május és június (de főleg április) nagy változékonysággal rendelkezett (gyakori frontátvonulások). Itt is látni a WRF modellre jellemző felülbecslését a globálsugárzásban.

3. táblázat: A mért óras globálsugárzás és a WRF modell 48 órás futtatásaiból kinyert óras globálsugárzás abszolút eltéréseinek szórása, maximuma, illetve az átlagos hiba Szegedre különböző időintervallumokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve.

	Szórás [W m^{-2}]	Max norma [W m^{-2}]	Átlagos hiba [W m^{-2}]
Félév	126,2	833,8	95,2
Március	92,9	403,1	81,1
Április	135,4	595,4	141,6
Május	146,1	714,2	110,7
Június	140,5	833,8	111,2
Július	100,8	614,9	70,7
Augusztus	107,6	657,6	58,3

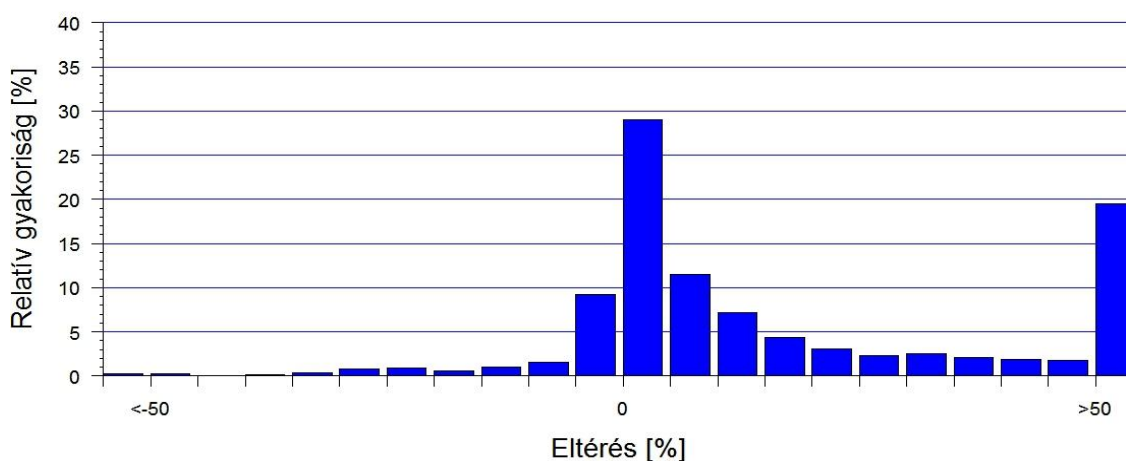
A fentebb leírtak mellett részletesen vizsgáltuk a relatív hiba (RE) gyakoriságát is, kiemelve áprilist, júniust és augusztust Tóth *et al.* (2017) munkája alapján. Ezzel próbáljuk kimutatni az előrejelzés jóságát. RE értéket a következőképpen kell kiszámolni:

$$RE = \frac{G_{Fi} - G_{Mi}}{G_{Mi}} 100, \quad (25)$$

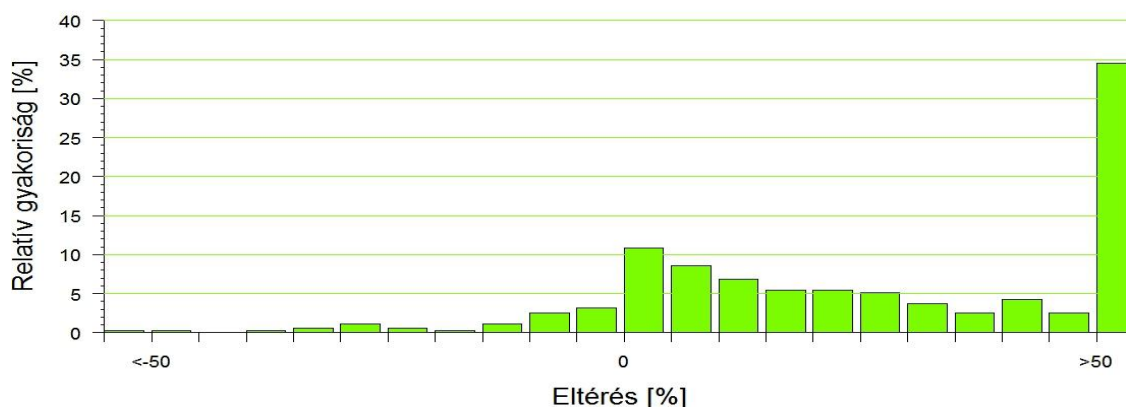
ahol RE a relatív hiba (%), G_F az előrejelzett globálsugárzás W m^{-2} -ben, G_M pedig a mért globálsugárzás szintén W m^{-2} -ben. Ennek számítása során leválogattuk az 50 W m^{-2} -nél nagyobb mért globálsugárzással rendelkező adatokat. Így kiszűrtük a túl kicsi értékeket Tóth *et al.* (2017) gondolatmenetét követve. Megnéztük a relatív hibák szerkezetét abban az esetben is, ha csak a 100 W m^{-2} feletti mért adatokat vesszük figyelembe. A görbék jellege hasonló volt, de pl. márciusban jelentősen csökkent az esetszám. A napenergia hasznosítás számára ez már túl magas kritérium, így maradtunk az eredeti elgondolásnál, és az 50 W m^{-2} kritikus mért érték feletti esetekben elemeztük a relatív hibát.

A relatív hibák gyakoriságát hisztogramokon ábrázoltuk (16–19. ábra). Ezek x -tengelye 5%-os intervallumokkal lett ellátva, illetve a két szélső oszlop az 50% alatti, valamint feletti relatív hibát reprezentálja. A 16. ábrán a féléves időtartamra készített hisztogram látható. Az értékek az esetek 29%-ában estek a 0–5%-os relatív hiba intervallumba. Viszont, ha a 15%-nál kisebb eltérések gyakoriságára vagyunk kíváncsiak, az az esetek 59,7%-nál lesz. Erről az ábráról, és a többi hisztogramról is, egyértelműen leolvasható a WRF jellemző felülbecslése (az x -tengely pozitív oldala). A teljes vizsgált félévben azoknak az eseteknek a relatív gyakorisága, amelyeknek a relatív hibája 50% felett van mindössze 19,5%. A havi bontású hisztogramokból kitűnik, hogy április hónapban (17. ábra) legnagyobb ez a hiba (34,5%), míg augusztusban (19. ábra) a legkisebb (10%). Továbbá az is feltűnő, hogy míg áprilisban a legkisebb az előrejelzés beválási esélye, addig augusztusban a legnagyobb. Ez abból látszik, hogy áprilisban 0–5%-os relatív hibával (x -tengelyen) az esetek 10,8%-a (y -tengelyen), illetve $\pm 15\%$ -os relatív hibával (x -tengelyen) az esetek 33%-a (y -tengelyen) rendelkezik, míg augusztusban ugyanezek rendre 39,3% és 76,3%. Ha júniust nézzük (18. ábra), látható, hogy ekkor a WRF modell jobban teljesített, mint áprilisban, de kevésbé volt pontos, mint augusztusban. Augusztust kevésbé változékony időjárás jellemezte, mint júniust, amikor gyakrabban fordultak elő frontátvonulások, zivataros, csapadékos időszakok.

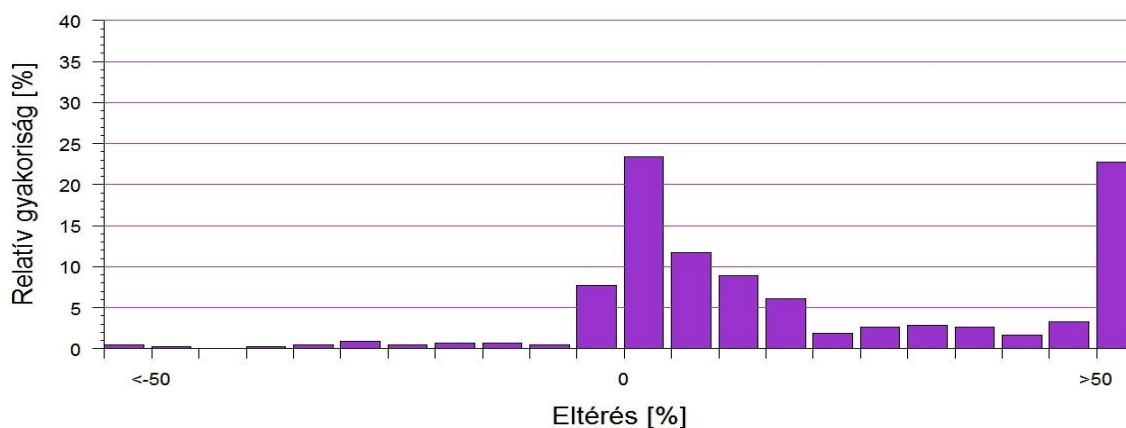
Megvizsgáltuk a relatív hibák szórását is az órás adatsorra. Áprilisra és augusztusra kaptuk a legnagyobb értéket (4. táblázat).



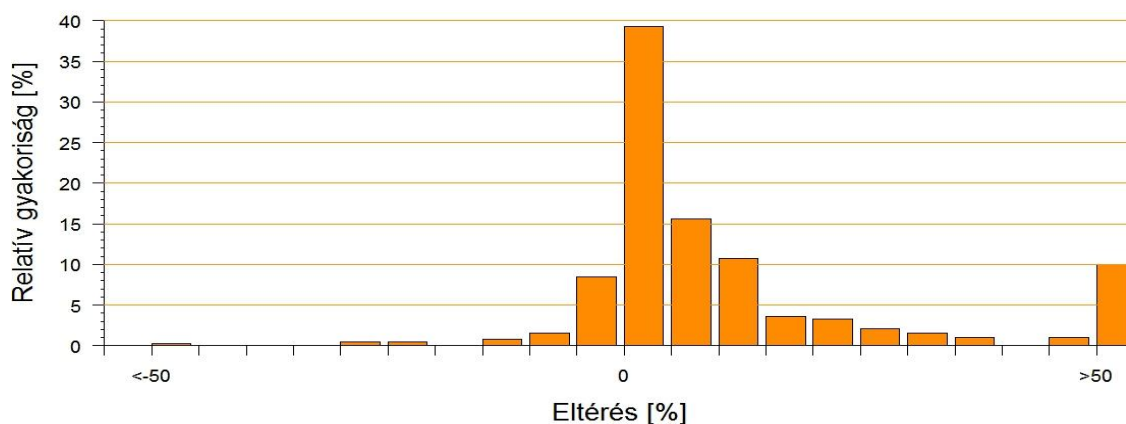
16. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálsugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (Fél éves időtartamra, modelleredmény a 48 órás futtatásból, Szeged).



17. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálisugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. április, modelleredmény a 48 órás futtatásból, Szeged)



18. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálisugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. június, modelleredmény a 48 órás futtatásból, Szeged)

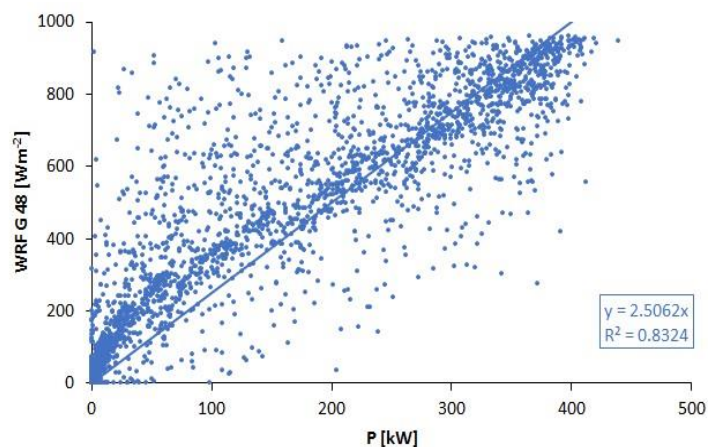


19. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálisugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. augusztus, modelleredmény a 48 órás futtatásból, Szeged)

4. táblázat: Relatív hiba (%) szórása (%) Szegedre (12982) 50 W m^{-2} feletti mért óras adatokra nézve.

	Óras adatok
Félév	82,1%
Március	63,7%
Április	90,0%
Május	85,4%
Június	93,6%
Július	43,8%
Augusztus	96,5%

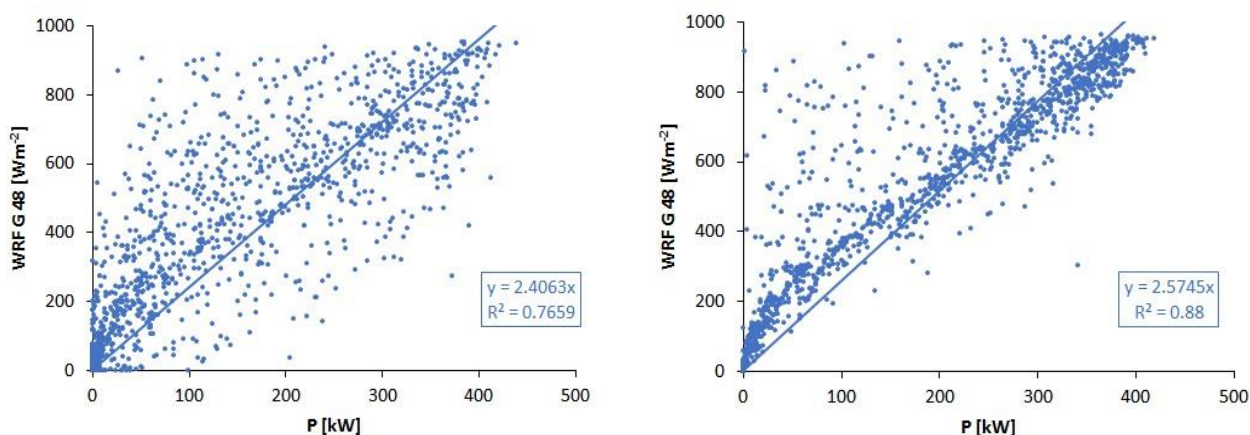
Az elemzésünk következő részében a Kistelekre kapott eredményekkel foglalkozunk. Itt is készítettünk pontdiagramokat (féléves időszakra, külön tavaszra és nyárra, illetve havi bontásban is).



20. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak (P, kW) és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás (48 óras eredmény) összehasonlítása óras időlépcső esetén 2017 márciusától augusztusáig lineáris illesztéssel.

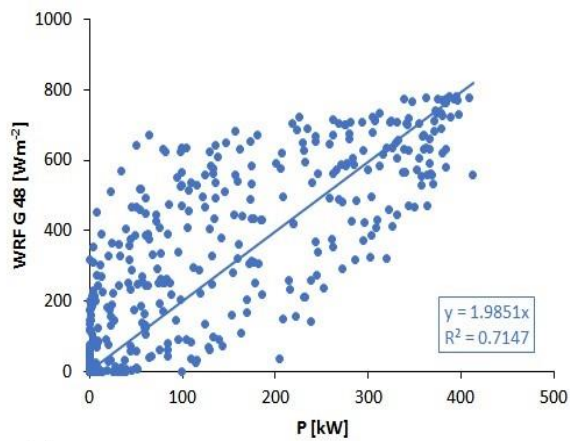
A 20. ábrán a kisteleki naperőmű termelési adatai és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás kapcsolatát számszerűsítettük. Észrevehető, hogy a WRF modell globálsugárzása sok esetben felülbecsül, akár csak a 8. ábrán. Tehát sokkal nagyobb sugárzási értékeket valószínűsít a modell, mint amennyit a mért teljesítményadatokból következtethetünk. Azonban szép számban fordul elő alábecslés is: a trendvonal alatti adatpont-párok esetében a WRF globálsugárzása alulmaradt, míg a termelési adatokra tekintve sokkal nagyobb besugárzás valószínűsíthető. Ez a helyi hatások következménye

lehet: a modell akkor is felhőképződést adott, amikor a valóságban még nem volt. Ezek azok az esetek, amikor a WRF nem „fogta meg” a megfigyelt felhőzetet. Sokban hasonlít a Szegedre levont következtetésekhez, az R^2 érték 0,83. A naperómű 100–200 kW alatti teljesítményadatai esetén (20. ábra) a pontthalmaz a trendvonal felett sűrűsödik, tehát a WRF modell magasabb globálsugárzás értékeket mutat, mint amit az adott termelési adatból valószínűsíteni lehet lineáris kapcsolat mellett.

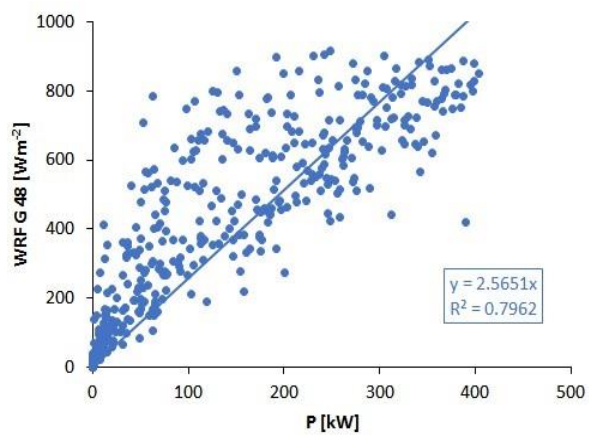


21. ábra: A kisteleki naperómű teljesítményadatainak és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 tavaszára (balra) és nyarára (jobbra), lineáris görbeillesztéssel.

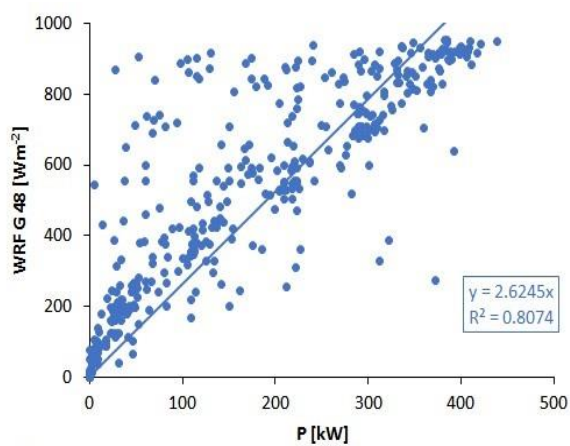
Itt is szétbontottuk a fél évet kisebb intervallumokra. 2017 tavasza látható a 21. ábra bal oldalán, nyara pedig a jobb oldalán. A tavaszi időszak itt is nagyobb bizonytalanságot hordoz, mint a nyári, hasonlóan a szegedi eredményekhez. A tavaszi determinációs együttható (R^2) 0,77-nek, a nyári 0,88-nak adódott. De még így is túl nagy a trendvonal feletti pontok szóródása. Következő lépésként itt is megnéztük az eredményeket havi bontásban (17. ábra). A legkisebb R^2 értékkel a március (0,71) és az április (0,80) rendelkezik. A legnagyobb determinációs együttható júliusra ($R^2 = 0,91$) és augusztusra ($R^2 = 0,91$) adódott. Továbbra is elmondható, hogy a tavaszi hónapok felelősek a féléves képen a nagy bizonytalanságért, az időjárás nagyobb változékonysága miatt. Itt is látni a WRF modellre jellemző felülbecslését a globálsugárzásban.



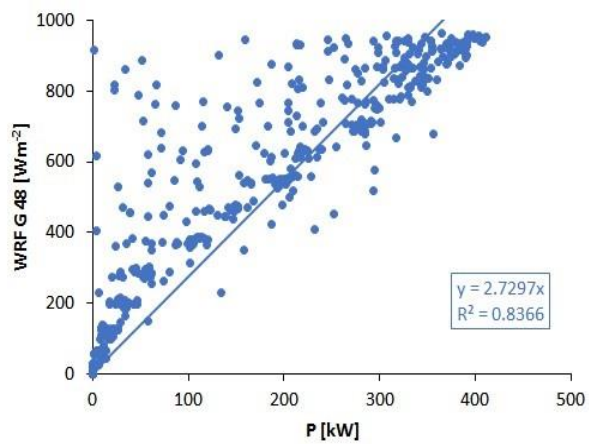
március



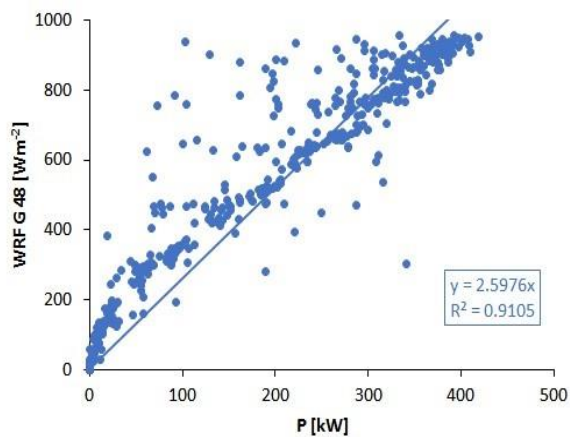
április



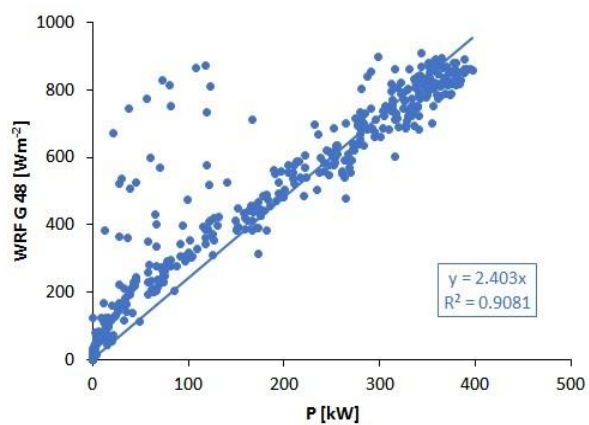
május



június



július



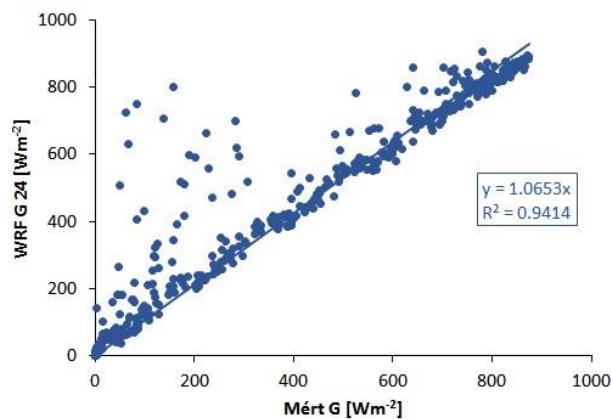
augusztus

22. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak és a WRF modelltől kinyert kisteleki globálsugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017. március-augusztus, lineáris illesztéssel (balról jobbra és fentről le, hónapok szerint).

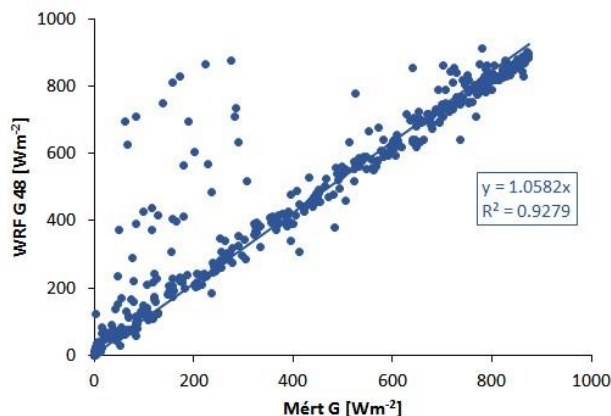
5.3. „Kvázi-ensemble”

Ebben a fejezetben arra a kérdésre kerestük a választ, vajon hogy viselkedik a modell hosszabb integrálási idő esetén. Így előállítottuk a 24 és 48 órás előrejelzések mellett a 72 órás eredményeket is. Ezt csak egy hónapra végeztük el, 2017 augusztusára. Az eredményeket továbbra is Szegedre és Kistelekre írtuk ki órás felbontásban.

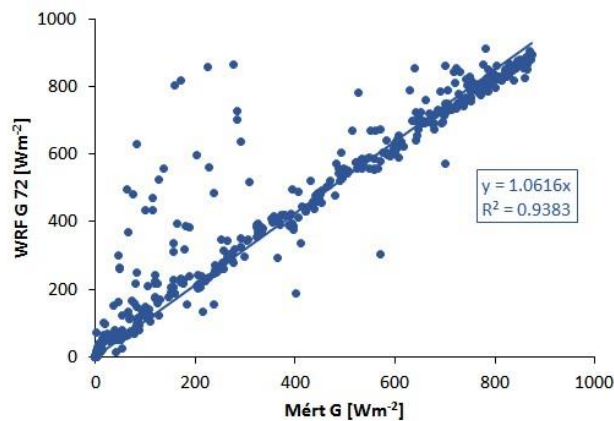
Itt is készítettünk pontdiagramokat, Szegeddel kezdve. Összehasonlítottuk a mért globálisugárzás adatokkal a 24 órás (23. ábra), a 48 órás (24. ábra) és a 72 órás (25. ábra) WRF futtatásból származó eredményeket. Ennek során a legjobb egyezést a 24 órás modelleredményekkel kaptuk, itt a determinációs együttható (R^2) 0,94-nek adódott. Ezzel megegyező eredményt kaptunk a 72 órás futtatásokra (harmadik napi eredmények), majd ezt követték a 48 órás előrejelzések ($R^2 = 0,93$). Ám ezek között a különbség csekély.



23. ábra: A szegedi mérőállomásról származó globálisugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálisugárzás (G 24 – 24 órás, aznapi eredmény) összehasonlítása 24 órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.



24. ábra: A szegedi mérőállomásról származó globálisugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálisugárzás (G 48 – 48 órás, második napi eredmény) összehasonlítása 24 órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.



25. ábra: A szegedi mérőállomásról származó globálsugárzás adatok és a WRF modellből kinyert szegedi globálsugárzás (G 72 – 72 órás, harmadik napi eredmény) összehasonlítása 72 órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

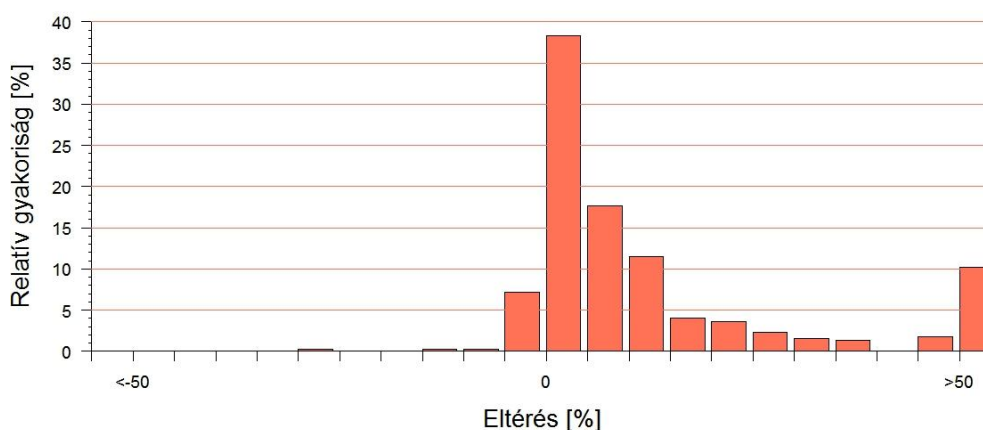
Továbbra is jellemző a WRF modell globálsugárzás felülbecslése a mért adatokhoz képest (pontok a trendvonal felett). Ha megnézzük a három ábrát egymás után, észrevehető, hogy az előrejelzési időtartam növelésével több adatpont-pár jelenik meg a trendvonal alatt. Itt a WRF, valószínűsíthetően a lokális, kis skálájú folyamatok végett, egyre kevésbé pontosan fogja meg a felhőzetet, egyre többször és egyre nagyobb intenzitással ad az indokoltnál alacsonyabb globálsugárzást. Ha megnézzük a 3. ábrát, a trendvonal alatti pontok egyre „mélyebbre ereszkednek” (egyre messzebb kerültek a trendvonalától).

Az abszolút eltérések szórásait az 5. táblázat tartalmazza. Megkerestük az abszolút eltérések maximumát (maximum normát) is, tehát az előforduló legnagyobb hibát. Itt a 24 órás futtatásnál adódott a legnagyobb abszolút eltérés. Ez is látható az 5. táblázaton az átlagos hibák értékei mellett. Elmondható, hogy az órás adatok abszolút hibáinak szórására a 48 órás futtatásoknál volt a legnagyobb érték. A 72 órás eredmény itt is meglepően jó lett, jobb, mint a 48 órás. Megnéztük az átlagos hibát is, ezek értéke rendre nő az előrejelzési idő függvényében, igaz csekély mértékben.

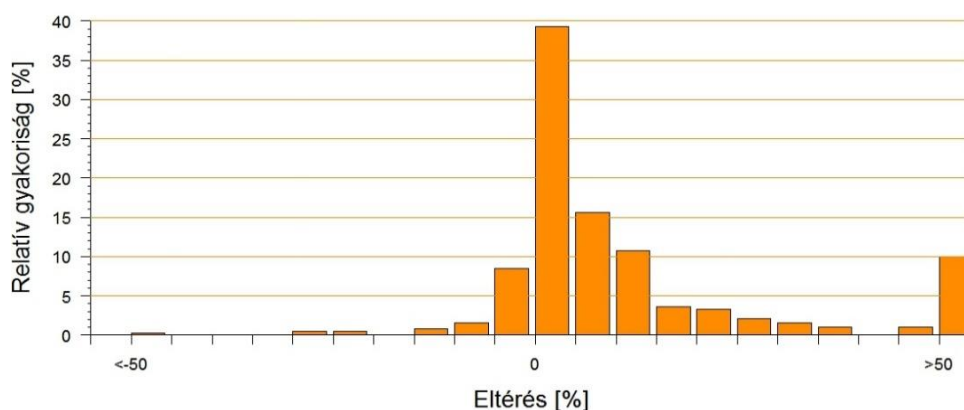
5. táblázat: A mért órás globálsugárzás és a WRF modell 24, 48 és 72 órás futtatásaiból (G 24, G 48, G 72) kinyert órás globálsugárzás abszolút eltéréseinek szórása, maximuma, illetve átlagos eltérése (W m^{-2}).

	Szórás [W m^{-2}]	Max norma [W m^{-2}]	Átlagos hiba [W m^{-2}]
G 24	94,5	666,8	56,6
G 48	107,6	657,6	58,3
G 72	97,4	648,0	59,1

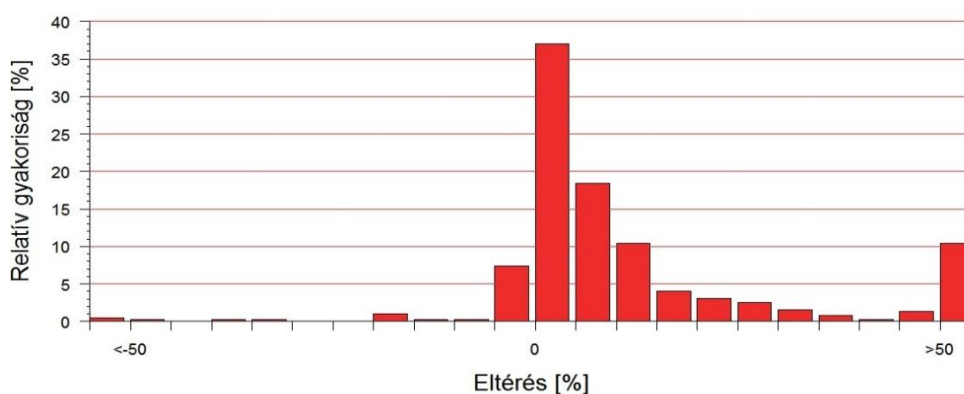
Itt is számoltunk relatív hibát. Kritériumként ismét az 50 W m^{-2} mért globálsugárzást választottuk. Eredményeinket (2017. augusztus) hisztogramokon ábrázoltuk (26–28. ábra). A beosztásokat és az elrendezést ugyanúgy oldottuk meg, mint a 16–19. ábrákon. Az értékek a 24, 48 és 72 órás eredményeket nézve rendre az esetek 38,5%, 39,3% és 36,7%-ában estek a 0–5%-os relatív hiba intervallumba. Viszont, ha a $\pm 15\%$ -on belüli relatív hibák esetszámát nézzük, akkor ezek már rendre 75%, 76,3% és 73,7%. A 72 órás futtatásból származó eredmény teljesített a leggyengébben, azonban nagyon csekély mértékkel ($\sim 3\%$) maradt el a többitől. Itt is jól látszik a WRF modell felülbecslése (x-tengely pozitív oldala). Az 50% feletti relatív hibával rendelkező esetek relatív gyakorisága rendre 10,2%, 10% és 10,5%. Ezek is nagyon közeli értékeknek bizonyulnak.



26. ábra: A relatív hiba (%) gyakorisága (%) az órás globálsugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. augusztus, modelleredmény a 24 órás futtatásból, Szeged)



27. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálsugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. augusztus, modelleredmény a 48 órás futtatásból, Szeged)



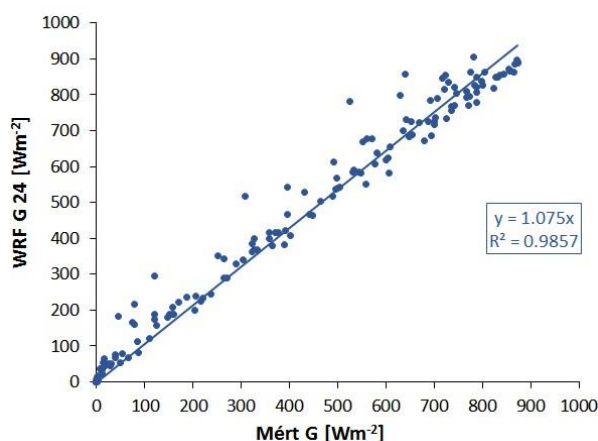
28. ábra: A relatív hiba gyakorisága az órás globálsugárzás adatokra, 50 W m^{-2} feletti mért értékeket tekintve. (2017. augusztus, modelleredmény a 72 órás futtatásból, Szeged)

Itt is megnéztük a relatív hibák szórását (6. táblázat) az órás adatsorra. A táblázatról leolvasható, hogy a 48 órás futtatásból származó és a mért globálsugárzás adatok között számolt relatív hibák szórása a legnagyobb. Ez nem meglepő, hiszen, ha megnézzük a hisztogramokat, látható, hogy a 48 órás futtatási eredményeket használva (27. ábra) nagyobb gyakorisággal estek a relatív hibák a 0–5%-os intervallumba, mint a 24, illetve a 72 órás futtatási eredményeket alkalmazva. Az 50%-ot meghaladó relatív hibák gyakorisága azonban szinte ugyanakkora.

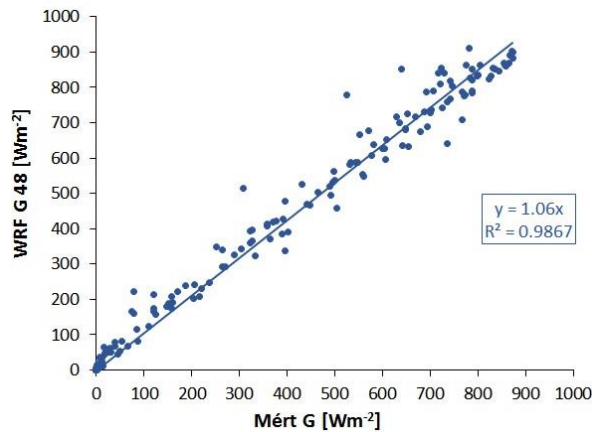
6. táblázat: A 2017 augusztusi relatív hibák szórása Szegedre (12982) a mért adatokból és a WRF modell 24, 48 és 72 órás futtatásaiból.

	Órás adatok
G 24	93,9%
G 48	96,5%
G 72	79,4%

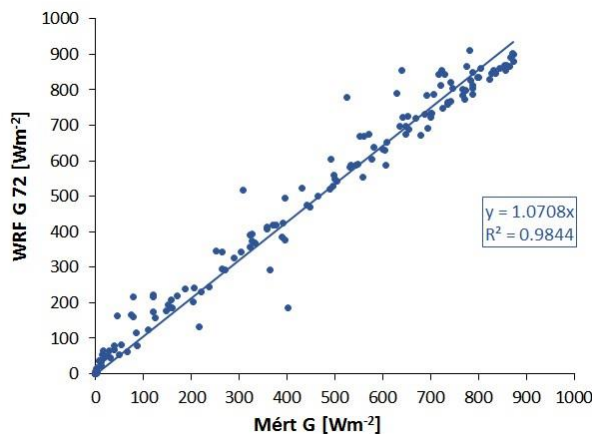
Felhőmentes esetre is összehasonlítjuk a mért globálsugárzást a 24, a 48 és a 72 órás futtatási eredményekkel (29–31. ábra). Elsőként kiválogattuk az órás adatsorunkból azokat az eseteket, amikor a szegedi szinoptikus állomás felhőzete 0 okta volt. A három ábra csekély eltérést mutat, tehát leszűrhető, hogy felhőmentes esetekre a modell akár 72 órára is bátran alkalmazható. Bár a 72 órás eredményeket használva (31. ábra) a WRF alulbecslése már erősebben megmutatkozik. Ez természetes, hiszen a mért felhőmentes órákat kell „eltalálnia” a modellnek. A determinációs együttható 0,98 körül alakult mind a három esetben.



29. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a szegedi mérőállomásról származó globálsugárzás adatok és a WRF modell szegedi globálsugárzásának (24 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

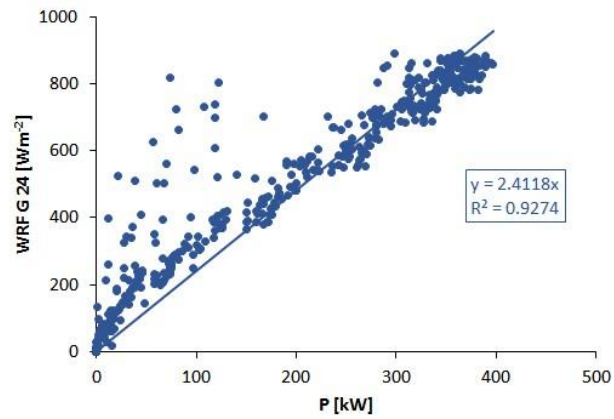


30. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a szegedi mérőállomásról származó globálisugárzás adatok és a WRF modell szegedi globálisugárzásának (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

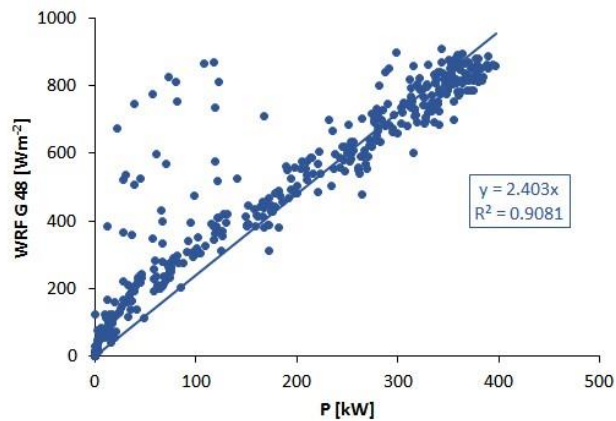


31. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a szegedi mérőállomásról származó globálisugárzás adatok és a WRF modell szegedi globálisugárzásának (72 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

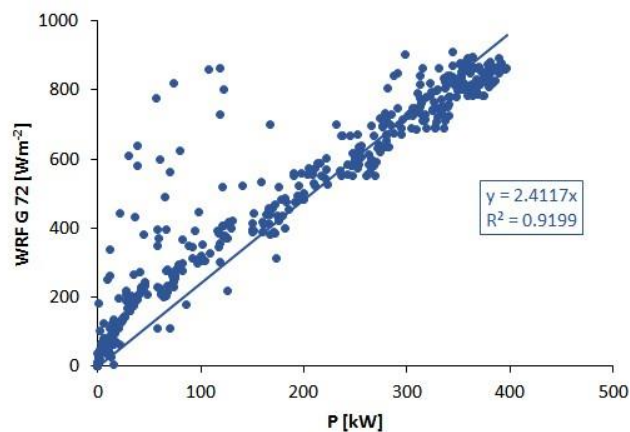
Kistelekre is elkészítettük az pontdiagramokat, amelyeken összehasonlítottuk a 24, 48 és 72 órás futtatásokból kapott kisteleki globálisugárzást és a kisteleki naperőmű termelési adatait (32–34. ábra). Itt a 48 és a 72 órás előrejelzések (a második és harmadik napra vonatkozó előrejelzések) nagyon hasonló képet mutatnak (33. és 34. ábra). A determinációs együtthatók (R^2), mivel augusztusról van szó, magas értékeket és nagyon jó egyezést mutatnak. A 24 órás futtatás során 0,93, míg a 48 és a 72 órás esetében 0,90 és 0,92 értékeket kaptunk.



32. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás (24 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

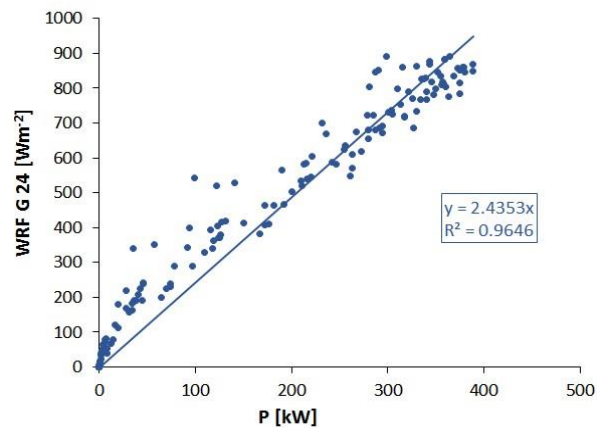


33. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel. (Ugyanaz, mint a 3. ábra.)

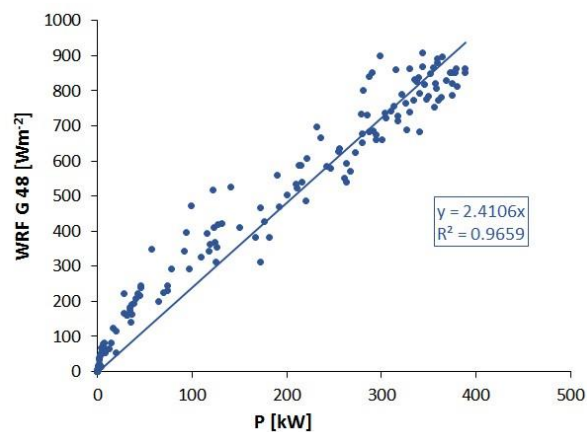


34. ábra: A kisteleki naperőmű teljesítményadatainak és a WRF modellből kinyert kisteleki globálsugárzás (72 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

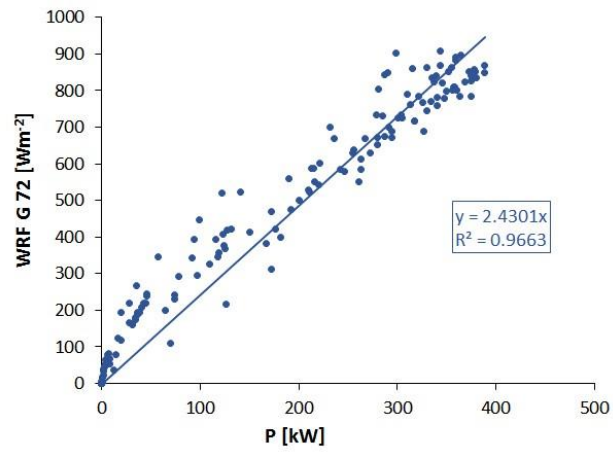
Ezek után, úgy ahogy azt a 11. ábra esetében is tettük, leválogattuk a szegedi derült órák (0 okta felhőzet) alapján a kisteleki teljesítmény adatokat és az ugyanide kapott WRF modell 24, 48 és 72 órás előrejelzéséből származó globálsugárzás adatokat (35–37. ábra). Természetesen számolni kell a földrajzi elhelyezkedésből adódó hibával, így az eredmények csak tájékoztató jellegűek. „Jó hír”, hogy a determinációs együtthatók mindhárom esetben 0,96 körül alakultak.



35. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a kisteleki naperőmű óras teljesítményadatainak és a WRF modellből kapott kisteleki globálsugárzás (24 órás eredmény) összehasonlítása óras időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.



36. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a kisteleki naperőmű óras teljesítményadatainak és a WRF modellből kapott kisteleki globálsugárzás (48 órás eredmény) összehasonlítása óras időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel. (Ugyanaz, mint a 11. ábra.)



37. ábra: Tiszta égbolt esetén („clear sky”) a kisteleki naperőmű órás teljesítményadatainak és a WRF modellből kapott kisteleki globálsugárzás (72 órás eredmény) összehasonlítása órás időlépcső esetén 2017 augusztusára, lineáris illesztéssel.

6. Összegzés

Diplomamunkámban a napenergia hasznosításával foglalkoztam. Azt vizsgáltam, hogy a meteorológiai előrejelzések (globálsugárzás) hogy alkalmazhatók a naperóművek termelési előrejelzéseiben, ami jellemzően meteorológus feladat. Elsőként a napenergia hasznosítás hazai kérdéseivel (napelemek, napkollektorok, naperómű fejlesztések, beruházások) foglalkoztam. Ezt követően az alkalmazott meteorológiai előrejelzési modellel (WRF) ismertettem meg az olvasót. Részletesen elemeztem a modell rövidhullámú sugárzási parametrizációs sémáit, rámutattam azok különbségeire. Ezt követte a magyar és a német globálsugárzás számító környezeti szabványmódszerek bemutatása. A korábbi kutatásaimban már használt eljárás az év adott órájában adott helyen a felhőzet ismeretében számítja a globálsugárzást. Itt is az Excel környezetben megírt Basic nyelvű makrót használtam. A 2017. március-augusztus közötti időszakot vizsgáltam. Rendelkezésre álltak a szegedi meteorológiai állomás (12982) SYNOP táviratai és az ott végzett globálsugárzás mérés órás adatai. Szintén letöltöttük a közeli (27 km) kisteleki naperómű termelési adatait.

Elemeztük a WRF modell három leggyakrabban használt rövidhullámú sugárzási parametrizációját (*Dudhia, 1989; Iacono et al., 2008, Chou and Suarez, 1999*), s kiválasztottuk a szegedi adatokra legjobban illeszkedőt. A szabványmódszerrel kapott globálsugárzási adatokhoz az RRTMG sémával (*Iacono et al., 2008*) végzett WRF futtatások álltak legközelebb (2017 augusztusi futtatások). A mért globálsugárzással történő összehasonlítás során a Dudhia séma bizonyult a legjobbnak. A 3 séma eredményei között nem voltak számottevő eltérések. Mivel a vizsgálat első szakaszában még nem álltak rendelkezésre a szegedi mért globálsugárzás, a féléves futtatásokat az RRTMG sémával végeztük. Ez egyébként a WRF V3.7.1 verziójának alapbeállítása, ami az ELTE Meteorológiai Tanszék meteor9 nevű számítógépén futott.

Elvégeztük a kisteleki naperómű termelési adatainak és a WRF modell globálsugárzási előrejelzéseinek összehasonlító vizsgálatát is (2017. március-augusztus). A futtatásokat minden nap 00 UTC-vel kezdtük. 48 órás integrálásokat végeztünk. Vizsgálatainkban a 24–48 órás eredményt használtuk. Az R^2 érték 0,83-nak adódott, ami jó egyezésre utal. Havi bontásban a legkisebb R^2 értékkel a március (0,71) és az április (0,80) rendelkezik. A legnagyobb determinációs együttható júliusra ($R^2 = 0,91$) és augusztusra ($R^2 = 0,91$) adódott. *A tanszéki WRF modell alkalmazható napenergia termelési előrejelzésekre.*

A féléves vizsgálat után (48 órás futtatások) 72 órás futtatásokat is készítettünk 2017 augusztusára. Így minden napra 3 előrejelzési adatsor állt rendelkezésre állt rendelkezésre (24, 48 és 72 órás eredmények), ami lehetővé tette a sugárzási előrejelzések pontosságának vizsgálatát az előrejelzési idő függvényében. Megnéztük az eredményeket Szegedre és Kistelekre is. Az R^2 eredmények mindkét helyen, minden esetben 0,90 és 0,94 közöttinek adódtak, az átlagos hibák között is kicsi a különbség, tehát elmondható, hogy a 48 órás előrejelzés mellett a 72 órás előrejelzés is jól használható.

A WRF modellel kapott globálsugárzási előrejelzés – megfelelő modell output statisztikák használatával – alkalmas naperőművek napi, vagy napszakos termelési előrejelzéséhez, de természetesen kritikával kell fogadni az órás, vagy annál rövidebb időszakokra vonatkozó adatokat. Ez a modell jellegéből és a légköri folyamatok skála-analíziséből következik. Minden esetben elmondható, hogy a WRF-re jellemző a globálsugárzás felülbecslése. További vizsgálatokhoz – megfelelő felhasználói igény esetén – hosszabb időszakra (akár több évre) vonatkozó WRF futtatások és célzott modell output statisztikák szükségesek.

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani Dr. Weidinger Tamás egyetemi docensnek a munkám során nyújtott segítségéért, kitartó türelméért. Köszönet illeti Gyöngyösi András Zénót is, aki bevezetett a WRF modell rejtelseibe és működésébe, továbbá köszönöm neki, hogy a témában felmerülő kérdéseimre mindig készségesen válaszolt.

Köszönet illeti a Solargate Energetikai Beruházó Kft-t, hogy egy bizonyos ideig a rendszer által megtermelt áram mennyiségét folyamatosan nyomon követhető és bárki számára hozzáférhetővé tette az interneten keresztül.

Köszönetet mondok továbbá az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a rendelkezésemre bocsátott globálsugárzás adatokért. Külön köszönet illeti Kordás Nórárt és Nagy Zoltán osztályvezetőt. Ezúton szeretném megköszönni OMSZ-os kollégáimnak, Zsebeházi Gabriellának, Garamszegi Balázsnak, Szabó Péternek és osztályvezetőmnek, Bihari Zitának, a diplomafélévemben irántam tanúsított türelmet és a sok segítséget, biztatást.

Köszönöm Kristóf Erzsébetnek, hogy segítséget nyújtott az R programban a hisztogramok ábrázolásakor. Nélküle ezek a szép ábrák nem jöhettek volna létre.

Köszönöm a támogatást és a biztató szavakat családomnak és barátaimnak, mindenekelőtt Farkas Ritának és Kovács Dorottyának, s mindazoknak, akik mellettem álltak és lelkesítettek a dolgozat megírása során.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Breuer H., Pieczka I., Pongrácz R., Radics K., (2013): Megújuló energiaforrások. E-jegyzet, Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Barótfi I., (2000): Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó.
(<http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/kornyezettechnika-eloszo/ch02s05.html>)
- Bartók B. (2013): A globálsugárzás változásai Európában. Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem (témavezetők: Mika János és Tar Károly), Debrecen 133 p.
- Bán B. (2015): Globálsugárzás modellezése energetikai vizsgálatokhoz. Szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék (Témavezető: Weidinger T.), 50 p.
- Bán B. (2016): WRF modellszámításokra alapozott napenergia termelési előrejelzés fejlesztése. Környezet és Energia a Mindennapokban (szerk.: Lázár I.), Debrecen. 77-84. ISBN: 978-96-7064-3-0
- Bán B., Weidinger T., Gyöngyösi A. Z. (2018): A WRF időjárás előrejelző modell rövidhullámú sugárzási parametizációinak alkalmazása napenergia előrejelzésekhez. Környezet és Energia (szerk.: Lázár I.), Debrecen, 157–163. ISBN: 978-963-7064-36-4
- Barker, H. W., R. Pincus, and J.-J. Morcrette (2002): The Monte Carlo Independent Column Approximation: Application within large-scale models. Paper presented at the GCSS-ARM Workshop on the Representation of Cloud System in Large-Scale Models, Global Energy and Water Cycle Exp. Cloud Syst. Stud. – Atmos. Radiat. Meas. Program, Kananaskis, Alberta, Canada, 20–24.
- Bottyán Zs. (2016): A pilóta nélküli repülőeszközök meteorológiai alkalmazásának lehetőségeiről I. az időjárás-felderítés. Repüléstudományi Közlemények XXVIII. évfolyam 2016/2, 57–70.
- Chou, M.-D. and M. Suarez (1994): An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Mem. 104606, 3, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. 85 pp.
- Chou, M.-D., Suarez, M. J., Ho, C.-H., Yan, M. M.-H., Lee, K.-T. (1997): Parametrizations for Cloud Overlapping and Shortwave Single-Scattering Properties for Use in General Circulation and Cloud Ensemble Models. Journal of Climate, American Meteorological Society 11, 202–214.
- Chou, M.-D., Suarez, M.J. (1999): A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW) Developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1999. NASA Tech. Memo., NASA/TM1999e104606(15).
- Collins, W., P. J. Rasch, B. a. Boville, J. J. Hack, J. R. Mccaa, D. L. Williamson, J. T. Kifhi, B. Briegleb, C. Bitz, S.-J. Lin, M. Zhang, Y. Dai (2004): Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). NCAR Technical Note NCAR/TN-464+STR, doi:10.5065/D63N21CH.
- Czelnai R., (1995): Bevezetés a meteorológiába I. Tankönyvkiadó, Budapest, 338 p.
- Dudhia, J. (1989): Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. Journal of the Atmospheric Sciences 46(20), 3077–3107.

- EC (1997): Communication from the Commission Energy for the future: renewable sources of energy COM(97)599 final. White Paper for a Community Strategy and Action Plan COM(97)599 final, European Commission, Brüsszel, november 26. http://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_en.pdf
- EB (2005): Zöld könyv az energiahatékonyságról, avagy többet kevesebb. COM (2005) 0265.végleges, Európai Közösségek Bizottsága, Brüsszel, június 22. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52005DC0265&from=HU>
- EB (2006a): Zöld könyv. Európai stratégia az energiaellátás fenntarthatóságáért, versenyképességéért és biztonságáért SE C (2006) 317. végleges. Európai Közösségek Bizottsága, Brüsszel, augusztus 3. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:52006DC0105>
- EB (2006b): Energiahatékonysági cselekvési terv: a lehetőségek kihasználása. COM (2006) 545.végleges. Európai Közösségek Bizottsága, Brüsszel, december 19. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX:52006DC0545>
- EB (2007b): Európai energiapolitika COM/2007/0001 végleges. Európai Közösségek Bizottsága, Brüsszel, január 10. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX:52007DC0001>
- EB (2010): Energia 2020. A versenyképes, fenntartható és biztonságos energiaellátás és -felhasználás stratégiája. COM/2010/0639 Európai Bizottság, Brüsszel, január 14. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52010DC0639R%2802%29:HU:HTML>
- EB (2014): Éghajlat- és energiapolitikai keret a 2020–2030-as időszakra COM (2014) 15 végső. Európai Bizottság, Brüsszel, január 22. <http://www.ipex.eu/ipexWeb/dossier/document/COM20140015.do>
- ET (2014): A 2030-ig tartó időszakra vonatkozó éghajlat- és energiapolitikai keret. Európai Tanács, Brüsszel, október 23. http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/HU/ec/145379.pdf
- Farkas I. (2010): A napenergia hasznosításának hazai lehetőségei. Magyar Tudomány 2010/8, 937–946.
- Farkas I. (2017): Napenergia-hasznosítás – hazai és nemzetközi helyzetkép. Magyar Tudomány 2017/5, 517–523.
- Fels, S. B., and M. D. Schwarzkopf (1981), An efficient, accurate algorithm for calculating CO₂ 15 mm band cooling rates, *Journal of Geophysical Research*, 86, 1205 – 1232.
- Fu, Q. and Liou, K. N. (1992): On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *Journal of the Atmospheric Sciences* 49, 2139–2156.
- Gu, Y., Liou, K. N., Ou, S. C., and Fovell, R. (2011): Cirrus cloud simulations using WRF with improved radiation parameterization and increased vertical resolution. *Journal of Geophysical Research* 116, D06119, doi:10.1029/2010JD014574.
- Iacono, M. J., Mlawer, E. J., Clough, S. A., Morcrette, J.-J. (2000): Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3, *Journal of Geophysical Research*, 105, 14,873-14,890.

- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Clough, S. A. (2003): Evaluation of upper tropospheric water vapor in the NCAR community climate model (CCM3) using modeled and observed HIRS radiances. *Journal of Geophysical Research*, 108(D2), 4037.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., Collins, W. D. (2008): Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculation with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research* 113, D13103, 1–8.
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez J.P., López-Romero, J.M., Thais, F., Bartok, B., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S., van Meijgaard, E., Teichmann, C., Wild, M., 2015: The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications* 11, 6:10014. doi: 10.1038/ncomms10014.
- Joseph, J. H., W. j. Wiscombe, J. A. Weinman (1976): The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 2452-2459.
- Kasten, F. (1989): Strahlungsaustausch Zwischen Oberflächen und Atmosphäre, VDI Berichte NR. 721, 131–151.
- Lacis, A. A., Hansen, J. E. (1974): A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 118-133.
- László J. (szerk.) (2018): Újfajta naperőműveket hoz Magyarországra a napenergia-forradalom. Bartal Tamás, a Miniszterelnökség helyettes államtitkárának nyilatkozata, MVM Hírlevél VII. évfolyam 2018. április 23. 7-9 p.
- Major Gy. (szerkesztő) Takács O., Nagy Z. és R. Paál A. (1985): A napenergia hasznosítás meteorológiai megalapozása Magyarországon. ÉTI kiadvány. Budapest, 189 p.
- Major Gy., Nagy Z., Tóth Z. (2002): Magyarországi éghajlat-energetikai tanulmányok No. 9. Budapest. 52 oldal (http://korny.uni-corvinus.hu/kti/9_szam.pdf)
- Major Gy., (2010): Mennyire ismerjük a napállandót és a föld albedóját? *Légekör* 55. évf. 1. szám, 7–10.
- Mesinger, F., and Arakawa, A. A. (1976): Numerical methods used in atmospheric models. GARP Publ. Ser. 17(I), 64 pp.
- Mészáros R., (2013): Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek. E-jegyzet, Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997): Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated k-model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16,663-16,682.
- Molnár Cs. (2015): A rövidhullámú sugárzás modellezése komplex felszínek felett. Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék (Témavezető: Weidinger T.), 56 p.
- NFM (2010): Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve/ 2010–2020. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, Budapest, ISBN 978-963-89328-0-8, 224 p. http://2010-2014.kormany.hu/download/2/b9/30000/Meg%3BAjul%3%B3%20Energia_Magyarorsz%3A1g%20Meg%3BAjul%3%B3%20Energia%20Hasznos%3ADt%3A1si%20Cselev%3A9si%20terve%202010_2020%20kiadv%3A1ny.pdf

- Oreopoulos, L., and H. W. Barker (1999): Accounting for subgrid-scale cloud variability in a multi-layer 1-D solar radiative transfer algorithm. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 301-330.
- Pálfy M., (2005): A napenergia fotovillamos hasznosításának potenciálja Magyarországon. *Elektrotechnika* 98. évf. 11. szám, 293–295.
- Pincus, R., H. W. Baker, and J.-J. Morcrette (2003): A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields. *Journal of Geophysical Research*, 108(D13), 4376.
- Práger T., Ács F., Baranka Gy., Feketéné N. K., Mészáros R., Szepesi D., Weidinger T. (1999): A légszennyező anyagok transzmissziós szabványainak korszerűsítése, III. Részjelentés 2., OMSZ.
- Sebestyénné Szép T. (2016): Energetikai konvergencia az Energia 2020 stratégia tükrében. *Közgazdasági Szemle* LXIII. évfolyam 2016. május. 564–587.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., (2008): A Description of the Advanced Research WRF -59- Version 3 NCAR/TN-475+STR, June 2008. – NCAR Technical Note. (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf)
- Skarbit N. (2018): Városklíma-elemzés térben és időben részletes mérések, valamint lokális léptékű klímamodell alapján. Doktori (PhD) értekezés, Szegedi Tudományegyetem (témavezető: Dr. Unger János), Szeged 113 p.
- Stephens, G. L. (1978): Radiation profiles in extended water clouds, Part II: Parameterization schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences* 35, 2123-2132.
- Stamnes, K., S. C. Tsay, W. Wiscombe, and K. Jayaweera (1988): A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method- radiative transfer in scattering and emitting layered media, *Applied Optics*, 27, 2502-2509.
- Szabó Zs. (2017): Magyarország megújuló energia stratégiai céljainak bemutatása és a megújuló energiatermelés helyezte. Előadás, Nemzeti Fejlesztési Minisztérium. http://www.mket.hu/alapanyagok/XX_konferencia/eloadasok/szabozsolt_2017_MKET.pdf
- Tóth P., Bulla M, Nagy G., (2011): Energetika. Digitális tankönyvtár. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Energetika/index.html
- Tóth Z., Nagy Z., Szintai B. (2017): Verification of global radiation fluxes forecasted by numerical weather prediction model AROME for Hungary. *Időjárás* 121, 189-208.
- Varga P., (2014): Európa - Magyarország 2014. Napenergia-hasznosítás iparági helyzetkép. V. Napenergia hasznosítás az épületgépészetben konferencia anyaga.
- Weidinger T., Molnár Cs., Bán B. (2015): A globálsugárzás modellezése és alkalmazása naperőművek termelési előrejelzésére. *Tiszteletkötet Károssy Csaba 70. születésnapjára*, Szombathely 107–116.

Internetes hivatkozások

[1 – Világgazdaság] <https://www.vg.hu/velemenytobbmintszaznaperomuvetepitazmvm-2-613325/>

[2 – met.hu] <http://www.met.hu>

[3– solargate.hu] solargate.hu – A Solargate Kft. honlapja