

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

A rövidhullámú sugárzás modellezése komplex felszínek felett

Diplomamunka



Készítette:

Molnár Csilla

Meteorológus mesterszak, Előrejelző szakirány

Témavezető:

Dr. Weidinger Tamás, egyetemi docens

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Modellezés sík felszín felett	5
2.1. A rövidhullámú sugárzásmérleg komponenseinek meghatározása	5
3. Modellezés lejtők felett	12
3.1. Globálsugárzás lejtőre 40°-nál kisebb lejtőszög esetén	12
3.2. Globálsugárzás lejtőre 40°-nál nagyobb lejtőszög esetén	14
4. Sugárzási modell leírása	17
5. WRF modell	23
6. Modelleredmények ismertetése	27
6.1. Sík felszín felett	27
6.2. Lejtő felett.....	28
6.3. Tájolás	36
6.4. Árnyékolás	39
7. A napenergia felhasználása	42
8. Összefoglalás	50
9. Köszönetnyilvánítás	52
10. Irodalomjegyzék	53

1. Bevezetés

A légköri folyamatok legfontosabb energiaforrása a Nap. A felszínre érkező napsugárzás a földi élet fő hajtóereje, az energiamérleg bevételi oldalának legfontosabb eleme. A sugárzásháztartás ismerete a légköri folyamatok leírása mellett fontos a napenergia hasznosításban, a növénytermesztésben, de az építészetben és az épületgépészeti tervezésben is.

A felszíni mérleg komponensek (impulzus, energia, víz, nyomanyagok) és a tulajdonság áramok (impulzus, szenzibilis és latens hő, nyomanyagok) modellezése a mikrometeorológia tárgykörébe tartozik. A sugárzási mérleg komponensek és a turbulens áramok parametrizálása, tágabb értelemben a határréteg folyamatok leírása meghatározó eleme a numerikus modellszámításoknak; legyen az egy mezoskálájú előrejelzés, vagy a globális cirkulációs modellek éghajlati előrejelzése.

Gondoljunk csak arra, hogy a latens és a szenzibilis hőáram adja meg a konvekció erősségét, a légkörbe jutó víz mennyiségét, illetve alakítja a felhő és csapadékképződési folyamatokat. Ezért is fontos kérdés a meteorológiában a légköri sugárzás (sugárzásátviteli modellek, szóródás, elnyelés, spektrális szerkezet, stb.) kutatása, a sugárzási viszonyok statisztikai és numerikus modellezése (*Fleagle és Businger, 1980; Bencze et al., 1982; Salby, 1996*).

Az időjárás és éghajlati modellekben mind a sugárzásátviteli folyamatokat (felhős és felhőtlen égbolt, rövid és hosszuhullámú sugárzás), mind a felszíni sugárzási mérleg komponensek meghatározását külön parametrizációs eljárásokkal végzik. Kevés általánosan felhasználható modell született, mely regionális mértékben is felhasználható. Ennek oka az alkalmazott fizikai összefüggések bonyolultsága. A feladat jellege határozza meg a parametrizációs eljárások bonyolultságát. A felszínre érkező rövid, illetve hosszuhullámú sugárzást közelíthetjük az egyes rétegek sugárzásháztartásának modellezésével, ami a légköri üvegházhatás vizsgálatában, vagy az éghajlati modellekben fontos. Elterjedőben vannak a kutatásban és az oktatásban szabadon felhasználható sugárzásátviteli modellek is mint a MODTRAN, vagy az SBDART (*Ricchiazzi et al., 1998; Gueymard és Zemel, 2001; Trenberth et al., 2009; de Bruin, 2010; Archer, 2011*). A felszíni sugárzásmérleg komponensek modellezésének másik útja – amit mi is választottunk – a standard meteorológiai mérések (itt a hőmérséklet és a felhőzet) alapján történő

számítás (*TopoRad, Kang et al., 2002; Németh, 2004*). Ilyen parametrizációs módszereket alkalmaznak többek között a légszennyezés meteorológiában, az agrometeorológiában vagy a napenergia-hasznosítás területén is. Ezt a közelítést használják a felszín energiamérleg komponenseit, illetve turbulens áramokat leíró SVAT (Surface Vegetation Atmosphere Transport, felszín-bioszféra-légkör kicserélődés) modellekben is. A SVAT modellek

- önállóan (*SURFMOD, Ács et al., 2000, Ács, 2008*) vagy
- ökológiai modellekben (*DNDC, Grosz, 2010*),
- hidrológiai modellekben (*WETSPA, Shafii és De Smedt, 2009; ellenállás modell, Kugler et al., 2014*) vagy
- a terjedésszámításban alkalmazott meteorológiai preprocesszorokban kerülnek felhasználásra (*AERMET, 2004; Práger et al., 1999; Weidinger et al., 2008*).

A SVAT modellek adják az időjárás és éghajlati modellek felszíni parametrizációs moduljait is. Jó példa erre a hazai előrejelzési gyakorlatban alkalmazott ALADIN modell, s benne ISBA modul (*Noilhan és Mahfouf, 1996*), vagy a WRF modellben használt különböző felszíni sémák (*Skamarock et al., 2005*).

Egy komplex domborzat felett a sugárzási mérleg komponensek (fluxusok) eloszlása a napszak és a légkör állapotán (felhőzet, szennyezettség, v. optikai rétegvastagság) túl függ a felszín geometriájától, a borítottságától (pl. erdő mező, csupasz talaj, beépített terület), illetve az adott felszín típus milyenségétől pl. a növényzet sűrűsége, vízellátottsága, vagy a beépítettség jellemzői (épületek mérete, elhelyezkedése). E tulajdonságok jól leírhatóak különböző elméleti megközelítések, indexek alapján. A különböző sugárzási modelleket meteorológiai mérések alapján tesztelik (*Iziomon és Mayer, 2002; Oliphant et al., 2003; Häntzschel et al., 2005*).

A diplomamunkám az alapszakos szakdolgozatom (*Molnár, 2012*) továbbfejlesztése. Standard meteorológiai mérések alapján kidolgoztunk egy felszíni sugárzási mérleg komponenseket számító modellt korábbi hazai (*Justyák és Tar, 1974; Takács, 1981; Tar et al., 1998; Mészáros, 2002; Rajna, 2003; Németh, 2004; Weidinger et al., 2008*) és külföldi (*Holtslag és Van Ulden, 1983; Foken, 2006, 2008*) eredményekre

támaszkodva, ami kiterjeszthető a felszíni energiamérleg meghatározására is (pl. a Priestley-Taylor elmélet alkalmazásával, *Práger et al., 1999*).

A tanulmányban egy komplex felszín sugárzási viszonyait elemeztem a domborzat árnyékoló hatásának figyelembevételével. A modell tesztelésekor a sugárzási mérleg komponensek közül a bejövő rövidhullámú sugárzást vettem össze a debreceni alapéghajlati állomás adataival (*Szász és Nagy, 2007; Nagy et al., 2008, 2012*). Beüzemelttem a WRF időjárási előrejelzési modell Kárpát-medencei változatát (8 km-es rácsfelbontás), elemeztem a modell által szolgáltatott globálsugárzás előrejelzéseket, majd megvizsgáltam ezek átszámítását lejtőre az általunk fejlesztett modellel.

Ezt követően röviden kitérek a modell adaptáció távlati céljára a hazai naperőművek számára készíthető sugárzási-termelési előrejelzésekre a 2013-ban indult kisteleki naperőmű példáján.

2. Modellezés sík felszín felett

A Föld különböző pontjain elhelyezett meteorológiai és speciális sugárzási állomásokon (pl. Baseline Surface Radiation Network, BSRN – felszíni sugárzásmérő alaphálózat, <http://www.bsrn.awi.de/>) mérik a vízszintes felületre jutó teljes napsugárzást. A sugárzási mérleg komponensek mérésével, a meteorológiai gyakorlatban használt módszerekkel itt nem foglalkozunk (Czelnai, 1995).

Első lépésként tekintsük a vízszintes felületre érkező sugárzást!

2.1. A rövidhullámú sugárzásmérleg komponenseinek meghatározása

Nézzük a globálsugárzás meghatározást standard meteorológiai adatok alapján! A globálsugárzás értéke minden esetben függ a napmagasságtól, ami a vizsgált terület földrajzi koordinátáinak, és az adott időpontnak a függvénye (Práger et al., 1999).

A napmagasság meghatározása a következő összefüggésekkel történik:

$$\phi = \arcsin(\sin\delta \cdot \sin\varphi_{rad} + \cos\delta \cdot \cos\varphi_{rad} \cdot \cosh). \quad (1)$$

Az esetek többségében a napsugárzás a felszínt nem merőlegesen, hanem egy bizonyos szög alatt éri el, ezt nevezzük zenitszögnek és θ_0 -val jelöljük.

$$\cos\theta_0 = \sin\delta \cdot \sin\varphi_{rad} + \cos\delta \cdot \cos\varphi_{rad} \cdot \cosh. \quad (2)$$

Az egyenletekben h a Nap óraszöge, δ a deklinációja (Egyenlítőtől mért érték, ami 90° és -90° közötti értékeket vehet fel), φ_{rad} pedig a földrajzi szélességet jelöli (radiánban megadva). Tudjuk azt is, hogy:

$$\delta = \arcsin(0,398\sin(SL)). \quad (3)$$

SL a szoláris hosszúságot jelöli, melynek értéke:

$$SL = 4,871 + 0,0175d + 0,033\sin(0,0175d). \quad (4)$$

Az év napjának a száma: d ($d = 1$ - január elseje).

H a félnapos időszak hossza, a Nap delelésekor ugyanis $h = 0$.

$$H = \lambda_{rad} + 0,043 \sin(2SL) - 0,033 \sin(0,0175d) + 0,262t_{UTC} - \pi. \quad (5)$$

t_{UTC} az adott nap órája (UTC szerint).

A globálsugárzást (G) a napmagasság (ϕ) és borultság (N) ismeretében a következő összefüggéssel határozhatjuk meg (Práger et al., 1999):

$$G = (a_1 \cdot \sin\phi + a_2) \cdot (1 + b_1 \cdot N^{b_2}), \quad (6)$$

ahol a az empirikus állandók jele:

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

b a felhőzeti állandók jele:

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

Ehhez a széleskörben alkalmazott parametrizációhoz a földrajzi paraméterek mellett, tehát csak az aktuális felhőzeti értékekre van szükség. Az állandókat a budapesti mérések felhasználásával állították be. Léteznek más, ennél bonyolultabb formulák is a globálsugárzás számítására. A német környezetvédelmi szabványban (Kasten, 1989) például a felhőzeten túl a homályossági tényezőt is figyelembe kell venni. Ott a következő parametrizációt alkalmazzák:

$$G = G_0 \cdot \left(1 - a \cdot \left(\frac{N}{8}\right)^b\right), \quad (7)$$

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

$$G_0 = I \cdot \sin\phi \cdot A \cdot \exp\left(-B \cdot \frac{Tm}{\sin\phi}\right), \quad (8)$$

ahol I a Föld-légkör rendszer külső határára érkező napsugárzás, ami függ az I_0 napállandótól, az aktuális (r) és a közepes (r_0) Nap-Föld távolságtól is:

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2. \quad (9)$$

$I_0 = 1367 \text{ Wm}^{-2}$, az a légkör külső határára közepes Nap-Föld távolság (150 millió km) esetén, a Nap sugárzására merőleges egységnyi felületre időegység alatt bejövő energia. A fenti képletben alkalmazott állandók: $A=0,84$, $B=0,027$. Tm a homályossági tényező.

A légkörön áthaladó napsugárzás a levegőben lévő gázok pl. vízgőz, ózon, széndioxid, illetve a különböző aeroszol részecskék molekuláin történő szóródás és elnyelődés miatt, több-kevesebb gyengülést szenved. Ennek a gyengülésnek a mértékét fejezi ki a homályossági tényező. Függ a földrajzi adottságoktól, a helyi szennyezettségtől és a széljárástól: értéke ennek megfelelően változik. (Tiszta égbolt és zavartalan besugárzás esetén 2, míg ipari környezetben akár 6,5-es értéket is felvehet.) Természetesen a szennyező anyag koncentráció (nyomanyagok, aeroszol részecskék) növekedésével nő a homályossági tényező. Derült időben a homályossági tényező növekedésével exponenciálisan nő a szórt sugárzás (Takács és Major, 1974). Takács (1989) vizsgálatai szerint a derült égboltnál mérhető szórt és globálsugárzás aránya a korábbi, több évtizedes budapesti időszoron növekvő tendenciát mutatott, ami a városiasodással és a légszennyezettség növekedésével hozható összefüggésbe.

Fontos mennyiség a globálsugárzás napi összege. Ennek meghatározására is többféle parametrizáció áll rendelkezésre Ezeket Rajna (2003) dolgozata alapján ismertetem. (Megjegyzem, hogy az elmúlt közel egy évtizedben is hasonló típusú egyszerű parametrizációs eljárásokkal találkozhatunk mind az aktuális, mind a napi globálsugárzást illetően (Izomon és Mayer, 2002; Lengfeld et al., 2010).)

1, Morvai (1973) formulája:

$$G = 40,6 + 22,21N + 6,76I_r - 2,89e. \quad (10)$$

Ebben az egyenletben a globálsugárzás $cal\ cm^{-2}\ nap^{-1}$ -ben van megadva, a felhőzet értéke tizedekben, e a párányomás jele, I_r pedig a relatív napfénytartamot jelöli ($1\ cal = 4,18\ J$).

2, Supit-féle (2001) Angström-Prescott formula:

$$G = R_a \cdot \left(A_a + B_a \cdot \left(\frac{n}{L_d} \right) \right). \quad (11)$$

A globálsugárzás mértékegysége itt $MJ\ m^{-2}\ nap^{-1}$. R_a az adott napon az átlagos napállandó. A_a és B_a empirikus állandók, melyek a vizsgált terület földrajzi helyzetétől függenek. A napsütéses órák számát n -el jelöli, és az adott nap hosszát L_d -vel.

3, Supit-féle (2001) Hargreaves formula:

$$G = R_a \cdot A_a \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} + B_a. \quad (12)$$

A globálsugárzás mértékegysége $MJ\ m^{-2}\ nap^{-1}$. T_{max} és T_{min} a maximum és minimum hőmérsékletek.

4, Supit-féle (2001) Extended Hargreaves formula:

$$G = R_d \cdot \left(A_a \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} + B_a \cdot (1 - N/8) \right) + C_a. \quad (13)$$

A globálisugárzás mértékegysége szintén $MJ m^{-2} nap^{-1}$. C_a az A_a és B_a -hoz hasonlóan a vizsgált terület földrajzi helyzetétől függő empirikus állandó.

5, Szász-féle (2002) parametrizáció:

$$G = \frac{(1,163 \cdot V \cdot c \cdot \omega \cdot G_{max})}{2} \quad (14)$$

A globálisugárzás $cal cm^{-2} nap^{-1}$ -ben van megadva. c jelöli a valódi napfénytartam százalékát, a csillagászatilag lehetséges értékhez viszonyítva. ω a nappalok hossza percben megadva, ami az év minden napjára kiszámítható.

A globálisugárzás maximuma ideális körülmények között az G_{max} ($cal cm^{-2}$), ami szintén kiszámítható az év minden napjára. V pedig az Albrevht-féle átlagos veszteségi tényező korrekciós tagja (Szász, 2002).

Hónap	Jan.	Febr.	Márc.	Ápr.	Máj.	Jún.	Júl.	Aug.	Szept.	Okt.	Nov.	Dec.
V	1,10	1,07	1,12	1,05	0,96	0,95	0,98	0,93	1,00	0,97	0,98	1,06

1. táblázat: Az Albrevht-féle átlagos veszteségi tényező korrekciója (Szász, 2002)

A globálisugárzás a közvetlenül a Naptól érkező direkt és az égbolt minden pontja felől érkező diffúz sugárzásból áll. A következő lépésben a direkt sugárzás parametrizációs eljárásaival ismerkedünk.

A **direkt sugárzás** (S) felhőmentes időszakban, adott napmagasságnál, ismerve a komplex átbocsátási együtthatót (q) és a homályossági tényezőt (Tm), az aktuális napállandóból meghatározható a Bougner-Lambert-formula segítségével:

$$S = I \cdot q^{Tm \cdot z} \quad (15)$$

q az ideálisan tiszta és száraz légkör komplex átbocsátási együtthatója, amely azt fejezi ki, hogy merőleges beeséskor az eredetinek hányad részére csökken a légkör alján a sugárzás erőssége. Értéke napmagasságtól függően 0,9-hez közeli érték.

z a napsugár relatív úthossza, értéke:

$$z = \frac{1}{\sin\phi}. \quad (16)$$

M	0°	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Z	39,4	10,4	5,6	2,9	2,0	1,55	1,3	1,15	1,06	1,02	1,0

2. táblázat: A napsugár relatív úthossza (z) a napmagasság (m) függvényében (Szász, 2002)

A direkt sugárzás számítására is léteznek további formulák is, például a német környezetvédelmi szabvány (Kasten, 1989):

$$S = I \cdot \exp[-Tm \cdot (p/p_0)/(0,9 + 9,4 \cdot \sin\phi)]. \quad (17)$$

Az aktuális nyomásérték jele p és tudjuk, hogy $p_0 = 1023,25 \text{ hPa}$.

Ezek a direkt sugárzásra felírt egyenletek azonban a felhőmentes esetet adják meg, de a pontos érték meghatározásához figyelembe kell vennünk a felhőzetet. Ilyenkor a következő összefüggést kell alkalmaznunk:

$$S_d = S \cdot (1 - t_L/t_V). \quad (18)$$

S_d a direkt sugárzás felhőzettel. A csillagászatilag lehetséges napfénytartam jele t_L , a valódi napfénytartamot pedig t_V -vel jelöljük.

A direkt sugárzás meghatározásánál azt feltételezzük, hogy az fordítottan arányos a borultsággal:

$$S_d = S \cdot (1 - N/8). \quad (19)$$

Ha meghatároztuk a direkt sugárzást, akkor megadható már a **diffúz sugárzás** is, hiszen tudjuk, hogy a globálsugárzás a diffúz és direkt sugárzás összege.

A **rövidhullámú visszavert sugárzás (vagy reflexugárzás)** a talajról visszaverődött globálsugárzás, ami az albedótól függ. Az albedó értéke a talaj borítottsága, vízellátása és egyéb tulajdonságai mellett függ a napmagasságtól is.

$$R = G \cdot a. \quad (20)$$

a az albedót jelöli, amit mérésekből, vagy szakirodalmi adatok alapján adhatunk meg: például az OMSZ kiadványaiban található a talajtípustól, a felszínt borító növényzettől és a vízellátottságtól függő havi átlagos albedó értéket (*Dávid et al. 1990*).

Ezzel a **rövidhullámú mérleg** mindkét tagja ismertté vált:

$$Rn_s = (S + D) - R. \quad (21)$$

3. Modellezés lejtők felett

A pontosabb modellek elkészítéséhez nem elégséges a vízszintes felszínt vizsgálni, szükség van még a függőleges, illetve a ferde felületekre (lejtőkre) eső sugárzás ismeretére is. Mivel ilyen típusú méréseket nem végeznek szolgálatserűen, ezért a vízszintes felületre jutó napsugárzásból kell meghatározni (kiszámítani) a ferde és a függőleges felületre jutó napsugárzást.

Az OMSZ Központi Légekörfizikai Intézetben 1969-76 között számos mérést végeztek a függőleges felületre eső össz sugárzással kapcsolatban. A legtöbb tanulmányt *Takács Olga* írta, aki a négy főégtáj irányú falra jutó globálsugárzás évi menetét vizsgálta. Azt elemezte, hogy az év folyamán hogyan aránylik a függőleges felületre jutó sugárzás napi összege a vízszintes felületre eső globálsugárzáshoz. *Justyák János és Tar Károly (1973 és 1974)* a különböző kitettséű lejtőkre és a vízszintes felületekre érkező sugárzás kapcsolatát modellezte. Később ez kiegészült a napi és óraösszegek tanulmányozásával, illetve a szórt sugárzás hasonló vizsgálatával is.

Ha a felszín nem vízszintes, a globálsugárzás mindkét összetevője; a diffúz és a direkt sugárzás is módosul. Megváltozik a napkelte és a napnyugta időpontja. A közvetlen sugárzás más szögben érkezik a talajra. A diffúz sugárzásnál vízszintes felszín esetén a vizsgált pont éppen félgömbnyi térszögből kapja a sugárzást. Lejtő esetén ez a térszög csökken. Azonban a lejtőnek lesz pozitív sugárzásbevétele, mégpedig a mellette lévő sík terület által visszavert sugárzás, ami az albedótól és a lejtőszögtől függ.

3.1. Globálsugárzás lejtőre 40° -nál kisebb lejtőszög esetén

Abban az esetben, **ha a lejtőszög kisebb, mint 40°** , a globálsugárzást közvetlenül átszámíthatjuk lejtőre. *Justyák és Tar (1974)* a lejtőre és a vízszintes felszínre jutó direkt sugárzás kapcsolatát vizsgálták és kiszámították azok pillanatnyi értékeinek, illetve napi összegének hányadosát. Arra a következtetésre jutottak, hogy a hányadosok jó közelítéssel egyenlőnek tekinthetők a globálsugárzások hányadosával. A közelítésük tetszőleges tájolású lejtőre alkalmazható és azt is kimutatták, hogy annál pontosabb

minél kisebb a lejtőszög, illetve minél magasabb a napállás (ilyenkor kisebb a szórt sugárzás aránya).

$$G_L = G \cdot \cos\beta \frac{A \cdot (\omega'_2 - \omega'_1) + B \cdot (\sin\omega'_2 - \sin\omega'_1) - C \cdot (\cos\omega'_2 - \cos\omega'_1)}{2 \cdot (\omega_2 \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_2)}, \quad (28)$$

ahol G_L a lejtőre vonatkozó globálsugárzás.

Az egyenleten belül:

$$A = (\sin\varphi - \operatorname{tg}\beta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\alpha_L) \cdot \sin\delta, \quad (29)$$

$$B = (\cos\varphi + \operatorname{tg}\beta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\alpha_L) \cdot \cos\delta, \quad (30)$$

$$C = -\operatorname{tg}\beta \cdot \sin\alpha_L \cdot \cos\delta. \quad (31)$$

ω_1 a napkelte óraszögét, ω_2 a napnyugta óraszögét, ω'_1 a lejtőnapkelte, ω'_2 pedig a lejtőnapnyugta óraszögét jelöli.

Továbbá:

$$\cos\omega'_{1,2} = \frac{-A \cdot B \pm C \sqrt{C^2 + B^2 - A^2}}{C^2 + B^2}. \quad (32)$$

Ebben az egyenletben az ω'_1 -hez tartozik a + előjel, az ω'_2 -höz pedig a – előjel.

Ez a formula minden $\beta < 90^\circ$ esetben érvényes.

Ezzel a módszerrel tehát sík felszínre számított globálsugárzás összegekből kaphatunk lejtőre vonatkozó értékeket.

3.2. Globálsugárzás lejtőre 40°-nál nagyobb lejtőszög esetén

A globálsugárzás meghatározásánál, **ha a lejtőszög nagyobb, mint 40°**; első lépésként a síkra számolt globálsugárzást szétválasztjuk direkt és diffúz tagra. Ezután ezeket külön átszámoljuk a lejtőre, s így fel tudjuk írni a globálsugárzást a direkt, a diffúz és a reflex sugárzási tag összegeként.

$$G(\beta, \alpha) = S(\beta, \alpha) + D(\beta, \alpha) + R(\beta, \alpha). \quad (33)$$

β a lejtőszöget, α pedig az azimutszöget, azaz az irányítottságot (déli iránytól való eltérést) jelöli a lejtőknél. (Természetesen a módszer alkalmazható kisebb lejtőszögek esetén is.)

Külön megvizsgálva a tagokat, elsőként megkapjuk a **direkt sugárzás** lejtőszögtől való függését:

$$S_L(\beta, \alpha) = S \cdot \cos v, \quad (34)$$

ahol

$$\cos v = \sin \phi \cdot \cos \beta + \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha - \psi). \quad (35)$$

Az egyenletben S_L a lejtő feletti direkt sugárzás, ψ a Nap azimutszöge, ϕ pedig a már említett napmagasság.

A **diffúz sugárzás** számítására több módszer is van, attól függően, hogy a diffúz sugárzás függ-e a térbeli iránytól, azaz izotrop, vagy nem függ, tehát anizotropnak tekinthető.

Izotrop esetben *Liu és Jordan* (1963) által kidolgozott formulával határozható meg. Ennél az esetenél a lejtő lejtésszöge tetszőleges, és a diffúz sugárzás nem függ a lejtő irányítottságától, azaz α -tól, csak a vízszintessel bezárt szögtől.

$$D_L(\beta) = D \cdot (1 + \cos\beta)/2. \quad (36)$$

Itt a D a vízszintes felületen, D_L a lejtőn mért diffúz sugárzást jelöli.

Azonban ez az izotrop sugárzás a gyakorlatban nem teljesül. Tekintetbe kell vennünk az égbolt anizotrop jellegét, így a diffúz sugárzás kiszámításának a következő módszerei lehetségesek:

1, Hay McKay (1979) módszere:

$$D_L(\beta, \alpha) = D \cdot \left(\tau \cdot \frac{\cos v}{\sin \phi} + (1 - \tau) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \right), \quad (37)$$

ahol

$$\tau = \frac{S}{I}. \quad (38)$$

A már fentebb említett (35) képlet érvényes itt is.

A modell figyelembe veszi a sugárzás izotropikus volta mellett azt is, hogy a Nap irányában nagyobb az égbolt diffúz sugárzása.

2, Klucher (1979) módszer:

$$D_L(\beta, \alpha) = D \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left((1 - F) \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \cdot (1 + F \cdot \cos^2 v \cdot \cos^3 \phi). \quad (39)$$

Az egyenletben $F = 1 - \left(\frac{D}{G}\right)^2$.

A modell figyelembe veszi az éghajlati diffúz sugárzás többletet is.

3, Reindl (1990) féle parametrizáció:

$$D_L(\beta, \alpha) = D \cdot \left[\tau \cdot \frac{\cos v}{\sin \phi} + (1 - \tau) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{S}{G}} \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right]. \quad (40)$$

A Reindl-modell – már összevetve az előző kettőt – figyelembe veszi mind a Nap irányából érkező többlet diffúz sugárzást, mind az éghajlati többlet diffúz sugárzást.

Ezek a parametrizációk nagyban függenek a lejtő földrajzi helyzetétől, a lejtőszögtől és a vizsgálandó időszaktól is.

A harmadik összetevő a sík felszínről a lejtőre visszaverődő, azaz **reflex sugárzás**, melyet így írhatunk fel:

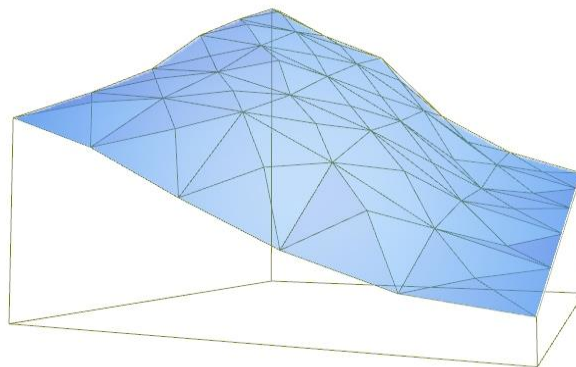
$$R_L(\beta, \alpha) = a \cdot G \cdot \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right). \quad (41)$$

4. Sugárzási modell leírása

A 2012-ben készített szakdolgozatomhoz megírt és abban kifejtett Fortran nyelvű modell számítja a beolvasott meteorológiai paramétereiből (az év napja, órája, felszíni albedó, hőmérséklet, továbbá a felhőzet) a síkra és lejtőre vonatkozó sugárzásháztartás komponenseit és azok különböző statisztikáit: óránkénti pillanatnyi érték, napi összeg, havi összeg, szórások, minimumok, maximumok, átlagok, átlagos napi menet (Molnár, 2012).

Az ilyen egyszerű sugárzási modellekben a lejtőket lejtő-, és azimut szöggel jellemzett sík lapként kezelik, majd e szögek segítségével számítják ki a sugárzásértékeket. Ha nem síkról, hanem egy összetett felületről beszélünk, akkor ezekkel a szögekkel nehezen boldogulunk, illetve a négyzetekkel való fedést sem tudjuk alkalmazni. A lejtők, illetve a komplex felszínek energiamérleg komponenseinek vizsgálata a napenergia hasznosítás mellett fontos lehet ökológiai és mezőgazdasági szempontból is.

A rendelkezésre álló vetületi térképek a felületet magassági pontokkal jellemzik. A vizsgált terület vízszintes vetületét előbb négyzetekkel, majd az egyes négyzetek középpontja- és a négyzet csúcspontjai által képzett háromszögekkel (4 db) fedtük le. E felbontás előnyös, hiszen háromszögekkel bármely felület lefedhető. E háromszögek csúcspontjainak x , y koordinátaival és az x , y pontok fölötti magassági értékekkel jellemezhetjük a felületet. A csúcspontok koordinátaiból meghatároztuk az egyes háromszögek területét és normálvektorait. (Ez két vektor vektoriális szorzatából számítható.) Az ily módon képzett háromszögek lefedik a felületet (1. ábra).



1. ábra: A sugárzási modellben használt felületkezelés, a lejtő háromszögekkel történő lefedésének sematikus rajza (Molnár, 2012)

A FORTRAN program minden változóját, a számítás minden lépését kommentekkel is elláttam. Az elemi háromszögek területének és normálvektorának kiszámítása után a Napból a z adott háromszög súlypontjához mutató egységvektor meghatározása következett. E két vektor helyzete alapján már számítható a direkt, diffúz, illetve a globálsugárzás. A program elsőként síkra, majd lejtőre számol. A sugárzási modellt teszteltem különböző felületeken és ezeket összehasonlítottam valós, mért értékekkel. A Debreceni Egyetem Agrometeorológiai Observatóriumának globálsugárzás adatait használtam referenciaként. A mérések és a modelleredmények jó egyezést mutattak. A lejtőre jutó sugárzás modellezésével egy egységnyi felületű napkollektorra jutó direkt és globálsugárzást modelleztem.

A globálsugárzást a (6) és (7) egyenlettel írtuk fel, a homályossági tényező értékeit a német környezetvédelmi szabványban (*Kasten, 1989*) található átlagos havi értékekből vettük. A direkt sugárzást a (17) egyenlettel, a felhőzetet (19) szerint számoltuk. A lejtőre vonatkozó átszámításnál a direkt sugárzást a (34), a diffúz sugárzást a (40), a reflex sugárzást a (41) összefüggéssel számoltuk. Ezen egyenletek részletesebb leírása megtalálható a 2.1. fejezetben.

A program könnyebb alkalmazhatósága miatt létezik egy *bemenő.dat* nevű file. Ebben beállíthatók a külső változók (földrajzi koordináták, albedó, rácsfelbontás, rácspontok száma), a vizsgálni kívánt időszak hossza (év, kezdő hó, záró hó, kezdő nap, záró nap, kezdő óra, záró óra) és megadhatjuk, hogy mely paramétert szeretnénk számítani (globálsugárzás, direkt sugárzás, diffúz sugárzás, effektív kisugárzás, sugárzási mérleg, szenzibilis hőáram, látens hőáram, párolgás, hasznosítható energia).

A program 4 adatbázist készít el. Első a kért paraméter órás adatait tartalmazza: *oef.dat*. Második a napi összegét, órás maximumát és minimumát, valamint az átlagát: *nöoaf.dat*. Harmadik a havi összegét, napi maximumát, minimumát és átlagát: *hönaf.dat*. A negyedik pedig a vizsgált időszakra az átlagos napi menetet készíti el egy konkrét rácspontra: *atnmf.dat*. A magassági adatokat a *mag.dat* file-ban tudjuk bevinni az adott formátumban. A képzett háromszögek területértékei a *terulet.dat* file-ban, a normálvektorok adatai a *norm1, norm2, norm3.dat* file-okban találhatóak. A vízszintes felületre vonatkozó sugárzási adatokat a *sugarzas_sik.dat* file tartalmazza, a napi sugárzási menetek számítását pedig a *sug_napi.dat*. Ezenkívül még megtalálhatóak a homályossági tényező órás adatai: *tmuj.dat*, illetve a lejtő azimutszögei: *napaz.dat*.

Azoknál a számításoknál, ahol figyelembe vettük a felhőzeti értékeket bemenő adatként szolgált a *Debrecen felho 2011 08.txt* file.

A következő táblázatokban a programban használt jelölések, a bemenő adatok értékei, illetve az állandók bemutatása kerül sorra.

Jelölés	Jelentés	Forrás neve	Mértékegység
h (i,j)	Rácspontok magassága	magas.dat	méter
hk (i,j)	Rácsnégyzetek k. pontjának magassága	magas.dat	méter
a	Albedó	bemenő.dat	-
ev	Vizsgált év	bemenő.dat	-
fi	Földrajzi szélesség	bemenő.dat	fok
lambda	Földrajzi hosszúság	bemenő.dat	fok
M	Felhőzet	82felh.dat	okta
T	Hőmérséklet	82höm.dat	K
Tm	Homályossági tényező	tm.dat	-
z	Vizsgálatra kért paraméter kódja	bemenő.dat	-
dx	Rácstávolság x irányban	bemenő.dat	m
dy	Rácstávolság y irányban	bemenő.dat	m
di	Rácsnégyzetek száma x irányban	bemenő.dat	-
dj	Rácsnégyzetek száma y irányban	bemenő.dat	-
ko, zo	Kezdő- és záró óra	bemenő.dat	-
kn, zn	Kezdő- és záró nap	bemenő.dat	-
kh, zh	Kezdő- és záró hónap	bemenő.dat	-
ki, kj	Átlagos napi menethez vizsgált négyzet i,j k.	bemenő.dat	-

3. táblázat: Kívülről bemenő (választott értékű) adatok jelölése a programban

(Molnár, 2012)

Jelölés	Jelentés	Érték	Mértékegység
a1	Állandó a globálsugárzás számításához	990	W m ⁻²
a2	Állandó a globálsugárzás számításához	-30	W m ⁻²
b1	Felhőzeti paraméter	-0,75	-
b2	Felhőzeti paraméter	3,4	-
N	Felhőzet (0 és 1 közötti értékben)	M/8	-
c	A szórt sugárzásban használt állandó	0,33	-
alfat	Emisszió képesség	0,95	-
T₀	Abszolút hőmérsékleti korrekció	273,16	K
pi	π koordinátája	3,1415926	-
Snap	Napállandó	1367	W m ⁻²
Stef	Stefan-Boltzmann-állandó	5,6710 ⁻⁸	W m ⁻² K ⁻⁴
pid (1)		0,906	-
pid (2)		0,916	-
pid (3)	Ideálisan tiszta légkör átbecsátási	0,922	-
pid (4)	tényezője különböző napmagasságoknál, a	0,927	-
pid (5)	légkör vastagságának függvényében.	0,935	-
pid (6)		0,937	-
pid (7)	Ha a Nap zenitben van, a légkör egységnyi	0,939	-
pid (8)	vastagságú.	0,941	-
pid (9)		0,9435	-
pid (10)		0,946	-

4. táblázat: Állandó értékek jelei és értékei a programban (Molnár, 2012)

Jelölés	Jelentés
i	Rácspontok számozása x irányban
j	Rácspontok számozása y irányban
k	Háromszögek számozása
i1	Rácspontok száma x irányban
j1	Rácspontok száma y irányban
n1 (i,j,k)	Háromszög normálvektorának x komponense
n2 (i,j,k)	Háromszög normálvektorának y komponense
n3 (i,j,k)	Háromszög normálvektorának z komponense
n1nap	Nap irányába mutató normálvektor x komponense
n2nap	Nap irányába mutató normálvektor y komponense
n3nap	Nap irányába mutató normálvektor z komponense
d	Az év napjának sorszáma
utc	Adott óra UTC-ben
o	Az aktuális óra CET-ben
iho	Az adott hónap napjainak száma
napsz	A vizsgálatba bevont napok száma
dekl	Deklináció
azimut	Nap azimutszöge
leaz	Lejtő azimutszöge
kulonb	A Nap azimutszöge és a lejtő azimutszöge közötti különbség
finap	Napmagasság
orasz	Óraszög
hsz	Szoláris hosszúság
slopcos	Felület és napsugár által bezárt szög
Slszog	Lejtőszög
S0	Globálsugárzás a hazai szabványmódszer Práger et al. (1999) alapján
S1	Globálsugárzás a német környezetvédelmi szabvány szerint
Sk0	Globálsugárzás sík felszínen
Sk1	Globálsugárzás lejtőn, Liu és Jordan (1963) módszere alapján
Sk2	Globálsugárzás lejtőn, Reindl (1990) módszere alapján
Sk0dir	Direkt sugárzás sík felszínen
Sk1dir	Direkt sugárzás lejtőn
rb	A lejtőre és síkfelszínre jutó direkt sugárzás hányadosa

Jelölés	Jelentés
Sk0dif	Diffúz sugárzás sík felszínen
rk	A lejtőre és síkfelszínre jutó diffúz sugárzás hányadosa
D1	Diffúz sugárzás a lejtőn, Liu és Jordan (1963) formulájával
D2	Diffúz sugárzás a lejtőn, Reindl (1990) formulájával
Irefl	Rövidhullámú reflexsugárzás
Qrovid	Rövidhullámú sugárzási mérleg
anm	Átlagos napi menet a vizsgált időszakra
arny	Árnyékolás figyelembevételkor szorzó (értéke: 1, vagy 0)
ertek	Vizsgálatra kért paraméter elnevezése a programban

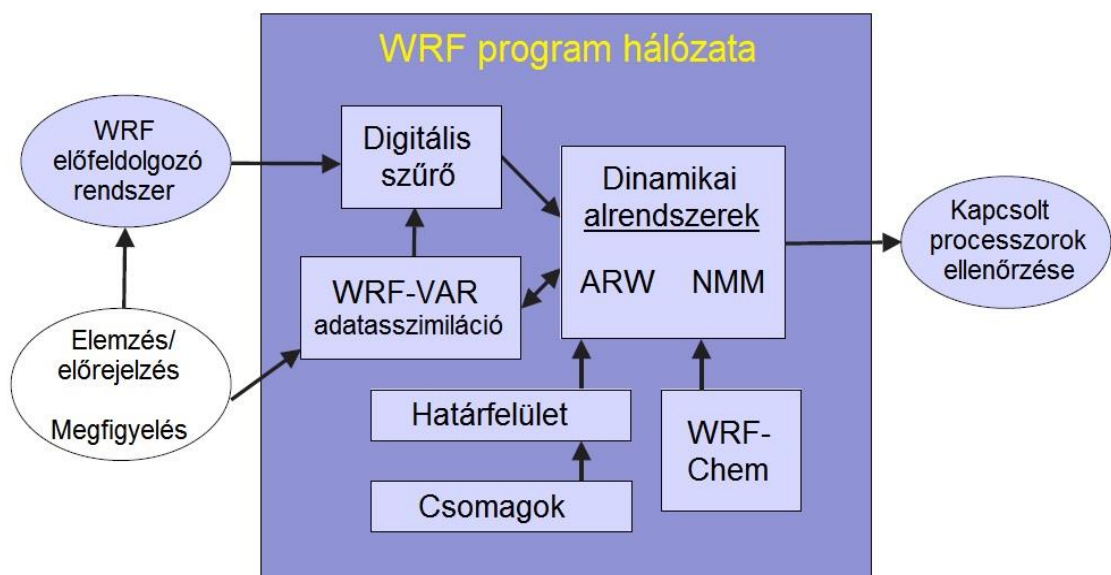
5. táblázat: A programban használt egyéb jelölések (Molnár, 2012)

5. WRF modell

A WRF (Weather Research and Forecasting Model) egy légköri szimulációs rendszer és numerikus időjárás előrejelző modell. Ez a kutatásokra és operatív alkalmazásokra kifejlesztett rendszer az előrejelző modellek egyik legelterjedtebb és ezzel együtt leggyorsabban fejlődő tagja. A fejlesztőmunka fő koordinátora az NCAR (National Center for Atmospheric Research's). A programot kifejezetten nyílt forráskóddal (szabadon letölthető a világhálóról) készítették közösségi fejlesztésre.

A WRF modellnek két dinamikai alrendszere létezik. Az egyik az ARW (Advanced Research WRF), amelyet elsősorban kutatási célokra használnak. Ebben vizsgálhatunk valós és idealizált eseteket, regionális klímaváltozásokat, vagy például hurrikánokat. (A modellnek van még egy direkt a hurrikánok előrejelzésére kifejlesztett speciális változata a HWRF (Hurricane Weather and Forecasting).) A másik változat a kevesebb opcióval bíró NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), amely egy már továbbfejlesztett változat az üzemszerű előrejelzések készítésére.

A 2. ábrán bemutatom a WRF rendszert. A WSF (WRF Softver Framework) biztosítja az infrastruktúrát, hogy a program befogadja a dinamikai megoldókat, fizikai csomagokat, határfelületeket a program indításkor (WRF-VAR, WRF-Chem).

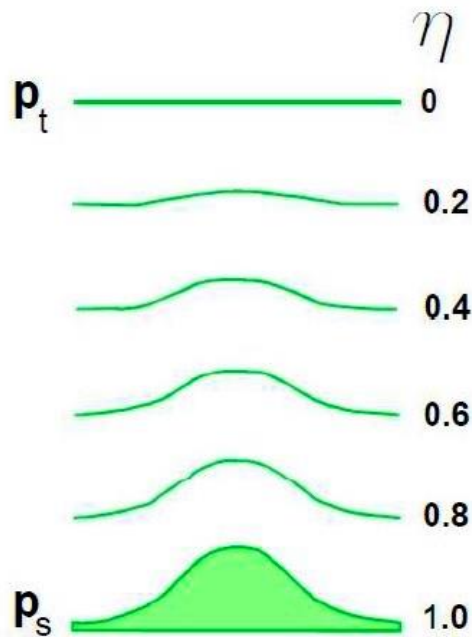


2. ábra: WRF rendszer összetevői (arw_v3.pdf)

Mivel a modell mezoskálájú, korlátos tartományú, ezért egy-egy beállított régióra történik a futtatás. A légköri folyamatokat az 1000 km-es horizontális rácsfelbontástól képes az 1 km-esig vizsgálni. Amennyiben nagyobb felbontásban szeretnénk futtatni, akkor ki kell jelölnünk további kisebb részterületeket a modellterületen belül, ez az ún. beágyazás. Ezzel csökkentjük a leskálázásból adódó hibalehetőségeket és növeljük a felbontást. Ezután amennyiben egyirányú visszacsatolási mechanizmust használunk, a külső területre nem hatnak vissza a modellterület folyamatai. Amennyiben a másik lehetőséget választjuk, azaz a kétirányú visszacsatolási mechanizmust úgy értelemszerűen megnő a számítások időtartama is.

Térjünk vissza az ARW rendszerre, mely az én kutatásaimat is segítette. A modell a jól ismert alapegyenletek integrálását végzi el, egyéb számítások, plusz kapcsolók közbeiktatásával lehetséges, melyhez számos különböző séma áll a rendelkezésünkre. Beépíthető a modellbe a turbulens kinetikus energia és tetszőleges számú skalár (keverési arányok, kémiai elemek, szennyező anyagok...) időbeli változását leíró egyenlet is. Amennyiben szükséges a hidrotermodinamikai egyenletrendszer ezekkel bővíthető.

A modell öt különböző parametrizációs csoportot tartalmaz, ezek a mikrofizika, a határreteg, a felszíni séma, a cumulus és természetesen a légköri sugárzás. A légköri sugárzásértékek között is több lehetőség közül választhatunk. A jelenlegi munkám során a globálsugárzás eredményeit nyertem ki a WRF segítségével és az általunk kifejlesztett programommal számoltam ebből direkt és diffúz tagokat, vagyis elvégeztem a sugárzási adatok utófeldolgozását. A rövidhullámú sugárzás modellezésénél a *Dudhida (1989)* sémát alkalmaztam. A dinamikai egyenletekhez teljesen összenyomható légkört és Euler-módszert, azaz nem hidrosztatikus rendszert használ (de opció a hidrosztatikus beállítási lehetőség is). Térképsík feletti, derékszögű koordináta-rendszerben számolja a sebesség komponenseket (u és v), vertikális sebességet (w), perturbációs felszíni nyomást, potenciális hőmérsékletet és geopotenciált. A modell η felszínkövető vertikális koordináta-rendszert használ, ennek alapja látható a következő ábrán.



3. ábra: Felszínkövető koordinátarendszer (*arw_v3.pdf*)

A nyomás hidrosztatikus komponense szerint számított vertikális koordinátázását alkalmazva az egyes η szinteket a következőképpen határozhatjuk meg:

$$\eta = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}.$$

Ezek a szintek állíthatóak a vizsgálatától függően 10-től egészen akár 60-ig. A legalsó szint a p_s , amit a domborzat határoz meg. A vertikális szintvonalak a magasság növekedésével egyre inkább kisimulnak, egészen addig, amíg el nem érik az állandó nyomású p_t -t, azaz a modell felső szintjét. Így alakul, hogy η értéke 1 és 0 között változik (1 felszínen, zérus a modell felső szintjén).

Az ARW a horizontális koordinátázásra az Arakawa C rácsot használja (*Mesinger és Arakawa, 1976*). Ennél a skalárok a rács közepén helyezkednek el, széleken pedig a sebességvektorok (u, v). A modell az egyenletekben a Coriolis-hatást is figyelembe veszi és Lambert-féle (szögtartó) térképvetületet használ. Mindemellett az időlépcső hossza is változtatható a Courant-Friedrichs-Lewy kritériumot (CFL) szem előtt tartásával, azaz a rácstávolság és az időlépcső hányadosának kisebbnek kell lennie, mint a leggyorsabban terjedő mozgásforma sebessége.

A bemenő adatokat a WPS (WRF Preprocessor System) kezeli és ez végzi el az előfeldolgozást. Az első tennivalóm tehát a kezdeti feltételek előállítás volt. Számításaim során a futtatásoknál beágyazást használtam. A modell 8 km-es horizontális felbontású és 14 vertikális szintre számol a troposzférában. A beágyazott terület adott rácspontjaira írtam ki a globálsugárzás órás adatait Debrecenre (É.sz.: 47,53° és K.h.: 21,63°) és Kistelekre (É.sz.: 46,47° és K.h.: 19,98°).

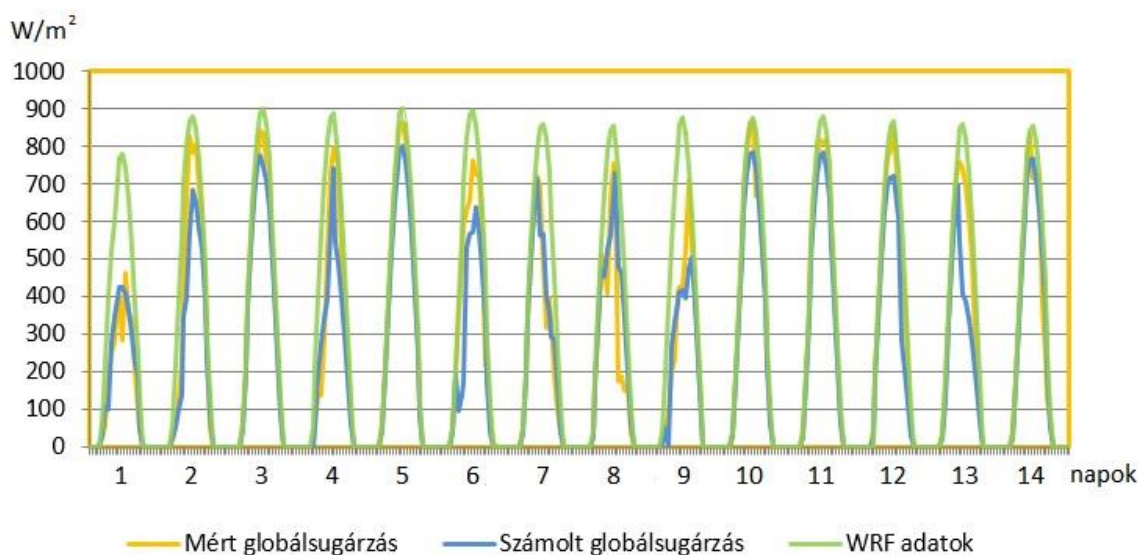
Az eredmények kiértékelését az 6. és 7. fejezetben mutatom be.

6. Számítási eredmények ismertetése

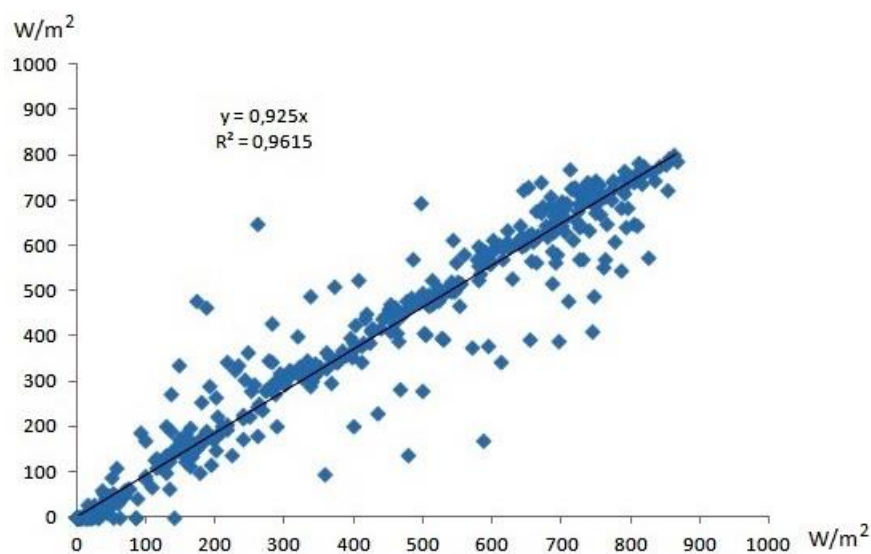
Első lépésként az általunk fejlesztett globálsugárzás számítási modell tesztelését végeztem el. Lépésenként megvizsgáltam a speciális felületeken (vízszines, lejtő, összetett geometria) való futtatásokkal a geometriai számításokat, a sugárzási parametrizációkat, a modellezett sugárzásértékeket. A programot jól áttekinthető módon, minden kifejezést és értéket megmagyarázva készítettem el. A különböző file-okba kiírt eredmények is egyértelműek.

6.1. Sík felszín felett

Nézzük először a vízszintes felszínre jutó globálsugárzást. A mért és a modellezett, valamint a WRF modellből származtatott debreceni adatokat hasonlítottam össze a 2011. augusztusi adatok alapján. A mért és az általunk modellezett globálsugárzás adatok jó egyezést mutatnak, míg a WRF modell felülbecsli a napi maximumokat. Eredményeimet a 4. ábra szemlélteti. A numerikus modell számításokból származó előrejelzési hiba (frontátvonulás, felhőzeti mező előrejelzése) tükröződik az augusztus elsején látható eltérésekben (két jellegében eltérő időjárás a „WRF modellben” és a valóságban).



4. ábra: Mért, számolt és futtatott globálsugárzás összehasonlítása augusztus 1-14 közötti időszakban Debrecenben



5. ábra: Mért és számolt globálisugárzás összehasonlítása augusztus hónapban, lineáris illesztéssel

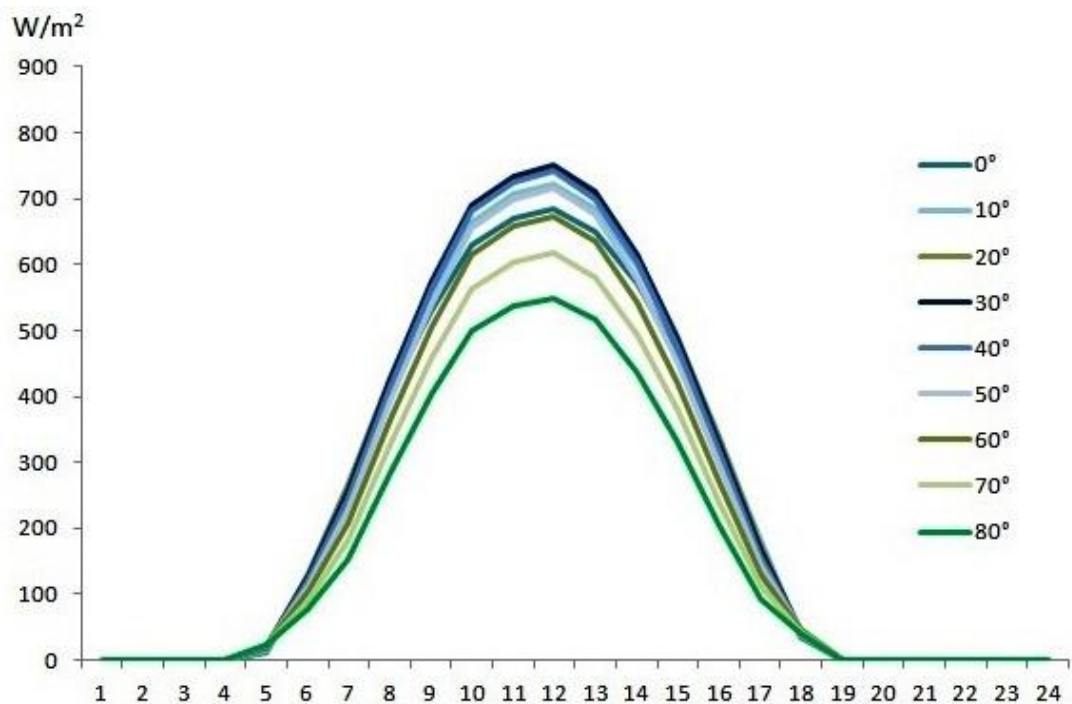
Az 5. ábrán a mért és a debreceni felhőzeti adatok alapján általunk modellezett globálisugárzás közötti kapcsolatot számszerűsítjük. A magas korrelációs együttható ($R^2 = 0,96$) a módszer alkalmazhatóságát mutatja. Az esetenként megjelenő nagy eltérések a mért és a modellezett értékek között a felhőzeti mező becsléséből származhatnak. A debreceni meteorológiai észlelések a repülőtéren folynak, ami a város másik felén van. A sugárzásmérések 10 percnként állnak rendelkezésre, míg a felhőzetet óránként egyszer regisztráljuk, emiatt mindenképp először a mért sugárzásértékek órás átlagát számoltam ki.

6.2. Lejtő felett

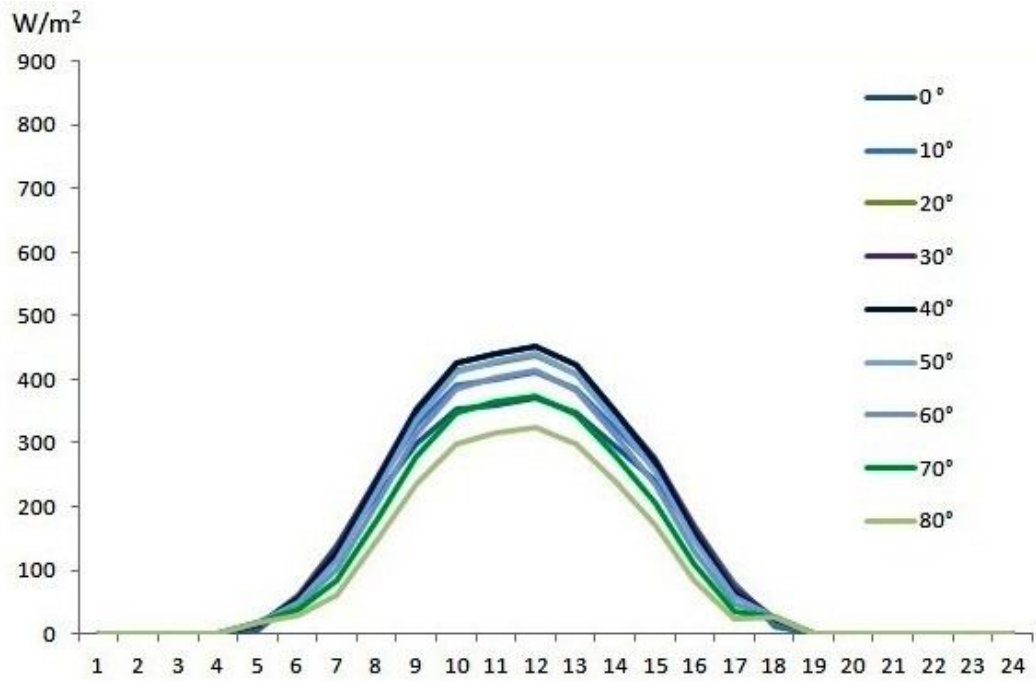
A következő lépésként a különböző kitettségi és hajlásszögű lejtőkre jutó direkt és globálisugárzás értékeket elemezzük felhőmentes és reális felhőzettel jellemzett esetekben. A vizsgálatokat ismét Debrecenre végeztük el. A 2011. augusztusi eredményeket mutatjuk be a négy fő égtájra 10 fokként változtatva a dőlésszöget.

Modellünket minden parametrizációra lefuttattuk. A diplomamunkában a Liu és Jordan-féle globálsugárzás parametrizáció és az ehhez tartozó direkt sugárzás adatokat ábrázolom. Elsőként a globálsugárzás átlagos napi menetét mutatom be felhős légkörben a déli iránynál (6. ábra), majd a direkt sugárzást ugyanerre az irányra szintén felhős légkörben (7. ábra). Ezt követi a felhőmentes esetek vizsgálata a szintén a legnagyobb besugárzással jellemzett déli tájolás mellett (8. és 9. ábra).

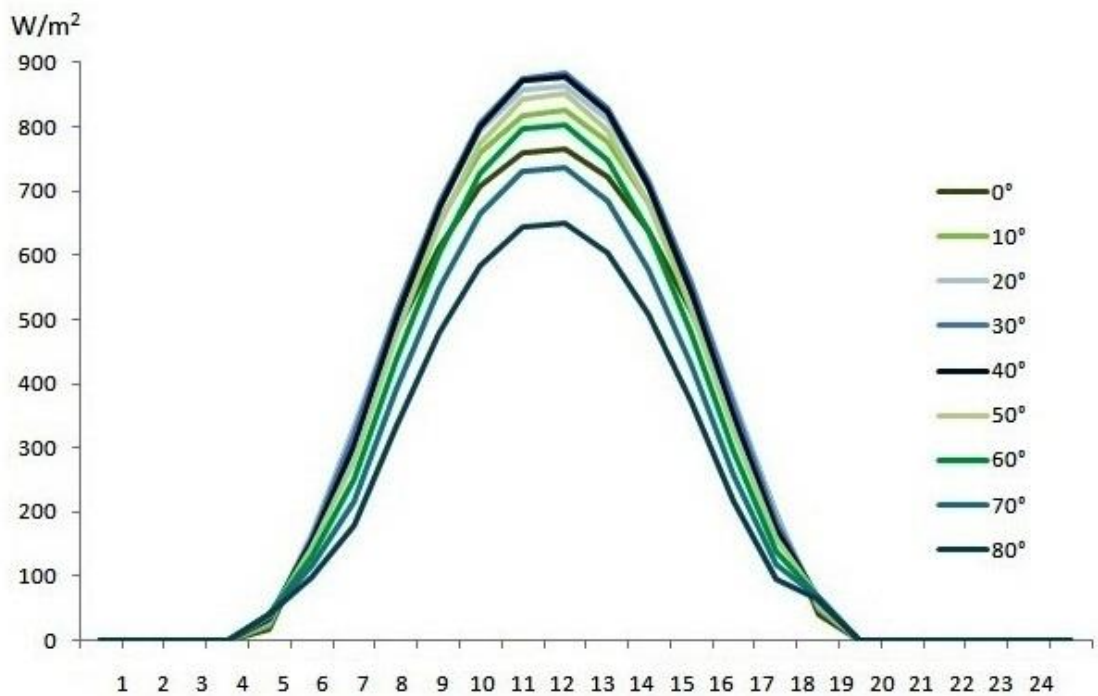
E módszerrel modellezhetővé válik pl. a napkollektorok elhelyezése, és az egységnyi felületre jutó sugárzási energia. Ha az általunk kifejlesztett számítási eljárást összekapcsoljuk egy időjárás-előrejelző modellel, akkor a napsugárzásból származó energia előrejelzésére is vállalkozhatunk pl. egy napkollektoros rendszer részére. (Ez a közeli jövő feladata.)



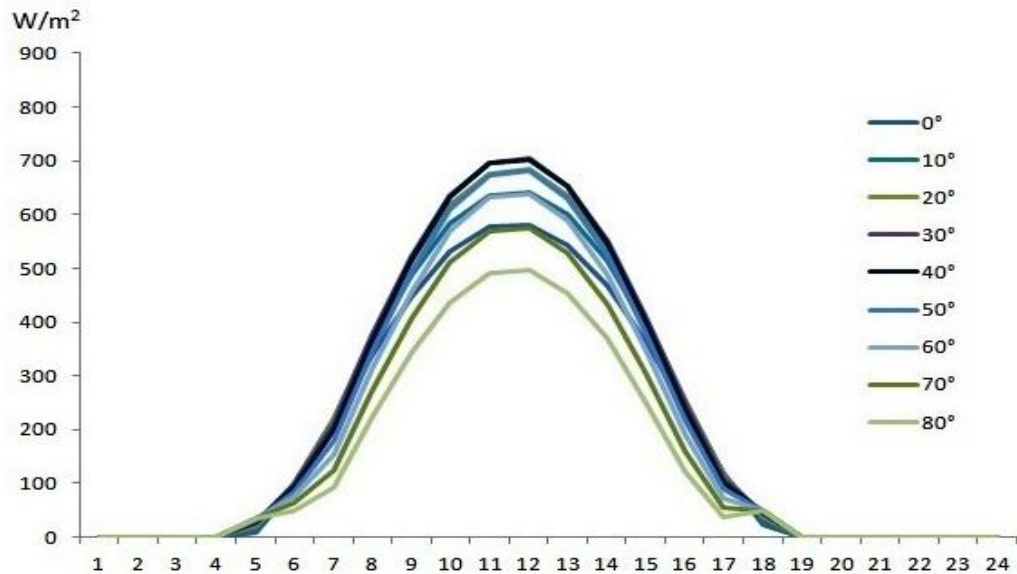
6. ábra: A globálsugárzás átlagos havi menete 2011 augusztusában déli irányítottágú lejtőn a dőlésszög függvényében felhős légkör esetén Debrecenben



7. ábra: A direkt sugárzás átlagos havi menete 2011 augusztusában déli irányítottaságú lejtőn a dőlésszög függvényében felhős légtörés esetén Debrecenben



8. ábra: A globálisugárzás átlagos havi menete 2011 augusztusában déli irányítottaságú lejtőn a dőlésszög függvényében felhőmentes légtörés esetén Debrecenben



9. ábra: A direkt sugárzás átlagos havi menete 2011 augusztusában déli irányítottaságú lejtőn a dőlésszög függvényében felhőmentes légkör esetén Debrecenben

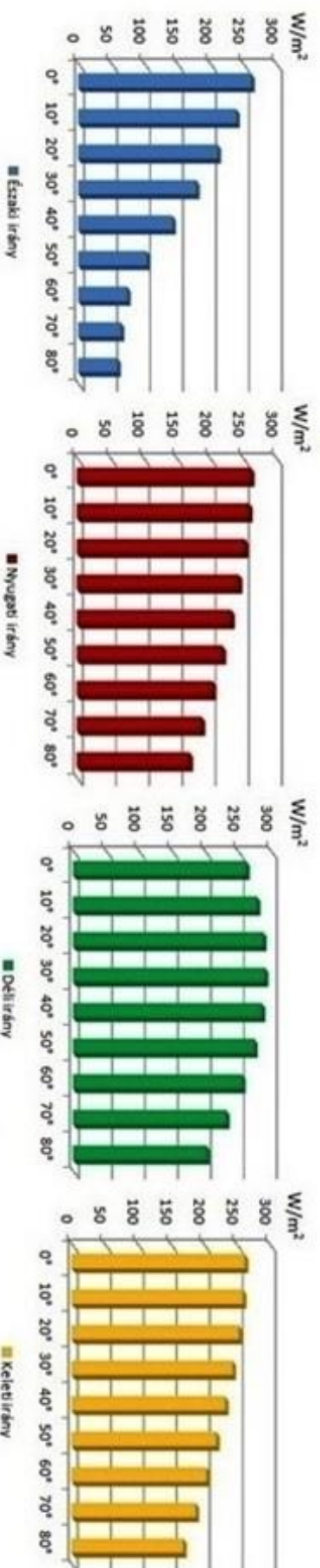
Azért választottam a déli irányt, mert itt mérhető a legtöbb energia és így könnyen összehasonlíthatóak a különböző parametrizációk. Látható, hogy felhős légkör esetén a globálsugárzásnak mintegy 60%-át adja a direkt sugárzás, míg felhőmentes légkör esetén ez az arány 80%-ra módosul. A 6. és 8. ábrát összehasonlítva láthatjuk, hogy a felhős égbolt kb. 35%-kal csökkenti a direkt sugárzás mértékét. Ugyanez az arány globálsugárzás esetén 16% (7. és 9. ábra).

Ezt követően oszlopdigramokon ábrázoltam mind a globál-, mind a direkt sugárzás havi átlagértékeit ($W m^{-2}$, 2011. augusztus, Debrecen) minden szögnél (0° és 80° között 10° -onként) felhős és felhőmentes légkör esetén.

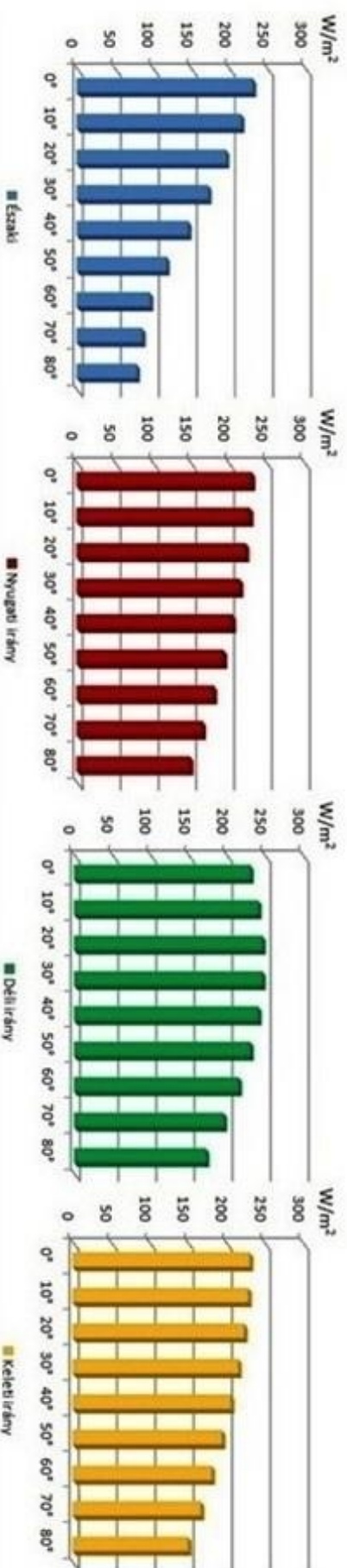
Elsőként (10. ábra) a globálsugárzás értékeit elemeztem. A legmagasabb sugárzásértékeket, déli irányban, mintegy $280 W m^{-2}$ 30° -os lejtőszög esetén. Felhőzet mellett (11. ábra) a globálsugárzás értéke iránytól és dőlésszögtől függetlenül átlagosan $50 W m^{-2}$ -el alacsonyabb. Jól kirajzolódik az árnyékolás hatása az északi lejtőkön. Nagy lejtőszög esetén a direkt sugárzás szinte nullává válik.

A direkt és a globálsugárzás adatainak összevetéséből (10-13. ábra) kitűnik, hogy a diffúz sugárzás a dőlésszögtől függően $50-70 W m^{-2}$ -nyi átlagos teljesítményt ad. A keleti és

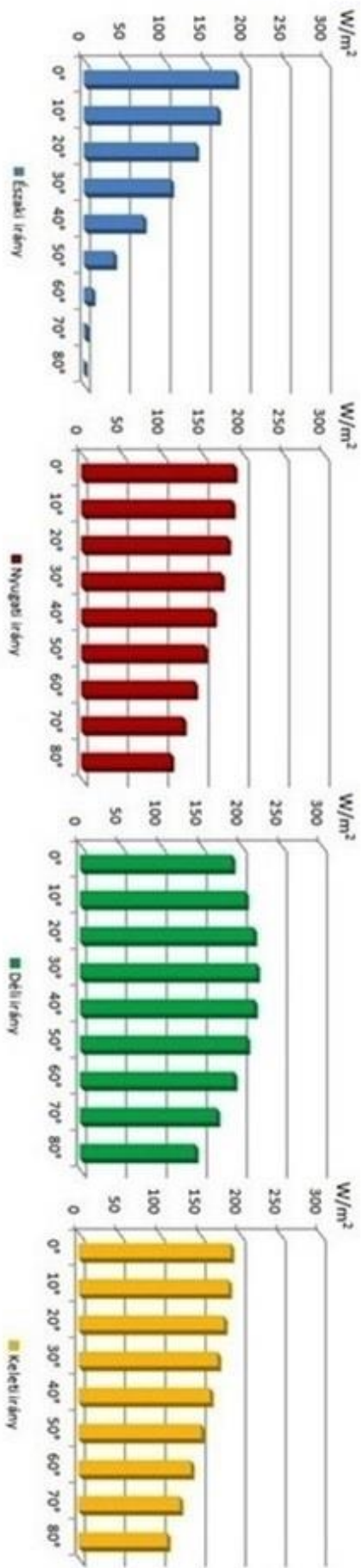
nyugati irányokat vizsgálva hasonló értékeket láthatunk adott dőlésszögnél, ennek oka, hogy a napsugárzás irányára nézve a dőlés szimmetrikus. Végezetül nézzük meg, hogy mekkora energia érkezik a képzeletbeli napkollektor 1 m²-ére. Ha optimális a tájolás (déli irány, 30°-os lejtőszög), akkor a lejutó energia (33%-os hasznosítás esetén) hozzávetőlegesen 80-85 liter vizet tudna felmelegíteni naponta 20°C -kal.



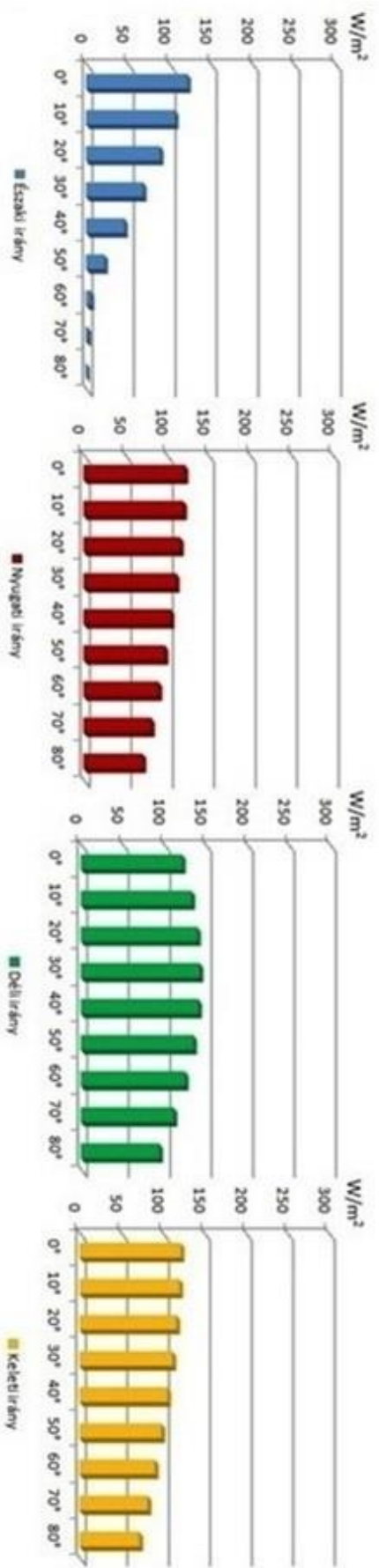
10. ábra: A globálisugárzás órás adatai 2011 augusztusában felhőmentes légkör esetén a dőlésszög függvényében a négy fő égtájnál Debrecenben



11. ábra: A globálisugárzás órás adatai 2011 augusztusában felhős légkör esetén a dőlésszög függvényében a négy fő égtájnál Debrecenben

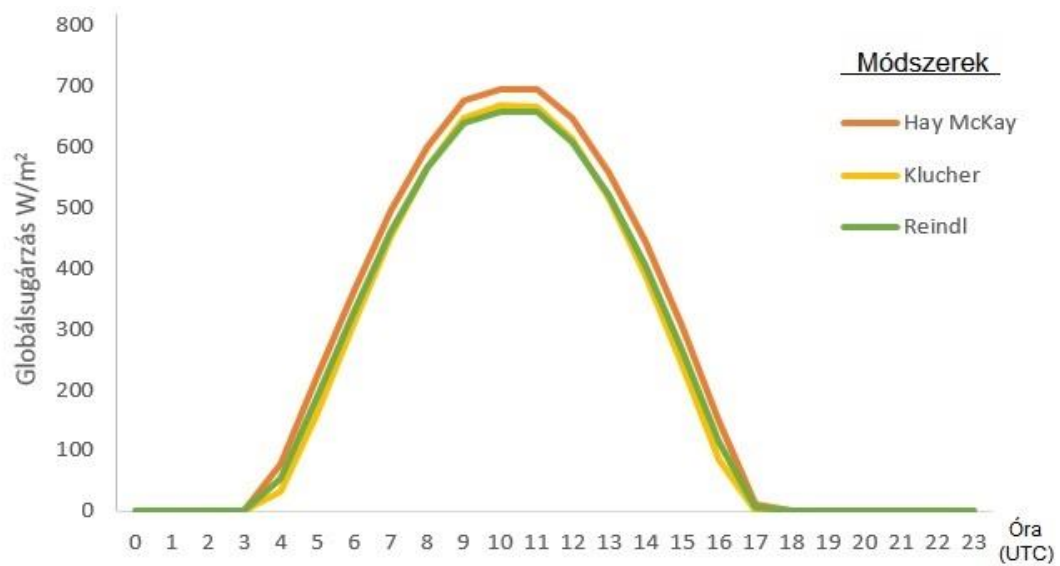


12. ábra: A direkt sugárzás órás adatai 2011 augusztusában felhőmentes légkör esetén a dőlésszög függvényében a négy fő égtájnál Debreceenben



13. ábra: A direkt sugárzás órás adatai 2011 augusztusában felhős légkör esetén a dőlésszög függvényében a négy fő égtájnál Debreceenben

Modellünk –a korábban bemutatott- más parametrizációkkal is képes számolni, ezért bemutatom a lejtőre alkalmazott különböző formulák közötti különbséget a globálsugárzás példáján a 14. ábrán. Látható, hogy a 3.2.-es fejezetben részletesen bemutatott három különböző módszer alig tér el egymástól. A legmagasabb értékeket a *Hay McKay* formula adja, mely a (37)-es képlet alapján számolja a globálsugárzást. A *Klucher* módszer (38) és az előző kettő összevetéséből készült *Reindl* parametrizáció (39) közötti különbség pedig minimális.



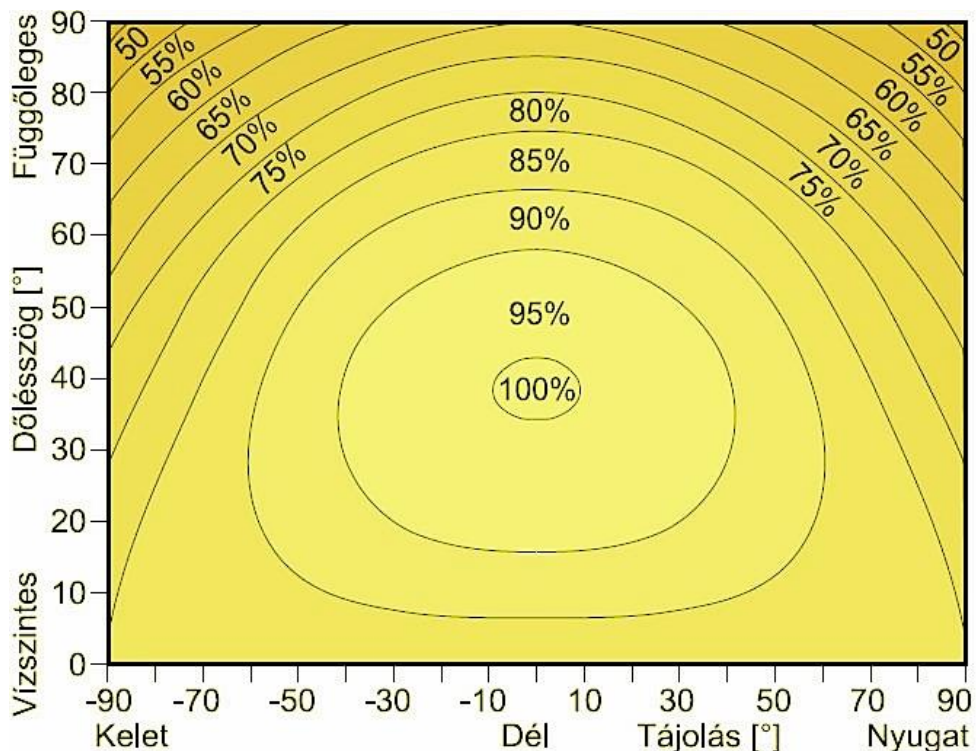
14. ábra: A lejtőre alkalmazott különböző parametrizációk összehasonlítása a globálsugárzás értékekre déli tájolás, 45°-os dőlésszög mellett (Debrecen, 2011.augusztusi adatok alapján)

Mindhárom parametrizáció anizotrop szórt sugárzás feltételezésével él. A *Liu és Jordan (1963)* által kidolgozott formulát ezért sem vettem össze a fentiekkel, az ő képletükkel számolt globálsugárzás jóval alacsonyabb értékeket ad.

6.3. Tájolás

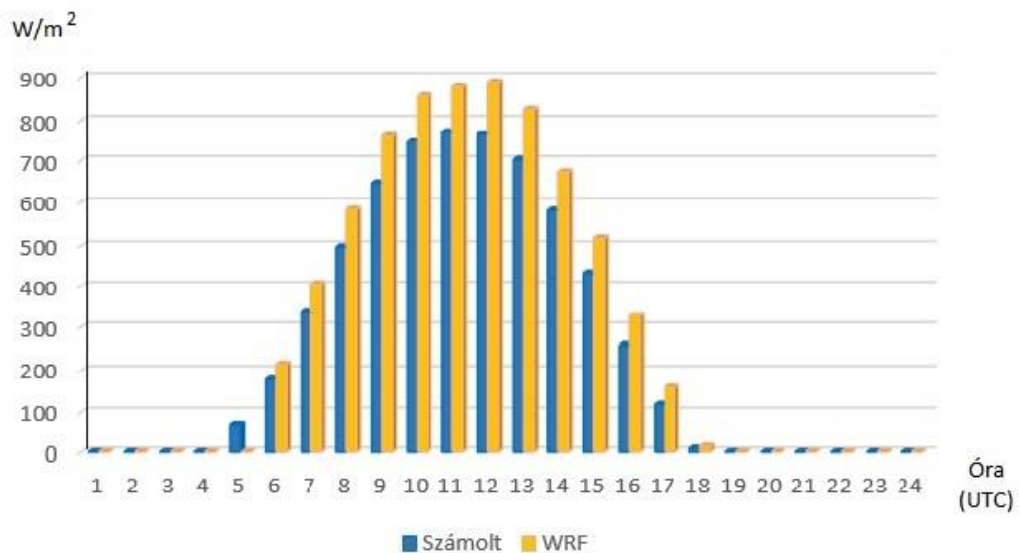
Az előző részben láthattuk, hogy a napenergia hasznosítás céljából nagyon fontos figyelembe vennünk, hogy a napelemeket milyen tájolás és dőlésszög szerint helyezzük el. A sugárzásértékek Magyarországon a déli tájolás 40-45°-os szögénél a legmagasabbak, ez a legkedvezőbb a villamos energia előállítás számára is.

A 15. ábrán a napsugárzás-jövedelem csökkenése az elnyelő felület dőlésszöge és tájolása függvényében látható. Több helyen már úgy helyezik el a napelemtáblákat, hogy arra egy napkövető rendszert építenek, mely értelemszerűen követi a Nap mozgását és így jóval optimálisabb teljesítményt érhetnek el. Ennek azonban az egyértelmű hátránya, hogy bonyolult automatizálási rendszer szükséges hozzá és ez még inkább megnöveli a napelem-rendszer költségét, s újabb esélyt ad a meghibásodásra.

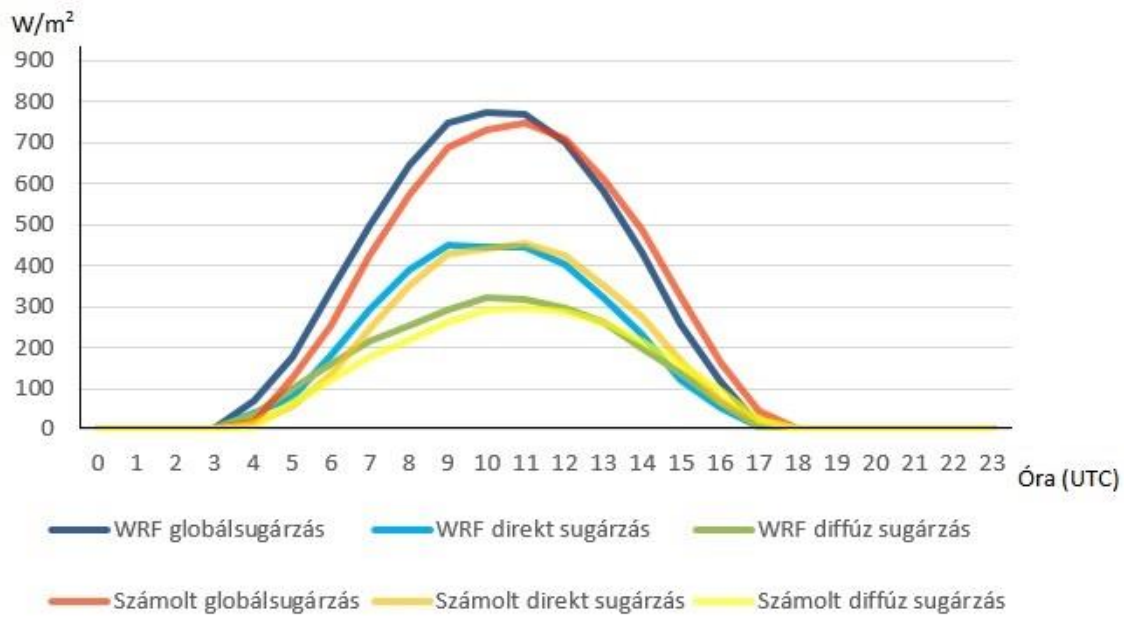


15. ábra: A napsugárzás-jövedelem csökkenése az elnyelő felület dőlésszöge és tájolása függvényében (www.immotherm.hu)

Bebizonyítva, hogy melyik a legmegfelelőbb irány és dőlésszög végeztem egy statisztikai összehasonlítást a programom által számolt és a WRF által futtatott mérések között a déli tájolás 32°-os dőlésszög mellett. (Hasonló számításokat végeztem a kisteleki naperóműnél is.) A statisztikai összehasonlítást a 16. ábrán látható. A globálsugárzás órási adatait vizsgáltam felhős léghő esetén 2011 augusztusában Debrecenben. Ahogy a teljes bevételt vizsgálva is felülbecsült értékeket kaptunk a WRF-től, így ez a várt módon megmutatkozik a választott tájolásnál is. A különbség 10% feletti, ami nem elhanyagolható, s további feladatokat jelent a parametrizációk optimalizálásában (mind a WRF, mind az általunk készített modell esetén).



16. ábra: A globálsugárzás órási statisztikai adatai 2011 augusztusában Debrecenben déli tájolás 32°-os dőlésszög esetén számolt és futtatott értékekkel



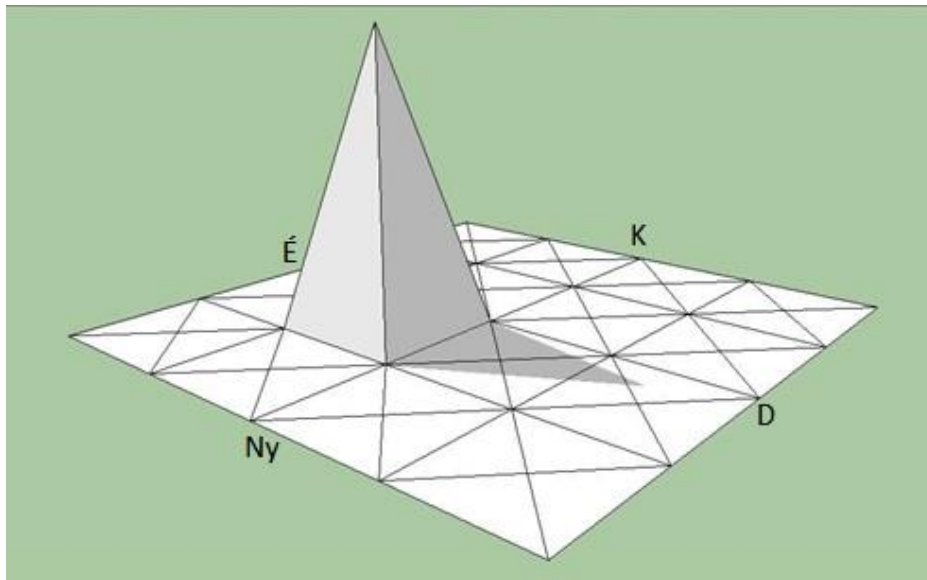
17. ábra: WRF futtatások és az általunk számolt órás sugárzásadatok pontos összehasonlítása a déli 32°-os tájolásnál (Debrecen, 2011.augusztus)

A pontos összehasonlításból is jól látszik, hogy a hideg színekkel jelölt WRF futtatásokból származó adatokat –bár a 32°-os déli tájolásnál nem oly mértékben, mint vízszintes felszínre-, de itt is felülbecslik az általam számolt sugárzási adatokat.

6.4. Árnyékolás

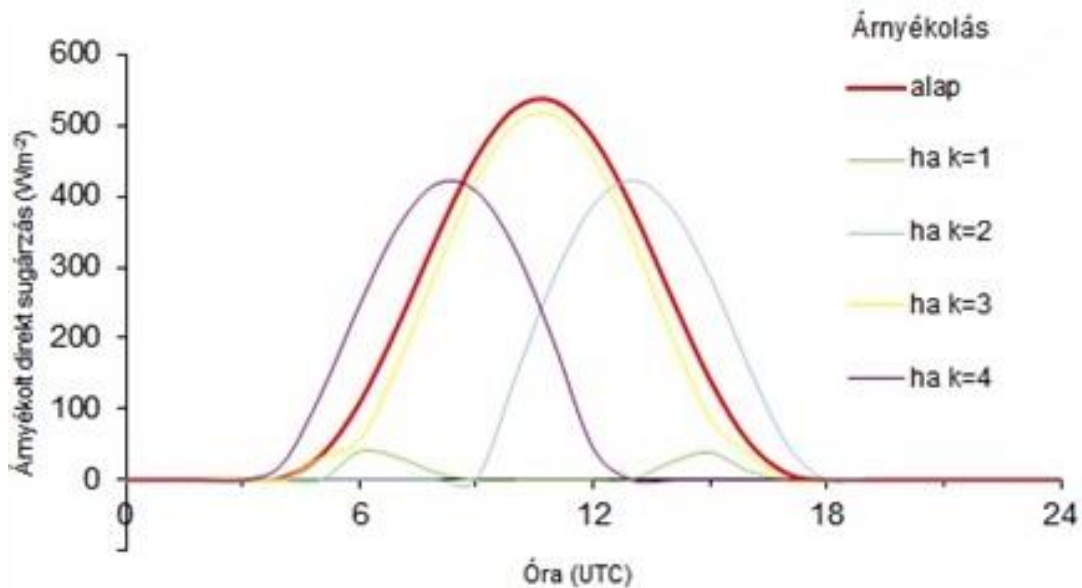
Az árnyékolásnak nagy jelentősége van olyan speciális helyeken, ahol völgyek, bemélyedések találhatóak a felszínen. Az árnyékolás meghatározásához a Nap irányába mutató normálvektor komponenseinek horizontális koordináta rendszerben való felírására volt szükség (Gábris et al., 1999).

A csillagászati jellemzőket (deklináció, óraszög, napmagasság) A légszennyező anyagok transzmissziós szabványainak korszerűsítése. III. fázis. Részjelentés 2. (Práger et al., 1999) című kiadványában található összefüggésekkel írtam fel (már a 3.1. fejezetben is). Árnyékolásnál a nap irányába mutató normálvektor vízszintes vetülete által érintett rácsnégyzetek magasságát vizsgáltam. Ha a magasság nagyobb, mint a vektor z komponense, akkor a vizsgált pont ki van árnyékolva. A programban a *kismag.dat* file-ban adott tartományban beállíthatóak a magassági értékek. A tesztelés során különböző domborzatokat, falakat, épületeket szimbolizáló értékekkel dolgoztam. A sugárzási program e részét 2014-ben fejlesztettem. Az árnyékolás sematikus rajzát a 18. ábra mutatja.



18. ábra: Hegy árnyékolásának szemléltetése a sugárzás értékek ismeretében (Google SketchUp)

Az árnyékolás alkalmazása sikeresnek bizonyult. Példaként egy 100 x 100 m-es alapterületű 100 m magas hegyet szimbolizáló beállítást választottam. A hegyet jellemző négyzetes gúla négy háromszöge a fő égtájak (D, K, É, Ny) fele néz. Az egyes lapokra (a 4 háromszögre) érkező sugárzás napi menete (19. ábra) jól szemlélteti az árnyékolás hatását. Egy derült napot modelleztem (augusztus 11, Debrecen földrajzi szélessége).



19. ábra: Négyzetes gúla (18. ábra) egyes lapjaira érkező direkt sugárzás (2011. augusztus 1.)

k=1 Észak k=2 Kelet k=3 Dél k=4 Nyugat

A sík felszínre jutó direkt sugárzást a piros görbe szemlélteti. A várakozásnak megfelelően markáns napi menetet látunk. Az egyes számú északra néző háromszög mutatja a legnagyobb árnyékolást. Csak a reggeli és az esti órákban éri direkt sugárzás, az is kis intenzitással. Megjegyzem, hogy minden esetben azt vizsgáltam, hogy az egyes háromszögek súlypontjait az adott óra 30. percében milyen szögben éri a direkt sugárzás. A keleti és a nyugati irányba néző háromszögre (a kettes és négyes számú) érkező direkt sugárzás menete egymás ellentettjei, hiszen a hegycsúcstól keletre elhelyezkedő háromszöget a délelőtti órákban, míg a nyugati irányban levőt késő délután éri direkt sugárzás. A dél felé néző oldalra jutó direkt sugárzás hasonló menetet mutat a síkfelszínre jutóval. A valamivel kisebb értékek a nagy 45°-os dőlésszöggel magyarázhatóak. Ezzel az

egyszerű példával jól szemléltethető a program működőképessége, így bátran végezhető tesztek bonyolultabb formák, épületek modellezésére is.

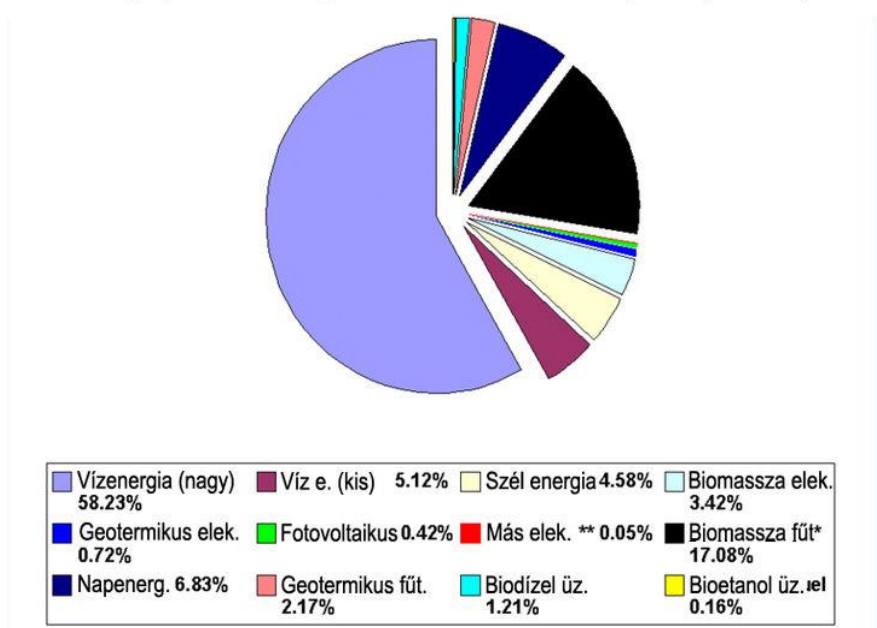
Az itt bemutatott alkalmazás során a felhőzeti értékeket nem vettem figyelembe a könnyebb ellenőrizhetőség céljából, de természetesen beépíthető a felhőzet és alkalmazható a diffúz sugárzást számító modul is.

7. A napenergia felhasználása

A fenntartható jövő érdekében az emberiség számára létfontosságúak az energiahatékony megoldások. Beszélhetünk akár szél, akár víz, vagy éppen napenergiáról, a kulcs az energiatakarékosság és a források széles körben elterjedő hasznosítása. A megújuló energiaforrások segíthetnek szembenézni a globális klímaváltozással és annak társadalmi fejlődésre gyakorolt hatásaival. A megújuló energiaforrás egy olyan természeti jelenség, melyből más-más módszerrel energia nyerhető ki, és folyamatosan, vagy ismétlődően rendelkezésre áll, esetleg jelentősebb mesterséges beavatkozás nélkül maximum néhány éven belül újratermelődik.

Egy 2005-ös felmérés szerint bolygónkon leginkább a vízenergia elterjedt. A négy meghatározó lehetőség (víz, biomassza, napenergia, szél) közül ez több, mint 58%-ot tesz ki (20. ábra).

Megújuló energiaforrások a világon (2005)



20. ábra: Megújuló energiaforrások felhasználásának felmérése a világon 2005-ben
(Wikipédia)

Hazánk természeti adottságaiból adódóan ugyanakkor a legkézenfekvőbb, legkiszámíthatóbb és hosszú távon is biztos forrást a napenergia jelenti. A napenergia voltaképpen nem más, mint a Földet érő napsugárzásból kinyerhető energia. Akár a hőenergia felhasználásával, vagy a fotovoltaikus elektromosság generálásával hasznosítható. A fotovoltaikus azt jelenti, hogy a napsugárzás bizonyos elektrokémiai konfigurációk mellett elektromos energiát termel. Ennek módja lehet aktív, mint a naperőmű vagy a napelem, illetve passzív, mint például az építészeti praktikák (épületek tájolása, árnyékolás, felhasznált építőanyagok) segítségével elért hőmegtakarítás. A napenergia kinyeréséhez naperőművek szükségesek. Ez leginkább egy gyűjtőfogalomnak mondható, mely a megújuló energiaforrásokat felhasználó erőművek egyik csoportja, jelen esetben a napsugárzás energiáját hasznosító erőmű. Ezen belül megkülönböztetünk fotovillamos naperőműveket, melyek napelemeket alkalmaznak, ebben az esetben a Nap elektromágneses sugárzását közvetlenül alakítják villamos árammá. A másik lehetőség a napkollektorok alkalmazása, ahol a Nap infravörös energiáját vízmelegítésre, illetve gőzfejlesztésre használják, ez utóbbi esetben a gőzt turbinákkal alakítják elektromos árammá.

Az első naperőmű egy naphőerőmű volt, amit 1982-től 1988-ig építettek az Egyesült Államokbeli Mojave-sivatagban. A második ennek a továbbfejlesztett változata volt ugyanitt, mely 1994 és 1999 között épült. 2009-re készült el Lipcse közelében a következő fotovillamos naperőmű (Waldpolenz naperőmű), mely már évi 50 ezer tonna szén-dioxid kibocsátást előz meg. Napjainkban számos országban találunk ilyen fejlesztéseket.

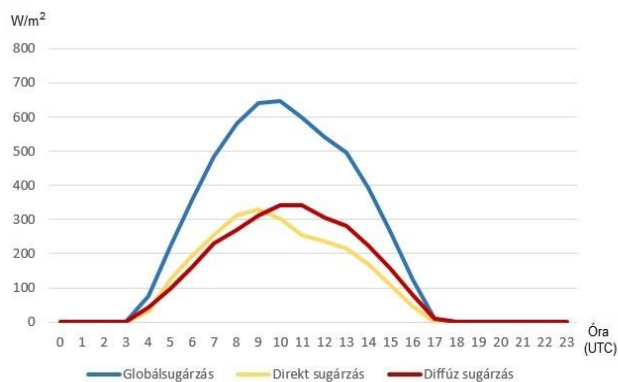
Hazánkban is már több fotovoltikus naperőmű üzemel. Ezek közül az egyik legelső a Csongrád megyei Kisteleken működik 2013 őszétől (21. ábra). Hozzávetőlegesen 170–180 család villamosenergia szükségletét tudja biztosítani. A fejlesztés keretében közel 11 000 m² területen telepítettek napelemeket. A 2124 darab, egyenként 235 W teljesítményű napelemet déli irányba fordítva, 32 fokban megdöntve szerelték fel. A napelemek által a napsugárzás segítségével előállított egyenáramot 15 darab, egyenként 33 300 W váltóárami teljesítmény leadására képes inverter alakítja át váltóárammá. Az így megtermelt és előállított, közel 632 ezer kWh kifeszültségű elektromos áramot egy transzformátor állomás alakítja át középfeszültségre, majd innen továbbítják egy elosztó állomásra. A rendszer által megtermelt áram mennyisége folyamatosan nyomon

követhető és bárki számára hozzáférhető az interneten a német meteocontrol GmbH (Energy and weather Services) honlapján.

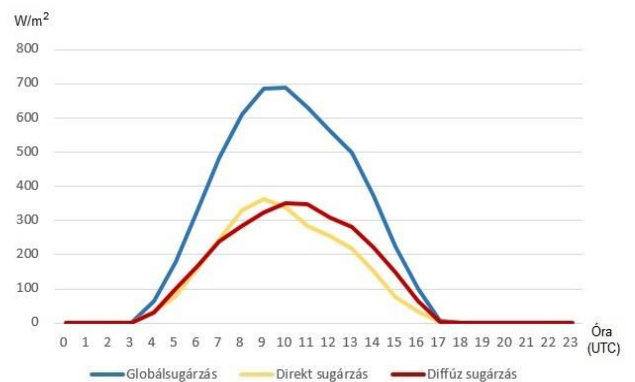


21. ábra: Kisteleki fotovoltaikus naperőmű részlete (Körös Consult)

A megfelelő tájolásnak köszönhető hatékonyságot bizonyítottam Kistelekre is. A 22 és 23. ábrán összehasonlíthatóak a WRF sugárzásértékei és a program által számolt 32°-os dőlésszögű adatok. A vizsgálatokat 2014 augusztusára végeztem el, hogy a debreceni adatokhoz viszonyítani lehessen, ezért a megfelelő nyári hónap. És hogy vizsgálni tudjam a megtermelt energiát -választottam a 2014-es évet- ugyanis a fentebb említett honlapon a naperőmű átadása óta (2013. október) követhető ez nyomon.



22. ábra: Kistelekre futtatott sugárzásértékek 2014 augusztusában



23. ábra: A sugárzásértékek 32°-os dőlésszög esetén Kisteleken 2014 augusztusában

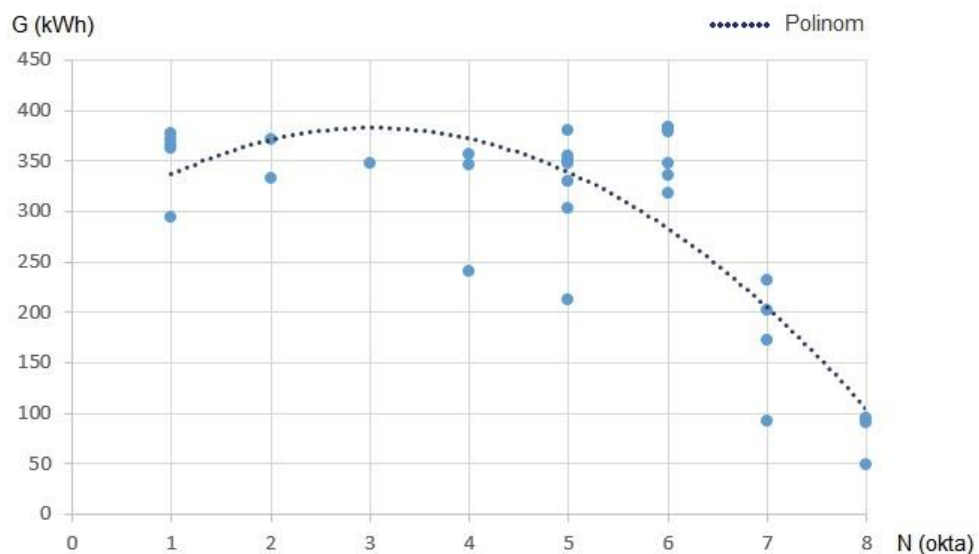
Munkám további részében a kisteleki naperőmű leadott teljesítménye és a felhőzet közötti kapcsolatot vizsgáltam ebben az időszakban a déli (10 UTC-s) adatok alapján a közeli szegedi meteorológiai állomás megfigyeléseire támaszkodva. A 2014. augusztusi

órás termelési adatokat és a szegedi borultsági és felhőalap adatokat az 6. táblázat tartalmazza. Jól látszik a kapcsolat a két változó között.

(10 UTC)	Borultság (okta)	Számolt globális. (Wm ⁻²)	WRF globális. (Wm ⁻²)	Teljesímeny (kW)
Augusztus 1.	6	542,7	564,2	379,1
Augusztus 2.	3	733,6	856,8	346,6
Augusztus 3.	5	635,5	864,6	354,5
Augusztus 4.	8	198,5	128,1	90,8
Augusztus 5.	6	534,6	858,3	347,8
Augusztus 6.	8	196,9	133,0	49,4
Augusztus 7.	6	530,5	599,8	316,9
Augusztus 8.	5	623,3	783,5	302,7
Augusztus 9.	4	680,5	831,0	356,4
Augusztus 10.	5	618,3	861,8	350,3
Augusztus 11.	7	384,3	810,1	231,1
Augusztus 12.	5	613,1	822,9	328,8
Augusztus 13.	2	717,6	886,3	332,2
Augusztus 14.	4	666,0	275,0	365,9
Augusztus 15.	1	715,9	765,4	376,4
Augusztus 16.	6	510,4	733,5	383,0
Augusztus 17.	1	709,2	711,6	293,4
Augusztus 18.	1	705,8	916,6	365,5
Augusztus 19.	5	593,3	903,4	379,6
Augusztus 20.	7	368,5	536,4	201,3
Augusztus 21.	7	366,6	648,9	91,9
Augusztus 22.	2	686,8	845,1	371,6
Augusztus 23.	7	362,7	339,2	172,6
Augusztus 24.	6	489,9	437,9	383,1
Augusztus 25.	4	629,9	601,4	239,7
Augusztus 26.	5	571,4	748,8	212,8
Augusztus 27.	8	178,2	210,9	94,3
Augusztus 28.	1	668,5	867,0	370,5
Augusztus 29.	1	664,5	832,7	362,1
Augusztus 30.	6	472,9	805,2	336,1
Augusztus 31.	5	554,4	778,0	347,8

6. táblázat: 2014. augusztusi időszakban mért napenergia adatok és felhőzeti értékek

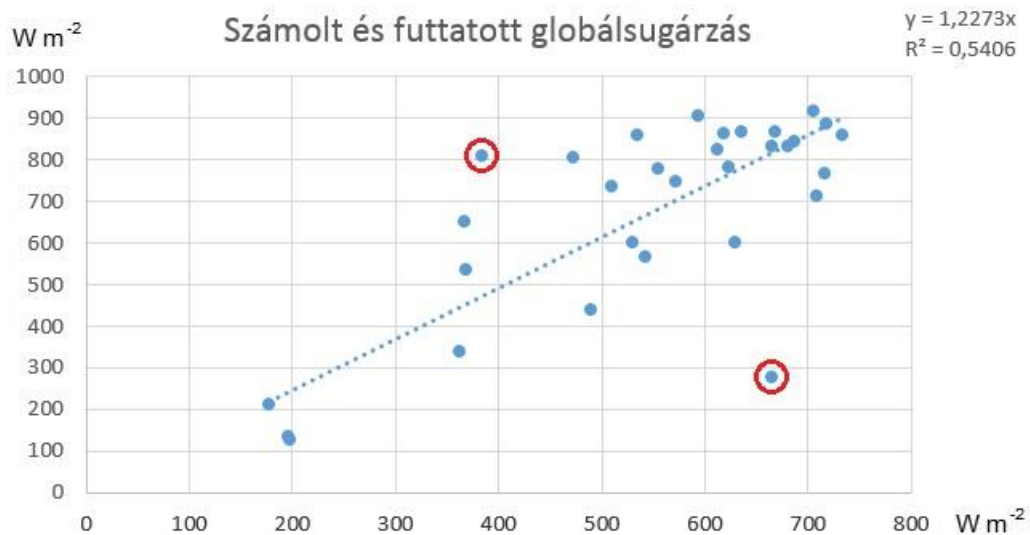
A következő lépésként ezt számszerűsítettem. A 10 UTC-s szegedi borultsági adatok és a naperómű termelési adatait vettem össze. Az eredmények a 24. ábrán láthatóak. A szegedi borultság jó indikátora a naperómű termelésének. Van értelme a szinoptikus állomásokon mért borultsági adatokból az általunk fejlesztett modellel direkt és globálsugárzási adatok előállítására, s ezeket felhasználni a naperóművek termelési becsléséhez.



24. és 25. ábra: Előzetes számításaink (fent) a szegedi felhőzeti adatok és a déli 12 órás termelési adatok közötti kapcsolat elemzésére (Kistelek, 2014. augusztus)
A kisteleki fotovoltaikus naperómű részlete (lent) (www.solargate.hu)

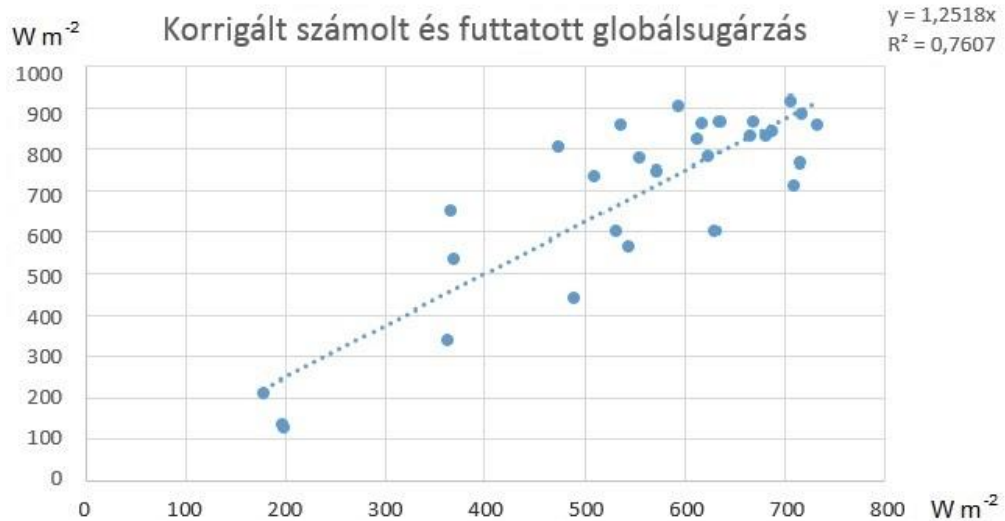
Végezetül a 6. táblázat adatai alapján a következő ábrákon is bemutatom a kapcsolatot az általunk számolt globálisugárzás, a WRF modell globálisugárzása és a naperőmű termelése között.

A 26. ábrán a két féle globálisugárzást vetettem össze. A korrelációs együttható $R^2 = 0,54$, a módszer alkalmazhatóságát mutatja.



26. ábra: Az általunk és a WRF által modellezett globálisugárzások kapcsolata

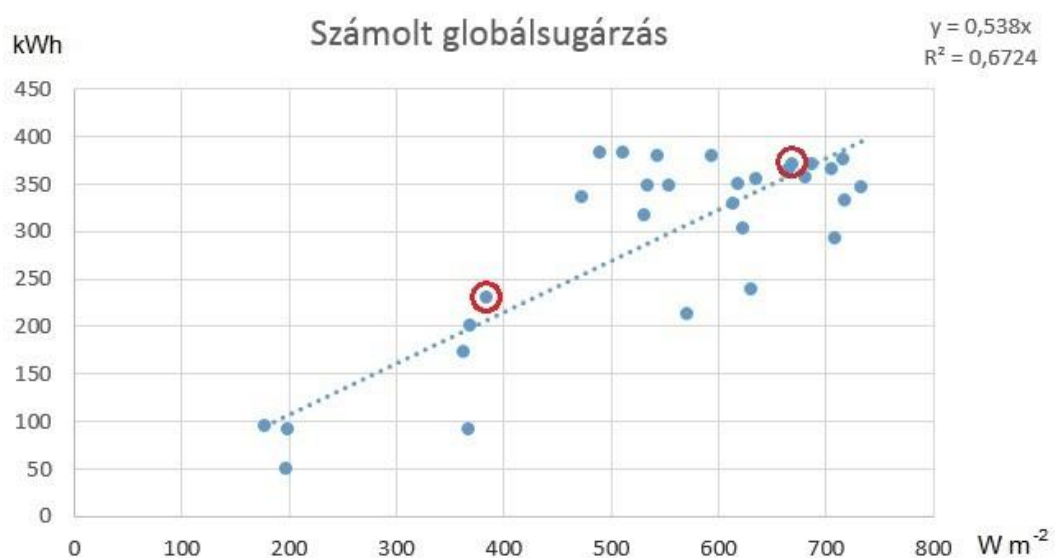
A pirossal bekarikázott pontok a kiugró adatokat jelzik, amennyiben ezt a két értéket kivesszük az adatsorból, a két sugárzás közötti kapcsolat még szorosabb. Ebben az esetben a korreláció értéke jóval magasabb ($R=0,76$). Elég tehát pár rossz előrejelzés, amely rossz irányba viszi a becslést. A korrigált globálisugárzás értékek a 27. ábrán láthatóak.



27. ábra: Kiugró adatok nélküli kapcsolat az általunk és a WRF által modellezett globálisugárzások között

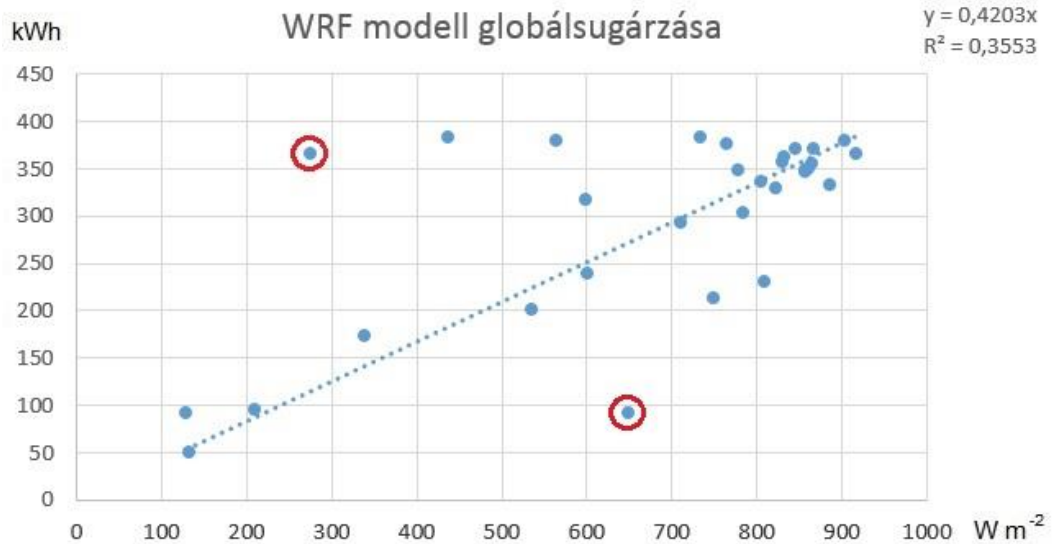
Külön vizsgáltam a sugárzások teljesítménnyel való kapcsolatát, mind az általunk modellezett, mind pedig a WRF futtatásokból kinyert adatokkal. Az előzőekben bemutatott kiugró értékekkel és azok nélkül is elvégeztem a számításokat.

A 28. ábrán az általunk számolt globálisugárzás és teljesítmény kapcsolata látható. Ekkor a korreláció értéke $R^2=0,67$. A két sugárzás összevetésekor megállapítottam a kiugró értéket, ezt a következő ábrán is pirossal jelöltem. Ezt elhagyva a korreláció ($R^2=0,66$) nem sokkal kisebb az eredetnél.



28. ábra: Az általunk modellezett globálisugárzás és a naperőmű teljesítményének kapcsolata

A WRF modell által számolt globálsugárzás és teljesítmény kapcsolata a 29. ábrán látható. Ebben az esetben az $R^2=0,35$. Itt is hasonlóan jelöltem a kiugró értéket, amely nélkül a korreláció ($R^2=0,58$) már egyértelműen magasabb értéket ad. Látható tehát, hogy a WRF nem globálisan rossz, csak egy-egy rossz érték ronthatja le az előrejelzést.



29. ábra: A WRF által modellezett globálsugárzás és a naperőmű teljesítményének kapcsolata

Az előzőekben már megállapítottam, hogy a WRF kicsivel felülbecsül, a két globálsugárzás közötti eltérés 2014. augusztusában 10 UTC-kor Kisteleken 18%. Ugyanez déli irányítottágú, 32°-os dőlésszög esetén 21%.

Ezekkel a vizsgálatokkal bebizonyítottam, hogy az ilyen és ehhez hasonló előrejelzéseknek van létjogosultsága. A kezdeti lépéseket megtettem, ezt követően a számítások még utóvizsgálatokat igényelnek.

8. Összefoglalás

A Nap a legfontosabb éghajlatformáló tényező, a fizikai folyamatok irányítója, a földi élet egyik feltétele és a legfontosabb energiaforrásunk. Ezért is fontos a felszínre jutó napenergia meghatározása, a felszíni sugárzási és energiamérleg komponensek ismerete.

Ma már számos mérési adatsor, numerikus modelleredmény áll rendelkezésre. Furcsa azonban, hogy ritkán találunk domborzatra vonatkozó adatbázisokkal, s nem állnak rendelkezésre könnyen alkalmazható sugárzási komponenseket számító modellek sem. A lejtők, illetve a komplex felszínek energiamérleg komponenseinek vizsgálata a napenergia hasznosítás mellett fontos lehet ökológiai és mezőgazdasági szempontból is.

Dolgozatomban a sugárzási mérleg komponensek parametrizációs eljárásainak áttekintése után Rajna (2003) munkájára támaszkodva elkészítettem egy sugárzási modellt, amely beolvasott meteorológiai paramétereiből határozza meg a lejtőre vonatkozó sugárzásháztartás komponenseit. Ismertettem az alapfogalmakat és a különböző számítások módjait sík felszínre, majd lejtőkre egyaránt. Leírtam a program működési elvét és táblázatba foglaltam az abban használt jelöléseket, mértékegységeket. A modellt teszteltem különböző felületeken és ezeket összehasonlítottam valós, mért értékekkel. A debreceni meteorológiai állomás globálsugárzás adatait használtam referencia mérésneként. A mérések és a modelleredmények jó egyezést mutattak. A lejtőre jutó sugárzás modellezésével egy egységnyi területű napkollektorra jutó direkt- és globálsugárzást modelleztem.

A sugárzási modell továbbfejlesztéseként nem csak egy felületre, hanem egy komplex felszínre is alkalmazhatóvá tettem a programot, meghatároztam az energiamérleg komponenseit és figyelembe vettem az árnyékolást. A felszínre jutó rövidhullámú sugárzás, illetve a sugárzási- és energiamérleg komponensek meghatározására, a lejtők, illetve a komplex felszínek energiamérleg komponenseinek vizsgálata a napenergia hasznosítás mellett többek között ökológiai és mezőgazdasági szempontból is fontos. A sugárzási program fejlesztése mellett foglalkoztam a WRF (Weather Research and Forecasting) numerikus időjárás előrejelző modellel.

Eredményeimet összevettem a debreceni alapéghajlati állomás globálsugárzás adataival (a korrelációs együttható $R^2 = 0,96$ -nak adódott), illetve a WRF előrejelzési modell eredményeivel – itt a WRF modell túlbecslését tapasztaltam. Vizsgáltam lejtők sugárzásháztartását és a módszerünk alkalmazását napelemekre jutó sugárzás meghatározására. Módszerem alkalmas komplex felszínekre jutó direkt és diffúz sugárzás modellezésére.

Célom olyan csatolt felszíni sugárzási modell kialakítása, amely alkalmas a WRF modell eredmények (felhőzet mennyiség: alacsony- közép- és magas-szintű), hőmérséklet, direkt és globálsugárzás utófeldolgozására, a napenergia hasznosításhoz szükséges becslések, valószínűségi előrejelzések készítésére. Az ehhez vezető út első lépéseit megtettem.

9. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. Weidinger Tamás egyetemi docensnek, aki felkeltette érdeklődésemet a téma iránt, hasznos tanácsokkal látott el a sugárzási modell fejlesztésénél, az eredmények kiértékelésénél és segítségemre volt a dolgozat végső formába öntésénél.

Továbbá Rajna Szilárdnak a modell korábbi változatának rendelkezésre bocsátásáért.

Külön köszönet illeti Nagy Zoltán az OMSZ osztályvezetőjét a debreceni mérési eredmények rendelkezésre bocsátásáért.

Nem utolsó sorban köszönettel tartozom családomnak és barátaimnak, akik mindvégig segítettek és támogattak szeretetükkel és türelmükkel a dolgozatom elkészítése során.

A kutatás az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg, a támogatási szerződés száma TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KMR-2010-0003.

10. Irodalomjegyzék

- AERMET, (2004): User's guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET)
U.S. Environmental Protection Agency
<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermetugb.pdf>
- Archer, D., (2011): Global Warming: Understanding the Forecast. Wiley, 207.
- Ács F., Hantel, M., Unegg, J., (2000): The land-surface model family SURFMOD. *Időjárás* 104., 21-41.
- Ács F., (2008): A talaj-növény-légkör rendszer meteorológiai alkalmazású modellezése. ELTE Eötvös Kiadó.
- Allen, R.G., Trezza, R., Tasumi, M., (2006): Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes, *Agricultural and Forest Meteorology* 139., 55-73.
- Bencze P., Major Gy. és Mészáros E., (1982): *Fizikai Meteorológia*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- de Bruin, H.A.R., (2010): Comments on "Greenhouse effect in semi-transparent planetary atmospheres" by Ferenc M. Miskolczi. *Időjárás Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 114(4)., 319-324.
- Czelnai R., (1995): *Bevezetés a meteorológiába*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Dávid A., Takács O., Tiringér Cs., (1990): A sugárzási egyenleg eloszlása Magyarországon az 1951-1980-as időszak adatai alapján. *OMSZ kisebb kiadványai* 66.szám.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences* 46, 3077–3107.
- Fleagle, R.G. and Businger, J.A., (1980): *An introduction to atmospheric physics* Academic Press, 432.
- Foken, T., (2006): *Angewandte Meteorologie*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg; Allgemeine Grundladungen 7–23; Grundgleichungen der atmosphärischen Turbulenz 39–52.
- Foken, T., (2008): The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications* 18(6), 1351–1367.
- Gábris Gy., Marik M., Szabó J., (1999): *Csillagászati földrajz*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Grosz B.P., (2010): Üvegházhatású gázok (CO₂, N₂O, CH₄) talajfluxusainak meghatározása magyarországi mezőgazdasági és erdőszült területeknél. PhD dolgozat, ELTE Kémia Doktori Iskola, Budapest.
- Gueymard, C.A., and Zemel, A., (2001): Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy* 71(5), 325–346.
- Häntzschel, J., Goldberg, V. and Bernhofer, C., (2005): GIS-based regionalisation of radiation, temperature and coupling measures in complex terrain for low mountain ranges. *Meteorol. Appl.* 12, 33–42.

- Holtslag, A. A. M. and Van Ulden, A. P., (1983): A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. Climate Appl. Meteorol.* 22(4), 517–529.
- Izomon, M.G. and Mayer, H., (2002): Assessment of some global solar radiation parameterizations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64, 1631–1643.
- Justyák J., Tar K., (1973): A déli lejtőre és a vízszintes felszínre jutó közvetlen sugárzás kapcsolata. *Időjárás* 77, 165-174.
- Justyák J., Tar K., (1974): A keleti és nyugati lejtőre és a vízszintes felszínre jutó közvetlen- és globálisugárzás kapcsolata. *Időjárás* 78, 228-234.
- Kang, S., Kim, S., Lee, D., (2002): Spatial and temporal patterns of solar radiation based on topography and air temperature. *Can. J. For. Res.* 32., 487-497.
- Kasten, F., (1989): Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und Atmosphäre, VDI Berichte NR. 721., 131-151.
- Klucher, T.M., (1979): Evolution of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23., 111-114.
- Kugler Sz., Weidinger T., Ács F., Vörös M., (2014): A Balaton energiaháztartásának modellezése standard meteorológiai mérések alapján *Ecology of Lake Balaton/A Balaton ökológiája* 2(1), 13–42.
- Lengfeld, K., Macke, A., Feister, U., Güldner, J., (2010): Parametrization of solar radiation from model and observations, *Meteorologische Zeitschrift*, 19(1)., 25-33.
- Liu, B.H.Y. and Jordan, R.C., (1960): The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 10., 72-77.
- Mészáros R., (2002): A felszínközeli ózon száraz ülepedésének meghatározása különböző felszíntípusok felett. PhD dolgozat, ELTE TTK, 113.
- Mesinger, F., and A. Arakawa. 1976. Numerical methods used in atmospheric models. *GARP Publ. Ser.*, (17) I, 64 pp.
- Meteocontrol GmbH
<http://public.solarmonitoring.net/dashboard/system/UUYXE/OsuLxO3GE2>
- Molnár Cs., (2012): Komplex felszín sugárzásmérleg komponenseinek modellezése. Szakdolgozat. ELTE TTK Fizika BSc. (Témavezető: Weidinger T.), Budapest, 49 oldal.
- Morvai A., (1973): Számítási módszer a globálisugárzás-összegek meghatározására. *Időjárás* 77, 311-314.
- Nagy Z., Weidinger T., Szász G., Baranka Gy., Tóth Z., Nagyné K. E. és Törék O., (2008): Célzott éghajlati mérőhálózat a globális klímaváltozás magyarországi hatásainak nyomon követésére. Magyar Földrajzi Konferencia, Debrecen, <http://geography.hu/mfk2008/pdf/NagyZ.pdf>
- Nagy Z., Szász G., Weidinger T., Baranka Gy., Kovács N., Decsi A., (2012): Long term micrometeorological and energy budget measurements in Agrometeorological Observatory in Debrecen. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-8915.

- Németh Á., (2004): A globálsugárzás modellezése digitális domborzatmodell alkalmazásával. HUNDEM, A digitális domborzatmodellek alkalmazása a környezet- és mérnök-tudományokban, Miskolc, CD-ROM, 7.
- Noilhan, J. and Mahfouf, J.F., (1996): The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* 13., 145-159.
- Oliphant, A.J., Spronken-Smith, R.A., Sturman, A.P. and Owens, I.F., (2003): Spatial Variability of Surface Radiation Fluxes in Mountainous Terrain. *J. Appl. Meteor.* 42., 113–128.
- Práger, T., Ács, F., Baranka, Gy., Feketéné, N. K., Mészáros, R., Szepesi, D. és Weidinger, T., (1999): A légszennyező anyagok transzmissziós szabványainak korszerűsítése. III. fázis. Részjelentés 2.
- Rajna Sz., (2003): Lejtők sugárzásviszonyainak modellezése. Diplomamunka ELTE TTK Meteorológiai Tanszék (Témavezető: Weidinger T.), Budapest, 52 oldal.
- Ricchiazzi, P., Yang, S.R., Gautier, C., and Sowle, D., (1998): SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 79(10)., 2101-2114.
- Salby, M.L., (1996): An introduction to atmospheric physics. Academic Press, 627. http://books.google.com/books?id=xWQOG-_UTBoC&hl=hu&sitesec=reviews
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W. and Powers, J.G., (2005): *A Description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR, NCAR/TN-268+STR.*
- Shafii, M. and De Smedt, F., (2009): Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13., 2137–2149.
- Szász G., (2002): Energy budget between the atmosphere and the surface in the vegetation period during 1963-1994. *Időjárás* 106(3-4), 161–184.
- Szász G., és Nagy Z., (2007): A légköri és a felszíni hatások elkülönítésének lehetőségei a felszín közeli sűrűlódási rétegben – Weidinger T., Geresdi I., szerk.: 32. Meteorológiai Tudományos Napok 2006. Felhőfizika és mikrometeorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 125-150.
- Takács O., és Major Gy., (1974): A napfénytartam és a globálsugárzás változása a magassággal Magyarországon mért adatok alapján. *Időjárás* 78 (4), 281-287.
- Takács O., (1981a): A vertikális felületre jutó napsugárzási energia napi menete és gyakorisági eloszlása. *Időjárás* 85 (1), 33-42.
- Takács O., (1981b): A függőleges és vízszintes felületre jutó szórt sugárzás aránya. *Időjárás* 85 (4), 220-225.
- Takács O., (1981c): A keleti, és nyugati irányítású vertikális felületre jutó napsugárzási energia napi menete és gyakorisági eloszlása. *Időjárás* 85 (5), 278-292.
- Takács O., (1989): A tipikus sugárzás meteorológiai évben a függőleges felületekre jutó szórt sugárzás adatsorai. *Időjárás* 93 (5), 296-303.

Tar, K., Makra, L. and Lóki J., (1998) A mathematical model of shading rows of plants. *Int. J. Ambient Energy* 19(2), 69–74.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. and Kiehl, J., (2009): Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 90(3), 311-324.

Weather Research and Forecasting Model

http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf

Weidinger, T., Nagy, Z., Baranka, Gy., Mészáros, R., and Gyöngyösi, A.Z., (2008): Determination of meteorological preprocessor for air quality models in the New Hungarian Standards. *Croatian Meteorological Journal*, Special issue for the 12th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO 12., 460–464.