

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Rövidhullámú sugárzás mérése és modellezése

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Kerek Aliz Natália

Földtudományi alapszak,
Meteorológia szakirány

Témavezető:

Dr. habil Mészáros Róbert

ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalom

1. Bevezetés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Rövidhullámú sugárzás és komponensei	4
2.2. Rövidhullámú sugárzás mérése	5
2.3. Rövidhullámú sugárzás modellezése vízszintes felületen	8
2.3.1. A havonkénti napi átlagos globálsugárzás modellezése.....	8
2.3.2. Órás felbontású globálsugárzás modellezése.....	12
2.4. Rövidhullámú sugárzás modellezése dőlt felületen	13
2.4.1. Izotróp modellek	14
2.4.2. Anizotróp modellek.....	14
2.4.3. Izotróp és anizotróp modellek beválása különböző alkalmazásokra	15
3. A felhasznált izotróp modell bemutatása	17
3.1. A globálsugárzás meghatározása vízszintes felületen	17
3.2. Rövidhullámú sugárzás meghatározása ferde felületen.....	18
4. Mérések	22
4.1. A felhasznált műszer és kalibrációja	22
4.2. Mérési adatok	25
5. Eredmények és következtetések	27
6. Összefoglalás	32
Köszönetnyilvánítás	33
Irodalomjegyzék	34

1. Bevezetés

A légköri jelenségek motorja a Naptól érkező rövidhullámú sugárzás. Éppen ezért a meteorológiai gyakorlatban nagy jelentőséggel bír ennek a légköri állapotváltozóknak a mérése és modellezése. Az elmúlt évszázadban mind a mérés-technika, mind a modellezés jelentős fejlődésen ment át. Mára már számos különböző elven működő mérőeszköz és változatos modellezési eljárás áll rendelkezésünkre egy adott felszínre eső teljes rövidhullámú sugárzás, valamint az egyes rövidhullámú sugárzási komponensek mennyiségének meghatározására. A mért illetve modellezett sugárzási adatok alapvető információt jelentenek az időjárás-előrejelző és a környezeti modellek számára, de egyre nagyobb szerepet kapnak a napenergia felhasználás, a biometeorológia és az építészet terén is.

Manapság a fosszilis tüzelőanyagok megfogyatkozása és a melléktermékként kibocsátott széndioxid hatására megerősödött üvegházhatás miatt, egyre nagyobb szerephez jutnak – az atomenergia mellett – a megújuló energiák, amelyek nem járnak károsanyag-kibocsátással és helyben szolgáltatnak energiát. Ezek közé tartozik a napenergia egyre szélesebb körben elterjedt hasznosítása, fotovoltaikus rendszerek valamint napkollektorok formájában. Ezen berendezések megtérülési ideje nagyban függ attól, hogy adott helyen, irányban és szögben elhelyezve mennyi energiát képesek termelni áram vagy hő formájában. Az északi félgömbön a Nap és Föld relatív helyzete miatt a legtöbb sugárzás déli irányból érkezik, ám a napelem vagy napkollektor felszínnel bezárt optimális szöge a földrajzi szélességgel növekszik (*Chang, 2009*). Ennek az ideális szögnek és a várható megtérülési időnek a meghatározásában is segítséget nyújthat egy olyan sugárzási modell, amely képes meghatározni akár a ferde felszínre eső sugárzást is különböző dőlésszögekben.

Az élőlények energiaháztartására is szignifikáns befolyása van az általuk elnyelt rövid- és hosszuhullámú sugárzási fluxus-sűrűségnek, ezért a humánmeteorológia és a mezőgazdaság területén is nagy az érdeklődés az olyan módszerek iránt, amelyekkel ez a hatás könnyen becsülhető (*Matzarakis et al., 2009*). Ilyen például a RayMan szoftver, amellyel többek között kiszámíthatunk sugárzási fluxus-sűrűséget, napfénytartamot, és termo-fiziológiásan fontos indexeket csupán néhány alapvető meteorológiai állapotváltozó és gyakori biometeorológiai indexek segítségével.

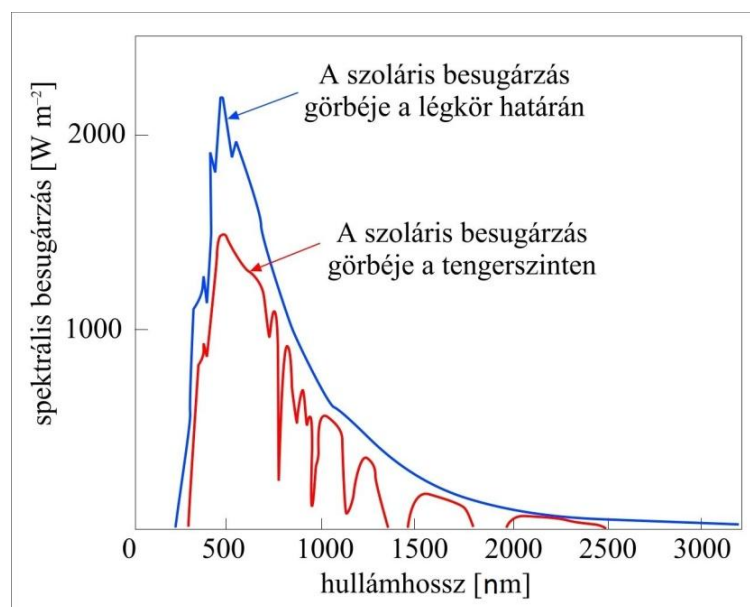
Az építészetben is mindig fontos szerepet játszott a napfény. Az emberek elsődleges igényei lakásvásárlás esetén a kényelmes elosztás, a napfényes szoba és az alacsony fűtésszámla. Ezek eléréséhez nagyméretű ablakokat, meleg burkolatokat és hőszigeteléseket használnak, nyáron azonban a nagyméretű ablakokon rengeteg napenergia érkezik, amelyet a hőszigetelő falak benntartanak, így a szoba kellemetlenül felmelegszik (Szabó, 2001). Ezért az építészeti tervezésben és árnyékolástechnikában is fontos szereppel bír a beeső sugárzás ismerete, különösen ferde felszínen, hisz a falak függőlegesek, a tetők pedig – amelyeket egyre gyakrabban építenek be a dráguló telekárak miatt (Szabó, 2001) – valamilyen hegyes szöveget zárnak be a vízszintessel.

Dolgozatomban először a rövidhullámú sugárzást illetve az annak mérésére használt eszközöket mutatom be, majd áttekintést adok a horizontális és ferde felszínre érkező sugárzás becslését leíró különböző típusú sugárzási modellekről. Végül bemutatok egy olyan izotróp modellt, amely a ferde felszínre eső sugárzást is képes kiszámítani, valamint saját méréssorozatot, amely segítségével – elsősorban vízszintes felszín és derült égbolt esetén – ezen modell verifikációjára törekedtem.

2. Szakirodalmi áttekintés

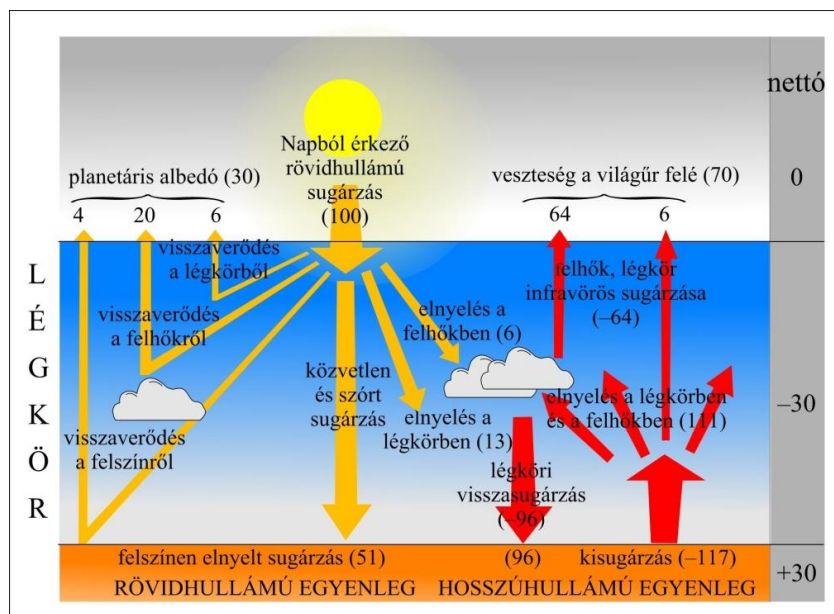
2.1. Rövidhullámú sugárzás és komponensei

A Napból érkező sugárzás a 4 μm alatti hullámhossztartományba esik, amelyet rövidhullámú sugárzásnak nevezünk. Maximumát a látható fény tartományában, 555 nm-en veszi fel (1. ábra). Ennek következtében a szemünk is erre a hullámhossztartományra optimalizálódott.



1. ábra A Nap sugárzási spektruma
[1 - Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek]

A Nap korongjából érkező direkt (R_{dir}) és a levegőben lévő részecskéken szóródó diffúz (R_{diff}) sugárzást együttes néven globálsugárzásnak hívjuk, amely a felső féltérből a vízszintes síkra érkező összes rövidhullámú sugárzást jelöli és a légkör külső határára érkező sugárzás mintegy 51%-át teszi ki. Ez a csökkenés a légköri összetevőkön (elsősorban O_3 , CO_2 , H_2O , N , N_2 , O , O_2) történő elnyelődésnek köszönhető. A talajról és a légkör alkotóiról albedójuk függvényében visszaverődő reflexsugárzás globális szinten a bejövő sugárzás mintegy 30%-át teszi ki. A fennmaradó 19% a légkörben elnyelődik. Ezek különbségéből származtatjuk a Föld rövidhullámú sugárzási egyenlegét. (2. ábra)



2. ábra: A Föld rövid- és hosszuhullámú, valamint nettó sugárzási egyenlege [1 - Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek]

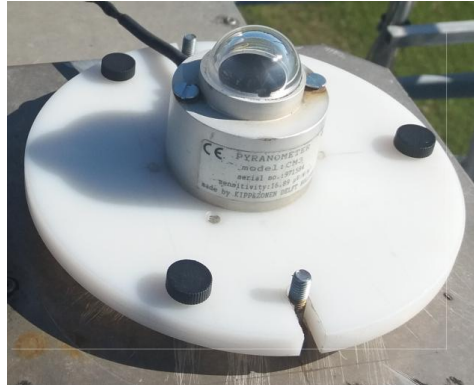
Két további, a bioszféra szempontjából fontos hullámhossztartomány az ún. fotoszintetikusán aktív sugárzási tartomány (Photosynthetically Active Radiation – PAR) 0,38–0,72 μm között és a közeli infravörös tartomány (Near Infrared Radiation – NIR) 0,8–2,5 μm között, amelyeket – ahogy a későbbiekben látni fogjuk – a vizsgált modell különböző parametrizáció mellett szintén kiszámít.

2.2. Rövidhullámú sugárzás mérése

A napsugárzás mérésére számos elvi megoldás létezik, mivel a Napból érkező energiát közvetlenül nem tudjuk mérni, csupán az elnyelt energia által kiváltott hatást tudjuk a sugárzás intenzitásával arányosítani. Ezek között két fő csoportot különböztetünk meg, – amelyek a fény két különböző természetét használják ki – ezek a hőhatáson és a fotonhatáson alapuló műszerek.

A mai meteorológiai alkalmazásban a sugárzásmérésére leggyakrabban a hőhatáson alapuló műszerek termikus csoportjába tartozó valamilyen termoelektromos elven működő érzékelőt használnak, amely a fény hullámtermészetét használja ki. Ezekben a sugárzás hatására létrejött valamilyen elektromos jellemző megváltozását mérjük. Ide tartozik például a rövidhullámú sugárzás mérésére leggyakrabban használt piranométerek egy csoportja. Ezen belül is két fajtát különböztetünk meg: fekete (3. ábra) és fehér-fekete érzékelős (4. ábra) piranométereket.

Az előbbi esetben a piranométer közepén egy mintegy 14 mm átmérőjű fekete tárcsa helyezkedik el, amely koncentrikus körökben sűrűn elhelyezett nikkell-krómnikkel termoelemekből áll. Napsugárzás hatására hőmérsékletkülönbség alakul ki a fekete érzékelő, a fehér műszertest és az üvegbúra között, amelynek hatására elektromos áram indul meg a sorba kapcsolt termoelemeken. Ennek az áramnak a nagysága arányos a sugárzás intenzitásával. Éjszaka a sugárzás hiányában a hőmérsékletkülönbség megfordul így negatív sugárzás, ún. nullpont depressziót jön létre.



3. ábra: Fekete érzékelős piranométer az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában

A második esetben az érzékelő fekete és fehér termoelemekből áll, amelyek leggyakrabban sugarasan váltják egymást a kör alakú érzékelőn (4. ábra). Ezek között hőmérsékletkülönbség alakul ki, és szintén elektromos áram indul meg, amelynek erőssége nemcsak a hőmérséklet-különbséggel és így természetesen a sugárzással arányos, hanem az érzékelő nagyságával is. Ebből kifolyólag a meginduló áram erőssége kisebb a fekete érzékelős műszereken, mint a fekete-fehér érzékelővel ellátott társaikon, amelyek nagyobb méretűek.



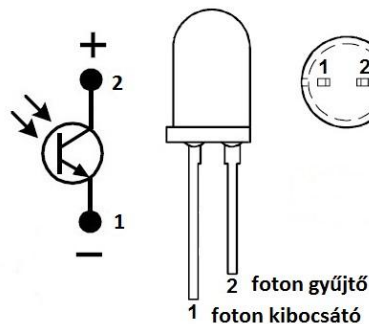
4. ábra: Fekete-fehér érzékelős piranométer

A műszert fedő kettős üvegbura 4 féle szerepet lát el: azon túl, hogy védi az érzékelőt a környezeti hatásoktól és fókuszálja a sugarakat – mint már láttuk – szerepet játszik az áram kialakulásában, valamint kiszűri a $4\ \mu\text{m}$ -nél hosszabb hullámú sugárzást. A kettős üveg közötti levegő hőszigetelőként funkcionál, így csökkentve a konvektív hőveszteséggel járó mérési hibát. Egy piranométert felfelé, egyet pedig lefelé fordítva a globálsugárzás és a reflexsugárzás mérése is kivitelezhető. Így a kettő különbségeként megállapítható a rövidhullámú sugárzási egyenleg valamint kiszámítható az albedó, amely a reflex és a globálsugárzás hányadosa, 0 és 1 közötti szám.

A piranométert egy napkövető árnyékoló rendszerrel ellátva a szórt sugárzás mérhető. A piranométerek elhelyezése a meteorológiai állomásokon vízszintes síkban történik.

A hőhatáson alapuló, termikus érzékelők másik csoportját a termomechanikus érzékelők alkotják. Ezek a legkorábbi sugárzásmérő műszerek közé tartoznak. Ilyen eszközök segítségével a sugárzás hatására bekövetkező mechanikai jellemzők változását mérjük és arányosítjuk a sugárzás intenzitásával. További hőhatáson alapuló műszerek a kalorikus érzékelők, amelyekben sugárzás hatására a belsőenergia megváltozását érzékeljük.

A másik alapvető működési elv a fotonhatás, amely a fény anyagi természetét használja ki. Ezek a műszerek a megfelelő áramkörbe kapcsolva, fotonokkal kölcsönhatásba lépve szintén elektromos jelet hoznak létre, amely arányos a sugárzás mennyiségével. Ide tartozik például a fotocella, a fényelem, a fototranzisztor (5. ábra), a fotoellenállás, a fotodióda (6. ábra), a foto-elektronsokszorozó ill. egyes piranométerek is, ugyanakkor ezen műszerek mérési spektruma jóval kisebb (általában $0,3$ és $1,1\ \mu\text{m}$ közötti), mint a termo-elektromos eszközöké.



5. ábra: Fototranzisztor sematikus ábrája



6. ábra: Fotodióda

2.3. Rövidhullámú sugárzás modellezése vízszintes felületen

2.3.1. A havonkénti napi átlagos globálsugárzás modellezése

A globálsugárzás kiszámítására számos formula létezik, amelyek olyan változatos paraméterekkel állítják kapcsolatba a felszínre érkező rövidhullámú sugárzás értékét, mint például az extraterresztriális sugárzás (a légkör külső határára érkező rövidhullámú sugárzás), a napsütéses órák száma, a minimum vagy maximum hőmérséklet, a talajhőmérséklet, a relatív nedvesség, az esős napok száma, a földrajzi szélesség és hosszúság, a tengerszint feletti magasság, a csapadékösszeg, a felhőzet és az evaporáció. Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott paraméter a napfénytartam, mivel ez szoros kapcsolatban áll a globálsugárzás értékével, könnyen és megbízhatóan mérhető és széles körben elérhető (*Ahmad and Tiwari, 2010*).

A legegyszerűbb módszer a horizontális felületre eső havonkénti átlagos napi globálsugárzás kiszámítására az Angstrom-féle egyenlet (*Angstrom, 1924*) valamely módosított formájának használata. Az eredeti összefüggés a havi átlagos napi globálsugárzást az adott helyen mért tiszta égboltról érkező sugárzással és a lehetséges napfénytartam valamint a valós napfénytartam hányadosával állítja kapcsolatba. A későbbiekben ezt a formulát Page az alábbi módon módosította, hogy a tiszta-égbolt sugárzás helyett extraterresztriális sugárzáson alapuljon (*Page, 1961*):

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0}, \quad (1a)$$

ahol H a havonkénti napi átlagos globálsugárzás, H_0 pedig a havonkénti napi átlagos extraterresztriális sugárzás, amelyet a következő egyenlettel definiálhatunk:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_S + \frac{\pi}{180} \omega_S \sin \varphi \sin \delta \right], \quad (1b)$$

ahol I_{SC} a szoláris állandó (1367 W/m^2), φ a földrajzi szélesség, δ a deklináció, ω_S a Nap adott hónapra vonatkozó átlagos óraszöge és n az adott nap sorszáma január elsejétől számítva. A képletben szereplő δ és ω_S értéke a következőképpen számítható ki:

$$\delta = 23,45 \sin[360(284 + n)/365], \quad (1c)$$

$$\omega_S = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta). \quad (1d)$$

Az (1a) összefüggésben szereplő S a havi átlagos napi napsütéses órák száma, S_0 pedig a havi átlagos napfénytartam, ami az alábbi egyenletből adódik:

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_S. \quad (1e)$$

Az (1a) egyenletben szereplő a és b pedig empirikus állandók, amelyek a földrajzi hely függvényében változhatnak.

Mivel különböző földrajzi helyeken más-más empirikus értékek adnak megfelelő megoldást, ebből kifolyólag számos formula született egy adott országra, régióra vagy éppen városra – és azokkal rokon klímájú és geometriai adottságú helyekre – optimalizálva, pl. *Iqbal* (1979) Kanadára, *Lewis* (1983) Zimbabwéra, *Kholagi et al.* (1983) Yemenre, *Alsaad* (1990) Amman városára Jordániában, *Jain* (1990) három olasz településre, *Tasdemiroglu and Sever* (1991) Törökországra számították a napi átlagos globálsugárzás havi értékeit. A földrajzi helytől függő algoritmusok mellett léteznek globálisan használható formulák is, amelyek – a fentiekkel együtt – az alábbi 4 csoportba sorolhatók (*Ahmad and Tiwari*, 2010):

Lineáris modellek

Ezekben az egyenletekben a és b együtthatók elsőrendű regressziós analízis eredményei. Ide tartozik többek között *Page* modellje is, aki a és b értékét az alábbi egyenletben szereplő módon határozta meg az északi és déli szélesség 40-edik foka közötti területre (*Page*, 1961):

$$\frac{H}{H_0} = 0,23 + 0,48 \frac{S}{S_0}. \quad (2)$$

Szintén ebbe a csoportba sorolható *Benson et al.* (1984) modellje, akik két egyenletet állítottak fel az év két különböző klimatikus paraméterekkel rendelkező szakaszára:

januártól márciusig és októbertől decemberig az alábbi egyenlőséget javasolták:

$$\frac{H}{H_0} = 0,18 + 0,60 \frac{S}{S_0}, \quad (3a)$$

áprilistól szeptemberig pedig a következőt:

$$\frac{H}{H_0} = 0,24 + 0,53 \frac{S}{S_0}. \quad (3b)$$

Polinomiális modellek

Egyes kutatók szerint az ideálisan módosított Angstrom-féle egyenlet másod-, harmad-, vagy magasabb fokú polinom. Erre többek között *Bakirci* (2008) tanulmánya a példa, aki első-, másod- és ötödfokú polinomiális kapcsolattal is próbálkozott a H/H_0 és a S/S_0 hányadosok kapcsolatának leírására:

$$\frac{H}{H_0} = 0,7836 - 0,0460 \frac{S}{S_0}, \quad (4a)$$

$$\frac{H}{H_0} = 1,0192 - 1,0547 \frac{S}{S_0} + 0,9661 \left(\frac{S}{S_0}\right)^2, \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} \frac{H}{H_0} = & -11,225 + 128,010 \frac{S}{S_0} - 516,900 \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + 994,730 \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 - \\ & 920,350 \left(\frac{S}{S_0}\right)^4 + 329,93 \left(\frac{S}{S_0}\right)^5. \end{aligned} \quad (4c)$$

Szögfüggvényes modellek

Kilic and Oztruk (1983) modelljükben a és b értékét δ , φ és Z függvényeként írták le

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\varphi - \delta), \quad (5a)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\varphi - \delta), \quad (5b)$$

ahol Z a tengerszint feletti magasság kilométerben.

Dogniaux and Lemoine (1983) a fenti együtthatókat a földrajzi szélesség (φ) függvényében határozták meg általánosan:

$$a = 0,37022 - 0,00313\varphi, \quad (6a)$$

$$b = 0,32029 + 0,00506\varphi. \quad (6b)$$

és havi bontásban is:

$$\text{Január: } \frac{H}{H_0} = (0,34507 - 0,00301\varphi) + (0,34572 + 0,00495\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6c)$$

$$\text{Február: } \frac{H}{H_0} = (0,33459 - 0,00255\varphi) + (0,35533 + 0,00457\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6d)$$

$$\text{Március: } \frac{H}{H_0} = (0,36690 - 0,00303\varphi) + (0,36377 + 0,00466\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6e)$$

$$\text{Április: } \frac{H}{H_0} = (0,38557 - 0,00334\varphi) + (0,35802 + 0,00456\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6f)$$

$$\text{Május: } \frac{H}{H_0} = (0,35057 - 0,00245\varphi) + (0,33550 + 0,00485\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6g)$$

$$\text{Június: } \frac{H}{H_0} = (0,39890 - 0,00327\varphi) + (0,27292 + 0,00578\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6h)$$

$$\text{Július: } \frac{H}{H_0} = (0,41234 - 0,00369\varphi) + (0,27004 + 0,00568\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6i)$$

$$\text{Augusztus: } \frac{H}{H_0} = (0,36243 - 0,00269\varphi) + (0,33162 + 0,00412\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6j)$$

$$\text{Szeptember: } \frac{H}{H_0} = (0,32946 - 0,00338\varphi) + (0,27125 + 0,00564\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6k)$$

$$\text{Október: } \frac{H}{H_0} = (0,36213 - 0,00317\varphi) + (0,31790 + 0,00504\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6l)$$

$$\text{November: } \frac{H}{H_0} = (0,36680 - 0,00350\varphi) + (0,31467 + 0,00523\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6m)$$

$$\text{December: } \frac{H}{H_0} = (0,36262 - 0,00250\varphi) + (0,30675 + 0,00559\varphi) \frac{S}{S_0}. \quad (6n)$$

Egyéb modellek

Ide azok a formulák sorolhatók, amelyekben az Angstrom-féle egyenlet nemlineáris vagy exponenciális formájú vagy logaritmikus taggal egészül ki. Ezek a formulák főként egy adott földrajzi helyre specializált egyenletekre jellemzőek.

Ezt láthatjuk *Rensheng et al.* (2004) modelljén is, akik az alábbi összefüggést állították fel Kínára:

$$\frac{H}{H_0} = a \ln(T_M - T_m) + b \left(\frac{S}{S_0} \right)^c + d, \quad (7)$$

ahol a , b , c és d empirikus együtthatók, T_M a napi maximum, T_m pedig a napi minimum hőmérséklet.

2.3.2. Órás felbontású globálsugárzás modellezése

Előfordulhat, hogy a munkánkhoz a potenciálisan lehetséges havonkénti átlagos napi globálsugárzási adatoknál nagyobb időbeli felbontásra van szükség, azonban továbbra sem áll módunkban, hogy saját méréseket végezzünk. Ekkor az elméletileg lehetséges órás felbontást ($R_{G,pot}$) a következőképpen állíthatjuk elő:

$$R_{G,pot} = R_{dir,pot} + R_{diff,pot}, \quad (8)$$

ahol $R_{dir,pot}$ a direkt és $R_{diff,pot}$ a diffúz sugárzási komponensek, amelyeket Chouard és munkatársai átlagos borultság esetén a következőképpen határoztak meg (*Chouard et al.*, 1977):

$$R_{dir,pot} = 0,87 I_{SC} r \exp(-\sec\vartheta_Z) \cos\vartheta_Z, \quad (9)$$

$$R_{diff,pot} = 0,27 I_{SC} \cos\vartheta_Z - 0,29 R_{dir,pot}, \quad (10)$$

ahol I_{SC} a szoláris állandó, r a valós és az átlagos Nap–Föld távolság hányadosa és ϑ_Z a zenitszög.

Ez a formula azonban az átlagostól eltérő borultságú helyekre vagy időszakokra nem feltétlenül reprezentatív, csupán potenciálisan lehetséges értéket szolgáltat.

Gyakran előfordul azonban, hogy az adott helyen a napi összbesugárzás mérési adatai a rendelkezésünkre állnak. Ekkor az alábbi eljárást követve állíthatunk elő a felhőzet helyi sajátosságait figyelembe véve órás felbontású sugárzási adatokat a mért napi besugárzás segítségével (*Alabiso et al.*, 1989):

Első lépésként szükség van az ún. napi borultsági együttható bevezetésére. Ez az együttható a napi mért besugárzás és az elméletileg kiszámított órás besugárzások napkeltétől napnyugtáig vett összegének a hányadosa.

Azt feltételezve, hogy a napi borultsági együttható állandó a nap folyamán, az órás globálsugárzás horizontális felszínén (R_G) a következőképpen alakul:

$$R_G = R_{G,pot} C_d, \quad (11)$$

ahol $R_{G,pot}$ az elméleti órás globálsugárzás és C_d a napi borultsági együttható.

Az órás globálsugárzás diffúz komponense (R_{diff}) így írható fel:

$$R_{diff} = R_{G,pot} C_D (1 + R_{dir}/R_{diff})^{-1} = R_{G,pot} C_d (1 + K)^{-1}, \quad (12)$$

ahol K -t az alábbi egyenlet definiálja:

$$K = (R_{dir}/R_{diff}) (A C_d^B)^{-1}, \quad (13)$$

melyben A és B empirikus állandók.

Ez az eljárás a dőlt felületek sugárzásának modellezésénél is hasznos, mivel számos formula létezik, amelyekkel a horizontálisra beeső órás sugárzást ferde felületre lehet konvertálni. A következő fejezetben három példát mutatok be erre.

2.4. Rövidhullámú sugárzás modellezése dőlt felületen

Egy T szögben megdöntött felszínre érkező órás globálsugárzás az alábbi komponensekből tevődik össze:

$$R_{G,T} = R_{dir,T} + R_{diff,T} + R_{r,T}. \quad (14)$$

Tehát a direkt és diffúz sugárzáson túl a globálsugárzás a ferde felszínre visszaverődő reflexsugárzással ($R_{r,T}$) is kiegészül. A modellek közötti eltéréseket azonban mégsem ez a paraméter okozza. A ferde felületek sugárzásmodelljei a direkt és reflexsugárzást általában az alábbi formában számítják ki, azzal a feltételezéssel élve, hogy a sugárzás minden irányból egyformán verődik vissza:

$$R_{dir,T} = R_{dir} \cos \vartheta / \cos \vartheta_Z, \quad (15)$$

$$R_{r,T} = R_G \rho \frac{1}{2} (1 - \cos \alpha), \quad (16)$$

ahol ϑ a lejtő dőlési szöge, ϑ_Z a zenitszöge, ρ pedig a felszín albedója.

A következőkben bemutatott modellek is kivétel nélkül ezzel a közelítéssel élnek. Különbségek inkább a diffúz sugárzás kiszámításában mutatkoznak. Alapvetően kétféle szemlélet létezik: izotróp és anizotróp, és mindkét módszerre számos példát találunk a szakirodalomban (*Liu and Jordan, 1960; Temps and Coulson, 1977; Hay, 1979; Klucher, 1979; Hay and Davis, 1980; Willmott, 1982; Ma and Iqbal, 1983; Kronakis, 1986; Perez et al., 1986; Skartveit and Olseth 1986; Gueymard, 1987; Reindl et al., 1990; Badescu, 2002; Muneer and Munawwar, 2006; Shukla et al., 2015*).

2.4.1. Izotróp modellek

Az izotróp megközelítést alkalmazva a diffúz sugárzást egységesnek tekintjük a teljes égboltra nézve, tehát az azimuttól és a zenitszögtől függetlennek. Ezt a megközelítést Liu és Jordan dolgozta ki, akik a ferde felszínre érkező óras diffúz sugárzás ($R_{diff,T}$) horizontálisból (R_{diff}) történő kiszámítására a következő egyenletet állították fel (*Liu and Jordan, 1963*):

$$R_{diff,T} = R_{diff} \frac{1}{2} (1 + \cos T). \quad (17)$$

2.4.2. Anizotróp modellek

Az anizotróp modellek már jóval összetettebb összefüggést alkalmaznak a diffúz sugárzás leírására. Dolgozatomban két alapvető anizotróp modellt mutatok be.

Klucher (1979) modelljében, két új taggal szorozza be az izotróp értéket, amelyek a cirkumszoláris- és a horizontfényesség anizotróp hatásait veszik figyelembe:

$$R_{diff,T} = R_{diff} [(1 + \cos T) / 2] [1 + F \sin T / 2] [1 + F \cos^2 \vartheta \sin^3 \vartheta_Z], \quad (18)$$

ahol F az anizotrópia foka:

$$F = 1 - (R_{diff}/R_G)^2. \quad (19)$$

Hay (1979) modelljében az órás diffúz sugárzást két tényező szorzataként írja le, egy a Nap irányából érkező cirkumszoláris és egy az égbolt többi részéről érkező izotróp eloszlású diffúz sugárzás szorzatával:

$$R_{diff,T} = R_{diff} \{(R_{dir}/R_0) (\cos \vartheta / \cos \vartheta_Z) + [1 + \cos T/2](1 - R_{dir}/R_0)\}, \quad (20)$$

ahol R_0 az órás extraterresztriális sugárzás horizontális felszínén:

$$R_0 = r I_{SC} \cos \vartheta_Z. \quad (21)$$

2.4.3. Izotróp és anizotróp modellek beválása különböző alkalmazásokra

Az összehasonlításhoz leggyakrabban használt statisztikai módszerek a következők:

Átlagos abszolút hibaszázalék (MAPE), amely a következőképp fejezhető ki:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|H_{pi} - H_i|}{H} \right), \quad (22)$$

ahol H_{pi} a számított érték, H_i a valós érték és n a mérések száma. Ez az index a pontatlanságot százalékban fejezi ki.

Szisztematikus hiba (MBE):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{pi} - H_i), \quad (23)$$

ahol H_{pi} a sugárzás i -edik modellezett értéke és H_i az i -edik mérési eredmény. A pozitív MBE a modell túlbecslésének átlagos értéke, a negatív MBE fordítva. Ez a módszer jól alkalmazható hosszú adatsorra, azonban egy egyedi mérés túlbecslése törölheti egy másik mérés alulbecslését (Ahmad and Tiwari, 2010).

Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{Pi} - H_i)^2}, \quad (24)$$

Ez az érték mindig pozitív. Különösen rövidtávú idősorokra jól alkalmazható. Hátránya, hogy néhány nagy eltérés a számított és mért értékek között szignifikánsan megnöveli az *RMSE* értékét a teljes adatsorra (*Ahmad and Tiwari, 2010*).

Az általam bemutatott három modell (*Liu és Jordan, 1963; Hay 1979; Klucher 1979*) bevéálásának vizsgálatát Alabiso és munkatársai végezték 1989-es publikációjukban (*Alabiso et al., 1989*). Ehhez a feladathoz egy Olaszországi település, Rossano mérési adatait használták fel, ahol egy 40 és egy 90 fokos szögben megdöntött dél felé néző felszínen folytattak méréseket, és vetettek össze a modellek eredményeivel.

A hiba mindhárom esetben nőtt a dőlésszög 40-ről 90 fokra történő emelésével, ám az izotróp modell következetesen felülbecsülte a sugárzást az anizotrópokhoz képest. A bemutatott két anizotróp modell közül is különösen a *Klucher* modell produkált kis hibákat a teljes mérési periódusra nézve. Ez, az említett modell esetében 3%-ot jelent a 40 fokos és 10%-ot a 90 fokos lejtő esetében.

Ennek ellenére – ahogyan azt *Szabó (2001)* megállapította – jelenleg a világon az izotróp modellt alkalmazzák a legtöbben, a relatíve kis pontatlansága és egyszerűen kezelhetősége miatt. *Szabó (2001)* megjegyezte, hogy a hazai napsugárzási adatokhoz nehéz hozzájutni – sőt, Magyarországon ferde felületeken gyakorlatilag nincsenek is mérési eredmények – az árnyékolók vizsgálatához azonban elengedhetetlen a napi teljes besugárzás valamint a direkt és diffúz komponensek ismerete. Ilyen esetben az építész a teljes napi besugárzást képlettel is kiszámíthatja, ám ez csupán tiszta égboltra érvényes potenciális értéket szolgáltat.

3. A felhasznált izotróp modell bemutatása

3.1. A globálsugárzás meghatározása vízszintes felületen

A vízszintes síkra a teljes felső féltérből érkező globálsugárzást (R_G) az alábbi képlettel számítjuk (MSZ-21457-4, 2002):

$$R_G = (a_1 \sin \phi + a_2)(1 + b_1 N^{b_2}), \quad (25)$$

ahol a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , a földrajzi helytől függő empirikus állandók (1. táblázat), ϕ a napmagasság, N pedig a borultság (értékét 0 és 1 között adjuk meg, ahol 0 a derült égboltot, 1 a teljes borultságot jelenti).

1. táblázat: a globálsugárzás számításánál használt állandók

Jelölés	Leírás	Érték
a_1	empirikus állandó	990 W/m ²
a_2	empirikus állandó	-30 W/m ²
b_1	felhőzeti állandó	-0,75
b_2	felhőzeti állandó	3,4

A táblázatban szereplő a_1 és a_2 állandók figyelembe vételével számított globálsugárzás értékek jó egyezést mutattak budapesti globálsugárzás mérési adatokkal (Mészáros, 2003).

A napmagasság a következő képlettel számítható:

$$\phi = \arcsin(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega), \quad (26)$$

ahol φ radiánban szerepel és δ a Nap deklinációja:

$$\delta = \arcsin(0,398 \sin \epsilon), \quad (27)$$

ϵ a szoláris hosszúság:

$$\epsilon = 4,871 + 0,0175 d + 0,033 \sin(0,017 d), \quad (28)$$

ahol d az adott nap sorszáma az évben 1-től 360-ig.

Végül ω a Nap óraszöge:

$$\omega = \lambda + 0,043 \sin(2\epsilon) - 0,033 \sin(0,0175 d) + 0,262 t_{UTC} - \pi, \quad (29)$$

ahol λ a földrajzi hosszúság, d az év napjának száma és t_{UTC} az adott nap órája UTC-ben. Az egyes értékek radiánban vannak megadva. A földrajzi koordináták, a szoláris hosszúság, a napmagasság és a Nap óraszögének számításában megkövetelt pontosság 10^{-3} radián. Ezen képlet alapján negatív értékeket is kaphatunk, ami fizikailag nem értelmezhető. Ezért amennyiben a kapott globálsugárzás érték nulla vagy annál kisebb, akkor a továbbiakban $R_G = 0$ értékkel kell számolni. Éjszakai órákban $R_G = 0$, a nappali órákban pedig $R_G > 0$.

3.2. Rövidhullámú sugárzás meghatározása ferde felületen

A továbbiakban a légkörből érkező szórt, valamint a felszínről visszaverődő reflexsugárzást is izotrópnak tekintjük. Így a teljes sugárzás (R_T) egy ferde felületen az alábbi képletből adódik:

$$R_T = R_{air} \cos \theta + R_{diff} F_d + R_G A F_r, \quad (30)$$

ahol $\cos \theta$ a direkt sugárzás beérkezési szögének koszinusza a ferde síkra, F_d és F_r rendre a diffúz és a reflexsugárzások korrekciós tényezője, A pedig az albedó értéke 0 és 1 között megadva (l. pl. *Gueymard*, 2009).

Az egyenletben szereplő $\cos \theta$ geometriai tényezőktől függ, értéke a következő egyenlettel adható meg:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos T - \sin \delta \cos \varphi \sin T \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos T \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin T \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin T \sin \gamma \sin \omega, \quad (31)$$

ahol a korábbi jelöléseknek megfelelően δ a Nap deklinációja, φ a földrajzi szélesség, ω a Nap óraszöge, T a dőlésszög a vízszinteshez képest, γ pedig az égtáj (az észak-déli tengelytől való eltérés fokban).

A (30) egyenletben szereplő korrekciós tényezők izotróp esetben az alábbi egyszerű képletekkel számíthatók ki (*Liu and Jordan, 1963*):

$$F_d = (1 + \cos T)/2, \quad (32)$$

$$F_r = (1 - \cos T)/2. \quad (33)$$

R_{dir} és R_{diff} értékei Weiss és Norman 1985-ös publikációja nyomán a következőképp számíthatók (*Weiss and Norman, 1985*):

A rövidhullámú sugárzás direkt és diffúz részét a sugárzási spektrum két tartományában eltérően parametrizáljuk, ezek a fotoszintetikusán aktív sugárzás tartománya (*PAR*), valamint a közeli infravörös tartomány (*NIR*), amelyeket már a 2.1-es fejezetben bemutatattam.

A Lambert–Beer-törvény alapján a potenciálisan lehetséges fotoszintetikusán aktív sugárzás direkt ($PAR_{dir,pot}$) és szórt ($PAR_{diff,pot}$) komponensei a következők:

$$PAR_{dir,pot} = 600 e^{(-0,185 \frac{p}{p_0} m)} \cos \phi_z, \quad (34)$$

$$PAR_{diff,pot} = 0,4 (600 - PAR_{dir,pot}) \cos \phi_z, \quad (35)$$

ahol a 600 W/m^2 -es érték a légkör külső határára jutó fotoszintetikusán aktív sugárzás (*PAR*) átlagos értéke és ϕ_z a zenitszög. A közeli infravörös tartományba eső globálsugárzás diffúz ($NIR_{diff,pot}$) és direkt ($NIR_{dir,pot}$) részeit pedig a következő két egyenlet írja le:

$$NIR_{diff,pot} = 0,6 (720 - NIR_{dir,pot} - w_a) \cos(\phi_z), \quad (36)$$

$$NIR_{dir,pot} = \left(720 e^{(-0,06 \frac{p}{p_0} m)} - w_a \right) \cos(\phi_z), \quad (37)$$

amelyekben a 720 W/m^2 -es érték a légkör külső határára érkező közeli infravörös sugárzás átlagos értéke, p az aktuális légnyomás (jelen esetben 1000 hPa -al közelítettük), p_0 a

standard légköri nyomás (1013,25 hPa), $m = (\cos\phi_z)^{-1}$, w_a pedig a víz abszorpciója a közeli infravörös tartományban:

$$w_a = 1320 * 10^{(-1,195+0,4459 \log_{10}(m)-0,0345 (\log_{10}(m))^2)}. \quad (38)$$

A teljes lehetséges PAR és NIR értékét a szórt és direkt komponensek összege adja:

$$PAR_{pot} = PAR_{dir,pot} + PAR_{diff,pot}, \quad (39)$$

$$NIR_{pot} = NIR_{dir,pot} + NIR_{diff,pot}. \quad (40)$$

E kettő összege a lehetséges globálsugárzás értéke:

$$RG_{pot} = NIR_{pot} + PAR_{pot}. \quad (41)$$

A teljes fotoszintetikusan aktív sugárzás, valamint a teljes közeli infravörös sugárzás az alábbi egyenletekkel adható meg:

$$PAR = R_G(PAR_{pot}/RG_{pot}), \quad (42)$$

$$NIR = R_G(NIR_{pot}/RG_{pot}), \quad (43)$$

ahol R_G -t az (25) egyenlet alapján számítjuk. Az egyes komponensekre eső direkt és diffúz sugárzások értékei:

$$PAR_{dir} = PAR f_v, \quad (44)$$

$$PAR_{diff} = PAR (1 - f_v), \quad (45)$$

$$NIR_{dir} = NIR f_n, \quad (46)$$

$$NIR_{diff} = NIR (1 - f_n), \quad (47)$$

amelyekben f_v és f_n rendre:

$$f_v = \frac{PAR_{dir,pot}}{PAR_{pot}} \left[1 - \left(\frac{0,9-R}{0,7} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (48)$$

$$f_n = \frac{NIR_{dir,pot}}{NIR_{pot}} \left[1 - \left(\frac{0,88-R}{0,68} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (49)$$

ahol R értéke:

$$R = R_G / RG_{pot}, \quad (50)$$

ami a (48) egyenletben nem lehet több 0,9-nél, a (49)-ben pedig 0,88-nál.

A fentiek értelmében a (30) egyenletben szereplő R_{dir} és R_{diff} értéke pedig az alábbi módon számítható:

$$R_{dir} = PAR_{dir} + NIR_{dir}, \quad (51)$$

$$R_{diff} = PAR_{diff} + NIR_{diff}. \quad (52)$$

4. Mérések

4.1. A felhasznált műszer és kalibrációja

Az általam végzett mérések során egy BENNING SUN2 típusú kézi sugárzásmérővel (7. ábra) dolgoztam. Ezt a műszert arra fejlesztették ki, hogy fotovoltaikus rendszerek telepítésénél és ellenőrzésénél nyújtson könnyen kezelhető segítséget, ezért a sugárzáson túl az égtájat és a dőlés szögét is kijelzi, az adatokat tárolni is képes.



7. ábra: BENNING SUN2 típusú kézi sugárzásmérő



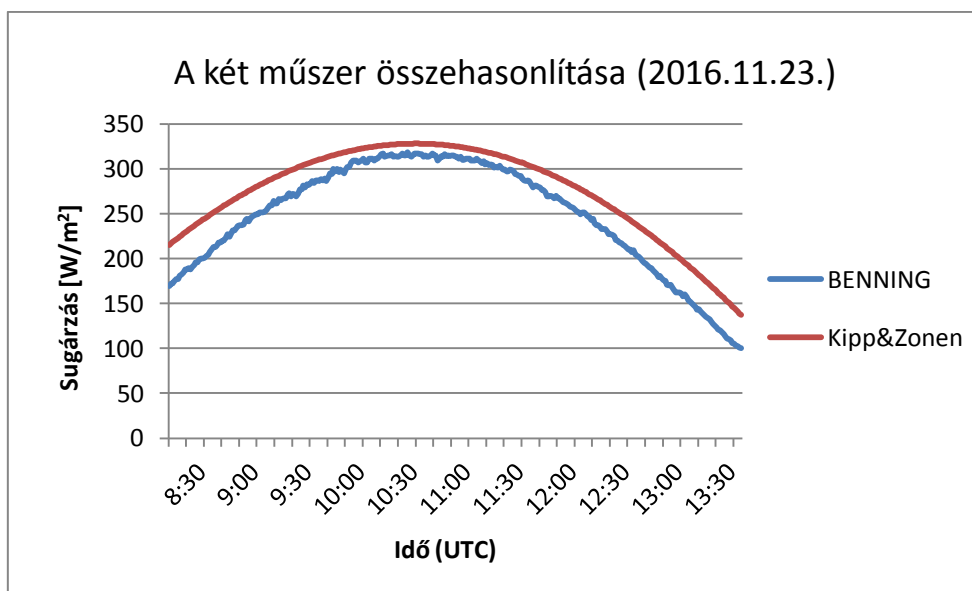
8. ábra: A 2017.05.11-i kalibrációs mérés az OMSZ Marcell György Főobszervatóriumában

2. táblázat: A műszer gyári kalibrációja

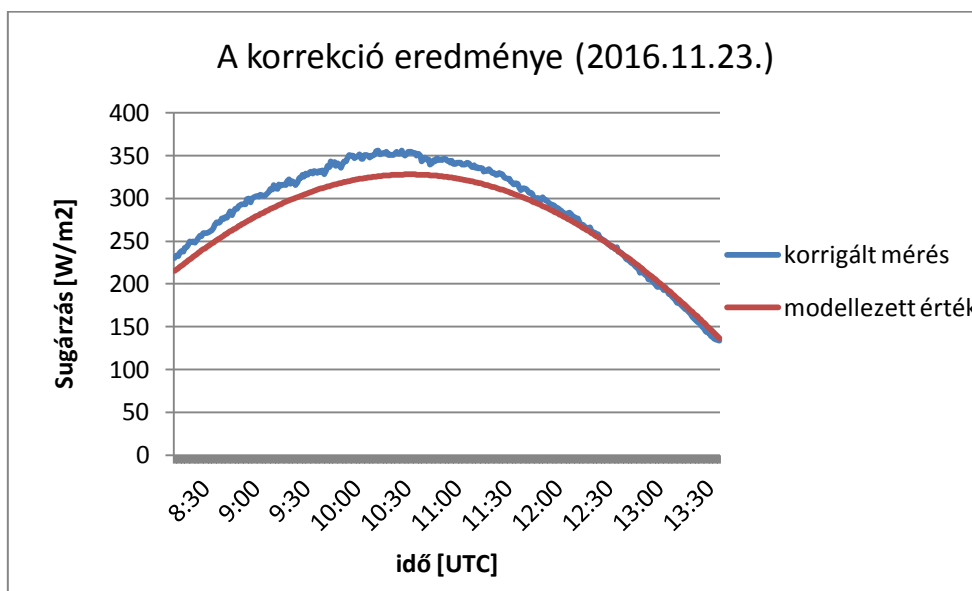
Funkció	Mérési intervallum	Pontosság
sugárzásmérés	100 – 1250 W/m ²	1 ± 5 W/m ²
azimut megállapítása	0° – 360°	1° ± 10°
dőlési szög megállapítása	0° – 80°	1° ± 2°

Az eredmények pontossága érdekében a műszert mi is kalibráltuk a pestszentlőrinci meteorológiai állomás egyik Kipp&Zonen CM3 típusú globálisugárzásmérő piranométeréhez (8. ábra). Az ehhez szükséges mérések november 23-án 08:12 és 13:16 UTC között valamint 2017.05.11-én 7:13 és 14:16 UTC között történtek vízszintes felszínen. Mindkét adatsort tízpercesre átlagolva az alábbi eredmények adódtak.

Az első esetben a két adatsort összehasonlítva jelentős eltérés mutatkozott, különösen az alacsonyabb sugárzási tartományban (9. ábra). Az eltérések arányának napmagasságtól való függését vizsgálva a Nap felszálló és leszálló ágában kissé eltérő eredményeket kaptunk. Ezt a két függvényt korrekcióként alkalmazva vízszintes felszínen a mért és a modellezett adatok között jó egyezést ($R^2 = 0,9944$) kaptunk (10. ábra).



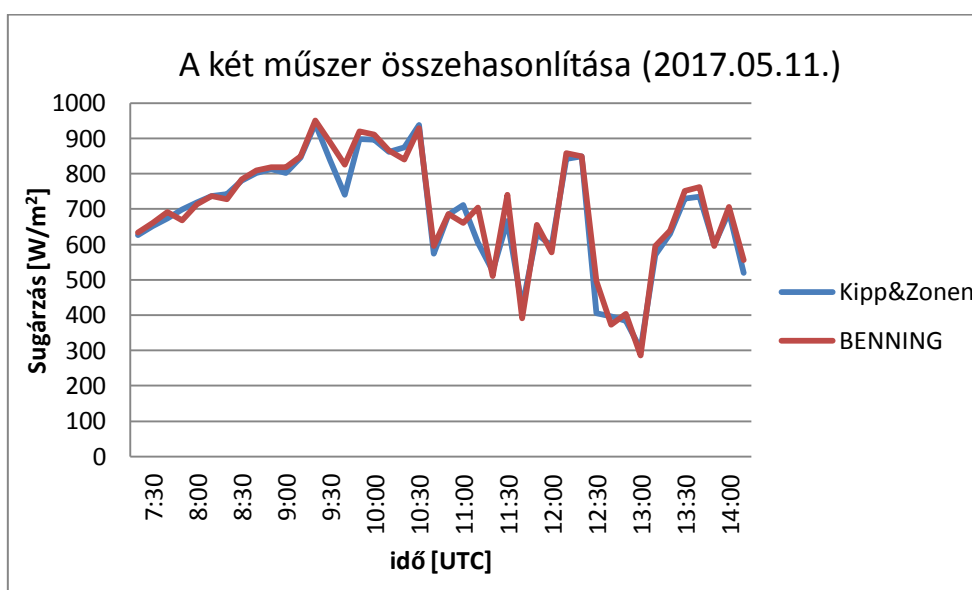
9. ábra: A két műszer adatsora korrekció nélkül



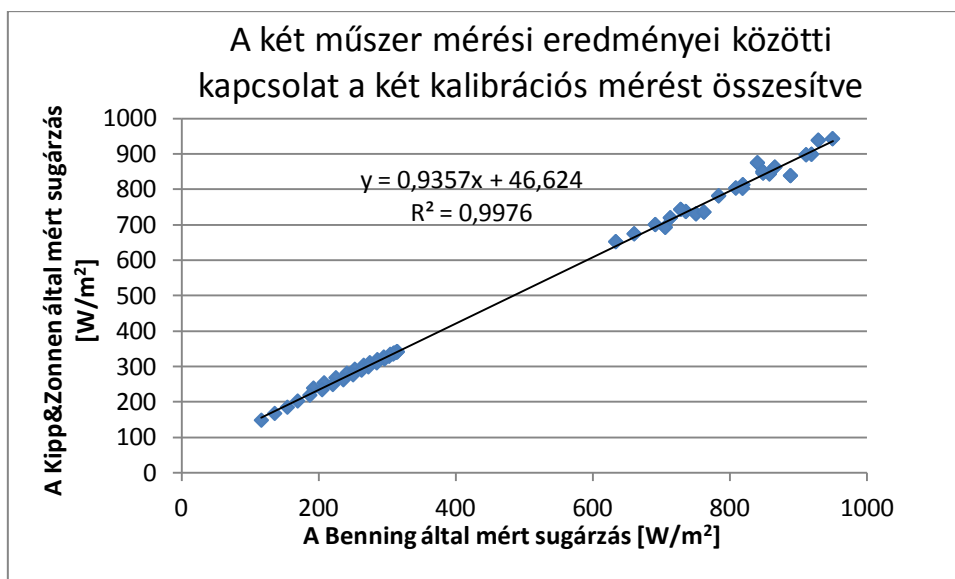
10. ábra: A korigált mérések és a modellezett sugárzás

Ahogy a 9. ábrán is látszik, nagyobb sugárzás esetén a kézi műszer eredményei jobban közelítik a pontosabb műszer által mért adatokat. Ezt tapasztaltuk a második, nyári mérésünk alkalmával is. Ekkor a két adatsor jó egyezést mutatott korrekció nélkül is,

annak ellenére is, hogy a mérés során a késő délelőtti órákban megjelent a felhőzet (11. ábra). A két műszer mérési adatait a november 23-aival kiegészítve az adatsorok közötti kapcsolatot leíró determinációs együttható (R^2) a felhőzet által befolyásolt méréseket is figyelembe véve 0,9907, azokat kihagyva pedig 0,9976 volt (12. ábra)., A Nap felszálló és leszálló ágában nem kaptunk jelentős eltérést a determinációs együtthatók között (13. és 14. ábra), így a fent leírt módon összeállított adatsor teljes hosszára derült ég esetén kiszámolt regressziós egyenletet használtuk fel második kalibrációként az összes mérési adatomra.

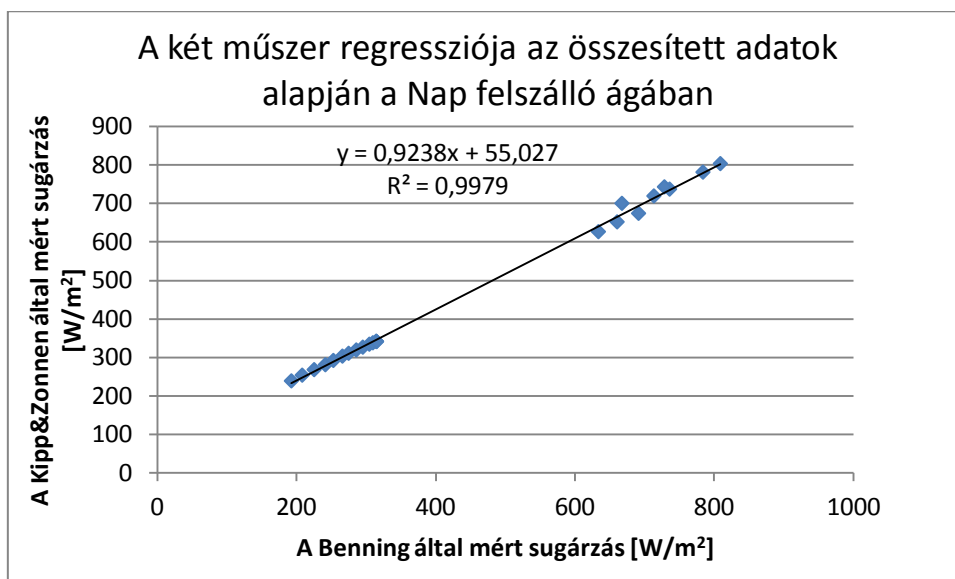


11. ábra: A 2017.05.11-ei kalibrációs mérés eredménye korrekció nélkül

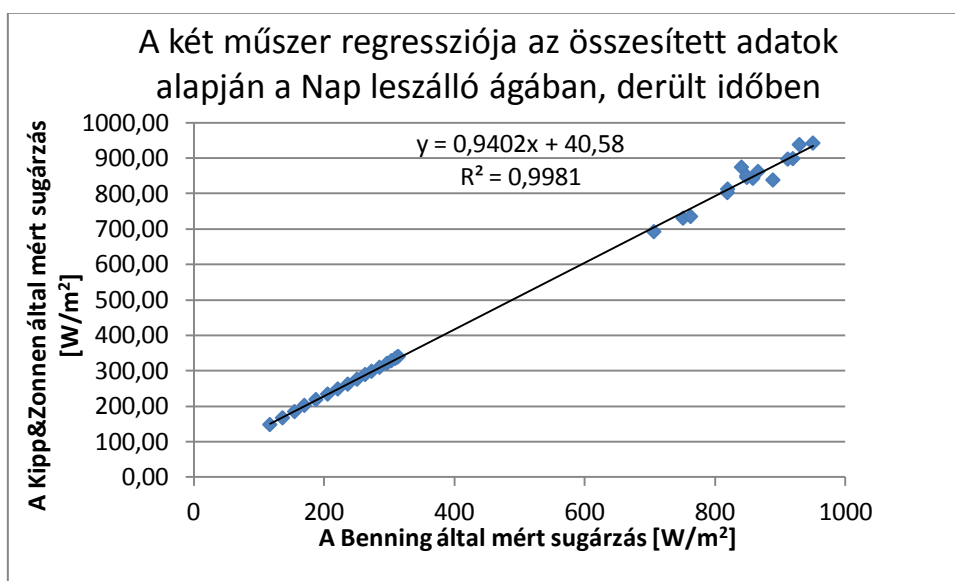


12. ábra: A két műszer mérési eredményei közötti kapcsolat a két kalibrációs mérést összesítve

A 12. ábrán a novemberi mérések a diagram alsó, a májusiak a diagram felső sarkában helyezkednek el a sugárzás évi menetének köszönhetően.



13. ábra: A két műszer regressziója az összesített adatok alapján a Nap felszálló ágában



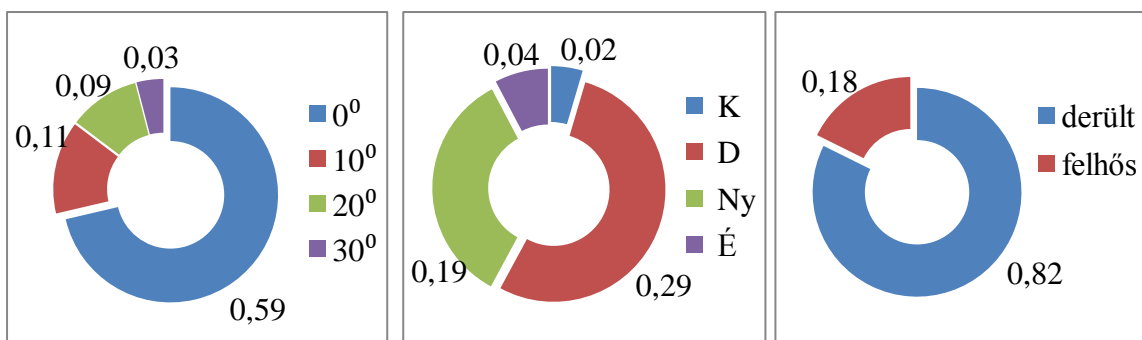
14. ábra: A két műszer regressziója az összesített adatok alapján a Nap leszálló ágában, derült időben

4.2. Mérési adatok

A sugárzásméréseket 2016. november 9-én kezdtem, az utolsó mérést – a májusi kalibrációt nem számítva – 2017. március 29-én végeztem. Ebben az időszakban egyperces mintavételezéssel főként derült időjárási viszonyok mellett 1115 sugárzási adatot

rögzítettem két helyszínen: az Eötvös Loránd Tudományegyetem lágymányosi kampuszán, füves területen és egy, a főváros XXI. kerületének határán fekvő réten.

A munkám során kezdetben ferdeszögű méréseket is végeztem, de a műszer kalibrációjának korlátai miatt – mivel nem állt rendelkezésünkre ferde szögben elhelyezett piranométer – a legtöbb mérést vízszintes felszínre vonatkozóan végeztem. Az adatok dőlésszög és irány szerinti megoszlását valamint a derült és a felhős adatok arányát a 15., 16. és 17. ábrán szemléltetem.



15. ábra: Az adatok dőlésszög szerinti relatív gyakorisága

16. ábra: Az adatok égtáj szerinti relatív gyakorisága

17. ábra: Az adatok borultság szerinti relatív gyakorisága

Amint az a 15. ábrán is látszik elsősorban a déli irányt preferáltam, mivel az északi féltekén általában innen érkeznek a legtöbb sugárzás és így a napelemek és napkollektorok telepítése szempontjából ez releváns, másrészt magasabb sugárzási tartományban a műszer pontossága is növekszik. Ez utóbbi megfontolás érvényesült a többi irányban történő méréseknél is, valamint az a tény, hogy a 100 W/m^2 alatti sugárzást a műszer már nem képes érzékelni.

5. Eredmények és következtetések

A két kalibrációt külön-külön a mérési adataimra alkalmazva, azoknak a modellezett értékektől számított átlagos négyzetes hibák négyzetgyökét (RMSE), átlagos abszolút hibaszázalékát, valamint a hibák szórását a 3. és 4. táblázatban tüntetem fel.

3. táblázat: A modell és a kalibrált mérések összehasonlítása különböző szögű lejtők esetén. A táblázatban szereplő értékek mértékegységei: MAPE [%], RMSE [W/m^2], hibák szórása [W/m^2].

Dőlt felületre érkező sugárzás mérése az első kalibrációval												
10 fok					20 fok				30 fok			
	n	MAPE	RMSE	szórás	n	MAPE	RMSE	szórás	n	MAPE	RMSE	szórás
É	10	12	74	31	10	22	71	3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K	13	52	91	47	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
D	80	24	129	49	52	32	194	89	18	36	308	221
NY	25	15	105	93	36	17	49	48	37	19	48	36
Dőlt felületre érkező sugárzás mérése a második kalibrációval												
10 fok					20 fok				30 fok			
	n	MAPE	RMSE	szórás	n	MAPE	RMSE	szórás	n	MAPE	RMSE	szórás
É	10	10	49	27	10	43	122	2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K	13	51	88	35	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
D	80	20	104	41	52	25	152	77	18	39	252	198
NY	25	5	16	11	36	18	52	16	37	26	71	21

A táblázatból kitűnik, hogy a hibaszázalékok és az átlagos hibák is nőnek a lejtő dőlésének növelésével valamint, hogy a második kalibráció alkalmazásával – a nyugati irány kivételével 30 fok és az északi irány 20 fok kivételével – csökkennek. A hibaszázalékok azonban még így is magasnak mondhatók. Ez azt bizonyítja, hogy a BENNING SUN2 kalibrálásához dőlt felület esetén nem megfelelőek a vízszintesen meghatározott

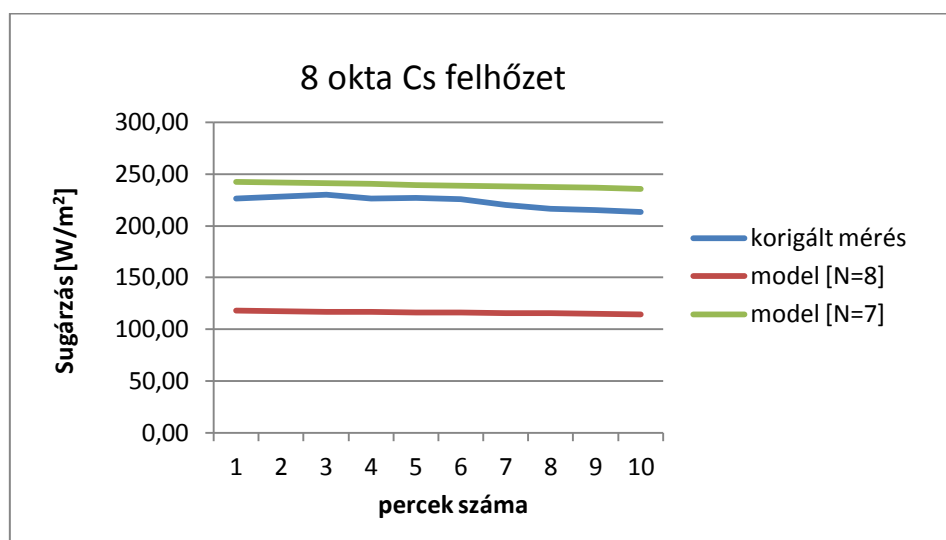
kalibrációs egyenletek, szükség volna egy dőlt felületen elhelyezett etalon piranométerrel való összevetésre.

4. táblázat: A modell és a kalibrált mérések összehasonlítása vízszintes felületen, derült égbolt esetén.

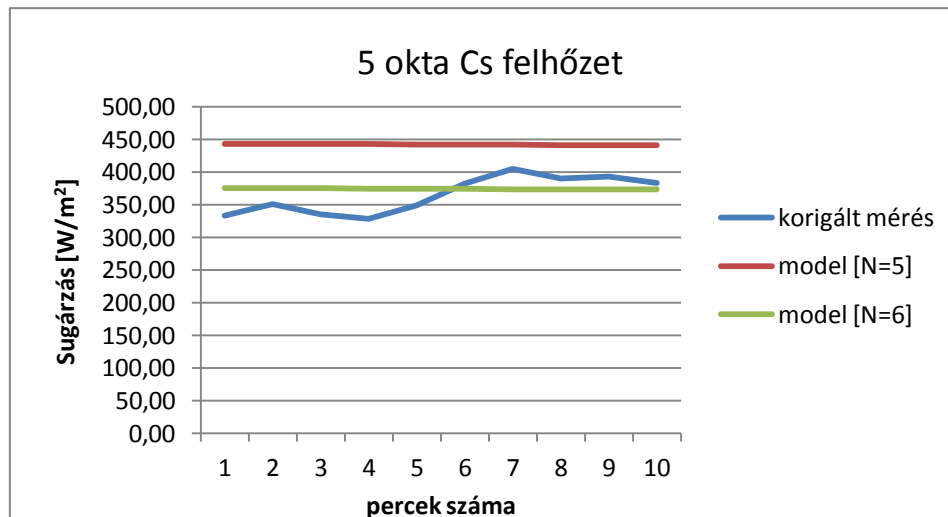
Vízszintes síkra érkező sugárzás derült időben				
kalibráció	mérések száma	MAPE [%]	RMSE [W/m^2]	hiba szórása [W/m^2]
első	655	8	51	49
második	655	7	50	36

A 4. táblázatban azt látjuk, hogy vízszintes síkon sincs nagy különbség a két kalibráció eredménye között, a kalibrált mérés és a modell eltérését jellemző átlagos abszolút hibaszázalék minimum 7, maximum 8 százalék.

A modellt alapvetően derült égbolt esetén vizsgáltam, de ahogy a 4.2. fejezetben bemutattam, felhős időben is folytattam méréseket. Ezeket a vízszintes méréseket a modellel összehasonlítva 8 okta (18. ábra) és 5 okta (19. ábra) cirrostratus esetén a következő eredményeket kaptam.



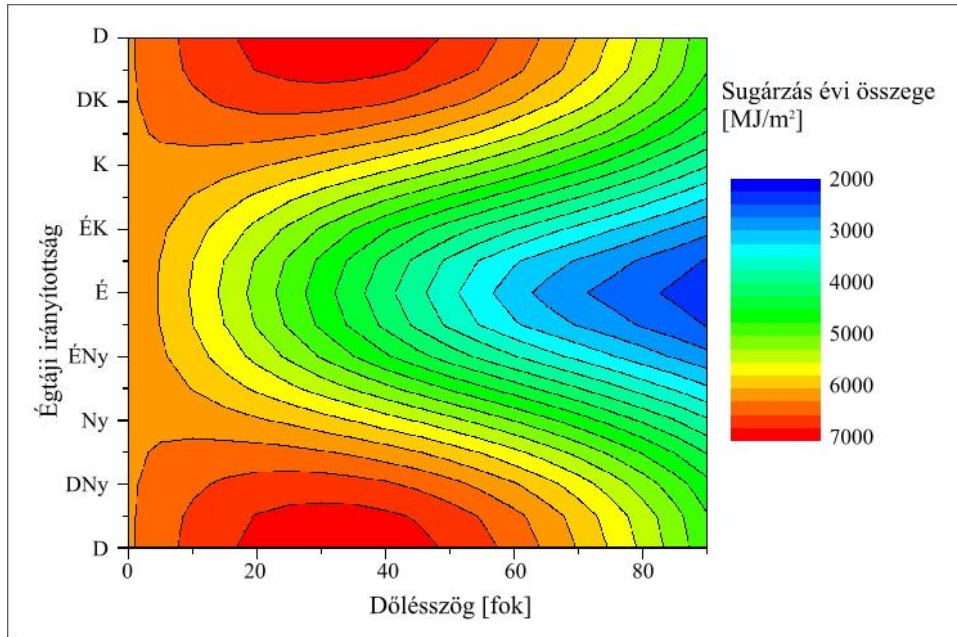
18. ábra: A kalibrált mérés és a modell összehasonlítása különböző parametризációval 8 okta Cirrostratus esetén



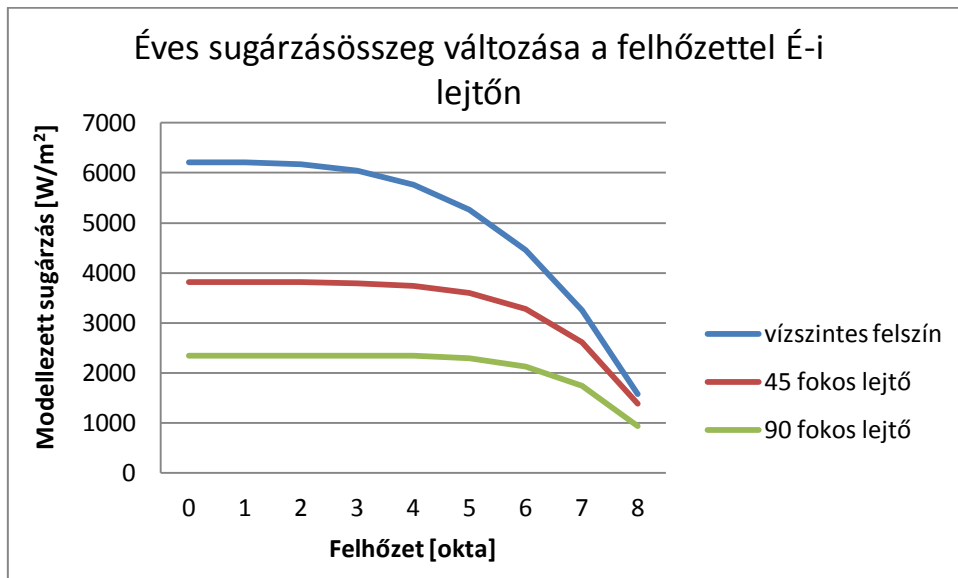
19. ábra: A kalibrált mérés és a modell összehasonlítása különböző parametrizációval 5 okta Cirrostratus esetén

Amint azt a 18. és 19. ábrán látjuk 8 okta Cs esetén a modellt alul, míg 5 okta Cs esetén felül becsülte a mért sugárzást. Ebből arra következtethetünk, hogy a felhőzetnek nem csak a mennyisége, de a típusa is befolyásolja az eredményeket, amelyet a modell egyelőre még nem vesz figyelembe.

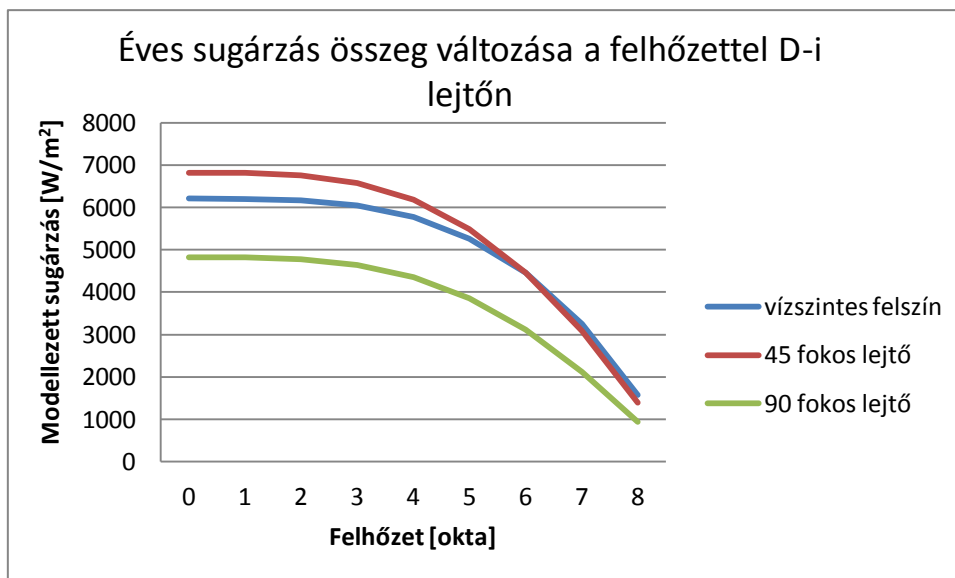
Ugyanezen modellel elkészítettük az éves sugárzásösszegeket is, előbb derült égbolt esetén, mintegy potenciális sugárzást számítva az égtájat 22,5 fokként, a dőlésszöget 10 fokként változtatva (20. ábra), majd a modellben a borultság értékét folyamatosan növelve az eredményeket az egyes irányokban is összehasonlítottuk (21., 22., 23. ábra). Magyarországon a felhőzetet is figyelembe véve az éves sugárzás 4300 és 4900 MJ/m² közötti [2 – met.hu], a 20. ábrán bemutatott potenciálisan lehetséges érték a különböző irányítottságú és dőlésszögű lejtőkre 2000 és 7000 MJ/m² között változik. A dőlésszög bizonyos fokú növelésével – különösen déli kitettségű lejtők esetén – növelhetjük a beérkező sugárzás összegét, ellentétben az északi kitettségű lejtőkkel, ahol ez jelentős csökkenést eredményez a sugárzásösszegben. Az ábrán látható éves sugárzás derült égbolt esetén maximumát egy dél felé néző 30 fokos lejtőn veszi fel, minimumát pedig egy északi felé néző 90 fokban megdőntött felszínen.



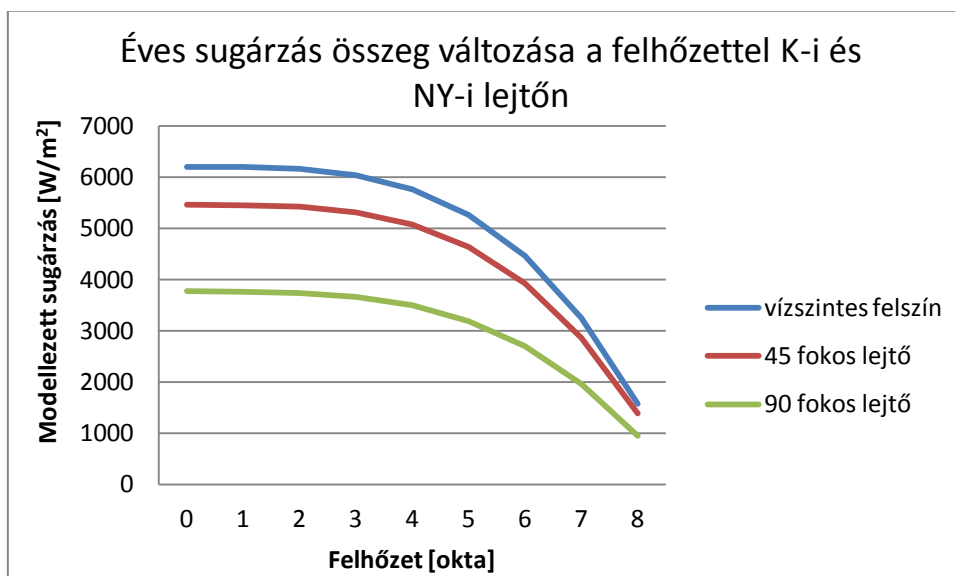
20. ábra: Az éves sugárzásösszeg derült égbolt esetén égtájanként és dőlésszögenként



21. ábra: Az éves sugárzásösszeg változása a felhőzettel É-i lejtőn



22. ábra: Az éves sugárzásösszeg változása a felhőzettel D-i lejtőn



23. ábra: Éves sugárzásösszeg változása a felhőzettel K-i és NY-i lejtőn

Amint a fenti diagramokon látjuk a felhőzet hatása a modell szerint nem lineárisan változik a borultság növekedésével. Keleti és nyugati irányba néző lejtők esetén nem tapasztalható nagy különbség az évi besugárzást illetően a modell alapján, az északi és déli lejtők között azonban annál inkább. Déli irányban azt tapasztaljuk, hogy egy 45 fokos lejtő növeli a beérkező sugárzást 6 oktánál kevesebb felhőzet esetén, ellentétben az északi iránnyal, ahol mindkét lejtő jelentősen csökkenti a beérkező sugárzás mennyiségét a felhőzettől függetlenül.

6. Összefoglalás

Dolgozatomban a rövidhullámú sugárzás mérésének és modellezésének elméleti összefoglalása után egy izotróp sugárzási modell részleteit mutattam be, amellyel különböző égtáji irányítottság és dőlésszög szerint számítható az adott felületre érkező rövidhullámú sugárzás. A modell eredményeit egy BENNING SUN2 típusú kézi sugárzásmérő műszer mérési adataival vettem össze, amelyet az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában két időszakban végzett sugárzásmérési adatok segítségével kalibráltam. Munkám során az alábbi tapasztalatokat szereztem, következtetéseket vontam le:

- A kézi műszer mérései jó egyezést mutattak az OMSZ etalonként használt Kipp&Zonen műszerének adataival sík felszínen végzett mérés és derült égbolt esetén.
- Ez az egyezés romlott alacsony napállás valamint borultság esetén.
- A kalibrációs függvény némi eltérést mutatott a Nap felszálló és leszálló ágában.
- Az izotróp sugárzási modell eredményei jó egyezést mutattak a sík felszínre vonatkozó korrigált mérési adatokkal derült égbolt esetén.
- Ahhoz, hogy a kézi műszerrel lejtős felszínen és alacsony sugárzási tartományban is pontos méréseket végezhessünk a modell verifikálására, szükséges lenne a BENNING és a Kipp&Zonen sugárzásmérők ferde síkon végzett méréseinek összevetésére is.
- Az alkalmazott modell pontosságának javítása érdekében felhős égbolt esetén szükséges lenne a felhőzet parametrizációjának specifikálására különböző felhőtípusok szerint.

A dolgozatomban bemutatott kalibrációs mérések eredményei hasznosak lehetnek a kézi műszerrel végzett további rövidhullámú mérések számára is.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Tóth Zoltánnak és Fekete Dénesnek, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak, hogy lehetővé tették a dolgozatomban felhasznált műszer kalibrációját az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Főobszervatóriumában, külön köszönettel Tóth Zoltánnak az adatokért. Köszönöm témavezetőmnek, Mészáros Róbertnek a téma felvetését és a műszert, amelyet rendelkezésemre bocsátott, valamint a dolgozat készítése során nyújtott segítséget. Továbbá köszönöm szeretteimnek a támogatást, külön kiemelve Buzás Attilát és Csatády Zsuzsát valamint szüleimet, Novotni Editet és Kerek Attilát.

Irodalomjegyzék

- Ahmad, M.J., Tiwari, G.N.*, 2010: Solar radiation models – review, *International Journal of Energy and Environment*, 513 – 532.
- Alabiso, M., Parrini, F., Sidri, R.*, 1989: Hourly solar radiation on sloping planes with different orientations from measured daily radiation on the horizontal surface, *Environmental Software* 88, 35 – 40.
- Alsaad, M.A.*, 1990: Characteristic distribution of global radiation for Amman, Jordan, *Solar and Wind Technology* 7, 261 – 266.
- Angstrom, A.*, 1924: Solar and terrestrial radiation, *Quarterly Journal of Meteorological Society* 50, 121 – 125.
- Badescu, V.*, 2002: 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces, *Renewable Energy* 26, 221 – 233.
- Bakirci, K.*, 2008: Correlation for estimation of solar radiation on horizontal surface, *Journal of Energy Engineering* 134, 130 – 134.
- Benson, R.B., Paris, M.V., Sherry, J.E., Justus, C.G.*, 1984: Estimation of daily and monthly direct diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements, *Solar Energy* 32, 523 – 535.
- Chang, T. P.*, 2009: The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere, *Solar Energy* 83, 1274 – 1284.
- Chouard, P., Michel, H., Simon, M.F.*, 1977: *Bilan thermique d'une maison solaire*, Eyrolles Kiadó, Parigi
- Dogniaux, R., Lemoine, M.*, 1983: Classification of radiation sites in terms of different indices of atmospheric transparency, *Solar Energy research and development in the European Community*, F sorozat, 2. kötet, Reidel Kiadó, Dordrecht
- Gueymard, C.*, 1987: An anisotropic solar irradiance for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms, *Solar Energy* 38, 367 – 386.
- Gueymard, C.A.*, 2009: *Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications*. *Solar Energy* 83. 432–444.
- Hay, J.E.*, 1979: Study of short wave radiation on non-horizontal surface, In: *Atmospheric Environment Service*, Downview Kiadó, Ontarió, 72 – 12.
- Hay, J.E., Davis, J.A.*, 1980: Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface, In: *Proceedings of First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Canadian Atmospheric Environmental Service, Canada, 59 – 72.

- Iqbal, M.*, 1979: Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine, *Solar Energy* 23, 169 – 173.
- Jain, P.C.*, 1990: A model for diffuse and global radiation on horizontal surface, *Solar Energy* 45, 301 – 308.
- Kholagi, A., Ramadan, M.R.I., Alih, Z.H.E., Fattah, Y.A.*, 1983: Global and diffuse solar irradiance in Yemen, *Solar Energy* 31, 55 – 62.
- Kilic, A., Oztruk, A.*, 1983: Solar energy, Kipas Kiadó, Isztambul
- Klucher T.M.*, 1979: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces, *Solar Energy*, 23, 111 – 114.
- Kronakis, P.S.*, 1986: On the choice of angle of tilt for south facing solar collectors in Athens Basin Area, *Solar Energy* 36, 217 – 225.
- Lewis, G.*, 1983: Diffuse irradiation over Zimbabwe, *Solar Energy* 31, 125 – 128.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C.*, 1960: The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy* 4: 1 – 9.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C.*, 1963: The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors, *Solar Energy* 7, 53 – 74.
- Ma, C.C.Y., Iqbal, M.*, 1983: Statistical comparison of models for estimating solar irradiation on inclined surfaces, *Solar Energy* 31, 313 – 317.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Meyer, H.*, 2009: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 54: 131 – 139.
- Mészáros R.*, 2003: A felszínközeli ózon száraz ülepedésének meghatározása különböző felszíntípusok felett. *PhD értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.*
- MSZ-21457-4*, 2002: A felszínközeli légréteg dinamikai jellemzőinek kiszámítása mértékadó meteorológiai adatokból. *Magyar Szabvány.*
- Muneer, T., Manuawwar, S.*, 2006: Improved accuracy models for hourly diffuse solar radiation, *Journal of Solar Energy Engineering* 128, 104 – 117.
- Page, J.K.*, 1961: The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surface from sunshine records for latitudes 40N – 40S, *Proceedings of UN Conference on New Sources of Energy* 4, 378 – 390.
- Perez, R., Stewart, R., Arbogast, R., Selas, J., Scott, J.*, 1986: An anisotropic hourly diffuse radiation model for surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation, *Solar Energy* 36, 481 – 497.

- Reindl, D.T., Beckman, W.A, Duffie, J.A., 1990: Diffuse fraction correlations, Solar Energy 45, 1 – 7.*
- Rensheng, C., Ersi, K., Jinaping, Y., Shihua, L., Wenzhi, Z., 2004: Validation of five global radiation models with measured daily data in China, Energy Conversation and Management 45, 1759 – 1769.*
- Shukla, K.N.,Rangnekar, S.,Sudhakar, K., 2015: Comperative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India, Energy Reports 1: 96 – 103.*
- Skartveit, A., Olseth, J.A., 1986: Modeling slope irradiance at high latitudes, Solar Energy 36, 333 – 344.*
- Szabó, P., 2001: Favázas épületek nyári hőkomfortja Magyarországon, doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 99 p.*
- Tamps, R.C., Coulson, K.L, 1977: Solar radiation incident upon slopes of different orientations, Solar Energy 19, 179 – 187.*
- Tasemiroglu, E., Sever, R., 1991: Estimation of monthly average daily, horizontal diffuse radiation in Turkey, Energy 16, 787 – 790.*
- Willmott, C.J., 1982: On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors, Solar Energy 28, 205 – 216.*
- Weiss, A., Norman, J.M., 1984: Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components, Agricultural and Forest Meteorology 34, 205 – 213.*

[1 - Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiMuszerekEsMerorendszerek/book.pdf>

[2 – met.hu]

http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/sugarzas/