

## PIRANOMÉTER SZINTEZÉSI HIBÁJÁNAK HATÁSA A MÉRT GLOBÁLSUGÁRZÁS ÉRTÉKEKRE

### IMPLICATIONS OF THE LEVELING ERROR OF PYRANOMETER ON THE MEASURED VALUES OF GLOBAL RADIATION

Menyhárt László<sup>1</sup>, Anda Angéla<sup>1</sup>, Nagy Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pannon Egyetem Georgikon Kar, Meteorológia és Vízgazdálkodás Tanszék, 8360 Keszthely, Festetics u. 7.,  
menyhart-l@georgikon.hu, anda-a@georgikon.hu

<sup>2</sup>Országos Meteorológiai Szolgálat, Léggörfizikai és Méréstechnikai Osztály, 1181 Budapest, Gilice tér 39., nagy.z@met.hu

**Összefoglaló.** A piranométer szintezési hibájának a következményeit vizsgáltuk. Éves, havi, napi és 10 perces globálsugárzás összegek esetében meghatároztuk a néhány fokos kibillenés által okozott relatív hibát. A vízszintes és a ferde felületre érkező globálsugárzást egyaránt a direkt-, diffúz- és reflexsugárzásból állítottuk elő. Ezeket a komponenseket gondosan beállított, folyamatosan felügyelt műszerekkel mértük. 2°-os kibillenés délre az éves összegben 1,4%-os relatív hibát eredményezett. A novemberi, decemberi és januári havi összeg hibája meghaladta a 3%-ot. Derült, téli napokon a napi összeg hibája 9% körül volt. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a megbízható globálsugárzás adatok érdekében szükséges egy olyan módszer kifejlesztése, amellyel az esetleges szintezési hiba utólag is kimutatható.

**Abstract.** Implications of the leveling error of the pyranometer were investigated. Relative error caused by inclination of a few degrees was calculated for the annual, monthly, daily and 10-minute global radiation. Global irradiance incident on both the horizontal and the tilted surface was calculated from the direct beam, diffuse and the ground-reflected irradiance. These components were measured by accurately leveled and regularly supervised instruments. A tilt as small as 2° towards the South caused 1,4% relative error of the annual sum. The same tilt resulted in relative error of over 3% in the monthly sum of November, December and January. Even larger error, about 9% was found in the daily sum on clear sky days in winter. These results show that in order to obtain reliable values it is necessary to develop a method with which the accidental tilt error can be detected after the measurement.

**Bevezetés.** Az utóbbi évtizedekben folyamatosan nőtt az igény a nagy pontosságú globálsugárzás adatok iránt. A meteorológiai és klíma modellek, a napkollektoros és fotoelektromos rendszerek tervezése, a szoláris építészeti egyaránt megbízható, nagy térbeli és időbeli felbontású globálsugárzás adatokat igényel. Ehhez igazodva a sugárzásmérő eszközök is jelentős fejlődésen mentek keresztül. A meteorológiai állomások közül egyre több helyen van globálsugárzás mérés és általánossá vált a piranométerek ipari célokra történő felhasználása is. Mindezek ellenére más meteorológiai paraméterrel összevetve a napsugárzás mérése van a legtöbb hibalehetőségnek kitéve (Moradi, 2009). Ezek a hibák két nagy csoportba sorolhatók: a mérőeszköz felépítéséből, a mérés elvéből következő pontatlanságok, illetve a mérőeszköz nem megfelelő elhelyezéséből, működtetéséből származó hibák (Younes et al., 2005). Az első csoportba tartozik a piranométer koszinuszhibája, azimuthibája, a szenzor érzékenységének hőmérsékletfüggése, hullámhosszfüggése, stabilitás és linearitás hibája valamint a termoelemes piranométerek esetén a hosszú hullámú veszteségből származó offszethiba. A második csoportba tartozik a piranométer nem megfelelő vízszintezése, a horizontkorlátozás, a bűrára kerülő por, hó, vízcseppek, madárürülék. Továbbá idetartozik a kábelek mechanikai terheléséből (piezoelektromosság) származó és a mérőberendezés körüli elektromos tér okozta hiba is. Az elmúlt években számos olyan eljárást publikáltak, amely alkalmas a globálsugárzás idősorok mérés utáni ellenőrzésére (Geiger et al., 2002, Muneer és Fairouz, 2002, Younes et al., 2005, Shi et al., 2008, Moradi, 2009, Tang et al., 2010, Journée és Bertrand, 2011, Mirás et al., 2012). Ezek a módszerek egy alsó és egy felső küszöbértéket határoznak meg minden egyes méréshez, és hibásnak tekintik azokat az értékeket, amelyek nem esnek a két küszöbérték közé. Így kiszűrjük a kiugróan alacsony

vagy magas értékeket, de nem foglalkoznak azzal, hogy a küszöbértékek közé eső adat is lehet hibával terhelt.

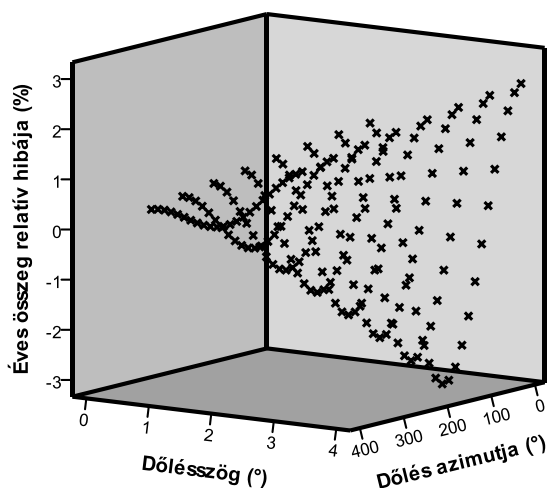
Szintezési hiba korrekciójára dolgoztak ki módszert Bacher et al. (2013). A derült égbolthoz tartozó globálsugárzást egy modellel becsüli, majd ez alapján kvantilis regresszió segítségével korrigálja az adatokat a dőlést jellemző szögek meghatározása nélkül.

E tanulmányban azt vizsgáljuk, hogy egy néhány fokos szintezési hiba milyen mértékben módosítja a globálsugárzás évi összegének, havi összegének, napi összegének és a 10 perces átlagának a mért értékét. 5°-os dőlés már szabad szemmel is egyértelműen látható, ezért vizsgálatainkat az ennél kisebb dőlésszögekre korlátoztuk. A gyártók a piranométerek pontos vízszintezése érdekében vízmértéket, ún. libellát építenek a műszer házára. Gondos beállítás esetén a szenzor síkja és a vízszintes által bezárt szög a piranométer típusától függően 0,1° vagy 1° alá szorítható. Ha a vízszintezés nem volt pontos, vagy az állvány a mérés ideje alatt megbillent, a libelláról csak a dőlés tényét tudjuk leolvasni, a mértékét nem. Mivel ilyen esetekben sem a dőlés iránya, sem a nagysága, sem ezeknek az időbeli változása nem ismert, utólagos korrekcióra nincs lehetőség. A műszer gondos telepítése esetén is előfordulhat, hogy a műszer később megbillen, különösen olyan automata állomásokon, ahol a műszer több évre „magára hagyva” végzi a méréseket.

A globálsugárzás mérés szintezési hibája fokozottan jelentkezik a víz fölötti, mozgó hajóról vagy bójáról történő mérések esetén. Periodikus mozgást végző piranométerrel mért sugárzásadatok korrekciós lehetőségével foglalkozott Long et al., (2010) és Boers et al., (1998). Katsaros és DeVault (1986) elméleti számítások alapján vizsgálta, hogy mekkora hibát okoz, ha folyamatosan dőlöngél, illetve ha fixen, de ferdén van rögzítve a piranométer. Számításaiban a vízszintes felületre vonatkoztatott direkt/globál arányt 0,7-nek tekintette. Dolgo-

zatunk újdonsága abban áll, hogy ezt az arányt nem becsültük, hanem mért adatokkal dolgoztunk.

**A vízszintes és a kibillentett piranométerre eső globálisugárzás.** A piranométer kibillenéséből származó hiba függ a nap helyzetétől, a piranométer dőlésétől és a direkt-sugárzás/globálisugárzás aránytól. Ha ezeket a paramétereket megfelelően kis értékkel változtatva szeretnénk méréseket végezni, az rendkívül hosszantartó és költséges volna. Ezért nem kibillentett sugármérőkkel dolgoztunk, hanem a szabvány szerint mért direkt-, diffúz- és reflexsugárzásból állítottuk elő a ferde piranométerre eső globálisugárzás értékét. A vizsgálatainkhoz felhasznált mérések 2011. január 1. és december 31. között, az Országos Meteorológiai Szolgálat pestszentlőrinci obszervatóriumában (47°25'45"É és 19°10'56"K) történtek. A diffúz- és reflexsugárzást Kipp&Zonen CM11 piranométer, a direkt-sugárzást Kipp&Zonen CH1 pirheliométer mérte. A méréseket gondosan beállított műszerekkel, folyamatos felügyelet mellett végezték. A mintavételezés 2 másodpercenként történt, ezeknek a 10 perces átlaga került az adatgyűjtőre. A napkoordinátákat a 10 perces intervallum közepéhez számítottuk a Reda és Andreas (2004) tanulmányában leírt algoritmus szerint.



1. ábra: Globálisugárzás évi összegének relatív hibája a piranométer dőlésének nagysága és iránya (azimut) függvényében.

A piranométer egy félgömbnyi,  $2\pi$  szteradián nagyságú térszögből érkező rövidhullámú sugárzás intenzitását méri. Vízszintes piranométer esetén ez a direkt-sugárzás függőleges komponensének és a diffúz sugárzásnak az összege. Ha a műszert kibillentjük, akkor a direkt-sugárzásnak a kibillentett felületre merőleges összetevőjével kell számolnunk. A ferde piranométer kevesebbet lát az égboltból, ezért a diffúz sugárzásból is kevesebbet mér. Ugyanakkor a felszínről visszaverődő reflexsugárzás egy része többletként jelenik meg a mérésben. Vizsgálatainkban olyan esetekre szorítottunk, ahol a dőlés kismértékű, 5°-nál kisebb, ezért számításainkban a diffúz és reflexsugárzást egyaránt izotrópnak tekintettük. A használt egyenletek:

$$G_H = B \cdot \sin\varphi + D \quad (1)$$

$$G_f = B_f + D_f + R_f \quad (2)$$

ahol  $G_H$  a vízszintes felületre érkező globálisugárzás;  $B$  a mért direkt-sugárzás;  $\varphi$  a napmagasság;  $D$  a mért diffúz sugárzás;  $G_f$  a ferde felületre érkező globálisugárzás;  $B_f$  a direkt-sugárzás ferde felületre eső komponense;  $D_f$  a ferde felületre érkező diffúz sugárzás és  $R_f$  a ferde felületre érkező reflexsugárzás. A (2) egyenlet jobb oldala így számolható (Iqbal, 1983):

$$B_f = B[\sin\varphi \cdot \cos s + \cos\varphi \cdot \cos(\alpha - \gamma) \cdot \sin s] \quad (3)$$

$$D_f = D \cdot \frac{1 + \cos s}{2} \quad (4)$$

$$R_f = R \cdot \frac{1 - \cos s}{2} \quad (5)$$

ahol  $s$  a ferde síknak a vízszintessel bezárt szöge;  $\alpha$  a Nap azimutja;  $\gamma$  mutatja, hogy merre dől a piranométer ( $\gamma=0$  esetén délre dől és nyugatra nő az azimuthoz hasonlóan);  $R$  a mért reflexsugárzás. A (4) és (5) egyenletekből jól látható, hogy ha kicsi a dőlésszög ( $s$ ), akkor  $D_f \approx D$  és  $R_f \approx 0$ . Vagyis a dőlés miatti változás lényegében a direkt komponenshez köthető. Mivel a vízszintes felületre számított és mért globálisugárzás között előfordul kismértékű eltérés, ezért használtuk vízszintes esetben is a számított értéket a mért érték helyett. A mérés relatív hibáját az

$$E = \frac{G_f - G_H}{G_H} \quad (6)$$

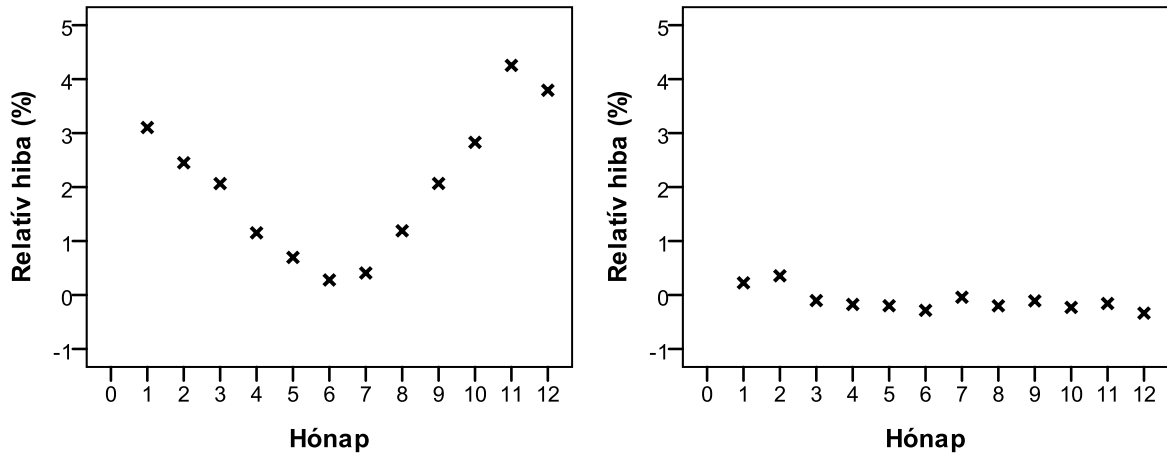
összefüggéssel határoztuk meg. Ha a mért értékek közül valamelyik negatív volt (horizont körüli mérések), akkor azt 0 értékkel helyettesítettük, illetve a (2) egyenletben a  $B_f$  direkt komponenset csak akkor vettük figyelembe, ha az pozitív. Ugyanis előfordulhat, hogy pl. a nyugatra döntött piranométer esetén napkelte körüli mérésnél a (3) egyenlet alapján  $B_f$  értéke negatívnak adódik.  $\gamma$  értékét 0°–345° között 15°-onként,  $s$  értékét 0°–4,5° között 0,5°-onként változtattuk. Ezekkel a szögekkel minden rekord esetén kiszámoltuk a globálisugárzás értéket, majd ezek évi összegének, havi összegének, napi összegének és a 10 perces átlagnak számítottuk a relatív hibáját. A piranométer dőlését egész évben állandónak tekintettük.

**Eredmények.** A globálisugárzás évi összegének a hibáját mutatja az 1. ábra. A vizsgált dőléstartományban adott irányú dőlés esetén a hiba közel egyenesen arányos a dőlésszöggel. Adott nagyságú dőlés esetén pedig függ a dőlés irányát megadó szög koszinuszától, de azzal nem egyenesen arányos. Amikor északra ( $\gamma = 180^\circ$ ) dől a piranométer, akkor nagyobb az évi összeg csökkenése, mint az a növekedés, amit ugyanilyen mértékű délre ( $\gamma = 0^\circ$ ) dőlés esetén tapasztalunk. Ennek megfelelően a relatív hiba nagyságát a következő egyenlettel becsülhetjük:

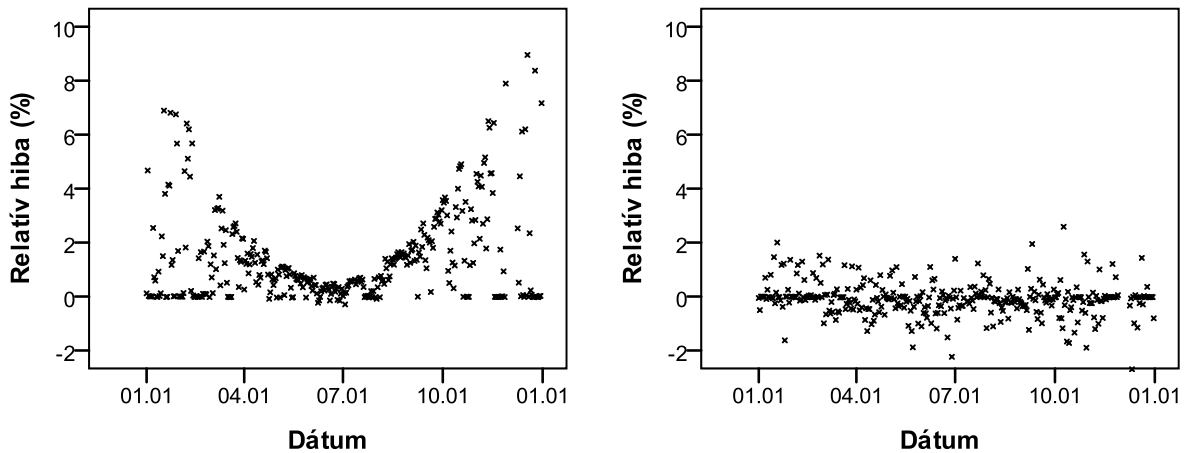
$$E_{\text{év}} = s(-0,00023 + 0,0070 \cos\gamma) \quad (7)$$

ahol  $E_{\text{év}}$  a globálisugárzás évi összegének relatív hibája,  $s$  a dőlésszög fokban mérve,  $\gamma$  pedig a dőlés azimutja.

Az illeszkedést jellemző  $R^2 = 0,994$  érték rendkívül jó illeszkedésről tanúskodik. Ha a piranométer északra dől, akkor a dőlésszög 1°-os növekedése -0,0068 többlethibát jelent. Ez az érték délre dőlés esetén 0,0065. Legkisebb a hiba a K-Ny irányú dőlés esetén, ekkor 1 fokos dőlésszög -0,0002 relatív hibát eredményez.



2. ábra: A globálsugárzás havi összegének relatív hibája 2°-os délre (a), illetve nyugatra (b) dőlés esetén



3. ábra: A globálsugárzás napi összegének relatív hibája 2°-os délre (a), illetve nyugatra (b) dőlés esetén

A havi összeg, a napi összeg és a 10 perces átlag relatív hibáját 2°-os kibillenés esetén mutatjuk be, ami nem ritka a mérések során. Déli irányba történő kibillenés esetén a legkisebb hibát a júniusi összegben, a legnagyobbat a novemberiben figyeltük meg (2a. ábra). Nyári hónapokban a relatív hiba 1% alatti, a téli időszakban 2,5–4% közötti érték. Minél kisebb a napsugaraknak a vízszintes-szel bezárt szöge, annál nagyobb mértékben torzítja a kibillenés a globálsugárzás mért értékét. Ez okozza a nagyobb relatív hibát a téli időszakban mind a havi, mind a napi összegben.

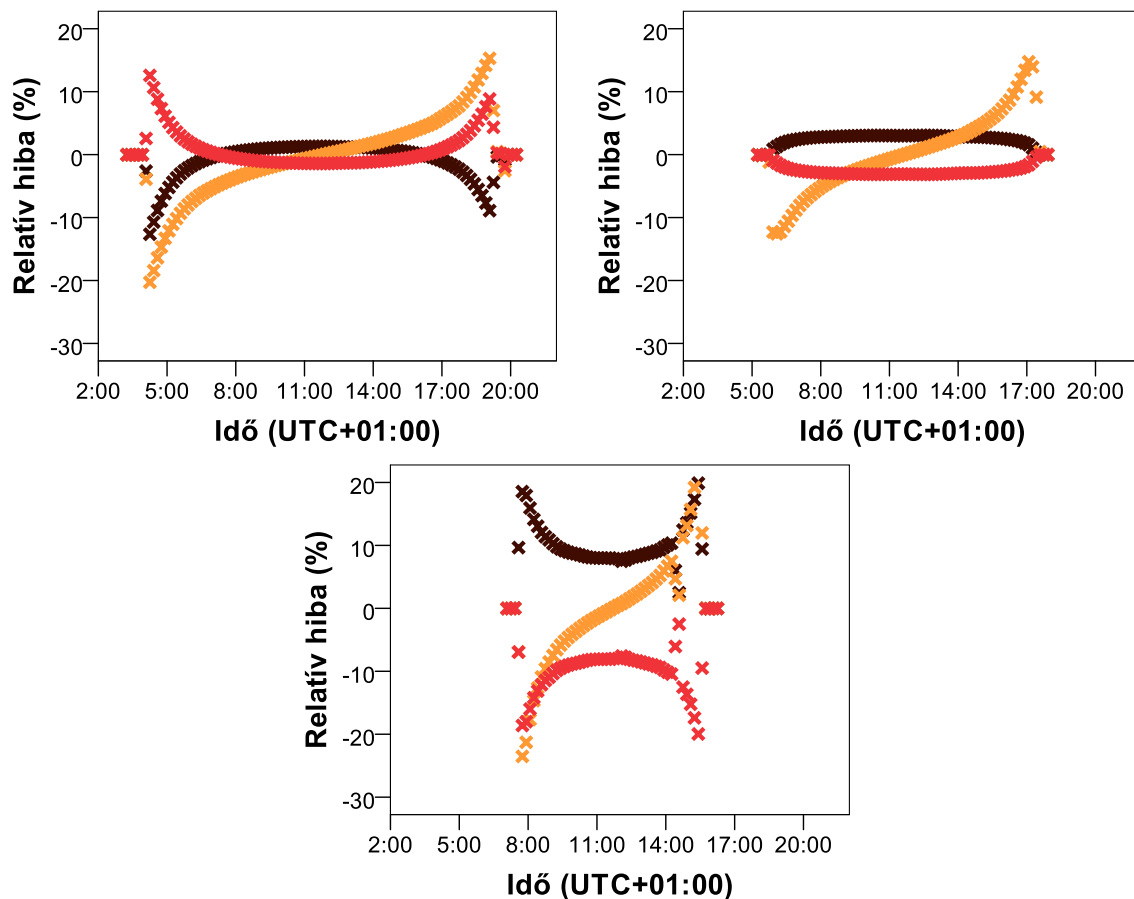
A napi összeg hibájának jellegzetes évi menete van (3. ábra). A 0 körüli relatív hiba azokhoz a napokhoz tartozik, amikor egész nap felhős volt az égbolt, a direkt sugárzás nulla, vagy elhanyagolható mennyiségű volt. Az ábrázolt pontok felső burkológörbéje kirajzolja a teljesen derült napok esetén megfigyelhető relatív hibát (3a. ábra). Ennek értéke 9% fölött van a téli napforduló környékén, míg 0,6% körül a nyári napforduló környékén.

Az évi, a havi és a napi összegben egyaránt É-D irányú kibillenésnél találtuk a legnagyobb abszolút értékű hibát. K-Ny irányú dőlés esetén a délelőtti és a délutáni ellentétes előjelű hiba gyakorlatilag kioltja egymást, ha az égbolt borultsága napközben számottevően nem változott (2b., 3b. ábra). Napi összeget tekintve Ny irányú dőlés esetén a legnagyobb pozitív előjelű hibákat azokon a napokon találjuk, amikor délután volt derült az égbolt,

délelőtt pedig borult. A fordított helyzet pedig a legnagyobb abszolút értékű, negatív előjelű hibát eredményezi. Ezekben az esetekben kb. 2% hibát okoz a 2°-os K-Ny irányú kibillenés.

A globálsugárzás 10 perces átlagának napi menetét vizsgálva a piranométer dőlése mellett a Napnak az égbolton leírt pályája is jelentősen befolyásolja a megfigyelt hibát. Ennek szemléltetésére a 3 legkülönbözőbb esetet mutatjuk be. Egy-egy teljesen derült napot kerestünk a nyári és téli napforduló, valamint a napéjegyenlőségek környékéről (4a., b. és c. ábra). A többi nappal megfigyelhető hibagörbék átmenetet képeznek e szélsőértékek között. A téli napforduló környékén 2°-os É-D irányú dőlés az egész nap folyamán 8%-nál nagyobb hibát eredményez (4c. ábra), de alacsony napállásnál ennek értéke 20% körüli. 30° feletti napmagasságnál viszont 2°-os kibillenés 2%-nál kisebb relatív hibát eredményez függetlenül attól, hogy milyen irányba dőlt meg a piranométer.

**Összegzés.** A piranométer kismértékű, szabad szemmel nem megfigyelhető, 2°-os megbillenése is jelentős, 1–8%-os hibát okozhat a globálsugárzás napi összegében. Havi összeget tekintve ez a hiba a dőlés nagyságától és irányától függően 0,5–4% közötti, évi összeg esetén pedig 0,1–2%. Legnagyobb hiba a globálsugárzás pillanatnyi értékében jelenik meg alacsony napállásnál. A piranométerek osztályozására vonatkozó ISO-9060 szabvány szerint a globálsugárzás napi összegének a bizonyta-



4. ábra: A globálisugrászás 10 perces átlagának relatív hibája  $2^\circ$ -os dőlés esetén a nyári napforduló környékén (a), az őszi napéjegyenlőség környékén (b) és a nyári napforduló környékén (c) dőlés azimutja  $\times \rightarrow 0^\circ$  (délre),  $\times \rightarrow 90^\circ$  (nyugatra),  $\times \rightarrow 180^\circ$  (északra)

lansága nem haladhatja meg a 2%-ot a referencia piranométer, az 5%-ot az első osztályú és a 10%-ot a másodosztályú piranométer esetén (ISO, 1990). Vizsgálataink azt mutatják, hogy  $1^\circ$ -os kibillenés már nagyobb hibát okoz, mint a referencia piranométernél megengedett érték.  $2,5^\circ$ -os kibillenés pedig a másodosztályú piranométernél megengedettnél is nagyobb hibát eredményez. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy szükség van egy olyan módszer kifejlesztésére, amivel az adatsorból utólag ellenőrizhető, hogy megfelelő volt-e a piranométer vízszintezése.

#### Irodalom

- Bacher, P., Madsen, H., Perers, B. and Nielsen, H., A., 2013: A non-parametric method for correction of global radiation observations. *Solar Energy* 88, 13–22.
- Boers, R., Mitchell, R.M. and Krummel, P.B., 1998: Correction of aircraft pyranometer measurements for diffuse radiance and alignment errors. *Journal of Geophysical Research* 103(D13), 16753–16758.
- Geiger, M., Diabate, L., Menard, L. and Wald, L., 2002: A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *Solar Energy* 73(6), 475–80.
- ISO, 1990: Solar Energy – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. *International Organization for Standardization*, ISO-9060.
- Iqbal, M., 1983: An introduction to solar radiation. *Academic Press*, New York, (11), 303–334.
- Journée, M. and Bertrand, C., 2011: Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. *Solar Energy* 85, 72–86.
- Katsaros, K. B. and DeVault, J. E., 1986: On irradiance measurement errors at sea due to tilt of pyranometers. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 3, 740–745.
- Long, C.N., Bucholtz, A., Jonsson, H., Schmid, B., Vogelmann, A. and Wood, J., 2010: A Method of Correcting for Tilt from Horizontal on Downwelling Shortwave Irradiance Measurements on Moving Platforms. *The Open Atmospheric Science Journal* 4, 78–87.
- Miras-Avalos, J. M., Rodriguez-Gomez, B. A., Meizoso-Lopez, M. C., Sande-Fouz, P., Gonzalez-Garcia, M. A. and Paz-Gonzalez, A., 2012: Data quality assesment and monthly stability of ground solar radiation in Galicia (NW Spain). *Solar Energy* 86, 3499–3511.
- Moradi, I., 2009: Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy* 34, 1–6.
- Muneer, T. and Fairouz, F., 2002: Quality control of solar radiation and sunshine measurements—lessons learnt from processing worldwide databases. *Building Services Engineering Research and Technology* 23(3), 151–66.
- Reda, I. and Andreas, A., 2004: Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, *Solar Energy*. 76(5), 577–589.
- Shi, G.Y., Hayasaka, T., Ohmura, A., Chen, Z.H., Wang, B., Zhao, J.Q., Che, H.Z. and Xu, L., 2008: Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 1006–1016.
- Tang, W., Yang, K., He, J. and Qin, J., 2010: Quality control and estimation of global solar radiation in China. *Solar Energy* 84, 466–475.
- Younes, S., Claywell, R. and Muneer, T., 2005: Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches. *Energy* 30, 1533–1549.