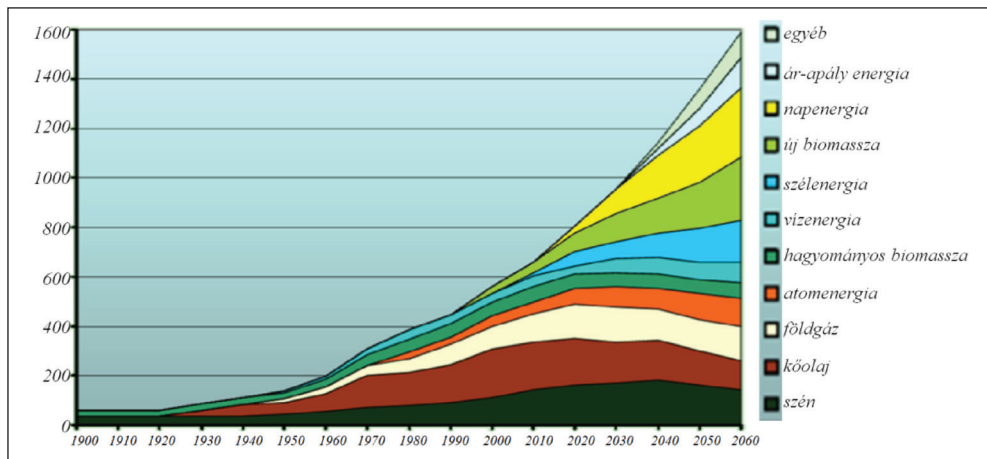


Az energiabiztonság és a környezetvédelem szempontjai mára felértékelődtek. A kutatók a felvetődő problémák megoldását a fenntartható fejlődés jegyében kívánják elérni. Ennek egyik útja lehet a napenergia közvetlen hasznosítása a villamosenergia-termelésben, ám e megoldási módszer műszaki-gazdaságossági megítélése erősen vitatott. Nehéz eligazodni az érvek és ellenérvek dzsungelében, hiszen több olyan, elsőre szakszerűnek tűnő indoklással és számszerűsített levezetéssel találkozunk, melyeket a tapasztalatok megcáfolnak. E jelenségek drasztikusan csökkentik az ingyenesnek hirdetett, ám nagy beruházást igénylő energia iránti befektetési hajlandóságot. E tanulmány itt közölt első része a napsugárzás intenzitásának tudományos leírását mutatja be energetikai szempontból, miközben szemléletesen felidézi a szükséges matematikai ismereteket, ami alapjául szolgál a következő részben sorra kerülő megfűtés-számítási modellek korrekt értékeléséhez.

Kulcsszavak: napenergia, TSI, ARMA-modell, spektrális teljesítmény-eloszlás (SPD)

Bevezetés

Naprendszerünk $2 \cdot 10^{30}$ kg tömegű anyagának 99,87%-a koncentrálódik a közel 1,4 millió km átmérőjű Napban. E központi óriás gravitációs ereje magához láncolja a bolygórendszert, miközben $3,86 \cdot 10^{26}$ W teljesítményű sugárzásával árasztja el a teret. Becslések szerint a földi ökoszisztéma számára szükséges energia 98%-ának szintén ez a forrása. Az 1. ábra a világ energiafogyasztásának másfél évszázados trendjeit vázolja. E grafikon egyben azt is feltűnteti, hogy milyen primer energiahordozók szolgálnak ezen energiafogyasztás fedezetéül. A fosszilis energiahordozók kimerülőben vannak, az atomenergiát sokan veszélyesnek ítélik, így nem meglepő, hogy a szoláris energia közvetlen műszaki hasznosítása központi kérdéssé vált, hiszen a Földet érő napsugárzás energiája a jelenlegi éves $7 \cdot 10^{20}$ J fogyasztás sokszorosa.



1. ábra: A világ éves energiafogyasztása EJ-ban 2060-ig (forrás: www.kvvm.hu)

A napenergia hasznosítása terén elért eredményekre látványos című híradások hívják fel a figyelmet:

- Már a nyolcvanas években üzembe helyeztek egy új típusú, ún. napkéményes termikerművet a spanyolországi Manzanaresben, ami 195 m magas, 10 m átmérőjű kéményével és 46 000 m²-es napkollektorával 50 kW csúcsteljesítménnyel szolgáltatott „ingyenes” villamos energiát.
- 2014-ben adták át a világ legnagyobb tükrös naperőművét a Mojave sivatagban. Három darab, 130 MW csúcsteljesítményű blokkból áll, blokkonként 100 ezer darab, számítógéppel vezérelt, 2–3 méteres tükör vetíti a napsugarakat a 140 méter magas tornyon elhelyezett vízforralóra. A keletkezett gőzből a klasszikus hőerőművekhez hasonlóan gőzturbinákkal termelik az áramot.
- 2014. július elején a Guardian¹ *A szolárenergia győzött, a széntüzelésű erőműveknek vége* cím alatt adta hírül, hogy Queensland 1100 megawattos „erőműve”, ami több mint 350 ezer épület tetején elhelyezett napelemekből áll, már veszteségesse tette Ausztráliában a fosszilis erőművek többségét. (Az elektromos áram nagykereskedelmi ára a szokásos 40-50 \$/MWh értékről több napig nulla környékére zuhant, sőt időnként negatívba is átment!) A cikk konklúziója: „2018. elejére a napenergia gazdaságilag is jó befektetés lehet a nagyvárosok áramellátásához, 2040-re pedig az elektromosság felét ott termelik majd, ahol felhasználják.”

A napsugárzás emberi léptékben olyan kimeríthetetlen primer energiaforrás, ami környezetvédelmi szempontból tisztának, gazdaságossági szempontból pedig szinte ingyenesnek minősíthető.² Az 1. ábra grafikonján jóslott trend szerint a következő ötven év

¹http://www.theguardian.com/commentisfree/2014/jul/07/solar-has-won-even-if-coal-were-free-to-burn-power-stations-couldnt-compete?CMP=fb_gu

² E tömör jelzőknek az életciklus-vizsgálatok és a beruházási költségek tükrében inkább csak reklámértékük van.

alatt a napenergia hasznosítása a jelenlegi közel nulla szintről 200 EJ/év értékre fog növekedni.

Az elmúlt évtizedek kutatási eredményei nyomán a napenergia hasznosítására többféle technikai megoldás is kialakult, ám a kisebb-nagyobb beruházásokat követő vizsgálatok szerint a tervezett költségmegtakarítások sokszor a vártnál sokkal alacsonyabb értéken realizálódnak. E tények jelentősen csökkentik a napsugárzás hasznosítására irányuló beruházási kedvet, hajlandóságot.

- A spanyol napkéményes termikerőmű üzemeltetését ugyan kedvezőnek minősítették, de működtetését 7 év után leállították!
- Hollósy és szerzőtársai (2014) egy napkollektorral támogatott energiarendszer üzemeltetési eredményeit így értékelték: *„A várttól jelentősen elmaradt a költségmegtakarítás, ami jelentősen rontja a megtérülés mutatóit. Az eltérés oka lehet a túlméretezett rendszer, de a nagy energiaveszteség is. Az utóbbi adódhat abból, hogy jelentős a kollektorok és a melegvíztárolók közötti távolság. A rendszernek beszabályozási problémái is lehetnek.”*
- Németország 2012-ig a napelemes energiatermelés élenjárója volt a világban, ám 2013-ban már felére csökkentették napelemes fejlesztéseiket. Az idei évre további jelentős csökkentést prognosztizáltak.

A meglehetősen kiegyenlített szoláris energia földi hozzáférhetőségének mértéke időben és helytől függően jelentősen változik, ami jelentősen befolyásolja felhasználásának gazdaságosságát. Az egyes megoldások gazdaságossági megítélését tovább nehezíti az a sajátosságuk, hogy a szolárberendezések beruházási költsége nagyságrendekkel nagyobb az élettartamuk alatti üzemeltetési költségüknél, így már a tervezés fázisában is igen alapos, megbízható elemzésre van szükség a befektetési kockázat csökkentése érdekében. A szakirodalomban található megtérülési számításokban több nagyvonalú és egyben félrevezető következtetés is található, ami jelzi, hogy az alkalmazott számolástechnikák több, a gyakorlati tapasztalatoknak ellentmondó hibát is tartalmaznak, így e témakör – fontossága mellett – különösen alkalmas a műszaki-gazdasági feladatok korrekt megoldásához szükséges alapvető matematikai eszközök gyakorlatias és szemléletes áttekintésére.

A szoláris energia hasznosításának aktualitásáról

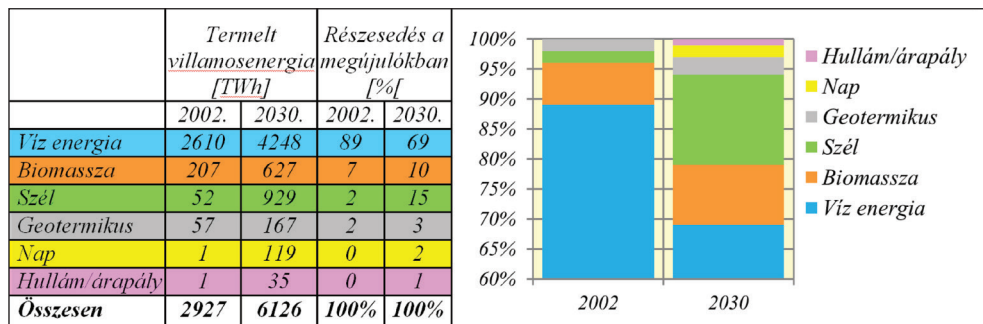
A megújuló energiák melletti és elleni bőséges érveléseket mellőzve *mértékadónak* a Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA, *International Energy Agency*) *elemzéseit tekinthetjük*. Az IEA évente megjelenteti a **World Energy Outlook (WEO)** kiadványát, aminek témakörei az energia iránti kereslet és kínálat trendjei mellett kiterjednek az energiabiztonság, a környezetvédelem, valamint a támogatható és fenntartható fejlődés energetikai jövőjének

kritikai elemzésére is. Ezek az elemzések, előrejelzések egyaránt befolyásolják az állami és a magánszektor tervezett befektetéseit.

A világ energiafogyasztásának legjelentősebb tételei felhasználási szempontból:

- a fűtéshez és technológiai folyamatokhoz használt termikus energia;
- a szállításhoz, közlekedéshez és mezőgazdasági gépekhez szükséges folyékony üzemanyag;
- az egyre nagyobb teret nyelő villamos energia.

A szoláris energia hasznosításának helyzetéről meghatározó képet fest, hogy milyen részarányt képvisel a villamos energia előállításában. A 2. ábra az IEA World Energy Outlook 2004-es elemzésének eredményét mutatja, mely szerint a napsugárzás közvetlen hasznosítása³ a következő két évtizedben fejlődik ugyan, de meglehetősen jelentéktelen marad.

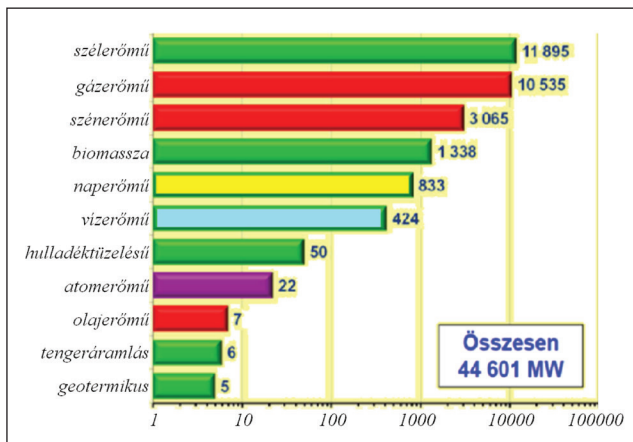


2. ábra: A villamosenergia-termelés megoszlása a megújuló energiahordozók között (2002-2030)

A napenergia hasznosítására vonatkozóan az 1. és 2. ábra jóslata jelentősen eltér. E jóslatok több mint egy évtizede készültek, és látens módon befolyásolták a befektetési hajlandóságot is. Az elmúlt évtized alatt megvalósult fejlesztések eredményét tükrözi a 3. ábra, ami az EU-ban üzembe helyezett új erőművek primer energiahordozók szerinti megoszlását is mutatja megawattban. (A vízszintes tengelyen logaritmikus a skála!) A napenergia hasznosítása az elmúlt évtizedben messze meghaladta az IEA 2004-es prognózisát, többek között az állami támogatással inspirált német napelem-ültetvényeknek köszönhetően. A 3. ábra csak az EU 27 országára vonatkozik, de a különböző típusú „naperőművek” világszerte, így az USA-ban (Mojave-sivatag), Ausztráliában (pl. Queensland), Kínában, Indiában, az Arab Emírségekben is hasonlóan hódítanak.

³Meg kell jegyeznünk, hogy a szélenergia, a biomassza, a vízenergia és a fosszilis energiahordozók is a napsugárzásból eredő, az ökoszisztéma által átalakított energiahordozók. A továbbiakban a szoláris energia hasznosításán mindig a napsugárzás közvetlen műszaki alkalmazását kell érteni.

A napenergia-hasznosítás megtérülés-számításainak vizsgálatát a napsugárzás jellemzésére végzett tudományos kutatások eredményeinek felidézésével kezdjük. Ez jó kiindulásnak tűnik, hiszen a primer energiaforrás kellő ismerete mellett a tudományos vizsgálódásokban alkalmazott matematikai módszerek fontosságára is ráirányítja a figyelmet.



3. ábra: Az EU-27-ben 2012-ben üzembe helyezett erőművek megawattban

A szoláris energia forrása: a Nap

A Nap alapvetően plazma állapotú hidrogénből álló gáztömb, melyben hidrogén–hélium magfúzióval termonukleáris hőtermelés zajlik. 1920-ban *Francis William Aston* megmérte a 4 hidrogénatom és 1 héliumatom tömegének különbségét, ami $\sim 0,7\%$. Ez a tömegdifferencia energiává, fotonokká alakul át. A modellszámítások szerint a Napban jelenleg másodpercenként ~ 600 millió tonna hidrogén alakul át héliummá, így a különbözetet jelentő $\sim 4,2$ millió tonna anyag alakul át $E = m \cdot c^2 = 3,78 \cdot 10^{26}$ J energiává, így a Nap teljes sugárzási teljesítménye $\sim 3,78 \cdot 10^{26}$ Watt.⁴ (A magas hőmérséklet miatt ez elsősorban rövid hullámhosszú elektromágneses sugárzás.) A Naptól ~ 150 millió km-re levő földi légkört érő sugárzás intenzitása:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{3,78 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2} = 1344 \frac{W}{m^2}$$

A teljes légkört érő napsugárzás teljesítménye:

$$P = r^2 \cdot \pi \cdot S = (6,375 \cdot 10^6)^2 \cdot \pi \cdot 1344 \approx 1,7 \cdot 10^8 \text{ GW}$$

Ez évi $\sim 15 \cdot 10^5$ PWh energiát jelent, ami kimeríthetetlennek tűnik a világ jelenlegi 16,8 PWh éves villamosenergia-fogyasztásának tükrében.⁵

A napenergia hasznosításakor kiinduló alapadat a földi légkört négyzetméterenként érő merőlegesen beeső sugárzási teljesítmény, az ún. napállandó, aminek értéke egyszerű

⁴ A mérésekkel alátámasztott pontosabb modellszámítások eredménye: 3,86·10²⁶ W.

⁵ E 2008-as adatot az IEA World Energy Outlook 2010 közli, és 2020-ra ennek várható értékét 23,18 PWh értékben valószínűsíti.

modellszámításunk szerint 1344 W/m^2 .⁶ Egy ilyen adat elfogadásához két fontos kérdést meg kell válaszolni:

- A fenti egyszerű modellszámítás eredménye milyen korlátok között, milyen pontossággal érvényes?
 - Mérésekkel mennyire alátámasztható a napállandó értékének ez a becslése?
- a) Az első kérdés a közelítéssel hibaszámítás témakörét érinti. A számítás menete a következő:

$$S = \frac{P_{\text{Nap}}}{4\pi \cdot d^2}$$

ahol d a Nap–Föld-távolságot jelöli. A hibaszámítás egyik „ökölszabálya” szerint a relatív hibák a változók szorzása és osztása esetén összeadódnak, azaz $r_s = r_p + 2 \cdot r_d$, ahol szokásos módon r_s , r_p és r_d az S , a P_{Nap} és a d relatív hibáját jelöli.

Általánosabb függvénykapcsolat esetén a teljes differenciál, illetve az érintősík alapján számítható az abszolút hiba. A napállandó abszolút hibájának (ΔS) levezetése e módszerrel a következő módon alakul:

$$\begin{aligned} |\Delta S| &\approx \left| \frac{\partial S}{\partial P} \cdot \Delta P \right| + \left| \frac{\partial S}{\partial d} \cdot \Delta d \right| = \frac{1}{4\pi \cdot d^2} \cdot |\Delta P| + \left| -2 \cdot \frac{P}{4\pi \cdot d^3} \cdot \Delta d \right| \\ |\Delta S| &\approx \frac{P}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{|\Delta P|}{P} + \frac{P}{4\pi \cdot d^2} \cdot 2 \cdot \frac{|\Delta d|}{d} \\ |\Delta S| &\approx \frac{P}{4\pi \cdot d^2} \cdot \left(\frac{|\Delta P|}{P} + 2 \cdot \frac{|\Delta d|}{d} \right) = \frac{P}{4\pi \cdot d^2} \cdot [r_p + 2 \cdot r_d] = S \cdot [r_p + 2 \cdot r_d]. \end{aligned}$$

Ez az eredmény éppen az „ökölszabályt” adja.

Modellünkben a Nap–Föld-távolság (d) relatív hibája (r_d) a napközeli (perihélium, $147\,098\,074 \text{ km}$) és a naptávoli (aphélium, $152\,097\,701 \text{ km}$) helyzet ismeretében:

$$r_d \approx \frac{\frac{1}{2} \cdot (152\,097\,701 - 147\,098\,074)}{\frac{1}{2} \cdot (152\,097\,701 + 147\,098\,074)} \approx 1,66 \%,$$

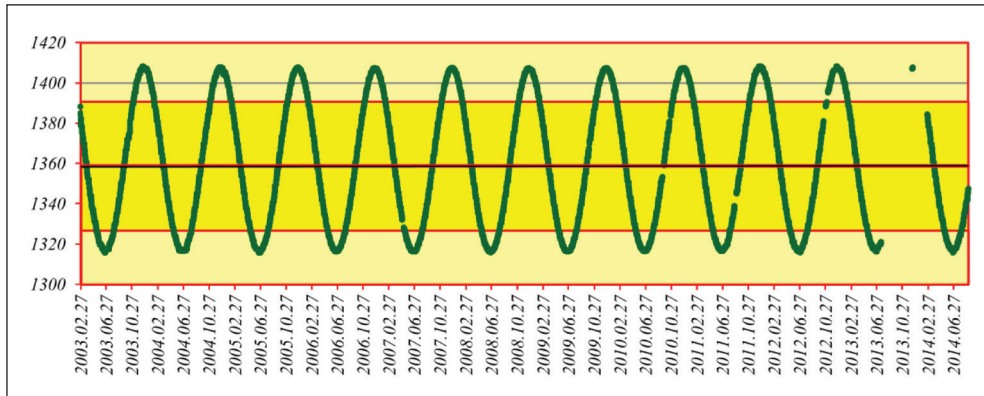
ami a földi légkört érő sugárzás értékében $\pm 3,3\%$ -os változást okoz. Ha a Nap sugárzási teljesítményére vonatkozó relatív hibát (r_d) ehhez képest elhanyagolhatónak tételezzük fel, akkor a hibakorlát $\pm 45 \text{ W/m}^2$, azaz az $S = 1,34 \pm 0,05 \text{ kW/m}^2$, így nincs értelme megadásukor négy értékes jegyet kiírni!

- A második kérdéskörre 1978-tól, a műholdas mérések kezdete óta közvetlenül is meg lehet válaszolni. A 4. ábrán egy műholdas mérési adatsor⁷ alapján ábrázoltuk a műholdon elhelyezett műszerek által mért sugárzási intenzitást 2003 februárjától

⁶A legújabb mérések alapján a napállandó szakirodalmi értéke 1367 W/m^2 közepes Nap–Föld-távolság esetén.

⁷Forrás: http://lasp.colorado.edu/data/soerce/tsi_data/six_hourly/soerce_tsi_L3_c06h_latest.txt

2014 szeptemberéig. A grafikonról egyszerűen leolvasható a napállandó $S = 1,36 \pm 3,3\% \text{ kW/m}^2$ értéke. Az ingadozások éves periódusa jól nyomon követhető az ábrán, és mértéke is egybeesik az elméletileg levezetett 3,3%-os hibával, ami jelzi, hogy a Nap sugárzási teljesítményének ingadozása ennél valóban kisebb értékű. (A műholdas mérési adatsor alapján számított pontos értéként az $S = 1,359 \pm 0,045 \text{ kW/m}^2$ adódik.)



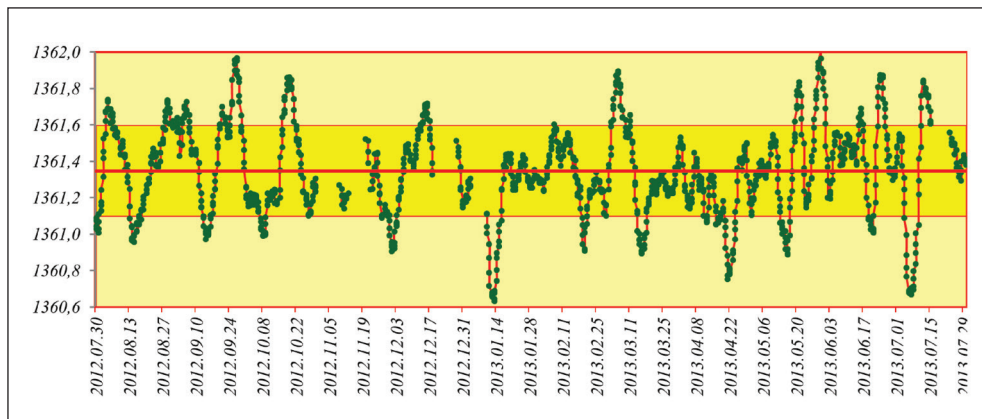
4. ábra: A napsugárzás egy műholdas mérési adatsora

A napállandó értéke tehát elsősorban a perihélium–aphélium-helyzet következtében változik ($\pm 3,3\%$), és a napfolttevékenységek ennél biztosan kevésbé módosítják alakulását. A Nap sugárzási teljesítményében megmutatkozó kismértékű ingadozások vizsgálatához célszerű a Föld helyzetéből adódó determinisztikus eltéréseket eliminálni. Ez egyszerűen megtehető úgy, hogy a napállandó aktuálisan mért értékét a közepes Nap–Föld-távolságra korrigáljuk az

$$S_{\text{korrigált}} = S_{\text{mért}} \cdot \left(\frac{d_{\text{közepes}}}{d_{\text{aktuális}}} \right)^2$$

összefüggéssel. E korrigált érték a TSI (*Total Solar Irradiance = teljes szoláris besugárzás*) elnevezést kapta, ami már a Föld mozgásából származó $\pm 3,3\%$ -os ingadozásoktól mentes.

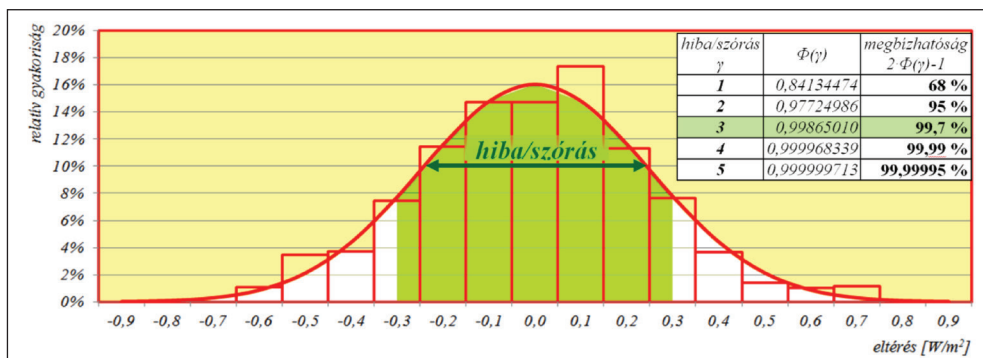
Az előző műholdas mérési adatsor alapján egyéves időtartamra ábrázoltuk a (korrigált) TSI értékének alakulását az 5. ábrán. E grafikonról egyszerűen leolvasható a napállandó $TSI = 1361,3 \pm 0,7 \text{ W/m}^2$ értéke. Egy adatsor koncentrált matematikai jellemzésére az értékek átlagát és az adatok átlag körüli ingadozásának mértékét, leggyakrabban a négyzetes eltérések átlagát, az ún. szórásst szokás használni. (Más értékek, így az abszolút eltérések átlaga, a terjedelem, a medián, a különböző momentumok és kvantilisok is vizsgálhatók.) A számítások szerint ezen adatsor átlaga $1361,35 \text{ W/m}^2$, a szórása pedig $0,25 \text{ W/m}^2$. (Az 5. ábrán látható az átlag \pm szórás sáv is.) Alapkérdés, hogy a szórás miként jellemzi a mért értékek ingadozását? Szemléletesen ezen adatsor ingadozása a $\pm 0,7 \text{ W/m}^2$ értékkel adható meg, ugyanakkor számítással az adatok szórására a $\pm 0,25 \text{ W/m}^2$ érték adódott.



5. ábra: A TSI-mérések egyéves adatsora átlagával és szórásával

A műszaki szempontból (mérési) hibaként vagy (gyártási) tűrésként interpretált eltérések és a (matematikai) szórás közti kapcsolatot szemléletesen az eltérések eloszlása mutatja meg. Jelen esetben az eltérések gyakorisági hisztogramját elkészítve és ábrázolva (6. ábra) láthatóan jó közelítést ad az $1361,3 \text{ W/m}^2$ várható értékű és $0,25 \text{ W/m}^2$ szórású normális eloszlás. (Ez nem egészen véletlen, hiszen a matematika centrális határeloszlás tétele szerint elegendően nagyszámú független valószínűségi változó eredője jó közelítéssel normális eloszlású.⁸⁾

A mért adat jellemzésére használt $1361,3 \pm h \text{ W/m}^2$ leírasi formában a h hibatarag csak úgy értelmezhető, ha egyúttal megadjuk az alkalmazott megbízhatóság szintjét is. Kis h hibatarag megadásakor a valódi értékek csak az esetek kisebb százalékában esnek ebbe a sávba, míg kellően nagy h hibatarag megadása esetén szinte az összes eset ebbe a sávba esik. (A számolásokhoz a standard normális eloszlás $\Phi(\gamma)$ értékei táblázatból kiolvashatók, amivel elkerülhető az egyébként zárt alakban nem integrálható függvény numerikus integrálása.)



6. ábra: A TSI-mérések eltéréseinek gyakorisági hisztogramja

⁸⁾E tételnek több változata is ismert.

Konkrét esetben a *hiba/szórás* értékét a standard eloszlás táblázatából kiolvastva megállapítható, hogy mekkora az adott hibasáv megbízhatósága, illetve fordítva: adott megbízhatósági szinthez a táblázatból kiolvasott érték visszatranszformálásával kapjuk meg a szükséges *h* hibaértéket. Ökölszabályként használható a 6. *ábra* táblázatának egyszerű összefüggése. A gyakorlatban hallgatólagosan többnyire feltételezzük a hiba háromszoros szórásaként való megadását, azaz a 99,7%-os megbízhatósági szintet, ami esetünkben a szemlélettel is egyező $1361,35 \pm 75 \text{ W/m}^2$ érték. (A hiba kétszórásnyira csökkentése a megbízhatósági szint 95%-ra redukálását eredményezi!) Összefoglalásként megállapítható, hogy gyakorta hallgatólagosan, de szemléletében mindenképpen egy mérési adat a következő komponenseket tartalmazza:

$$\text{adat} = \text{szám} \cdot \text{mértékegység} \pm \text{hiba és a megbízhatósági szint!}$$

A teljes szoláris besugárzás mérése

A mérési eljárásokban számítani kell a mért értékek esetleges időbeli változására is. A napállandót – mint elnevezése is mutatja – eredetileg állandó értékűnek vélték, ám a napfolttevékenységek megfigyelése nyomán megfogalmazódott a sejtés, hogy a *teljes szoláris besugárzás* (továbbiakban: *TSI*) értéke sem állandó. Napjainkra a TSI kicsi, de folyamatos változásainak vizsgálata a kutatások középpontjába került, mivel a modellek szerint jelentős klímamódosító hatásokat válthat ki. E változások pontosabb feltérképezése, netán ismeretének múltbeli időkre történő kiterjesztése lehetőséget nyújt a TSI-változások megbízhatóbb előrejelzésére, egyben klímamódosító hatásainak jóslatához. Az időbeli változások vizsgálati módszerei jól nyomon követhetők a TSI mérésének nem túl régi történetében is.

A napsugárzás erősségét ugyan a magunk bőrén is érzékeljük, objektív mérése mégis hosszú ideig váratott magára. Galilei már 1600 körül kiadta a jelszót: „*Mérjük meg, ami mérhető!*”, ám ennek megvalósítása néhány fizikai mennyiség esetében igen nehézkesen haladt előre. A hőtan alapmennyiségének, a hőmérsékletnek a mérése a törekvések ellenére is csak a 18. század első felében realizálódott. Már Galilei is megpróbált termométert készíteni, csakúgy, mint firenzei mecénása az Accademia del Cimento keretében. A következő másfél évszázad szinte minden nagy tudósa: Renaldini, Boyle, Huygens, Hooke, Halley, Newton, Römer szintén próbálkozott e feladat megoldásával, de csak a kitartó Fahrenheit oldotta meg érdemben e feladatot, és készítette el 1708-ban először alkoholos, majd 1714-ben higanyos hőmérőit.⁹ Ezt követően a 18. század a hőmérők évszázada lett. Elegendő Réaumur (1730), Delisle (1732) vagy Celsius (1742) hőmérsékleti skáláira gondolni. A napsugárzás erősségének érdemi mérése csak a 19. században kezdődött

⁹ Amontons már 1702-ben közzétett egy jól működő, de nehezen kezelhető gázhőmérőt, ami nem terjedt el.

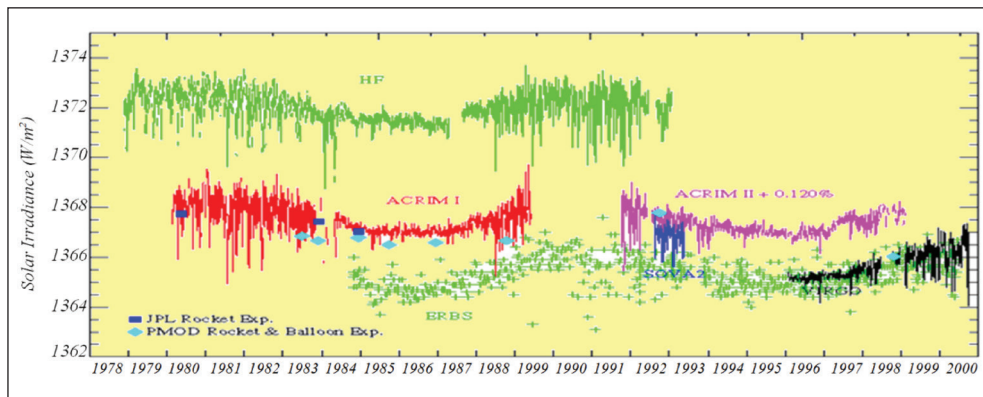
meg. Meglepően pontos mérést végzett 1838-ban Claude Servais Mathias Pouillet francia fizikus, aki kezdetleges pirheliométerével (napra kitett, vízzel telt edényben a víz hőmérséklet-növekedése alapján) mérte meg a napállandót. 1883-ban Samuel Pierpoint Langley amerikai asztrofizikus kifejlesztette az ún. bolométert, ami egy fém napsugárzás hatására bekövetkező elektromos ellenállás-változását használja fel a napállandó méréséhez. A ma használatos aktív üregradiométerekben egy üreg szinte a teljes sugárzást elnyeli, és az üreg hőmérsékletéből állapítja meg a sugárzás intenzitását. (Ezek a műszertípusok már 2%-os pontossággal kalibrálhatók!)

radiométer	műhold	működési ideje
HF	NIMBUS-7	1978.11.16 - 1993.01.24.
ACRIM I	SMM	1980.02.14 - 1989.06.01.
ERBS	ERBS	1984.10. 25-
ACRIM II	UARS	1991.10 -
SOVA2	EURECA	1992.08.11 – 1993.05.14.
VIRGO	SOHO	1996.01.18-

7. ábra: Műholdas mérések

végzett műholdas adatgyűjtések eredményeit összegyűjtve egy közös időtengely mentén ábrázolták a különböző műszerek által mért TSI-értékeket. Grafikonjuk kiválóan szemlélteti, hogy a különböző műholdas műszerek átlagosan némileg eltérő ($1365\text{--}1372\text{ W/m}^2$), de relatív ingadozásaikban hasonló TSI-értékeket mutatnak (8. ábra).

A napsugárzás intenzitását eleinte a földfelszínen mérték, de 1978 óta már műholdas mérések is folynak. A 7. ábrán feltüntetett műholdakon, valamint néhány rakétán és ballonon is helyeztek el a napsugárzást mérő berendezéseket, melyek szinte folyamatosan küldték a TSI-mérések adatait. Fröhlich és munkatársai a 2000-ig



8. ábra: A különböző műszerek észlelései a TSI napi adataira W/m^2 -ben¹⁰

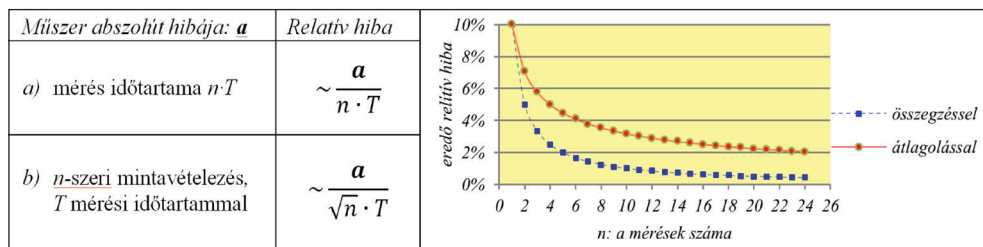
¹⁰ Forrás: Fröhlich (2000): Space Science Reviews in preparation and the VIRGO Team.

A teljes szoláris besugárzás időszora

A mérési adatsorok eltéréseit tanulmányozva a kutatók (Fröhlich, Lean, Pap, Foukal) az okokat a mérési módszerek különbözőségében találták meg. Az eltérések egyik okát az egyes műszerek más-más mintavételezési módjában találták meg. Egy adott időtartamra vonatkozóan többnyire két alapvető mérési eljárás alkalmazható:

- hosszabb időtartamra a mennyiség integrált értékét mérve az abszolút hiba egy nagyobb mért értékre vonatkozik;
- adott időtartamon belül többszöri (n -szeri) mintavételezéssel kapott „pillanatnyi értékek” átlaga adja meg a mért értéket.

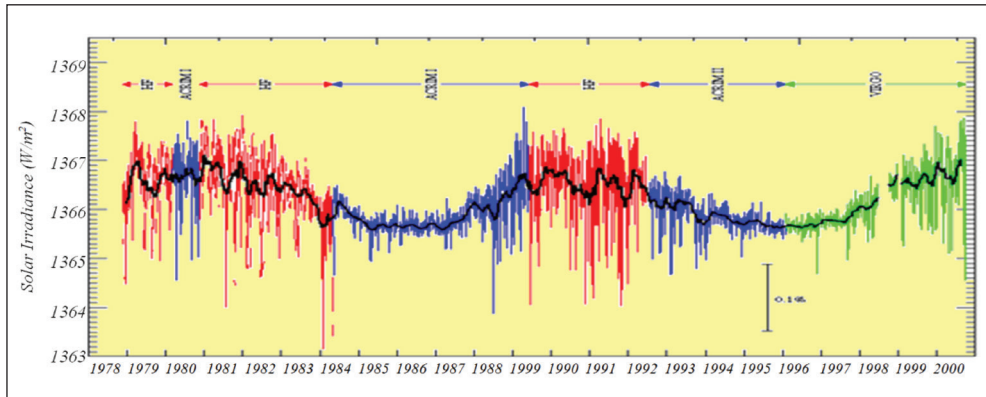
A két mérési eljárás relatív hibája eltérően alakul, hiszen az a) esetben az adott abszolút mérési hiba egy relatíve nagyobb mért értékre vonatkozik, amitől a mérés relatív hibája kisebb, míg a b) esetben az abszolút hiba ugyan a relatíve kisebb mért értékre vonatkozik, amitől az egyes mért értékek relatív hibája nagyobb lesz, de az átlagolás következtében az eredő relatív hiba a nagy számok törvénye alapján csökken. A 9. ábra vázolja a két mérési eljárás hibájának alakulását.



9. ábra: Mérési eljárások relatív hibájának összehasonlítása

A konkrét műszerek esetében persze komplikáltabb a helyzet, hiszen a hosszabb időtartamon át nyitva tartott radiométer a tartósabb kozmikus sugárzás hatására gyorsabban degradálódik, így a műszer hibájánál ezzel a hatással is számolni kell. (A gyakorlatban több műszer segítségével, valamint a mintavételezési idő megfelelő megválasztásával mindkét módszert együttesen alkalmazzák.)

Az eltérések egy másik részét a műszerek eltérő irányítottága okozta. A kutatók az okokat részletesen feltárva korrigálták az eltéréseket, és előállították a 10. ábrán szemléltetett egységes adatsort. Itt látható, hogy a teljes szoláris besugárzás (TSI) értéke 1363-1368 W/m^2 között ($\sim 4\%$) ingadozik, és időbeni alakulásában egy 11 éves periódus is sejtethető.



10. ábra: A TSI egységesített adatsora (1978–2000) és mozgóátlagolással simított görbéje¹¹

A 10. ábrán látható, fekete színű simított görbe a relatíve nagymértékű, de rövid idejű ingadozásokat nem tartalmazza. A rövid idejű ingadozások kiiktatásának egyszerű módszere az ún. mozgó-, illetve futóátlagolás. E számolástechnika lényege, hogy minden adatot a környezete (azaz az előtte és utána mért néhány adat) átlaga helyettesít.¹² Eredményét tekintve e 22 éves időtartamra vonatkozó simított görbén egészen szembeötlő egy 11 éves periódusú változás, ami a TSI értékének pontosabb megadásánál például így vehető figyelembe:

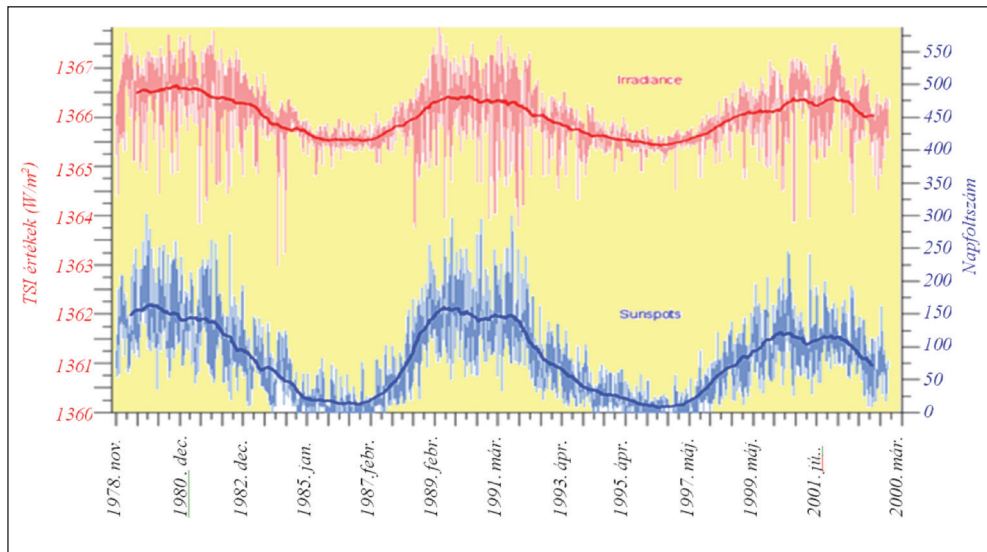
$$TSI \approx 1366 + 0,5 \cdot \sin \frac{2\pi}{11 \text{ év}} t \pm 4\% \frac{W}{m^2}.$$

A kutatók e periodikus változást egyértelműen a napfolttevékenységekkel¹³ hozták összefüggésbe, ami fizikailag érthető lenne, hiszen a sötétebb napfoltok hőmérséklete alacsonyabb, azaz kevesebb energiát sugároznak ki. A 11. ábra közös időtengelye mentén látható a napfoltok számának és a TSI-értékeknek az alakulása. Meglepő, hogy a két mennyiség változása szinkronban van, azaz a mérések szerint intenzívebb napfolttevékenység esetén a Nap több energiát sugároz ki! E jelenséget az okozza, hogy a sötétebb napfoltok által kibocsátott alacsonyabb sugárzási szintet a napfoltokat kísérő napfáklyák kisugárzása túlkompenzálja.

¹¹ Forrás: Fröhlich (2000): Space Science Reviews in preparation and the VIRGO Team.

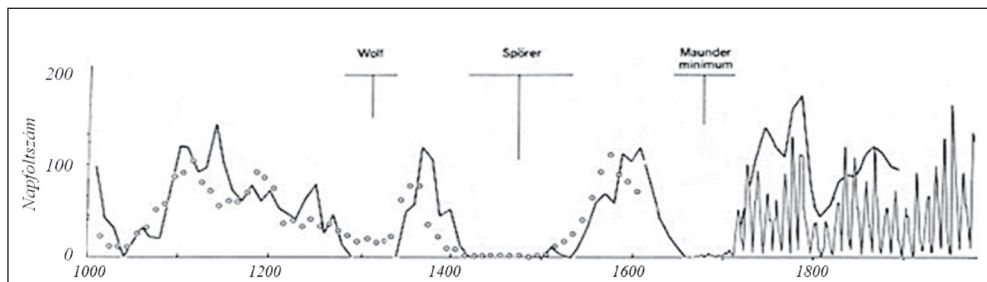
¹² E módszer matematikailag megalapozott verziói az ún. ARMA-modellek, melyek az autoregresszió és mozgóátlagolás technikáját együttesen alkalmazzák az idősorok analízisére (Michelberger és társai, 2001).

¹³ A kb. 11 éves napfoltciklus megfigyelését már 1843-ban publikálta H. Schwabe (Solar Observations during 1843).



11. ábra: A TSI-érték és a napfoltszám időbeli alakulása¹⁴

A két periodikus időfüggvény hasonlatossága és fizikai magyarázatuk egybeesése kellő alapot nyújt a TSI múltbéli változásainak becsléséhez, mert a napfolttevékenységek múltjáról több ismeret is felgyűlt már. Zhou és Butler (1998) felfedezése nyomán a fák évgyűrűi mesélnek a múltbéli napfolttevékenységekről. A napfoltciklus és a fák évgyűrűi közti összefüggést az okozza, hogy az intenzívebb szoláris sugárzás hatására a kozmikus sugárzás kevésbé tudja megemelni a C-14 izotópok arányát, amikből ilyenkor Archibald (2006) elemzése szerint kevesebb raktározódik el. A 12. ábra a napfolttevékenységek alakulását mutatja, amiben a ~11,1 éves periódus mellett megfigyelhető további (pl. közel két évszázados) periódus is.



12. ábra: A napfolttevékenységek alakulása az elmúlt ezer évben (forrás: Foukal)

¹⁴ Az adatok a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) szervezetének köszönhetően az NGDC (National Geophysical Data Center) adatbázisában szabadon elérhetők.

A TSI idősorának nagyobb távlatait vizsgálva nyilván megjelenne a Föld Naptól való távolodása, valamint a Nap fejlődéséből adódó energiatermelés változása is, ezek azonban csak egy igen nagy időtávlatra vonatkozó trendként vehetők figyelembe, aminek energetikai szempontból, emberi léptékű tervezésekben nincs szerepe. Mindamellet érdemes megállapítani, hogy egy adat időbeni változásának adekvát leírásához általában célszerű egy *trend + szezonális + zaj* modellel közelíteni. A jelentősebb véletlen komponens is tartalmazó adatsorok nem megfelelő kezelése sokszor jelentős tévedéseket okoz a műszaki-gazdasági számításokban.

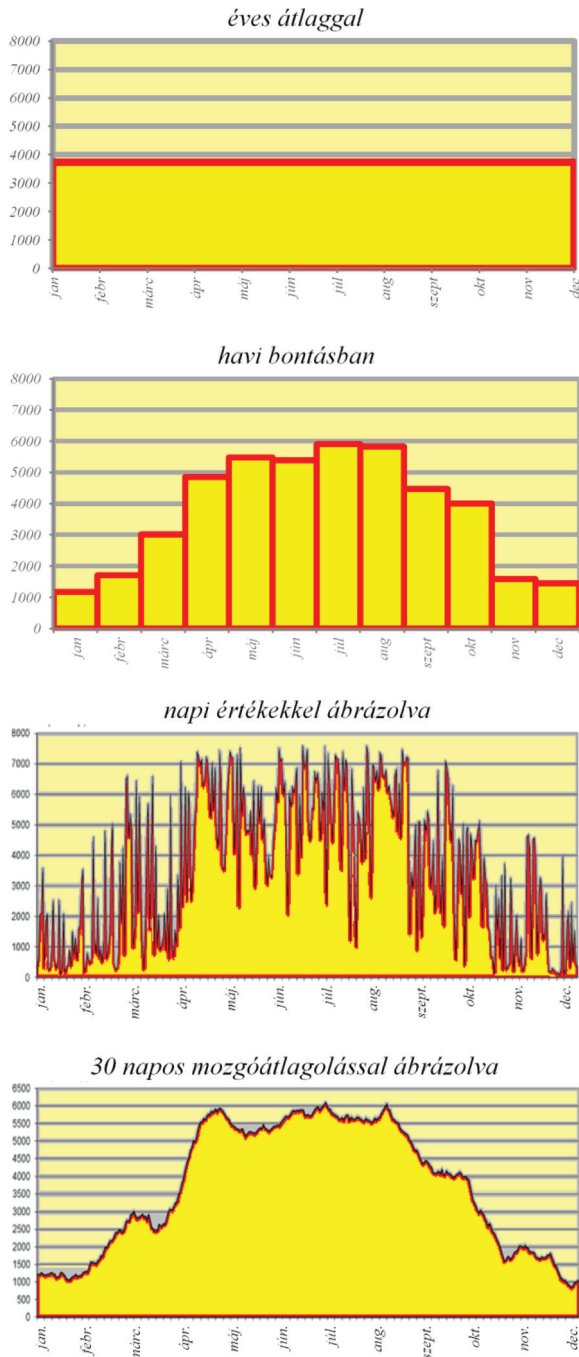
Szummatív módszerek és mozgó átlagolás

A determinisztikus (trend + szezonális) rész mellett sokszor jelentős nagyságrendű véletlen komponens is jelen van az adatsorokban. Tipikusan ilyen érték a napsugárzás intenzitásának helyi változása, aminél nem pusztán a TSI apró változásairól van szó, hiszen a légkör a napsugárzást sajátos módon engedi át, illetve tárolja, valamint a felhőzet is drasztikusan befolyásolja, ráadásul a Föld forgásából adódóan a beérkező sugárzás helyileg napi szinten is periodikusan változik. E nagy ingadozások tipikus kezelési módszere, hogy hosszabb időtartamra, gyakorta egy évre képezik az adatsor összegét, illetve ennek alapján a napi átlagát. (Fizikailag az intenzitás integrálása a négyzetméterenként beérkező energia meghatározását jelenti.) E módszer matematikai eredménye: az erősen ingadozó időfüggvény egy konstans értékkel kerül helyettesítésre. Esetenként finomabb, például havi vagy napi felbontásban végzik el ezt az átlagolást. A 13. ábrán a 2013. évi magyarországi napsugárzási adatsoron figyelhető meg e szummatív módszer hatása a felbontás finomításának függvényében, így az éves átlag látszólagos hibájára is:

- $3,74 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{nap} \pm 70\%$ (havi bontás);
- $3,74 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{nap} \pm 100\%$ (napi bontás).

Ha az energia helyett a pillanatnyi teljesítményre végezzük el ezt a vizsgálatot, akkor a hiba lényegesen nagyobb lesz!

A szummatív módszer hatása



13. ábra: 2013. évi napsugárzás Magyarországon (függőleges tengelyen: W-h/m²-nap)

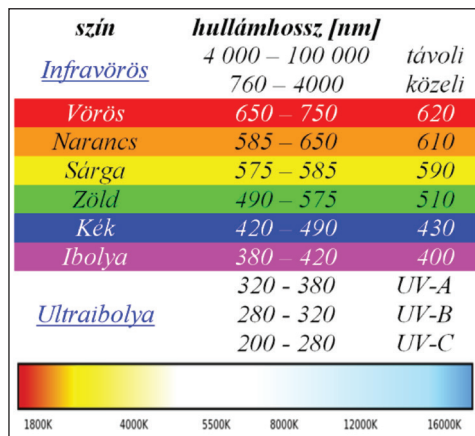
Látható, hogy a futóátlagolás a görbét valóban simítja, ám alapkérdés, hogy hány pontos az átlagolás. A túl sok pontos futóátlagolás a görbét szinte teljesen kisimítja, így a rövidebb idejű változásokról nem ad információt, míg a hárompontos átlagolás csak a szomszédos ingadozásokat egyenlíti ki.

Energetikai szempontból egy adott időszakra összegzéssel nyert adat az elvileg ki nyerhető napenergia értékét adja, ami tervezőként csak felső korlátként értékelhető. A beérkező sugárzási teljesítmény napi és éves szintű óriási változásai miatt mind a tervezés, mind gazdaságossági kiértékelése valószínűség-elméleti alapon álló méretezést és statisztikai kiértékeléseket követel meg (Fatalin,1996).

A napsugárzás spektrális jellemzői

A napsugárzás összetett jellege ősidők óta ismert jelenség. A szivárvány, a prizma színfelbontó képessége, az olajfoltokon megjelenő színes Newton-gyűrűk közismert jelenségek, melyek leírásával Descartestól Newtonig sok kutató foglalkozott, ám fizikai jellemzőinek leírásában jelentős áttörést csak a 19. század második fele hozott. Az elektromágneses sugárzás vizsgálata igen sok területen gazdagította ismereteinket. Ezek egyik jelentős területe a testek hőmérsékletével kapcsolatos, a teljes elektromágneses spektrumra kiterjedő ún. hőmérsékleti sugárzás vizsgálata. A hőmérsékleti sugárzás vizsgálata vezetett el a kvantumelmélet kialakulásához is.

A hőmérsékleti sugárzás első jelentős törvényét Kirchhoff tárta fel 1859-ben: *adott hőmérséklet és hullámhossz esetén egy test kisugárzott és elnyelt sugárzási teljesítményének hányadosa állandó.* E felismerés nyomán alakult ki az (abszolút) feketetest, azaz a maximális abszorpciójú test fogalma, aminek egyébként adott hőmérsékleten a legnagyobb a kisugárzott teljesítménye.¹⁵ 1879-ben Jožef Štefan szlovén fizikus a feketetest emisszióját különböző hőmérsékleteken mérve azt találta, hogy ez a test hőmérsékletének a negyedik hatványával arányos. Összefüggését volt doktorandusza, Boltzmann elméleti úton is levezette. A Stefan–Boltzmann-törvény szerint az egységnyi felület sugárzási teljesítménye $5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4$, amivel a Nap „fel-



14. ábra: Elektromágneses spektrum részlete és a színhőmérsékleti skála

¹⁵ Bármely más test kisugárzása az elnyelési tulajdonságának és a feketetest emisszióképességének szorzataként meghatározható.

színi” hőmérséklete meghatározható, a $P = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot A_{Nap} \cdot T^4 = 3,86 \cdot 10^{26} \text{ W}$ összefüggésből:

$$T = \sqrt[4]{\frac{3,86 \cdot 10^{26}}{A_{Nap} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} \approx \sqrt[4]{0,11 \cdot 10^{16}} \approx 5800 \text{ K}.$$

A hőmérsékleti sugárzás más vizsgálatai a sugárzás spektrális eloszlására vonatkoztak. Ennek jelentős eredménye a Wien-féle eltolódási törvény, ami adott hőmérséklet mellett megadja azt a hullámhosszt, amin maximális az emisszió. Az összefüggés egy fordított arányosság: $\lambda_{max} \cdot T = 2,88 \cdot 10^{-3}$, amiből a napsugárzás spektrális csúcspontja:

$$\lambda_{max} = \frac{2,88 \cdot 10^{-3}}{5800} \approx 496 \text{ nm} \quad \lambda_{max} = \frac{2,88 \cdot 10^{-3}}{5800} \approx 496 \text{ nm} .^{16}$$

Ez az összefüggés alacsonyabb hőmérsékleteken a tapasztalattal jól egyezik. A 14. ábra táblázata szerint a $\lambda = 496 \text{ nm}$ hullámhosszhoz a (kék)zöld szín tartozik. A Nap persze nem zöld, ám a szín fiziológiai fogalom, és itt egy kevert hullámhosszú fény színérzetéről van szó! Az ábrán látható ún. színhőmérsékleti skála mutatja, hogy a feketetest hőmérsékleti sugárzása adott hőmérséklet esetén milyen színérzetet kelt.

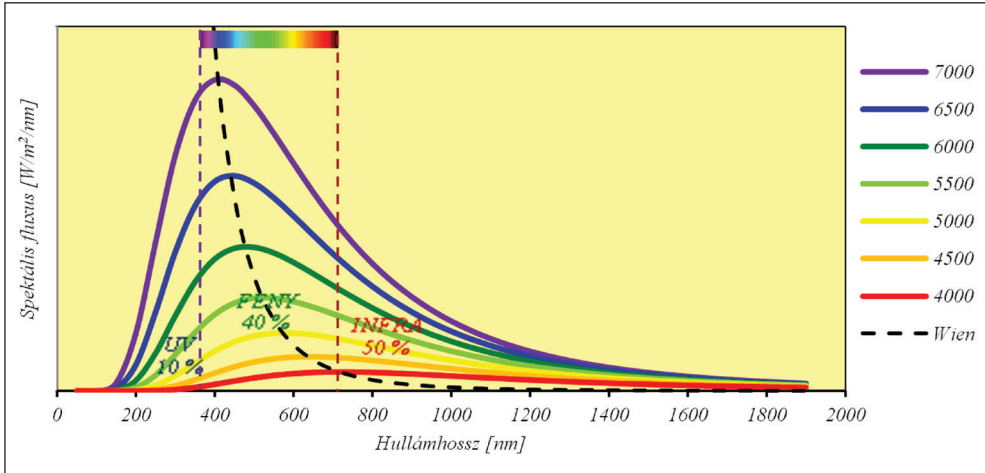
Homogén energia-eloszlás feltételezésével Rayleigh és Jeans is levezetett egy sugárzási törvényt, ami nagyobb hullámhosszakon jól közelíti a mért értékeket. (Ehrenfest rámutatott képletük hibás voltára, mert formulájuk rövidebb hullámhosszra óriási energiasűrűséget, azaz ún. ultraibolya-katasztrófát eredményezne.)

A hőmérsékleti sugárzást a teljes spektrum tartományban helyesen leíró formulát Max Planck 1901-ben állította fel, ami a két határesetben kiadja a Wien-féle és a Rayleigh–Jeans-féle törvényt is, és ráadásul ezt az összefüggést kvantumhipotézisével elméletileg is sikerült levezetnie. A feketetest elektromágneses sugárzásának spektrumát a szokásos jelöléseket alkalmazva a következő Planck-féle összefüggés írja le:

$$I(\lambda; T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

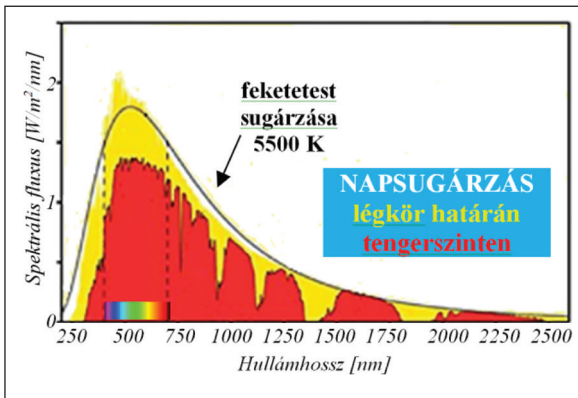
A 15. ábrán látható a különböző hőmérsékleteken sugárzó feketetesthez tartozó spektrális eloszlás. Az ábrán jól nyomon követhető a Wien-féle eltolódási törvény érvényesülése is.

¹⁶ A Föld hőmérsékleti (ki)sugárzásánál $\lambda_{max} = 2,88 \cdot 10^{-3} / 298 \approx 1000 \text{ nm}$ a közeli infravörös tartományba esik. A napfoltok közel 1500 K-nel alacsonyabb hőmérséklete miatt a $\lambda_{max} = 2,88 \cdot 10^{-3} / 4500 \approx 640 \text{ nm}$, ami a narancs tartományban van, ám e területek sugárzási teljesítménye csak a $(4500/5800)^4 < 50\%$ -a többi tartományénak, amit azonban a napfoltokat kísérő napfáklyák kisugárzása jelentősen megnövel!



15. ábra: A feketetest hőmérsékleti sugárzásának spektrális fluxusa

A napsugárzás spektrális eloszlásának ismerete energetikai szempontból azért fontos, mert az egyes kollektorok, napelemek nem a teljes spektrumot hasznosítják. A napsugárzás és a feketetest sugárzásának spektrális eloszlása némileg különbözik egymástól, és bár a 16. ábra alapján úgy tűnhet, hogy a napsugárzás a légkör felső határán jól közelíthető az



16. ábra: A napsugárzás spektrális eloszlása

5800 K hőmérsékletű feketetest sugárzásával, de a légkör hatására spektrális eloszlása jelentősen módosul, ún. beharapások figyelhetők meg benne. A tengerszinten mérve a napsugárzás spektrális eloszlását, az ibolyántúli tartományba esik a sugárzás 9-10%-a, a fennmaradó rész pedig közel fele-fele arányban oszlik meg a látható fény, illetve az infravörös tartomány között.

Összegzés

A Nap sugárzási teljesítménye közel állandó, a Föld légkörének felső határán mérhető besugárzás értéke $1,37 kW/m^2$, amit befolyásol a Föld keringése ($\pm 3,3\%$ -os periodikus változás) és a naptevékenységek alakulása (4% -es változás). A légkör hatására a földfelszínre érő sugárzás spektrális összetétele és intenzitása is jelentősen módosul. E változásokban

a Föld forgása és keringése miatti napi és éves periódus mellett az időjárás okozta jelentős véletlen komponens is megjelenik. E szélsőséges változások miatt tervezői szempontból a szummatív módszerrel, illetve mozgóátlagolással kapott értékek csak felső korlátot jelentenek a hasznosítható napenergiára. A beérkező sugárzási teljesítmény óriási napi és éves szintű, valamint sztochasztikus változásai miatt a napenergia hasznosításának tervezése és gazdaságossági kiértékelése valószínűség-elméleti alapon álló méretezéseket és statisztikai kiértékeléseket követel.

Irodalomjegyzék

1. Ács, F. (2013): Légköri sugárzástan (2013), http://nimbus.elte.hu/~acs/pdf/OKTATAS/legkori_%20sugarzastan.pdf
2. Archibald, D.C. (2006): Solar cycles 24 and 25 and Predicted Climate Response. *Energy and Environment*, 17(1), pp. 29–35.
3. Bolton, H. C. (1900): Evolution of the thermometer 1592–1743. The Chemical Publishing Co.
4. Brunetti, M. (2003): Solar signals in instrumental historical series of meteorological parameters. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 74(3), pp. 778–785.
5. Czögler, A. (1882): A fizika története életrajzokban (Magyar Természettudományi Társulat).
6. Fatalin, D. (2011): A használati melegvíz előállításának műszaki és gazdasági kérdései lakossági felhasználók körében (TDK-dolgozat).
7. Fatalin, D. (2012): A napkollektorral támogatott használati melegvíz egyedi előállításának gazdaságossági és környezetvédelmi kérdései. *Magyar Energetika*, XIX/3., 30–37. o.; http://www.e-met.hu/files/cikk3191_Fatalin_Dora_Napkollektor.pdf
8. Fatalin, L. (1991): Biztonság- és kockázatelemzési módszerek az épületgépészetben. ETE 13. Táv hő Konferencia T-2 Táv hőszállítás, Hajdúszoboszló.
9. Fatalin, L. (1996): A hmv szolgáltatás paradoxona, avagy a költségképzés és az energetika anomáliái. *Magyar épületgépészet*, 1996/8., 32–38. o.
10. Fatalin, L. – Varsics, Z. (1996): A tudományos modellalkotás alapjai II. Keraban Kiadó, Budapest.
11. Fröhlich, C. – Lean, J. (1998): The Sun's Total Irradiance: Cycles, Trends and Related Climate Change Uncertainties since 1976. *Geophysical Research Letters*, 25(23), pp. 4377–4380.
12. Heller Á. (1891/1902): A fizika története I–II. K. M. Természettudományi Társulat.
13. Hollósy Z. – Hegedűsné B. N. – Górné A. (2014): Napkollektoros rendszer működésének gazdasági hatásai különös tekintettel az energia-megtakarításra. *Economica*, Szolnok.
14. Klein T. (2001): A Nap és a naptevékenység földi hatásai (szakdolgozat), <http://mek.oszk.hu/00500/00560/html/kleint3.htm>
15. Korsós M. – Ludmány A. (2013): Bevezetés az űrfizikába. MTA CsFK Napfizikai Observatórium, Debrecen, <http://fenyi.solarobs.unideb.hu/oktatas/F2701jegyzet/Urfizika.pdf>
16. Lean, J. (2000): Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters*, 27(16), pp. 2425–2428.
17. Michelberger P. – Szeidl L. – Várlaki P. (2001): Alkalmazott folyamatstatisztika és idősor-analízis. Typotex.
18. Opitz A. (2001): Változó napállandó (TDK-dolgozat), <http://fenyi.solarobs.unideb.hu/~ludmany/opitz/napallando1.html>
19. Parkinson, G. (2014): Solar has won. Even if coal were free to burn, power stations couldn't compete. *Guardian*, http://www.theguardian.com/commentisfree/2014/jul/07/solar-has-won-even-if-coal-were-free-to-burn-power-stations-couldnt-compete?CMP=fb_gu (Letöltés ideje: 2014. 07. 14.)
20. Zhou, K. – Butler, C. J. (1998): A statistical study of the relationship between the solar cycle length and tree-ring index values. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(18), pp. 1711–1718.
21. http://phet.colorado.edu/sims/blackbody-spectrum/blackbody-spectrum_hu.html (szimuláció).
22. IEA World Energy Outlook 2004. pp. 200–205.
23. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solarirrad.html#composite>
24. Solar Radiation & Climate Experiment, Solar Spectral Irradiance Data, http://lasp.colorado.edu/sorce/data/ssi_data.htm
25. Data Center, <http://www.climate4you.com/Sun.htm>

Let's Count with Solar Energy! – The Intensity of the Solar Radiation

FATALIN DÓRA – FATALIN LÁSZLÓ

Energy security and environmentalism have now gained importance. Researchers are keen on solving the arising problems in the spirit of sustainable development. One way could be the direct utilization of solar energy in electricity generation, although this solution is highly disputed from a techno-economical point of view. It is hard to navigate through the jungle of arguments and counter-arguments, because there are several professional-looking explanations and numerical derivations which have been disproved by experience. These phenomena drastically reduce the willingness to invest in an energy production claimed free, but requiring major investment. The first part of this paper presents the scientific description of the solar radiation intensity from an energy point of view, while the necessary mathematical knowledge is evoked visually. These provide the basis for the correct evaluation of the return on investment calculation models, which will appear in the next part.

Keywords: solar energy; TSI; ARMA models; spectral power distribution (SPD)