

## A klímaváltozás okozta felmelegedés hatása a közepes méretű napelemes erőművek teljesítményére

Bozsik Nándor – Takács István

### Összefoglaló

*A tanulmány három magyarországi település – Miskolc, Sopron és Veszprém – közepes méretű napelemes rendszereinek modellezésére és az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatára összpontosít a villamosenergia-termelés szempontjából. Az elemzés az RCP2.6, az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyveken alapul. A vizsgálatokhoz a Meteoronorm időjárási adatbázis generált bemeneti idősorokat, míg a szimulációkat a SAM program végezte el. Az eredmények azt mutatják, hogy az éghajlatváltozás hatásai jelentős eltéréseket okozhatnak a napelemes rendszerek teljesítményében. A növekvő hőmérséklet kedvezőtlenül befolyásolja a rendszerek hatásfokát, míg a globális sugárzás változásai pozitív irányú korrelációban vannak a teljesítménnyel. Az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek alapján várható legnagyobb hőmérséklet-emelkedés csökkentheti az energiatermelés hatékonyságát, míg az RCP2.6 forgatókönyv stabilabb eredményeket mutat. Az elemzés eredményei hasznos iránymutatást nyújthatnak a jövőbeli napelemes projektek tervezéséhez és telepítéséhez, különösen a változó éghajlati körülményekhez való alkalmazkodás érdekében. Az ilyen vizsgálatok hozzájárulnak ahhoz, hogy a megújuló energiaforrások hatékonyabban támogassák az energiaátmenetet, miközben Magyarország fenntarthatósági céljait is elősegítik.*

**Kulcsszavak:** napelem, felmelegedés, hatásfok, klímaváltozás, RCP forgatókönyv

**JEL:** Q20, Q47

## Impact of climate change warming on the performance of medium-sized solar power plants

### Summary

*The study focuses on the modelling of medium-sized solar PV systems in three central European cities - Miskolc, Sopron and Veszprém - and the impact of climate change on electricity generation. The analysis is based on the scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. The Meteoronorm weather database was used to generate input time series for the analyses, while the simulations were performed by the SAM program. The results show that climate change impacts can cause significant variations in the performance of solar PV systems. Increasing temperatures negatively affect the efficiency of the systems, while changes in global radiation are positively correlated with performance. The maximum temperature increase expected under scenarios RCP4.5 and RCP8.5 may reduce the efficiency of power generation, while scenario RCP2.6 shows more stable results. The results of the analysis can provide useful guidance for the design and installation of future solar PV projects, especially to adapt to changing climate conditions. Such studies will contribute to a more efficient use of renewable energy sources to support the energy transition, while also contributing to Hungary's sustainability goals.*

**Keywords:** *solar PV, warming, efficiency, climate change, RCP scenario*

**JEL:** *Q20, Q47*

## **Bevezetés**

A cikkben három magyarországi település közepes méretű napelemes rendszere került modellezésre. A vizsgálat a napelemes rendszerek éghajlat változásra adott válaszait elemezi a villamosenergia-termelés szempontjából.

A klímaváltozás okozta hatások nem kerülnek el a villamosenergia-termelés szektort sem. Ezek a problémák egyre gyakoribbá válnak; például Franciaországban több nukleáris erőművi blokkot kellett leállítani vagy teljesítményét korlátozni az alacsony vízhozam miatt. A megújuló energiaforrások – elsősorban a nap- és szélenergia – termelésére az időjárási minták átalakulása jelentős hatást gyakorol. Az erős viharok, szélsőséges hőmérsékletek és aszályok mind befolyásolják a szél-, nap- és vízenergia-termelést, ami hosszú távon átrendeződést eredményezhet az energiamixben (Jackson – Gunda, 2021). A felmelegedés kedvezőtlen hatással van a félvezető technológiákat alkalmazó eszközök hatásfokára. A hőmérséklet emelkedése csökkenti ezeknek a rendszereknek a teljesítményét, különösen igaz ez a napelemekre és a villamos átalakító eszközökre (Sheik et al., 2022).

A napelemes rendszerek teljesítményére ható klímaváltozás vizsgálata nemcsak Magyarországon, hanem világszerte is kiemelt kutatási téma, különösen az olyan régiókban, ahol az éghajlati szélsőségek – mint például a sivatagi és félsivatagi környezetek – komoly kihívásokat jelentenek a napenergia-hasznosítás számára. A Közel-Keleten és Észak-Afrikában (MENA-régió), valamint az Egyesült Államok dél-nyugati részén végzett kutatások azt mutatják, hogy a szélsőséges hőmérséklet, a magas por- és aeroszoltartalom, valamint a változó napsugárzási viszonyok mind hatással vannak a fotovoltaiikus rendszerek hatékonyságára. Sheik és szerzőtársainak (2022) tanulmánya szerint a magas hőmérséklet csökkenti a félvezető alapú napelemek hatékonyságát, míg a levegőben szálló por és a homoklerakódások további teljesítménycsökkenést okoznak. Smith és szerzőtársai (2015) kutatása pedig arra mutatott rá, hogy a vízgőz és az üvegházhatású gázok koncentrációjának változása is érzékenyen befolyásolja a napenergia-termelést.

## ***A magyarországi klímavédelmi célok a napelemes energiatermelés területén***

Magyarország a 2017-es az IEA (Nemzetközi Energiaügynökség) felülvizsgálata óta jelentős haladást ért el az éghajlat-politikai ambícióinak növelésében. Jogszabályi keretek között rögzítette a 2050-re kitűzött szén-dioxid-semlegességi célt, és elfogadott több közép- és hosszú távú forgatókönyvet, amelyek előíranyozzák a szén fokozatos kivezetését 2025-ig. Emellett hangsúlyt helyez a napelemes kapacitások növelésére és minél több területen való alkalmazásukra (IEA, 2022).

Magyarországon a napelemes villamosenergia-termelés 2014-2015 táján indult igazán növekedésnek, köszönhetően ez annak is, hogy a háztartási méretű kiserőművek mellett megjelentek a közepes és erőművi méretű termelők.

**1. táblázat. A magyar teljes-, megújulókból- és napelemes rendszerekből származó villamosenergia-termelése, GWh**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Napelem	141	244	349	629	1497	2459	3796	4732	6925
Megújuló	3229	3258	3480	3766	4690	5529	6915	7662	9371
Országos teljes termelés	30298	31824	32833	31928	34180	34787	35975	35802	35544

*Forrás: Eurostat, Complete energy balances, Eurostat (2025)*

A napelemekből származó villamosenergia a megújulókból származó villamosenergia 4,4%-át tette ki 2015-ben, ez 2023-ra már 73,9%-ot ért el. Ez a 2023-as évi termelés már az ország teljes villamosenergia-termelésében is jelentős volt, 19,5%-ot jelentett (Eurostat, 2025).

## Anyag és módszer

A múltban alkalmazott kibocsátással és társadalmi-gazdasági helyzettel foglalkozó éghajlatváltozási modelleknek volt egy nagy hiányossága. Ezek a modellek nem vették számításba a klímavédelmi intézkedéseket és annak a Földre való hatását (Nakicenovic et al., 2000).

Ennek orvoslására az IPCC (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület) 2014-ben kiadott egy erre vonatkozó jelentést az AR5-t. Az AR5 jelentés tartalmazta azokat a forgatókönyveket, amelyeket reprezentatív koncentrációs útvonalaknak neveznek, röviden RCP-nek. Az RCP tartalmazza az eddigi kibocsátásokat, légköri gázkoncentrációkat és talajborítás változásokat. Ezeket az adatokat felhasználva a négy fő RCP forgatókönyv trendeket szolgáltat éghajlati modellek bemeneti paramétereire (Schulte-Uebbing et al., 2015; Mester, 2015).

## A szcenárió forgatókönyvek

Az RCP forgatókönyvek az üvegházhatású gázok koncentrációjának lehetséges jövőbeli alakulását írják le. Ezek az éghajlatmodellezésben használatosak a várható éghajlati változások előrejelzésére. Ezek a forgatókönyvek a különböző kibocsátási pályákat és azok éghajlatra gyakorolt hatásait mutatják be. Az RCP2.6 a legalacsonyabb, míg az RCP8.5 a legmagasabb károsanyag-kibocsátási szcenáriókat képviseli, míg az RCP4.5 és RCP6.0 köztes kibocsátási útvonalakat képviselik (1. ábra). Ezek a fő pályamodellek, de léteznek ennél árnyaltabb és egyikből a másikba átvezető pályák is.

Az RCP2.6 reprezentatív koncentrációs útvonal szerint a CO<sub>2</sub>-kibocsátás 2020-tól csökkenni kezd, és 2100-ra eléri a nullát. Ez 2100-ra 2,6 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszert okoz. Ez a forgatókönyv nagy valószínűséggel korlátozza a globális felmelegedést 2 °C alá 2100-ra.

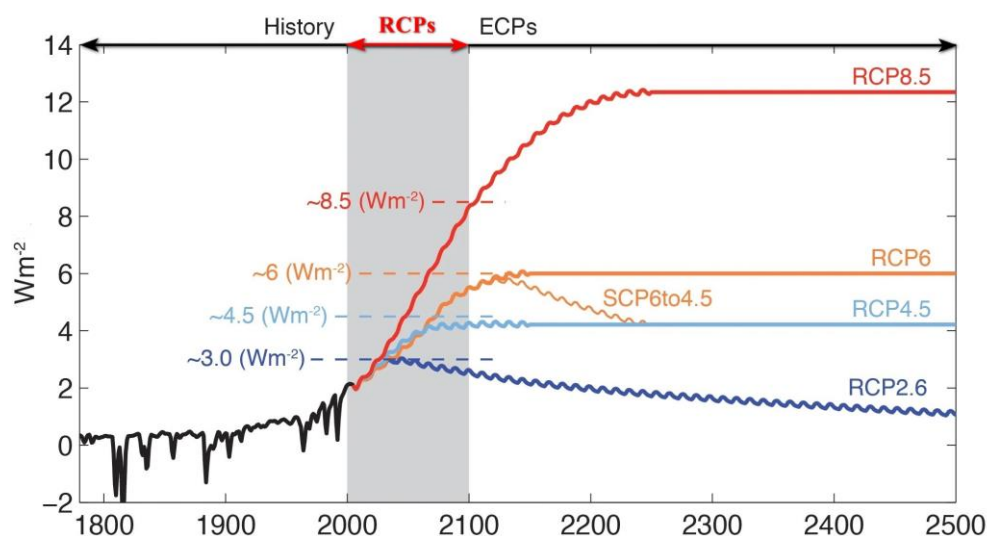
Az RCP4.5 reprezentatív koncentrációs útvonal azt feltételezi, hogy a CO<sub>2</sub>-kibocsátás körülbelül 2045-ben kezd el csökkenni, és 2100-ra a 2050-es szintnek körülbelül a felére csökken. Ez 2100-ra 4,5 W/m<sup>2</sup> sugárzási kényszert eredményez. Az RCP4.5 szerint a globális hőmérséklet várhatóan 2 °C és 3 °C között emelkedik.

Az RCP8.5 reprezentatív koncentrációs útvonal feltételezi, hogy a globális kibocsátások a 21. század során tovább emelkednek, ami 2100-ra a globális átlaghőmérséklet közel 4°C-os emelkedéséhez fog vezetni (van Vuuren et al., 2011; Bozsik et al., 2024a; Bozsik et al., 2024b).

## A sugárzási kényszer

A sugárzási kényszer az energiaegyensúly megváltozását jelző mutató, amelyet a légkörben jelenlévő "kényszerítő" anyagok, például gázok, porszemcsék stb. okoznak. Ezek az anyagok befolyásolják a globális energiaáramlást, és jelentős szerepet játszanak az éghajlatváltozás folyamatában (He et al., 2018). A vízgőznek a gázok között érdekes kettős szerepe van. Egyrészt, az áttetsző légkörben a vízgőz abszorpciós képessége csökkenti a napelemekhez elérkező sugárzást, míg üvegházhatású tulajdonságai növelik a környezet hőmérsékletét. Másrészt, a vízgőz kicsapódása miatt kialakuló felhőképződés csökkenti a földfelszínre érkező sugárzást, ezzel pedig a napelemek villamosenergia-termelését is csökkenti. (Smith et al., 2015).

A 1. ábra a globális emberi tevékenység által okozott sugárzási kényszert szemlélteti az alábbi forgatókönyvek alapján: a magas RCP8.5, a közepesen magas RCP6.0, a közepesen alacsony RCP4.5 és az alacsony RCP3-PD (más néven RCP2.6). Emellett két kiegészítő kiterjesztést is bemutat: az egyik az RCP6.0 szintek fokozatos csökkentését ábrázolja az RCP4.5 szintre 2250-re (SCP6to4.5), a másik pedig az RCP4.5 szintek csökkentését az RCP3-PD (RCP2.6) szintre ugyancsak 2250-re (SCP45to3PD) (Meinshausen et al., 2011).



1. ábra. Sugárzási kényszerek RCP-forgatókönyvek szerint

Forrás: saját szerkesztés, Meinshausen et al. (2011)

A sugárzási kényszerszintek az alapértelmezett medián becslésekre vonatkoznak. Nagy a bizonytalanság a jelenlegi és a jövőbeli sugárzási kényszerszintekre vonatkozólag. A rövid távú ingadozások a múltban (1800–2000) a ciklikus szoláris erőből adódnak – a 11 éves napciklust feltételezve (Meinshausen et al., 2011).

A sugárzási kényszer és az üvegházhatású – főképp a szén-dioxid – gázok koncentrációi az RCP-k esetében 2100-ig adják meg, de például az éghajlatmodellezéseknél 2300-ig terjesztik ki. Amennyiben archívumokban rendelkezésre áll, akkor a történeti információkat 1850-ig visszamenőleg szolgáltatják (RCP, 2009; RCP, 2023; Sarofim et al., 2024).

## ***Szimuláció***

Annak vizsgálatához, hogy ki tudjuk értékelni a napelemes rendszereket érintő klímaváltozás hatásait, ahhoz szimulálnunk kell a jövőbeli termelést. A szimulációhoz ismernünk kell a környezeti tényezők jövőbeli alakulását, amelyek a termeléssel összefüggnek. Ezt szolgálja a fent említett RCP forgatókönyvek, amelyek közül az RCP2.6, az RCP4.5 és az RCP8.5 kerültek felhasználásra. A szimulációt végző SAM – System Advisor Model – programhoz a Meteonorm program az RCP forgatókönyvek alapján állítja elő a bemeneti változókat.

## ***Meteonorm***

A Meteonorm egy komplex meteorológiai adatbázis és szoftver, amely a világ különböző részeiről szolgáltat környezeti és időjárási adatokat. A program történeti, aktuális és előre jelzett időjárási információkat kínál, így hasznos eszköze például energiarendszerek tervezésének, épületek teljesítményelemzésének. A Meteonorm különböző forrásokból, például földi meteorológiai állomásokról és műholdas adatokból gyűjti össze az információkat, és egyesíti azokat. Az adatbázis számos éghajlati változót tartalmaz, mint például hőmérséklet, napsugárzás, szélsébség, páratartalom és csapadék, amelyek órás, napi, havi vagy éves időbontásban érhetőek el.

A Meteonorm 8.0 a korábban említett RCP forgatókönyvek alapján generál idősorokat a kívánt éghajlati modellekhez, figyelembe véve a földrajzi helyet. A szimulációk ebben az esetben Miskolc, Sopron és Veszprém térségeire készültek. A program minden helyszínhez és RCP modellhez létrehoz egy tipikus meteorológiai évet 2010 és 2100 között, tízéves időintervallumokkal. Az előállított adatokat csv formátumú fájlokban tárolja, amelyek a SAM szimulációs program számára betölthetők. Ezek a fájlok órás felbontásban tartalmazzák a tipikus meteorológiai év globális és diffúz horizontális sugárzási értékeit, a levegő hőmérsékletét és a szélsébséget.

A SAM szimulációs program állandó bemeneti értékei a telepítési paraméterek, mint például a panel típusa, a panelek száma, valamint a dőlés és az irányultság. Az inverter típusa is meghatározásra került, bár az összehasonlító elemzés elsősorban a napelemes mező egyenáramú oldalának teljesítményére ( $P_{DC}$ ), azaz az inverter előtti értékekre fókuszál. Az inverter kimeneti adatai, a váltakozó áramú teljesítmény ( $P_{AC}$ ), a későbbi elemzések alapját képezhetik (Meteonorm 8, 2021; Bozsik et al., 2024a).

## ***SAM, Sam Advisor Model***

A SAM egy sokoldalú szimulációs program, amelyet elsősorban a napelemes rendszerek modellezésére használnak a kutatók és a megújuló energiaipar szakemberei. A program egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy különböző földrajzi helyszíneken, időjárási körülmények között és rendszerkonfigurációk alapján képes szimulálni a napelemes rendszerek teljesítményét. Részletes időjárási adatbázissal rendelkezik, amely több ezer helyszín hosszú távú történeti időjárási adatait tartalmazza világszerte. Ezeket az adatokat felhasználva a SAM pontos és valósághű előrejelzéseket nyújt az energiatermelésről, figyelembe véve olyan tényezőket, mint a napsugárzás, a hőmérséklet, az árnyékolás hatása és a rendszer veszteségei (Shahzad, 2022).

A SAM lehetőséget nyújt a felhasználók számára, hogy testre szabják szimulációikat a rendszer-elemek meghatározásával, mint például a PV modul típusai, inverterek és energiatárolók. Ez a rugalmasság segíti a felhasználókat abban, hogy optimalizálják terveiket a maximális energiatermelés és költséghatékonyság érdekében. A program egyik kiemelkedő képessége a pénzügyi elemzés, amely különféle pénzügyi modelleket tartalmaz. Ezek figyelembe veszik a projekt költségeit, az

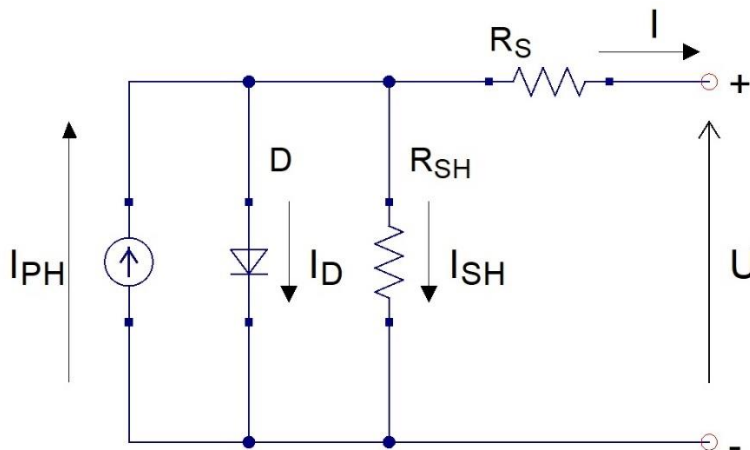
öztönzőket, az adókedvezményeket és a villamosenergia-díjakat. A felhasználók által megadott pénzügyi paraméterek alapján a SAM átfogó értékelést nyújt a napenergia-projektek gazdaságosságáról. Kiszámítja a fontos pénzügyi mutatókat, például a nettó jelenértéket, a belső megtérülési rátát, a kiegyenlített energiaköltséget és a megtérülési időt. Ezek az elemzések segítik a felhasználókat a projektfinanszírozással és jövedelmezőséggel kapcsolatos döntések meghozatalában.

Továbbá a SAM képes hibrid energiarendszerek szimulálására is, amelyek a napenergiát más megújuló energiaforrásokkal, például szél- vagy biomassza-alapú energiával kombinálják. Ez lehetővé teszi az energiarendszerek átfogó elemzését és optimalizálását, támogatva a fenntartható és hatékony energiaellátást (Hollósy et al., 2019; Bozsik et al., 2024a).

### ***Az áramköri- és matematikai modell***

A napsütés következtében a napelem cellákat elérő fotonok szilícium kristály alapú félvezető réteget érnek el, amelyen vagy visszaverődnek, vagy közvetlenül áthatolnak, vagy elnyelődnek a cellában. Azok a fotonok, amelyek elnyelődnek energiát adnak át a félvezető réteg elektronjainak (fotovoltaikus jelenség). Ez a kölcsönhatás elektronáramlást indít meg, amint a kivezetéseket áramkörhöz kapcsoljuk (Ready, 1997).

A SAM szimuláció az egydiódás Perez-Ineichen-modelt alkalmazza. Alkalmazott még a Hay-modell, amit főképp akkor használnak, ha a diffúz besugárzási adatok nem ismertek pontosan (Perez et al., 1990).



**2. ábra. Egydiódás napelem modell**

*Forrás: saját szerkesztés*

A napelem pillanatnyi teljesítmény egyenlete:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (1)$$

Az egy diódás napelem modell áram egyenlete:

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (2)$$

ahol  $I$  a modul áram,  $I_{PH}$  fotoáram,  $I_D$  diódaáram és  $I_{SH}$  a párhuzamos ellenálláson folyó áram. (2. ábra)

$$I_{PH} = \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \left( I_{PHref} + \mu_{ISC} \cdot (T_C - T_{Cref}) \right) \quad (3)$$

ahol  $G$  és  $G_{ref}$  az effektív, illetve a referencia sugárzást jelölik, míg a  $T_C$  és a  $T_{Cref}$  az effektív, illetve a referencia cellahőmérsékletet jelentik. A  $\mu_{ISC}$  a rövidzárási áram hőmérsékleti együtthatója. A  $G$  értékét a Meteororm időjárási adatbázisból származó globális horizontális sugárzás ( $G_h$ ) és diffúz horizontális sugárzás ( $D_h$ ) adatai alapján az SAM program számítja ki a telepítési paraméterek, a dátum és az idő figyelembevételével. A  $T_C$  értékének meghatározása a (7) egyenletben látható.

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_S)}{N_{CS} \cdot \text{Gamma} \cdot k \cdot T_C}} - 1 \right) \quad (4)$$

ahol  $I_0$  a dióda rövidzárási árama,  $q$  az elektron töltése,  $N_{CS}$  a cellák száma,  $\text{Gamma}$  a dióda minőségi tényezője (1 és 2 közé eső érték),  $k$  a Boltzmann állandó.

$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left( \frac{T_C}{T_{Cref}} \right)^3 \cdot e^{\left( \frac{q \cdot E_{Gap}}{\text{Gamma} \cdot k} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{Cref}} - \frac{1}{T_C} \right)} \quad (5)$$

ahol  $I_{0ref}$  a dióda rövidzárási referencia árama,  $E_{Gap}$  = Gap energiája, ami Si-kristály esetén  $\sim 1,12$  eV.

$$I_{SH} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (6)$$

ahol  $R_S$  a soros,  $R_{SH}$  a párhuzamos (sönt) ellenállás.

$$T_C = T_a + G \frac{\alpha(1 - \text{eta}_m)}{H_0 + H_1 \cdot WS} \quad (7)$$

ahol  $\text{eta}_m$  a napelem modul hatékonysága (0...1),  $\alpha$  a modul abszorpció együtthatója (ez SAM programban alapértelmezettként: 0,9),  $H_0$  a hőátadó komponens,  $H_1$  a konvektív hőátadó komponens,  $WS$  a szél sebessége.

A  $G$  értékét, a levegő hőmérsékletét ( $T_a$ ) és szél adatokat ( $WS$ ) a Meteororm időjárási adatbázis szolgáltatja a SAM program számára. A napelem referencia értékei az STC alapján vannak megadva.

A napelem modul árama számos tényezőtől függ, A tényezők egy része nem lineáris tagként szerepelnek az egyenletekben. Ezt tovább nehezíti, hogy az áram-feszültség értékpárok hőmérséklettől függő görbesereget alkotnak, és ezek nem egyszerű eltolás-transzformáció eredményei (Markvart–Castañer, 2018; Bozsik et al., 2024b).

## SPSS

A bemeneti- és a kimeneti változók közötti korreláció-mátrix és a parciális korreláció vizsgálat az SPSS statisztikai programcsomaggal készült. A korreláció-mátrixban a változók közötti lineáris korreláció értéke van feltüntetve. A korreláció együttható – ami  $r$ -ként van jelölve – -1-hez vagy 1-hez közeli érték, akkor erős lineáris kapcsolatot jelez, míg a 0-hoz közeli érték nem utal szignifikáns

lineáris összefüggésre. Az előjel (+/-) jelzi a kapcsolat irányát. A szignifikancia szint – p-érték – a korreláció együtttható statisztikai szignifikanciáját jelzi. Az egy és öt százalékos szignifikancia meg-  
léte esetén azok külön jelezve is vannak (Meloun– Militký, 2011).

Fontos megjegyezni, hogy a korreláció nem jelent ok-okozati összefüggést. A korreláció a kap-  
csolat erősségét és irányát méri, de nem hoz létre ok-okozati összefüggést a változók között. A  
parciális-korreláció a korrelációs elemzés kiterjesztése, amely során két változó közötti kapcsolatot  
méri, miközben egy harmadik vagy több változót kontroll változóként vesz alapul. Ez segít felmérni  
két változó közötti összefüggést, úgy, hogy egy vagy több változó hatását figyelmen kívül hagyja  
(Taylor, 1990; Bozsik et al., 2024a).

## Eredmények

Az 2–4. táblázatok tartalmazzák a vizsgált régió három településén szimulált erőművek be-és kime-  
neti adataikat. A Gh változó az adott évben egy négyzetméter érő napi átlag napenergia termelést  
mutatja. A Ta változó az adott év napi középhőmérsékletét mutatja Celsius-fokban. Az En ered-  
ményváltozó a szimulált 250 kW-os közepes méretű napelemes rendszer éves egyenáramú (DC)  
villamosenergia hozamát mutatja kilowattórában. A 2-4. táblázatokban szereplő változók mérték-  
egységei: Gh: kWh/m<sup>2</sup>/d; Ta: °C; En: kWh/y.

**2. táblázat. Miskolc**

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP 2.6	Gh	3,26	3,34	3,44	3,45	3,48	3,49	3,49	3,49	3,50	3,50
	Ta	10,7	11,2	11,7	11,9	12,1	12,3	12,2	12,2	12,2	12,1
	En	305673	313799	323527	324536	325733	330983	328316	329553	328158	328005
RCP 4.5	Gh	3,26	3,31	3,37	3,38	3,40	3,42	3,43	3,44	3,46	3,47
	Ta	10,7	11,2	11,6	12,0	12,4	12,7	13,0	13,3	13,5	13,8
	En	305673	310884	314868	314388	314147	319897	317790	318704	321020	321117
RCP 8.5	Gh	3,26	3,30	3,35	3,38	3,41	3,43	3,45	3,46	3,48	3,49
	Ta	10,7	11,3	11,8	12,5	13,1	13,8	14,5	15,2	15,9	16,6
	En	305673	308566	315135	315621	318343	320788	320258	319130	322300	321317

**3. táblázat. Sopron**

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP 2.6	Gh	3,37	3,43	3,50	3,52	3,54	3,55	3,54	3,54	3,53	3,53
	Ta	11,0	11,4	11,8	12,0	12,3	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0
	En	320284	325806	332901	332366	335737	339056	334982	336633	335190	334260
RCP 4.5	Gh	3,37	3,40	3,44	3,46	3,48	3,49	3,50	3,50	3,51	3,52
	Ta	11,0	11,5	11,8	12,2	12,6	12,9	13,1	13,4	13,6	13,8
	En	320284	322216	323847	325572	328188	328194	327107	327896	330459	331329
RCP 8.5	Gh	3,37	3,41	3,46	3,49	3,51	3,52	3,54	3,55	3,57	3,58
	Ta	11,0	11,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,6	15,4	16,0	16,7
	En	320284	324466	327323	330906	331064	330332	331047	332536	333078	333808



**4. táblázat. Veszprém**

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP 2.6	Gh	3,32	3,38	3,45	3,47	3,49	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	Ta	10,7	11,1	11,5	11,8	12,0	12,2	12,1	12,1	11,9	11,8
	En	308564	314782	322688	323791	325282	325908	325870	327357	323869	328741
RCP 4.5	Gh	3,32	3,34	3,37	3,39	3,41	3,42	3,43	3,44	3,46	3,47
	Ta	10,7	11,2	11,5	11,9	12,3	12,6	12,9	13,0	13,3	13,6
	En	308564	310404	312302	314543	314863	315566	316328	317329	316885	318324
RCP 8.5	Gh	3,32	3,36	3,40	3,43	3,45	3,47	3,48	3,50	3,51	3,53
	Ta	10,7	11,4	11,8	12,5	13,1	13,8	14,4	15,2	15,9	16,6
	En	308564	314669	317641	317095	320289	321066	322789	322312	321856	322926

*Forrás: saját szerkesztés*

### **Korreláció vizsgálat**

A klímaváltozás hatása a napelemes rendszerek energiatermelésére elsősorban két kulcsfontosságú tényezőtől függ: az éves globális sugárzási értéktől és az éves átlaghőmérséklettől. E tényezők vizsgálata szükséges annak meghatározásához, hogy a változó éghajlati viszonyok milyen mértékben befolyásolják a napenergia-termelést. Ez először a Pearson-korrelációval történt. (5. táblázat)

**5. táblázat. Pearson-korreláció mátrix**

		Gh_2.6	Ta_2.6		Gh_4.5	Ta_4.5		Gh_8.5	Ta_8.5
Miskolc	Corr. Ta_2.6	0,988		Ta_4.5	0,975		Ta_8.5	0,963	
	Sign. Ta_2.6	0,000		Ta_4.5	0,000		Ta_8.5	0,000	
	Corr. En_2.6	0,988	0,911	En_4.5	0,971	0,936	En_8.5	0,969	0,878
	Sign. En_2.6	0,000	0,000	En_4.5	0,000	0,000	En_8.5	0,000	0,001
Sopron	Corr. Ta_2.6	0,980		Ta_4.5	0,973		Ta_8.5	0,952	
	Sign. Ta_2.6	0,000		Ta_4.5	0,000		Ta_8.5	0,000	
	Corr. En_2.6	0,982	0,975	En_4.5	0,965	0,964	En_8.5	0,973	0,877
	Sign. En_2.6	0,000	0,000	En_4.5	0,000	0,000	En_8.5	0,000	0,001
Veszprém	Corr. Ta_2.6	0,968		Ta_4.5	0,995		Ta_8.5	0,965	
	Sign. Ta_2.6	0,000		Ta_4.5	0,000		Ta_8.5	0,000	
	Corr. En_2.6	0,979	0,931	En_4.5	0,983	0,977	En_8.5	0,951	0,867
	Sign. En_2.6	0,000	0,000	En_4.5	0,000	0,000	En_8.5	0,000	0,001

*Forrás: saját szerkesztés*

A változók mindegyike magas korrelációt mutat egymással. Ez feltételezi, hogy a változók között van olyan változó, amely a másik változón keresztül is igen erősen hat. Ezt a Pearson-korreláció nem jelzi, ezért parciális-korreláció vizsgálatot kell végezni. Ezt egyrészt a sugárzási változóra, másrészt pedig a hőmérsékleti változóra, mint kontrol változóra kell elvégezni a teljesítmény változóval kapcsolatban.

6. táblázat. Miskolc, Sopron és Veszprém parciális-korreláció mátrixa

	Kontroll változó	Változó_1	Változó_2	Korreláció	Szignifikancia sz.
Miskolc	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,393	0,295
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,645	0,060
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,747	0,021
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,202	0,602
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,945	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,815	0,007
Sopron	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,592	0,093
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,327	0,390
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,439	0,238
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	0,423	0,259
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,939	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,695	0,038
Veszprém	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,845	0,004
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	-0,317	0,406
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,527	0,145
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,081	0,835
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,879	0,002
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,638	0,064

Forrás: saját szerkesztés

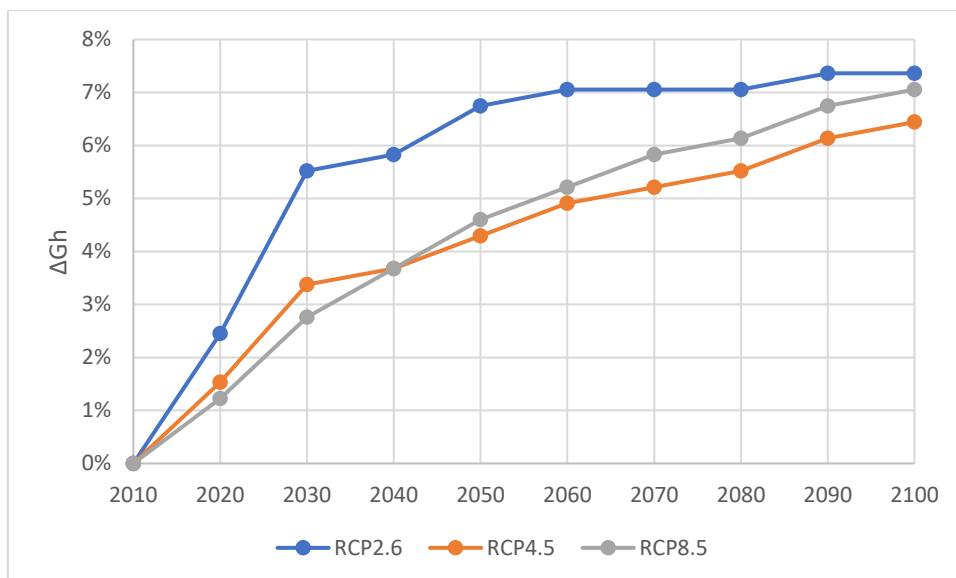
A napelemes rendszerek energia termelése továbbra is pozitív korrelációban van a sugárzással. Sopronnál az RCP8.5, Miskolcnál az RCP4.5 és az RCP8.5, Veszprém esetén pedig mindhárom forgatókönyvnél negatívan korrelál a hőmérsékleti változó az energiatermeléssel. Ez nem azt jelenti, hogy a növekvő hőmérséklet csökkenő energiatermeléssel jár, hanem azt jelenti, hogy a sugárzás növekedéssel együtt járó hőmérséklet növekedés kedvezőtlen, határfok csökkentő hatással van a napelemek energiatermelésére.

Az is igaz, hogy a szignifikancia szint csak Miskolc RCP8.5-nél és Sopron RCP8.5-nél esik 0,05 érték alá (bár Veszprém esetén is közel van hozzá, 0,064 az értéke), de esetünkben ez kevésbé fontos, mint a korreláció negatív előjele a hőmérséklet és az energiatermelés vonatkozásában. Azt is fontos figyelembe venni, hogy a korreláció vizsgálat a lineáris kapcsolatra vonatkozik, míg a fizikai háttérből és a matematika modellből tudjuk, hogy ez a kapcsolat a hőmérséklet és az energiatermelés között csak kis intervallumokban lineáris. A következőkben az idősorok vizsgálata még inkább rávilágít a növekvő hőmérséklet határfok csökkentő hatására.

### Idősorok

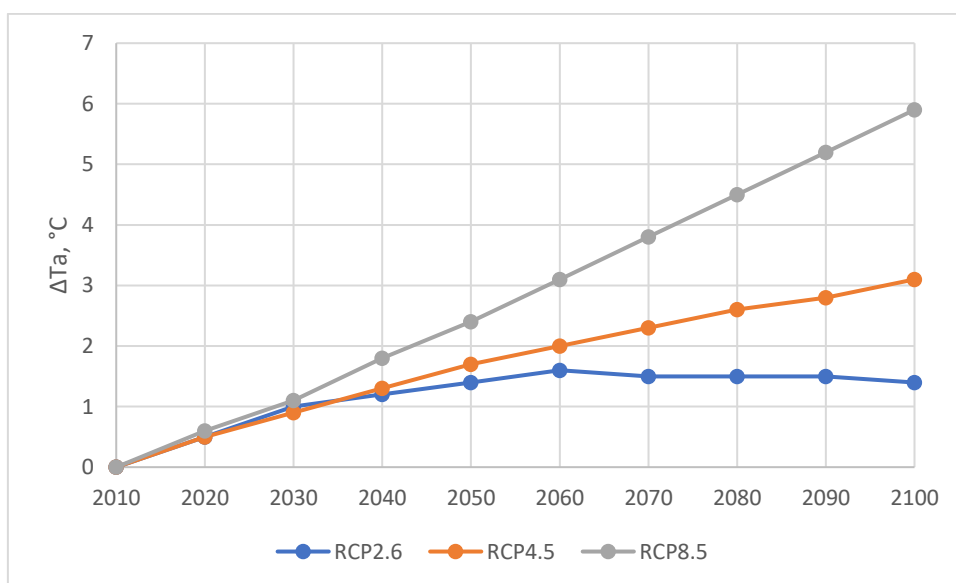
Az idősorok településeként a 2010-es évet bázisul véve készült el. Tartalmazzák a klíma forgatókönyvek alapján számított a sugárzás, a hőmérséklet és az energiatermelés változásokat.

Miskolc esetén az RCP2.6 – 4.5 – 8.5 forgatókönyvek rendre a globális horizontális sugárzás 6,8% – 4,3% – 4,6%, a levegő átlag hőmérséklet 1,4°C – 1,7°C – 2,4°C, az egyenáramú teljesítmény 6,6% – 2,8% – 4,1% változást mutatnak az évszázad közepére. Az évszázad végére pedig a globális horizontális sugárzás 7,4% – 6,4% – 7,1%, a levegő átlag hőmérséklete 1,4°C – 3,1°C – 5,9°C, az egyenáramú teljesítmény 7,3% – 5,1% – 5,1% változást mutat. (3-5. Ábra)



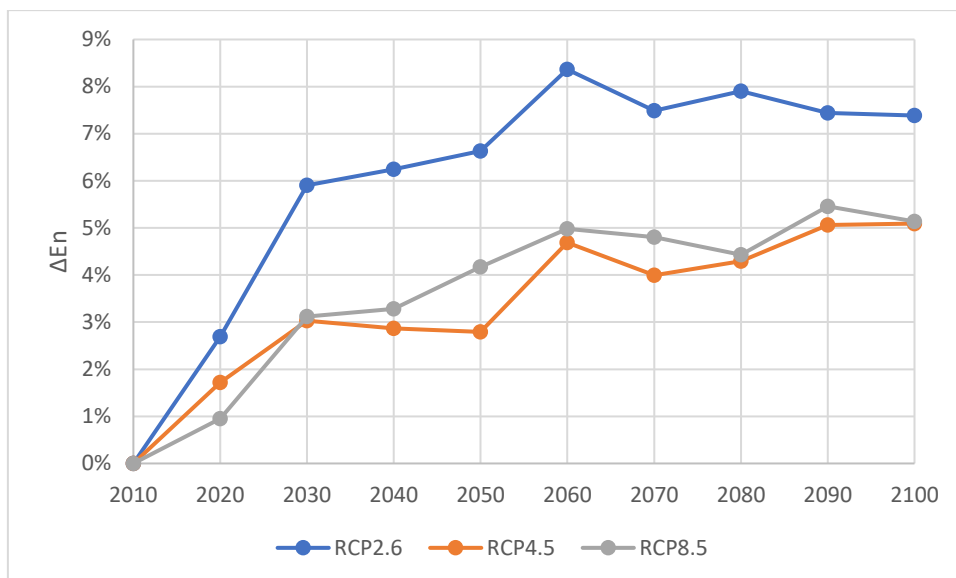
3. ábra. Miskolc éves horizontális sugárzás 2010-es báziséhez viszonyított idősorai, RCP forgatókönyveként

*Forrás: saját szerkesztés*



4. ábra. Miskolc éves átlaghőmérséklet 2010-es báziséhez viszonyított idősorai, RCP forgatókönyveként

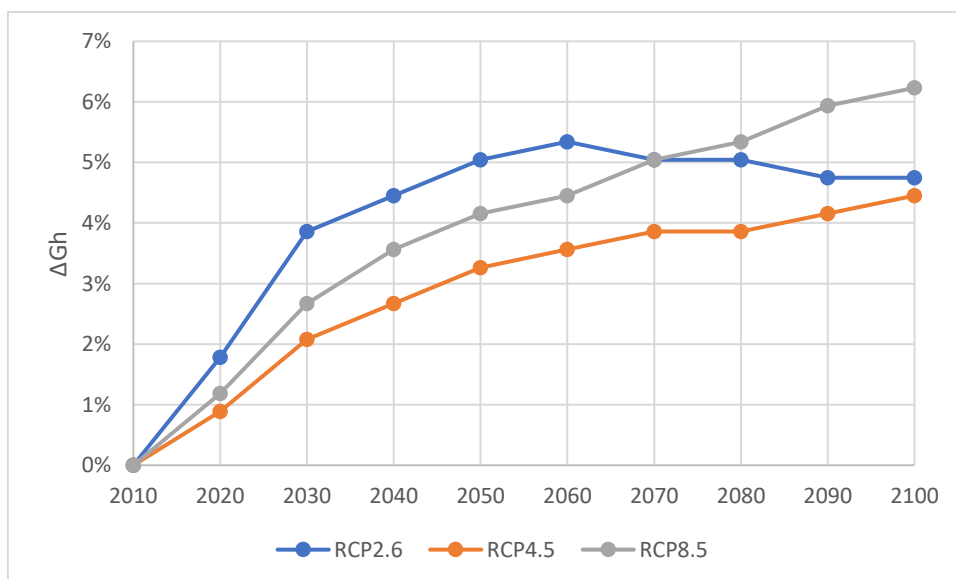
*Forrás: saját szerkesztés*



5. ábra. Miskolc éves energiatermelés 2010-es bázisához viszonyított idősorai, RCP forgatókönyveként

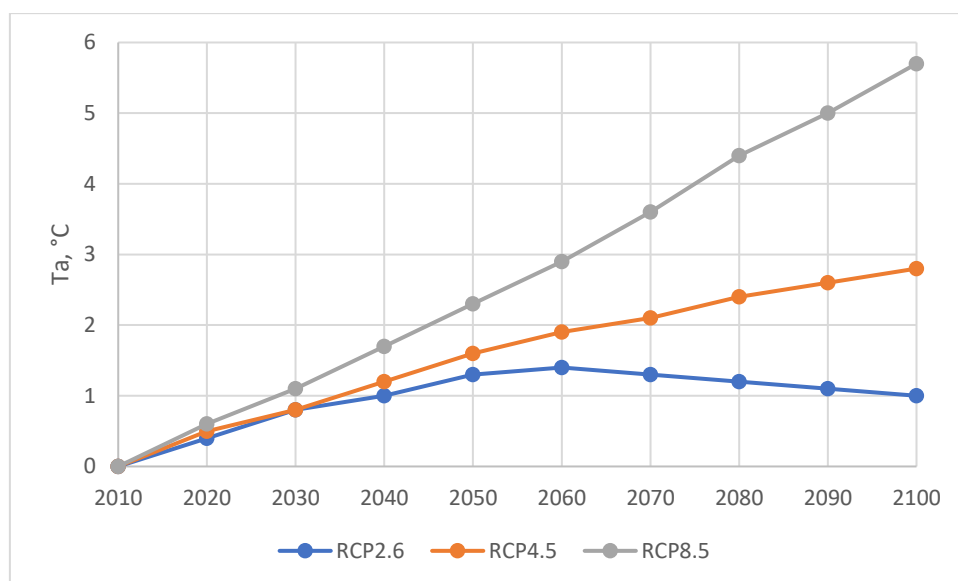
*Forrás: saját szerkesztés*

Sopron esetén az RCP2.6 – 4.5 – 8.5 forgatókönyvek rendre a globális horizontális sugárzás 5,0% – 3,3% – 4,2%, a levegő átlag hőmérséklet 1,3°C – 1,6°C – 2,3°C, az egyenáramú teljesítmény 4,8% – 2,5% – 3,4% változást mutatnak az évszázad közepére. Az évszázad végére pedig a globális horizontális sugárzás 4,8% – 4,5% – 6,2%, a levegő átlag hőmérséklete 1,0°C – 2,8°C – 5,7°C, az egyenáramú teljesítmény 4,4% – 3,5% – 4,2% változást mutat. (6-8. Ábra)



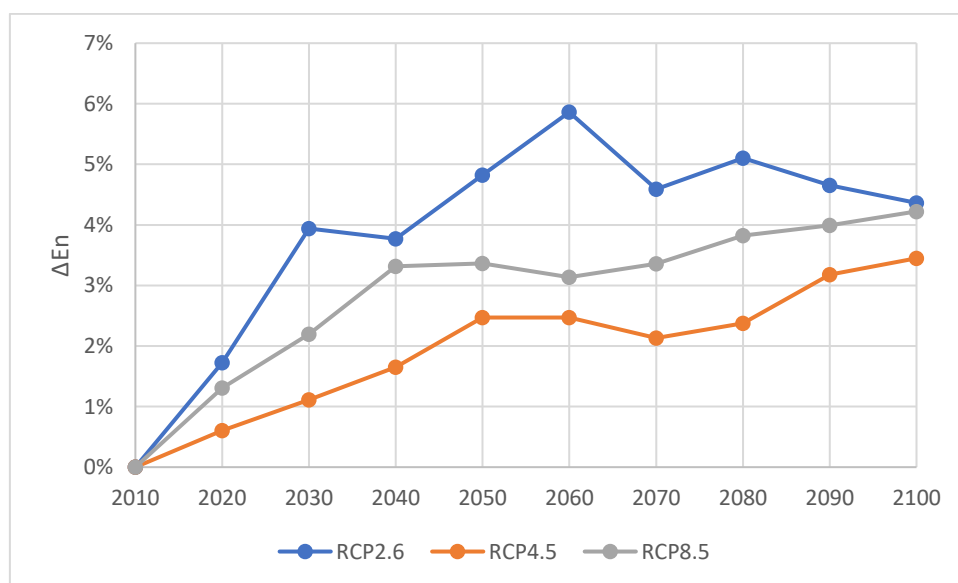
6. ábra. Sopron éves horizontális sugárzás 2010-es bázisához viszonyított idősorai, RCP forgatókönyveként

*Forrás: saját szerkesztés*



7. ábra. Sopron éves átlaghőmérséklet 2010-es bázisához viszonyított idősorai, RCP forgatókönyvekként

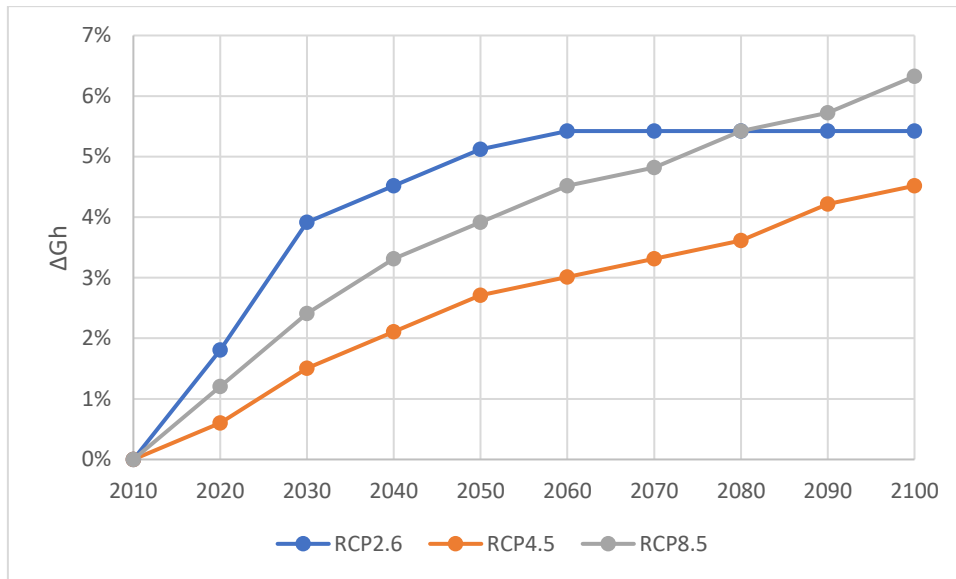
*Forrás: saját szerkesztés*



8. ábra. Sopron éves energiatermelés 2010-es bázisához viszonyított idősorai, RCP forgatókönyvekként

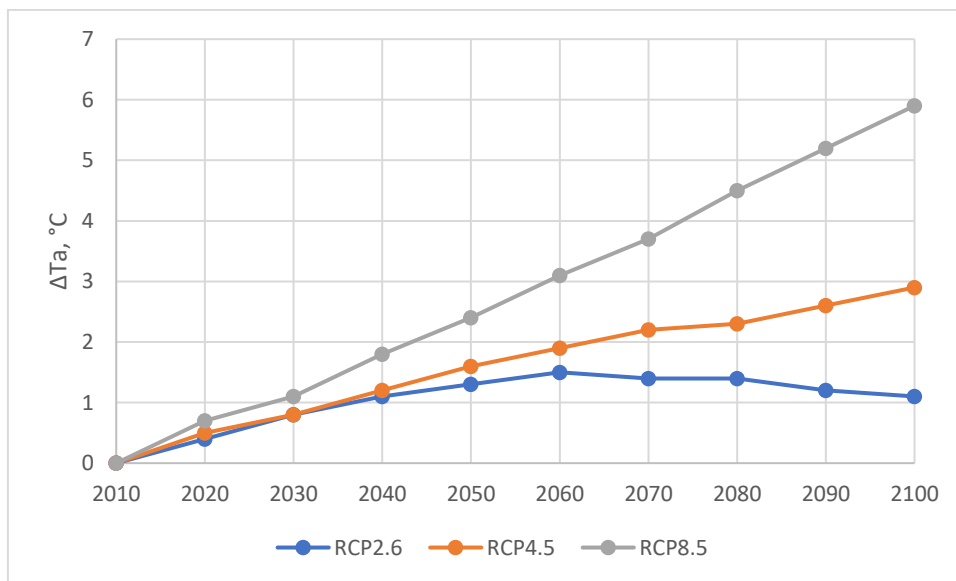
*Forrás: saját szerkesztés*

Veszprém esetén az RCP2.6 – 4.5 – 8.5 forgatókönyvek rendre a globális horizontális sugárzás 5,1% – 2,7% – 3,9%, a levegő átlag hőmérséklet 1,3°C – 1,6°C – 2,4°C, az egyenáramú teljesítmény 5,4% – 2,0% – 3,8% változást mutatnak az évszázad közepére. Az évszázad végére pedig a globális horizontális sugárzás 5,4% – 4,5% – 6,3%, a levegő átlag hőmérséklete 1,1°C – 2,9°C – 5,9°C, az egyenáramú teljesítmény 6,5% – 3,2% – 4,7% változást mutat. (9-11. Ábra)



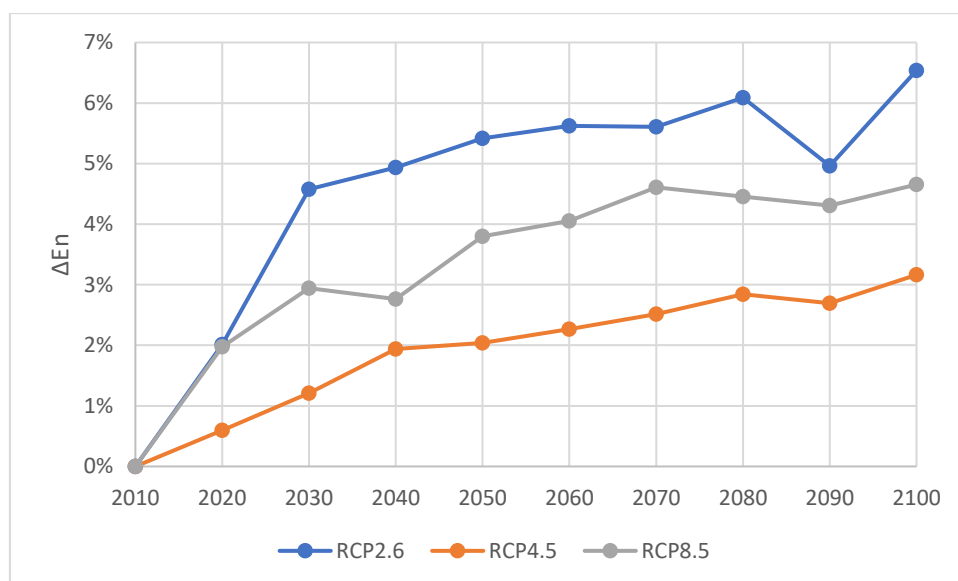
9. ábra. Veszprém éves horizontális sugárzás 2010-es bázisévhez viszonyított idősorai, RCP forgatókönyvekként

*Forrás: saját szerkesztés*



10. ábra. Veszprém éves átlaghőmérséklet 2010-es bázisévhez viszonyított idősorai, RCP forgatókönyvekként

*Forrás: saját szerkesztés*



11. ábra. Veszprém éves energiatermelés 2010-es bázisévhez viszonyított idősorai, RCP forgatókönyveként

Forrás: saját szerkesztés

### A napelemes rendszer villamosenergia-termelés hatásfok változása

A hatásfok változást jól érzékelteti a egységnyi sugárzás változására mekkora teljesítmény változás esik, ehhez érdemes megvizsgálni a teljesítmény változás és a globális horizontális sugárzás változás hányadosát. (7. táblázat)

7. táblázat. A teljesítmény változás és a globális horizontális sugárzás változás aránya

		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Miskolc	2050	0,972	0,646	0,901
	2100	0,992	0,784	0,725
Sopron	2050	0,956	0,756	0,810
	2100	0,919	0,775	0,678
Veszprém	2050	1,058	0,753	0,970
	2100	1,206	0,700	0,736

Forrás: saját szerkesztés

Az egyes eredmény cellákban lévő értékek az mutatják, hogy a 2010-es bázisévhez képest egy egységnyi sugárzás növekedés mekkora változást hozott a teljesítményben. Az 1-nél kisebb érték romló, míg az 1-nél nagyobb érték javuló hatásfokot jelent az energiatermelésben 2010-es bázis évhez viszonyítva.

### Következtetések, javaslatok

A napelemes rendszerek villamosenergia-termelésének hatásfokát jelentősen befolyásolják a vizsgált különböző éghajlati forgatókönyvek (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5).

Az eredmények alapján az RCP2.6 forgatókönyv – amely alacsonyabb kibocsátásokkal és mérsékelt éghajlati változásokat vetít előre – kedvezőbb teljesítményváltozási arányokat eredményez,

azaz a napelemes rendszerek hatékonyabban hasznosítják a megnövekedett napsugárzást. Például 2050-re és 2100-ra az arányok több esetben meghaladják az 1,0 értéket, ami azt jelzi, hogy a teljesítményváltozás értéke meghaladja az ugyan arra az időszakra vett sugárzásváltozás értékét.

Ezzel szemben az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek – amelyek nagyobb kibocsátásokat és szélsőségesebb éghajlati változásokat vetítenek előre – alacsonyabb teljesítményváltozási arányokat mutatnak. Ezek a teljesítményváltozások jelentősen elmaradnak a sugárzásváltozás mértékétől, különösen a század végére. Ez azt jelzi, hogy a klímaváltozás szélsőségesebb hatásai a napelemes rendszerek hatásfokának romlásával járnak. Területi eltérések is megfigyelhetők: míg Veszprém térsége kedvezőbb kilátásokkal rendelkezik, addig Miskolc és Sopron esetén a hatásfok csökkenése idővel markánsabbá válik.

A forgatókönyvek közötti különbségek rávilágítanak arra, hogy a jövőbeli napelemes rendszerek hatásfoka szoros összefüggésben áll az éghajlatváltozás intenzitásával, amely azonban jelenleg nem megjósolható. Éppen ezért kiemelten fontos a technológiai fejlesztések ösztönzése, amelyek lehetővé teszik, hogy a napelemek a változó környezeti viszonyok között is hatékonyan működjenek, függetlenül attól, hogy melyik forgatókönyv valósul meg. Az eredmények hangsúlyozzák a napelemes rendszerek rugalmasságának növelését célzó innovációk jelentőségét, hogy hosszú távon is fenntartható és versenyképes energiaforrást jelentsenek.

## Hivatkozott források

- Bozsik, N. – Szeberényi, A. – Bozsik, N. (2024a): Impact of Climate Change on Electric Energy Production from Medium-Size Photovoltaic Module Systems Based on RCP Climate Scenarios. *Energies*, 17(16), 4009. <https://doi.org/10.3390/en17164009>
- Bozsik, N. – Szeberényi, A. – Bozsik, N. (2024b): Impact of Climate Change on the Performance of Household-Scale Photovoltaic Systems, *Hightech and Innovation Journal*, 5(1), 1–15. <https://doi.org/10.28991/HIJ-2024-05-01-01>
- Eurostat (2025): Complete energy balances, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG\\_BAL\\_C\\_\\_custom\\_14825795/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_C__custom_14825795/default/table?lang=en), in: [https://doi.org/10.2908/NRG\\_BAL\\_C](https://doi.org/10.2908/NRG_BAL_C)
- He, T. – Wang, D. – Qu, Y. (2018): 5.06 - Land Surface Albedo, Editor(s): Shunlin Liang, *Comprehensive Remote Sensing*, 5, 140–162, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10370-7>
- Hollósy, Zs. – Poór, J. – Tóth, J. (2019): „Háztartási méretű kiserőművek: Napelemes rendszerek gazdaságossági vizsgálata”. *Studia Mundi – Economica*, 6(1) 22–33. <https://doi.org/10.18531/Studia.Mundi.2019.06.01.22-33>
- IEA (2022): Hungary reports, <https://www.iea.org/reports/hungary-2022/executive-summary>
- Jackson, N. D. – Gunda, T (2021): Evaluation of extreme weather impacts on utility-scale photovoltaic plant performance in the United States. *Applied Energy*, 302, 117508. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117508>
- Markvart, T. – Castañer, L. (2018): Chapter I-1-A - Principles of Solar Cell Operation. In: Soteris A. Kalogirou (ed.) *McEvoy's Handbook of Photovoltaics* (Third Edition), Academic Press, 2018, 3–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00001-X>
- Meinshausen, M. – Smith, S. J. – Calvin, K. et al. (2011): The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109, 213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>



- Meloun, M. – Militký, J. (2011): 7-Correlation. In: *Statistical Data Analysis*. India: Woodhead Publishing, 631–666, <https://doi.org/10.1533/9780857097200.631>
- Mester, M. A. (2015): A globális klímaváltozás becslésére készült új RCP kibocsátási scenáriók összehasonlítása, Budapest: ELTE. [https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/2015/Mester-MateAttila\\_2015.pdf](https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/2015/Mester-MateAttila_2015.pdf)
- Meteonorm 8 (2021): Handbook part II: Theory, [https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81\\_theory.pdf](https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81_theory.pdf)
- Nakicenovic, N. – Alcamo, J. – Davis, G. et al. (2000): Special Report on Emissions Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 599 p.
- Perez, R. - Ineichen, P. - Seals, R. - Michalsky, J. – Stewart, R. (1990): Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- RCP (2009): RCP database version 2.0.5, <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=html-page&page=compare>
- RCP (2023): Representative Concentration Pathways Database, <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/rcp>
- Ready, J. F. (1997): Chapter 6 – Care and Maintenance of Lasers. In: Ready, J. F. (ed.): *Industrial Applications of Lasers* (Second Edition), Academic Press, 193–214. <https://doi.org/10.1016/B978-012583961-7/50008-9>
- Sarofim, M.C. – Smith, C.J. – Malek, P. et al. (2024): High radiative forcing climate scenario relevance analyzed with a ten-million-member ensemble. *Nat Commun* 15, 8185. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52437-9>
- Schulte-Uebbing, L. – Hansen, G. – Hernández, A. M. – Winter, M. (2015): Chapter scientists in the IPCC AR5—experience and lessons learned. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.012>
- Shahzad, U. (2022): „Analysis of Solar System Models Using System Advisor Model Simulations” 9 (2022. szeptember 21.): 23–32., [https://www.researchgate.net/publication/363700701\\_Analysis\\_of\\_Solar\\_System\\_Models\\_Using\\_System\\_Advisor\\_Model\\_Simulations](https://www.researchgate.net/publication/363700701_Analysis_of_Solar_System_Models_Using_System_Advisor_Model_Simulations)
- Sheik, M. S. – Kakati, P. – Dandotiya, D. – Ravi M., R. – Ramesh, C. S. (2022): A comprehensive review on various cooling techniques to decrease an operating temperature of solar photovoltaic panels. *Energy Nexus*, 8, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100161>
- Smith, C. – Crook, R. – Forster, P. (2015): Changes in solar PV output due to water vapour loading in a future climate scenario. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-5BV.1.30>
- Taylor, R. (1990): Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *J. Diagn. Med. Sonogr.*, 6(1), 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
- van Vuuren, D.P. – Edmonds, J. – Kainuma, M. et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

## Szerző(k)

### **Bozsik Nándor**

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6798-3844>

PhD hallgató

Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola

E-mail: [bozsik.nandor@uni-obuda.hu](mailto:bozsik.nandor@uni-obuda.hu)

### **Takács István**

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0847-3844>

PhD

egyetemi tanár

Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar, Gazdaság- és Társadalomtudományi Intézet

E-mail: [takacs.istvan@kgk.uni-obuda.hu](mailto:takacs.istvan@kgk.uni-obuda.hu)

*This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. /*

*A műre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik:*

[CC-BY-NC-ND-4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

