



A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál változásának várható trendjei a XXI. században, globális éghajlati modellek szimulációs eredményei alapján

Kristóf Erzsébet, Kalmár Tímea

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, ekristof86@staff.elte.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.1.3

Az elmúlt évtizedben a naperőművek beépített teljesítménye világszerte jelentősen bővült, a növekedés pedig várhatóan a jövőben is folytatódni fog. A napenergiából előállítható villamosenergia mennyisége azonban jelentősen függ a meteorológiai viszonyoktól, ezért a globális napenergia-potenciál – éghajlatváltozás hatására bekövetkező – jövőbeli változásának számszerűsítése a klimatológiai kutatások népszerű témaköre. Az alábbiakban a napenergia-potenciál XXI. század végéig várható változásainak szakirodalmi áttekintésére kerül sor, globális éghajlati modellek szimulációs eredményei alapján.

Trends in photovoltaic power potential changes in the 21st century based on general circulation model simulations

Over the past decade, the installed capacity of solar power plants has increased significantly worldwide, and this growth is expected to continue in the future. However, the amount of electricity generated from solar energy largely depends on meteorological conditions. Consequently, quantifying future changes in photovoltaic power output due to climate change has become a popular topic in climatological research. This paper provides an overview of projected changes in photovoltaic power output by the end of the 21st century, based on simulation results from general circulation models.

A fosszilis tüzelőanyagok drágulása és a forrásaik kimerülése miatt, illetve a klímavédelmi célok elérése érdekében egyre fontosabbá válik a megújuló energiaforrásokból származó energia (Holeček *et al.*, 2022). Globálisan a legnagyobb mennyiségben rendelkezésre álló megújuló energiaforrás a napenergia, amely a Föld minden térségében kiaknázzható valamilyen mértékben, még a pólusok felett is (Edenhofer *et al.*, 2012; Frimannslund *et al.*, 2021).

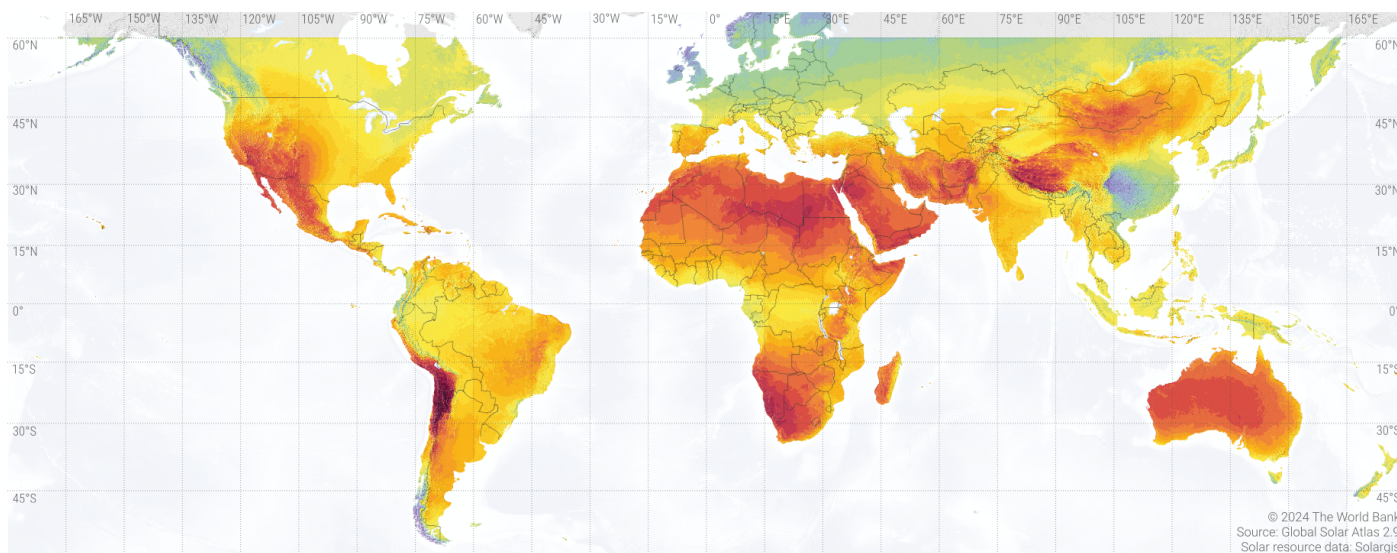
A napenergia-potenciál jövőbeli változásainak becslése széleskörű szakirodalommal rendelkezik világszerte. A potenciál azonban többféleképpen értelmezhető. Nagyság szerint csökkenő sorrendben megkülönböztethető például a napenergia elméleti, műszaki és gazdasági potenciálja, amelyek meghatározása az energiatervezés alapeleme (Brown *et al.*, 2016; Munkácsy, 2018). Tanulmányunk középpont-

SOLAR RESOURCE MAP

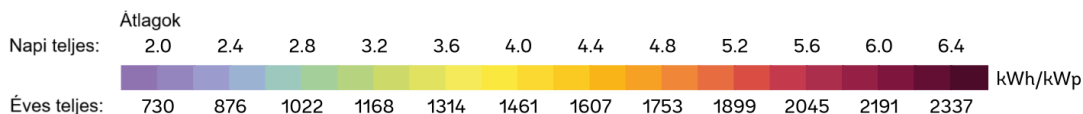
FOTOVOLTAIKUS VILLAMOSENERGIA-POTENCIÁL



WORLD BANK GROUP



© 2024 The World Bank
Source: Global Solar Atlas 2.9
Solar resource data: Solargis



1. ábra. A fotovoltaikus villamosenergia-potenciált jellemző fajlagos hozam értékek [kWh/kWp] a szárazföldrök felett, az é. sz. 60° és a d. sz. 60° közötti térségben [1].

jában a Nap villamosenergiatermelő-képességének műszaki potenciálja áll, méghozzá a napelem rendszerek potenciáljának, azaz a fotovoltaikus (photo voltaic, PV) villamosenergia-potenciál (a továbbiakban: PV_{pot}) becslése. Ennek keretében a XXI. századra vonatkozó, legfontosabb szakirodalmi megállapításokat foglaljuk össze, amelyek általános cirkulációs modellek, más néven globális éghajlati modellek (General Circulation Models, GCM-ek) szimulációs eredményein alapulnak. Kézenfekvőnek tűnhet a GCM-ek helyett a finomabb felbontású, regionális éghajlati modellek (Regional Climate Models, RCM-ek) szimulációs eredményeinek elemzése. Azonban a GCM-hibák átöröklődhetnek a GCM szimulációs eredményeinek dinamikus leskálázása során a durvább felbontású rácsról a finomabb felbontású rácsra (Sørland et al., 2018). Célszerű ezért a GCM-ek futtatási eredményeiből meghatározott trendeket, tendenciákat vizsgálni.

A tanulmányunkban a GCM-projekciókból meghatározott, a PV_{pot} értékében várható változások globális trendjeinek összefoglalására kerül sor az elmúlt néhány évben szakfolyóiratokban publikált tanulmányok alapján.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál földrajzi eloszlása

A napenergia a legnagyobb mennyiségben a trópusok mentén áll rendelkezésre (1. ábra).

Magyarországon a napenergia fajlagos hozama évente átlagosan 1050 és 1250 kWh/kWp között változik (Pintér et al., 2020), azaz egy 1 kW csúcs teljesítményű [kWp] napelem rendszer, egy év alatt átlagosan 1050–1250 kWh (3780–4500 MJ) elektromos munkát végez. Hazánk közepes fajlagos hozamú országnak tekinthető, míg globálisan a legjobb adottságú területeket 2000 kWh/kWp feletti értékek jellemzik. Érdekes megfigyelni a fajlagos hozam területi eloszlásának eltéréseit Kína északnyugati és délkeleti régiói között (1. ábra). Az elmúlt években Kínában hajtották végre a legnagyobb, napenergiához kapcsolódó fejlesztéseket (REN21, 2024). Az északnyugati térségben a besugárzás azonban jelentősen nagyobb a délkeleti területekéhez képest, az utóbbi területekre vonatkozó értékek inkább a magasabb földrajzi szélességekre jellemzők. Ez nagyrészt a két régió eltérő tengerszint feletti magasságával és felhőborítottságával

magyarázható (Li et al., 2017). A besugárzást módosítja az aeroszolkoncentráció is (Streets et al., 2006), így a szálló por növekvő koncentrációja csökkentheti a villamosenergia termelésére hasznosítható napenergia mennyiségét, amely kimutatható például Kína keleti, sűrűn lakott területein (Li et al., 2017).

GCM-generációk

Napjainkban a legmodernebb GCM-ek szimulációs eredményei a Csatolt Modelleket Összehasonlító Projekt (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) keretében érhetők el. A projekt legutóbbi, egymást követő fázisaiban – a 2000-es években a harmadik fázisában (CMIP3; Meehl et al., 2007), a 2010-es években az ötödik fázisában (CMIP5; Taylor et al., 2012), majd a hatodik fázisában (CMIP6; Eyring et al., 2016) – mind több, illetve nagyobb tér- és időbeli felbontású, az éghajlati rendszer folyamatait egyre komplexebb módon leíró GCM szimulációs eredményeit tették közzé a meteorológiai állapothatározók bővülő körére, kutatási célokra szabadon felhasználható módon. Napjainkban a GCM-ek megfelelő felbontással rendelkeznek a szubkontinentális léptékű PV_{pot} -becsléshez (pl. Dutta et al., 2022), habár a domborzat kevésbé részletes leírása miatt korlátozottan alkalmasak a hegységek mentén jellemző PV_{pot} -értékek valóságghú visszaadására (Ha et al., 2023).

A GCM-ekkel folytatott vizsgálatok fontos lépése a validáció (Gleckler et al., 2008), vagyis a GCM-ek szimulációs eredményeiből meghatározott trendek összehasonlítása a megfigyelésekkel. A validációhoz referenciaként mérési és reanalízis adatbázisok alkalmazhatóak. A reanalízisek adatait a múltbeli földfelszíni és magaslégköri mérésekből, illetve rövidtávú időjárás-előrejelzésekből asszimilálják, légköri általános cirkulációs modell (Atmospheric General Circulation Models, AGCM) meghajtásával. A reanalíziseket – bár modellezett értékekből állnak – számos kutatásban a valóság megbízható leképezéseként kezelik (Stryhal and Huth, 2017).

Alternatív jövőképeken, ún. társadalmi-gazdasági forgatókönyveken (Special Report on Emission Scenarios, SRES; Nakicenovic et al., 2000) alapuló, jövőre vonatkozó modellszimulációkat először a CMIP3 keretében végeztek. A CMIP5 és CMIP6 GCM-ek jövőre vonatkozó szimulációi a légköri CO₂-koncentráció sugárzási kényszerét leíró scenáriókra épülnek, még hozzá a CMIP5 modelljei esetén a reprezentatív koncentráció pályákat leíró (Representative Concentration Pathways, RCP; Moss et al., 2010) forgatókönyveket,

míg a CMIP6 modelljei esetén a megosztott társadalmi-gazdasági pályákat leíró (Shared Socioeconomic Pathways, SSP; O'Neill et al., 2016) forgatókönyveket alkalmazzák. A scenáriók között az antropogén eredetű üvegházhatású gázok kibocsátását csökkentő célok elérését illetően optimistább (pl. a SRES B2) és pesszimistább (pl. a SRES A1B) forgatókönyvek is megtalálhatók. A továbbiakban az RCP2.6 és az SSP1-2.6, az RCP4.5 és az SSP2-4.5, valamint az RCP8.5 és az SSP5-8.5 scenáriókat rendre optimista, közepes kibocsátást feleltető és pesszimista forgatókönyveknek nevezzük.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál meghatározása

Az áttekintett tanulmányok a világviszonylatban legelterjedtebb monokristályos napelem cellák (Ha et al., 2023) fotovoltaikus villamosenergia potenciálját (PV_{pot}) az (1) formulával határozzák meg (Mavromataki et al., 2010). Ez a formula lehetővé teszi a PV_{pot} környezeti állapothatározóktól való függésének elemzését is:

$$PV_{pot} = P_R \frac{I}{I_{STC}}, \quad (1)$$

ahol PV_{pot} mértékegység nélküli mérőszám, azaz nem teljesítményt fejez ki közvetlenül, hanem egy relatív potenciált. Az I a Napból a földfelszínre irányuló rövidhullámú sugárzás tényleges energia áramsűrűsége (besugárzás) [Wm^{-2}], míg I_{STC} a napelem cellát érő sugárzás áramsűrűsége az ideális, ún. Standard Teszt Körülmények (Standard Test Conditions, STC) között ($1000 Wm^{-2}$). Ez azt jelenti, hogy a napelem cella hőmérséklete $25\text{ }^{\circ}C$, a napelem cellát érő besugárzás áramsűrűsége pedig $1000 Wm^{-2}$ AM1,5 légtömeg-spektrum, azaz $41,81^{\circ}$ -os napmagasság mellett (lásd pl. Matusz-Kalász, 2023). A P_R dimenziótlan teljesítményarány a (2) formulával számolható ki:

$$P_R = 1 - \gamma (T_{cell} - T_{STC}), \quad (2)$$

ahol T_{cell} a napelem cella tényleges hőmérséklete, míg T_{STC} a napelem cella STC szerinti hőmérséklete ($25\text{ }^{\circ}C$). A γ a hőmérsékleti hatékonysági tényező (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007), melynek értéke a monokristályos szilícium napelemre $0,005\text{ }^{\circ}C^{-1}$ (pl. Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022; Ha et al., 2023).

A T_{cell} értéke a (3) formulával számítható ki:

$$T_{cell} = c_1 + c_2 T + c_3 I - c_4 v, \quad (3)$$

azaz a T_{cell} függ az I besugárzástól, a T léghőmérséklet-től [$^{\circ}C$] és a v szélsebességtől [$m\text{ }s^{-1}$]. A monokristályos

Tanulmány	Vizsgált GCM-ek száma	Referencia adatbázis	Referencia időszak	Vizsgált jövőbeli időszak	Vizsgált térség	Vizsgált forgatókönyvek
Crook et al. (2011)	2 (CMIP3)	-	1980-1999	2010-2080	globális	SRES A1B
Goetani et al. (2014)	1 (CMIP3)	-	1996-2005	2000-2030	Európa, Afrika	SRES B2
Feron et al. (2021)	7 (CMIP5)	ERA-Interim reanalízis	1961-1990 1971-2000	2036-2065	globális	RCP4.5, RCP8.5
Dutta et al. (2022)	5 (CMIP6)	ERA5 reanalízis	1981-2014	2015-2040 2041-2100	globális	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5
Ha et al. (2023)	7 (CMIP5) 7 (CMIP6)	ERA5 reanalízis	1971-2005 (GCM) 1979-2008 (ERA5)	2071-2100	globális	RCP2.6, SSP1-2.6, RCP8.5, SSP5-8.5
Niu et al. (2023)	7 (CMIP6)	mérési adatok	1980-1999	2023-2100	Kína	SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP5-8.5

1. táblázat. A jövőbeli fotovoltaikus villamosenergia-potenciált (PV_{pot}) a 4. fejezetben leírt összefüggések alapján becsült tanulmányok, a tanulmányokban vizsgált GCM-ek száma, a referencia adatbázis, a vizsgált időszakok és térségek, továbbá a GCM-ek szimulációs eredményei alapjául szolgáló forgatókönyvek megnevezése.

szilícium napelem cellákra az együtthatók értékei $c_1 = 3,9^\circ\text{C}$, $c_2 = 0,942$, $c_3 = 0,028 \text{ m}^2\text{CW}^{-1}$ és $c_4 = 1,509 \text{ }^\circ\text{Csm}^{-1}$ (TamizhMani et al., 2003).

Az (1)-(3) formulák alapján tehát az alábbi összefüggések állapíthatók meg a PV_{pot} és a légköri állapot-határozók között. A PV_{pot} értéke annál nagyobb, minél nagyobb az I besugárzás és a P_R teljesítményarány. Az I értékét a csökkenő felhőborítottság és a csökkenő aeroszolkoncentráció növeli. A P_R értéke maximális, ha T_{cell} a T_{STC} értékével, azaz 25°C -kal egyenlő. A P_R értéke tehát csökkenthet az I értékének növekedése mellett akkor, ha T_{cell} értéke egyre inkább eltér 25°C -tól. A ν növekedésével ugyanakkor csökken a T_{cell} értéke, amely a T az I , valamint a ν környezeti állapot-határozókon kívül a relatív nedvesség [%] értékétől is függ. Utóbbi hatását azonban gyakorta figyelmen kívül hagyják a számítások során (pl. Dutta et al., 2022, Feron et al., 2021, Jerez et al., 2015).

Összefoglalóan, a besugárzás növekedésével – így a nappalok hosszának növekedésével, valamint a felhőborítottság és az aeroszolkoncentráció, a természetes és antropogén eredetű szálló por koncentrációjának csökkenésével – nő a monokristályos napelem cella villamosenergia-termelő képessége. A növekvő léghőmérséklettel azonban nő a napelem cella hőmérséklete, amely csökkentheti annak teljesítményét. A szél viszont hűti a napelem cellát, tehát pozitívan hathat az energiatermelésre, növelve a PV_{pot} értékét.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál globális trendjei

Az alábbiakban az 1. táblázatban felsorolt tanulmányokban meghatározott PV_{pot} -trendeket összegezzük kontinensenként, azon régiókat és évszakokat megnevezve, amelyekben a legjelentősebb változások várhatók. A GCM-ek magasabb földrajzi szélességekre vonatkozó szimulációs eredményei kevésbé megbízhatók (Dutta et al., 2022), ezért a sarkkörön túli térségeket kihagytuk az elemzésből.

Az áttekintett tanulmányok szerzői között konszenzus van arról, hogy a GCM-ek megfelelőek a PV_{pot} várható változásainak becsülésére, területi és időbeli eloszlásának vizsgálatára. A bemutatott vizsgálatok eltérnek a kiválasztott GCM-szimulációkat, illetve a vizsgálati időszakokat illetően (1. táblázat), ezért az ezekben meghatározott PV_{pot} számértékek kevésbé vethetők össze. A GCM-ek együttese, azaz GCM-ensemble alapján kimutatott trendek azonban meggyőzőek (pl. Feron et al., 2021), így a tanulmányok általában egyetértenek a kontinensek PV_{pot} -trendjeit illetően.

Európa

A XXI. század közepére általában a PV_{pot} növekedése várható egész évben Európa jelentős részén, mindhárom forgatókönyv szerint (Dutta et al., 2022). A közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján a legjelentősebb, akár 5%-ot elérő növekedésre nyáron,

Közép-Európában számíthatunk (Feron et al., 2021). Magyarországon is hasonló mértékű növekedés várható. A PV_{pot} növekedése – a tavasz kivételével – valószínűleg a csökkenő felhőborítottság következménye (Dutta et al. 2022). Közép-Európában, nyáron a PV_{pot} növekedése a várhatóan csökkenő felhőborítottság mellett a csökkenő aeroszolkoncentrációval is magyarázható (Gaetani et al., 2014; Gutiérrez et al., 2020), amelyek felülmúlhatják a léghőmérséklet emelkedésének PV_{pot} -csökkentő hatását (Feron et al., 2021; Ha et al., 2023). Tavasszal pedig a PV_{pot} növekedése a relatív nedvesség várható csökkenésével együtt növekvő besugárzás következménye lehet (Dutta et al. 2022). Az Európa déli és nyugati területein a nyári és koraőszi hónapokra becsült PV_{pot} -növekedés háttérében a várhatóan erősödő Hadley-cirkuláció áll, amely felhőoszlató hatású (Gaetani et al., 2014). Az előbb felsorolt, várható változások összhangban vannak Bartók és mtsai (2017) megállapításaival, akik CMIP5 GCM-ek szimulációs eredményeiből kimutatták, hogy a XXI. század folyamán, különösen tavasszal és nyáron a besugárzás növekedése és a felhőborítottság csökkenése várható Európában. A besugárzás növekedése a mérési adat sorokban is kimutatható az 1980-as évektől (Sanchez-Lorenzo et al., 2015). Érdekes azonban kiemelni, hogy a GCM-ek a validációs vizsgálatuk alapján felülbecsülték a globálsugárzást és alulbecsülték a felhőborítottságot (Bartók et al., 2017).

Télen Európában kevésbé számíthatunk jelentős változásokra, amelyek irányát illetően sincs teljes konszenzus. Dutta és mtsai (2022) a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) csökkenését mutatták ki a három forgatókönyv alapján, míg Feron és mtsai (2021) a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) növekedésére következtettek. Észak-Európában a PV_{pot} jelentősebb csökkenésére számíthatunk a felhőborítottság várható növekedésével, ami különösen markáns lesz azokban a hónapokban, amikor a tengeri jég a legnagyobb ütemben olvad (Feron et al., 2021).

A XXI. század végi becslések alapján tavasszal, nyáron és ősszel Európa sarkkörűl délebbre eső területein a PV_{pot} növekedésére számíthatunk, aminek mértéke Közép-Európában elérheti a 6–8%-ot is. Télen azonban forgatókönyvenként jelentősen eltérők a becslések: a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) növekedése vagy változatlansága várható az optimista forgatókönyv esetén, a PV_{pot} változatlansága vagy kismértékű (2% körüli) csökkenésére számíthatunk a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján, valamint a PV_{pot} jelentősebb (akár 8–10%-os) csökkenése várható a pesszimista forgatókönyvet feltételezve (Dutta et al., 2022).

Ázsia

A XXI. század közepére Ázsiában, az európai trendekkel ellentétben, ősszel és télen várhatók a legjelentősebb változások. India vonatkozásában az áttekintett tanulmányokban becsült PV_{pot} -trendek irányai azonosnak mutatkoznak. Kína esetében a CMIP5 és CMIP6 modell-együttesek szimulációs eredményei árnyalják Crook és mtsai (2011) korábbi, CMIP3 modellgeneráció alapján tett megállapításait, miszerint Kínában általánosan a PV_{pot} növekedésére számíthatunk 2010 és 2080 között. Kínában egyidejűleg eltérő trendek valószínűsíthetők: míg az északnyugati területein várhatóan csökken, addig a délkeleti területein előreláthatólag növekszik a PV_{pot} (Dutta et al., 2022). Kína északnyugati régiójában és Indiában a PV_{pot} – forgatókönyvtől függően akár 5-10%-os – projektált csökkenése a Himalája térsége, India és Kína fölött a felhőborítottság várható növekedésével, így a besugárzás csökkenésével hozható összefüggésbe (Dutta et al., 2022). Ugyanakkor Niu és mtsai (2023) kimutatták, hogy Kína északnyugati területein, a Tibeti-fennsíkon, a felhőborítottság csökkenésére számíthatunk. A becsült PV_{pot} -csökkenés, tehát a nagymértékű antropogén eredetű kibocsátással, az aeroszolkoncentráció növekedésével és a hőmérséklet emelkedésével állhat kapcsolatban. Tavasszal és nyáron Dutta és mtsai (2022) mutattak ki hasonlóan jelentős mértékű csökkenést Kína északnyugati régióiban, ugyanakkor Ázsia más térségeiben kisebb mértékű (+/-2% körüli) változásokra számíthatunk. Kína délkeleti részein és Délkelet-Ázsiában a PV_{pot} csekély (2% körüli) növekedése, Közép-Ázsiában pedig ugyanekkora mértékű csökkenése projektálható a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv szerint (Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022).

A XXI. század végére becsült PV_{pot} -trendek, Európához hasonlóan, a választott scenáriótól függenek. Ázsia közepes földrajzi szélességi körökre eső területei, valamint az indiai szubkontinens fölött az optimista forgatókönyv alapján a PV_{pot} növekedésére, míg a pesszimista forgatókönyv alapján a PV_{pot} csökkenésére számíthatunk (Dutta et al., 2022).

Afrika és az Arab-félsziget

A XXI. század közepéig Afrika területének nagy részén minden évszakban a PV_{pot} kismértékű (+/-3% körüli) változásait vetítették előre (Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022). Az északi félgömb nyarán várható változások területi eloszlását illetően azonban nincs konszenzus az áttekintett tanulmányok között. Dutta és mtsai (2022) a PV_{pot} 8–10%-os csökkenését mutatták

ki a Kongói-medencétől délre eső, Atlanti-óceánhoz közeli területeken, míg *Feron* és *mtsai* (2021) tanulmánya szerint Afrika egyenlítői térségének keleti részén számíthatunk 3%-ot meghaladó PV_{pot} -csökkenésre a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyvek alapján. Konszenzus van azonban arról, hogy nyáron Észak-Afrikában a PV_{pot} csökkenése várható (*Gaetani et al.*, 2014; *Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022), ami kapcsolatban állhat a Hadley-cirkuláció globális felmelegedés hatására történő, a pólusok felé irányuló kiszélesedésével (*Hu and Fu*, 2007), így a felhőborítottság növekedésével (*Gaetani et al.*, 2014). *Dutta* és *mtsai* (2022) továbbá kimutatták, hogy Afrika keleti és északi térségében a téli hónapokban és márciusban a növekvő felhőborítottság okozhatja a PV_{pot} várható visszaesését.

A XXI. század végére Afrikában, forgatókönyvenként jelentősen eltérő PV_{pot} -becslések adhatók minden évszakban. Míg az optimista forgatókönyv esetén minden évszakban a XXI. század közepéhez hasonló trendek adódtak, a pesszimista scenárió alapján a PV_{pot} értéke szinte Afrika egész területén várhatóan csökkenni fog, amelynek mértéke elérheti a 10%-ot (*Dutta et al.*, 2022). Az Afrikára, különösen a Száhel-övezetre vonatkozó PV_{pot} -becslések azonban jelentős bizonytalansággal terhelték, amelyek a felhőborítottság becslésének bizonytalanságából eredeztethetők (*Feron et al.*, 2021).

A XXI. század folyamán az Arab-félszigeten, ősszel és nyáron a PV_{pot} csekély mértékű (2-4% körüli) csökkenése várható, aminek háttérében a hőhullámok gyakoribbá válása és a felhőborítottság változékonyságának növekedése állhat (*Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022).

Amerika

Észak-Amerikában a XXI. század közepére és végére várható PV_{pot} -trendek hasonlóak. Észak-Amerika nyugati és a keleti partjának térségében azonban ellentétes PV_{pot} -trendek figyelhetők meg. A XXI. század közepéig minden évszakban és mindhárom scenárió szerint a PV_{pot} kismértékű (4-5% körüli) csökkenésére számíthatunk a nyugati part felett, míg a PV_{pot} csekély (2% körüli) növekedése várható a keleti part felett (*Crook et al.*, 2011; *Dutta et al.*, 2022). Utóbbi régióban a becsült PV_{pot} -növekedés területi kiterjedése tavasszal a legnagyobb, majd ez a terület a nyár és az ősz folyamán csökken. A PV_{pot} nyugati parti csökkenése a felhőborítottság növekedésével magyarázható, azonban a keleti parti PV_{pot} -növekedés és a felhőborítottság változása között nem mutattak ki szignifikáns kapcsolatot. Télen pedig az előrevetített felhőborítottság-növekedés ellenére sem mutattak ki szignifikáns változást a PV_{pot} értékeiben (*Dutta et al.*, 2022).

Dél-Amerikában – az eddig áttekintett kontinensekhez képest – kisebb mértékű PV_{pot} -változásokra számíthatunk. A XXI. század közepéig Dél-Amerika szubtrópusi térségében a PV_{pot} csekély (2-4% körüli) növekedése várható a déli félgömb téli hónapjai kivételével, mindhárom forgatókönyv alapján (*Dutta et al.*, 2022). A PV_{pot} várhatóan kismértékű (3% körüli) növekedése a déli félgömb nyáron az Atacama-sivatagban is kimutatható, a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján (*Feron et al.*, 2021). A déli félgömb telén szignifikáns PV_{pot} -változás azonban nem detektálható (*Dutta et al.*, 2022). Érdemes kiemelni, hogy *Dutta* és *mtsai* (2022) a felhőborítottság csökkenése és a PV_{pot} növekedése közötti kapcsolatot csak a déli félgömb őszen tudták kimutatni, a többi évszakban nem. *Ha* és *mtsai* (2023) megállapították, hogy Dél-Amerikában azért nem nő a PV_{pot} értéke a besugárzás mértékéhez hasonlóan, mert a lég-hőmérséklet emelkedésének PV_{pot} -csökkentő hatása ellensúlyozza a besugárzás PV_{pot} -növelő hatását.

A XXI. század végére Dél-Amerikában a PV_{pot} növekedése projektálható, amelynek mértéke a déli félgömb tavaszán és nyáron nagyobb, mint a déli félgömb telén. Ennek okaként a besugárzás várható növekedését és a felhőborítottság feltételezhető csökkenését nevezte meg (*Dutta et al.*, 2022).

Ausztrália

A XXI. század közepére Ausztráliában általában csekély mértékű változások várhatók. A PV_{pot} értékének kismértékű (2-4% körüli) növekedésére számíthatunk a déli félgömb nyáron és őszen, például Ausztrália északnyugati térségében, míg hasonló mértékű (2%-nál kisebb) csökkenés várható a déli félgömb telén és tavaszán, például Ausztrália délkeleti régióiban (*Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022). *Dutta* és *mtsai* (2022) kimutatták, hogy a déli félgömb őszeré előrevetített PV_{pot} növekedés kapcsolatba hozható a felhőborítottság csökkenésével.

A XXI. század végére a PV_{pot} kismértékű csökkenése várható a déli félgömb tavaszán, nyáron és őszen, amely azonban nem magyarázható a besugárzás csökkenésével vagy a felhőborítottság növekedésével (*Dutta et al.*, 2022).

Konklúzió

A tanulmányunkban a PV_{pot} XXI. század végéig várható változásainak szakirodalmi áttekintését végeztük el GCM-ek szimulációs eredményei alapján, amelyek szerint az alábbi megállapítások tehetők.

A PV_{pot} változásai a környezeti állapotváltozók, így a léghőmérséklet, a felhőborítottság, az aeroszol-koncentráció, a szélesebb és a relatív nedvesség várható változásaival magyarázhatók, azonban ezek térségenként és évszakonként eltérő mértékben befolyásolhatják a PV_{pot} értékét, egymás hatását felerősíthetik vagy csökkenthetik. A PV_{pot} értékek azonban a napelem-technológia fejlődésével is módosulhatnak, ezért időről-időre való újraszámításuk elengedhetetlen.

A XXI. század közepére vonatkozóan a különböző forgatókönyvek többnyire megegyeznek a PV_{pot} változásának irányát illetően, míg a XXI. század végéhez közeledve egyre inkább eltérnek egymástól. A PV_{pot} értékeiben bekövetkező, látszólag kismértékű, pár százalékos változások is nagy jelentőséggel bírhatnak, többek között jelentősen növelhetik vagy csökkenthetik adott térségben a napenergia hasznosítására alkalmas napok számát (Feron et al., 2021).

Az áttekintett tanulmányok alapján kiemelhető legjelentősebb PV_{pot} -változások a XXI. század folyamán a következők: Közép-Európában a PV_{pot} várhatóan növekszik nyáron, míg Kína északnyugati területén és India térségében a csökkenése várható ősszel és télen. Afrikában és Észak-Amerika nyugati partjának térségében a PV_{pot} csökkenésére számíthatunk, míg Észak-Amerika keleti partjának térségében, Dél-Amerikában és Ausztráliában inkább a PV_{pot} növekedése valószínűsíthető.

Irodalomjegyzék

- Bartók, B., Wild, M., Folini, D., Lüthi, D., Kotlarski, S., Schär, C., Vautard, R., Jerez, S. and Imecs, Z., 2017: Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. *Clim. Dyn.* 49, 2665–2683. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3471-2>
- Brown, A., Beiter, P., Heimiller, D., Davidson, C., Denholm, P., Melius, J., Lopez, A., Hetteringer, D., Mulcahy, D., and Porro, G., 2016: Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States: Methodology and Initial Results (No. NREL/TP-6A20-64503). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64503.pdf>
- Crook, J.A., Jones, L.A., Forster, P.M., and Crook, R., 2011: Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ. Sci.*, 4, 3101–3109. <https://doi.org/10.1039/C1EE01495A>
- Dutta, R., Chanda, K., and Maity, R., 2022: Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis. *Renew. Energy* 188, 819–829. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.023>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C., and Matschoss, P. eds., 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feron, S., Cordero, R.R., Damiani, A., and Jackson, R.B., 2021: Climate change extremes and photovoltaic power output. *Nat. Sustain.* 4, 270–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00643-w>
- Frimannslund, I., Thiis, T., Aalberg, A., and Thorud, B., 2021: Polar solar power plants—Investigating the potential and the design challenges. *Sol. Energy*, 224, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.069>
- Gaetani, M., Huld, T., Vignati, E., Monforti-Ferrario, F., Dosio, A., and Raes, F., 2014: The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.041>
- Gleckler, P.J., Taylor, K.E., and Doutriaux, C., 2008: Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.* 113, D06104. <https://doi.org/10.1029/2007JD008972>
- Gutiérrez, C., Somot, S., Nabat, P., Mallet, M., Corre, L., van Meijgaard, E., Perpiñán, O., and Gaertner, M.A., 2020: Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe: investigating the role of aerosols. *Environ. Res. Lett.* 15, 034035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6666>
- Ha, S., Zhou, Z., Im, E-S., and Lee, Y-M., 2023: Comparative assessment of future solar power potential based on CMIP5 and CMIP6 multi-model ensembles. *Renew. Energy*, 206, 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.039>
- Holeček, J.L., Geli, H.M.E., Sawalhah, M.N., and Valdez, R., 2022: A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability*, 14, 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- Hu, Y., Fu, Q., 2007: Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 5229–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007>
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J.P., López-Romero, J.M., Thais, F., Bartók, B., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S., van

- Meijgaard, E., Teichmann, C., and Wild, M., 2015: The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nat. Commun.* 6, 10014. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>
- Li, X., Wagner, F., Peng, W., and Mauzerall, D.L., 2017: Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China. *PNAS* 114, 11867–11872. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711462114>
- Mavromatakis, F., Makrides G., Georghiou G., Pothrakis, A., Franghiadakis, Y., Drakakis, E., and Koudoumas, E., 2010: Modeling the photovoltaic potential of a site. *Renew. Energy*, 35, 1387–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.010>
- Matusz-Kalász, D., 2023: Szilíciumkristályos napelemek működését befolyásoló tényezők vizsgálata és állapotfelmérésük módszertana. Doktori disszertáció. Miskolci Egyetem, Miskolc. https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/FEI/news_files/34_0.pdf
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E., 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 88, 1383–1394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., and Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Munkácsy, B., 2018: Energiaföldrajz és energiatervezés – egyetemi jegyzet. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Földrajztudományi Központ, Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék. https://munkacsy.web.elte.hu/energiaföldrajz_tankonyv.pdf
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z., 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge. 570 p. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf
- Niu, J., Qin, W., Wang, L., Zhang, Wu, J., and Zhang, Y., 2023: Climate change impact on photovoltaic power potential in China based on CMIP6 models. *Science of the Total Environment*, 858, 159776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159776>
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B.M., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Pintér, G., Zsiborács, H., Hegedűsné Baranyai, N., Vincze, A., and Birkner, Z., 2020: The Economic and Geographical Aspects of the Status of Small-Scale Photovoltaic Systems in Hungary—A Case Study. *Energies* 13, 3489. <https://doi.org/10.3390/en13133489>
- REN21, 2024: Renewables 2024 global status report: Renewables in Energy Supply, 137p. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Brunetti, M., Guijarro, J.A., Hakuba, M.Z., Calbó, J., Mystakidis, S., and B. Bartok., 2015: Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9555–9569. <https://doi.org/10.1002/2015JD023321>
- Sørland, S.L., Schär, C., Lüthi, D., and Kjellström, E., 2018: Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environ. Res. Lett.* 13, 074017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacc77>
- Streets, D.G., Wu, Y., and Chin, M., 2006: Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophys. Res. Lett.* 33, L15806. <https://doi.org/10.1029/2006GL026471>
- Stryhal, J., Huth, R., 2017: Classifications of Winter Euro-Atlantic Circulation Patterns: An Intercomparison of Five Atmospheric Reanalyses. *J. Clim.* 30, 7847–7861. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0059.1>
- Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci, L., and Osterwald, C., 2003: Photovoltaic module thermal-wind performance: Long-term monitoring and model development for energy rating. NCPV and Solar Program Review Meeting 2003. <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A., 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y., 2007: Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renew. Energy*, 32, 623–637. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.006>

Internetes hivatkozás

[1] Solar resource map © 2021 Solargis

<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>

Kalmár Timeát az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium támogatta.