

# NAPELEMEK VISELKEDÉSE KÜLÖNBÖZŐ SZÉLVISZONYOK (HŰTÉSI HATÁS) MELLETT

## BEHAVIOR OF SOLAR PANELS UNDER DIFFERENT WIND CONDITIONS (COOLING EFFECT)

Szalánczi Dávid\*, Dr. Bencs Péter\*\*

### ABSTRACT

*This study investigates the thermal and efficiency behavior of three photovoltaic technologies—conventional silicon, PERC, and PERC + UV film—under varying ventilation conditions using a MATLAB/Simulink-based simulation model. Simulations were conducted under representative summer irradiance and ambient temperature for three wind scenarios (calm, 3 m/s, and 5 m/s). Results indicate that increased ventilation significantly lowers internal panel temperature and reduces efficiency losses, with PERC + UV film consistently delivering the most stable and efficient performance. These findings underscore the importance of ventilation and appropriate technology selection in minimizing thermal performance losses under summer conditions.*

### 1. BEVEZETÉS

A napelemes rendszerek teljesítményét nyáron a magas besugárzás és hőmérséklet miatti túlmelegedés rontja. A légmozgás természetes hűthetősége kulcsszerepet játszik a hőmérséklet mérséklésében, de hatékonysága a telepítési körülményektől függ: zárt tetőkön korlátozott, míg állványos rendszerek esetén jóval hatékonyabb. Azonos külső feltételek mellett így eltérő belső hőmérséklet és hatásfok alakulhat ki. Bár több tanulmány vizsgálta a hűtési megoldásokat és a technológiák viselkedését, kevés foglalkozik a hagyományos szilícium, PERC és PERC + UV fóliás technológiák összehasonlításával különböző természetes szellőzési viszonyok között. Jelen tanulmány célja e hiány pótlása: a három technológia szimulációs vizsgálata nyári környezetben, háromféle szellőzési szint mellett, annak feltárására, hogyan befolyásolja a természetes hűtés a hőmérsékletet és a teljesítményt.

### 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A napelemek hatásfoka jelentősen csökken a panelhőmérséklet emelkedésével. A hőmérsékleti együtthatók alapján 1 °C növekedés 0,4–0,5%-os hatásfokvesztést okozhat, különösen hagyományos szilíciumtechnológia esetén (Skoplaki & Palyvos, 2009). A túlmelegedés nemcsak a pillanatnyi teljesítményt

rontja, hanem felgyorsítja az anyagfáradást és a degradációt is [1].

A természetes hűtés – például a szélmozgás okozta konvekció – bizonyos körülmények között akár 5–15 °C-kal is csökkentheti a panel hőmérsékletét, különösen jól szellőző elrendezésben (Fouad et al., 2017). Ugyanakkor zárt tetőszerkezeteknél ez a hatás korlátozott, míg szabadon álló vagy állványos rendszerek esetén hatékonyabb lehet [2].

Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy a PERC technológiájú modulok alacsonyabb üzemi hőmérsékletet és nagyobb energiatermelést eredményeznek, mint a hagyományos Al-BSF típusú panelek [3]. Ennek ellenére ritkák azok a szimulációs tanulmányok, amelyek több napelem-technológiát hasonlítanak össze különböző természetes szellőzési viszonyok között. Különösen kevés kutatás vizsgálja a hőmérséklet- és hatásfokváltozást a szellőzés fokozatosságára (szélesend – gyenge – erős légmozgás) függvényében.

E tanulmány e hiányt pótolja: Miskolcra jellemző nyári környezetben, három technológia és több szellőzési szint szimulációs elemzésével mutatja be a hűtés hatását.

### 3. VIZSGÁLT TECHNOLÓGIÁK ÉS SZIMULÁCIÓS KÖRÜLMÉNYEK

A vizsgálat során három széles körben alkalmazott napelem-technológiát modelleztünk, amelyek lakossági és ipari rendszerekben is elterjedtek:

#### • **Hagyományos szilícium (Al-BSF):**

Egyszerű felépítésű, a cellák hátoldalán összefüggő alumíniumréteggel, amely korlátozza a hőelvezetést. Magas hőérzékenysége miatt különösen kitett a túlmelegedésnek.

#### • **PERC (Passivated Emitter and Rear Cell):**

A hagyományos technológia továbbfejlesztett változata, ahol a hátoldali dielektromos rétegek javítják a fénycsapdázást és csökkentik a hőterhelést, ezáltal kedvezőbb hőmérsékleti és hatásfok-jellemzőket biztosítanak.

#### • **PERC + UV fólia:**

A PERC technológia UV-reflektáló fóliával egészül ki, amely visszaveri a nem hasznosuló közeli infravörös

\* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

\*\* Egyetemi Docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Aramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

sugárzást. Ez csökkenti a hőelnyelést, különösen gyenge szellőzésű környezetben.

### 3.1. Szimulációs paraméterek és körülmények

A Simulink-alapú modell Miskolc földrajzi adottságaira épült, tipikus nyári nap (júliusi) besugárzási adatokkal. A sugárzás 950–1050 W/m<sup>2</sup> között változott, a számításokhoz 1000 W/m<sup>2</sup>-t, a külső hőmérséklethez 34–35 °C-ot vettünk figyelembe, 10:00–16:00 közötti időszakban.

Négy eltérő szellőzési forgatókönyvet szimuláltunk:

Szellőzés típusa	Légmozgás (m/s)	Leírás
Szélszélcsend	0 m/s	Zárt tetős környezet, természetes légáramlás nélkül
Gyenge szellőzés	1 m/s	Enyhe légmozgás városi környezetben
Jó szellőzés	3 m/s	Szabodon álló rendszer, természetes hűtéssel, mérsékelt szélmozgással
Erőteljes szellőzés	5 m/s	Nyitott, szeles terület; kedvező hőelvezetésű környezet, ahol a folyamatos légáramlás segíti a túlmelegedés csökkentését

A szimuláció célja annak vizsgálata volt, hogy az eltérő szellőzési körülmények milyen hatást gyakorolnak:

- a panelek **belső hőmérsékletének alakulására**, és
- az ebből következő **hatásfokváltozásokra**, technológiánkénti bontásban.

Megjegyzés: A hatásfokgörbék a panelek relatív teljesítményét ábrázolják, a névleges (STC) teljesítményhez viszonyítva százalékos formában.

### 3.2. Szimulációs modell felépítése

A szimulációs vizsgálatot Simulink-alapú dinamikus modell segítségével végeztük, amely figyelembe vette a napelemek hőmérséklet-változását és az ebből eredő hatásfokváltozást. A modell a következő fő összetevőket tartalmazta:

#### • Energiaegyensúlyi hőmérsékleti modell:

A panel belső hőmérséklete a napsugárzás (G), a környezeti hőmérséklet (T<sub>a</sub>), valamint a természetes hőelvezetés (konvekció és sugárzás) alapján számítottott. Az energiaegyensúly képlete:

$$Q_{be} = G \cdot (1 - \eta_{opt}), \quad Q_{ki} = h_c \cdot A \cdot (T_p - T_a)$$

ahol  $h_c$  a konvekciós hőátadási tényező, A a panel felülete, T<sub>p</sub> a panel hőmérséklete.

#### • Konvekciós hűtés szimulálása:

A szellőzési scénárióknak megfelelően módosítottuk a  $h_c$  értékét, amely a szélsébséggel arányos:  $h_c = a + b \cdot v$  (jellemezően  $a=5$ ,  $b=3.5$  W/m<sup>2</sup>K)

#### • Hatásfok-hőmérséklet összefüggés:

A pillanatnyi hatásfokot az alábbi empirikus képlettel számítottuk:

$$\eta(T) = \eta_{STC} \cdot [1 - \beta \cdot (T_p - T_{STC})]$$

ahol  $\beta$  a hőmérsékleti együttható (pl. 0.004/°C),  $\eta_{STC}$  a névleges hatásfok, és T<sub>STC</sub>=25°C.

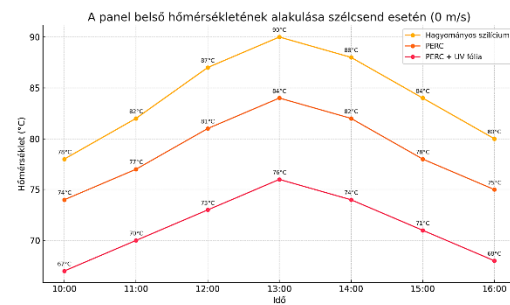
### UV-fólia hatása:

A PERC + UV panelnél az abszorpciós együttható csökkentett értéket vett fel (pl. 85% helyett 75%), ami alacsonyabb hőnyelődést és így kisebb hőmérséklet-emelkedést eredményezett.

## 4. EREDMÉNYEK

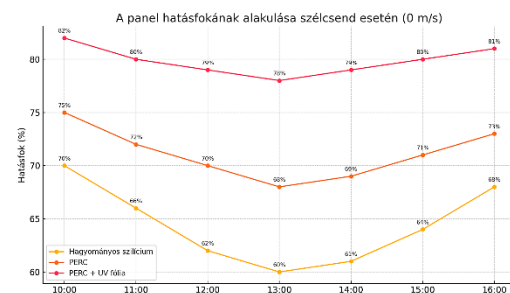
### 4.1. Szélszélcsend körülmények (0 m/s)

A szélszélcsend – azaz természetes légmozgás nélküli állapot – különösen kritikus a napelemes rendszerek működésére nézve, mivel a hűtés hiánya jelentős mértékben fokozza a panel belső hőmérsékletét.



1. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása szélszélcsend esetén (0 m/s)

Az ábra szerint szélszélcsendben a panelek belső hőmérséklete dél körül (12:00–14:00) jelentősen megemelkedik. A hagyományos panel eléri a 90°C-ot, míg a PERC technológia 75–83°C között marad. A PERC + UV fóliás panel legfeljebb 74°C-ra melegszik, kisebb kilengéssel. Ez is alátámasztja, hogy ez a technológia hatékonyabban vezeti és sugározza el a hőt, ami előnyt jelent az élettartam és teljesítmény szempontjából.

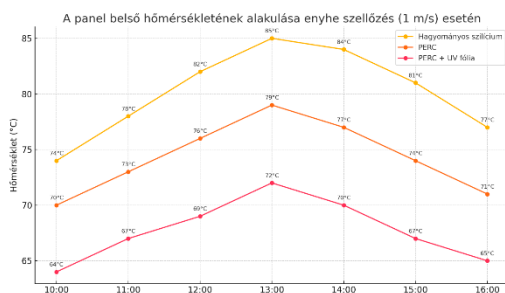


2. ábra: A panel belső hatásfokának alakulása szélszélcsend esetén (0 m/s)

A hatásfokgörbék szerint a belső hőmérséklet emelkedése jelentősen rontja a teljesítményt. A hagyományos panel 60–70% között ingadozik, dél körül erős visszaeséssel. A PERC 7–8 százalékpontos csökkenést mutat, míg a PERC + UV fóliás technológia 77–81% között marad, stabil teljesítményt tartva. Az ábra alátámasztja, hogy fokozott melegedés mellett is ez a technológia nyújtja a legjobb hő- és hatásfokstabilitást.

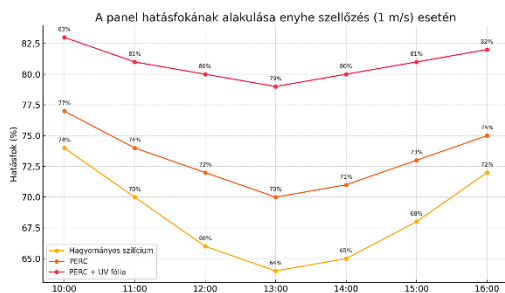
## 4.2. Enyhe szellőzés (1 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



3. ábra – A panel belső hőmérsékletének alakulása enyhe szellőzés (1 m/s) esetén

Enyhe légmozgás hatására minden technológiánál csökkent a belső panelhőmérséklet. A hagyományos panel még eléri a 85 °C-ot, de a kilengések mérséklődtek. A PERC 70–79 °C, míg a PERC + UV fóliás panel 64–72 °C között marad, stabilabb és kiegyensúlyozottabb hőviselkedéssel.

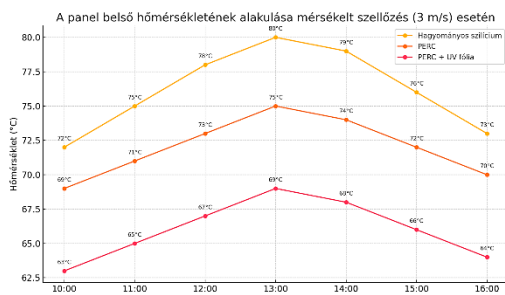


4. ábra – A panel hatásfokának alakulása enyhe szellőzés (1 m/s) esetén

A kisebb hőterhelés közvetlenül javítja a hatásfokot. Dél körül a hagyományos panel 64%-ra esik vissza, enyhe javulással szélszélhez képest. A PERC 70–77%, míg a PERC + UV fóliás technológia stabilan 79–83% között teljesít, jól kihasználva a szellőzés hűtőhatását.

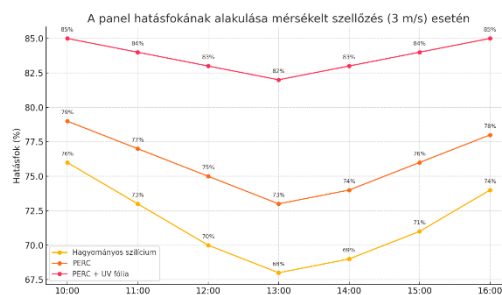
## 4.3. Mérsékelt szellőzés (3 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



5. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása mérsékelt szellőzés esetén (3 m/s)

A hőmérsékleti görbék szerint mérsékelt szellőzés mellett is csökken a panelhőmérséklet mindhárom technológiánál. A hagyományos szilícium továbbra is melegebb, míg a PERC + UV fóliás panel stabilan a leghűvösebb marad.

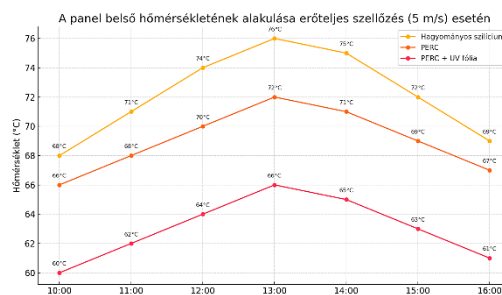


6. ábra: A panel hatásfokának alakulása mérsékelt szellőzés esetén (3 m/s)

A hatásfokgörbék szerint a nagyobb légmozgás főként a hűtési hatás révén javítja a teljesítményt. A PERC + UV fóliás panel maradt a legkiegyensúlyozottabb, magas hatásfokot tart fenn, míg a hagyományos technológia érzékenyen reagál a melegedésre.

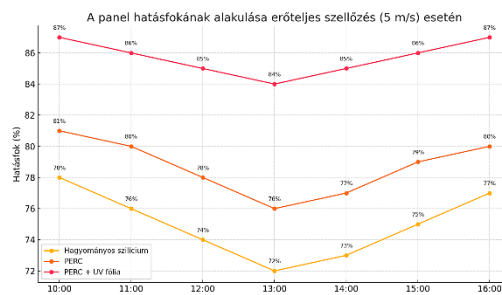
## 4.4. Erőteljes szellőzés (5 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



7. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása erőteljes szellőzés esetén (5 m/s)

A hőmérsékleti görbe szerint a fokozott légmozgás különösen a déli órákban csökkenti a panelek belső hőmérsékletét. A PERC + UV fóliás technológia továbbra is a leghatékonyabb hűtést biztosítja.

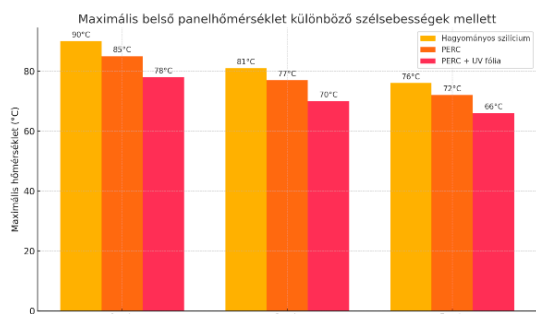


8. ábra: A panel hatásfokának alakulása erőteljes szellőzés esetén (5 m/s)

A hatásfokgörbe alapján a szellőzés minden technológiánál javítja a teljesítményt, azonban a különbségek megmaradnak: a PERC + UV fóliás panel stabilan a legmagasabb hatásfokot nyújtja.

#### 4.5. Összehasonlító ábrák a 3 technológiáról

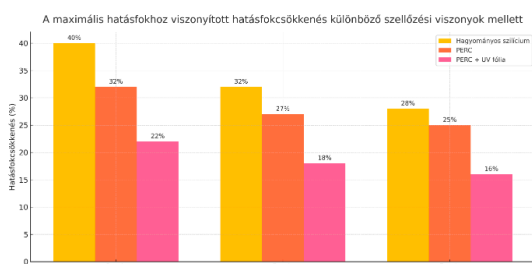
##### 4.5.1. A maximális panelhőmérséklet alakulása különböző szellőzési viszonyok mellett



9. ábra: Maximális belső hőmérsékletek a különböző szélsebességek mellett

A diagram szemlélteti, hogy a szélsebesség növekedése minden technológiánál mérsékli a panel belső hőmérsékletét. Szélcsendben a hagyományos panel elérte a 90 °C-ot, míg a PERC + UV fóliás csak 78 °C-ot. 5 m/s-os szél esetén ezek az értékek 76 °C-ra, illetve 66 °C-ra csökkentek.

##### 4.5.2. A maximális hatásfokhoz viszonyított hatásfokcsökkenés különböző szellőzési viszonyok mellett



10. ábra: A maximális hatásfokhoz viszonyított hatásfokcsökkenés különböző szellőzési viszonyok mellett

A második diagram a maximális hatásfokhoz viszonyított csökkenést mutatja különböző szellőzési viszonyok mellett. A PERC + UV fóliás panelek minden esetben mutatták a legkisebb hatásfokvesztést. Szélcsendben a hagyományos panelek 40%-os csökkenést mutattak, míg a PERC + UV paneleké csak 22% volt. Erőteljes szellőzésnél ezek az értékek 28%, illetve 16% körül alakultak. A két diagram egyértelműen mutatja, hogy növekvő szellőzés mellett minden technológia hűvösebben és hatékonyabban működik – a PERC + UV panel mutatta a legkisebb hatásfokvesztést minden esetben.

## 5. EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálat célja három napelem-technológia (hagyományos szilícium, PERC és PERC + UV fóliás) hőmérsékleti és hatásfokbeli viselkedésének elemzése volt eltérő szellőzési körülmények között, egy tipikus, 34–35 °C-os nyári miskolci napon. A szimuláció alapján az alábbi következtetések születtek:

- A szellőzés jelentősen befolyásolja a panel belső hőmérsékletét: szélszélben 90 °C-ig, míg 5 m/s-os szél mellett 66–76 °C-ig terjedtek az értékek.
- PERC és PERC + UV technológiáknál minden szélsebesség mellett alacsonyabb hőmérséklet és magasabb hatásfok volt megfigyelhető.
- A PERC + UV fóliás panelek teljesítménye a legstabilabban: míg a hagyományos panelek hatásfoka akár 40%-kal is csökkent, ennél a technológiánál ez mindössze 16–22% volt.
- A szélsebesség és a technológia együtt döntően befolyásolja a teljesítményt – figyelembevételük elengedhetetlen a tervezés során.

Összegzésként elmondható, hogy a PERC + UV fóliás technológia biztosította a legkedvezőbb hőmérsékleti és hatásfokbeli jellemzőket, különösen meleg, szélcsendes nyári időszakokban. Az eredmények szimulációs modellen alapulnak; terepi vagy laborvalidálásuk további kutatást igényel.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13\*(9), 2585–2594. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.005>

[2] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77\*, 331–346. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.020>

[3] Vogt, M. R., Henning, H. S., & Blankemeyer, S. (2016). Reduced module operating temperature and increased yield of modules with PERC instead of Al-BSF solar cells. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/309756771\\_Reduced\\_Module\\_Operating\\_Temperature\\_and\\_Increase\\_of\\_Yield\\_of\\_Modules\\_With\\_PERC\\_Instead\\_of\\_Al-BSF\\_Solar\\_Cells](https://www.researchgate.net/publication/309756771_Reduced_Module_Operating_Temperature_and_Increase_of_Yield_of_Modules_With_PERC_Instead_of_Al-BSF_Solar_Cells)