

NAPELEMES TECHNOLÓGIÁK ÉLETTARTAM ANALÍZISE

Bencs Péter – Szalánczi Dávid

Absztrakt: A tanulmány célja a különböző napelemes technológiák (hagyományos szilícium alapú, PERC és PERC + UV fólia) élettartamának és teljesítménycsökkenésének elemzése szimulációs környezetben. A vizsgálatok során 10 és 25 éves időtartamot modelleztünk, figyelembe véve a hőmérsékleti hatásokat, mint a degradáció és az anyagfáradás. Az eredmények alapján a PERC + UV fólia technológia bizonyult a leghatékonyabbnak, mivel jelentősen lassította a hatásfok csökkenését és növelte az energiahozamot. Ezzel szemben a hagyományos szilícium napelemek mutatták a leggyorsabb teljesítménycsökkenést, különösen hosszabb időtávon. A kutatás rámutat arra, hogy a hőmérséklet-csökkentő technológiák kulcsszerepet játszanak a napelemek fenntarthatóbb és hatékonyabb működésében.

Abstract: This study examines the lifespan and performance degradation of various solar panel technologies, including traditional silicon-based panels, PERC, and PERC + UV foil, in a simulated environment. The simulation modelled 10- and 25-year periods, considering temperature-related factors such as degradation and material fatigue. The results indicate that PERC + UV foil technology was the most effective, as it significantly reduced efficiency loss and improved energy output. Conversely, traditional silicon panels experienced the most rapid performance decline, particularly over extended periods. This research emphasizes the importance of temperature-reducing technologies in enhancing the long-term sustainability and efficiency of solar panel systems.

Kulcsszavak: Napelem, PERC technológia, UV visszaverő fólia, Élettartam-analízis, hatásfokcsökkenés, Simulink szimuláció

Keywords: Solar panel, PERC technology, UV reflective foil, lifespan analysis, efficiency loss, Simulink simulation

1. Bevezetés

A megújuló energiaforrások iránti növekvő igény közepette a napelemek technológiai fejlesztése kiemelt fontosságúvá vált. A napelemes rendszerek egyik legjelentősebb kihívása a hőmérsékleti tényezők által okozott hatásfokcsökkenés és az anyagok hosszú távú fáradása. A hőmérséklet növekedése csökkenti a napelemek áramtermelési hatékonyságát, mivel negatív hatással van a félvezető anyagok működésére.

A napelemes rendszerek teljesítményvesztesége hosszú távon jelentős problémát jelent a fenntartható energiatermelésben. Különösen a hőmérsékleti és UV-sugárzás okozta degradáció veszélyezteti a rendszerek gazdaságosságát. Az új technológiák, mint például a PERC (Passivated Emitter and Rear Contact) és a PERC + UV fólia, hatékonyabb energiaátalakítást biztosítanak azáltal, hogy csökkentik a panelek hőmérsékletét és mérséklik a degradáció ütemét. Ezen technológiák elemzése elengedhetetlen ahhoz, hogy hosszú távú megoldásokat találjunk a napelemek teljesítményveszteségének minimalizálására.

A jelen tanulmány célja, hogy szimulációs környezetben hasonlítsa össze a különböző napelemes technológiák hosszú távú teljesítménycsökkenését és élettartamát, különös tekintettel a hőmérséklet-csökkentő megoldások hatékonyságára. A szimulációk révén pontosabb képet kapunk arról, hogy az egyes

technológiák milyen mértékben járulnak hozzá az energiahozam hosszú távú stabilitásához.

2. Irodalmi áttekintés

A napelemek hosszú távú hatékonyságát és élettartamát jelentősen befolyásolják a környezeti tényezők, különösen a hőmérsékleti stressz és az UV sugárzás. Az elmúlt években számos tanulmány vizsgálta a degradáció mechanizmusait és a technológiai fejlesztések hatékonyságát ezek mérséklésére.

Okorieimoh et al. (2020) megállapították, hogy az UV-sugárzás, a hőmérsékleti stressz és az anyagfáradás csökkenti a napelemek élettartamát, és hangsúlyozták az UV visszaverő fóliák szerepét az energiahozam növelésében. Diallo et al. (2023) kimutatták, hogy az időjárási tényezők együttes hatása gyorsíthatja a degradációt, de védőrétegek alkalmazásával ez mérsékelhető. Oliveira et al. (2018) kutatása szerint az UV fóliák csökkentik az EVA rétegek fotodegradációját, amely kulcsfontosságú a napelemek stabilitásában.

Ezek a kutatások alátámasztják, hogy a PERC és PERC + UV fólia technológiák hatékonyan lassítják a teljesítményvesztést. Azonban további vizsgálatok szükségesek annak meghatározására, hogy ezek az innovatív megoldások milyen mértékben növelik a napelemek hosszú távú megbízhatóságát. Ezt a kérdést jelen tanulmány szimulációs elemzésekkel vizsgálja.

Ezek a kutatások alátámasztják a hőmérséklet-csökkentő technológiák, mint például a PERC és a PERC + UV fólia, kulcsszerepét a napelemek hosszú távú teljesítményének fenntartásában, valamint rámutatnak az anyagválasztás és az innovatív bevonatok fontosságára. Az eddigi kutatások eredményei alapján azonban további vizsgálatok szükségesek annak pontos meghatározására, hogy a hőmérséklet-csökkentő technológiák milyen mértékben lassítják a teljesítményvesztést hosszabb időtávon. Ennek érdekében jelen tanulmány szimulációs elemzésekkel hasonlítja össze a különböző napelemes technológiák hosszú távú hatékonyságát, kiemelt figyelmet fordítva a PERC és PERC + UV fólia megoldásokra.

3. Anyag és módszer

A kutatás során a Simulink szoftver segítségével modelleztük a különböző napelemes technológiák hőmérsékletfüggő teljesítményvesztését és hosszú távú energiahozam-csökkenését, vagyis a hőmérséklet okozta degradációt. A vizsgálatok Simulink szimulációs környezetben történtek, ahol a valós környezeti feltételeket modelleztük.

Vizsgált technológiák:

- Hagyományos szilícium alapú napelemek: Ezek a legelterjedtebb napelemek, amelyek teljesítményét erőteljesen befolyásolja a külső hőmérséklet.

- PERC (Passivated Emitter and Rear Contact) napelemek: A PERC technológia javítja a hatásfokot azáltal, hogy visszaveri az infravörös sugarakat, és csökkenti a panelek hőmérsékletét.
- PERC + UV visszaverő fóliás napelemek: A PERC technológia egy továbbfejlesztett változata, ahol egy UV visszaverő fólia csökkenti a hőmérsékletet, így hosszabb távon is magasabb energiahozamot biztosít.

3.1. Időjárási környezet és szimulációs beállítások

A szimuláció célja, hogy a hőmérséklet-csökkentő technológiák hosszú távú hatékonyságát modellezzük és értékeljük a hatásfokcsökkenés és az energiahozam változásain keresztül.

A szimuláció Miskolc éghajlati viszonyai alapján történt, mivel a város éghajlata jól reprezentálja a mérsékelt övi körülményeket. Az alábbi paramétereket használtuk a szimulációhoz:

- Külső hőmérséklet: A szimuláció során a hőmérsékletet 30-35°C között állítottuk be, ami a nyári hónapokban gyakran előforduló hőmérséklet Miskolcon.
- Napsugárzás intenzitása: Nyáron 950-1050 W/m² közötti értékekkel modelleztük, ami a nyári napsütéses napokra jellemző. Télen ez az érték 200-300 W/m². Éves napsütéses órák száma: 1900-2000 óra.
- Szélcsendes környezet: A szimuláció nem számolt természetes hűtéssel, így a panelek önmagukban mutatták a hőmérséklet-csökkentő technológiák hatását.

A Simulink modell a szezonális hőmérsékleti ingadozásokat is figyelembe vette a 10 és 25 éves periódusok során, hogy valósághű képet kapjunk a hosszú távú degradációs folyamatokról.

3.2. Modellezési eljárás

A szimulációk során a következő tényezőket modelleztük:

- Hőmérsékleti stressz: A változó hőmérsékleti körülmények hatására fellépő anyagfáradást és teljesítményvesztést figyeltük meg.
- Anyagfáradás: A hosszú távú használat során a panelek anyagában bekövetkező mikroszerkezeti változásokat is modelleztük, amelyek hatással vannak a hatásfokra.
- Mechanikai stressz: A szezonális és napi hőmérsékleti ciklusok következtében fellépő szerkezeti deformációkat is figyelembe vettük.

3.3. Szimulációs időtávok

- 10 éves időtáv: A rövid távú vizsgálatok fontos információt nyújtanak a kezdeti degradációs ütemről és a technológiák közötti eltérésekről.
- 25 éves időtáv: Ez az időtáv megfelel egy átlagos napelemes rendszer teljes élettartamának, amely alatt a technológiai különbségek markánsan megjelennek.

3.4. Az eredmények elemzése

A Simulink szimuláció során kapott adatokat grafikonokon ábrázoltuk:

- Éves hatásfokcsökkenés grafikonok: Ezek a grafikonok bemutatják az egyes technológiák hatásfokának csökkenését az idő előrehaladtával.
- Éves energiahozam-változás grafikonok: Az energiahozam-veszteséget külön vizsgáltuk, hogy bemutassuk, melyik technológia képes hosszabb távon fenntartani a teljesítményt.
- Kumulatív veszteségek: Az energiahozam-csökkenést összegző grafikonok segítettek pontosan megérteni a különböző technológiák hosszú távú hatékonyságát.

A szimulációs paraméterek pontos megválasztása és az eredmények részletes elemzése elengedhetetlen ahhoz, hogy reális képet kapjunk a hőmérséklet-csökkentő technológiák hosszú távú hatékonyságáról. A Miskolcra jellemző éghajlati adatok a közelség miatti könnyebbség mellett jól reprezentálják a mérsékelt övi környezetet, amely sok napelemes rendszer alkalmazási helyszíne lehet.

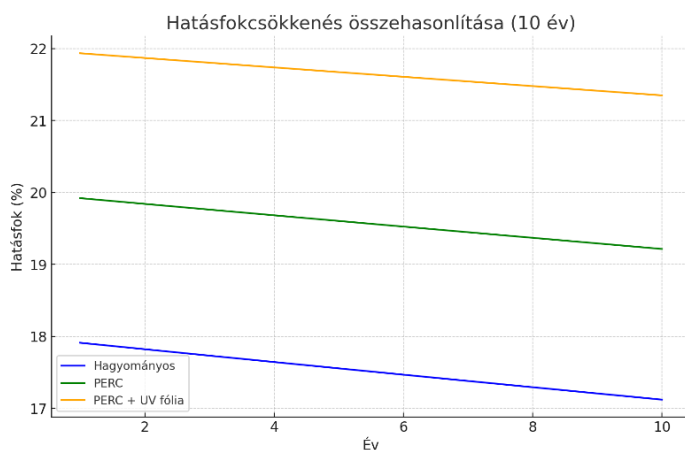
4. Eredmények és értékelésük

4.1. Hatásfokcsökkenés - 10 éves időtáv

Az 1. ábra a három napelemes technológia hatásfokcsökkenését ábrázolja az első 10 év során. A hagyományos technológia mutatja a leggyorsabb csökkenést, amely az évtized végére majdnem 5%-os teljesítményvesztést eredményezett. A PERC technológia 3,9%-os csökkenést mutatott, míg a PERC + UV fóliás panelek 2,9%-kal csökkentek, kiemelve a technológia hőmérséklet-csökkentő hatását.

A rövidebb időtávon a különbségek még nem túl élesek, de már látható, hogy az UV fólia hozzáadása lassítja a degradációt.

1. ábra: A 3 típusú napelem panel hatásfokcsökkenése az idő múlásával



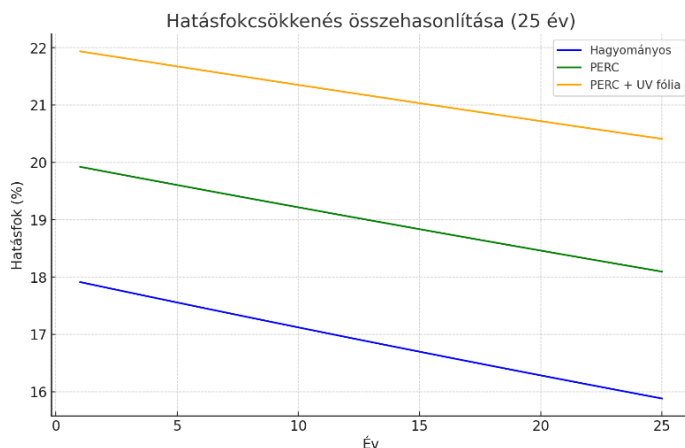
Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

4.2. Hatásfokcsökkenés - 25 éves időtáv

A 2. ábra a három technológia hatásfokcsökkenését mutatja 25 év alatt. A hagyományos panelek teljesítménye jelentősen csökkent, több mint 12%-os veszteséget mutatva. A PERC technológia 9,8%-os veszteséggel zárta az időszakot, míg a PERC + UV fóliás panelek csökkenése a legkisebb, 7,1%-os volt.

Ez az ábra kiemeli a hosszú távú degradációs különbségeket. A PERC + UV fólia technológia előnyei egyértelműen láthatók, különösen az időszak vége felé.

2. ábra: A 3 típusú napelem panel hatásfokcsökkenése az idő múlásával

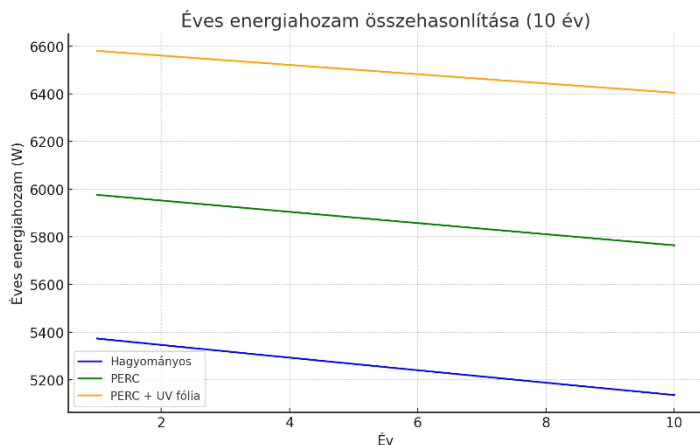


Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

4.3. Éves energiahozam - 10 éves időtáv

A 3. ábra egyértelműen bemutatja, hogy a különböző technológiák eltérő mértékű energiahozam-veszteséget szenvednek el már az első 10 évben. A hagyományos szilícium alapú napelemek esetében jelentős csökkenés figyelhető meg, mivel a degradációs ráta magasabb (0,5%/év), amely körülbelül 8,5%-os energiahozam-veszteséget eredményezett. A PERC technológia valamivel kisebb veszteséget mutatott, 6,8%-kal. A legjobban teljesítő PERC + UV fólia rendszerek mindössze 5,1%-os veszteséget szenvedtek el, köszönhetően az UV-védő réteg és a jobb hőmérséklet-szabályozás együttes hatásának. Ez az eredmény kiemeli, hogy a modern hőmérséklet-csökkentő megoldások már rövid távon is hozzájárulnak az energiahatékonyság megőrzéséhez.

3. ábra: A 3 típusú napelem panel éves energiahozama az idő múlásával

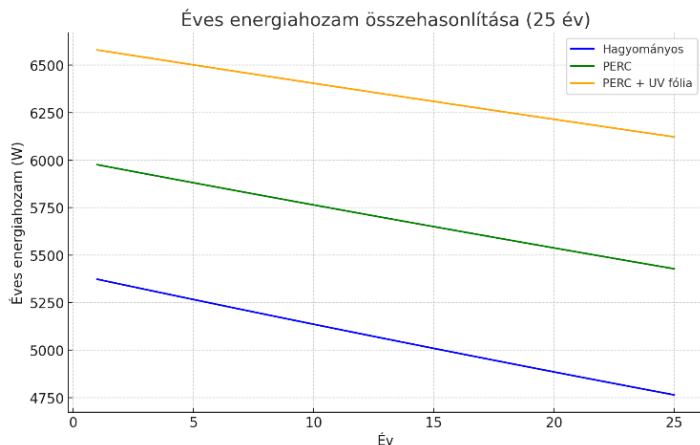


Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

4.4. Éves energiahozam - 25 éves időtáv

A 25 éves energiahozam-veszteséget bemutató 4. ábra világosan szemlélteti a három különböző napelemes technológia hosszú távú teljesítményének eltéréseit. A hagyományos szilícium alapú napelemeknél a degradációs ráta (0,5%/év) következtében jelentős, 20%-os energiaveszteség alakult ki, ami hosszú távon gazdaságtalanná teheti ezt a technológiát. A PERC technológia kedvezőbb eredményeket mutatott, de még így is körülbelül 15%-os energiahozam-veszteség következett be. A PERC + UV fólia technológia esetében viszont a veszteség mindössze 10%-ra korlátozódott, ami kiemeli az UV-védelmi réteg és az alacsonyabb hőmérsékleti stressz előnyeit. Az eredmények arra utalnak, hogy a modern napelemes technológiák nemcsak rövid, hanem hosszú távon is jelentős előnyt biztosítanak az energiatermelés stabilitásában.

4. ábra: A 3 típusú napelem panel éves energiahozama az idő múlásával



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

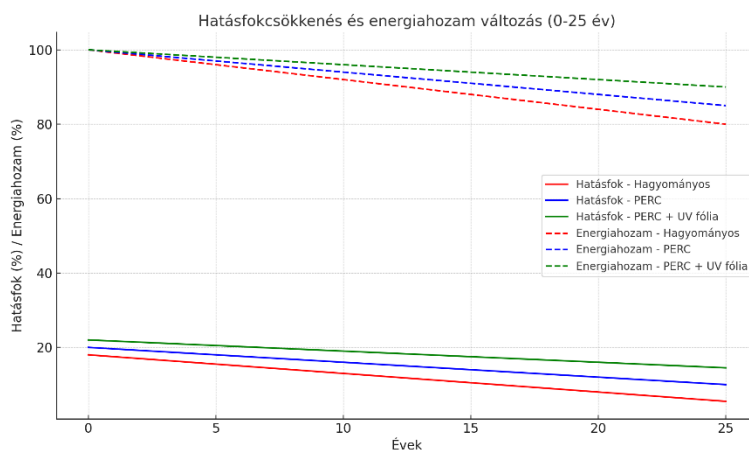
Készítettünk még 2 ábrát, amik szemléltetik a két hatás közti kapcsolatot.

4.5. Hatásfokcsökkenés és az éves energiahozam-változás (0-25 év)

Az 5. ábra a három különböző napelemes technológia hatásfokcsökkenését és energiahozam-változását mutatja 25 éves időtávon. A hagyományos szilícium alapú napelemek, a PERC technológia, valamint a PERC + UV fólia megoldás eltérő degradációs mintázatokat követ, amelyek már rövid időn belül is megmutatkoznak, de hosszabb távon még szembetűnőbbé válnak.

- **Hatásfokcsökkenés (szaggatott vonalak):** A hagyományos szilícium napelemek (piros vonal) gyorsabb hatásfokcsökkenést mutatnak, amely 25 év alatt jelentős teljesítményvesztéshez vezet. A PERC technológia (kék vonal) mérsékeltebb degradációval rendelkezik, míg a PERC + UV fólia (zöld vonal) a leghatékonyabb, mivel a védőréteg jelentősen lassítja az anyagok fáradását és a hőmérsékleti stressz hatását.
- **Energiahozam-változás (folytonos vonalak):** Az energiahozam csökkenése szorosan követi a hatásfokcsökkenést. A hagyományos szilícium napelemeknél (kék) a legmeredekebb az energiahozam csökkenése, míg a PERC technológia stabilabb teljesítményt nyújt, de hosszú távon így is jelentős veszteséget mutat. A PERC + UV fólia technológia a leghatékonyabbnak bizonyul, mivel az energiahozam-vesztés a 25 év alatt is minimális marad.

5. ábra: Hatásfokcsökkenés és az éves energiahozam-változás közti kapcsolat



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

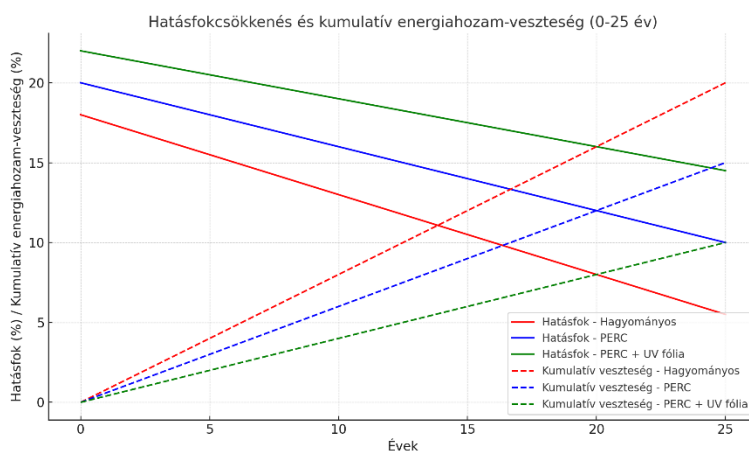
Az ábra tanulsága: A hatásfok és az energiahozam közötti összefüggésből jól látható, hogy a modern hőmérséklet-csökkentő megoldások (PERC + UV fólia) hosszú távon is fenntarthatóbb és gazdaságosabb energiatermelést biztosítanak. Ezen megoldások különösen fontosak olyan környezetekben, ahol a hőmérsékleti ingadozások és az UV-terhelés jelentős.

4.6. Hatásfokcsökkenés és a kumulatív energiahozam (0-25 év)

A 6. ábra a napelemes rendszerek hosszú távú teljesítménycsökkenését szemlélteti, mind a hatásfokcsökkenés, mind a kumulatív energiahozam-veszteség szempontjából. Az ábra fontos információt nyújt arról, hogy az egyes technológiák hogyan halmozzák fel az energiatermelési veszteségeket az évek során.

- **Hatásfokcsökkenés (folytonos vonalak):** A hagyományos szilícium napelemek (piros vonal) már az első években jelentős hatásfokcsökkenést mutatnak, amely folyamatosan nő. A PERC technológia (kék vonal) lassabb csökkenést mutat, de hosszú távon még így is jelentős a degradáció. A PERC + UV fólia technológia (zöld vonal) stabilabb hatásfokcsökkenést mutat, mivel az UV-védő réteg és a jobb hőszabályozás mérsékli az anyagfáradást.
- **Kumulatív energiahozam-veszteség (szaggatott vonalak):** Az ábra világosan szemlélteti, hogy a kumulatív energiaveszteség az idő múlásával egyre nagyobb mértékben halmozódik fel. A hagyományos szilícium napelemek 25 év alatt jelentős, több mint 20%-os energiaveszteséget halmoznak fel. A PERC technológia esetében ez a veszteség kisebb, de még mindig körülbelül 15%-ra tehető. A PERC + UV fólia technológia csupán 10%-os veszteséget mutat, amely a legjobb eredményt biztosítja az energiatermelés fenntartása szempontjából.

6. ábra: Hatásfokcsökkenés és a kumulatív energiahozam közti kapcsolat



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

Az ábra tanulsága: A kumulatív veszteségek vizsgálata azt mutatja, hogy a modern technológiák (PERC és különösen a PERC + UV fólia) nemcsak rövid távon, hanem hosszú időtávon is jelentős előnyt biztosítanak az energiatermelés fenntarthatóságában. Ez az ábra különösen fontos a beruházási döntések során, mivel rámutat arra, hogy a kezdeti többletberuházás a hosszú távú stabilitás révén térül meg.

Az eredményeket összefoglaltuk az 1. táblázatba is, melyben az egyes napelemes technológiák induló hatásfokát, valamint a 10 és 25 éves időtávon

bekövetkező hatásfokcsökkenést és energiahozam-veszteséget mutatja be. Ez a strukturált összehasonlítás lehetővé teszi a különböző technológiák közötti teljesítménykülönbségek könnyebb megértését és elemzését.

1. táblázat: Összefoglaló táblázat az eredményekről

Technológia	Induló hatásfok (%)	Hatásfok csökkenése 10 év után (%)	Hatásfok csökkenése 25 év után (%)	Energiahozam vesztesége 10 év után (%)	Energiahozam vesztesége 25 év után (%)
Hagyományos szilícium	18	4,9	12,5	8,5	20
PERC	20	3,9	9,8	6,8	15
PERC + UV fólia	22	2,9	7,1	5,1	10

Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

a) Induló hatásfok

- Hagyományos szilícium alapú napelemek: Az induló hatásfok 18%, amely az iparágban alapértelmezettnek számít. Ezek a napelemek megbízható kiindulási pontot jelentenek, de az újabb technológiákhoz képest alacsonyabb hatékonyságot biztosítanak.
- PERC technológia: Az induló hatásfok 20%, ami 2%-kal magasabb a hagyományos szilícium technológiához képest. Ez a növekedés a jobb fényelnyelési képesség és az alacsonyabb fényvisszaverődés eredménye.
- PERC + UV fólia technológia: Az induló hatásfok 22%, amely a legmagasabb a három technológia között. Az UV fólia hozzáadása nemcsak a degradáció csökkentésében segít, hanem már az induló hatékonyságban is érezhető előnyt biztosít.

Kijelenthető: Az induló hatásfok különbségei már a telepítéskor befolyásolják az energiatermelési potenciált, de a hosszú távú fenntarthatóság szempontjából a degradációs ráták kulcsfontosságúak.

b) Hatásfok csökkenése (10 és 25 év)

- Hagyományos szilícium alapú napelemek: A hatásfok 10 év alatt 4,9%-kal csökkent, míg 25 év alatt 12,5%-os csökkenést szenvedett el. Ez a legnagyobb veszteség a három technológia közül, ami alátámasztja, hogy a hagyományos panelek kevésbé ellenállók hosszú távon.
- PERC technológia: A hatásfok csökkenése mérsékeltebb volt, 10 év alatt 3,9%, 25 év alatt 9,8%-os veszteséggel. Ez jelentős javulást mutat a hagyományos technológiához képest.
- PERC + UV fólia technológia: A legkisebb hatásfokvesztést mutatta, mindössze 2,9%-os csökkenéssel 10 év alatt, és 7,1%-os csökkenéssel 25 év alatt. Ez az eredmény kiemeli az UV fólia és a PERC technológia szinergikus hatékonyságát.

Kijelenthető: A 25 éves hatásfokcsökkenési adatok egyértelműen mutatják, hogy a modern technológiák, különösen a PERC + UV fólia rendszerek, hosszú távon jelentős előnyt nyújtanak a hagyományos napelemekkel szemben.

c) Energiahozam vesztesége (10 és 25 év)

- Hagyományos szilícium alapú napelemek: Az energiahozam vesztesége 10 év alatt 8,5%, míg 25 év alatt 20% volt. Ez a legnagyobb veszteség, amely a jelentős hatásfokcsökkenéssel van összefüggésben.
- PERC technológia: Az energiahozam vesztesége 10 év alatt 6,8%, 25 év alatt pedig 15%-os volt, ami mérsékelt energiavesztést eredményezett.
- PERC + UV fólia technológia: A legkisebb energiahozam-vesztést mutatta, 10 év alatt 5,1%-kal, míg 25 év alatt mindössze 10%-kal csökkent az energiatermelési potenciál.

Kijelenthető: Az energiahozam-vesztesség kulcsfontosságú, mivel közvetlenül befolyásolja a napelemes rendszer gazdaságosságát és megtérülési idejét. A PERC + UV fólia technológia hosszú távon stabilabb energiatermelést biztosít, ami jobb megtérülési mutatókat eredményez.

d) Az eredmények általános értelmezése

- A táblázat adatai világosan megmutatják, hogy a modern technológiák, különösen a PERC + UV fólia rendszerek jelentős előrelépést jelentenek a hosszú távú hatékonyság fenntartásában. A következő főbb megállapítások tehetők:
- A hagyományos szilícium alapú napelemek degradációja és energiahozam-vesztése hosszú távon gazdaságtalan lehet, különösen olyan területeken, ahol a hőmérsékleti stressz magas.
- A PERC technológia már rövid távon is jobb teljesítményt nyújt, de a hosszú távú degradációs hatások miatt továbbra is érzékeny marad az anyagfáradásra.
- A PERC + UV fólia technológia kiemelkedő eredményeket mutat mind az induló hatásfok, mind a hosszú távú energiahozam fenntartása szempontjából. Az alacsonyabb degradációs ráta miatt ezek a rendszerek hosszabb időn át biztosítanak fenntartható és stabil energiatermelést.

e) Gazdasági szempontok

- A táblázat adatait figyelembe véve a következő gazdasági következtetések vonhatók le:
- A hagyományos szilícium technológia esetében a 20%-os energiahozam-vesztesség hosszú távon csökkenti a befektetés megtérülési rátáját.
- A PERC és különösen a PERC + UV fólia rendszerek kisebb energiavesztése jobb gazdasági megtérülést biztosít, mivel kevesebb teljesítményvesztés mellett hosszabb időtávon képesek energiát termelni.

4. Eredmények értelmezése és következtetések

A szimulációk eredményei három különböző napelemes technológia teljesítményét és hatásfokcsökkenését vizsgálták 10 és 25 éves időtávon. Az eredmények rámutattak arra, hogy a különböző technológiák között jelentős eltérések

mutatkoznak nemcsak az induló hatásfokban, hanem a hosszú távú stabilitásban és az energiahozam fenntartásában is.

1. Hatásfokcsökkenés és energiahozam-veszteség

- A hagyományos szilícium napelemek: Jelentős mértékű degradációt szenvedtek el mindkét időtávon. Az energiahozam több mint 20%-os csökkenése hosszú távon gazdaságilag fenntarthatatlanná teheti ezeket a rendszereket.
- A PERC technológia: Javulást mutatott a teljesítmény fenntartásában, de hosszabb időtávon még mindig számottevő degradációs hatások jelentkeztek, különösen a 25 éves periódus végén.
- A PERC + UV fólia technológia: A leghatékonyabbnak bizonyult, mivel az UV-védő réteg és a PERC technológia kombinációja jelentősen lassította a degradációt, és az energiahozam-veszteség mindössze 10% maradt 25 év után.

2. Degradációs ráták értelmezése

A szimulációk eredményei alapján a következő degradációs rátákkal számolhatunk, amelyek meghatározóak az egyes technológiák hosszú távú teljesítménye szempontjából:

- Hagyományos szilícium napelemek (0,5%/év): A legmagasabb degradációs rátával rendelkeznek, évente átlagosan 0,5%-os hatásfokcsökkenést okozva. Ez 25 év alatt több mint 20%-os energiahozam-veszteséget eredményez, ami a technológiát hosszú távon kevésbé gazdaságossá teszi.
- PERC technológia (0,4%/év): A degradációs ráta mérsékeltebb, évente 0,4%, amely kisebb energiahozam-veszteséget eredményezett mind 10, mind 25 év alatt a hagyományos technológiához képest. Ez az előny a hátsó réteg jobb fényvisszaverő tulajdonságának köszönhető.
- PERC + UV fólia technológia (0,3%/év): A legalacsonyabb degradációs rátával rendelkezik, évente mindössze 0,3%-os hatásfokcsökkenéssel. Ez hosszú távon biztosítja a legjobb eredményeket: az energiahozam 25 év alatt mindössze 10%-kal csökkent. A technológia jól teljesített a hőmérsékleti és UV-sugárzási stressz csökkentésében is.

A szimuláció során lineáris degradációs modellt alkalmaztunk, amely az éves teljesítményveszteséget egy állandó ütemben csökkenő folyamatként kezeli. Az iparági adatok és korábbi kutatások alapján a napelemek esetében a teljesítménycsökkenés jellemzően egyenletes ütemű, mivel a félvezető anyagok öregedése, az UV-sugárzás és a hőmérsékleti ingadozások folyamatos hatást gyakorolnak a panelek szerkezetére.

Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy bizonyos környezeti hatások, például extrém UV-terhelés vagy mechanikai sérülések, nemlineáris degradációt eredményezhetnek, amely gyorsabb teljesítményvesztéshez vezethet. Ezen tényezők pontosabb feltárása további kutatásokat igényel, amelyek figyelembe vehetik a különböző napelem-telepítések valós méréseit.

3. Következtetések

- Hagyományos szilícium technológia: Az emelkedett degradációs ráta miatt ezek a napelemek hosszú távon jelentős teljesítménycsökkenést mutatnak, különösen olyan környezetekben, ahol a hőmérséklet-ingadozások és az UV-sugárzás jelentős.
- PERC technológia: Rövidebb időtávon már érzékelhető a hatékonyságjavulás, de hosszabb időtávon továbbra is érzékeny a hőmérséklet okozta anyagfáradásra. Köztes megoldásként alkalmazható ott, ahol mérsékelt éghajlati viszonyok uralkodnak.
- PERC + UV fólia technológia: Ez a technológia bizonyult a leghatékonyabbnak, mivel az alacsony degradációs ráta hosszú távon is stabil és fenntartható energiatermelést biztosít. Különösen ajánlott olyan helyszíneken, ahol a hőmérsékleti hatások és az UV-sugárzás jelentős.

4. Kritikai megközelítés és validáció

A jelen kutatás a Simulink szoftver segítségével modellezte a napelemes rendszerek hosszú távú degradációját és hatásfokcsökkenését. A Simulink egy széles körben alkalmazott modellezési eszköz, amelyet számos kutatásban alkalmaztak fotovoltaiikus rendszerek vizsgálatára. Azonban a modell eredményei nem helyettesítik a valós környezeti méréseket és a laboratóriumi validációt.

A kapott eredmények megerősítéséhez a jövőbeli kutatások során ajánlott:

- Valós mérési adatok bevonása, amelyeket hosszú távú üzemelő rendszerek adatbázisaiból lehetne kinyerni.
- Más modellezési módszerek (pl. nemlineáris degradációs modellek) alkalmazása, amely jobban figyelembe veheti az idő előrehaladtával változó anyagfáradási folyamatokat.
- Kockázati elemzés, amely az extrém időjárási hatásokat és a gyártási sajátosságokat is figyelembe veszi.

5. Javaslatok a gyakorlatban

- Modern technológiák alkalmazása: A hagyományos szilícium alapú technológiák helyett a PERC vagy a PERC + UV fólia rendszerek alkalmazása javasolt az energiahatékonyság és a hosszú távú fenntarthatóság növelése érdekében.
- PERC + UV fólia rendszerek preferálása: A kutatás eredményei alapján ezek a technológiák biztosítják a legjobb teljesítményt, ezért különösen ott érdemes telepíteni őket, ahol a hőmérsékleti és UV-terhelés magas.
- További kutatások: Javasolt további vizsgálatok elvégzése a degradációs mechanizmusok pontosabb megértése érdekében. Az UV-védelmi rétegek és az új anyagkombinációk fejlesztése kulcsfontosságú lehet a jövőbeni rendszerek teljesítményének további javítása szempontjából.

6. Jövőbeli kutatási irányok

A jelen kutatás eredményei a Simulink szoftver szimulációin alapulnak, amelyek megbízható képet adnak a különböző napelemes technológiák hosszú távú teljesítménycsökkenéséről. Ugyanakkor további kutatások szükségesek az alábbi területeken a modell pontosságának és gyakorlati alkalmazhatóságának növelése érdekében:

- Valós mérésekkel történő validáció: A szimulációs eredmények összehasonlítása tényleges működésben lévő napelemes rendszerek adataival. Az ipari és kutatási projektekből származó hosszú távú teljesítménymérési adatok felhasználása segíthet a modellek pontosításában.
- Nemlineáris degradációs modellek vizsgálata: A jelenlegi lineáris degradációs megközelítés helyett érdemes lenne megvizsgálni az időfüggő, nemlineáris degradációt (pl. exponenciális vagy logaritmikus csökkenés), amely jobban tükrözheti a valós teljesítménycsökkenési folyamatokat.
- Szélsőséges időjárási hatások elemzése: A jelen tanulmány a mérsékelt éghajlati viszonyokat modellezte, azonban fontos lenne külön vizsgálni a szélsőséges időjárási körülmények (pl. extrém UV-terhelés, jégeső, szélsőséges hőmérsékleti ingadozások) hatásait is.
- Hosszú távú anyagfáradás vizsgálata: Az egyes technológiák rétegstruktúrájának hosszú távú változásait laboratóriumi körülmények között is érdemes lenne vizsgálni, például mikroszkópos vagy spektroszkópiai elemzésekkel.

Ezek az irányok hozzájárulhatnak a jelen tanulmány eredményeinek továbbfejlesztéséhez és a különböző napelem-technológiák gyakorlati alkalmazhatóságának jobb megértéséhez.

Irodalomjegyzék

- Okorieimoh, C. C., Norton, B., Conlon, M. (2020): Long-Term Durability of Solar Photovoltaic Modules. In: Scott, L., Dastbaz, M., Gorse, C. (szerk): *Sustainable Ecological Engineering Design*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44381-8_24
- Diallo, S., Melhaouia, F. Z., Rafib, M., Ellassoudi, A. (2023): Understanding photovoltaic module degradation: An overview of critical factors, models, and reliability enhancement methods - consensus. *E3S Web of Conferences*, 469: 00011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900011>
- Oliveira, M. C. C., , Cardoso, A. S. A. D., Viana, M. M. , Lins, V. F. C. (2018): The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2): 2299–2317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>