

## NAPELEMEK TÖNKREMENTELE

### Matusz-Kalász Dávid

egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,  
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [elkmd@uni-miskolc.hu](mailto:elkmd@uni-miskolc.hu)

### Lipták Róbert

Ph.D. hallgató, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,  
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [elkrobi@uni-miskolc.hu](mailto:elkrobi@uni-miskolc.hu)

### Tóth Péter

villamosmérnök alapszakos hallgató, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,  
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [tope0825@gmail.com](mailto:tope0825@gmail.com)

### **Absztrakt**

*A tanulmány a félvezető technológiájú napelem cellák azon tulajdonságára reflektál, miszerint az évek során elszorított teljesítmény-csökkenésük meghaladhatja a gyártó által garantált szintet. A gyors öregedés, valamint korai tönkremenetel oka lehet a nem megfelelő működtetés, vagy akár a gyártási hibák felerősödése a beüzemelés követően. A sérülés jellegétől függően, valamint annak mértéke alapján lehet szemmel jól látható, azonban számos sérülés észrevehetetlen marad. Az elektrolumineszcens vizsgálat hatékonyan feltárja a rejtőzködő sérüléseket.*

**Kulcsszavak:** napelem, károsodás, degradáció, elektrolumineszcens

### **Abstract**

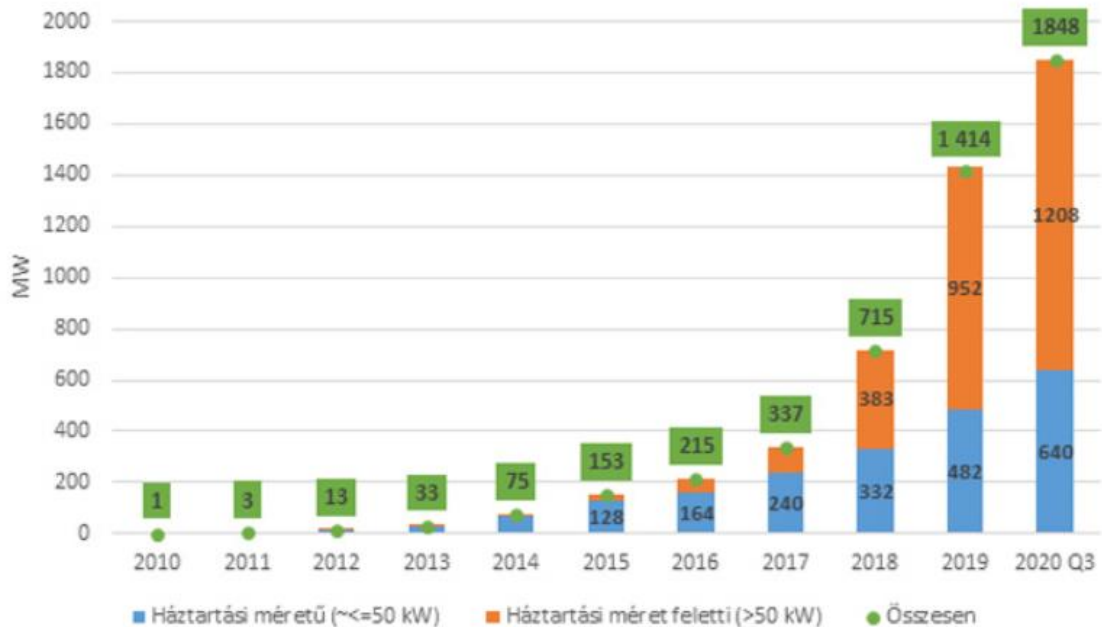
*The study reflects the property of semiconductor solar cells that their performance loss over the years may exceed the level guaranteed by the manufacturer. Rapid aging as well as premature failure can be caused by improper operation or even an increase in manufacturing defects after commissioning. Depending on the nature of the damage and its extent, it may be visible to the naked eye, but many failures remain unnoticeable. Electroluminescent testing effectively reveals latent damages.*

**Keywords:** solar cell, damage, degradation, electroluminescent

### **1. Bevezetés**

A mai világban egyre nagyobb szerepet kapnak a megújuló energiaforrások mivel emberi léptékben képesek megújulni, illetve a nem megújuló társaikkal szemben a felhasználásuk jóval környezetkímélőbb. Ezért is fektetnek egyre több figyelmet ezeknek az energiafajták előnybe részesítésére, megismerésére. A megújuló energiaforrásokat alkalmazó eszközök közül a napelemekre egyre több és több kutatást és fejlesztést fordítanak, így a hatások egyre növekszik, az előállítási költségük pedig csökken. Mindez a nagyobb mértékű felhasználásának kedvez. A mi esetünkben a napelemek sem kivételek az előbb elmondottakkal kapcsolatban, hiszen egyre több tudományos cikk, illetve munkanyag olvasható a fotovoltaiikus panelek fejlesztéséről, esetleges hatásfokuk növekedéséről. Mint ahogy az 1. ábra mutatja, nem csak külföldön, hanem hazánkban is egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek

a napelemes rendszerek alkalmazására. Azonban nem szabad elfelejteni, hogy a napelemek is öregszenek, azaz használatuk során a hatékonyságuk folyamatosan csökken.



1. ábra. Magyarországon telepített hálózatra termelő napelemes rendszerek kapacitása

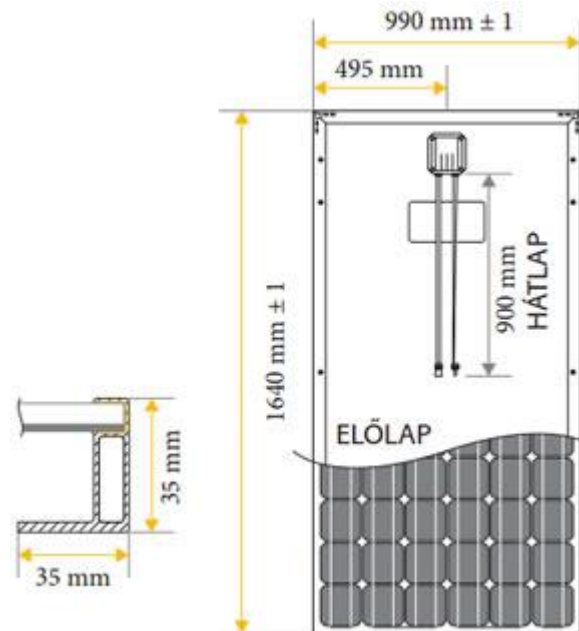
## 2. A napelemek felépítése és generációi

A napelem a p-n átmenete révén egy egyszerű diódként fogható fel, azon belül is könnyen hasonlítható egy fényt kibocsátó diódához (LED-hez), csak a működése ellentétes. A napelem úgy működik, hogy lehetővé teszi a fotonoknak vagy a fényrészecskéknél, hogy az elektronokat az atomtól függetlenül mozdítsák el, így áramot generálva. A napelemek legkisebb egységét fotovoltaikus celláknak neveznek. Sok egymáshoz kapcsolt cella alkot egy napelem modult, vagy más néven panelt [2]. A gyakorlatban alkalmazott  $1,6\text{ m}^2$  felületű napelem panelek 60 db cellát tartalmaznak. Egy így összeállt panel teljesítménye napjainkban 270-330 W közötti értéket képvisel a felhasznált cellák hatékonyságának függvényében. Egy gyakorlatban alkalmazott napelem panel felépítését a 2. ábra szemlélteti.

Minden cella alapvetően két szelet félvezető anyagból áll, általában szilíciumból, de napjainkban a polimer alapú, illetve az organikus napelemek megjelenésével már találkozhatunk nem szilícium alapú napelem cellákkal is.

A működéshez a fotovoltaikus celláknak elektromos teret kell létrehozniuk. Hasonlóan a mágneses mezőhöz, amely ellentétes pólusok miatt következik be, elektromos mező akkor fordul elő, ha ellentétes töltések vannak elválasztva. Ennek a mezőnek a megszerzéséhez a gyártók a szilíciumot más anyagokkal szennyezik, így a két rész minden szeletének pozitív vagy negatív elektromos töltése van. Pontosabban foszfort diffundálnak a szilícium felső rétegébe, amely negatív töltésű extra elektronokat ad hozzá ehhez a réteghez. Eközben az alsó réteget bórral szennyezik, ami kevesebb elektront, illetve pozitív töltést eredményez. Ezután, amikor a napfény fotonja szabadabbá teszi az elektronokat, az elektromos mező kiszorítja az elektront a szilícium csatlakozásból, így felhasználható energiává változtatja

ezeket az elektronokat, vagyis elektromos áramot hoz létre. A cella oldalán elhelyezkedő fém vezetőlemezek összegyűjtik az elektronokat és átvezetik őket a vezetékekbe. Ezen a ponton az elektronok úgy áramolhatnak, mint bármely más áramforrás [1, 2].



2. ábra. Egy gyakorlatban alkalmazott napelem modul méretei

A napelemek 3 generációba lehet besorolni:

- első generáció,
- második generáció,
- harmadik generáció.

Az első generációs napelemek más néven a hagyományos cellák, kristályos szilíciumból készülnek ideértve a polikristályos és a monokristályos elemeket. Jelenleg a piacon ezek a legelterjedtebbek. A Második generációs anyagokat fejlesztettek ki a napelemek energiaigényének és előállítási költségeinek kielégítésére. Előnyösek az olyan alternatív gyártási technikák, mint a gőzleválasztás, a galvanizálás és az ultrahangos fúvókák használata, mivel jelentősen csökkentik a magas hőmérsékleten történő feldolgozást. A második generációs cellák a vékony film napelemek, amik magukba foglalják a kadmium-tellurid (CdTe), réz-indium-gallium-szelenid (CIGS) és az amorf szilíciumot, amik mellesleg a legsikeresebb második generációs anyagok. Ezeket vékony bevonatként viszik fel egy hordozóra, mint például üveg vagy kerámia, ezzel is csökkentve az anyag tömegét és költségét. A harmadik generációs technológiák célja a második generáció gyenge elektromos teljesítményének növelése, miközben a gyártási költségek nagyon alacsonyak. Gyakran használnak szerves anyagokat fémorganikus vegyületeket, valamint szeretlen anyagokat. Annak ellenére, hogy hatékonyságuk alacsony volt és az abszorber anyag stabilitása túl rövid volt, hogy piacra dobják annak ellenére sok fejlesztést fektetnek bele ebbe a technológiába. A jelenlegi kutatások 30-60%-os konverziós hatékonyságot céloznak meg az alacsony költségű anyagok és gyártás mellett. Néhány megközelítés létezik a cél elérésére ideértve többfunkciós cellák, UV-fénnyel történő hőtermelés a feszültség fokozására vagy az infravörös spektrum éjszakai használata [1].

### 3. A napelemek degradációja

A degradáció egy alkatrész vagy egy rendszer jellemzőinek a fokozatos romlása, amely befolyásolja annak működését, hogy az elfogadhatóság határain belül működjön. Ez esetben a napelem továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a modul problematikussá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet. Ami a gyártók szerint akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára. Ez várhatóan 25 év alatt következik be. Egy napelem teljesítménye különböző tényezők miatt romolhat, mint például: hőmérséklet, páratartalom, besugárzás mértéke vagy mechanikai behatás. Ezek különféle lebomlást idézhetnek elő: korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon. A napelemek degradációját szimulációs modellezéssel próbálják megjósolni, mint a PVsyst vagy PVSol. A lebomlási arány akár 0,6%-5%/év is lehet, illetve 1757 kWh-1464 kWh/év is lehet. Ezek a szimulációs értékek nem feltétlen a legpontosabbak ugyanis a lebomlás mértéke nemcsak a környezetifeltételektől hanem az alkalmazott technológiáktól is függ [5].

A vékonyrétegű napelem sokkal nagyobb lebomlási sebességgel rendelkezik, mint egy polikristályos szilícium modul. Az a tény, hogy a PV modulok lebomlási foka lineáris hosszú távú működés során ma már széles körben elfogadott, de a működés megkezdésének első évében a lebomlási arány eltér ettől a linearitástól. Ezt a jelenséget több napelemes modulra megvizsgálták. A legszembevetőbb eredmény az, hogy az első évben az amorf szilícium 13,8%-kal, míg a kristályos szilícium rendszerek 7,9-9%-kal szolgáltatottak kisebb teljesítményt [5].

A napelemek tönkremenetelének időbeni lefutását a gyártók jellemzően két értékpárral adják meg. A napelemek első 10 évében 90%-os, az azt követő 15 évben pedig 80%-os teljesítménygaranciát adnak. A valóságban az üzemeltetés és karbantartás jellegétől ezen értékek jelentősen eltérhetnek. A gyakorlatban a napelemek hőmérséklete a leggyakoribb degradációs ok. A napelemeknek is van hőtehetlensége, így a változó megvilágítások során ún. hőmérsékleti tranziens folyamatok játszódnak le. Ezek a folyamatok egyfajta hőkezelési ciklusnak tekinthetők, amely folyamat során indukált dekadáció alakul ki. Egy panel részleges árnyékbakerülése, vagy megnövekedett degradációja hőmérsékletkülönbséget hoz létre a napelempanelen, ami tovább fokozza a teljes panel tönkremenetelét. E hatások lényegében gyorsító paraméterként tekinthető, így a napelemek gyártó által garantált használati időhöz képest hamarabbi tönkremenetelét eredményezik [3, 4].

#### A leggyakoribb degradációs hibák:

- rétegenkénti leválás,
- korrózió,
- elszíneződés,
- árnyékolás,
- mikrorepedések,
- PID.

#### 3.1. Rétegenkénti leválás

Delaminációnak, vagy rétegenkénti leválásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a tapadásvesztés a cellák között vagy a cella és az elülső üveg között következik be (3. ábra). Ez a jelenség két komoly problémát is kivált, ugyanis növeli a fényvisszaverődést és víz behatolásának esélyét a modul szerkezetébe. A rétegeltávolítás akkor a legsúlyosabb amikor a modul szélein fordul elő ugyanis nemcsak teljesítmény romlást okoz, de elektromos kockázatot is

jelent. Ez a leválás meleg és nedves környezeti feltételek mellett a leggyakoribb. Mérések követően azt állítják, hogy a delaminálódást a só felhalmozódása és a nedvesség behatolása okozhatja a modulokban [6].



**3. ábra.** A delamináció, vagy rétegleválás jelensége napelemeken

### 3.2. Korrózió

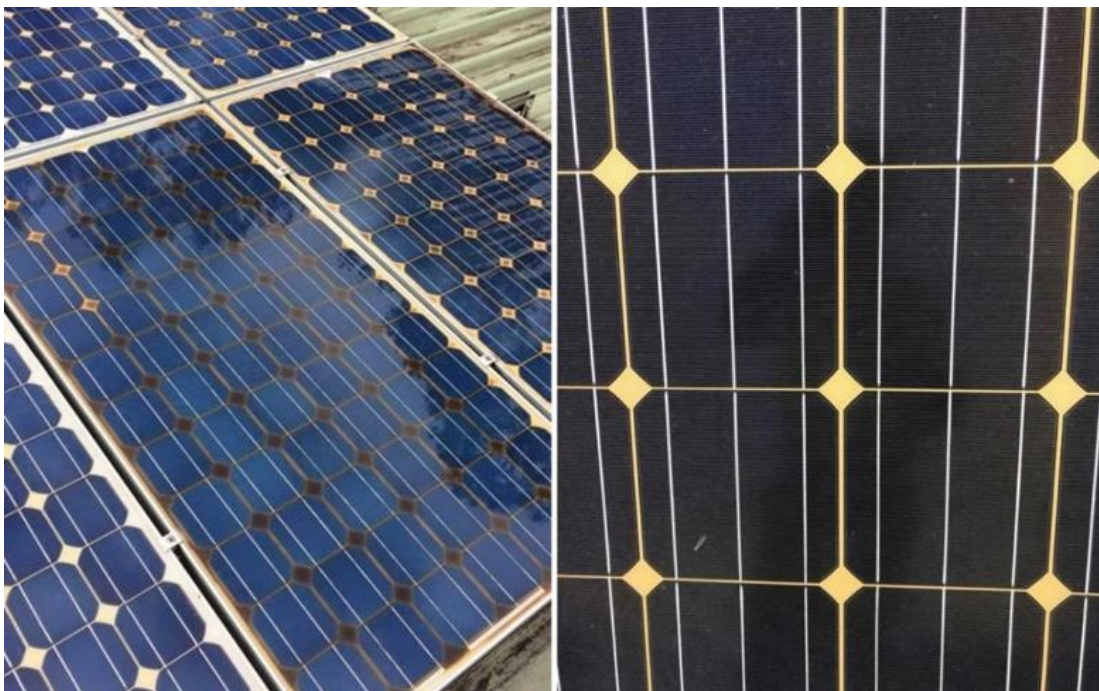
A nedvesség, amely a modulba a laminált szélein bejut korróziót okoz. A megnövekedett nedvesség növeli az anyag elektromos vezetőképességét. A korrózió megtámadja a cellák fémes csatlakozásait, és a szivárgási áramok növekedése miatt teljesítményvesztés lép fel. Károsítja a cellák és a fémkeret közötti tapadást. Egy kutatás vizsgálta a cellák lebomlását egy adott páratartalom és hőmérséklet esetén. Tesztet hajtott végre 85 °C és 85%-os páratartalom mellett. A teszt kiértékelése után megállapították, hogy a korrózió 1000 óra után jelentkezett. Bizonyos modulokon végzett tesztek után kimutatták, hogy az üvegben lévő nátrium, amely nedvességre reagál és ez a modulok széleinek korróziójának fő tényezője. A nedvesség behatolásának megakadályozása a megfelelő tömítés, alacsony diffuzivitású, nagy mennyiségű szárítószeret tartalmazó tömítések használatával [6].

### 3.3. Elszíneződés

Az elszíneződés általában az EVA (etilén-vinil-acetát) ragasztóanyag bomlása okozza az üveg és a cellák között (4. ábra). Az elszíneződés a cella színváltozása, amely sárga vagy néha barnát vált ki. Ez a jelenség módosítja a cellákba jutó fény áteresztőképességét, ezért csökken a modul által generált energia. Kutatások szerint az EVA lebomlásának a fő okai az UV sugarak. Az elszíneződés a napelem különböző pontjain is felléphet ennek oka, a különböző karakterisztikájú polimerek. Ezek vizsgálatára



mesterséges sugárzást használtak, ahol csak az UV sugarak hozzájárulást vizsgálták 280 nm és 380 nm között. Amikor  $4000 \text{ W/m}^2$  volt a sugárzás akkor a moduloknak a degradációja felgyorsult és 400 óra után fényérzékenység és áteresztőképesség is növekedett. Ennek oka az UV abszorber nyomása, amelynek meg kell védenie a cellákat a fotodegradációtól. Ezeken felül a cellák sárgulni kezdtek, ami teljesítmény csökkenést is okozott. Azonban  $1000 \text{ W/m}^2$  sugárzásnál nem történt változás. További UV tesztek végeztek a paneleken  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  hőmérséklet mellett és azt állapították meg, hogy elszíneződés csak akkor következik be, amikor a globális UV sugárzás eléri a  $15 \text{ kWh/m}^2$  anélkül, hogy meghaladná a  $250 \text{ W/m}^2$  expozíciót. Az elszíneződés hatással van a rövidzárlati áramra. A degradáció az elszíneződés mértékében lehet akár 6- 8%-ig, illetve akár 10-13%-ig is terjedhet. A panel maximális teljesítményére is negatív hatással van az elszíneződés [8].



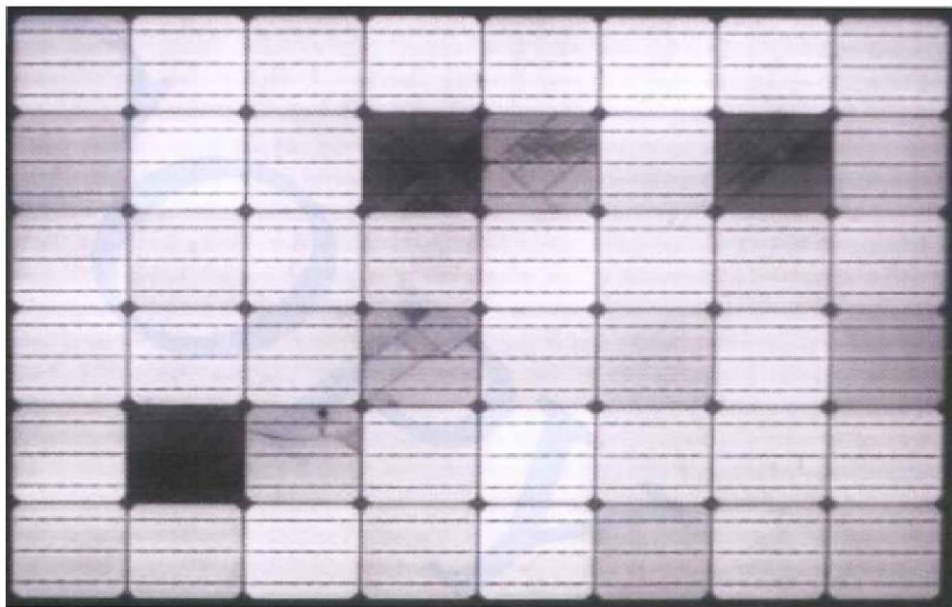
5. ábra. A napelemek elszíneződése

### 3.4. Árnyékolás

A napelemek részleges árnyékolása nagy problémát jelent, ugyanis túlmelegedés és meghibásodást is okozhat, ami kihat az egész modulra. Egy kutatás különböző típusú fotovoltaikus panelekre vizsgálta a részleges árnyékolást, különböző mértékű és helyzetű árnyakkal a modul hosszanti és kereszt irányba. Arra a következtetésre jutottak, hogy az árnyék növekedésével a kimeneti teljesítmény csökken a különböző anyagú és szerkezetű napelemek esetén. Általánosságban elmondható, hogy a keresztirányú árnyékolás a modulon nagyobb teljesítménycsökkenést okozott. A kutatás eredményeként arra jutottak, hogy a vékonyrétegű modulok jobban tolerálták a részleges árnyékolást, mint egy monokristályos napelem. Az ilyen árnyékolásban az amorf szilíciumú napelem teljesített a legjobban, ezt követte a Kadmium-tellurid napelem. Ezért érdemes a napelemek úgy telepíteni, hogy ne legyen rájuk hatással semmilyen árnyékoló objektum vagy ha ez nem megvalósítható akkor az árnyékolás hosszanti irányban történjen, hogy minimalizálva legyen a teljesítmény veszteség [1].

### 3.5. Mikrorepedések

A repedések valódi problémát jelentenek a fotovoltaikus modulok számára. Az új típusú modulokon viszonylag alacsony befolyása van a repedéseknek mindaddig, amíg a cellák elektromos kapcsolatban maradnak. De azonban ahogy a napelem „elöregszik”, hő, illetve mechanikai hatásoknak van kitéve repedések keletkezhetnek. Különböző repedésirányok nagyon eltérő hatást gyakorolhatnak a modulok teljesítményére, akár egy repedés is a cella megfelelő részén jelentősen csökkentheti a teljesítményt [6]. A mikrorepedések akár 3-4%-os teljesítményvesztést is eredményezhet, ami egy nagy gazdasági beruházásnál nagyobb veszteséget is okozhat. A repedések orientációja nagy szerepet játszik, hogy mekkora lesz ez a teljesítményromlás. Legjelentősebb egy függőleges vagy több irányú repedés. Felmérések alapján a repedések 6%-a gyártás és a szállítás folyamán keletkezik ezért is fontos a telepítés előtti ellenőrzés és jóváhagyás, hogy mekkora a súlyossága az esetleges repedés vagy repedéseknek. Repedés akár teljes elválasztást is eredményezhet, ami inaktív cellát fog maga után vonni. Egyes típusú repedések akár növekedhetnek is alakjuk és elhelyezkedésük szerint. Ennek többféle oka is lehet akár szállítás közbeni sérülés, környezeti terhelés, nem megfelelő telepítés. A repedések feltárásának egyik módszere az elektrolumineszcens vizsgálat. A 6. ábra egy napelem elektrolumineszcens felvételét mutatja, amin szabadszemmel is jól láthatók a repedések.



6. ábra. Egy napelem elektrolumineszcens felvétele

### 3.6. PID

A napelemes rendszer egyes moduljai leggyakrabban sorba vannak kapcsolva a rendszer feszültségének a növelése érdekében. Ennek következtében a potenciál különbség időként akár több száz volt is lehet. Ezért a védelem érdekében minden fém szerkezetet leföldelnek. A potenciál különbség miatt lehetséges, hogy a napelemes modulokhoz használt anyagokból a földelt kereteken keresztül elektronok szivárognak amikor a szerkezet és az aktív réteg kapcsolata nem tökéletes és ekkor szivárgási áram jön létre. Ez a jelenség ronthatja a cellák villamos jellemzőit. Ezt nevezzük PID-nek (Potential

Induced Degradation), teljesítmény fokozatos romlása a kristályos szilícium modulok esetén. Kutatások kimutatták, hogy az a jelenség a nedves éghajlaton sokkal nagyobb valószínűséggel fordul elő. Illetve a szivárgási áram nagysága a növekvő páratartalom hatására nő [7].

## 6. Összefoglalás

Összességében tehát elmondható, hogy a napelemek üzemelésük során olyan környezeti hatásoknak és tényezőknek vannak kitéve, amelyek gyorsíthatják az elöregedésüket. Egyes hatások, mint például a hőmérséklet, a napelemek gyors tönkremenetelét is okozhatják.

## Irodalom

- [1] Bodnár, I. (2019). *Napelemek működésének alapjai, a napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. ME, p. 108. ISBN 978-615-00-456-65.
- [2] Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., Mohsen, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94-113. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- [3] Bodnár, I. (2018). Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient. *Acta Polytechnica Hungarica*, 15(4), 59-82.
- [4] Bodnár, I. (2017). Napelem hőmérsékletfüggésének kísérleten és szimuláción alapuló vizsgálata. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*, XII(4), 195-206. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2017.4.195-206>
- [5] Silvestre, S., Chouder, A. (2008). Effects of shadowing on photovoltaic module performance. *Progress in Photovoltaics*, 16(2), 141-149. <https://doi.org/10.1002/pip.780>
- [6] Szemler, Z. (2014). Hibatípusok a napelemes rendszereknél. *Magyar Energetika*, XXI(4), 14-17.
- [7] Hara, K., Jonai, S., Masuda, A. (2015). Potential-induced degradation in photovoltaic modules based on n-type single crystalline Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, 361-365. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.04.037>
- [8] Badiee, A., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D. (2016). The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.008>