

# Napelemek állapotfelmérése és károsodásvizsgálata

**Bodnár István**

Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, [3515 Miskolc-Egyetemváros]  
istvan.bodnar@uni-miskolc.hu

---

*Absztrakt: A degradáció a napelemeknél egyrészt természetes alapon, másrészt a környezeti hatások révén indukált módon játszódik le. A napelem a degradációs folyamat során továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a napelem modul rendszerszinten problematikusvá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet. A napelemek helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérésének egyik lehetséges módszere a hőkamerás felvételekkel történő hiba-azonosítás. A Flash-teszt a napelemek állapot-felmérésének egyik „ex-situ” módszere. Lényege, hogy villamos mérések útján határozzuk meg egy Napszimulátor segítségével megvilágított napelem villamos paramétereit és felvázolhatjuk az U-I görbéjét. Az elektrolumineszcencia vizsgálat lényege, hogy a napelemeket fordított üzemben működtetjük, azaz egy egyenfeszültségről tápláljuk meg. Ilyenkor a napelem fogyasztóként működik és fényt/hőt bocsát ki. Kutatómunkám során ezen módszerekkel vizsgáltam napelemeket.*

*Keywords: napelem, állapotfelmérés, károsodás, termográfia, Flash-teszt, El-teszt*

---

## 1 Bevezetés

Egy napelem teljesítménye és hatékonysága különböző tényezők miatt romolhat, mint például: hőmérséklet, páratartalom, besugárzás mértéke vagy mechanikai behatás. Ezek különféle indukált öregedést, anyagszerkezeti átalakulást idézhetnek elő. Tipikusan korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon, de nem elhanyagolható a napelemeket borító edzett üveg térfogati és/vagy felületi struktúrájának a megváltozása sem. A napelemek degradációját szimulációs modellezéssel próbálják megjósolni, amelyek első sorban anyagtechnológiai modelleket alkalmaznak. A teljesítménycsökkenési arány akár 0,6%-5%/év is lehet, de a szimulációs értékek nem feltétlen a legpontosabbak ugyanis a

degradáció mértéke nemcsak a környezeti feltételektől, hanem az alkalmazott napelemtechnológiáktól is függ [1].

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. Egyes gyártók magát a hatékonyságromlási görbét is elérhetővé tették. A valóságban az üzemeltetés és karbantartás jellegétől ezen értékek jelentősen eltérhetnek. A gyakorlatban a napelemek hőmérséklete a leggyakoribb degradációs ok. A napelemeknek is van hőtehetetlensége, így a változó megvilágítások során ún. hőmérsékleti tranzien্স folyamatok játszódnak le. Ezek a folyamatok egyfajta hőkezelési ciklusnak tekinthetők, amely folyamat során indukált degradáció alakul ki. Egy panel részleges árnyékba kerülése vagy megnövekedett degradációja hőmérsékletkülönbséget hoz létre a napelempanelen, ami tovább fokozza a teljes panel tönkremenetelét. E hatások lényegében gyorsító paraméterként tekinthetők, így a napelemek gyártó által garantált használati időhöz képest hamarabbi tönkremenetelét eredményezik. Ezen indukált tönkremenetel mikrorepedések megjelenésével, a korábbi mikrorepedések kiszélesedésével, cellarész-leválásával járhat [2, 3].

A napelemek felületén lerakódó szennyeződések hőmérsékletnövelő hatást eredményeznek. Magyarországon a leggyakoribb szennyezőanyag a szálló por. Az Egyenlítőhöz közeledve a sivatagi homok, míg a nagyvárosokban a közlekedésből származó légszennyezőanyagok okozzák a legnagyobb problémát. Mivel az egyes szennyezőanyagforrások szemcseméretében, sűrűségében és fényáteresztőképességében jelentős eltérések tapasztalhatók, ezért azok napelem termelésére gyakorolt hatásai is igen széles skálán mozognak. Európában éves szinten akár 5-20%-os termelőkiesést is okozhatnak a szennyeződések. Sivatagi környezetben egy-egy homokvihar után a napelemek termelőképessége 75-90%-kal is csökkenhet [2, 3].

Egyes szennyezőanyagok, mint például a homok, formájukat és keménységüket tekintve karcoló, koptató hatást is kifejtenek a napelem felületén, ami a felületi struktúra megváltozását és maradó hatásfokromlást eredményez (mert megnövekedik a visszatükröződés). A szerves, növényi, vagy állati eredetű lerakódások bediffundálhatnak a napelemet borító üveglap szerkezetébe, így tartós árnyékhatást eredményezhetnek, továbbá az üveglapot is elszínezhetik. Eltávolításuk száraz tisztítási módszerekkel nem célszerű. Ilyen szennyezőanyagoknál lágyvíz, vagy speciális tisztítófolyadék alkalmazása javasolt [4].

A szálló porok jelentős része egy esőzést követően lefolyik a napelem felületéről, azonban a napelem sarkain feltorlódhat és iszapos réteget képezhet. Ez további problémákhoz vezethet, első sorban túlhevülést eredményez. A szálló pornál nagyobb problémát a madárürülék okoz, amely a napelem felületén megszilárdul és hőszigetelő kérget képez. Amennyiben csak egy kis része szennyeződik a

napelemnek és nem az egész beárnyékolódik, akkor a ByPass diódák nem aktiválódnak és a Hot-Spot (Forró-Pont) jelenség is kialakulhat, ami hosszabb távon visszafordíthatatlan kárt okoz a napelem működésében [4, 5].

Mivel az árnyékhatásnak kitett cella árnyékoláskor ellenállásként viselkedik, az azon átfolyó áram további (Jolule) hőt generál. A szennyezőanyag gátolja ennek a hőnek a kisugárzását, ezért a cella túlmelegszik. A lokális túlmelegedés a cellák kiégést, azonnali tönkremenetelét is okozhatja, amely a teljes napelem panel működésére hatással van. Csökken a panel áramerőssége, feszültsége és a teljesítménye, tehát a hatásfoka. Amennyiben egy panelen belül több cella is kiég, akkor az a panel működésképtelenségéhez vezet és elkerülhetetlen a panel cseréje. Ezért célszerű ezeket a szennyeződések mihamarabb eltávolítani. A madárürülék eltávolítása a legnehezebb feladat. Hatékonyan csak napelem-tisztítófolyadék, vagy nagynyomású lágyított víz alkalmazásával távolítható el. A túl kemény víz a száradást követően vízkő foltokat hagy a napelem felületén, ami szintén csökkentheti annak teljesítményét. A napelemek tisztítására erőműmérettől függően különböző módszereket dolgoztak ki. A kisméretű robotoktól kezdve a takarító járművekig széles választék áll a rendelkezésünkre.

Napjainkban egyre gyakoribb, hogy a napelemeket kis dőlésszögben, vagy teljesen síkfelületen helyezik el. Ezen elhelyezést a tartószerkezet által okozott többlet terhelés, vagy a költségmegtakarítás indokolja. Főleg lapos fedélszerkezetű épületeknél alkalmazzák ezt a telepítési módszert. Ezen telepítésnél a felületen fokozottabban rakódhatnak le szennyeződések, így a megfelelő gyakoriságú és módszerű tisztítás jelentősége megnő. A napelem felületén lerakódó szennyező anyagok többnyire szabad szemmel is észrevehetőek, azonban az általuk okozott hatások csak mérési úton határozható meg.

A napelemek minél nagyobb hatásfokkal és minél hosszabb élettartammal való üzemeltetésének záloga a rendszeres állapotfelmérés és karbantartás.

## **2   Állapotfelmérés módszerei**

Az állapotfelmérésre számos módszer terjedt el az „in-situ” és az „ex-situ” módszereket ideértve. A napelemek úgynevezett in-situ, azaz helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérésének egyik lehetséges módszere a hőkamerás felvételekkel történő hibaazonosítás. Az elv azon alapul, hogy a felületi sérülések, árnyékhatások és kiégések okozta tönkremeneteli pontokon, zónákban a napelem érintkezési, átmeneti, vagy állandósult ellenállása nagyobb, mint az ép celláké, pontoké, felületeké. A nagyobb ellenálláson az átfolyó áramok hatására felszabaduló Joule hő tovább melegíti a hibás (sérül, vagy szennyezett) cellákat, így a napelempanelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások.

A gyártási hibák rendszerint mikorepedésként jelentkeznek, amely a forrasztási helyeken alakulnak ki és csak a hőhatásövezetben, kis hatótávon okoznak átmeneti ellenállást, így a túlmelegedés is csak lokális, azaz egy cellán belül is változó a hőmérsékleteloszlás. Az árnyékhatás rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérsékletdifferenciát okoz. Az árnyékhatás származhat telepítési és üzemeltetési problémákból.

Egy napelempanelen belül még teljesen ép (gyári) állapotban is előfordulhat 15 °C hőmérsékletkülönbség. Ezt számos tényező befolyásolja, mint például a telepítés jellege, a jellemző széljárás, annak eloszlása. Ennél nagyobb hőmérsékletkülönbség csak akkor jöhet létre, ha a panelen belül gyártási, telepítési, vagy üzemeltetési hibák miatt károsodott cellák találhatók.

## 2.1 Termovíziós állapotfelmérés – forró pontok feltárása

Minden tárgynak van energiája, amit elektromágneses sugárzással a felületen bocsált ki, ha a hőmérséklete nagyobb az abszolút 0K-nél (-273°C). Ez szabad szemmel nem látható tartomány (0.78 -1000 μm). A hőképkalkító berendezések, mint az ipari hőkamerák ezt térképezik és alakítják át láthatóvá. Ez úgy történik, hogy mesterséges színekkel különböző árnyalatokhoz különböző hőmérsékletet rendelnek. A meleg színek (világossárga) általában a magasabb hőmérsékletűeket, míg a hidegebb színek az alacsonyabbakat jelölik. A számszerűsítés érdekében a hőkamerás képhez, egy színskálát rendel számértékekkel, mellyel leolvasható az adott felület hőmérséklete. A hőkamerás felvételek készítésekor fontos a minőség érdekében a kamera tárgyhoz viszonyított helyzete. A megfelelő képkalkotáshoz ügyelni kell a kamera magasságára szögére és távolságára a felülethez képest. Mivel a napelemek ideális dőlésszöge kb. 35-45°, ehhez képest a kamera szöge 60-120° lehet. A távolság a kamera felbontásától függ, de többségében ez 2-3 méter között van. Egy megfelelő hőkamerás eszközzel és vele rendszeres méréssel a napelemes rendszerek hibái jól feltérképezhetők és időben orvosolhatók. Ezen hibák megállapítási lehetősége és ezek elemzése alapvetően a munkám témája. Ennél a megállapítási módszernél az átlaghőmérséklettől való eltérés, túlmelegedés állapítható meg és ebből lehet a rendellenességre, hibára gyanakodni, amely azért fontos, mert a napelem alapanyaga, a szilícium tulajdonságai megváltoznak hő hatására [6, 7].

A modulok gyártása nagy precizitású technológiai folyamatok során történik, de így is előfordul, hogy hiba keletkezik a termékben, melyet még a vizsgálatok sem feltétlenül tudnak egyből megállapítani. Ezek az eltérések, hibák idővel a rendszer üzeme közben a valós természeti feltételek hatására felerősödhetnek és egyre nagyobb problémát okoznak. Szembetűnővé csak a megfelelő vizsgálat által válhatnak. A gyártási hibák rendszerint mikorepedésként jelentkeznek, amely a forrasztási helyeken alakulnak ki és csak a hőhatásövezetben, kis hatótávon

okoznak átmeneti ellenállást, így a túlmelegedés is csak lokális, azaz egy cellán belül is változó a hőmérsékleteloszlás. Az árnyékhátas rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérséklet-differenciát okoz. Az árnyékhátas származhat telepítési és üzemeltetési problémákból [6, 7].

Az 1. a ábrán nagy kiterjedésű, közel egyenletes eloszlású (madárürülék) szennyezettség figyelhető meg, valamint a kis intenzitású esőzés miatti koszmegfolyás. A legnagyobb szennyezettségi ponton lévő cella kiégett. Az 1. b ábrán növényzet okozta árnyékhátas miatti cella túlmelegedés és kiégés figyelhető meg.



1. Ábra

Napelempanelekről készült hőkamerás felvételek, koszthatás (a) és növényzet okozta árnyékhátas (b) következményeinek detektálására vonatkozóan.

## 2.2 Flash-teszt – villamos paraméterek meghatározása

A Flash-teszt a napelemek állapotfelmérésének egyik „ex-situ” módszere. Lényege, hogy villamos mérések útján határozzuk meg egy Napszimulátor segítségével megvilágított napelem villamos paramétereit. A mérés során a napelem aktuális feszültségének, áramerősségének és teljesítmények meghatározása mellett felvázolásra kerül az U-I karakterisztika is. Flash-teszt során a napelemet egy fekete dobozban helyezik el, ahol rendszerint egy LED-Halogén reflektorokból kialakított Napszimulátorral világítják meg [8].

Az 1. táblázat 3 darab napelemen végzett Flash-teszt eredményeit mutatja be. A mérések során meghatározásra kerültek a napelemek üresjáratú és munkaponti feszültségei, a rövidzárási és munkaponti áramerősségei, a munkaponti teljesítmény és a Fill faktor, továbbá felvázolásra kerültek az U-I jelleggörbék.

A 2. ábra a mérések során felvételre került U-I karakterisztikákat szemlélteti a fentebb is megnevezett három, eltérő viselkedésű napelempanelre vonatkozóan. Jól megfigyelhető, hogy a PV23160 panel (1. a ábra) és a PV73760 panel (2. b

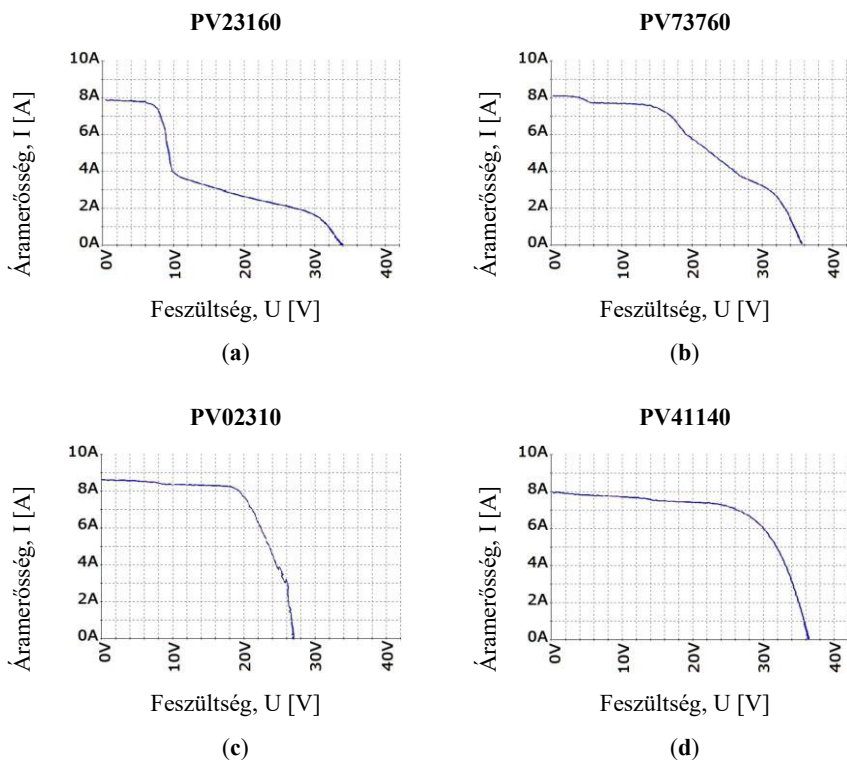
ábra) U-I görbéje nem felel meg a hibamentes napelem panel jellemzőinek, sőt igencsak messze van mind az ideális, mind a gyakorlati görbétől. A PV02310 modulnál (2. c. ábra) ugyan jellegét tekintve hasonlít a gyakorlati görbéhez, azonban a letérés már kisebb feszültség szinten megtörténik, amely szintén nem működő cellák jelenlétére utal. Az 1. d. felvétel egy természetes ütemben öregedett napelem panel U-I görbéjét szemlélteti.

1. Táblázat

A vizsgált napelem panelek Flash-tesztel kapott villamos paramétereit.

Paraméter neve, mértékegysége	PV23160	PV73760	PV02310	Adattábla
Munkaponti teljesítmény [W]	68,28	144,23	180,50	260±3%
Munkaponti feszültség [V]	9,52	20,91	22,29	34,80
Munkaponti áramerősség [A]	7,17	6,90	8,10	7,47
Üresjáratú feszültség [V]	34,31	35,54	26,69	37,70
Rövidzárlati áramerősség (A)	7,85	8,32	8,65	7,92
Fill faktor (%)	25,40	83,60	78,20	-

A napelem panelek gyártói adatok alapján 260 Wp teljesítményűek és 3%-os teljesítménytoleranciára garantáltak, továbbá az első 10 üzemévben 90%-os, az azt követő 10-25 év közötti időszakban pedig 85%-os teljesítménygarancia érvényes a panelekre. Lineáris ütemű természetes öregedést feltételezve, az üzembe helyezés és a bemérés között eltelt mintegy 4 éves időszak alatt a toleranciát is figyelembe véve maximálisan 17,888 Wp teljesítménycsökkenés engedhető meg. Ez azt jelenti, hogy a panelek mérés kori teljesítménye hibátlan, tiszta panelek esetében 242,112 Wp teljesítményt meghaladónak kell lennie. Amennyiben 3%-os mérési bizonytalanságot vesszük figyelembe, akkor az elvárt teljesítményérték 234,849 Wp. Az ettől kisebb teljesítményt nyújtó napelem panel gyorsabban öregedett, mint ahogy az várható lenne, vagy üzemeltetési problémákból adódóan meghibásodott. Ezen panelek esetében a hőkamerás vizsgálatok 15 °C-nál nagyobb hőmérsékleteltéréseket mutattak a napelem panelen belül, így a Flash-tesztel visszaigazolták, hogy egyes napelem panelek valóban nem teljesítik az elvárt teljesítményt. A gyorsabb öregedés, illetve károsodás okának meghatározására készültek el az Elektrolumineszcencia-vizsgálatok.



2. Ábra

U-I karakterisztikák: (a) PV23160 panel; (b) PV73760 panel; (c) PV02310 panel; (d) PV41140 panel.

### 2.3 Elektrolumineszcencia módszer - károsodáselemzés

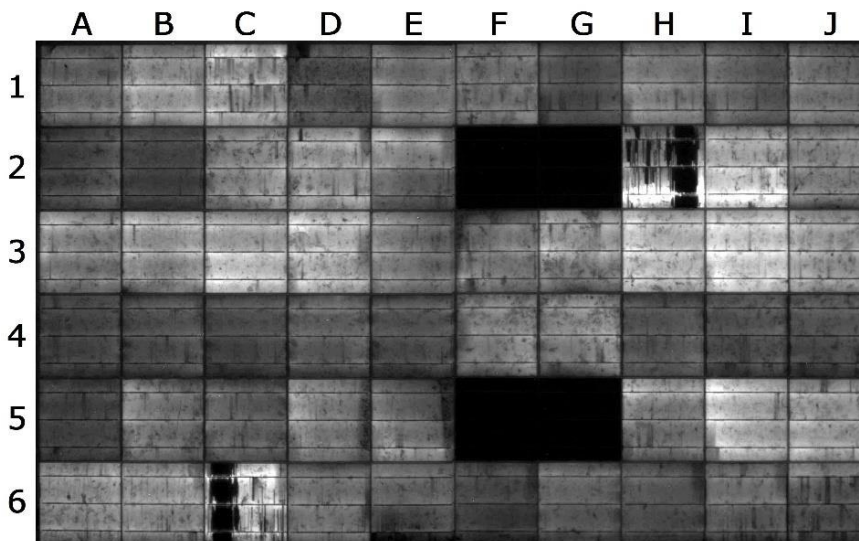
Az elektrolumineszcencia vizsgálat (EL-teszt) lényege, hogy a napelemeket fordított üzemben működtetjük, azaz egy egyenfeszültségű tápegységről tápláljuk meg. Ilyenkor a napelem fogyasztóként működik és fényt/hőt bocsát ki. Ezt a kibocsátást kamerával pásztázva feltárhatók a napelem hibái. A kibocsátott fény/hő intenzitása a napelem ellenállásának függvénye. A nagyobb ellenállással rendelkező részek fekete foltként jelennek meg a felvételeken, ezáltal a hibák egyértelműen beazonosíthatók [9, 10, 11, 12].

A következő 3. – 6. ábrák az előző fejezetben bemutatott napelem panelek elektrolumineszcencia módszerrel történő vizsgálat eredményeit szemléltetik. A képek jól összeegyeztethetők a panelek Flash-tesztekkel kapott U-I görbéihez. A 1. táblázathoz hasonlóan az elektrolumineszcencia felvételek a károsodás mértékének sorrendjét követik. A sötét részek a hibákat, a világos területek a jól

működő cellarészeket mutatják. Először szemléljük meg a 3. ábrát, amely a PV23160 jelű panel elektrolumineszcencia felvételét mutatja. A Flash-teszt alapján ez a panel a leginkább károsodott, de legalábbis nem tudta reprodukálni az elvárt teljesítményt. A második és ötödik sorban (F2, G2, F5 és G5) vannak nem működő cellák. Ezért ezek a cellák egyáltalán nem termelnek áramot, sőt ellenállásként hatnak a velük sorba kötött cellákra nézve.

Mivel a panelen belül az 1 és a 2 jelű sorban lévő cellák egy sorra vannak felfűzve, ezért ez a cellasor nem képes a szükséges feszültség szintet elérni. Az 5 és a 6 jelű cellasor hasonlóan viselkedik. A 3 és a 4 jelű cellasor alkalmasabb energiatermelésre, mert az nem tartalmaz kritikus hibát. A legtöbb cella jó állapotban van, de a H2 és a C6 jelű cellákban kritikus repedések figyelhetők meg, amelyek tovább csökkentik a cellasor működőképességét. Mindezek alapján elmondható, hogy a napelem panel mérésből származó feszültsége miatt csak a gyártó adatainak 27,4%-a. Gyakorlatilag csak a 3 és a 4 jelű cellasor képes energiatermelésre, azonban a másik két, rosszul működő cellasor lerontja annak működési tulajdonságait.

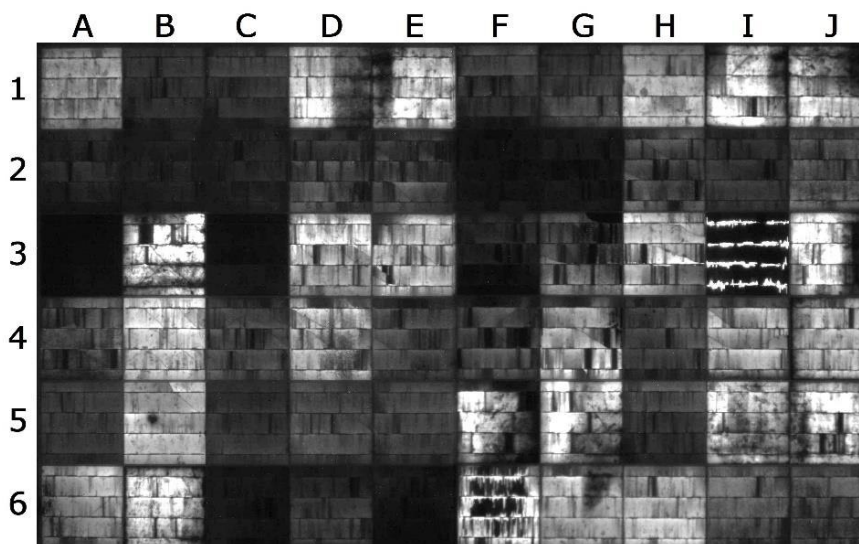
A 4. ábrán egy olyan napelem panel (PV73760) elektrolumineszcencia képe látható, amelynek teljesítménye körülbelül a fele a névleges csúcsteljesítményének (144 Wp, 55,5%, lásd 1. táblázat) a Flash-teszt alapján. Látható teljes cellás kiegészítés (A3), nem kritikus mikropredések (B4, C4), kritikus repedések (I3), lokális forrasztási hiba (B5). Számos cella ujjnyi méretű repedéseket tartalmaz (például A4, D3, H3).



3. Ábra

A PV23160 jelű napelem panel elektrolumineszcencia felvétele, amely a Flash-teszt alapján meghibásodottnak minősül.



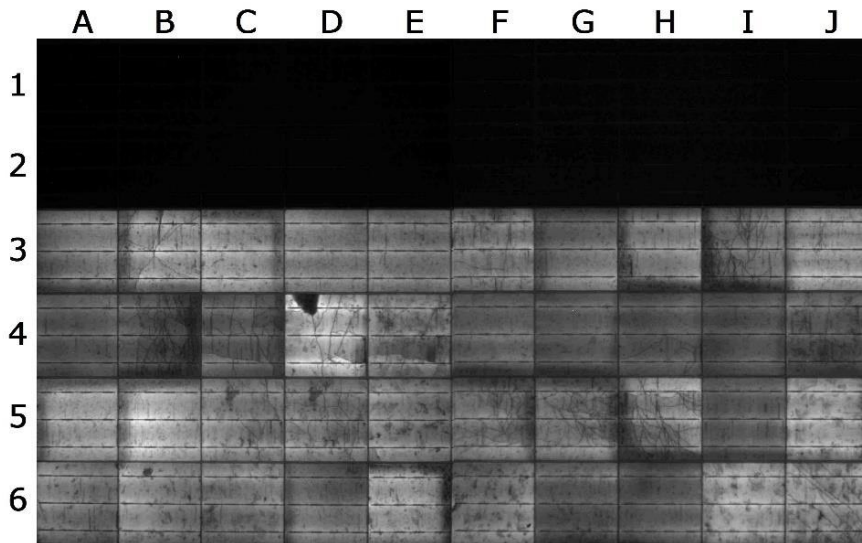


4. Ábra

A PV73760 jelű, súlyosan károsodott napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

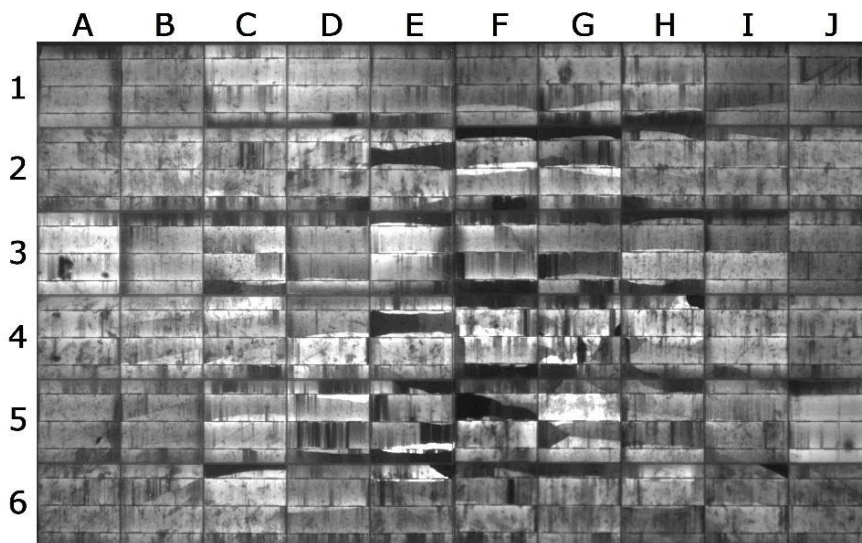
Az 5. ábra egy olyan panel (PV02310) elektrolumineszcencia felvételét mutatja, amely egy napelemtartó asztal legalsó sorában üzemelt. Minden bizonnyal a napelemtartó asztalok közötti távolság nem megfelelően lett kiszámítva, vagy helytelenül lett kimérve a telepítés során, ezáltal az 1. és 2. cellasor túl közel volt a talajhoz, így az előtte lévő asztal felső sorában lévő paneljei gyakran árnyékolták (főleg a kis beesési szögű napsütéses időszakokban). Ez egy igen gyakori tervezési és/vagy telepítési hiba eredménye. Ezenkívül sok cellán repedések és ún. pókhálóstörések láthatók (B3, B4, H5, I3). A D4 cellán celladarab-leválás, a B6 cellán pedig helyi forrasztási hiba figyelhető meg. A nem működő két sor miatt a mért feszültség 20,91 V (a normál érték 60,1%-a, lásd 1. táblázat). A másik négy sor továbbra is képes áramot termelni.

A 6. ábrán a PV41140 jelű napelem panel elektrolumineszcencia képe látható, amely ugyan nem érte el az elvárt teljesítményszintet, de már jobban közelítette a gyártói adatot. Ennek a modulnak a teljesítménycsökkenése több mint 12,8%, amely a 3%-os tűrést is figyelembe véve csak 10 üzemév után következhetett volna be. A mért maximális teljesítmény 226,7 Wp volt. Megfigyelve a 6. ábrát az E, F és G oszlopokban széles (krikus) repedések, leválások láthatók, azaz részlegesen működésképtelen cellák. Hasonló részleges cellaszakaszleválások okozta „vakfoltokat” tartalmaznak pl. a C6, E4, F5 cellák. Sok cella ujjnyi méretű repedéseket tartalmaz (pl. C2, D5, H5), továbbá számos cellán mikrorepedések is jól kivehetők (A6, B6, C4,...). Lényegében ez a panel sem teljesíti az állapotára vonatkozó előírásokat, de működése nem tekinthető kritikusan alacsonynak.



5. Ábra

A PV02310 jelű, állandó részleges árnyékhatásnak kitett napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.



6. Ábra

A PV41140 jelű, átlagosan sérült (öregedett) napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

### Conclusions 10 pt

Az elvégzett kutatómunka alapján elmondható, hogy az árnyékoló növényzet súlyos hatással van a napelemek működésére és élettartamára. Ez egy gyakori probléma földfelszíni telepítésű rendszereknél, amit csak rendszeres ellenőrzéssel és a talaj megfelelő gyomtalanításával lehet megelőzni. A hőkamerás vizsgálatokkal kimutathatók az úgynevezett forró pontok (Hot-Spot), valamint a napelem modul teljes felületére vonatkoztatott hőmérsékleteloszlás, amely a hibadetektálás első lépése.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az árnyékhatások által okozott napelem-meghibásodás esetén garanciális cserére nem számíthatunk, mert a meghibásodás nem gyártói, hanem üzemeltetői hiba következménye. Javasolt tehát egyrészt még a telepítéskor, megfelelő érzékenységgű hőkamerával feltárni a napelem panelek állapotát, illetve az esetleges árnyékjelenségeket, továbbá évi rendszerességgel ellenőriztetni. Amennyiben már a telepítést követően, az első használat során is tapasztalhatók cella-defektusok, akkor célszerű egyből a forgalmazóhoz/gyártóhoz fordulni, mert akkor még érvényesíthető lehet a garancia.

Hőkamerás vizsgálatokkal a hiba megléte ugyan detektálható, azonban annak típusa és közvetlen hatása a napelem villamos paramétereire és tulajdonságaira nem egyértelműen definiálható, ezért további mérések végzése szükséges. Ezen mérések az ún. „ex-situ” módszerek, amelyek elsődlegesen a Flash-tesztet (villamos tulajdonságok mérése) és az Elektrolumineszcencia-vizsgálatokat (hibatípus feltárása) jelenti. E vizsgálatok bebizonyították, hogy a nem szakszerűen üzemeltetett napelemek hatékonysága és élettartama is csökkent.

### References 10 pt

- [1] Skoplaki, E., Palyvos, J.A.: On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. Vol. 83. No. 5. 2009. pp. 614-624.
- [2] Siddiqui, R., Kumar, R., Jha, K.G., Morampudi, M., Rajput, P., Lata, S., Agariya, S., Nanda, G., Raghava, S.S.: Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability. *Energy*. Vol. 107. No. 15. 2016. pp. 550-561.
- [3] Ndiaye, A., Kébe, C.M.F., Bilal, B.O., Charki, A., Sambou, V., Ndiaye, P.A.: Study of the Correlation Between the Dust Density Accumulated on Photovoltaic Module's Surface and Their Performance Characteristics Degradation. *Innovation and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas*. 2018. pp. 31-42.

- [4] Gürtürk, M., Benli, H., Ertürk, N.K. Effects of different parameters on energy – Exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 92. No. 9. 2018. pp. 426-439.
- [5] Alghamdi, A.S., Bahaj, A.S., Blunden, L.S., Wu, Y.: Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems. *Energies*. Vol. 12. 2019. paper. 2923.
- [6] Ali, M.U., Saleem, S., Masood, H., Kallu, K.D., Masud, M., Alvi, M.J., Zafar, A.: Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study. *International Journal of Energy Research*. Vol. 1. 2021. p. 12.
- [7] Ikejiofor, O.E., Asuamah, Y.E., Njoku, H.O., Enibe, S.O.: Detection of Hotspots and Performance Deteriorations in PV Modules under Partial Shading Conditions Using Infrared Thermography. *Engineering Proceedings*. Vol. 2. 2020. p. 71.
- [8] Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Alonso-García, M.C., Santos, J.D., Morales-Aragón, J.I., Alonso-Gómez, V., Moretón-Fernández, Á., González-Rebollo, M.Á., Martínez-Sacristán, O.: Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: Experimental study and comparison. *Energy*. Vol. 205. 2020. paper. 117930. p. 13.
- [9] Berardone, I., Lopez-Garcia, J., Paggi, M.: Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle. *Solar Energy*. Vol. 173. 2018. pp. 478-486.
- [10] Gerber, A., Huhn, V., Tran, T.M.H., Siegloch, M., Augarten, Y., Pieters, B.E., Rau, U.: Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 135. 2015. pp. 35-42.
- [11] Ballestín-Fuertes, J., Muñoz-Cruzado-Alba, J., Sanz-Osorio, J.F., Hernández-Callejo, L., Alonso-Gómez, V., Morales-Aragones, J.I., Gallardo-Saavedra, S., Martínez-Sacristan, O., Moretón-Fernández, Á.: Novel Utility-Scale Photovoltaic Plant Electroluminescence Maintenance Technique by Means of Bidirectional Power Inverter Controller. *Applied Sciences*. Vol. 10. 2020. paper. 3084.
- [12] Parikh, H.R., Buratti, Y., Spataru, S., Villebro, F., Reis Benatto, G.A.D., Poulsen, P.B., Wendlandt, S., Kerekes, T., Sera, D., Hameiri, Z.: Solar Cell Cracks and Finger Failure Detection Using Statistical Parameters of Electroluminescence Images and Machine Learning. *Applied Sciences*. Vol. 10. 2020. paper. 8834.