

MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT  
BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS  
ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA**

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE

**Matusz-Kalász Dávid**  
energetikai mérnök (BSc),  
okleveles gépészmérnök (MSc)

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA  
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET  
VEGYIPARI GÉPÉSZETI TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ  
**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**  
DSc, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ  
**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**  
DSc, egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐ  
**Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán**  
egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ  
**Dr. habil. Bodnár István**  
egyetemi docens

**Miskolc**  
**2023**

## TARTALOM

TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA .....	III
JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA .....	V
1. BEVEZETÉS .....	7
2. A NAPELEMES ENERGIATERMELÉS HELYZETE MAGYARORSZÁGON .....	9
2.1. A villamos erőművi rendszer felépítése .....	9
2.2. A villamosenergetikai elosztórendszer működése .....	10
2.3. A villamosenergia-termelés és -felhasználás egymáshoz igazítása .....	11
3. A NAPELEMES RENDSZEREK BEMUTATÁSA .....	13
3.1. A napelemek fejlődéstörténete .....	13
3.2. A napjainkban széleskörben alkalmazott és kutatott napelem típusok .....	14
3.2.1. Szilícium napelemek .....	14
3.2.2. Perovszkit napelemek .....	15
3.2.3. Organikus napelemek .....	16
3.3. A napelemes rendszerek típusai .....	17
3.3.1. Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény feletti napelemes erőművek .....	17
3.3.2. Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény alatti napelemes erőművek .....	17
4. A NAPELEMES MŰKÖDÉSE ÉS ELEKTRONIKAI MODELLJE .....	21
4.1. A napelemek fizikájának rövid ismertetése .....	23
4.2. A napelem áramköri modellje .....	24
4.3. Félvezetők hőmérsékletfüggésének vizsgálata .....	27
4.4. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terheletlen napelempanelen és természetes megvilágítottság esetén .....	29
4.5. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terhelt napelempanelen .....	32
4.5.1. Terhelt napelempanel hőtranzien jelensége 700 W/m <sup>2</sup> fényintenzitás mellett .....	32
4.5.2. Terhelt napelempanel hőtranzien jelensége 900 W/m <sup>2</sup> fényintenzitás mellett .....	33
5. A FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA .....	35
5.1. Szennyeződések és forrásaik .....	35
5.2. A lerakódások formái a napelem felületén .....	35
5.3. Szennyezők hatásának vizsgálata .....	37
5.4. A mérések menete .....	37
5.5. Terheletlen napelempanel szennyeződésvizsgálata .....	39
5.5.1. Feszültségesés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén .....	39
5.5.2. Áramerősség csökkenés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén .....	41
5.6. A szennyeződésvizsgálat értékelése felületre való kijuttatási mód szerint .....	42
5.6.1. Szennyeződésvizsgálat földdel .....	42
5.6.2. Szennyeződésvizsgálat homokkal .....	42
5.6.3. Szennyeződésvizsgálat hamuval .....	42
5.6.4. Szennyeződésvizsgálat városi porral .....	43
5.7. Terhelt napelempanel szennyeződésvizsgálata organikus anyagokkal .....	43
6. ÁLLAPOTFELMÉRÉS ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLAT .....	44
6.1. Termográfias hibakeresés .....	45
6.1.1. A napelemek üzemi hőmérséklete és a hő keletkezésének okai .....	46
6.1.2. Az optimális mérési körülmények .....	46
6.1.3. Hőkamerás állapotfelméréssel azonosítható hibák (kültéri mérések) .....	48

---

6.1.4. Laboratóriumi mérések hőkamerával.....	57
6.2. Flash teszt.....	59
6.2.1. A flash teszt mérőberendezése.....	59
6.2.2. A flash teszt eredménye.....	60
6.2.3. A flash teszt során kapott eredmények kiértékelése.....	63
6.2.4. A flash teszt eredmények statisztikai alapú bemutatása.....	65
6.3. Elektrolumineszcens vizsgálatok.....	68
6.3.1. A EL teszt mérőberendezése.....	68
6.3.2. Leggyakoribb EL teszttel azonosítható szilícium cella hibák.....	69
6.3.3. Megengedett hibahatárok.....	72
6.3.4. Erőművi modulok elektrolumineszcencia alapú teljes kiértékelése.....	72
6.4. EL kamera kiváltása hőkamerával.....	77
7. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	79
8. ÖSSZEFOGLALÁS.....	82
9. SUMMARY.....	83
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	84
PUBLIKÁCIÓS LISTA.....	85
ÁBRÁK JEGYZÉKE.....	87
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....	89
IRODALOM.....	90

## TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA

Matusz-Kalász Dávidot már BSc-s hallgató kora óta ismerem. Energetikai mérnök alapszakon a *Környezetvédelem* c. tantárgyat tanítottam az évfolyamának, amikor is Dávid nagy érdeklődést mutatott a megújuló energiaforrások és a környezetbarát energiatermelés iránt. Tanulmányait Gépészmérnöki MSc szakon folytatta, ahol diplomamunkáját témavezetésem alatt 2017 tavaszán készítette el. Miután sikeresen teljesítette MSc tanulmányait az iparban helyezkedett el, ígéretet téve, hogy nem szakítja meg a kapcsolatot az egyetemmel. 3 év iparban eltöltött szakmai tapasztalat szerzést követően 2019 őszén kezdte meg Ph.D tanulmányait a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolában. Kutatási témája a napelemekre koncentrál, amely egyre hangsúlyosabb tématerületté vált a villamosenergetikában. Munkája során alkalmazott és elméleti kutatást egyformán végzett, ahol a napelemek károsodását okozó üzemi körülmények feltárását és a napelemek állapotfelmérését tárgyalja.

Már a képzése kezdetén egyetértésben kidolgozott egy ütemtervet, amely tartalmazta a tantárgyak felvételének- és teljesítésének rendjét. Az elvégzendő mérések és szimulációk tervét, valamint felvázolta a publikációs lehetőségeket is.

Az elmúlt négy évben számtalan szakirodalmat tanulmányozott, amely alapján egy mérőrendszert, mérőkört alakított ki, amin számos kísérletet végzett. A mérések eredményeit angol- és magyar nyelvű konferencia-, illetve folyóiratcikkek formájában jelentette meg, valamint magyar és angol nyelven tartott konferencia előadásokat.

A napelemek egyre gyorsabb ütemben terjednek, nem csak világszinten, hanem már hazánkban is. Egyre sürgetőbb az olyan problémák megoldása, amelyek a napelem működéséből adódnak. Amennyiben a napelemek felülete szennyeződik, nem csak termelőkieséssel, hanem jelentős feszültségcsökkenéssel is számolnunk kell, ami első sorban a napelemes autóknál jelent nagy kihívást. Továbbá az átmeneti ellenállás- és hőmérsékletnövekedés révén a napelemek károsodnak. Dávid ebbe az irányba mozdította kutatását és erre vonatkozóan méréseket is végzett, amelyek összhangban állnak az igen kis számban rendelkezésre álló, de annál értékesebb szakirodalommal.

Folyamatosan részt vett intézeti kutatásokban, ezek révén igen sok, az értekezés készítése során is hasznosítható, gyakorlati tapasztalat birtokába jutott. Jelenleg is több projekt résztvevője (2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 – „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.”; 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00147 – OmegaSys – Élettartam tervező

és meghibásodás előrejelző komplex döntéstámogató rendszer, facility management szolgáltatás kialakításához) és előkészítés alatt álló pályázat közreműködője.

PhD értekezését folyamatos munkával készítette el. Az elkészített értekezés egyik legnagyobb értékének azt tartom, hogy a tudományos kutatások eszközszerével, tudatos és jól megválasztott alkalmazásával a mindennapi gyakorlat számára is hasznosítható eredményekhez vezetett.

Matusz-Kalász Dávid emberileg, oktatóként és kutatóként is kiváló kolléga, eddigi tudományos tevékenységével, PhD értekezésének elkészítésével az önálló, alkotó tudományos tevékenység végzésére való alkalmasságát messzemenően bizonyította.

Összefoglalva, az elkészült értekezést tartalmi és formai vonatkozásban igényesnek tartom, a jelölt eredményes munkája közvetett bizonyítéka a Karon folytatott doktori képzés magas színvonalának.

Miskolc, 2023. május 10.

Dr. habil. Bodnár István  
egyetemi docens, témavezető

**JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA**

**JELÖLÉSJEGYZÉK**

<b>Jel</b>	<b>Megnevezés</b>	<b>Mérték</b>
$A_{hasznos}$	a napelem hasznos felülete	m <sup>2</sup>
$c$	fénysebesség (közelítő értéke: $3 \cdot 10^8$ m/s)	m/s
$C_T$	parazita kapacitás	F
$e$	Euler-féle szám	-
$E$	energia	J
$E_{foton}$	foton energiája	J
$E_g$	félvezető anyag tiltott sávjának energiája	J
$E_{med}$	a megvilágítás intenzitásának medián értéke	W/m <sup>2</sup>
$E_{STC}$	a sztenderd megvilágítás intenzitása	W/m <sup>2</sup>
$eV$	elektronvolt (közelítő értéke: $1,602 \cdot 10^{-19}$ )	J
$f$	frekvencia	Hz
$h$	Planck állandó (közelítő értéke: $6,626 \cdot 10^{-34}$ )	Js
$I_0$	telítési (szaturációs) áramerősség	A
$I_d$	diódaáram	A
$I_{foto}$	fotoáram	A
$I_{mp}$	munkaponti áram	A
$I_R$	a napelem kivezetésén mérhető áramerősség	A
$I_{rz}$	rövidzárási áram	A
$k$	Boltzmann állandó (közelítő értéke: $1,38 \cdot 10^{-23}$ )	J/K
$m$	tömeg	kg
$p$	impulzus (lendület)	kg·m/s
$P$	hatásos villamos teljesítmény	W
$P_{fény}$	a napelempanel hasznos felületére érkező fénytelijsítmény	W
$P_{max}$	maximális teljesítmény, a napelem csúcsteljesítménye	W
$P_{mp}$	munkaponti teljesítmény	W

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA

$q_e$	elektron töltése (közelítő értéke: $-1,602 \cdot 10^{-19} C$ )	C
$R_p$	párhuzamos ellenállás	$\Omega$
$R_s$	soros ellenállás	$\Omega$
$R_t$	terhelő ellenállás	$\Omega$
$T$	hőmérséklet	$^{\circ}C$
$T_k$	a környezeti hőmérséklet	$^{\circ}C$
$T_n$	a napelem névleges hőmérséklete	$^{\circ}C$
$T_{nf}$	a napelem felületi hőmérséklete	$^{\circ}C$
$U_{mp}$	munkaponti feszültség	V
$U_R$	a napelem kivezetésén mérhető feszültség	V
$U_T$	termikus feszültség	V
$U_{\ddot{u}}$	üresjárási feszültség	V
$\eta$	hatásfok	-, %
$\lambda$	hullámhossz	m
$\varphi$	kitöltési tényező	-, %

**RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK**

DMM	digitális multiméter
DSC	<i>dye-sensitised cells (angol)</i> , fényérzékeny festett cellák
EL	<i>elektrolumineszcencia</i>
HMKE	háztartási méretű kiserőmű
KDSZ	Körszeti Diszpécser Szolgálat
MAVIR	Magyar Villamosenergia-ipari Rendszerirányító
MPPT	<i>maximum power point tracking (angol)</i> , maximálismunkapont-keresés
MVM	Magyar Villamos Művek
PV	<i>photovoltaic (angol)</i> , fotovoltaikus
PV/T	<i>photovoltaic/thermal (angol)</i> , napelem-kollektoros
PWM	<i>pulse-width modulation (angol)</i> , impulzusszélesség-moduláció
ÜIK	Üzemirányító Központ
VER	villamosenergia-rendszer

## 1. BEVEZETÉS

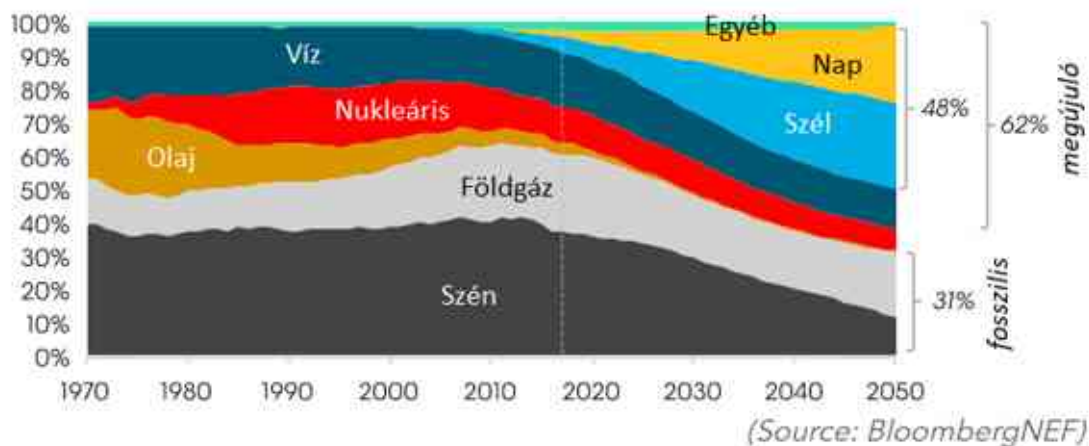
Régóta ismert tény, hogy a napenergia a legnagyobb potenciállal rendelkező energiaforrás, amely a Föld teljes energiaigényének sokszorosát is képes lenne kielégíteni. Amellett, hogy bőségesen rendelkezésre áll, tiszta és megújuló energiaforrás, ennek megfelelően illeszkedik a jelenleg érvényben lévő klímacélok teljesítéséhez. Az utóbbi évtizedek folyamán mért tendenciák egyértelműen azt az irányvonalat mutatják, hogy az emberiség a bolygónkra érkező napenergia minél hatékonyabb és egyre nagyobb mértékű kiaknázására törekedett.

Az európai országok mindig élen jártak a megújuló energiaforrások kiaknázásában, továbbá az utóbbi években Magyarország is csatlakozott az európai élbolyhoz a napelemes erőművi kapacitás tekintetében. Ugyanakkor a rendkívül népes és dinamikus fejlődő távol-keleti országok energiaéhsége óriási, amit célszerű minél több forrásból fedezni, akár napenergiával is. Továbbá a jelenleg legkörnyezetszennyezőbb országok közül több is ebben a régióban található, így érthető módon exponenciálisan nő az ázsiai napelemes erőművi potenciál. Csak Kínában az utóbbi években éves szinten több tíz gigawatt mennyiségben bővült a napelemes kapacitás. Ez a bővülési érték számos év során a már megépített, teljes németországi kapacitással volt egyenértékű.

Fontos kiemelni, hogy a napenergia esetében egy olyan energiaforrásról van szó, amely minél széleskörűbb kiaknázásában a lakosságnak is komoly szerepe van az országokat irányító politikai erők és gazdasági nagytőkék mellett. A háztartási méretű kiserőművek (HMKE) világszerte jelentős mértékben járulnak hozzá a napenergia hasznosításhoz. A hazai HMKE termelés éveken át dominálta a magyar napelemes energiatermelést, manapság a teljes kapacitás közel harmadát teszi ki. A HMKE azonban nem feltétlenül csak a villamosenergia rendszer termelési oldalán jelenik meg, hanem fogyasztási igényt a felhasználási helyen vált ki. Ezáltal csökkenti az országos hálózatra nehezedő energiaigényt, ugyanakkor a közcélú hálózat a hálózatra tápláló rendszerek esetében az „energiatárolást” is megoldja, vagyis megoldotta. Az utóbbi hónapok során viszont fontos, stratégiai változást sürgetett a villamos-energetikai szektor. A hazai rendszer, és egyben minden egyéb ország villamosenergia-rendszerének legnagyobb gondja az energiatárolás.

Ki kell emelni, hogy a napenergia egyre szélesebb körű kiaknázása az energiatárolás hiányának problémáit is tovább fokozza. Magyarország nem rendelkezik olyan földrajzi adottságokkal, hogy nagy kapacitású szivattyús-tározós erőművek építésével orvosolhatná a problémát. A közeljövőben gyors megoldásként funkcionáló akkumulátoros energiatárolás elterjedése várható. Továbbá, az *1. ábra* alátámasztja azt az általános véleményt, hogy várhatóan az elkövetkező évtizedekben még nem várható, hogy a megújuló energiaforrások teljes mértékben kiszorítsák az hagyományos energiaforrásokat, ez igaz Magyarországra is.





**1. ábra.** A különböző energiaforrások százalékos részesedése a világ villamosenergia-termeléséből.

Kétségtelen, hogy a napelemes energiatermelés esetében a legtöbb kritika az energiaátalakítás hatékonyságát éri, habár ez a paraméter is tudott javulni az elmúlt években. A napelemmodulok hatásfokát számos tényező befolyásolja a gyártástól, a telepítésen át egészen az üzemelés időtartamáig. A gyártástechnológia maximális hatékonyságától és a felhasznált anyagok tisztaságától függetlenül a külső tényezők (pl. szennyezett felület, terhelési szint, magas hőmérséklet) csökkenthetik a fotovoltaikus panelek villamos teljesítőképességét [1]. Ezek közül számos tényező hatása csökkenthető, vagy akár teljesen kiküszöbölhető.

Kazem és társai [2] jelentése szerint egy napelemes rendszer a termelt energia több mint 10%-át veszítheti el, ha nem tisztítják havonta. Mivel a felületi szennyeződések elsősorban az áramerősségsökkenést, valamint közvetetten feszültségcsökkenést is okozhatnak [3]. A földrajzi adottságoktól függően ez a veszteség akár a 17% -ot is elérheti [4, 5]. Amennyiben Magyarország elsősorban a napenergia-kiaknázás mellett tör lándzsát, a meglévő és tervezett erőművek maximális hatékonyságát biztosítani kell az energiatárolási lehetőségek kialakítása mellett.

A dolgozatomban bemutatom a napelemes erőművek magyar villamosenergia-rendszerben betöltött jelenlegi szerepét. Ezt követi egy rövid kitekintés a napelemek elméleti működésére vonatkozóan. A gyakorlati működést laboratóriumi és kültéri vizsgálatok során követtem figyelemmel, melyek során vizsgáltam a már említett, a hatékonyságot negatív irányába befolyásoló tényezőket. Többek között célom, hogy felvázoljam a felületi szennyeződések leggyakoribb forrásait, valamint megvizsgáljam azok hatását [6–8]. Ezen fejezetek teremtik meg az alapot a napelemes erőművek állapotfelmérésének - a tesztelési módszertan, hibakeresés és hiba beazonosítás - bemutatására. Célom felszámolni azt a hamis vélekedést, miszerint a napelemes erőművek igénytelen, karbantartást nem igénylő erőművek, vagy gazdasági szempontból beruházások, befektetések.

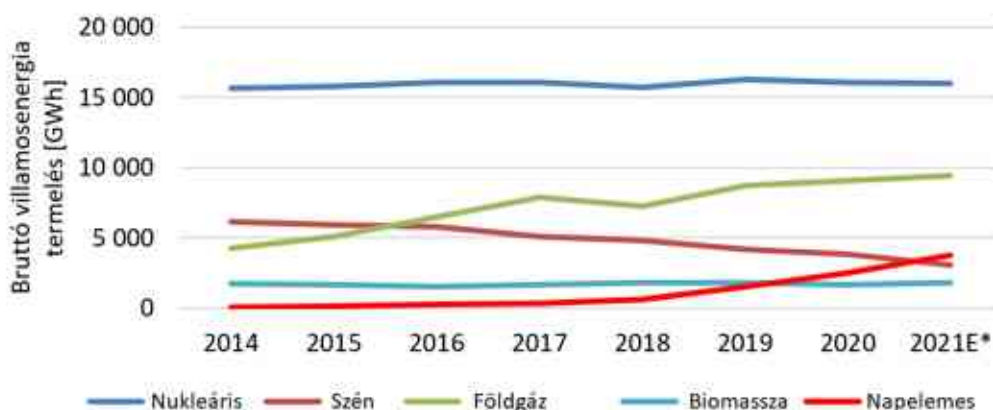
A dolgozatom a gyakorlati jelentőségében képvisel újdonságot, kihangsúlyozva, hogy a megszokott normáktól eltérően nagyobb figyelmet kell fordítani a teljesítményromlásra, élettartam-csökkenésre, tehát nem csak a gazdasági aspektusok számítanak.

## 2. A NAPELEMES ENERGIATERMELÉS HELYZETE MAGYARORSZÁGON

Az utóbbi időszakban számos rendelet- és jogszabály-módosítás szigorította a napelemes rendszerek üzembe helyezésének lehetőségét Magyarországon. Ennek legfőbb oka, hogy a hazai napelemes kapacitás dinamikusan növekedett és elért egy olyan szintet, amelyet a rugalmatlan és modernizálásra váró villamos hálózat már nehezen tud kezelni.

### 2.1. A villamos erőművi rendszer felépítése

Ahogy azt a 2. ábra mutatja, az utóbbi években a hazai villamosenergia-termelés jelentős részét a Paksi Atomerőműben állították elő. A széntüzelés visszaszorulásával a földgáz üzemű menetrendtartó erőművek léptek elő a képzeletbeli dobogó második fokára, valamint 2021-ben a napelemes energiatermelés is megelőzte a széntüzelést, ezzel előrelépett a harmadik helyre. Jól észrevehető a napenergia dinamikus térnyerése, azonban ez az érték még mindig jelentősen elmarad a nukleáris és földgáz alapú energiatermeléstől. Ennek legfőbb oka, hogy a napelemes erőművek kihasználtsága rendkívül alacsony, csupán 10-15%. Kihasználtság alatt azt a jellemzőt értem, hogy míg a Paksi Atomerőmű 2000 MW kapacitással szinte folyamatosan, alaperőműként üzemel, addig a napelemes erőművek 3000 MW-os összes kapacitása napi ciklikussággal és napi szinten csak 1-2 órán át termel ezen csúcserték közelében.

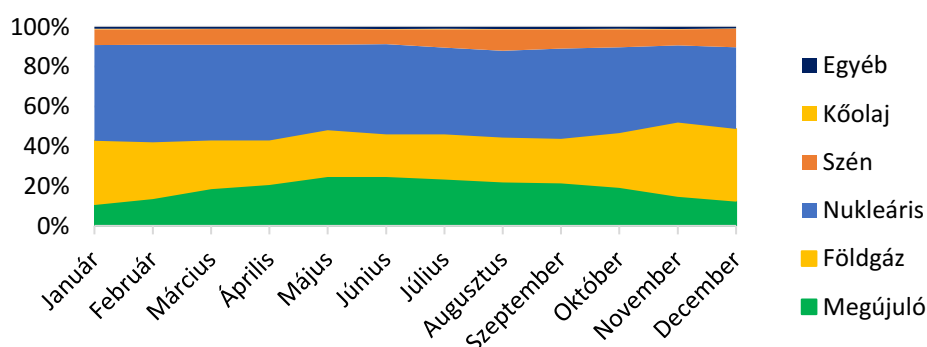


2. ábra. A legnagyobb villamosenergia-termelést biztosító energiaforrások Magyarországon 2014-2021 között [9].

Minden közcélú villamosenergia-termelő rendszernek rendelkeznie kell megbízható alaperőművekkel, amelyek éjjel-nappal az év minden szakaszában közel állandó teljesítményt adnak le, lehetőleg alacsony üzemeltetési költség mellett. A nagymértékű fogyasztási ingadozásokat hivatottak kiegyensúlyozni a menetrendtartó erőművek, amelyek már alacsonyabb kihasználtsággal üzemelnek ugyan, viszont az alaperőművekkel ellentétben sokkal rugalmasabbak, azokhoz képest gyorsabb indulási és leállítási idővel

rendelkeznek. Jellemzően ezek a földgáz- és kőolajüzemű erőművek, valamint a megújuló energiaforrások közül a nap- és szélenergia sorolható ebbe a kategóriába. Ezt az erőművi rendszert egészítik ki a csúcserőművek és a környező országokból importált villamos energia [10].

A 3. ábrán jó megfigyelhető, hogy a hazai villamosenergia-termelés döntő részt földgáz és nukleáris tüzelőanyagú erőművek használatára épül, mivel együttesen szinte az egész év során a villamos energia 70-80%-át szolgáltatják. A nukleáris forrásból származó energia részaránya 2021-ben februárban volt a legmagasabb (49%), míg novemberben volt a legalacsonyabb (38%). A megújuló energiák (elsősorban napenergia) és a földgáz jól kiegészítik egymást az év folyamán, nyáron a földgáz tüzelésű erőműveknek kevesebb energiát kell megtermelniük, mint télen. Földgáz esetén a maximális és minimális részesedés között jóval nagyobb különbség állt fenn. Novemberben 37%-os részarányban volt a legmagasabb, míg júniusban 21% volt az éves szinten szolgáltatott legalacsonyabb részarány földgáz esetében. A nyári időszakban érte el maximális értékét a megújuló energiaforrásokból származó energiatermelés részaránya, ami közel 25 százalék volt. Ellenben, a téli időszakban a januári 11% volt a legkisebb részesedési arány, amit a földgáz egyensúlyozott ki.



3. ábra. A megtermelt bruttó villamos energia százalékos megoszlása energiaforrások szerint 2021-ben [11].

## 2.2. A villamosenergetikai elosztórendszer működése

Az erőművekben megtermelt villamos energiát a lehető legkisebb veszteség mellett kell eljuttatni a fogyasztókhoz, amely feladat a nagyfeszültségű villamos hálózatra hárul. Az erőművekben a megtermelt villamos energiát nagy feszültségűre transzformálják fel, mivel így a lecsökkentett áramerősség hatására a vezetékben a veszteség is lecsökken. Szabvány szerint nagyfeszültségnek tekintjük az 1 kV feletti vonalifeszültségű hálózati rendszerszakaszokat. A gyakorlatban az 1 kV és 100 kV közötti hálózatelemeket szokás középfeszültségűnek nevezni és csak a 100 kV felettieket nagyfeszültségűnek. A kisméretű (400 V) hálózaton keresztül érkezik meg a villamos energia a kisfogyasztókhoz. A fogyasztók az elosztóhálózattal és a villamosenergia-rendszerrel szemben támasztott legfontosabb igényei, hogy a villamos energia folyamatosan, a megfelelő minőségben (feszültségűrés, időbeli állandóság, lüktetésmentesség és felharmonikus-mentesség, frekvenciaállandóság és a háromfázisú rendszer szimmetrikus

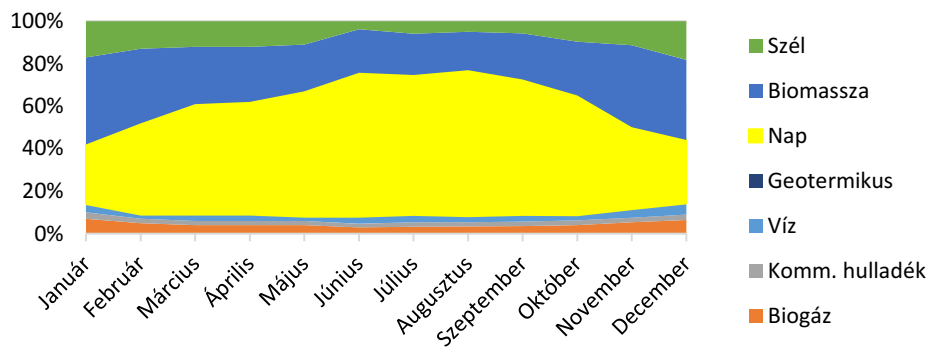
volta) és üzembiztosan álljon rendelkezésre. Ugyanakkor a gazdaságosan és kedvező áron előállított villamos energia léte is fontos szempont, azonban ez alapvetően inkább az energiahordozók világszertei árakon múlik, mintsem az üzemirányítás minőségén.

A rendszerirányítás legfontosabb szereplője a MAVIR, feladata az országos villamosenergia-rendszer (VER) mindenkor teljesítmény egyensúlyának fenntartása, a villamosenergia-piac mérlegkörei tervtől eltérő teljesítményforgalmának hatékony és biztonságos kiegyenlítése. Meghatározza a szükséges tartalékokat és a szabályozás számára lekötött teljesítményeket. Figyelembe kell vennie, hogy mely erőművek milyen gyorsan, milyen határfokkal és milyen árképzés mellett képesek villamos energiát előállítani. Irányítja az országok közötti export-import akciókat, menedzseli a termelői, kereskedői és részben fogyasztói oldalt is. Tehát a MAVIR irányítja az alap- és menetrendtartó erőműveket, valamint a főelosztó- és elosztóhálózat körzeteinek üzemirányításáért felelős körzeti diszpécser szolgálatokat (KDSZ), áramszolgáltatókat, amelyek a közepesfeszültségű hálózatok közvetlen üzemirányítását adják az üzemirányító központoknak (ÜIK). A KDSZ-ek irányítják a kiserőműveket és nagyobb fogyasztókkal tartják a kapcsolatot, míg az ÜIK a közepfogyasztókért felelős.

A villamosenergia-hálózatot feloszthatjuk a rendszerelemek rendeltetése szerint is. A magyarországi VER az összes szomszédos ország villamos hálózatával kapcsolatban áll, tehát része a nemzetközi kooperációs hálózatnak. Ez a legmagasabb feszültségértékű (220 kV, 400 kV és 750 kV) vezetékvezetékek használatát jelenti. A 400 kV-os távvezetékek adják egyben az országos alaphálózatot is. Az alaphálózat feladata, hogy összekapcsolja a nagy transzformátorállomásokat és lehetővé teszi nagy mennyiségű villamos energia szállítását, miközben az egész országot behálózza. Egy fokkal alacsonyabb szintet képvisel a 132 kV-os feszültségű főelosztóhálózat, amelynek rendeltetése a villamos energia elosztása az alaphálózati csomópontokból a közepesfeszültségű elosztóhálózatok táppontjaihoz, amelyek általában a fogyasztói körzetek súlypontjában helyezkednek el. Szakmai körökben szokás közepesfeszültségű elosztóhálózatnak nevezni az állomási gyűjtősíneket a fogyasztói transzformátorokkal összekötő távvezetékeket, amelynek feszültségűje közcélú esetben 11 és 22 kV, ritkábban 35 kV (ipari fogyasztók esetében 3 és 6 kV). Végezetül a kisfeszültségű hálózatok rendeltetése mindenkor a villamos energia közvetlen elosztása a fogyasztók között, ezért ezeket a hálózatszakaszokat összefoglalóan kisfeszültségű elosztóhálózatoknak nevezzük [10].

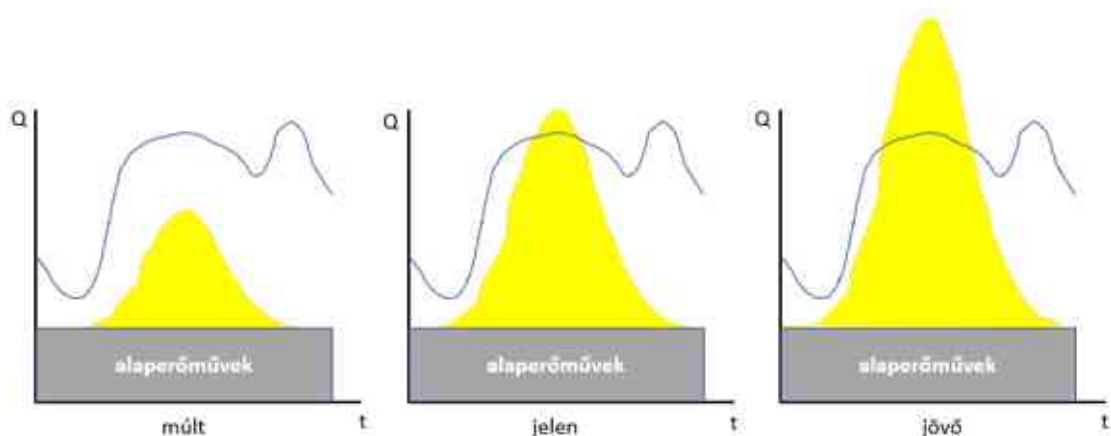
### *2.3. A villamosenergia-termelés és -felhasználás egymáshoz igazítása*

A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia éves eloszlása az utóbbi években teret nyert napenergia szerepére vezethető vissza. Mivel a legtöbb megújuló energiaforrás beépített erőművi kapacitása nem változott, így a megtermelt áram mennyisége is közel állandó. A 4. ábra jól prezentálja a 2021-es évben a napenergia dominanciáját az év túlnyomó részében. Maximális részesedését augusztusban érte el a megújuló energiaforrások között, akkor ez az arány közel 69% volt. Január hónapban szorult leginkább vissza a napenergia részesedése, mikor az csak 28%-ot tett ki. A második legjelentősebb megújuló energiaforrás a szilárd biomassa volt 2021-ben. Éppen ellentétes tendenciát mutatott a napenergiával, mivel maximális 41%-os részesedését januárban, míg minimális 18%-os részesedését augusztusban érte el.



4. ábra. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia százalékos megoszlása 2021-ben [11].

A 5. ábra szemléletesen ábrázolja a villamosenergia-termelés és fogyasztás kapcsolatát, átlagos napi jellegűt a nyári időszakban. Az importfüggőség csökkenése a naperőművek menetrendtartó jellegéből következik (6. ábra). Az éjszakai völgyidőszak (alacsony energiaigénye) után jellemzően növekedni kezd az energiaigény, amit a naperőművek az alaperőművekkel együtt jól lekövetnek. Évekkel korábban a hazai naperőművi kapacitás még nem volt képes meghaladni a fogyasztói igényeket, azonban ez az állapot már tavaly és az idei év folyamán is megváltozott. Tavaly számos nyári nap folyamán meghaladta a naperőművek által termelt energia a Paksi Atomerőmű által szolgáltatott mennyiséget, idén pedig már olyan időszakok is előfordultak, mikor a hazai rendszer exportált villamos energiát az import helyett. Ugyanakkor, ez a lüktető impulzusszerű energiatermelés nem teszi lehetővé, hogy a naperőművek alaperőművekként üzemeljenek. A legegyszerűsebb megoldás az lenne, ha Magyarország rendelkezne számottevő vízerőművi kapacitással, ami kiegészíthetné a naperőművek energiatermelését, valamint szivattyús-tározós erőművek képesek lennének kezelni azt a megtermelt többlet energiát, amire már nincs napközben igény.



5. ábra. A naperőművekből származó villamos energia és a fogyasztási igények kapcsolata.

### 3. A NAPELEMEK ÉS NAPELEMES RENDSZEREK BEMUTATÁSA

Ebben a fejezetben bemutatom a napjainkban használatos szilárd félvezető napelemek fejlődéstörténetét, megalkotásukhoz szükséges legfontosabb mérföldköveket. Ezen felül lényeges kiemelnem, hogy a napelemek a működésük során számos segédberendezést igényelnek. Egy komplett napelemes rendszer gondos tervezést igényel, aminek már több évtizedes gyakorlata van hazánkban is. A napkollektorok nem összetévesztendőek a napelemekkel, mivel a kollektorok nem villamos energiát, hanem hőt szolgáltatnak. Felhasználásuk a használati melegvíz előállító és hűtési rendszerben lehetséges.

#### 3.1. A napelemek fejlődéstörténete

A napelemek létrehozásához szükséges első felfedezések a 19. században élt fizikusok és mérnökök nevéhez fűződik. Kezdetben a fényelektromos jelenséget elektrolitokban is megfigyelték, később fémek vizsgálata során a szelén vezetőképességének a megvilágítástól való függésére lettek figyelmesek. Az első szelén alapanyagú aranyréteggel bevont napelemet C. E. Fritts készítette el 1883-ban, amelynek felülete  $30 \text{ cm}^2$ , míg hatásfoka kevesebb, mint 1% volt. A kortársak többsége nem ismerte el a prototípus jelentőségét, néhány kivételtől eltekintve. A 20. század elején jelentős felfedezések segítették a napelemek fejlődését. 1914-ben R. A. Millikan amerikai fizikus kísérletileg is bizonyította a fotoelektromos hatást. 1930-as években a teljesítményelektronika és félvezetők egyik úttörő zsenije, W. Schottky réz-oxid alapú napelemmel működő elektromotort mutatott be, majd C. W. Wagnerrel közösen bevezették a p- és n-típusú félvezető fogalmát. A német kutatásokkal párhuzamosan francia és amerikai fizikusok is vizsgálták a fotoelektromos tulajdonságú anyagokat. Megkezdődött a kadmium-szulfid (CdS), cink-szulfid (ZnS), réz-oxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), szelén (Se), tellurid (Te) anyagú fényérzékeny anyagok kutatása.

1941-ben R. S. Ohl, a Bell Telephone Labs elektrokémikus munkatársa jelentette be szilícium fényelem találmányát. Az 1950-es és 1960-as években számos szabadalmat nyújtottak be germánium (Ge), szilícium (Si), kadmium-szulfid (CdS), kadmium-szelén (CdSe) és gallium-arszenid (GaAs) alapú fényelemekre vonatkozóan. Ekkortájt már a Czochralski-féle eljárással monokristályos szilíciumot és germániumot elő tudtak állítani. 1954-ben D. M. Chapin, C. S. Fuller és G. L. Pearson, akiket R. S. Ohl kutatásai inspiráltak és szintén Bell Telephone Labs elektrokémikus munkatársai voltak, bemutatták 6% hatásfokú szilícium napelemüket. Az 1970-es években a kutatók figyelme az újdonságnak számító amorf szilícium napelemekre, valamint kadmium-tellurid (CdTe), gallium-indium-arszen-foszfid ( $\text{GaInAsP}$ ), réz-indium-diszelenid ( $\text{CuInSe}_2$ ), réz-indium-diszulfid ( $\text{CuInS}_2$ ), valamint a réz-indium-gallium-diszelenid ( $\text{CuInGaSe}_2$ ) vékonyréteg napelemekre összpontosult. Ezek a vékonyréteg napelem típusok jelentik a második generációt a p-n átmenetes első generációhoz képest [12, 13].

### 3.2. A napjainkban széleskörben alkalmazott és kutatott napelem típusok

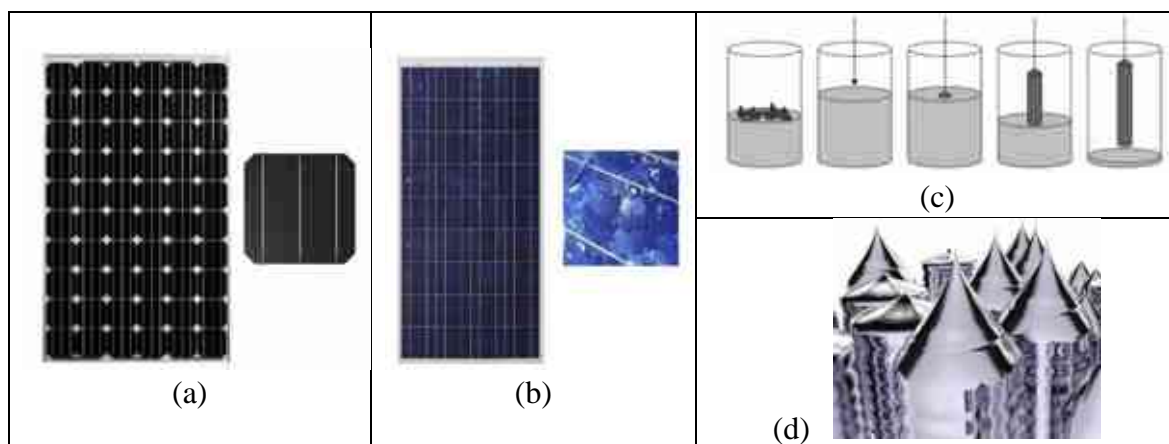
Ebben az alfejezetben a szilícium, perovszkit és organikus napelemeket fogom bemutatni, mivel a szilícium alapúak jelentik jelenleg az egyetlen lehetőséget a közcélú és magán felhasználás esetén egyaránt. Ugyanakkor a perovszkit és az organikus napelemek kutatása olyan ütemben halad, hogy a közeljövőben alternatívát jelenthetnek a szilícium alapú napelemekkel szemben.

#### 3.2.1. Szilícium napelemek

Jelenleg a legszelesebb körben alkalmazott napelem alapanyag a szilícium, amit nagy tisztaságú homokból (szilícium-dioxid) nyernek ki. A félvezető-gyártáshoz kibányászott homokot több mint 100 lépcsős gyártási folyamaton dolgozzák fel, mire az alkalmas lesz napelemcellák előállítására. Az egyik fő feladat a szilícium-dioxidból eltávolítani az oxigént, amit olvasztókemencékben szén hozzáadásával érnek el nagy hőmérsékleten (2000 °C). A szén megköti az oxigént, és CO<sub>2</sub> (szén-dioxid) jön létre, mint melléktermék. A napelemcellagyártáshoz minimum 6 N, azaz 99,999999% tisztaságú szilícium szükséges. A 6-9 N közötti tisztaságú szilíciumot napelemgyártáshoz, míg a 9 és 11 N közötti tisztaságú szilíciumot a mikrochipgyártáshoz használják fel.

Az 1970-es évekhez képest mára már háttérbe kerültek az amorf típusú napelemek, többek közt alacsonyabb hatásfokuknak köszönhetően (5 – 10%). Az amorf szilícium napelemek esetében a szilícium atomok kevésbé rendezetten helyezkednek el és az atomok kevésbé kötődnek szomszédjaikhoz, mint a kristályos változatában. Az amorf szilícium napelemek előnyei közé tartozik, hogy előállításuk olcsóbb, mint a kristályos szilícium elemeké, valamint fényérzékeny rétegük vékonyabb, így merev, vagy rugalmas keretekbe egyaránt helyezhetők. Továbbá jobban abszorbeálják a fényt, tehát gyenge megvilágítás, felhős körülmények között kevésbé romlik a teljesítményük, mint a kristályos típusoknak.

Manapság a háztartási méretű és közcélú erőművek esetében egyaránt a polikristályos napelemek használata a legjellemzőbb. Ez köszönhető annak, hogy a megtermelt energiára vetített költségük a legkedvezőbb. A polikristályos cellákhoz a szilíciumot négyszögletes alakú tömbbe öntik, miközben a szilícium több kristályban dermed meg (poli-, azaz "több-" kristály) és szintén ebből vágnak cellákat. A tömbösítéshez használt eljárás a Siemens-eljárás, amely kisebb energiaigényű, mivel egy nagyobb kád formájú kemencében, több pontról kiindulva egyszerre növesztik a szilíciumkristályokat: alacsonyabb hőfokon, mindössze 1100 °C-on és nagyobb méretben történik a tömbösítése a szilíciumnak. A nagy tömböket ezután kisebb hasábokra szeletelik fel (156 mm x 156 mm), viszont a vágási vonalak nem esnek egybe a kristályok széleivel, és az így kapott szilíciumlapkákon belül akár több szilíciumkristály „darabjai” is megtalálhatók. Ebből készülnek a polikristályos napelemcellák. A feldolgozatlan polikristályos lapkákon jól kivehetők még az egyes kristályok közötti határvonalak. A polikristályos Siemens-eljárás előnye, hogy kevesebb energia szükséges hozzá, ezáltal olcsóbbak az így előállított szilíciumtömbök. Hatásfokuk elérheti a 15%-ot is, és ezen érték kisebb mértékben függ a napelem korától. A gyártók általában 25 évre szavatolják a hatásfokromlás 20%-os határon belüli maradását. A kristályos napelemeket könnyen felismerni a cellás felépítésükről lehet, amely cellák egymással galvanikus kapcsolatban állnak és együttesen termelt energiájuk adja egy napelemmodul villamos energiáját (6. (a) és (b) ábra) [14].



**6. ábra.** A szilícium alapú (a) mono- és (b) polikristályos napelemmodul; (c) a szilícium monokristály növesztésének folyamata és (d) eredménye, a szilíciumtömb.

A legnagyobb hatásfokot a monokristályos napelemek produkálják. Gyártási technológiájuk (Czochralski-eljárás, 6. ábra (c)) viszont igen költséges, így népszerűségük a lakossági felhasználásban kevésbé számottevő, mint a polikristályos típusé. Ennek a tömbösítési módszernek a lényege, hogy a szilíciumot megolvasztják 1400 °C-on egy hengerben, ahol argongázzal vegyítik, hogy a szén fűtőszálak okozta szennyeződéseket megkössék (CO – szénmonoxid, ami a szén fűtőszálakból szabadul fel, illetve H<sub>2</sub> – dihidrogén, ami a folyamat kezdetén a hengerben lévő nedvesség és a szén között létrejövő kémiai folyamat hatására jön létre). A hengerben lévő olvadt szilíciumba egy már megszilárdult szilíciumkristályt lógatnak be, amire a szilíciumolvadékból kicsapódik, kikristályosodik az anyag. Miután a szilíciumkristályokat egy hengerben húzzák, növesztik, így egy henger alakú szilíciumtömböt kapunk eredményül (6. ábra (d)), aminek az átmérője 156 mm. Ha a szilíciumhengerünket merőlegesen felfűrészeljük, akkor egy-egy szelet (wafer) egységes kristályszerkezetű lesz, nem lesznek benne töréspontok, és ezt nevezük monokristályos szilíciumnak. Szerkezeti felépítése hasonló a polikristályos napeleméhez, jól elkülöníthető, egymással összekötött cellákból áll. Hatásfoka elérheti a 20 – 25%-ot is.

### 3.2.2. Perovszkit napelemek

A hagyományos, szilíciumból készült napelemeknek nem túl nagy az energiaátalakítási hatásfokuk, és ehhez képest elég környezetszennyező az előállításuk. Pár éve azonban egy új trend jelent meg a tudományos életben, a perovszkitből készült napelemek kutatási területe, amelyeknek hatékonyabbak, olcsóbb és környezetkímélőbb a gyártásuk. A perovszkit egy félig átlátszó és rugalmas anyag, olyan kristályos réteget alkot, amely ezerszer vékonyabb, mint a hagyományos szilícium. A perovszkitos napelemek hatékonysága sokkal jobb, mint a jelenleg használt hagyományos változatoké. A 20-20 százalékos szilícium-perovszkit aránnyal 29,1 százalékos energiaátalakítási hatásfokot lehet elérni [15]. Amennyiben nem szilíciummal, hanem egy másik vezetővel, a réz-indium-gallium-diszeleniddel (CIGS) kombináljuk (20 százalék perovszkit, 17 százalék CIGS), 23 százalékos hatásfokot kapunk. Jelenleg a kutatók előtt álló legnagyobb feladat nem az energiaátalakítási hatásfok további növelése, hanem a gyártási technológia piacképessé tétele [16].



### 3.2.3. Organikus napelemek

Az elmúlt évek másik sikertörténete a szerves napelemek fejlődése. A szerves, vagy más néven organikus napelemek a legfiatalabb napelemek. Kifejlesztésük az elmúlt két évtizedben kezdődött, ugyanis Alan Heeger 2000-ben kémiai Nobel-díjat kapott a félvezető polimerek felfedezéséért. Az organikus napelem technológiák valójában két fő irányt jelentenek: a félvezető organikus polimerek, és a fényérzékeny festett cellák (dye-sensitised cells, DSC). A félvezető polimerek mesterségesen előállítottak, amelyek a vékonyrétegű napelemekhez hasonlóan félvezető tulajdonsággal rendelkeznek, így napelem előállítására alkalmasak. Ezzel szemben a DSC-technológia sokkal inkább a természetes fotoszintézist utánozza, csak a zöld klorofil helyett jellemzően vöröses festékréteg nyeli el a fotonokat és generál elektromos feszültséget, és itt a víz bontása helyett egy fémrétegben (jellemzően ruténiumban, vagy titán-dioxidban) mozgatja meg az elektronokat, azaz hoz létre elektromos töltést. A szerves napelemek kutatói azzal számolnak, hogy ezek a cellák életciklusuk végén gyorsan lebomlanak, kisebb környezetterhelést jelentenek majd. A hatásfokuk sokat fejlődött a kezdeti 1-3 százalékhoz képest 5-6 százalékra, míg élettartamuk 3-5 évről 7-8 évre emelkedett. Már a 2010-es évek elején kutatók arról számoltak be tanulmányukban, hogy jelentősen sikerült a szerves polimerekből készített napelemek hatásfokán javítaniuk (8,62%), olyan módon, hogy különböző hullámhossz-tartomány elnyelésében hatékony polimereket kombináltak össze egyetlen cellává. Azóta többségében kínai fejlesztőknek sikerült 17,3, később 20,2 százalékra növelniük organikus tandem napelemek energia-átalakítási hatékonyságát, ami újabb lépést jelentett a zöld napelem széleskörű használatának elterjedéséhez [17, 18, 19, 20]. Ugyanakkor a nagyüzemi gyártási módszer kidolgozása még várat magára. Jelenleg az építészetben való kísérleti alkalmazásuk tűnik a legkézenfekvőbb megoldásnak, mivel:

- beesési szögre és déli tájolástól való eltérésre kevésbé érzékenyek,
- számos, akár egyenetlen felületű hordozóanyag-típusra felvihetők,
- színezhethetők, mintázhatók igény szerint (7. a ábra),
- fényáteresztők, üvegfelületek pótlására alkalmasak (7. b ábra),
- nagy felületek lefedésére alkalmasak.



(a)



(b)

**7. ábra.** (a) A szerves napelem ablakként történő felhasználása és (b) üvegház borításaként történő felhasználása.

### 3.3. A napelemes rendszerek típusai

A napelemes rendszerek méretoptimalizált és termeléseoptimalizált tervezési irányelvek alapján egyaránt megtervezhetők. Az irányelvek a nevükben hordozzák a tervezés kiindulópontját, miszerint méretoptimalizálás során a napelemes rendszer paramétereit a rendelkezésre álló hely, ezáltal a telepíthető modulok maximális száma határozza meg. Ugyanakkor a termeléseoptimalizált rendszertervezés a várható fogyasztási igény felmérésével kezdődik és annak optimális kiszolgálására törekszik. Ebben a szakaszban elsősorban a közcélú hálózathoz viszonyítva betöltött szerepük és csúcsteljesítményük tekintetében igyekszem bemutatni a napelemes erőművek típusait.

#### 3.3.1. Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény feletti napelemes erőművek

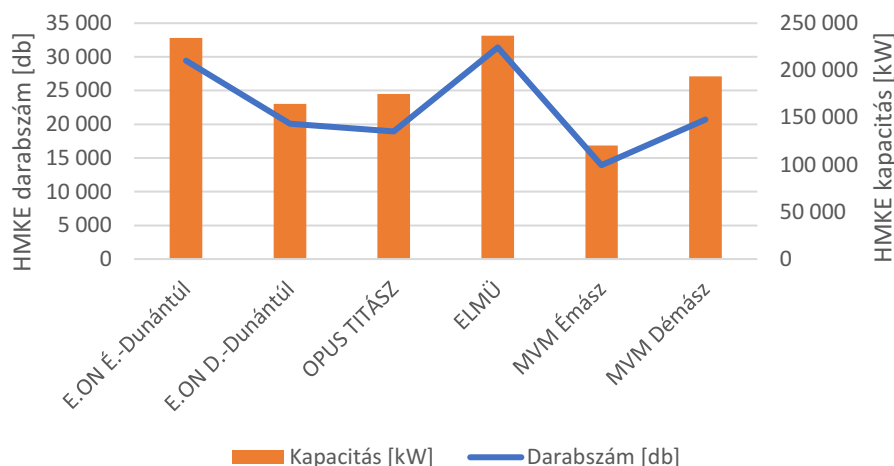
A napelemes rendszereket csoportosíthatjuk a csatlakozási teljesítményük alapján is. Jellemzően a híradásokban szereplő wattban megadott egyánáramú (DC) teljesítmény értékek a felhasznált panelek darabszámának és azok teljesítményének szorzata. Csatlakozáskor azonban a váltakozó áramú rendszereket (AC) jellemző látszólagos teljesítményt kell figyelembe venni, mivel az áram átalakításakor (DC → AC) a folyamatban résztvevő berendezések, pl. transzformátor, rendelkeznek teljesítménytényezővel ( $\cos\phi$ ), ezért a hatásos teljesítményen (P) felül meddő teljesítmény (Q) is termelődik.

Az 50 kVA csatlakozási teljesítményű és azt meghaladó erőművek kategóriájába jellemzően a közcélú nagyerőművek tartoznak, vagy a kereskedelmi célú napelemes kiserőművek 500 kVA maximális névleges teljesítményértékig. Ritkább esetben ezek lehetnek a hálózattal nem kooperáló üzemi erőművek is. Ezek az erőművek rendkívül nagy csúcs-teljesítményükből adódóan jellemzően a földfelszínen, talajra települnek, azonban az üzemi erőművek esetében célszerű lehet az üzem- és raktárcsarnokok lapos tetőjének hasznosítása. 2016-ban kezdődött meg a 10 MW beépített kapacitást meghaladó naperőművek első hazai építési hulláma, amelyek többsége az MVM Csoport tulajdonában vannak. Az első ilyen erőmű a Tüskésréten található pécsi naperőmű volt. Jelenleg a Kaposvár határában található 100 MW-os beépített kapacitású a legnagyobb hazai és egyben legnagyobb kelet-közép-európai naperőmű. A 2021-ben átadott erőmű 220 hektáron terül el, és éves szinten 120 000 tonna szén-dioxid kibocsátástól óv meg minket [21].

Európa legnagyobb tetőre telepített napelemes erőműve a győri AUDI HUNGARIA Zrt. és az E.ON Hungária Csoport együttműködésében valósult meg. Az egész kontinensünket figyelembe véve páratlan erőmű 12 MW kapacitású, 160 000 m<sup>2</sup> tetőfelületen terül el, így gyakorlatilag is karbonsemlegessé téve az Audi AG hazai üzemét [22].

#### 3.3.2. Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény alatti napelemes erőművek

A háztartási méretű kiserőművekre is érvényesek a korábban vázolt tervezési irányelvek, ellenben a telepítés módjában (tetőn, talajszinten) eltérhetnek. Az engedélyköteles hazai HMKE-k darabszáma 2011-ben 657 volt, míg 2021-ben 134 625 volt. Ebből napelemes 2011-ben 629 volt, míg 2021-ben 134 449 volt (99,9%). Az áramszolgáltatók tekintetében 2021-ben a legtöbb bejelentett kiserőmű az ELMŰ területén volt, szám szerint 31 404 db összesen 236 739 kW kapacitással. A legkevesebb az MVM Émász területén, szám szerint 13 931 db összesen 120 425 kW kapacitással (8. ábra). [23]



**8. ábra.** A telepített napelemes HMKE teljesítmények összeg (oszlopdiaagram) és a rendszerek darabszámának összege (vonaldiagram) Magyarországon áramszolgáltatók szerint 2021-ben [23].

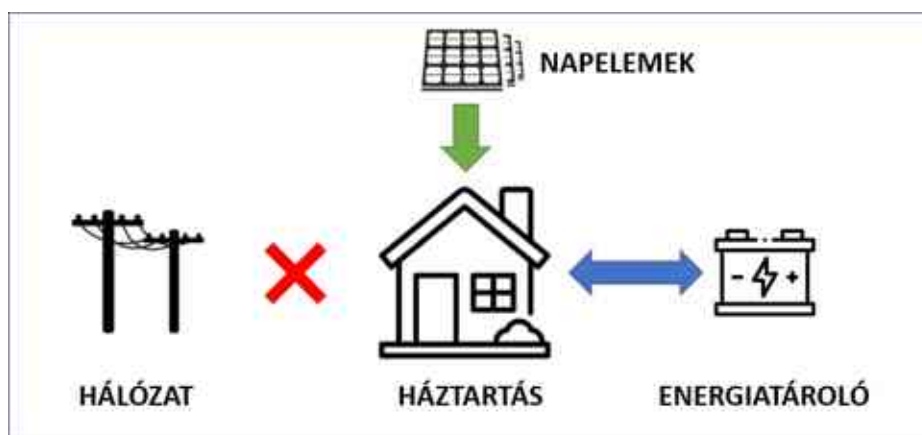
A háztartási méretű napelemes rendszerek típusait alapjában véve a közcélú hálózattal történő kapcsolatuk alapján csoportosítjuk az alábbi módon: hálózatra termelő, vagy szigetüzemű, vagy hibrid üzemű napelemes rendszer. Az első csoportot képviselik az olyan rendszerek (9. ábra), amelyek közvetlen összeköttetésben állnak a közcélú hálózattal. A villamosenergia-áramlás iránya kétirányú lehet, tehát ha nagyobb a napelemek által termelt villamos energia mennyisége, mint amennyit a helyi, háztartási fogyasztók igényelnek, akkor a többlet energiát a közcélú hálózatra tápláljuk. Ellenkező esetben a hiányt a hálózatból pótoljuk. Ezt a kialakítást nevezzük (közcélú) hálózatra tápláló napelemes rendszernek. Az ilyen rendszerek telepítése áramszolgáltatói engedélyköteles, egyben a legelterjedtebb. A legfontosabb építőeleme az engedélyköteles inverter, amely a napelempanelek által szolgáltatott egyenáramot hivatott váltóáramra átalakítani, valamint az építési engedély megadásának alapfeltétele. A szolgáltatók előnyben részesítik a háromfázisú invertereket, valamint számos további paraméter tekintetében kell megfelelnie, többek között tudnia kell kontrollálni a kimeneti áram teljesítménytényezőjét ( $\cos\varphi$ ) és felharmonikus-tartalmát. Szigorú határok között kell tartania a feszültség értékét, mert a szomszédos háztartásokban lévő elektromos eszközök tönkremenetelét okozhatja. Olyan kényelmi funkciókat is elláthat, mint az üzemeltetővel való kommunikáció és adatszolgáltatás, vagy a szolgáltatóval való kommunikáció. Amikor az áramszolgáltató hálózatánál feszültségkimaradás van, áramkimaradás van, akkor a hálózatba tápláló napelemrendszer inverterének is azonnal le kell kapcsolódnia az elektromos hálózatról.

Mivel csak szigetüzemű inverterrel lehet azt elérni, hogy az áramkimaradás ideje alatt is legyen villamos energiánk az épületünkben, hálózatba tápláló napelemrendszerrel ezt nem lehet biztosítani (szigetüzem tiltása). A hálózatba tápláló napelemrendszer csatlakozási dokumentációjának elkészítését csak az áramszolgáltatónál tervezői jogosultsággal rendelkező villamosmérnök végezheti. A másik nagyon lényeges eszköz az ad-vesz mérőóra, amely biztosítja a villamos energia áramlásának pontos elszámolását. Figyelembe veszi és méri a hálózatra termelt és onnan vételezett villamos energia mennyiségét egyaránt.



9. ábra. A hálózatra tápláló napelemes rendszer elvi felépítése.

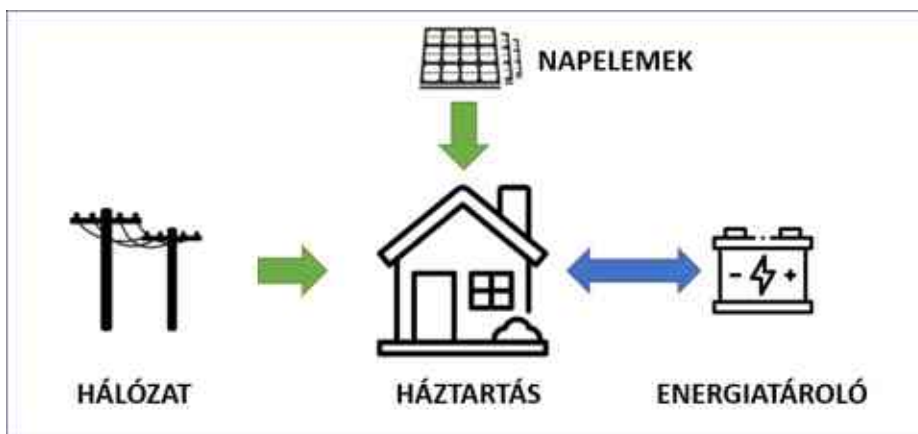
A második típus, a szigetüzemű valójában két altípust is magába foglal (10. ábra). Az egyik altípust nevezzük hálózatmentes szigetüzemű rendszernek, mikor a háztartás nincs kapcsolatban a közcélú hálózattal. A hálózatmentes szigetüzemű napelemes rendszerek telepítése olyan helyen javasolt, ahol egyáltalán nincs áramszolgáltató, mivel ilyenkor olcsóbb megoldás lehet egy szigetüzemű napelem kiépítése, mint az áramszolgáltatóval elvégeztetni a szükséges hálózatfejlesztést. Szigetüzem esetén célszerű lehet csak egyenáramú fogyasztókat alkalmazni (pl. világítás), azonban nagyobb teljesítményű háztartási gépek, esetleg háromfázisú fogyasztók ellátásához inverterre van szükség. Ebben az esetben nem kötelező a vásárló olyan magas költségű és minőségű invertert választani, mint hálózatra tápláló rendszer esetében. Ugyanakkor, az energiatárolás megoldása is a vásárlóra hárul, amely leggyakrabban akkumulátoros tárolóegységet jelent. Az energiatárolás jelentősen megnöveli a rendszer költségét, azonban nem szabad csupán a beszerzési ár alapján akkumulátort választani. Inkább az akkumulátorok élettartamára kell jelentős hangsúlyt fektetni, mivel a napelemek élettartama során több alkalommal is szükséges lehet az akkumulátoros tárolóegységek cseréje. Célszerű a napelemes rendszerekhez optimalizált, vagy a ciklikus üzemre tervezett akkumulátorok kiválasztása, mivel ezek élettartama lényegesen nagyobb lehet.



10. ábra. A hálózatmentes szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése.

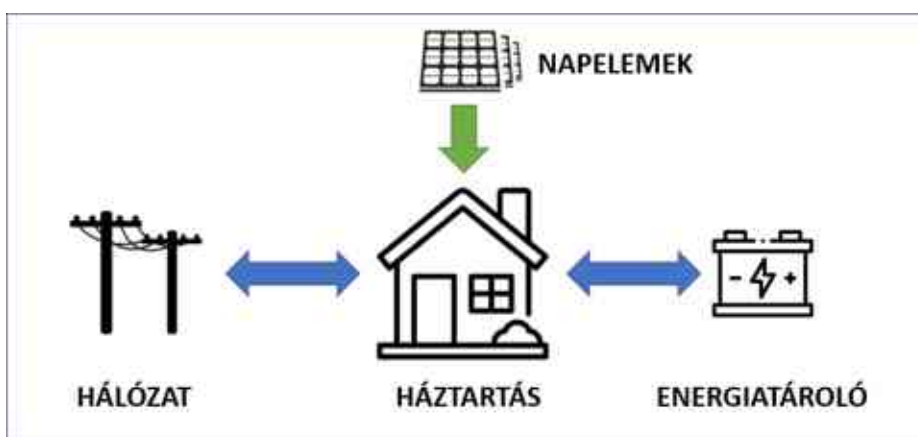
A másik, kizárólag vételezni tudó altípus (11. ábra) ugyan kapcsolatban áll a közcélú hálózattal, azonban az energiaáramlás iránya csak egyfelé lehetséges, tehát a közcélú

hálózatra nem tud rátáplálni, de a helyi fogyasztók energiaigényét, illetve az energiahiányt onnan képes fedezni, azaz a kapcsolat közvetett. Mivel a napelemes rendszer csak rásegít a háztartás villamos hálózatára, érdemben csak egy kiegészítő megoldást jelent. Fontos megjegyezni, hogy a hálózat és a napelem által termelt energia nem használható fel egyidejűleg, mert a két energiaforrás között logikai kizáró vagy kapcsolat áll fenn. Vagy az egyik, vagy a másik látja el a fogyasztókat. A két forrás nem kapcsolható össze, mert az zárlatot eredményezne. A jövő feladata azon hibrid rendszerek megteremtése, amelyek képesek teljes mértékben kapcsolatot létesíteni a napelemes rendszer és a közcélú hálózat között, lehetővé téve a hálózatra történő táplálást.



11. ábra. A csak vételezi tudó szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése.

A valódi hibrid rendszerek (12. ábra) legfontosabb feladata, hogy a rendszerbe integrált akkumulátoros tároló egység kiválassza a közcélú villamoshálózat energiátároló szerepét. A rendszer méretezésének alapelve, hogy a háztartás és villamos hálózat között a lehető legkevesebb interakció történjen. Ez azt jelenti, hogy mikor a napelemes rendszer több energiát termel a szükségesnél, elsősorban az akkumulátortelepeket tölti, amikor azok teljesen feltöltődtek, végső esetben táplálni kezd a hálózatra. Amikor a napelempanelék kevesebbet termelnek a felhasználási igénynél, elsősorban az akkumulátorok fedezik a megnövekedett igényt. Ha azok elérik a maximális kisütési mélységet, végső esetben a hálózatról kezd energiát vételezni a háztartás. A valódi hibrid rendszerek emellett távvezérelhetők, intelligensek és a villamos energia optimális elosztására fókuszálnak.

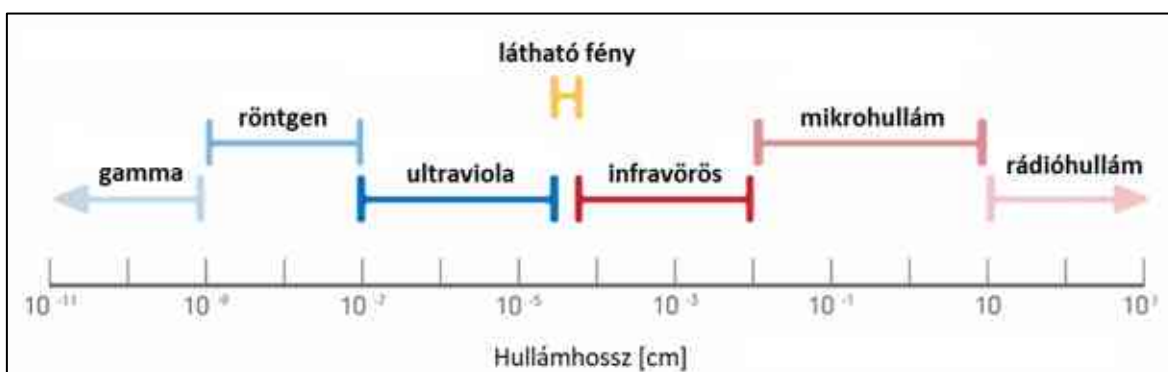


12. ábra. A hibrid napelemes rendszer elvi felépítése.

#### 4. A NAPELEMEK MŰKÖDÉSE ÉS ELEKTRONIKAI MODELLJE

Az elektromágneses sugárzás valamely forrásból közvetítő közeg nélkül terjedő energiaáram; egymásra merőleges oszcilláló elektromos és mágneses teret hoz létre, s a térben hullám formájában vákuumban fénysebességgel terjed, energiát és impulzust szállítva. A fény az elektromágneses sugárzás egy típusa, amelynek egyszerre van hullám és anyag természete is (Louis de Broglie). Az elektromágneses hullámok hullámhossztartománya rendkívül nagy, amelynek az emberi szem számára látható fény (380 - 780 nm) csak egy kis töredékét teszi ki, ahogy a 13. ábra is mutatja.

A hőmérsékleti sugárzás az anyag részecskéinek hőmozgásából eredő elektromágneses sugárzás. Az izzó testek alacsonyabb hőmérsékleten infravörös sugárzást, majd magasabb hőmérsékleten látható fényt is kibocsátanak (pl. Nap és más csillagok). A különböző anyagoknak azonban a hőmérsékleti sugárzása is igen lényegesen különbözhet. Az elektromágneses sugárzás típusok hullámtermészetükből adódóan elnyelődhetnek (abszorpció), visszaverődhetnek (reflexió) és áthaladhatnak (transzmisszió) az anyagokon. Például a Föld légkörének határán nagyobb a Naptól érkező sugárzás mértéke, mivel az a légkörön áthaladva gyengül. A légkör részecskéinek ütközve a fotonok eltérülhetnek, de akár el is nyelődhetnek. A földfelszínre elérő napsugárzás a légkörön túli érték 41%-a, mely a földfelszínre direkt módon elérő sugárzás (+33%), a légkörből a földfelszín felé verődő sugárzás (+18%) és a földfelszínről a légkörbe visszaverődő sugárzás (-10%) előjeles összege [10].



13. ábra. Az elektromágneses spektrum felosztása a jellemző hullámhossztartományok szerint.

Az  $f$  frekvenciájú elektromágneses sugárzás energiája nem folytonosan változhat, hanem csak adagokban. A legkisebb felvehető energiadag (kvantum) nagysága arányos az  $f$  frekvenciával, ahol  $h$  a Planck állandó. Mivel a foton esetében a frekvencia ( $f$ ) a fénysebesség ( $c$ ) és a hullámhossz ( $\lambda$ ) hányadosa, az egyenlet tovább bővíthető:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

A fény legkisebb energiaadagját, részecskéjét nevezzük fotonnak. Albert Einstein munkásságának eredménye a fényelektromos jelenség magyarázata mellett a tömeg-energia ekvivalenciának nevezett törvény, miszerint minden fizikai objektum (test, mező, részecske) tömege ( $m$ ) és energiatartalma ( $E$ ) szigorúan arányos egymással, az arányossági tényező a fénysebesség négyzete ( $c^2$ ).

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot f}{c \cdot c} = \frac{h}{c \cdot \lambda} \quad (2)$$

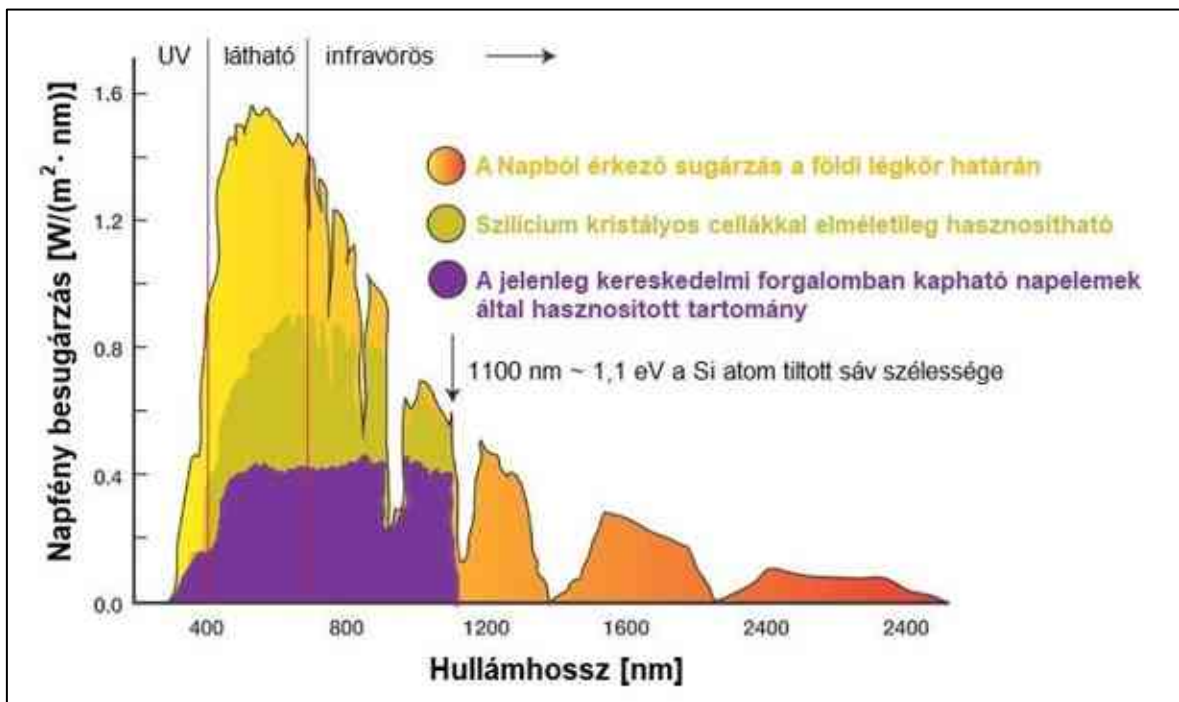
Tehát a foton impulzusa ( $p$ ):

$$p = m \cdot c = \frac{h}{\lambda} \quad (3)$$

Fontos, hogy a foton energiáját elektronvoltban is megadjuk. Elektronvoltnak nevezzük azt az energiát, amelyet az elektron 1 V potenciálkülönbség hatására nyer ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).

$$eV \approx \frac{6,626 \cdot 10^{-34} [\text{Js}]}{1,602 \cdot 10^{-19} \left[ \frac{\text{J}}{\text{eV}} \right]} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{\lambda [\text{m}]} \approx \frac{1,2431 \cdot 10^{-6} [\text{eV} \cdot \text{m}]}{\lambda [\text{m}]} \quad (4)$$

A szilíciumkristályos napelemek az 1100 nm hullámhosszig képesek hasznosítani az fotonokat. Például, egy 400 nm hullámhosszú (ibolyaközeli) foton energiája 3,1 eV, ugyanakkor egy 700 nm-es foton energiája 1,77 eV. 1100 nm-es hullámhosszhoz tartozó energiaérték 1,1 eV az 14. ábrán látható.



14. ábra. A Napból érkező sugárzás spektrális eloszlása.

#### 4.1. A napelemek fizikájának rövid ismertetése

A gyakorlatban széles körben alkalmazott napelempanelek alapanyaga szilícium (Si), ami félvezető tulajdonsággal bír. Az olyan anyagokat, amelyeknek a fajlagos ellenállása lényegesen nagyobb, mint a vezetőké, de nem tekinthetők szigetelőknek sem, félvezetőknek nevezzük. A Si atomban a külső elektronhéjon 4 elektron található, ezek vesznek részt a szilícium kristályban az atomok közötti kötésben. A félvezető eszközök gyártására használt anyagokban a kötést létesítő elektrópárok alapállapotban ( $T = 0\text{K}$ ) helyhez kötöttek, nincs tehát szabad töltéshordozó, ami vezetné az áramot. Ezért szokás a szilícium anyagot szennyezni olyan anyaggal, aminek 5 vegyértékelektronja van (arzén, foszfor, antimon), akkor a szennyező atom egy elektronja nem vesz részt a kötésben, könnyen leszakad és részt vesz a vezetésben. A szennyező atomot ilyen esetben donor atomnak nevezzük, ami elektron többletet eredményez. Amennyiben a szabad, vezetési elektronok vannak többségben az anyagban, n (negatív) típusú félvezetőnek nevezzük [11, 24].

Ha a szilíciumot olyan anyaggal szennyezzük, amelynek 3 vegyértékelektronja van (indium, bór, alumínium, gallium), akkor a vele szomszédos Si atomnak marad egy elektronja, ami nem tud kötést létesíteni, mert hiányzik hozzá egy elektron, ezért ezeket a szennyező atomokat akceptoroknak nevezzük. Egy másik atomról egy, a kötésben részt vevő elektron a hőmérséklet hatására átmehet az akceptor-atomhoz és létrejöhet a hiányzó kötés. Ekkor viszont onnan fog egy elektron hiányozni, ahonnan ez az elektron jött, tehát lyuk keletkezik. Az ilyen félvezetőt melyben a lyukak vannak többségben, p típusú félvezetőnek nevezzük [11, 24].

A két réteg (n és p réteg) érintkezési felületénél a töltéshordozók koncentrációkülönbsége kismértékű diffúziót indít meg: a n-rétegből elektronok diffundálnak át a p-szennyezettségű rétegbe, a pozitív töltésű lyukak pedig a p-szennyezettségű rétegből átdiffundálnak az n-rétegbe. Amikor az n-rétegből kiinduló elektronok áthaladnak a határrétegen, egy olyan tartományba érkeznek, ahol igen nagy a pozitív töltésű lyukak sűrűsége. Mivel itt a rekombináció valószínűsége nagy, az elektron, mint szabad töltéshordozó valószínűleg rövid idő alatt megszűnik létezni. Hasonló folyamaton megy keresztül a pozitív töltésű lyuk az n-szennyezettségű rétegben. Ennek következtében az átmenet környezetében, szennyezéstől függően, a félvezető anyag töltéshordozókban elszegényedik és egy úgynevezett határréteg (kiürített vagy tértöltésű tartomány) alakul ki, amely vastagsága 1 nm és 20 nm között változik. A p oldalra tehát elektronok mennek át, az n oldalra pedig lyukak. Mindkét folyamat azt eredményezi, hogy a p oldal negatív, tehát az elektronok számára magasabb potenciálú lesz, az n oldal pedig alacsonyabb, vagyis a két oldal között potenciálkülönbség alakul ki [11, 24].

Amennyiben a p-n-átmenetre külső feszültséget kapcsolunk, akkor a vezetőképesség attól függ, hogy ez a feszültség milyen polaritású, azaz nyitó vagy záróirányú-e. Nyitóirányú a félvezető dióda előfeszítése, ha a p tartomány az n-réteghez képest pozitív feszültséget kap, ellenkező polaritás esetén záróirányú működtetésről beszélünk. Nyitóirányban a félvezető dióda vezet, záróirányban az ellenállása nagy, így kevésbé vezet [11, 24].

A napelemek energia-viszonyairól az alábbi ábra nyújt tájékoztatást. Az előfeszítetlen p-n átmenetben a beeső fotonok elektronokat juttatnak a vezetési sávba, ha a foton  $E_{\text{foton}} = h \cdot f$  energiája meghaladja a tiltott sáv  $E_g$  szélességét. A p oldalról a többlet elektronok átáramolnak az n oldalra, az n oldalon lévő többlet lyukak a p oldalra. Az általánosan



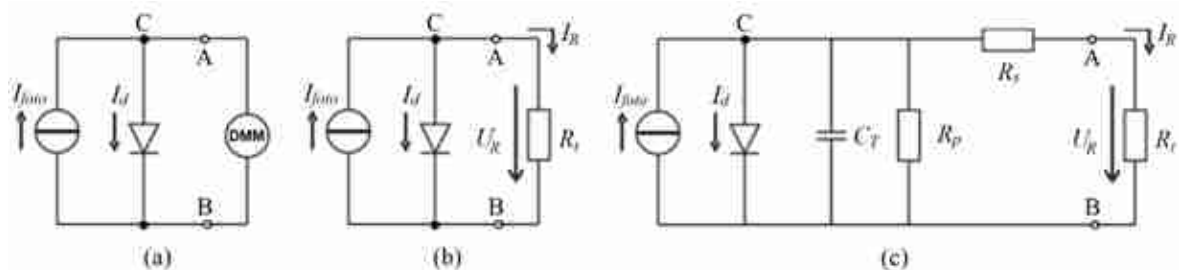
alkalmazott napelempanellek szerkezetét figyelembe véve az alsó p réteg pozitív, a felső n oldal negatív lesz, feszültségkülönbség jön létre, az áramkört zárva pedig áram folyik. Végeredményben a fény energiája jelentős részben egyenáramú energiává alakul. A létrejött fotoáram a külső áramelvezető kontaktusokon keresztül elvezethető. Az eszközt úgy tekinthetjük, mint egy galvánelemet [25, 26]. Ahhoz, hogy a foton által keltett töltéshordozó hasznosulhasson, a pn átmenetben kell keletkeznie, vagy ha nem ott keletkezik, el kell érnie az átmenet potenciállejtőjét. Az n+p verziót azért részesítik előnyben a p+n-nél, mert az elektronok diffúziós úthossza nagyobb a p rétegben, mint a lyukaké az n rétegben, így az átmeneten kívül keletkezett töltéshordozók nagyobb arányban jutnak el az átmenetig.

A napelem hatásfokának kiszámításánál nagyon fontos paraméter a félvezető anyagra jellemző ( $E_g$ ) tiltott sáv nagysága. A tiltott sáv jelen esetben egy olyan réteg, amely az atom vegyértéksávját választja el a vezetési sávtól. A tiltott sáv nagysága, szélessége azt az energiagátat, -küszöböt jelenti, melyet a töltéshordozónak le kell küzdenie a sávon történő áthaladáshoz. Ha a beeső foton energiája ( $E_{\text{foton}}$ ) kisebb, mint az anyagra jellemző tiltott sáv szélessége ( $E_g$ ), akkor az nem fog töltéshordozókat kelteni. A töltéshordozó-generálás elengedhetetlen feltétele, hogy a beeső foton energiája legalább akkora legyen, mint a tiltott sáv szélessége. Ha több, akkor az a többletenergia ( $E_{\text{foton}} - E_g$ ) nagyságú hőmennyiségként disszipálódik [11].

#### 4.2. A napelem áramköri modellje

A napelem ideális, egyszerűsített modellje (16. (a) és (b) ábra) nem tartalmaz kapacitív és ohmikus jellegű elemeket, csak egy diódából és egy vele párhuzamosan kapcsolt áramgenerátorból áll. Az összetettebb kapcsolás (16. (c) ábra) vezetékek ellenállásának figyelembevételével, valamint a belső ellenállással és a parazita kapacitás ( $C_T$ ) beillesztésével érhető el. A továbbiakban az egyenletek felírásához, valamint a működés irtmertetése során az ideális modellből indultam ki [27].

A napfény által generált fotoáram hatására a terheletlen napelem A-B kivezetéseire kapcsolt digitális multiméterrel (DMM) az üresjárási feszültséget ( $U_{\text{ü}}$ ) és a rövidzárási áram ( $I_{\text{rz}}$ ) meghatározható (16. (a) ábra). Amennyiben a kivezetésre egy fogyasztót ( $R_t$  terhelő ellenállást) kapcsolunk, abban a pillanatban a félvezető két oldalán felhalmozódó töltéshordozók mennyisége csökken. Ez pedig az elektromos tér töltéshordozó szétválasztó hatását is csökkenti. Ekkor a terhelő ellenálláson  $U_R$  feszültség és  $I_R$  áram mérhető (15. (b) ábra), melyek a terhelés által beállított nem feltétlenül maximális munkaponthoz tartozó értékek.



15. ábra. (a) A napelem ideális és (b) valóságos elektronikai helyettesítő képe  $R$  terhelő ellenállással.

A terhelő ellenálláson mérhető  $I_R$  áram az  $I_{foto}$  fotoáram és az  $I_d$  diódaáram különbségéből adódik [11, 25]. A napelem ideális áramköri modelljében (15. (a) ábra) létrejövő áramok kapcsolatát mutatja be az (5) egyenlet a C jelű csomópontra felírható I. Kirchoff törvény értelmében:

$$I_R = I_{foto} - I_d \quad (5)$$

Az ideális dióda áramának feszültség függése nem lineáris, hanem közelítőleg exponenciális jellegű, melyet az ún. Shockley-féle dióda-egyenlet írja le.

$$I_d = I_0 \cdot \left[ e^{\frac{U_R}{U_T}} - 1 \right] = I_0 \cdot \left[ e^{\frac{q_e \cdot U_R}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (6)$$

A diódaáramot behelyettesítve kapjuk az ideális napelemcella I-U karakterisztikáját leíró egyenletet (16. ábra):

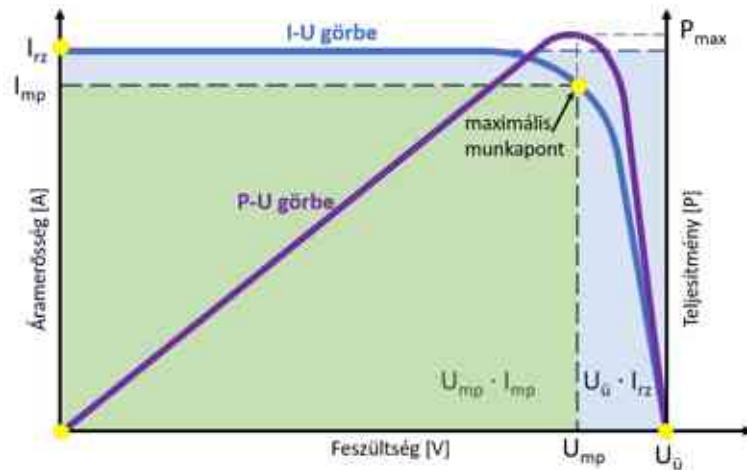
$$I_R = I_{foto} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{U_R}{U_T}} - 1 \right] = I_{foto} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{q_e \cdot U_R}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (7)$$

A (7) egyenlet alapján két határeset írható föl. Ebből kaphatjuk meg  $R_t = \infty$ , illetve  $U_R = 0$  esetén a  $I_{rz}$  rövidzárási áramot a (8) egyenlet szerint, tehát a rövidzárási áram arányos a megvilágítás intenzitásával, valamint  $R_t = 0$ , illetve  $I_R = 0$  helyettesítéssel az  $U_{\ddot{u}}$  üresjárati feszültséget a (9) egyenlet szerint, vagyis az üresjárati feszültség a megvilágítás intenzitásának logaritmusával arányos. Tehát a napelem villamos paraméterei jelentősen függenek a megvilágítottságtól ( $I_{foto}$ ) és a hőmérséklettől ( $U_T$ ) (17. ábra) [11, 28, 29].

$$I_{rz} = I_{foto} \quad (8)$$

Ennek megfelelően az  $U_{\ddot{u}}$  üresjárati feszültség a (9) egyenlet alapján számítható:

$$U_{\ddot{u}} = U_T \cdot \ln \left( \frac{I_{foto}}{I_0} + 1 \right) = \frac{k \cdot T}{q_e} \cdot \ln \left( \frac{I_{foto}}{I_0} + 1 \right) \quad (9)$$



16. ábra. A napelem áramerősség-feszültség karakterisztikája.

A besugárzás hatására a cella hőmérséklet nő. A cellahőmérséklet emelkedésének hatására a kapocsfeszültség lineárisan csökken, így a cella hatékonysága is csökken. A rövidzárási áram kismértékben növekszik a cellahőmérséklet növekedésével [11, 30].

A napelem hasznos teljesítménye ( $P$ ) a rákapcsolt terhelésen lévő áram és feszültség szorzatából lehet meghatározni.

$$P = U_R \cdot I_R = U_R \cdot \left[ I_{foto} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q_e \cdot U_R}{k \cdot T}} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

Megkeressük az egyenlet szélső értékét, a  $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$  feltétellel. Ebből fejezhető ki a maximális teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség ( $I_{mp}$ ) és feszültség ( $U_{mp}$ ) [11]. Ha sikerül a terhelést optimálisan megválasztani, akkor a kivehető teljesítmény a munkaponti feszültség és a munkaponti áram szorzata. Ideális esetben a napelem belső ellenállása és a terhelés ellenállása megegyező értékű és ekkor nyerhető ki a maximális teljesítmény. Ez függ a napelem megvilágításától, a megválasztott munkaponttól és a napelem életkorától. Ugyanis a napelem öregedésével ez az érték csökken, ami által csökken a napelem hatásfoka is [11].

$$\frac{\partial P}{\partial U} = 0 = I_R - U_R \cdot I_0 \cdot \frac{1}{U_T} e^{\frac{U_R}{U_T}} \quad (11)$$

A maximális teljesítményű munkaponthoz tartozó áram ( $I_{mp}$ ):

$$I_{mp} = U_{mp} \cdot I_0 \cdot \frac{1}{U_T} e^{\frac{U_{mp}}{U_T}} \cong I_{foto} \left( 1 - \frac{U_T}{U_{mp}} \right) \quad (12)$$

A maximális teljesítményű munkaponthoz tartozó feszültség ( $U_{mp}$ ):

$$U_{mp} = U_T \cdot \ln \left( \frac{1 + I_{foto}/I_0}{1 + U_{mp}/U_T} \right) = U_{\ddot{u}} - U_T \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_{mp}}{U_T} \right) \quad (13)$$

Az optimális terhelés értéke ( $R_{mp}$ ), ami megegyezik a napelem differenciális ellenállásával az  $U_{mp}$  és  $I_{mp}$  munkapontban:

$$R_{mp} = \frac{U_{mp}}{I_{mp}} = \frac{U_T}{I_0 \cdot e^{\frac{U_{mp}}{U_T}}} = \frac{U_T}{I_0 + I_{foto} - I_{mp}} \quad (14)$$

A napelem hatásfoka pedig a maximálisan belőle kivehető teljesítmény és a beeső fényteliesség hányadosából adódik:

$$\eta[\%] = \frac{P_{mp}}{P_{fény}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{fény}} \cdot 100\% = \frac{U_{\ddot{u}} \cdot I_{rz} \cdot \varphi}{P_{fény}} \cdot 100\% \quad (15)$$

Ahol,  $\varphi$  a kitöltési tényező a 16. ábrán jelölt kék és zöld téglalap területének hányadosa:

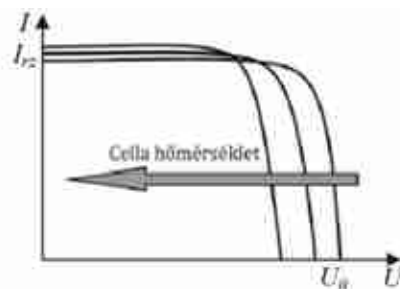
$$\varphi[\%] = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{\ddot{u}} \cdot I_{rz}} \cdot 100\% \quad (16)$$

A valóságos hatásfok értékek a gyártási technológiától függően többé-kevésbé kisebbek, amik többnyire reflexiók, termikus és rekombinációs veszteségekből adódnak, de a rosszul vezetett kontaktus is beárnyékolhat. További hatásfokváltozást befolyásoló tényező a félvezető hőmérséklete. Sajnos tudomásul kell vevnünk, hogy a napsugárzási spektrumban nem csak a félvezető szempontjából jótékony tartomány található, hanem az infratartomány

is. Hatására azonos megvilágítás mellett a rövidzárási áram jelentéktelen növekedését tapasztalhatjuk, viszont az üresjáráti feszültség hőmérsékleti tényezője anyagfüggő. Tehát a napsugárzás növekedésével a napelemnek teljesítménye ugyan nő, viszont belőle energiát kinyerni csak kisebb hatásokkal tudunk.

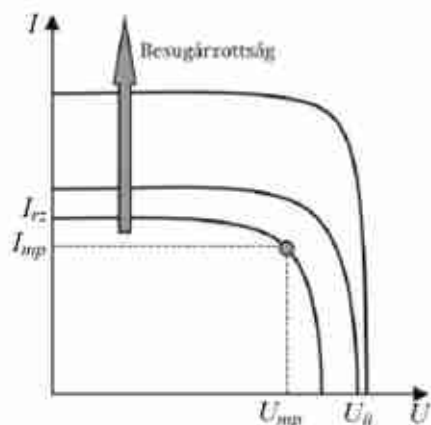
#### 4.3. Félvezetők hőmérsékletfüggésének vizsgálata

Csakúgy, mint a legtöbb félvezető alapú eszköz esetében, a napelem egyes jellemzői is erős hőmérsékletfüggést mutatnak. A napelem, mint energiatermelő eszköz esetében ezek leglényegesebb megnyilvánulása, hogy a napelem által leadható teljesítmény jelentősen csökken az eszköz hőmérsékletének növekedésével (17. ábra). A félvezető eszközök hőmérsékletfüggését gyakorlatilag a felhasznált anyagok anyagtulajdonságai határozzák meg. A különböző félvezetők tiltott sáv szélessége eltérő, továbbá függ a hőmérséklettől is, és több módon befolyásolja a napelemek tulajdonságainak hőmérsékletfüggését. Az abszorpciós tényező számottevően növekszik a hőmérséklet növekedésével, ugyanakkor növekvő hullámhosszal ez a tényező csökken. A diffúziós hossz és élettartamot számos paraméter befolyásolja, de általában feltételezhető, hogy a diffúziós hossz a hőmérséklettel valamelyest növekszik, mely befolyásolja többek között a telítési áram és a fotoáram hőmérsékletfüggését [11]. Összességében tehát elmondható, hogy egy napelem fotoáramának hőmérsékletfüggését az abszorpciós tényező, a diffúziós hossz és tiltott sáv szélesség hőmérsékletfüggése befolyásolja [30].



17. ábra. Cellahőmérséklet megváltoztatja az I-U karakterisztikát [30].

A napelem egydiódás modelljéből (16. ábra) láthattuk, hogy a p-n átmenet beépített tere által létrehozott áram egyrészt az eszköz által leadott áramból, illetve a diódán (és valóságos esetben a párhuzamos ellenálláson átfolyó), energiatermelés szempontjából veszteségnek tekintendő áramokból tevődik össze. Az, hogy egy adott eszköz esetén, a diódán és a párhuzamos ellenálláson mekkora áram folyik, az a napelemre kapcsolt terhelő ellenállástól, azaz a napelem munkapontjától (és természetesen valamelyest a soros ellenállásától) függ. A telítési áram növekedése rontja a napelemek paramétereit, és erősen növekszik a hőmérséklettel, így belátható, hogy a telítési áram eltérő hőmérsékletfüggése változtatja a napelem legtöbb paraméterének hőmérsékletfüggését is. Ebből következőleg a rövidzárási áram hőmérsékletfüggése függ a soros ellenállás, az ideálitási tényező és a telítési áram hőmérsékletfüggésétől is. Az üresjárási feszültség hőmérsékletfüggését valamennyi tag befolyásolhatja, de gyakorlatilag a telítési áram hőmérsékletfüggése változtathatja.



18. ábra. A napsugárzás intenzitása megváltoztatja az I-U karakterisztikát [30].

Röviden megfogalmazva, számunkra fontos az energiatermelés szempontjából a teljesítmény, amelyet a rövidzárási áram és az üresjárású feszültség szorzatával képezzük. Ezen szorzat elemei mind függenek a napelem egydiódás kapcsolásából értelmezhető áramoktól, amelyek a félvezető anyag tulajdonságainak hőmérsékletfüggésére eredeztethető vissza. Tehát a napelem által leadható teljesítmény jelentősen csökken az eszköz hőmérsékletének növekedésével. Mindebből következik, hogy a napelem hőmérsékletének növekedése a napelem hatékonyságát erősen csökkenti. A legegyszerűbb termelés-előrejelzések esetében a napelem leadható maximális teljesítményének hőmérsékletfüggését lineárisan közelítve meghatároznak egy hőmérsékleti együtthatót, amely a leadott teljesítmény becslésére használható a napelem hőmérsékletének ismeretében.

A napelemek működésük során magas hőmérsékletre felmelegedhetnek, ennek kialakulásáért javarészt az őket erő napsugárzás tehető felelőssé. A növekvő megvilágítással a hasznos intenzitás mellett a napelem melegekedéséért felelő sugárzás is növekszik.

Növekvő hőmérséklet hatására az  $U_0$  feszültség csökken. Tehát adott megvilágítás mellett, különböző hőmérsékleten I-U karakterisztikák a 18. ábrán láthatók. A feszültségesésből közvetlenül következik a teljesítmény és hatásfok csökkenése is, ha a besugárzást állandónak vettük. Ezen változások magyarázata az, hogy a hőmérséklet növekedése esetén, a p-n átmenetben lejátszódó termikus generáció hatására nagymértékben megnövekszik a kisebbségi töltéshordozók koncentrációja, ez okozza a telítési áramsűrűség  $I_s$  megnövekedését és az üresjárású feszültség  $U_0$  lecsökkenését [30].

A megvilágítás hatására a napelem melegszik, ezen felül a nagyobb intenzitás nagyobb átfolyó áramot jelent, amely négyzetes arányban tovább növeli a napelem hőmérsékletét. Emiatt nem csak a környezeti hőmérséklet, hanem a napelem belső ellenállásán hővé alakuló teljesítmény is veszteséget jelent. Ezek alapján elmondható, hogy a megvilágítás intenzitásának növekedésével csökken a napelem hatásfoka. A napelem üzemi hőmérsékletének meghatározása [28, 29]:

$$T_{nf} = \frac{T_n - T_k}{E_{STC}} \cdot E + T_k \quad (17)$$

Ebből meghatározható a fotoáram, amiből következik, hogy a megvilágítás intenzitása lineárisan befolyásolja a napelemben átfolyó áram erősségét, tehát ha nő az intenzitás, akkor csökken a napelem hatásfoka.

A napelemek feszültségének és áramának (ezért teljesítményének is) van hőmérsékleti tényezője, ez a  $T_k$ . A hőmérsékleti együttható mértékegysége %, amely megadja, hogy 1 K° (vagy 1 C°) változás hatására az adott fizikai mennyiség milyen jelleggel (nő vagy csökken) (1. táblázat). A feszültség hőmérsékleti tényezője negatív, az áramé kis mértékben pozitív, ezért a teljesítmény változása magasabb hőmérsékletek esetében eredőben negatív. Ez nem kedvez az energiahozamoknak. Ebből következően elmondható, hogy a hőmérsékletnövekedés teljesítménycsökkenést és így hatásfokcsökkenést eredményez [11].

1. táblázat. Hőmérsékleti együtthatók különböző típusú napelemeknél.

Típus	Hőmérsékleti együtthatók [%/K]		
	$T_K$ -feszültség	$T_K$ -áram	$T_K$ -teljesítmény
<b>Kristályos szilícium</b>	-0,3...-0,45	0,02...0,08	-0,37...-0,52
<b>Amorf szilícium</b>	-0,28...-0,50	0,06...0,10	-0,10...-0,30
<b>CIS</b>	-0,26...-0,50	0,04...0,10	-0,39...-0,45
<b>CdTe</b>	-0,22...-0,43	0,02...0,04	-0,20...-0,36
<b>GaAs</b>	-0,19...-0,24	0,02...0,03	-0,2...-0,24

#### 4.4. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terheletlen napelempanelen és természetes megvilágítottság esetén

Amikor egy napelemmodul hátoldalára ragasztott termékcímkére pillantunk, leolvashatjuk róla a legfontosabb paramétereket. Többek között az üresjárási és maximális munkaponti feszültséget, amelyekre a 25°C-os STC (Standard Test Conditions) hőmérséklet gyakorol hatást. Valamint megtaláljuk a rövidzárási és maximális munkaponti áram értékét, amiket elsősorban az 1000 W/m<sup>2</sup> STC megvilágítás befolyásol. Fontos, hogy működés közben jellemzően az üzemi körülmények adatai ritkán egyeznek az STC értékekkel.

A legtöbb szakirodalmi forrás egyetért azzal a megállapítással, hogy 1°C felületi hőmérséklet növekedés esetén a várható hatásfokcsökkenést 0,25% és 0,5% közötti érték. Ez elsősorban a napelem anyagi minőségétől, valamint gyártási technológiájától függ.

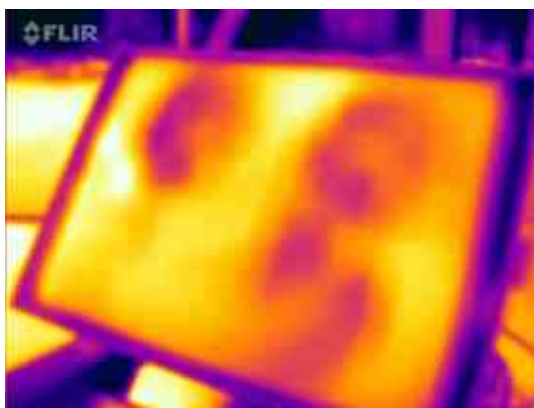
A napelemek hűtésére már számos megoldást kipróbáltak különböző kutatócsoportok. Az alkalmazott hűtőközeg leggyakrabban víz, levegő, vagy valamilyen fázisváltozásra alkalmas közeg. Ez utóbbi egy nagyon izgalmas tématerület, amikor a kutatócsoportok a legmegfelelőbb hűtőanyag típusát igyekeznek megtalálni. Talán a legkézenfekvőbb megoldásnak tűnik a levegővel való hűtés, mivel szinte korlátlan mennyiségben áll rendelkezésre, azonban a légköri hőmérséklet is jellemzően azokban a nyári hónapokban a legmelegebb, amikor a panelek felülete leginkább igényelné a fokozott hűtést, ezáltal a hőmérsékletkülönbség nem minden esetben ideális. A csekély hőmérsékletkülönbséget a lehető legnagyobb légköbméter mennyiség megmozgatásával igyekeznek a kutatók ellensúlyozni, intenzív ventilátoros hűtémódok alkalmazásával. Gyakran a panelek hátoldalára erősített hűtőbordákkal igyekeznek fokozni a hűtés minőségét [31, 32, 33].

A vízzel való hűtés talán a legígéretesebb megoldás, amelynek számos változata létezik. A folyadékűtés kiemelkedő esete a PV/T (Photovoltaic/Thermal) rendszerek, amelyek hibrid napelemekkel működnek. A hibrid napelemek fényérzékeny oldaluk irányából napelemek, a hátoldaluk irányából napkollektorok. A kombinált rendszer telepítésekor az épület villamosenergia-, valamint hőigényének egy része egyaránt kiváltható napenergiával.

A vízzel hűtő leggyakrabban vizsgált konstrukciók [31, 32, 33]:

- folyadékfilm létrehozásával,
- vízpermettel,
- csöves hőcserélővel,
- vízbemerítéssel,
- vízfelszínen történő lebegtetéssel.

A kutatómunkám a hűtött napelempanel (2. táblázat) vizsgálata 2022. augusztusában kezdődött kültéren, természetes fény által megvilágítva. Az első vizsgálat végeredménye sikeresnek volt mondható, mivel a ventilátorok viszonylag rövid idő alatt (15 perc) visszahűtötték a felmelegedett panelt, ezáltal az üresjárási feszültség csökkenése megállt és növekedni kezdett. Ellenben gondot jelentett, hogy a negyedik ventilátor nem megfelelően működőnek bizonyult és nem mindig indult el. A 19. ábrán látható, hogy csak három ponton kezdett lehűlni a felmelegedett panel felülete. Sajnos a szabadtéri vizsgálatok során nehéz állandó feltételeket biztosítani. Befolyásoló tényező a nem állandó fényintenzitás, amely a mérés során 780 – 870 W/m<sup>2</sup> között ingadozott. A külső hőmérséklet 23°C volt, azonban a szélmozgás befolyásolhatta a hőmérsékletértékeket [34].



19. ábra. A ventilátoros hűtés szabadtéri tesztelésének hőkamerás felvétele (bal alsó ventilátor nem lett bekapcsolva).

2. táblázat. A vizsgált napelempanel gyártói paraméterei.

Megnevezés	Jele	Mértékegysége	Értéke
Csúcsteljesítmény	P <sub>max</sub>	W <sub>p</sub>	20
Üresjárási feszültség	U <sub>ü</sub>	V	21,67
Rövidzárási áram	I <sub>rz</sub>	A	1,22
Maximális munkaponti feszültség	U <sub>mpp</sub>	V	17,49
Maximális munkaponti áram	I <sub>mpp</sub>	A	1,144

A laboratóriumi vizsgálatok során különböző (700 W/m<sup>2</sup> és 900 W/m<sup>2</sup>) megvilágítottsági szintnek (fényintenzitás) vettem alá a napelempanelt. Továbbá, a méréseket a működő ventilátoros hűtés mellett és anélkül is elvégeztem. Minden mérés 15 percig tartott, mert a panel felületének hőmérséklete ez idő alatt elérte a szabad térben tapasztalt átlagosan jellemző értéket, ami hozzávetőleg 45-50°C volt.

A 3. táblázat mutatja a mért kiinduló értékeket, amelyek üresjárási feszültség esetében a maximális értékek, míg a hőmérséklet esetében a minimális értékek, valamint a mérések befejezésekor mért értékek. 900 W/m<sup>2</sup> fényintenzitás mellett a hűtés 4,6°C -al csökkentette a panel felületének hőmérsékletét, ami közel 0,614 V feszültségnyereséget jelentett. 700

$W/m^2$  megvilágítottság mellett a két mérés hőmérsékletkülönbsége  $2,9^\circ C$ , míg a feszültség esetében  $0,214 V$  különbséget lehetett tapasztalni.

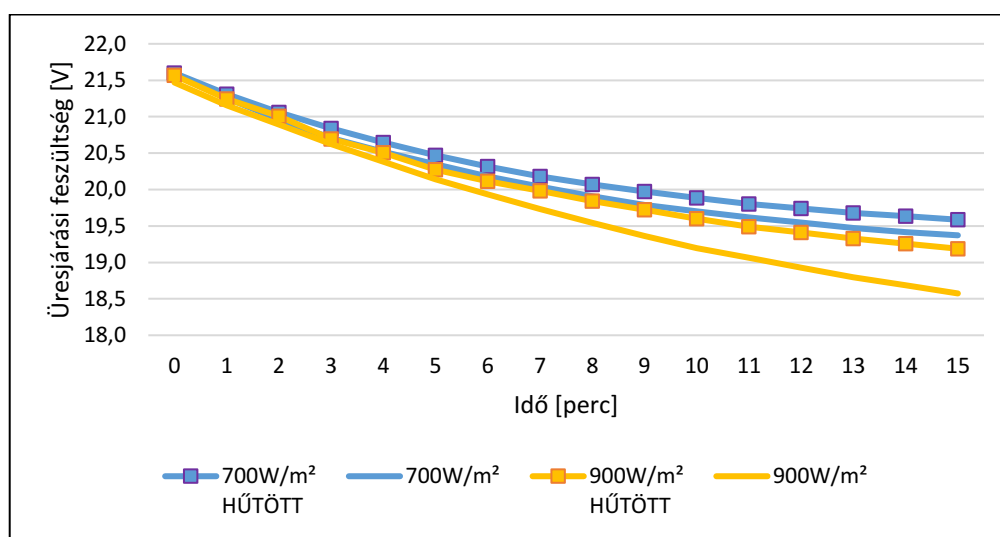
Az eredmények azt mutatják, hogy esetlegesen a hűtés optimalizálásakor megeshet, hogy bizonyos fényintenzitás-határérték elérése esetén a hűtést ki lehet kapcsolni. A hűtés építésekor lényeges szempontnak tekintetem, hogy impulzusszélesség-modulációval (PWM) vezérelhető ventilátorokat válasszak.

3. táblázat. A vizsgálatok során mért kiinduló és záró értékek.

Vizsgált jellemző paraméter	900 W/m <sup>2</sup>		700 W/m <sup>2</sup>	
	nem hűtött	hűtött	nem hűtött	hűtött
Maximális üresjárás feszültség [V]	21,469	21,567	21,577	21,599
Minimális üresjárás feszültség [V]	18,574	19,188	19,412	19,586
Maximális hőmérséklet [°C]	61,4	58,5	52,4	50
Minimális hőmérséklet [°C]	24,3	23,9	23,5	23,7

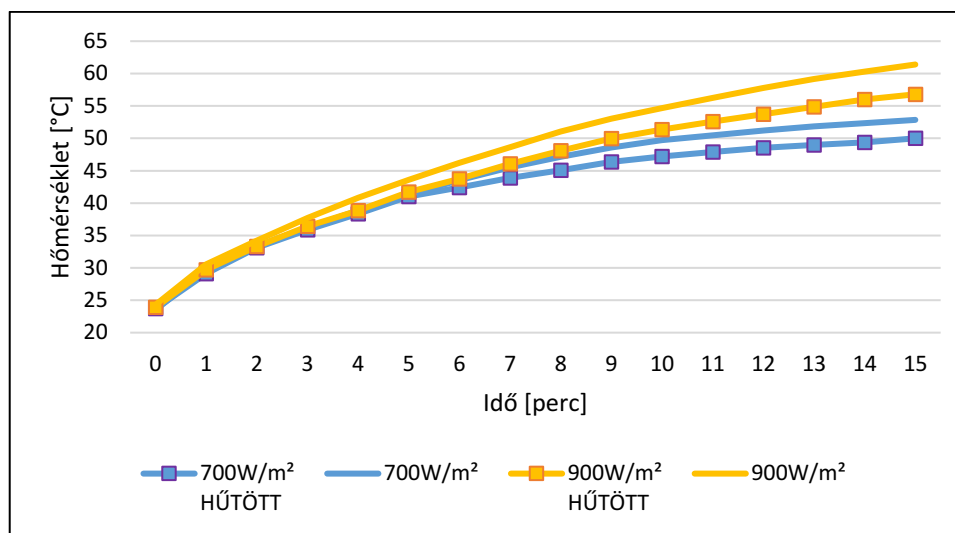
A hőmérséklet tranziens jelenség lefutásának hatását jól szemlélteti a 20. ábra. A panel üresjárás feszültsége minden alkalommal közel azonos értékről indult. Az előzetes várakozásoknak megfelelően a nagyobb fényintenzitás hatására a panel gyorsabban és intenzívebben melegedett át (21. ábra). A 15 perces mérések első 5 percében sem a hőmérséklet, sem az üresjárásfeszültség-értékek esetében nem alakultak ki számottevő különbségek. Amennyiben az utolsó 5 perces szakaszt vizsgáljuk, szembevetve, hogy a  $900 W/m^2$  fényintenzitás mellett a hűtés hatása erőteljesebben megmutatkozott.

A 20. és a 21. ábráról is egyértelműen leolvasható, hogy  $700 W/m^2$  megvilágítás mellett a melegedési folyamat és az ezzel járó feszültség hatványfüggvény jellegű csökkenése már szinte teljesen lecsengett, de még nem lépett át állandósult fázisba. A hűtés látszólag nem bizonyult olyan aktívnak, mint  $900 W/m^2$  fényintenzitás mellett, azonban ennek oka inkább abban a tényben keresendő, hogy a hűtés nélküli mérés során alacsonyabb fényintenzitás mellett a panel felületét érő hősugarak erőssége is gyengébb volt. A hűtés nélküli alacsonyabb fényintenzitás mellett produkált feszültségváltozás közel azonos volt a magasabb fényintenzitás mellett hűtött panel feszültségváltozásával.



20. ábra. A különböző fényintenzitás-értékek esetében mért üresjárásfeszültség-értékek.





21. ábra. A különböző fényintenzitás értékek esetében mért hőmérséklet értékek.

Az alkalmazott hűtési mód kültéri környezetben hatékonyabb volt, mint a laboratóriumi vizsgálatok során. Ennek egyik oka lehet, hogy a szabadtéri vizsgálatok során a meleg levegő könnyebben elhagyhatta a vizsgálati zónát. Másodsorban a halogén megvilágítás nagy mennyiségű hője torzítja a vizsgálatokat, valamint a fény spektrális eltérése miatt a termelt áramerősség is jóval alacsonyabb (mintegy fele), így a panel belsejében a folyó áram hatására keletkező hő nem jelentkezik. Ugyanakkor hasznos adatokat sikerült gyűjteni a panel működésével kapcsolatban, ami megalapozhatta további vizsgálatok elvégzését.

#### 4.5. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terhelt napelempanelen

Az adatgyűjtés során számos műszer szolgáltatja az adatokat. Alkalmaztam négycsatornás digitális hőmérőt (Voltcraft K204), digitális multimétereket az eredmények ellenőrzésére (Metrix MX59HD és Maxwell MX-25328), valamint digitális oszcilloszkópot (Voltcraft DSO-3204). A terheletlen napelempanel vizsgálathoz hasonlóan 4 db Arctic PWM PST ventilátor fűjta a levegőt a napelempanel hátoldalára. A ventilátorok vezérelhetők, fordulatszámuk szabályozható volt. Közvetlenül a töltésvezérlőhöz is csatlakoztathatók, vagy a napelemes rendszertől független tápegységről is üzemeltethetők voltak.

Négy mérési összeállítás lett vizsgálva, minden esetben halogén reflektorokkal:

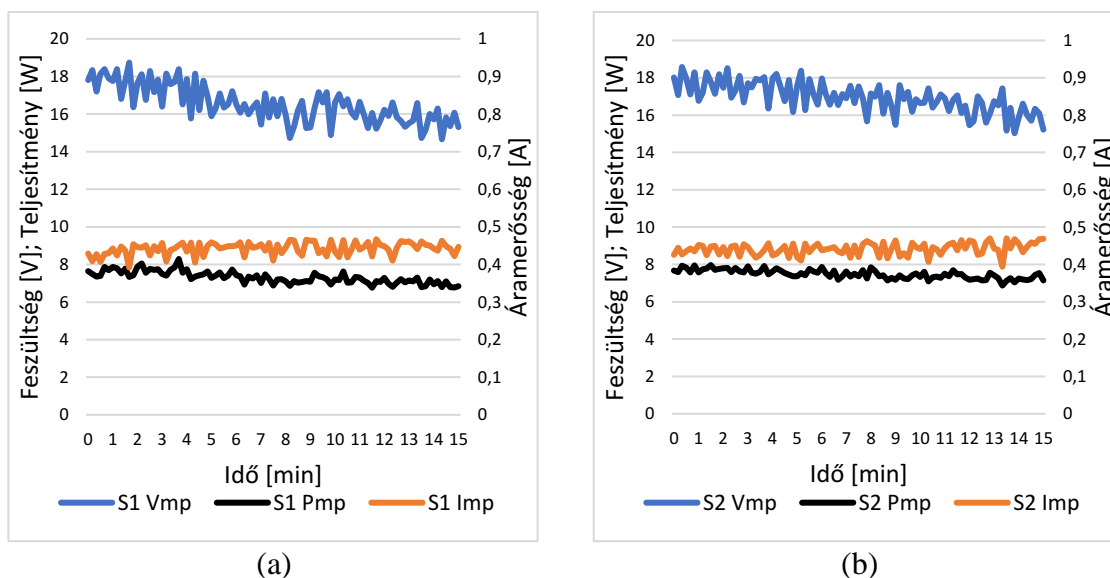
- S1: 700 W/m<sup>2</sup> megvilágítás
- S2: 700 W/m<sup>2</sup> megvilágítás és hűtés
- S3: 900 W/m<sup>2</sup> megvilágítás
- S4: 900 W/m<sup>2</sup> megvilágítás és hűtés

##### 4.5.1. Terhelt napelempanel hőtranziens jelensége 700 W/m<sup>2</sup> fényintenzitás mellett

Az első és második mérési összeállítás mérsékelt hőmérséklet növekedést eredményezett, mivel az alacsonyabb fényintenzitás kevésbé melegítette fel a napelempanelt. S1 kísérlet során a kezdeti hőmérséklet 25,1 °C volt és végül 54,2 °C lett. S2 esetében a kezdeti hőmérséklet 25,0 °C volt és 47,3 °C lett.

A 22. (a) ábra mutatja a S1 kísérlet eredményeit. Ebben az esetben a munkaponti feszültség kezdetben 18 V körül ingadozott, ez az érték a melegedés hatására 15 V körüli

értékre csökkent. Ezzel szemben az áramerősség kezdetben csak 0,4 A volt, ami az I-U karakterisztikából adódóan 0,46 A körüli értékre emelkedett. Ez a nagyon alacsony érték egyszerre következik az alacsony fényintenzitásból, valamint a napfény és a mesterséges fény közötti jelentős eltérésből. A generált teljesítmény csökkenő tendenciát mutat, a hőmérsékletnövekedés negatív hatását a vizsgálat igazolta [35, 36, 37, 38].



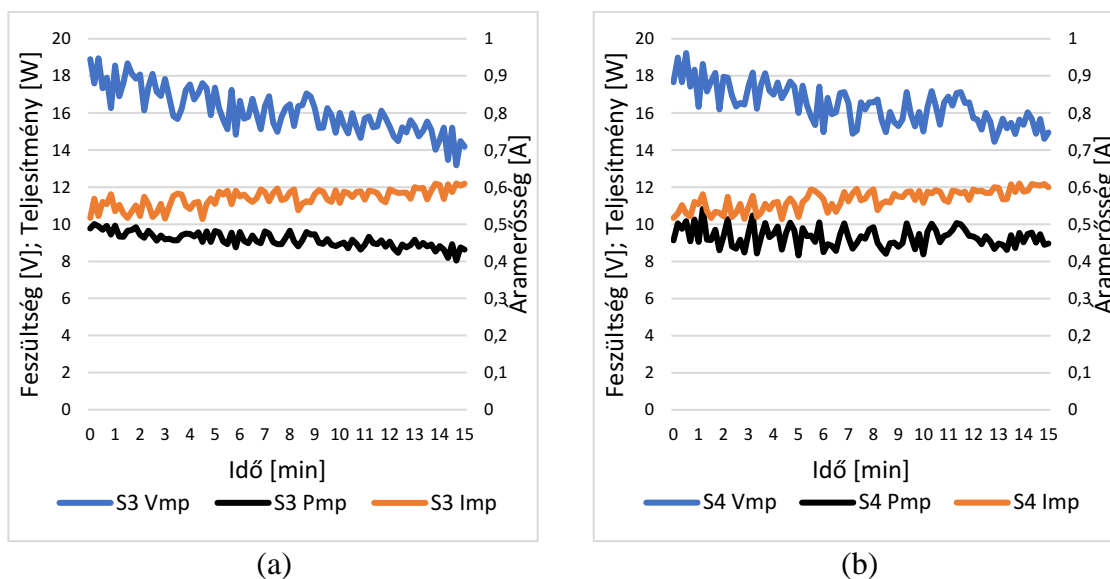
22. ábra. a) A S1; b) A S2 mérési összeállítás során mért villamos értékek.

A 22. (b) ábra mutatja a S2 kísérlet eredményeit. Ebben az esetben a munkaponti feszültség kezdetben 18 V körül ingadozott, ez az érték a melegedés hatására 16 V körüli értékre csökkent. Ezzel szemben az áramerősség kezdetben csak 0,4 A volt, ami az I-U karakterisztikából adódóan 0,47 A körüli értékre emelkedett. A generált teljesítmény csökkenő tendenciát mutat, a hőmérsékletnövekedés negatív hatását a vizsgálat igazolta, az S1 esethez hasonlóan. S1 és S2 esetben is 7,6 W volt a kezdeti teljesítmény, mely S1 esetben 6,8 W-ra csökkent. S2 kísérlet végén a teljesítmény 7,2 W volt.

#### 4.5.2. Terhelt napelempanel hőtranzien্স jelensége 900 W/m<sup>2</sup> fényintenzitás mellett

A harmadik és negyedik mérési összeállítás jelentős hőmérsékletnövekedést eredményezett, mivel nagyobb fényintenzitás érte a napelempanel felszínét. S3 kísérlet során a kezdeti hőmérséklet 24,9 °C volt és végül 58,5 °C-ra emelkedett. S4 esetében a kezdeti hőmérséklet 25,0°C volt és 53,1°C lett.

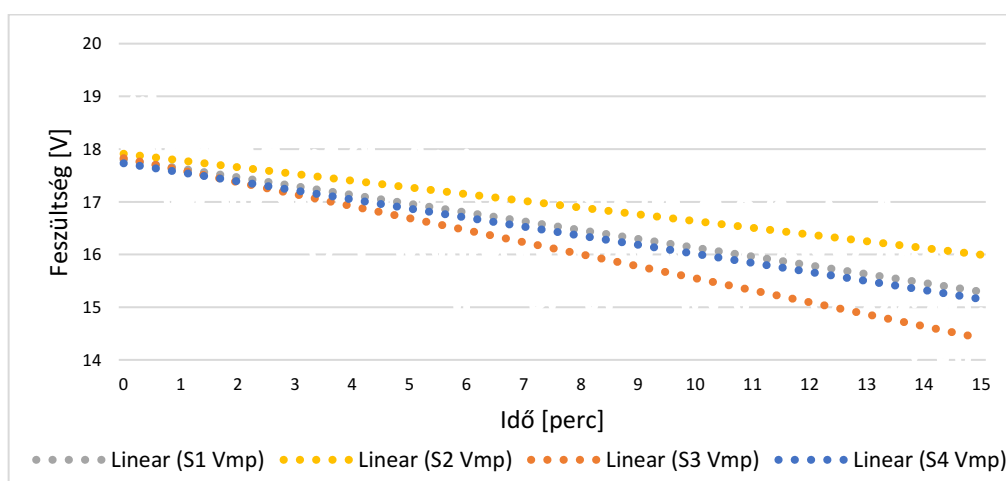
A 23. (a) ábra mutatja a S3 kísérlet eredményeit. Ebben az esetben a munkaponti feszültség kezdetben 18 V körül ingadozott, ez az érték a melegedés hatására 14 V körüli értékre csökkent. Ezzel szemben az áramerősség kezdetben csak 0,5 A volt, ami az I-U karakterisztikából adódóan 0,6 A körüli értékre emelkedett. Ez kis mértékben magasabb érték, mint S1 és S2 esetben a magasabb fényintenzitás eredménye. A generált teljesítmény csökkenő tendenciát mutat, a hőmérsékletnövekedés negatív hatását a vizsgálat igazolta [35, 36, 37, 38].



23. ábra. a) A S3; b) A S4 mérési összeállítás során mér villamos értékek.

A 23. (b) ábra mutatja a S4 kísérlet eredményeit. Ebben az esetben a munkaponti feszültség kezdetben 18 V körül ingadozott, ez az érték a melegedés hatására 15 V körüli értékre csökkent. Ezzel szemben az áramerősség kezdetben csak 0,5 A volt, ami az V-I karakterisztikából adódóan 0,6 A körüli értékre emelkedett. A generált teljesítmény csökkenő tendenciát mutat, a hőmérsékletnövekedés negatív hatását a vizsgálat igazolta, az S1, S2 és S3 esethez hasonlóan. S1 és S2 esetben is 10 W volt a kezdeti teljesítmény, mely S1 esetben 8,5 W-ra csökkent. S2 kísérlet végén a teljesítmény 9 W volt.

A 24. ábra a mért munkaponti feszültségértékek lineáris interpolációit mutatja, amely jobban szemlélteti a különbségeket a különböző esetek között. Mindkét megvilágítási érték mellett jól működött a hűtés, hasonlóképp mérsékelte a teljesítményvesztéséget. Ugyanakkor a 20. és 24. ábra között megfigyelhetőek olyan különbségek, hogy a feszültségváltozás üresjárás esetében hatványfüggvény, MPPT vezérlő közbeiktatásával lineáris volt.



24. ábra. A maximális munkaponti feszültség mérési sorozatainak összehasonlítása.

## 5. A FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A napelemek veszteségét, illetve a természetesnél gyorsabb élettartamcsökkenését három fő tényező befolyásolja. Ezen tényezőket egyrészt a konstrukciós veszteségek, másrészt a tervezési és telepítési, harmadrészt az üzemeltetési problémák jelentik. A technológia és az anyaghasználat okozta hatásfok maximumokon kívül, a kész napelemek használata során fellépő külső tényezők is csökkenthetik a modulok hatékonyságát. A szennyezett cellák, a hőmérséklet és a terhelés mértéke sorolható ezen környezeti körülmények közé [2, 3]. A napelemmodulok karbantartást szinte nem igényelnek, ugyanakkor a üzemeltetésük során felmerülő felületi szennyeződés hatékonyság- és élettartamcsökkentő hatását nem hanyagolhatjuk el. Az évi villamosenergia-veszteség jelentős lehet, világszinten értéke elérheti átlagosan a 17%-ot is. Európában éves szinten akár 5-20%-os termeléskiesést okozhatnak a szennyeződések, extrém nagy szennyezettségénél (pl. sivatagi környezetben) akár az 50-70%-ot is [5, 39]. A napelemcellák hőmérséklete az átmeneti ellenállásnövekedés okozta hőképződés és a hőszigetelő réteggént viselkedő szennyeződés miatt jelentősen megnőhet. A folyamat jellemzése nem egyszerű, hisz rengeteg tényező befolyásolja [5-8, 44-42]. A továbbiakban pontokba szedve mutatom be a legfontosabb paramétereket, amelyek összefüggést adnak a napelem felületi szennyeződése és a hatásfok romlás, az élettartamcsökkenés mértéke között [39, 41, 43-48].

### 5.1. Szennyeződések és forrásaik

A természetben leggyakrabban előforduló szennyezők a következők:

- madárürülék,
- por, pollen, homok- és talajszemcsék,
- a napelem felületére tapadt falevelek, növényi eredetű száraz, anyagdarabok.

Az emberi tevékenységek hatására jelentkező felületi szennyeződések:

- ipari üzemek működése során a levegőbe jutó szennyezők lerakódása,
- lakossági fűtésből származó korom, pernye,
- mezőgazdasági vagy egyéb emberi tevékenységből származó por,
- közúti közlekedésből származó szennyeződés (például: gumi-kopadék, korom).

### 5.2. A lerakódások formái a napelem felületén

A lokális szennyeződések (például: madárürülék) nem elhanyagolható mértékben befolyásolhatják a napelem teljesítményét. A kristályos napelemeknél még kritikusabb e típusú szennyezés megléte, hisz a sorba kötött cellákból álló egység hatékonyságát jelentősen csökkenti egy-egy cella foltos szennyeződése.

A teljes napelem felületét betakaró por, vagy egyéb szennyező réteg is káros hatással van a napelem megfelelő működésére. E lerakódások a nem megfelelő tisztítás következtében egymásra halmozódhatnak, az évek során egyre vastagabb és tartósabb „takaró” réteget képezve a napelem hasznos felülete előtt, és idővel képes beépülni, bediffundálni a napelempanelt borító üveglap felületébe, megváltoztatva annak struktúráját [2, 5, 43, 46, 49, 50].

A sarkokban kiemelkedően jelentős lehet a szennyező anyagok felgyülemelése, hisz ezeken a felületeken az eső tisztító hatása nem érvényesül kellőképpen. A vastag lerakódások a cellák túlhevülését is okozhatják, mert hőszigetelőként viselkedhetnek. Ha egy cella károsodik, akkor a vele sorba kötött cellák is kieshetnek az energiatermelésből, így a napelem hatásfoka és élettartama is csökken. Mivel a napelem felületén lerakódó porok közvetlenül fizikai kapcsolatba kerülnek a napelemmel, ezért az árnyékhatás mellett hőszigetelési problémákat is felvetnek, amelyek előre nem pontosan ismertek, dinamikusan változnak, ezért nehezen számszerűsíthetők. A valós hatások első sorban kísérleti úton ismerhetők meg. Magyarországon a leggyakoribb szennyezőanyag a szálló por. Az Egyenlítőhöz közeledve a sivatagi homok, míg a nagyvárosokban a közlekedésből származó légszennyezőanyagok okozzák a legnagyobb problémát. Időnként az úgynevezett transzporok is megjelennek. Mivel az egyes szennyezőanyagforrások szemcseméretében, sűrűségében és fényáteresztőképességében jelentős eltérések tapasztalhatók, ezért azok napeleme termelésére gyakorolt hatásai is igen széles skálán mozognak.

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. Eltávolításuk száraz tisztítási módszerekkel nem célszerű. Ilyen szennyezőanyagoknál lágyvíz, vagy speciális tisztítófolyadék alkalmazása javasolt.

A lágy- kisszemcsés anyagok mellett, hogy elektrosztatikusan tapadnak a napelem felületéhez, képesek bediffundálni a napelemet borító üveg, vagy műgyanta szerkezetébe. Ennek eredményeként eltűnhetnek a felületi barázdák, azonban ez egyben az üveglap elszíneződését is okozhatja. 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 növényi eredetű maradványok, mint például a falevél és az állati eredetű termékek, mint a madárürülék okoz. Amennyiben csak egy kis része szennyeződik a napelemnek és nem az egész árnyékolódik, akkor a bypass diódák nem aktiválódnak és a hot-spot (angol, jelentése forrópont) jelenség is kialakulhat, ami hosszabb távon visszafordíthatatlan kárt okoz a napelemben.

Mivel az árnyékhatásnak kitett cella árnyékoláskor fűtőellenállásként viselkedik, az azon átfolyó áram további (Joule) hőt generál. A szennyezőanyag gátolja ennek a hőnek a kisugárzását, ezért a cella túlmelegszik. A lokális túlmelegedés a cellák kiégést okozhatja, amely a teljes napelempanel működésére hatással van. Csökken a panel áramerőssége, feszültsége és a teljesítménye, tehát a hatásfoka és természetesen az élettartama is.

Amennyiben egy panelen belül több cella is kiég, akkor az a panel működésképtelenségéhez is vezethet és elkerülhetetlen a 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 vízkőfoltokat hagy a napelem felületén, ami szintén csökkentheti annak teljesítményét. A napelem tisztítását nem minden esetben végzi el az eső, általában a 9-10 mm-nél kisebb csapadék csak elmaszatozza a szennyezőanyagokat, éppen ezért a napelemek tisztítására erőműmérettől függően különböző módszereket dolgoztak ki. A kisméretű robotoktól kezdve a

takarító járművekig széles választék áll a rendelkezésünkre. Számítások szerint a napelemek gépesített tisztítása ugyan nagyobb költséggel jár, mint a poros napelemek termelés kiesése okozta bevételkiesés, azonban az élettartamcsökkenés elkerülése miatt szükségessé válhat annak időközönkénti elvégzése a telepítés környezeti adottságainak függvényében.

A tapasztalatok szerint jelentősége van a szennyező anyag szemcseméretének, sűrűségének és összetételének a hatásfokváltozásra nézve. A következő alfejezetekben példákat láthatunk az egyes anyagok által létrehozott hatásokra.

### 5.3. Szennyezők hatásának vizsgálata

A napelem működésének megértéséhez a félvezetőkkel foglalkozó elméleti anyagot kell megismerni. Amikor a naptól érkező foton energiája meghalad egy szükséges energiaszintet töltéshordozó párokat hoz létre. A napelem p-n átmenetében képződött feszültség szétválasztja az elektronokat és lyukakat, megakadályozza az úgynevezett rekombinációt. Az elektronok az n-réteg a lyukak a p-réteg irányába indulnak, ezzel létrejön a napelemben a fotoáram.

A napelem egyszerűsített elektronikai modellje (lásd 15. ábra) minden ohmikus és kapacitív elemet elhanyagolva egy diódából és egy vele párhuzamosan kapcsolt áramgenerátorból áll. Az előállított áramerősség értéke a megvilágítás erősségétől függ. A napelem kivezetésein üresjárási feszültséget, és rövidzárási áramot mérhetünk, azonban, ha terhelést kapcsolunk rá, ezek az értékek kisebbek lesznek. A napelem kapcsaira kapcsolt terhelésen átfolyó I áramerősség és azon eső U feszültség szorzataként számolható a napelem P hasznos teljesítménye (6. egyenlet).

A gyártók és forgalmazók jellemzően a teljesítmény csúcsértékével jellemzik a termékeiket. Ezt a csúcsértéket, azonban nagyon ritkán éri el a napelem, mivel számos tényezőtől függ, mint például a megvilágítottság mértékétől, a napsugarak beesési szögétől vagy épp valamilyen árnyékoló hatástól. Árnyékoló hatást gyakorol a napelempanel felületének szennyezettsége is. A tanszékünk napelemes laboratóriumában egy ideje folynak szennyezettég hatásait vizsgáló kutatások.

A korábbi mérések során a kiszórás általában valamilyen kanállal történt. A feltevés az volt, hogy mérésekkel igazolni lehet a kijuttatás módjának a napelem elektrotechnikai paraméterekre gyakorolt befolyásoló hatását. A kanál mellett új szóróeszközként a szitát alkalmaztam, valamint összevettem a két eszköz által a mérési adatokból kiolvasható különbségeket.

#### A szitálás szükségességét igazoló várt következmények:

- jobban eloszlik a szennyező a felületen,
- jobban közelíti a valós lerakódást,
- kiküszöböli a nagy szemcseméret béli különbségeket (nagyobb rögök kisselektálása),
- a nagyobb teljesítménycsökkenés lesz tapasztalható, ami egy esetleges fogyasztó biztonságos ellátását nehezíti fogja.

### 5.4. A mérések menete

A méréseket a Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék napelemes laboratóriumában végeztem el. A Korax Solar 80 Wp típusú monokristályos napelempanelt egy asztalra fektettem, ami fölé egy 8 reflektorból álló „napszimulátort” illesztettem [28, 49, 51, 52]. 1000 W-os halogén izzók világították meg a napelembet, azonban a megvilágítottság nem egyenletes a reflektorok közötti tér miatt (25. ábra). A megvilágítás medián értéke ( $E_{med}$ ) 874 W/m<sup>2</sup> volt [52, 53]. A

napelemet jellemző paraméterek:  $P_{\max}$ : 85 W,  $A_{\text{hasznos}}$ : 1,5 m<sup>2</sup>. Mért villamos paraméterek: a napelem üresjárási feszültsége, valamint a rövidzárási árama. A fény spektrális összetételének állandója 0,532, ami a spektrofotométerrel meghatározott görbe alatti területek hányadosa. [2, 28, 54, 55]. Ez azt jelenti, hogy halogén reflektoros szoláris szimulátorral a napfényhez képest a mért áram 53,2%-a a valós értéknek. Ezen villamos paraméterek mérése egy METRIX MX-59HD típusú digitális multiméterrel történt. A szennyező anyagok kiszórása háromféle eszközzel ismételttem meg, két eltérő lyukátmérőjű szitával, valamint egy konyhai műanyag kanállal. A szennyezőanyag adagok kimérését egy Voltcraft PS-200B típusú ékszermérleggel végeztem el.



25. ábra. A napszimulátor által megvilágított napelempanel.

Minden mérést 17,5 V üresjárásifeszültség-érték elérésekor kezdtem el. A kísérletek során a szennyező mennyiségét 5 g-ként növeltem egészen 75 g-ig. A por adagokat a korábbi fejezetben megemlített mérleggel kifejezetten pontosan ki tudtam mérni. Négy anyagot vizsgáltam, termőföldet, homokot, hamut és városi port, továbbá három eszközt, két különböző lyukátmérőjű szitát, valamint kanalat (4. táblázat). A különböző szemcseméretű frakciókat előre leszitáltam, így a kimérés után a napelem felületére való kijuttatáskor az összes anyag lehullhatott a felületre.

A vizsgálatok előtt felmelegedési folyamat lezajlottak az hőmérsékleti tranziens jelenséget, amikor az elektromos paraméterek gyorsan változnak. 20 perc elteltével a panel felületi hőmérséklete 23 C°-ról 70 C° fölé emelkedett, ekkor a feszültség beállt egy konstans értékre. Minden esetben a hőmérsékleti tranziens jelenség végeztével kezdődött meg a felület porral történő szennyezése [28].

4. táblázat. A vizsgálatok során felhasznált szóróeszközök és szennyezőanyagok kapcsolata.

	1. eszköz	2. eszköz	3. eszköz
<b>Elnevezés</b>	E1	E2	E3
<b>Jelölés diagramon</b>	háromszög	négyzet	kör
<b>Eszköz típusa</b>	kanál	szita	szita
<b>A szita lyukátmérője</b>	-	0,9 mm	0,5 mm
<b>Kiszórt szennyező szemcsemérete</b>	föld: 0,1 – 6 mm homok: 0,3 – 3 mm	0,9 mm szemcseátmérőnél kisebb szemcsék, de 0,5 mm-nél nagyobb	0,5 mm szemcseátmérőnél kisebb szemcsék

### 5.5. Terheletlen napelempanel szennyeződésvizsgálata

A felhasznált négy anyag közül három nem igényel komoly ismertetést, azonban a negyedik definiálása elkerülhetetlen. Az anyagnak a városi por nevet adtuk, mivel egy garázból lett gyűjtve. Ennek magyarázata, hogy a garázsban az autóról származó, lehulló por számos különböző anyag keveréke. Tartalmazhat földet, az autókból származó olajmaradványokat, gumi-kopadékat és minden olyan szennyezőt, amelynek jelenléte a városi környezetben és forgalomban felmerülhet. Az anyag használatának célja az volt, hogy városi környezetben hasonló szálló por lehet jelen a levegőben, ami adott esetben lerakódást képezhet bármilyen napelempanelen.

Mivel a szennyező anyagok pontos adagjainak beállítására tömegméréssel volt megoldható, így a sűrűség, mint fizikai paraméter jelentős szerepet kapott. Például a hamu és a homok közti sűrűség különbség majdnem háromszoros, így a hamu a homokhoz képest sokkal alacsonyabb koncentráció mellett, sokkal nagyon felületet boríthatott be a napelempanelen (5. táblázat).

5. táblázat. A különböző felhasznált anyagok fizikai jellemzői.

Szennyező	Színkód (diagramon)	Sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ]	Fajlagos felület [mm <sup>2</sup> /g]	Szemcseméret [mm]
Homok	kék	1,45	~0,30	0,2...0,8
Hamu	barna	0,6	~0,66	0,1...1,4
Föld	piros	0,8	~0,35	0,1...6
Városi por	zöld	n/a	n/a	< 0,5

#### 5.5.1. Feszültségesítés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén

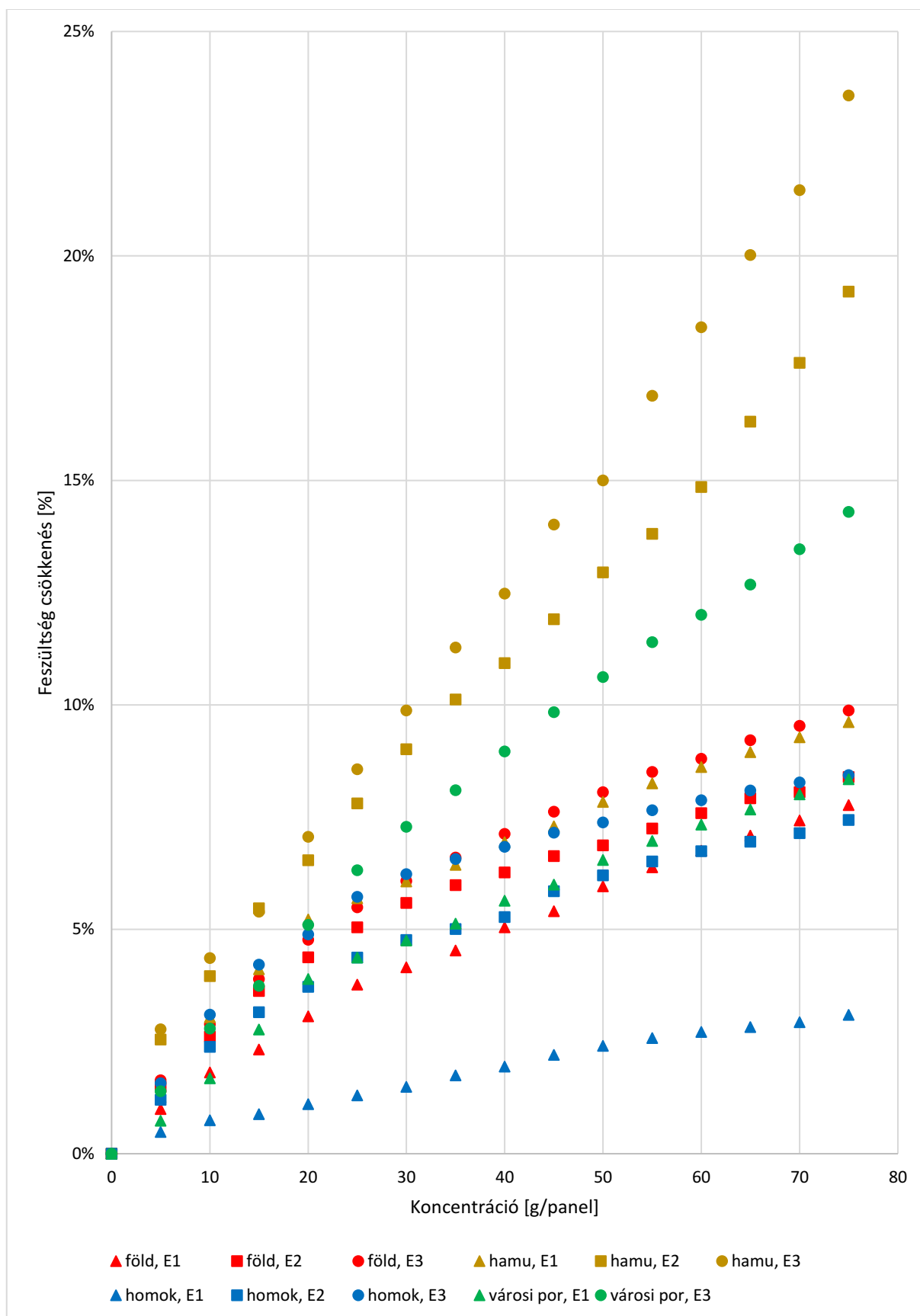
Mivel számos mérési sorozat eredményét kellett egy ábrába (26. ábra) belesűriteni ezért az anyagtípusokat színekkel jelöltem: a termőföldet a piros, a hamut a barna, a homokot a kék valamint a városi port a zöld szín jelöli. Továbbá a használt eszközöket (E1, E2 és E3) a sorozatok jelölőjének variálásával különböztettem meg (háromszög, négyzet és kör).

A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 10%-os feszültségesítés a kanál használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por és föld szennyezők legjelentősebb csökkentő hatása 7,8%-volt, ellenben homok esetén 3% volt. A homok szennyező jelentő lemaradása azzal magyarázható, hogy a homok fényesebb felületű, több fényt ver vissza. Ezáltal a hőelnyelő képesség kisebb, a feszültség értékek esetében is kisebb csökkenés tapasztalható.

A többi kijuttatási módhoz hasonlóan a hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 19%-os feszültségesítés a nagyobb szemcseméretű frakciót produkáló szita használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A föld legjelentősebb csökkentő hatása 8,5%-volt, ellenben homok esetén ez az érték 7% volt.

A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 24%-os feszültségesítés a legfinomabb szemcseméret és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por legjelentősebb csökkentő hatása 14%-volt, ellenben föld esetén ez az érték 10%, homok esetén 8% volt. A városi porral kapott eredmény kevésbé marad el a homok és a föld esetén tapasztalt értéktől, azonban a hamu esetén mért csökkenés továbbra is kiugróan magas volt a másik három anyaghoz mérten, ami a különböző anyagok sűrűségére vezethető vissza. A trendvonalak sorrendje és mintázata minden kijuttatási mód esetén hasonlóan alakult. Hasonló eredményekről számolt be Abderrezek és társai [6], Bhattacharya és társai [49], Sadat és társai [56], valamint Oh és társai [57].

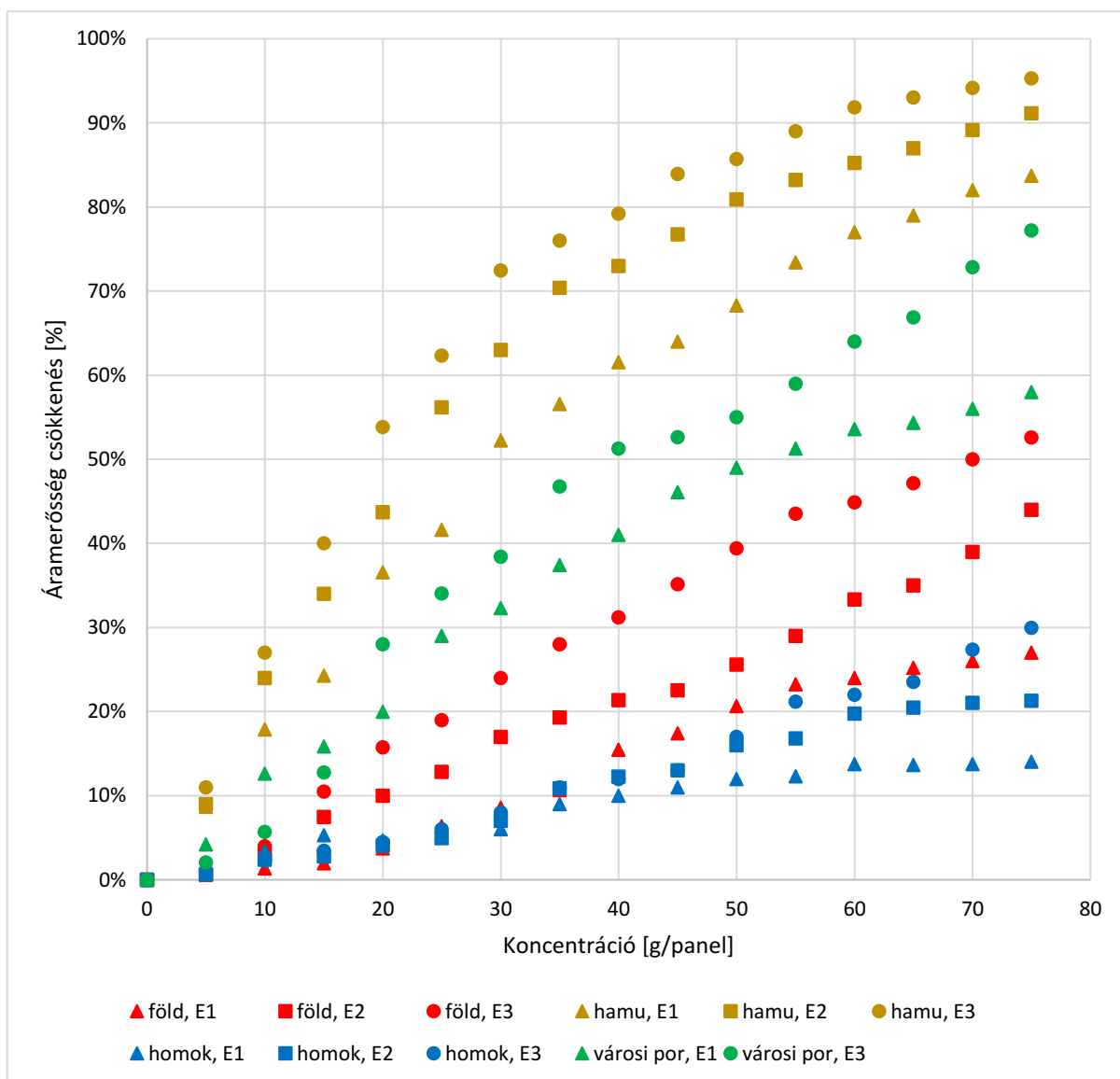




26. ábra. A felületi szennyeződés üresjárású feszültség csökkentő hatása.

5.5.2. Áramerősség csökkenés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén

Áramerősség csökkenés esetében az adatsorok jobban elkülönülnek a felhasznált szennyezőanyagok szerint (27. ábra). A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 84%-os áramerősség csökkenés a kanál használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por szennyező legjelentősebb csökkentő hatása 58%-volt, ellenben föld és homok esetén 27% illetve 14% volt. A többi kijuttatási módhoz hasonlóan a hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 91%-os áramerősség csökkenés a nagyobb szemcseméretű frakciót produkáló szita használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A föld legjelentősebb csökkentő hatása 44%-volt, ellenben homok esetén ez az érték 21% volt. A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 95%-os áramerősség csökkenés a legfinomabb szemcseméret és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por legjelentősebb csökkentő hatása 77%-volt, ellenben föld esetén ez az érték 53%, homok esetén 30% volt. Ennek magyarázata ismét a szemcseméretre, valamint az anyagok közti sűrűségkülönbségre és jellemző szemcseméretre vezethető vissza. A trendvonalak sorrendje és mintázata minden kijuttatási mód esetén hasonlóan alakult.



27. ábra. A felületi szennyeződés rövidzárasi áramerősség csökkentő hatása.

## 5.6. A szennyeződésvizsgálat értékelése felületre való kijuttatási mód szerint

### 5.6.1. Szennyeződésvizsgálat földdel

A mért elektrotechnikai paraméterek bemutatása során, mivel azok csökkenését kívánjuk bemutatni, minden esetben százalékos eltéréseket használunk. A vizsgálatok elején mért kiinduló érték (feszültség esetén 17,5 V), egyben a maximális érték is minden mérési sorozatban, így az ettől való százalékos eltérést mutatják a diagramok. Ebből kifolyólag, minden diagram az origóból indul, így a trendvonalakkal ellátott mérési sorozatok jobban szemléltetik a különböző vizsgálatok közti eltéréseket.

A 27. ábra mutatta termőföld esetén a szennyezőréteg hőszigetelő hatásából adódó feszültségesést. Megfigyelhető, hogy már a mérések kezdeti szakaszában jelentősen nagyobb feszültségesés volt tapasztalható a szitálás esetében, mivel így gyorsabban lehetett nagyobb felületrészeket befedni a szennyezőanyagokkal [58, 59].

Másodsorban, az áramerősség csökkenését a megvilágítottság mértéke befolyásolja. A napelempanel felületén jobban szétterülő szitált szennyező nagyobb árnyékoló hatása jelentősebb csökkenést eredményezett. A termőfölddel való beszennyezés áramerősség csökkentő hatását a 3. árba mutatja.

### 5.6.2. Szennyeződésvizsgálat homokkal

A homok esetében a mérés kiinduló szakaszában már igen jelentős, közel 3 szoros különbségeket lehetett tapasztalni. Kanállal való kiszórás esetén a kapott adatsor közel lineáris volt, ellenben a szitálással már hatványfüggvény jelleg szerint követték egymást a mért adatok. Ez a jelenség szintén azzal magyarázható, hogy már a mérés kezdeti szakaszában jobban szétterült a napelem felületén a szennyezőanyag. Továbbá a homok kanállal történő egyenletes kiszórása sokkal nehezebb volt, mint szita esetén, így ezek az értékek jobban elmaradnak a szitással elért eredményekhez képest [58].

A homok szennyező különböző szemcseméretinek esetében 30 g/panel koncentrációig nem volt tapasztalható jelentős különbség az áramerősség csökkenésében. Ez azzal magyarázható, hogy a homok szemcsék közt kisebb érték mutatkozik, kevesebb igazán apró részeket tartalmaz, mint a föld. Csak nagyobb koncentráció esetén lehetett jelentősebb különbségeket tapasztalni, ami már a felületen való szétterülésének mértékéből adódott [58].

### 5.6.3. Szennyeződésvizsgálat hamuval

A hamu kanállal való szórása esetén a feszültségcsökkenés a koncentráció függvényében hasonló trend szerint alakult, mint homok esetén. Ellenben nagy koncentrációk mellett már a az egyre vastagabb szennyező réteg miatt a feszültségcsökkenés mértéke megnőtt. Ez a különbség azzal magyarázható, hogy a hamu sűrűsége jelentősen kisebb. Ezáltal a hőelnyelő képesség nagyobb, a feszültség értékek esetében is nagyobb csökkenés tapasztalható. A hamu kanállal történő egyenletes kiszórása nem okozott komoly nehézséget, mint például homok esetén, ennek ellenére az értékek mégis jelentősen elmaradnak a szitálással elért eredményekhez képest.

A hamu szennyező különböző szemcseméretinek esetében a teljes koncentráció tartományban nem volt tapasztalható számottevő különbség az áramerősség csökkenésében, azonban az eredmény sorok jobban elkülönülnek, mint homok esetén. Ez azzal magyarázható, hogy a homok szemcsék közt kisebb érték mutatkozik, kevesebb igazán apró részeket tartalmaz, mint a hamu.

Nagyobb koncentráció esetén a görbék meredeksége lecsökken, ami már a felületen való jelentő szétterültségből adódott.

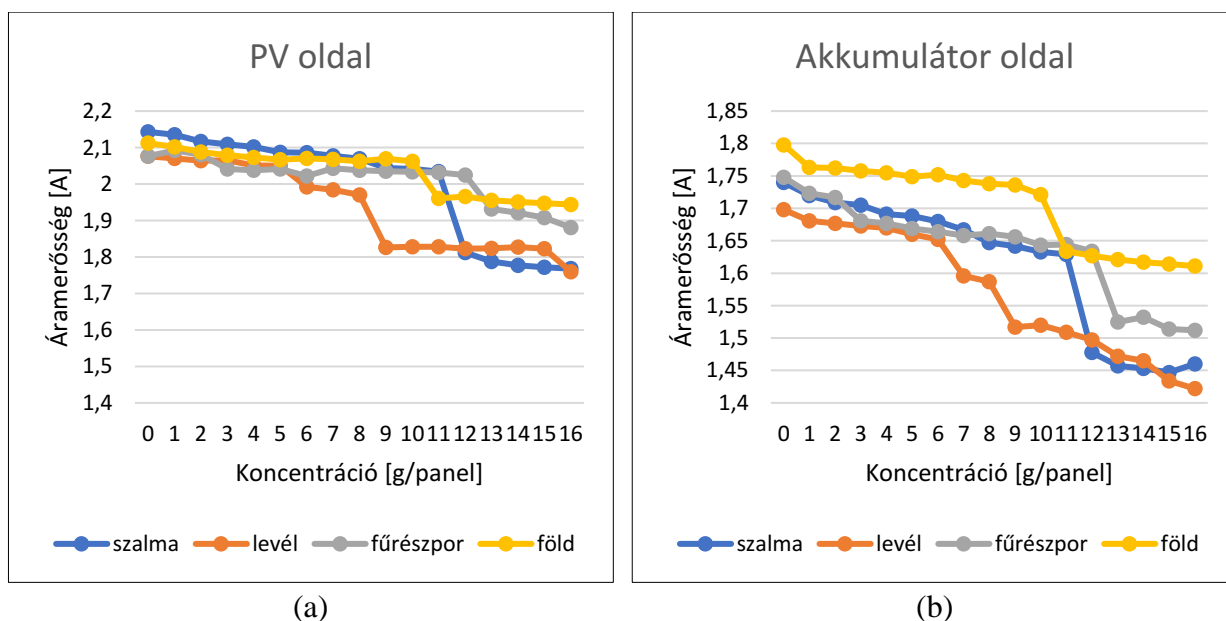
#### 5.6.4. Szennyeződésvizsgálat városi porral

A városi por esetében nem sikerült különböző frakciókra szétválasztani a szennyező anyagot, mivel jellemzően olyan kis szemcséket tartalmazott a gyűjtött anyag, amelyek nem maradtak fenn a nagyobb lyukátmérőjű szitán. A két mérés megfelelően bizonyítja a szitálás hatását, miszerint számottevően jelentősebb csökkenést okozott az üresjárásifeszültség-értékében.

A városi por szennyező különböző szemcseméretinek esetében 55 g/panel koncentrációig nem volt tapasztalható jelentős különbség az áramerősség csökkenésében. Ez azzal magyarázható, hogy a városi por szemcsék közt kisebb értékű mutatkozik, kevesebb igazán apró részecskét tartalmaz, szétválasztani is nehezebb volt, mint a többi szennyezőanyagot. Csak nagyobb koncentráció esetén lehetett jelentősebb különbségeket tapasztalni, ami már a felületen való szétterülés eltérő mértékéből adódott.

#### 5.7. Terhelt napelempanel szennyeződésvizsgálata organikus anyagokkal

Ugyanazzal a 80 Wp monokristályos napelemmel végeztem méréseket, azonban a napelemet MPPT töltésvezérlőre kötöttem és egy akkumulátor töltésére állítottam be. A szennyezőanyag koncentrációját 16 g/panel szintig emeltem, mivel az örölt organikus szennyezőanyagok sűrűsége rendkívül kicsi. A terhelt napelem vizsgálat lényege, hogy az MPPT működését lehet megfigyelni. A grafikonokon jól kivehetők azok a letörések, amelyek a munkapontkövető szabályozókör beavatkozását jelölik. Ekkor a felület szennyezettsége egy olyan kritikus határérték elérését jelentette az áramerősség csökkenésben, mikor új munkapont megválasztására volt szükség (28. (a) ábra). A napelem által szolgáltatott áramerősség és a töltőáram változását egyaránt mértem (28. (b) ábra). Értelemszerűen ez egyben drasztikus teljesítményvesztésget is jelentett.



28. ábra. A felületi szennyeződés munkaponti áramerősség csökkentő hatása.

## 6. ÁLLAPOTFELMÉRÉS ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLAT

A degradáció egy alkatrész vagy egy rendszer paramétereinek a fokozatos romlása, amely befolyásolja és folyamatosan rontja a működési értékeit. Mivel természetes és gyakorlatilag elkerülhetetlen folyamatról van szó az elsődlegesen elérendő cél, hogy a termék a lehető legtovább az elfogadhatóság határain belül működjön. A fotovoltaikus paneleknek és rendszereknek a degradáció ellenére is képeseknek kell lenniük hosszú távon ellátni az elsődleges funkciójukat, ami az energiatermelés, még akkor is ha a működésük az idő előrehaladtával már nem optimális. A gyártók szerint a napelempaneleknek 25 év elteltével is meg kell őrizniük a teljesítményük 80%-át. 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.

Az elmúlt évek során a napelemes rendszerek állapotfelmérésére számos módszer terjedt el, melyeket in-situ és ex-situ csoportra oszthatunk. Az in-situ, azaz helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérések előnye, hogy a rendszer működését minimális mértékben befolyásolják. Ilyen módszernek tekinthető a termográfias hibakeresés. Az ex-situ állapotfelmérés során, a rendszer megbontásával a rendszerelemeket további vizsgálatoknak lehet alávetni, amelyek laboratóriumi körülmények között pontos és részletes képet adnak a meghibásodások okáról és mértékéről. A gyakorlati tapasztalatok alapján kijelenthető, hogy a már üzembe helyezett napelemes rendszerek 70%-nak esetében található kisebb-nagyobb mértékű hibák [60].

Az napelemek vizsgálatára alkalmas módszerek kiválasztása függ az adott terület nagyságától, a feltárási szándéktól és a napelemek megközelíthetőségétől. A legáltalánosabb vizsgálati módszereket az alábbiak szerint lehet pár mondatban összefoglalni:

- *Belső ellenállás mérés:* A méréshez a modult változtatható terheléssel (változtatható ellenállás) terheljük, miközben mérjük minden beállításban a terhelésen átfolyó áramot és a terhelésen mérhető feszültsége [61]. Amennyiben az ellenállás nő panelhibára gyanakodhatunk.
- *PSMFM:* Panel Surface Magnetic Field Measurement: Elektromágneses tér erősségének vizsgálta
- *Sorba kapcsolt panelek kimeneti feszültsége:* A panelek feszültsége soros kötés során összeadódik így közel kiszámítható azok reális értéke. Amennyiben nagyságrendi eltérés tapasztalható panel vagy több panel meghibásodására is van esély.
- *Hőkamera:* A kézi hőkamera mérése, mint a neve is mutatja kézben tartva történik egy hőkamera mérőeszközzel. Ez a mérésforma sok hibát belevihet a mérésbe az emberi tényező miatt.
- *Hőkamerával felszerelt drón:* Drón segítségével nagy felület gyors felmérésére alkalmas. A környezeti hőmérséklettől számottevően magasabb hőmérsékletű pontok illetve, felületek kimutatására alkalmazandó.
- *Flash teszt:* Villanólámpákkal megvilágítva a napelempanel jelleggörbéje és villamos paraméterei mérhetőek, laboratóriumi körülmények alatt.

- *Elektrolumineszcencia teszt:* Az elektrolumineszcencia optikai és elektromos jelenség, ahol egy anyag fényt bocsát ki elektromos áram vagy elektromos mező hatására. Amikor a fotovoltaiikus cellára feszültséget kapcsolunk, fotonokat emittál. Ahol alacsony az emisszió, vagy egyáltalán nem detektálható foton, ott hibára gyanakodhatunk.

### 6.1. Termográfias hibakeresés

A termográfia alatt egy szilárd test hőmérsékleteloszlásának képi megjelenítését értjük. Minden esetben az „első” felületet mérjük, mivel minden test felülete, ami melegebb az abszolút 0 K-nél (-273,15 °C), az elektromágneses hullámokat bocsát ki (fény, sugárzás). Ez szabad szemmel nem látható tartományba esik (0,78 - 1000  $\mu\text{m}$ ). A hőképképző berendezések, mint az ipari hőkamerák ezt a sugárzást térképezik és alakítják át láthatóvá. 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. Számos színskála közül lehet választani [62, 63, 64].

Hőkamerák alkalmazása az élet számos területén elterjedt gyors és költséghatékony alkalmazásuk miatt. A következő területeken terjedt el legjobban alkalmazásuk:

- *Hőkamera alkalmazása a vadgazdálkodásban:*
  - Megfigyelése
  - Megszámlálása.
- *Hőkamera alkalmazása az építőiparban:*
  - Hőszigetelés vizsgálata
  - Ipari balesetek
- *Hőkamera alkalmazása a határvédelemben:*
  - Határsértő tevékenységek
  - Rendfenntartó szervek munkájának segítése
- *Hőkamera alkalmazása napelemparkok vizsgálatára:* [65]
  - karbantartás
  - hibadetektálás

Napelemes rendszerek állapotfelmérése során e módszer célja a hibakeresés. 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 hő tovább melegíti a hibás (sérül, vagy szennyezett) cellákat, így a napelempanelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások. Egy teljesen ép állapotban lévő panel esetében is előfordulhat 15 °C hőmérsékletkülönbség, amit befolyásolhat a telepítés jellege vagy az időjárási tényezők. Nagyobb hőmérsékletkülönbség csak akkor jöhet létre, ha a panelen belül gyártási, telepítési, vagy üzemeltetési hibák miatt károsodott cellák találhatók, vagy szennyeződések rakódtak le a felületen.

A hőkamerás vizsgálatokkal az emberi szem számára láthatatlan hibák is megjeleníthetők. A rendszer telepítése után a teljes munkafolyamat eredményének minősége ellenőrizhető, mivel nem csak a panelek átvizsgálására alkalmas, hanem a többi építőelem ellenőrzésére egyaránt. A hiba helyének azonosítása gyorsan és könnyen elvégezhető, azonban nem minden esetben lehet pontosan meghatározni a hiba típusát és közvetlen hatását a napelemes rendszerre.

### 6.1.1. A napelemek üzemi hőmérséklete és a hő keletkezésének okai

A napelemeket érő sugárzás csak kis része alakul villamos energiává, többsége hő formájában jelentkezik az eszközben. A napelemek hatásfoka általában 15-25%, a sugárzás maradék nagy része a hőveszteség. Ez a hőmennyiség sajnos elkerülhetetlen és káros az energiatermelésre, valamint a napelem élettartamára is. A modulok üzemi hőmérséklete függ a rajtuk keletkező hőtől, a környezet hőmérsékletétől és a környezet felé leadott hőmennyiségtől. A gyártók a napelem adattábláján adják meg a hőmérsékletre vonatkozó adatokat. Ezt általában 25 °C -on, 1000 kW/m<sup>2</sup> körülmények között határozzák meg. Itt általában feltüntetik a normál üzemi hőmérsékletet (NOCT), és a hőmérsékleti együtthatókat. Ezek azt mutatják meg, hogy a panel hőmérsékletének 1 °C-al való emelkedése milyen százalékban befolyásolja a különböző paramétereket. A valós körülmények között általában jóval magasabb hőmérsékleten dolgoznak a megadottnál, ezért fontos a ténylegesen várható értékekkel tisztában lenni a rendszerek tervezésénél.

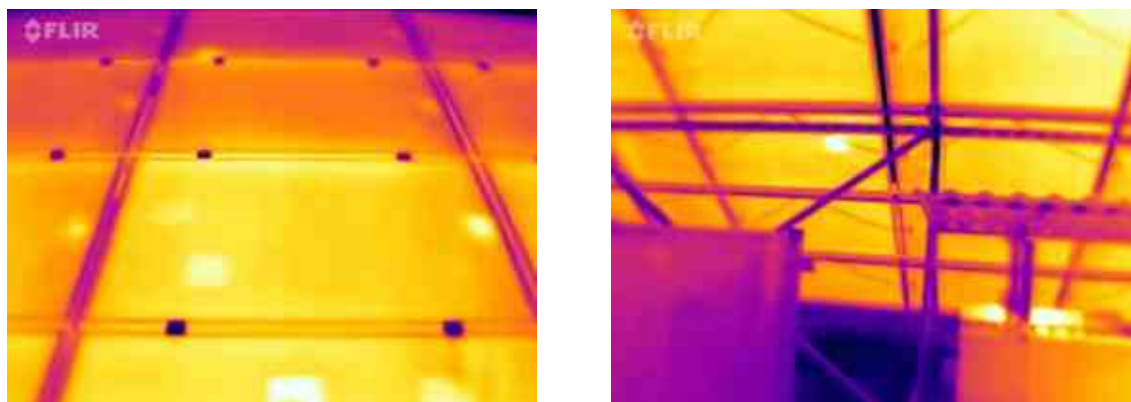
A modulokon keletkező hőnek több forrása is beazonosítható. A felületről visszaverődő hő nem járul hozzá az energiatermeléshez, de melegíti a modult. Ezért ezt a reflexiót a lehető legjobban minimalizálni kell. A napelem munkapontja a beérkező fény elnyelésétől függ abban az esetben, ha a modul nem rövidzárként vagy nyitott kapocsokként működik, mert ekkor az elnyelt energia hőként jelenik meg rajta. A panel hőmérsékletében közrejátszik a cellákon kívüli terület nagysága, ennek anyaga, színe és abszorpciós tényezője. A kis energiájú fény nem képes elnyelődni a hasznos rétegekben és energiává alakulni, ellenben a napelem hátsóbb részein abszorbeál és hővé alakul. A cellák elhelyezkedésének sűrűsége befolyásolja a keletkező hő mennyiségét. Minél nagyobb a cellák sűrűsége, annál nagyobb az egységnyi felületen keletkező hő.

### 6.1.2. Az optimális mérési körülmények

A hőkamera működése során az infrasugárzáson alapuló hőmérsékletet méri. A hőkamerás mérési módszer a testek hősugárzó képességétől függ. Hőmérsékleti sugárzás az a folyamat, amely az anyag hőmozgása miatt elektromágneses hullámokat bocsát ki magából. Ennek az energiának a nagy része másik testre vetülve emittálódhat, vagy reflektálódhat, továbbá transzmittálódhat. Ha a vizsgált testre érkező sugárzást a test maradék nélkül elnyeli, akkor abszolút fekete testről beszélhetünk. Ha teljes mértékben visszaverődik, akkor abszolút tükröződő testről, ha a testen teljes mértékben áthalad, akkor átlátszó anyagról beszélhetünk. A hősugárzásnak, mint elektromágneses hullám terjedésnek közvetítő közegre nincs szüksége. A különböző anyagok különböző energiát bocsátanak ki. A különböző anyagok esetében javítani kell az eredményt a megfelelő emissziós tényező figyelembevételével. A mai korszerű készülékek rendelkeznek automatikus emisszió-tényező-állítással, és lehetőség van kézi kalibrálásra is. A nem megfelelően figyelembe vett emisszió akár nagyságrendi hibát is okozhat. A helyes és pontos hőmérséklet meghatározásához nagy rutin és mérési tapasztalat szükséges az ipar minden területén [66]

A termográfias hibakeresésnek két módja ismeretes. Az egyik lehetőség a kézi hőkamerával végzett művelet, amely során az operátor gyalogosan térképezi fel az erőművet (29. (a) ábra). E módszer előnye az egyszerűsége, azonban nagy alapterületű (20-50 ha) erőműparkok esetében fásztó és időigényes. Továbbá az átlagos emberi testmagasságot figyelembe véve nehéz betartani az előírt kamera nézeti szöveget, ami 15-25 %-os reflexiós zavarokat (eltéréseket) eredményezhet a vizsgálat során. Mivel Magyarországon a napelemek ideális dőlésszöge kb. 35-45°, ehhez képest a kamera szöge 60-120° lehet (90° az ideális). A távolság a kamera felbontásától függ, de többségében ez 2-3 méter között van (29. (a) és 31. (a) ábra). A gyalogosan végzett hibakeresés

számára nehézséget jelent a háztetőre (nem lapostetőre) szerelt napelemek vizsgálata, azonban lehetőséget ad úgynevezett hátoldali mérés elvégzésére (29. (b) ábra), amely során a hőmérséklet eloszlás ugyanúgy ellenőrizhető, mivel a panelek vastagsága mindössze pár milliméter. A hátoldali mérés közben nem okoz gondot a reflexió, nem tudja károsítani a hőkamera detektorát a napsugárzás és magasabb az emissziós tényező [62, 63, 67].

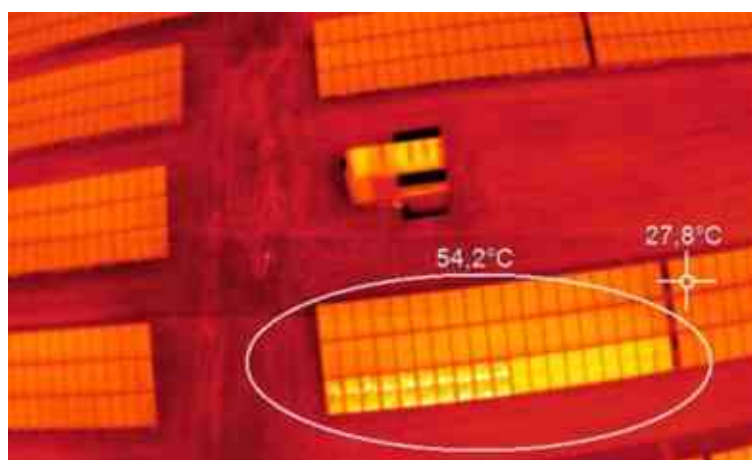


(a)

(b)

29. ábra. Erőművi napelemmodulok (a) fényérzéken oldali és (b) hátoldali mérése.

A másik lehetőség az erre a célra fejlesztett és felszerelt repülő drón alkalmazása (30. ábra), amennyiben a drón rendelkezik a megfelelő hatótávolsággal és akkumulátor kapacitással. Továbbá képesnek kell lennie a hőkamerát a magasba emelni, az üzembiztos repülési tulajdonságok megzavarása nélkül. A hőkamera megválasztásánál tisztában kell lennünk azzal a ténnyel, hogy a napelemek üvegfelülete nem teljesen átlátszó az infravörös spektrum számára és ez problémát okoz a termikus képalkotás során, mivel a napelemcellákból sugárzó infravörös sugárzás reflektálódik. Ezt a problémát érzékenyebb kamerák beszerzésével lehet orvosolni, amelynek legalább  $\leq 80$  mK hőérzékenységgel kell rendelkezni. Nagyobb távolságok esetén figyelni kell a kamerák felbontásának megfelelőségére is. További kényelmi funkció lehet az autofókusz, a forgatható kijelző, cserélhető lencse (különböző látószög pl.  $9^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $32^\circ$ ), valamint mobiltelefonos applikáció [60, 64, 68, 69, 70].



30. ábra. Erőművi modulok hőkamerás állapotfelmérése repülő drónnal.



A vizsgálatok során minkét ismertett esetben lényeges, hogy napfényes, tiszta időben a napelempanelek a felületüket megvilágító intenzív napsugárzás hatására már egy ideje üzemben legyenek, mivel a hibák megjelenése is időt vesz igénybe. Fényerősségmérő használatával ügyelni kell arra, hogy a napfény legalább  $500\text{-}600\text{ W/m}^2$  besugárzási értéket vegyen fel a sikeres detektálás érdekében (31. (b) ábra). A vizsgált felület emissziós tényezője elhanyagolható, mivel kizárólag a hőmérsékletkülönbségek megállapítására használatos eljárás.



(a)



(b)

**31. ábra.** Az előírt mérésnek megfelelő (a) távolság és kameraállás beállítása, (a) valamint a fényerősség mérő alkalmazása.

A vizsgálat emberi oldalát nézve elengedhetetlen, hogy az operátor és a kiértékelő személyzet megfelelő releváns műszaki képzettséggel, és informatikai terén felhasználói szintű tudással rendelkezzen. Továbbá a vizsgálatot végző személy rendelkezzen a termográfia alapismereteivel, illetve tudnia kell a hőkamerát előírás szerűen használni. Drónnal történő állapotfelmérés elvégzéséhez a kezelőnek rendelkeznie kell az adott drón vezetésére feljogosító vizsgával, valamint adott esetben légtérhasználati engedéllyel.

### 6.1.3. Hőkamerás állapotfelméréssel azonosítható hibák (kültéri mérések)

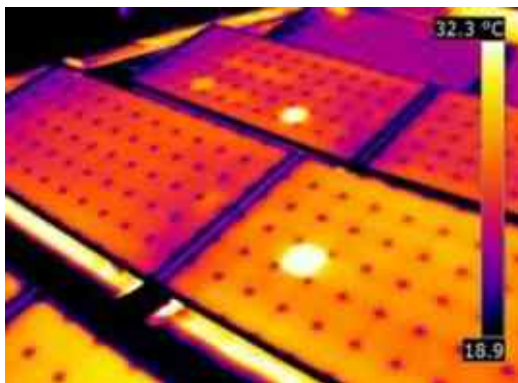
Fontos ismételt megemlíteni, hogy a termográfia alkalmas a teljes rendszer átvizsgálására. A módszer segítségével fény derülhet a napelemodulok károsodására, sérült csatlakozók korróziójára, esetleg gyártási hibáira, valamint az inverter vagy a kapcsolószekrény működési problémáira. Napelemek esetében tipikus hibának számít a rétegek sérülése vagy leválása, mikrorepedések és törések megjelenése a fényérzékeny anyagban, forrasztási hibák, bypass diódák gyári hibája, nedvesség okozta károsodás (korrózió), valamint a kopás [63, 68, 77, 72].

#### Hot-Spot hatás

Hot spot (forró pont) melegedésről akkor beszélünk, ha valamely kis terület a napelemen árnyékba kerül, vagy egyéb sérülési ok miatt nem tud a többi ép cellához hasonlóan energiát előállítani. A jelenség során a hibásan működő cella a szomszédos cellák egyenáramát hővé alakítja. Ez nagyobb probléma, mint a teljesítmény hozamának vesztese. Ez a nagy disszipáló teljesítmény a (leárnyékolt, hibás) kis területet túlságosan felmelegíti, hot spot keletkezik (32. ábra), amely visszafordíthatatlan károkat okoz a napelemben [67, 68, 71, 72, 73]. Ilyenek például

a cella- vagy üvegtörés, repedés, forrasztások fémes kontaktok olvadása, deformálódása, napelem öregedés.

A beazonosítás nagyon könnyű, mivel a detektált forrópont hőmérsékletének eltérése a környezetétől az átlagos hőmérsékletkülönbségnél (15 °C) jóval nagyobb. A hőmérséklet olyan mértéket ölthet, ami már potenciális tűzveszélyt jelenthet. A hot spot jelenség hátterében valójában számos kiváltó ok állhat, így inkább tekinthető egy összefoglaló fogalomnak.



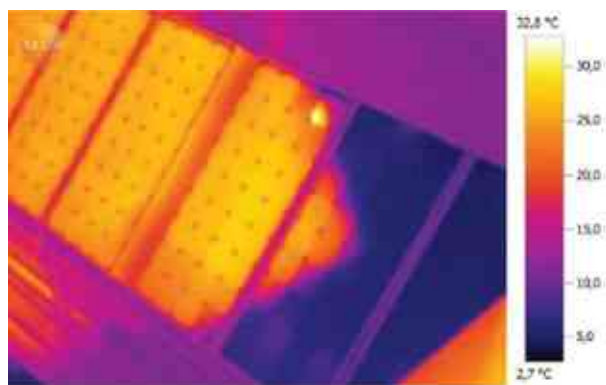
32. ábra. Hot-spot jelenség hőkamerával készített felvételen.

### Árnyékhatás – szennyeződés

Nagy alapterületű erőmű parkok esetében előfordulhat, hogy a felhőzet a napelemmodul sztringek bizonyos hányadát leárnyékolja, míg a fennmaradó rész az ideális feltételek mellett üzemelhet. Kisebb rendszerek esetében árnyékhatást okozhat valamilyen a fotovoltaikus rendszer közvetlen környezetében lévő épített (kémény) vagy természetes (faág) tárgy, valamint a modul üvegfelületén lerakódott szennyeződés. Előbbi esetben az érintett modulok vagy modul részek polaritása megfordul és terhelésként kezdenek viselkedni, ami befolyásolhatja a modulokban sorba kapcsolt cellák teljesítményét, akár a sorba kapcsolt modulok ezáltal a teljes rendszer termelőképességét (33. (a) ábra).



(a)



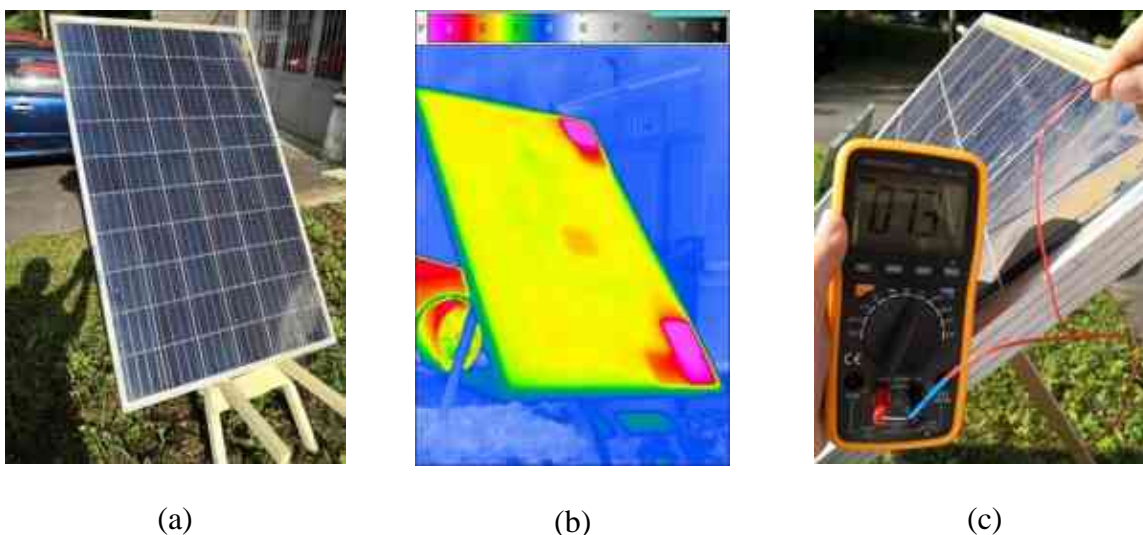
(b)

33. ábra. A nagy felületen árnyékolt panelek hőmérséklet eloszlása.

Abban az esetben mikor az árnyékhatást egy kémény, vagy a háztető geometriája okozza, az érintett felület hőmérsékleti terhelését akadályozza. Ebből kifolyólag átmenetelig lehül a panel árnyékolt része, mivel nem melegíti tovább a nap fénye és az áramerősség is drasztikusan lecsökken (33. (b) ábra). A napelem felületére vetülő, csak részletesen takaró mozgó árnyék a

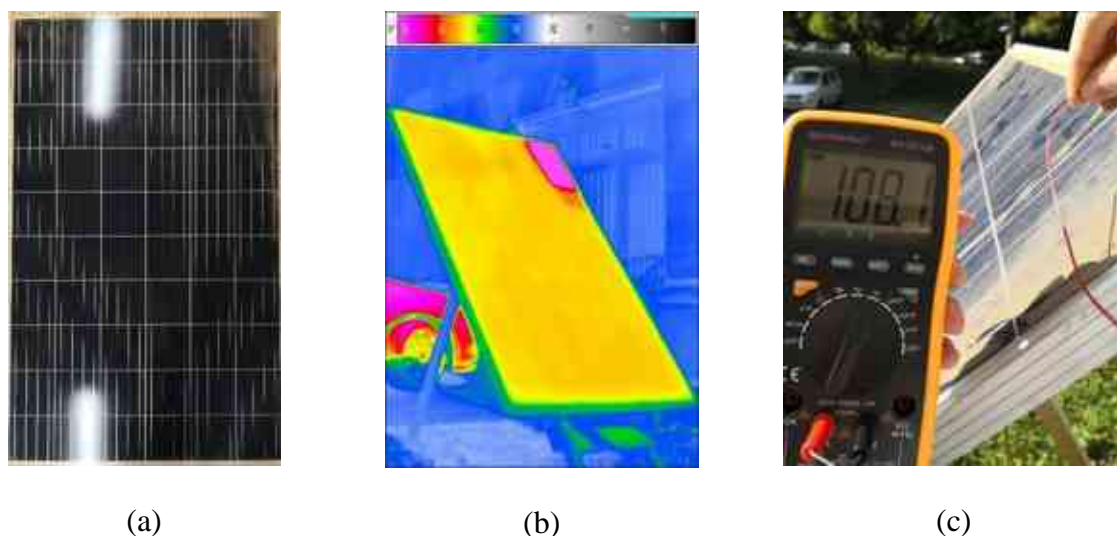
rendszer működésében igen zavaró és jelentős villamos aszimmetriát okoz, amely a napelem tönkremeneteléhez vezethet. Ellenben, a felületre tapadó szennyeződések esetében intenzív melegedési folyamatot indulhat el. Ez az utóbbi esetben a szennyeződés kiterjedésétől függően akár a hot spot jelenség is lehet az eredmény, de akár 3-4 szomszédos cella is átforrósodhat egyszerre.

A 34. ábrán által bemutatott felvételek nem egy erőművi felmérés során, hanem egy Miskolci Egyetemen elvégzett referenciakísérlet során készültek. A vizsgált 260 Wp napelemmodulok ugyan egy erőműből származnak, azonban leszerelésre kerültek. A 34. (a) ábrán (a modul normál, vizuális képén) megfigyelhető, hogy szemből a jobb felső és alsó sarkában felületi szennyeződés rakódott le. A panel rövidre zárva lett a napfény felé fordítva. A beltéri szobahőmérsékletéről (21°C) 20 perc leforgása alatt már elérte az átlagos 45 °C-os üzemi hőmérsékletét. Ugyanakkor a két sarokban a szennyeződés miatt jelentős túlmelegedés volt tapasztalható. A 34. (b) hőkamerás képen, melyet egy Jenpotik Variocam használatával készült, láthatóvá válnak a hot-spot jelenségek. A maximális hőmérséklet meghaladta a 73°C-ot (34. (c) ábra), ami kontakt hőméréssel lett ellenőrizve [63, 71, 72].



**34. ábra.** Két sarokponton szennyezett panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel.

A 35. ábrán hasonló folyamat eredménye figyelhető meg. Ebben az esetben egy másik (de azonos gyártmányú) panelen lett elvégezve a kísérlet, amelynek csak a felső sarka volt szennyezett (35. (a) ábra). Mivel ennek a közel azonos teljesítményű panelnek csak egy forrópontja keletkezett (35. (b) ábra), annak nagyobb hőfejlődést kellett elviselnie. Ez esetben már az átlagos panel hőmérséklet több mint duplájára melegedett a hot spot, meghaladta a 108 °C-os hőmérsékletet (35. (c) ábra).



**35. ábra.** Egy sarokponton szennyezett panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel.

#### Működésképtelen modul

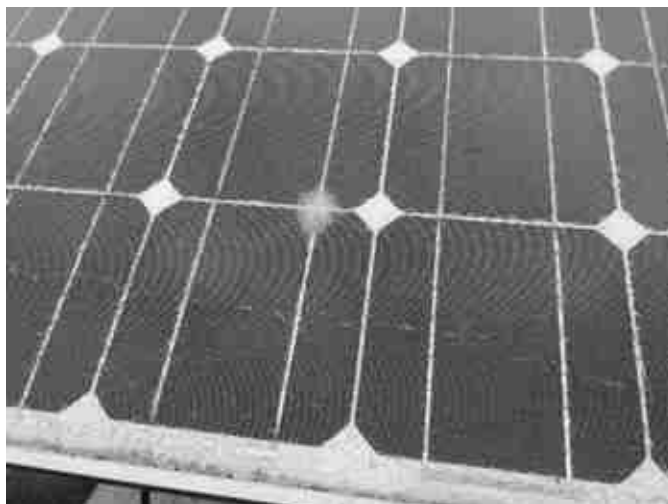
A nem működő modulok hőképe eltér a környezetükben lévő többi modul hőképétől. A hőmérséklet eloszlásuk feltűnően homogén, valamint hőmérsékletük alacsonyabb (36. ábra). A hiba oka lehet a nem megfelelő bekötés, vagy hibás csatlakozók vagy szakadt szolár vezetékek.



**36. ábra.** Egy működésképtelen modul hőkamerás képe.

#### Fizikai sérülések

Törött üvegfelület alatt mikrorepedések jelenhetnek meg (pl. jégeső hatására, 37. ábra). A cellatörések cellazárlatot okozhatnak. A fényérzékeny félvezetőréteg széleinek letöredezése teljesítményvesztést eredményez [67, 68].



*37. ábra. Jégkár okozta sérülés a modul üvegborításán.*

### **Elszíneződés és delamináció**

A modult felépítő rétegek közti ragasztóanyag (etilén-vinil-acetát, EVA) elszíneződése egyrészt esztétikailag rontja a panel értékét, másrészt az anyag fényáteresztő képességét csökkenti (38. ábra). A megváltozott reflexió van a rövidzárlati áramra, aminek mértéke 6-8%, szélsőséges esetben akár 10-13%-ig is terjedhet. A panel maximális teljesítményére is negatív hatással van az elszíneződés. Az elszíneződés az EVA bomlásának eredménye, melyet az UV sugárzás indikál.



*38. ábra. Elszíneződött napelemmodul.*

Delaminációnak nevezzük azt a jelenséget, amikor nagy kiterjedésű tapadásvesztés következik be a napelempanel rétegei között. Alapvetően a delaminációnak négy esetét különböztethetjük meg:

- a védőüveg és az elülső tokozás között,
- az elülső tokozás és a fényérzékeny cellák között,
- a fényérzékeny cellák és a hátulsó tokozás között,
- a hátulsó tokozás és a hátlapi fólia között.

A jelenség kialakulásának oka általában a modulon belüli gázok fejlődése, amik sehova sem tudnak távozni és ezért a rétegek között gázbuborékokat hoznak létre (39. (a) ábra). Abban az esetben, mikor a szétválás nem éri el a panel szélét és zárt buborék keletkezik, a hatás az elszíneződéshez hasonlóan optikai veszteséget okoz. Amikor a panel szélei is érintetté válnak, út nyílik a napelem belsejében kialakuló korrózió előtt (39. (b) ábra).



(a)



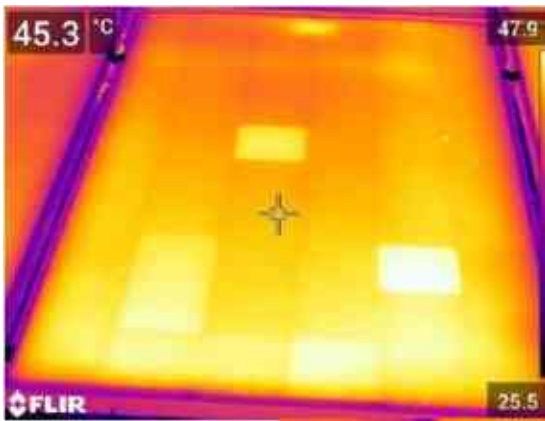
(b)

**39. ábra.** A delamináció jelenségének különböző esetei: (a) gázbuborék; (b) panel széleit érintő rétegelválás.

A nem megfelelő, vagy az extrém meleg és egyben magas páratartalmú időjárás hatására megbomló rétegek és azok egymástól való elválásának eredményeképp keletkező rések beeresztik a levegőben lévő párárt. Ebben az esetben a modul aktív felületén is megjelenhet korrózió, akár nagy mértékben csökkentve a panel teljesítményét. A korrózió megtámadja a cellák fémes csatlakozásait, és a szivárgási áramok növekedése miatt teljesítményvesztés lép fel. Károsítja a fényérzékeny félvezető anyag, a fémkeret közötti tapadást (kontakthiba) vagy akár a hegesztési kötések korrózióját is okozhatja. A nedvesség lecsapódása a panelen segít a levegőben lévő por vagy más szennyeződéseknek megtapadását. A gyakorlati megfigyelések melyeket olyan területen végeztek, ahol relatív magas páratartalom és hőmérséklet mellé állandó poros levegő társult azzal az eredménnyel végződtek, hogy magas páratartalom nemcsak a korróziót, hanem a levegőben lévő por felhalmozódását is elősegíti panel felületén, ami további teljesítmény romlást idéz elő [68].

#### **Mismatch / patchwork mintázat**

A mismatch azt jelenti, hogy egy modulba többféle, különböző paraméterekkel rendelkező napelemcellák kerültek gyárilag beépítésre. Az eltérő teljesítményű napelemcellák esetében a soron belül a leggyengébb cella határozza meg a maximális áramot, továbbá eltérő módon fognak melegedni (40. (a) ábra). Ugyanez a hiba előfordulhat modul szinten több string esetében és modulok szintjén is, tehát a hiba részben a soros kapcsolás eredménye. Előfordulhat, hogy a hiba és annak hatása a gyárilag megengedett teljesítménytolerancia határértékein belül marad, amikor a panel minőségellenőrzésen esik át. Ez az érték az utóbbi években és napjainkban már csak  $\pm 3\%$ . Az eltérések száma idővel megnőhet, ezáltal a káros hatásuk is felerősödhet. Számos modul esetében emberi szemmel, a látható fénytartományban is megfigyelhetőek kristályhibák, amikor nem homogén a fényérzékeny anyag színe. Valamint panelen belül is szemmel láthatók a szilícium lemezek közti színárnyalat béli különbségek (40. (b) ábra) [68].



(a)



(b)

**40. ábra.** Mismatch hiba megjelenése (a) a hőkamerás felvétlen, (b) szemmel is látható kristályszerkezeti hibák és eltérő szilícium színárnyalatok.

### Bypass dióda hibája

Az árnyékolás következményeinek megelőzése érdekében a gyártók úgynevezett bypass diódákat kötnek a panelekbe. Ez a dióda párhuzamosan és fordított előfeszítéssel van egy cellasorhoz rendelve úgy, hogy ne legyen hatással a kimenetre. A dióda legfontosabb szerepe, hogy megakadályozza az egyes cellák vagy cellasorok túlmelegedését. Amikor egy vagy akár több cella is árnyékba kerül az érintett cellasorhoz rendelt dióda ezt érzékelve vezetni kezd ezáltal kizárja az adott cellasort, ami így nem hátráltatja a nem árnyékolt cellákat. Amikor a takarás megszűnik a cellák visszatérnek az eredeti állapotukba és a dióda is a fordított előfeszítési állapotába.

Egy hibás bypass dióda szükségtelenül is letilthatja a teljes cellasort, akár az egész modult is. A hot spot hatást vagy az árnyékolás hatását nem tudja kiküszöbölni. A termelt áram a modulon túlmelegedést okozhat, sőt még a sértetlen cellák is túlmelegedhetnek, sérülhetnek (magas záróirányú áram). Továbbá, minél melegebb a napelem, annál kisebb a teljesítménye és a hatásfoka.

Fontos megjegyezni, hogy a panelek hátoldalán elhelyezett, a bypass diódákat és a szolár kábelek csatlakozási pontjait rejtő kapcsolódobozok általában melegebbek a környezetüknél (41. ábra). A jelenség normálisnak tekinthető, amíg a hőmérsékletkülönbség nem haladja meg a 15°C-ot. Ebben az esetben a doboz melegedése megemeli a felette elhelyezkedő cellák hőmérsékletét, ami feszültség különbséget idéz elő a cellákon a többihez képest. Ez megegyező hatás a cella részleges letakarásával, ami teljesítménycsökkenést okoz a kimeneten. Hosszútávon a cella átlagosan megemelkedett hőmérsékletű működése, lassú fokozatos öregedéshez és meghibásodáshoz vezet, állandó hozam csökkenéssel [63, 67, 68, 71, 72].



**41. ábra.** A napelemmodulok kapcsolódobozainak melegedése.

A következő hibaforrás gyakori probléma a talajszintre telepített rendszereknél, azonban kiküszöbölhető az aljnövényzet rendszeres gyomirtásával, vagy kaszálásával. A 42. ábra képein lévő modulok legalsó cellái az elburjánzott növényzet árnyékhatásának vannak kitéve. A két modul átlaghőmérséklete között nincs jelentős különbség, azonban a maximális hőmérséklet értékek között már rendkívül nagy. Az ok, hogy az 42. (a) képen a növényzet egyetlen egy cellát takar, amely esetben a legintenzívebb a melegedés, mivel ekkor csak az az egy inaktív cella által jelentett terhelésen folyik át a többi működő cella által termelt elektromos egyenáram, ami ekkor közel megegyező a maximális munkaponti árammal. Ilyen esetben fennáll a cella teljes tönkremenetelének lehetősége. Ellenben a 42. (b) képen szinte a teljes alsó cellasor melegszik, így a modul többi cellájának energiája a takart cellák ellenállásainak arányában eloszlik. Valamint a panel belsejében folyó egyenáram értéke lecsökken, jelentősen elmaradhat a maximális munkaponti értéktől, mivel több az inaktív cella. Ebből kifolyólag a maximális forrópont hőmérséklete alacsonyabb. A kontrolláltabb melegedés kevésbé károsítja a fényérzékeny anyagot, viszont melegedés és árnyékhatás érinti mindhárom bypass diódát, ezért mindhárom cellafűzér lekapcsolódhat, ennek megfelelően a teljes panelben megszűnhet az energiatemelés.



(a)



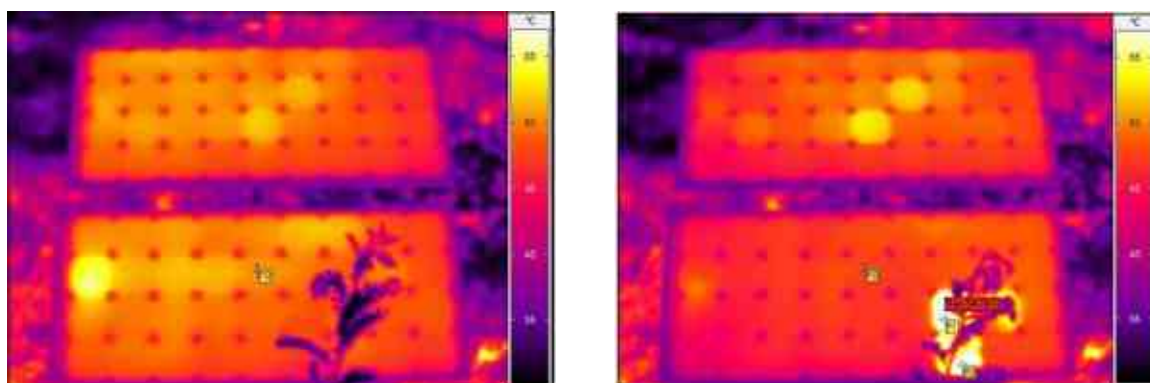
(b)

**42. ábra.** A talajhoz közeli napelemmodul (a) egy celláját növényzet árnyékolja, (b) több celláját növényzet árnyékolja.



A növényzet hatásának vizsgálatára szolgáló referencia mérések elvégzése egyszerű feladat. Az első esetben két 80 Wp csúcsteljesítményű modul lett elhelyezve egy állványon. A modulok nem lettek összekapcsolva, valamint egyenként rövidre lettek zárva. A felső modul működése nem lett befolyásolva, ellenben az alsó modul árnyékhátas vizsgálatnak lett alávetve (43. és 44. ábrák).

A 43. (a) ábra a kísérlet kiinduló állapotát mutatja, amikor még minden cella hőmérséklete közel azonos (50 °C), azonban megjeleni egy árnyékhátas. A növényzet által okozott hotspot hőmérséklete 64 °C, a jelenség 3 db szomszédos cellát is érint (43. (b) ábra). A modulok képeinek bal szélénél hátoldalán található a kapcsolódoboz a bypass diódákkal. Ez a 80 Wp modul két cellafüzére van bontva. A felső két sor és az alsó két sor külön-külön leválasztható a diódákkal. Az árnyék jelenség hatására az alsó modul áramerőssége a felére csökkent, ezáltal a teljesítménye is [63, 68].

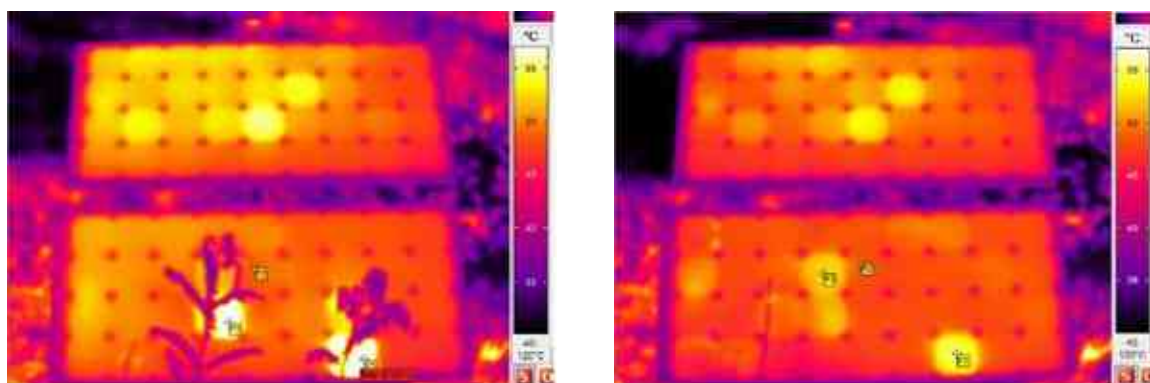


(a)

(b)

**43. ábra.** A növényzet árnyékhátas vizsgálatának (a) kezdőállapota, (b) hot-spot jelensége.

A 44. (a) ábra mutatja azt az állapotot, amikor egy újabb árnyékoló növény lett a modul elé helyezve. A 44. (b) ábra mutatja az árnyékhátasok megszűnése utáni állapotot. A zavaró hatás megszűnése után is hosszú időn át fennmarad a cellák túlhevültsége és emiatt képes negatívan befolyásolni az energiatermelést.

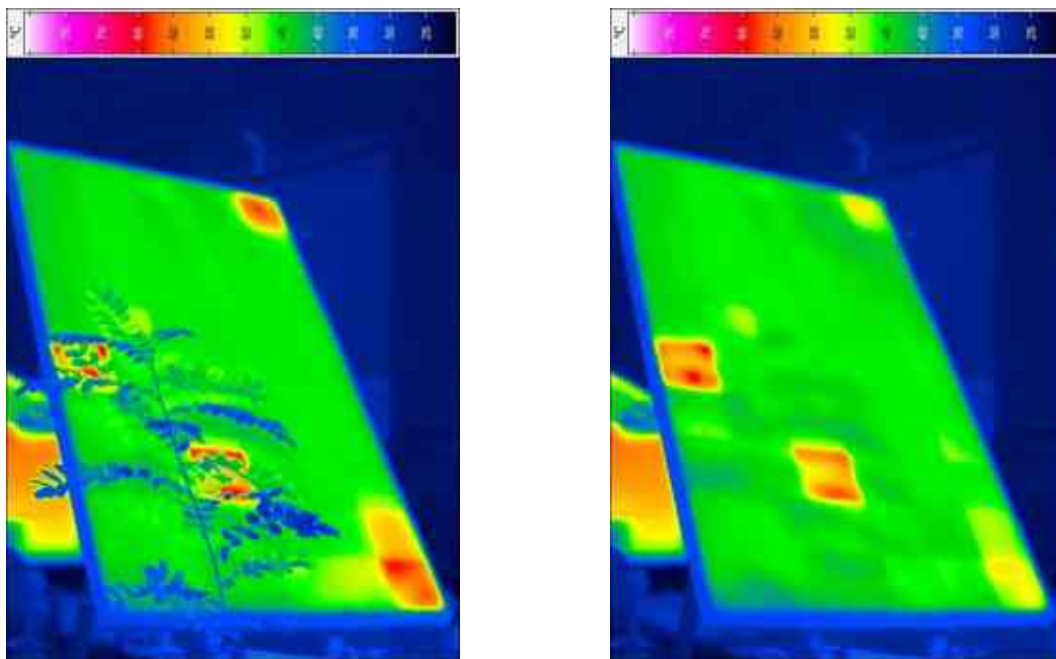


(a)

(b)

**44. ábra.** A növényzet árnyékhátasának (a) növelése, (b) az árnyékhátas megszűnése utáni állapot.

Erőművi méretű és onnan származó modullal is elvégeztem a kísérlet (45. ábra), amely azonos gyártmányú, mint amiken a flash és elektrolumineszcens tesztek készültek. 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 érzékenységű hőkamerával feltárni a napelempanellek 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.



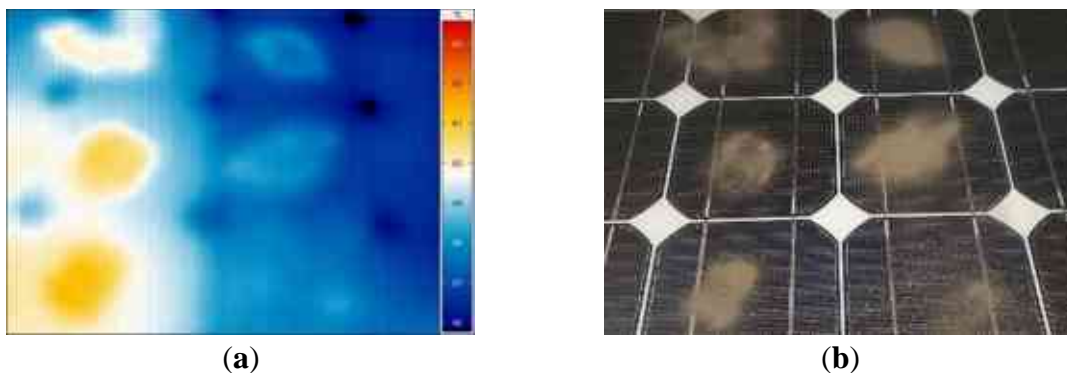
(a)

(b)

**45. ábra.** (a) Az erőművi modul árnyékolása faággal, (b) az erőművi modul árnyékolásának megszüntetése utáni állapot.

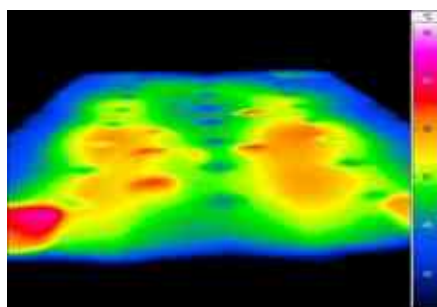
#### 6.1.4. Laboratóriumi mérések hőkamerával

Mivel a napfény egyben hőforrás is, bizonyos mértékű feszültségesést okoz. A porlerakódások fénycsapot halmoznak fel (46. ábra), ezáltal fokozzák annak negatív hatását. Másrészt a szennyeződés árnyékoló hatása áramcsökkenést okozhat, amit a szennyeződés tovább ront. Jelentős probléma a napelem által termelt teljesítmény csökkenése. Az eredményekből látható, hogy a feszültség a szennyeződés miatt csökken. Emellett az áramkimenet is csökken, így eltolódik a munkapont. Ennek eredményeként az inverter vagy töltésvezérlő másképp fogja vezérelni. A napelemes rendszerek egy rendszeren több szápra, ún. sztringre oszthatók, amelyek egymástól függetlenül vezérlik egymást, de a kimeneti váltakozó feszültség azonos lesz. A szennyezett vagy már sérült panelek, amelyek kevesebb energiát termelnek, csökkentik a rendszer teljesítményét. Ha a napelem a felületi szennyeződés miatt tartósan magasabb hőmérsékleten üzemel, az elektronika negatív hőmérsékletfüggése miatt csökken az élettartam. Ha sok gyenge panel van egy karakterláncon belül, akkor azok lekapcsolódnak a rendszerről [62, 64, 68].

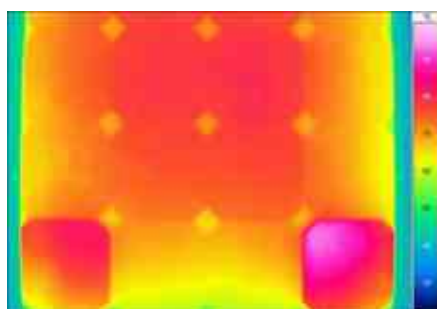


**46. ábra.** a) Hőkamerás felvétel, b) a napelempanel szabad szemmel látható képe.

Az elektrolumineszcens kísérletekhez hasonló méréseket hőkamerával is el lehet végezni, ilyenkor megfigyelhető a hőmérséklet-eloszlás. A két vizsgálati módszernek konzisztens mintázatot kell mutatnia, mivel az EL-képeken látható sötét részek ellenállása nagyobb, és így nagyobb a hőmérsékletnövekedés. Laboratóriumunkban ilyen jellegű vizsgálatok folynak. A 46., 47. és 48. ábra a szennyező anyagok hatásának mérési felvételeit mutatja. A képek egy 80 Wp panel hűtési folyamata során készültek, zárt dobozban. A világítást már le lett kapcsolva. A termográfiai felvétel megmutatja, hol van a por, ami sokkal melegebb területeken jelenik meg. Ez a hőmérsékletkülönbség kontakthőmérővel is mérhető. A modulok hátoldalán felületi hőmérő szenzorok (4 csatornás YC-747D digitális hőmérő a számítógéphez csatlakoztatva) kerülnek elhelyezésre, amelyek a termográfiai vizsgálatok során a kamera kalibrálását és a kapott eredmények ellenőrzését szolgálják. A mérési hiba minimális, mert a hasznos felület rendkívül vékony, így a hátoldalon a hőmérséklet közel van a fényérzékeny oldal hőmérsékletéhez.



**47. ábra.** Felmelegedett, felület szennyezett és egyéb sugárzás forrástól elzárt napelempanel hőkamerás felvétele.



**48. ábra.** Sarokcellák felületi szennyeződés okozta melegedés hátoldali, laboratóriumi körülmények között végzett mérésének eredménye.

## 6.2. Flash teszt

A flash teszt (magyar szövegkörnyezetben gyakran villanólámpa tesztként említve) egy ex-situ módszer, amely során a rendszer megbontásával a napelempanel leszerelésre kerül. A megvizsgálandó panel villamos paramétereit laboratóriumi, azaz standard teszt körülmények (STC – standard test conditons) között lehet nagy pontossággal megállapítani. A mérés során meghatározható a napelem üresjárási és maximális munkaponti (MPP – Maximális power point) feszültségének, rövidzárási és maximális munkaponti áramerősségének, maximális munkaponti teljesítmények és kitöltési tényezőjének értéke. Továbbá, felvázolásra kerül az I-U karakterisztika is. A flash teszt során kapott teljesítményértékeket kiegészítettem a helyszínen mért tényleges értékekkel (megtisztított panel), valamint 10 db panel esetében a szennyezett üvegfelülettel mért tényleges értékkel [39, 51, 57].

### 6.2.1. A flash teszt mérőberendezése

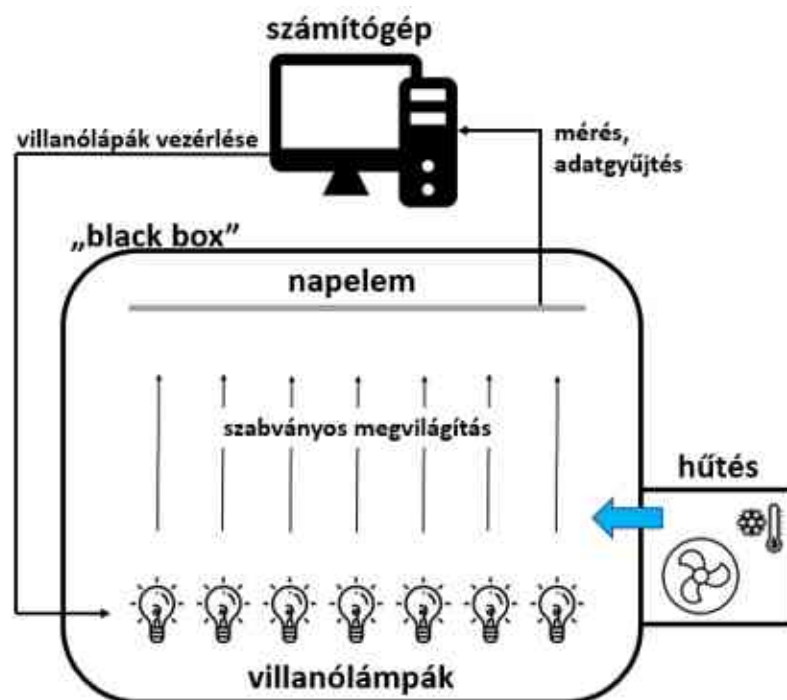
A napelemmodul által generált kimeneti teljesítmény megfelelésének mérésére használt készülék egy villanófény-teszt gép vagy napszimulátor. Ebből kifolyólag flash tesztet számos forrás napszimulátor tesztnek is nevezi. A villanófény teszt során a PV-modult egy xenonnal töltött ívlámpa rövid (1 ms és 30 ms közötti), erős ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) fényvillanásnak teszik ki. Ugyanis ennek a lámpának a kimeneti spektruma a lehető legközelebb van a nap spektrumához. Hasonló eredményt lehet elérni LED-halogén megvilágítású napszimulátorokkal is. A mérések során standard teszt körülményeket (STC) kell teremteni. Az STC egy iparági szabvány (IEC 61215) a PV-modulok teljesítményének jelzésére, és  $25^\circ\text{C}$ -os cella hőmérsékletet és  $1000 \text{ W/m}^2$  besugárzást határoz meg  $1,5$  (AM $_{1,5}$ ) légtömeg-spektrum mellett. Ezek az értékek olyan napfény besugárzásának és spektrumának felelnek meg, amely tiszta napon a nap felé néző  $37^\circ$ -os dőlésszögű felületre esik, miközben a Nap  $41,81^\circ$ -os szöget zár be a horizont felett [75, 76].

A használt szabványok nem feltétlenül tükrözik a tényleges működési feltételeket. A gyorsított eredménylapja általában felsorolja az összes tesztelt modul és a konkrét teszteredményeket. A kimeneti értékeket egy számítógép gyűjti össze, és az adatokat összehasonlítja egy pontosan kalibrált referencia modul értékeivel. A referenciaadatok a szabványos napsugárzásra kalibrált teljesítményre vonatkoznak. A gyorsított eredményeit össze lehet hasonlítani a PV modul típusának adatspecifikációival, amelyek a modul hátoldalán található címkére vannak nyomtatva.

Egy korszerű, „A” osztályú berendezéssel szemben támasztható elvárások a következők:

- megvilágítás egyenletlensége:  $< \pm 1\%$ ;
- megvilágítás ereje:  $200 - 1200 \text{ W/m}^2$ , akár  $1 \text{ W/m}^2$  felbontással;
- fényimpulzus ideje:  $30 - 60 \text{ ms}$ ;
- fényspektrum egyezés:  $< \pm 12,5\%$ ;
- hosszú-távú instabilitás:  $< \pm 1\%$ ;
- villanólámpa típusa: xenon;
- villanólámpa cseréjének intervalluma:  $> 500\,000$  mérés;
- mérés időtartama:  $5 - 10 \text{ s}$ ;
- többféle modulméret befogadására is képes legyen;
- mérhető feszültség:  $1 - 100 \text{ V}$ , pontosság  $< \pm 1\%$ ;
- mérhető áramértékek:  $0,5 - 25 \text{ A}$ , pontosság  $< \pm 1\%$ ;
- számítógépes vezérlés és adatrögzítés.

A tesztberendezés felépítése változó, számos kivitel létezik, a 49. ábra a leggyakoribb elrendezési sémát mutatja be. Ez a kompakt elrendezés, amikor a villanólámpák egy zárt és teljesen lesötétített burkolat (black box) aljában vannak elhelyezve, vízszintesen és felfelé néznek. A berendezés felülről nyitható, a modult a „sötét doboz” felső felületére kell rögzíteni szintén vízszintesen és lefelé nézzen a fényérzékeny oldala. Abban az esetben, ha ez a tesztberendezés mozgatható és kis térfogatú, akkor a vizsgálható modulok mérete is korlátozott. Az utóbbi években elterjedőben vannak az igazán nagy 400-500 Wp erőművi napelemmodulok, amelyek mérete már meghaladhatja a 2,5 métert is. Ilyen nagy modulok vizsgálatára egyszerűbb megoldás lehet egy lesötétített helyiséget kialakítani, abban az esetben, amikor a mobilitás nem feltétel. Ebben az esetben a villanólámpák és a modulok rögzítése akár függőleges pozícióban is történhet. Kompakt berendezés esetén manapság már célszerűbb lehet kombinált (kettő az egyben), flash és elektrolumineszcencia teszt (EL teszt) elvégzésére is egyaránt alkalmas berendezéseket alkalmazni.



49. ábra. A flash tesztberendezés elvi felépítése.

### 6.2.2. A flash teszt eredménye

Miután lezajlott a számítógép által vezérelt vizsgálat, a rendszer feldolgozza az adatokat és elkészít egy eredményközlő adatlapot. Az adatlap részletességétől függően 1-2 oldalas dokumentum hivatott bizonyítani a modul paramétereit számszerűleg, táblázatos formában. Szükség esetén a program összeveti a mért értékeket a megadott referencia adatokkal, és egy előre definiált tolerancia figyelembe vételével jelzi a jelentősebb eltéréseket. A vizsgálandó paraméterek egy korábbi bekezdésben már ismertetésre kerültek, valamint a 6. táblázatban felsorolásra kerültek. Továbbá készít egy feszültség-áramerősség jelleggörbét, ami adott esetben az ideális, elméleti jelleggörbétől való eltéréseiben jeleníti meg a modul károsodottságának mértékét, vagy egyezés esetén annak megfelelőségét. Abban egy esetben, ha a tesztberendezés képes elektrolumineszcencia vizsgálatra, a flash teszt eredmény mellé illeszti annak felvételét is.

6. táblázat. A vizsgált paraméterek és az erőművi modulok paraméterei.

Vizsgált paraméter	Jelölés (mértékegység)	Gyártói érték
Tényleges teljesítmény (tisztá üvegfelület*)	aP (W)	-
Tényleges teljesítmény (felületi szennyeződéssel**)	aP' (W)	
Maximális munkaponti teljesítmény	P <sub>mpp</sub> (Wp)	260±3%
Maximális munkaponti feszültség	U <sub>mpp</sub> (V)	34,40
Maximális munkaponti áramerősség	I <sub>mpp</sub> (A)	7,47
Üresjárás feszültség	U <sub>oc</sub> (V)	36,54
Rövidzárási áramerősség	I <sub>sc</sub> (A)	7,92
Kitöltési tényező	FF (%)	-

\*Nem standard teszt körülmények (STC) alatt mérve.

\*\*Nem STC alatt mérve és kizárólag 10 db modul esetében meghatározva.

A vizsgálatot megelőző nagyon fontos mozzanat, hogy a panelek üvegfelületét meg kell tisztítani minden nemű szennyeződéstől, lehetőleg desztillált vízzel. Mivel, ahogy azt a korábbi fejezetekben részleteztem, a felületi szennyeződések árnyékhatással bírnak, amelyek befolyásolnák a teszteredményeket.

10 db modul esetében a teljesítményértékek közül három féle adat is rendelkezésre áll, mivel még a flash teszt előtt minden modul tényleges teljesítménye meg lett mérve a helyszínen. Ezt az értéket számos emberi és környezeti tényező befolyásolja. Valamint az említett 10 db modul esetében a felület tisztítást megelőző tényleges teljesítmény is meg lett mérve. A modulok teljesítményértékeit és flash teszt eredményeit a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat. A 10 kiválasztott modul teljesítmény és flash teszt értékei.

Név	aP'	aP	P <sub>mpp</sub>	U <sub>mpp</sub>	I <sub>mpp</sub>	U <sub>oc</sub>	I <sub>sc</sub>	FF
	(W)	(W)	(Wp)	(V)	(A)	(V)	(A)	(%)
<b>PV4115</b>	200,24	212,31	254,73	34,02	7,49	36,40	7,99	87,60
<b>PV9146</b>	189,79	201,24	250,58	33,43	7,50	36,81	7,73	88,10
<b>PV4092</b>	185,63	208,85	255,80	33,79	7,57	36,64	7,88	88,60
<b>PV4032</b>	192,28	215,29	260,33	34,28	7,59	36,38	7,98	89,60
<b>PV4160</b>	201,89	219,48	257,07	33,56	7,66	36,34	7,81	90,60
<b>PV4179</b>	178,14	209,03	245,33	32,48	7,55	35,23	7,95	87,60
<b>PV4133</b>	169,58	220,57	261,74	34,13	7,67	36,50	8,30	86,40
<b>PV4658</b>	168,59	196,17	238,45	33,56	7,10	36,61	7,81	83,50
<b>PV4661</b>	180,11	196,19	239,15	33,09	7,23	35,80	7,84	85,20
<b>PV3930</b>	182,12	202,08	245,40	33,85	7,25	36,81	7,94	84,00

Mind a tíz modul 260 Wp csúcsteljesítményű, azonban 10-ből csak 2 db modul maximális munkaponti teljesítménye érte el, vagy haladta meg ezt az értéket. Az átlagos MPP teljesítményük 250,86 Wp volt. A legjobban teljesítő panel 261,74 Wp értéket, míg a leggyengébb 238,45 Wp teljesítményértéket ért el. A további két MPP érték esetében sincs nagy eltérés a modulok között, az átlagos MPP feszültség 33,6 V, míg az átlagos MPP áramerősség 7,46 A volt. Ezek az átlagértékek jól közelítik a gyártói értékeket is. Összességében a modulok többsége jól teljesített a flash teszt során, mivel csak két modul bukott meg a teszten (PV4658 és PV4661). Ha jobban megvizsgáljuk a tényleges teljesítmény értékeket az eredmény már elgondolkodtató [39, 51, 57].

8. táblázat. A 10 kiválasztott modul teljesítményértékeinek összehasonlítása.

Név	aP'	aP	Pmpp	aP és aP' különbsége	Pmpp és aP különbsége	Pmpp és aP' különbsége
	(W)	(W)	(Wp)	(W)	(W)	(W)
<b>PV4115</b>	200,24	212,31	254,73	12,07	42,42	54,49
<b>PV9146</b>	189,79	201,24	250,58	11,45	49,34	60,79
<b>PV4092</b>	185,63	208,85	255,80	23,22	46,95	70,17
<b>PV4032</b>	192,28	215,29	260,33	23,01	45,04	68,05
<b>PV4160</b>	201,89	219,48	257,07	17,60	37,59	55,18
<b>PV4179</b>	178,14	209,03	245,33	30,89	36,30	67,19
<b>PV4133</b>	169,58	220,57	261,74	50,98	41,17	92,16
<b>PV4658</b>	168,59	196,17	238,45	27,57	42,28	69,86
<b>PV4661</b>	180,11	196,19	239,15	16,07	42,96	59,04
<b>PV3930</b>	182,12	202,08	245,40	19,96	43,32	63,28

A 8. táblázatban látható a teljesítményértékek összehasonlítása. Az első oszlopban vannak felsorolva a szennyezett felületű modulok tényleges teljesítményértékei (aP'). Ezek átlagértéke 184,84 W volt, ami a gyártói 260 Wp érték 71%-a. A leggyengébb modul teljesítménye 168,59 W, míg a legerősebb modul teljesítménye 201,89 W volt. Ezek az értékek jól tükrözik azt a ténymegállapítást, hogy a napelemes erőművek nem képesek folyamatosan állandó teljesítményt termelni, mivel sajnos a környezeti tényezők ezt nem teszik lehetővé. A modulok tényleges teljesítménye (aP) az üvegfelület megtisztítása után jelentősen javult, de továbbra is elmaradt az elméleti csúcserőértéktől. Az tiszta modulok átlagos teljesítménye 208,12 W volt, ami az elméleti 260 Wp 80%-a. A minimális érték 196,17 W, míg a maximális érték 220,57 W volt a helyszíni mérések során. Az laboratóriumi, STC alatt mért MPP teljesítményértékeket már egy korábbi bekezdésben jellemeztem.

A 8. táblázat 4. oszlopa tartalmazza még a szennyezett és tiszta üvegfelülettel mért tényleges teljesítmények különbségét, a tiszta tényleges és MPP teljesítmény különbségét (5. oszlop), valamint a szennyezett tényleges és MPP teljesítmény különbségét (6. oszlop). A modulok tényleges teljesítménye a tisztítással átlagosan 23,28 W-ot javult. A legkisebb javulás 11,45 W volt, ellenben a legnagyobb javulás 50,98 W volt. Az eredmények relatív nagy szórásúak, ami tükrözi, hogy a felületi szennyeződés lerakódásának mértéke véletlenszerű a légkör sajátosságai okán. Az MPP teljesítményértékek és tisztán mért tényleges teljesítmény értékek szórása jóval kisebb. Az átlagos teljesítménykülönbség 42,74 W volt. A legkisebb különbség 36,3 W, míg a legnagyobb 49,34 W volt. A szennyezett mért tényleges teljesítmények és MPP teljesítmények összehasonlításakor az eddig különbségek összeadódnak. Az átlagos különbség 66 W volt, míg a minimális 54,49 W, ellenben a maximális 92,16 W volt.

A PV4133 nevű modul értékei a legérdekesebbek. E modul esetében volt a legnagyobb különbség a szennyezett aktuális teljesítmény és az MPP teljesítmény között, ami 92,16 W. Ennek oka, hogy a modul kimagaslóan szennyezett üvegfelületű volt. Ennek a modulnak növekedett legnagyobb mértékben a teljesítménye a tisztítás hatására, szám szerint 50,98 W-al. A tényleges teljesítmények ilyen részletes vizsgálata nem feltétlenül része a flash tesztnek, azonban rámutat, hogy a teszt előtt a mintadarabok letakarítása elkerülhetetlen, valamint a bizonyítja, hogy a napelemes erőművek milyen sebezhetőek a környezeti körülményekkel (szennyeződések, hőmérséklet, fényerősség) szemben.

6.2.3. *A flash teszt során kapott eredmények kiértékelése*

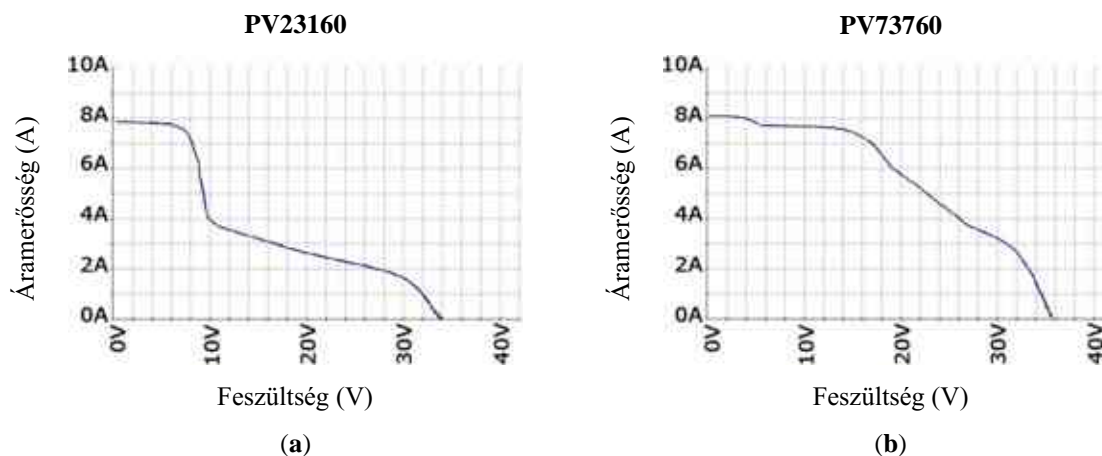
A flash teszt eredmények részletes értékelésére és a szélsőségek bemutatására további 6 db példaértékű modul lett kiválasztva. A modulok villamos paramétereit a 9. táblázat tartalmazza. A leginkább hibásan működő panel (PV23160) teljesítménye a gyártó adatainak mindössze 26,3%-át tudta teljesíteni. Ez az érték éles ellentétben áll a teljesítménygaranciával, amely a gyártó szerint az első 10 üzemévre vonatkozóan 90%. A mérés alapján a vizsgált panel gyakorlatilag meghibásodottnak, tönkrementnek minősíthető. Az aktuális munkaponti feszültség értéke csak a gyártáskori értékének egynegyede. A munkaponti áramerősség értéke azonban jobban közelít a gyártáskori értékhez. A villamos paraméterek alapján látható, hogy a modul feszültségének jelentős csökkenése megnövekedett belső ellenállásra, azaz cellasérülésekre utal [83, 84, 85, 86, 87]. A PV73760 és PV02310 jelű panelek feszültsége szintén az elvártak alatt maradnak, az eredeti értéknek csak mintegy harmada. Mindkettő teljesítményleadóképessége elmarad a vártaktól, mindössze 55,5% és 69,4%. A PV41140 és PV64260 jelű panelek a mérésből származó villamos paraméterek alapján jó állapotban vannak, de teljesítmény-csökkenésük meghaladják a 10%-os határt. Maximális teljesítményük aktuális aránya a gyártáskorhoz képest 87,2% és 89,2%. A gyártó által megadott  $\pm 3\%$ -os tűrést figyelembe véve még megfelelőnek minősíthetők. Egy hibátlanul működő panel (PV50239) esetén akár nagyobb teljesítményt is tapasztalhatunk (103,5%). A csúcsteljesítmény meghaladja a felső tűréshatárt (260 Wp+3%). A modul összes paramétere megfelel az adatlapon szereplő információknak.

9. táblázat. *A kiválasztott erőművi modulok flash teszt során mért paramétereit.*

Név	aP	Pmpp	Umpp	Impp	Uoc	Isc	FF
	(W)	(Wp)	(V)	(A)	(V)	(A)	(%)
<b>PV23160</b>	57,19	68,28	9,52	7,17	34,31	7,85	25,40
<b>PV73760</b>	114,76	144,23	20,91	6,90	35,54	8,32	83,60
<b>PV02310</b>	160,58	180,50	22,29	8,10	26,69	8,65	78,20
<b>PV41140</b>	188,34	226,74	32,90	7,38	37,09	8,40	86,10
<b>PV64260</b>	190,02	231,92	34,09	7,63	36,82	8,00	89,60
<b>PV50239</b>	262,43	268,99	35,08	7,67	37,63	8,63	88,70

A 50. 51. és 52. ábra hat eltérően viselkedő napelemmodullal végzett flash teszt során kapott I-U karakterisztikákat szemlélteti [74]. Jól megfigyelhető, hogy a PV23160 modul (50. (a) ábra) és a PV73760 modul (50. (b) ábra) I-U görbéje nem felel meg sem a hibamentes napelemmodul gyakorlati karakterisztikájának, sem a 4. fejezetben bemutatott ideális görbének. A képekre pillantva biztossá válik, hogy drasztikus teljesítmény veszteséget fognak mutatni a számok. Az ok a modul belső ellenállás értékeinek megváltozásában keresendő. Ideális esetben a soros ellenállásnak a lehető legkisebbnek kell lennie, hogy a lehető legtöbb elektron áthaladhasson az áramkörön. Az alábbi kép jól szemlélteti a soros ellenállás megváltozásának hatását egy napelemmodulra. A beépítés után a soros ellenállás növekedése annak tudható be, hogy a törékeny szilíciumban külső behatások miatt megszorodtak és megnövekednek a mikrorepedések. Ezért nagyon körültekintő kezelést igényelnek a modulok rakodás, szállítás és telepítés során.



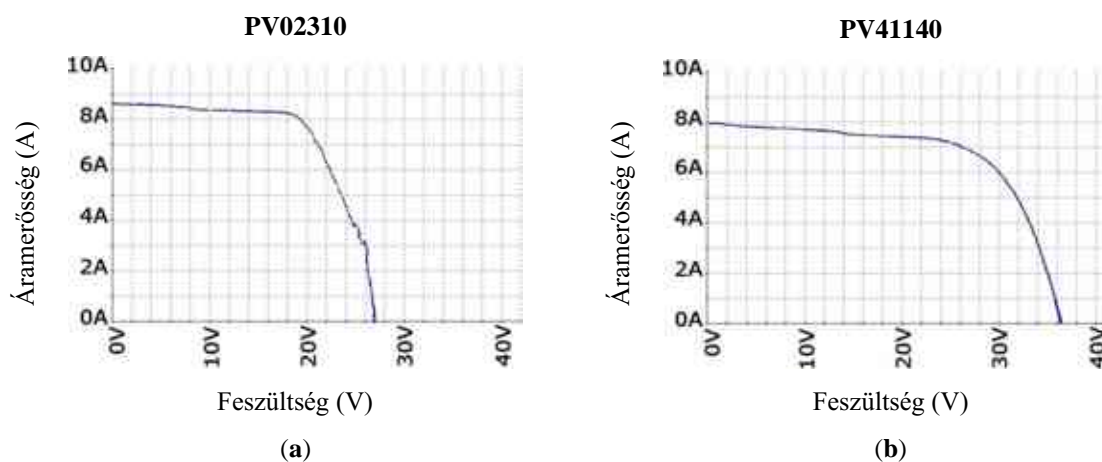


50. ábra. (a) A PV23160 modul és (b) a PV73760 modul I-U karakterisztikája.

A PV02310 modul (51. (a) ábra) I-U karakterisztikája 20 V környékén letörésbe kezd, valamint a modul üresjárás feszültsége 26,69 V, ami a legalacsonyabb érték a 6 modulból álló vizsgálati csoport elemei közül. A jelenség a bypass dióda meghibásodás tipikus jele. A I-U diagram alapján (51. (a) ábra) arra lehet következtetni, hogy a modul többnyire ép cellákból épül fel, a hiba mindenképp egy cellafüzért érint.

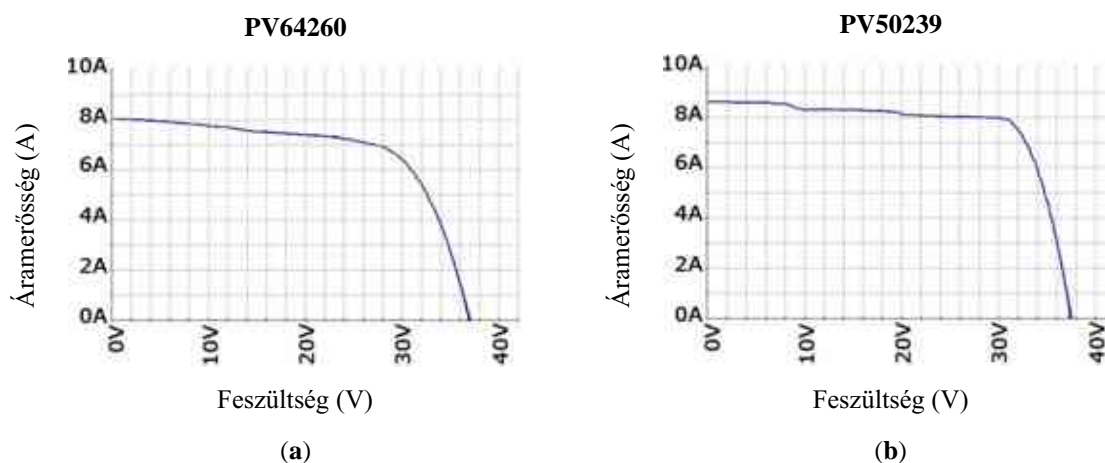
Mivel ezeknek az erőművi moduloknak 60 cellából épülnek fel, a modulok a belsejében 3 cellafűzér van, amelyek egyenként 20-20 db cellát kötnek össze. Ezek közül egy biztosan inaktív. A feltételezést a modul elektroluminescens képe (63. ábra) egyértelműen mutatja, hogy két egész sorban is (ez egy cella fűzér) nem működő cellák vannak [75].

A PV41140 modul görbéje azt mutatja, hogy a modul kis mértékű teljesítménycsökkenés ellenére is jól működik (51. (b) ábra) [75]. Ugyanakkor a jelleggörbe felső szakasza túlzottan meredeken csökken. Az áramerősség változásnak a feszültségnövekedés függvényében jobban kellene közelítenie a rövidzárási áram (konstans) értékét. Továbbá egy kisebb egyenetlenség is megfigyelhető a csökkenés linearitásában 14 V-nál. Ennek okán a kitöltési tényező alacsony, a munkaponti értékek elmaradnak az elvárt értéktől.



51. ábra. (a) A PV02310 modul és (b) a PV41140 modul I-U karakterisztikája.

A PV64260 modul flash tesztjének eredménye (52. (a) ábra) nagyon hasonlít a PV41140 jelleggörbéjére, hogy a modul kis mértékű teljesítménycsökkenés ellenére is jól működik [75]. Az 52. (b) ábrán látható gyakorlati jelleggörbe (PV50239) már kifejezetten jól közelíti a napelemmodul elméleti karakterisztikáját. Ez a jelleggörbe is csak közelítőleg felel meg, a görbe tartalmaz kisebb egyenetlenségeket az áramerősség csökkenése során, ettől eltekintve villamos értelemben a modul teljesítőképessége hibátlan [75].



52. ábra. (a) A PV64260 modul és (b) a PV50239 modul I-U karakterisztikája.

Ki kell jelenteni, hogy a hőkamerás hibafeltáráshoz hasonlóan a flash teszt eredménye a hibák pontos beazonosításában elsősorban csak sejtésekre, sok esetben bizonytalan következtetésekre ad lehetőséget [75]. Ugyanakkor kétségtelen, hogy a villamos paraméterek tekintetében pontos és a jelleggörbének köszönhetően szemléletes képet ad. Egy ennél jóval átfogóbb, a tényleges hibaállapotot leíró kép megismeréshez ebben az esetben is további vizsgálatokra van szükség. Ennek megfelelően a későbbiekben elektrolumineszcencia képek (61-66. ábra) erősítik majd meg az előbb bemutatott panelek valós állapotát [75-81].

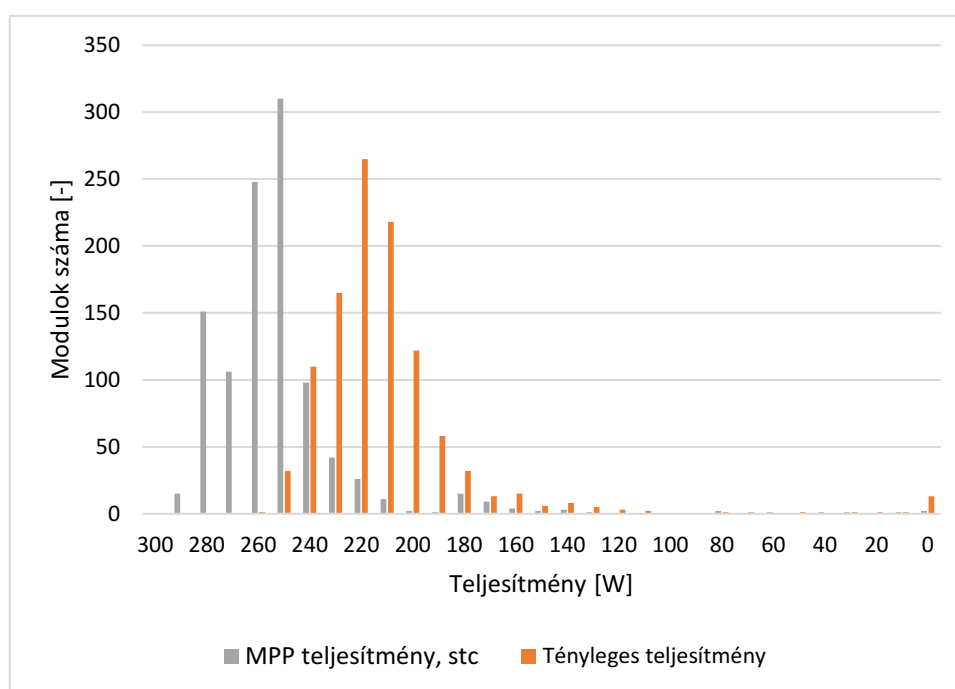
#### 6.2.4. A flash teszt eredmények statisztikai alapú bemutatása

Mivel az erőmű állapotfelmérése során 1000-nél több panel lett bevizsgálva, azok adatait nem lehet olyan részletesen közölni, mint ez előző bekezdésekben. Ezért sokkal célszerűbb a statisztikai összesítés. Ebben az összefoglalóban az egyes modulokhoz elérhető flash teszt eredményeit hasonlítottam össze. Az 53. ábra két értéktípus, az MPP teljesítmény és a tényleges teljesítmény eloszlását mutatja.

Az MPP teljesítményértékek közvetlenül a flash tesztből származnak, míg a tényleges teljesítményértékek az in-situ mérés eredményei. Az MPP teljesítménysorozat eloszlását közelebbről megvizsgálva látható, hogy számos panel maximális teljesítménye 270 W körül van. Ez azzal magyarázható, hogy a gyári adatokkal (260 Wp) ellentétben sok modul már a telepítéskor erősebb volt a többinél. A 6. táblázat harmadik oszlopában szereplő eredmények szerint a modulok teljesítménye 260 Wp, továbbá a teljesítménytűrés és mérési hiba feltételezett értéke is 3%. Ez azt jelenti, hogy a minimálisan megengedett teljesítményérték beépítéskor 252,2 W, ami a mérési tűréssel 244,63 W-ra változik. Ezzel szemben a maximális teljesítmény 267,8 W, a mérési tűréssel ez az érték 275,83 W. Az MPP teljesítménysorok mediánja 259,70 W, az átlagos MPP teljesítményérték pedig 250,76 W. Az átlagos eltérés 17,68 Wp, a szórás pedig 36,98 Wp. Az

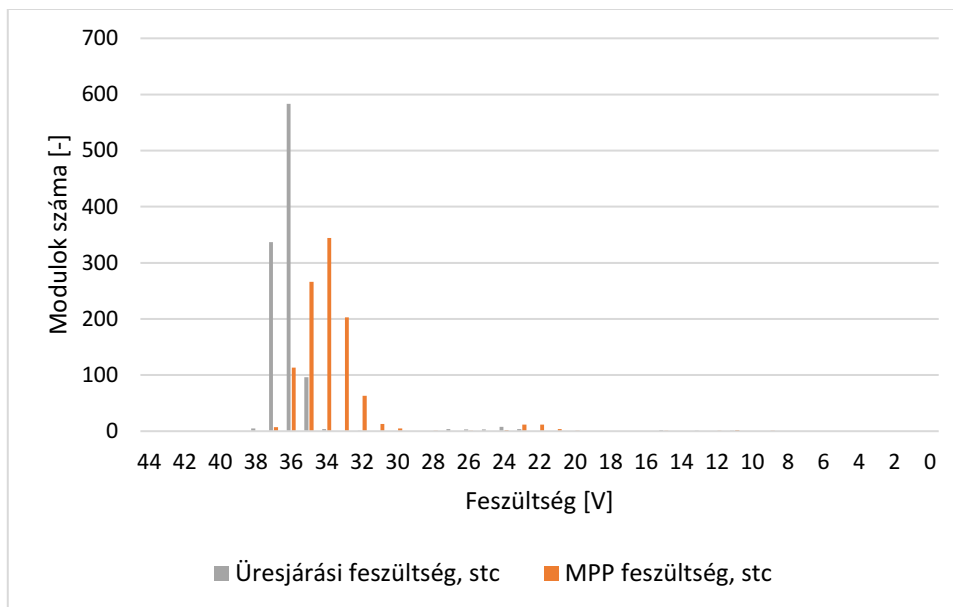
értékek 29%-a 250 W és 260 W között van (313 modul). Az MPP teljesítményértékeinek körülbelül 27%-a kisebb, mint 252,2 W (282 modul), 16%-a pedig kevesebb, mint 244,63 W (173 modul). A panelekre az első 10 évre 90%-os, a következő 15 évre pedig 80%-os teljesítménygarancia vonatkozik. Négy év elteltével a modulok 10%-a (107 modul) több mint 10%-os teljesítménycsökkenést szenvedett el.

Ha a tényleges teljesítményértékeket vesszük figyelembe, akkor az adatok összegzése után sokkal rosszabb végeredményt kapunk. A tényleges teljesítménysorok mediánja 221,55 Wp, az átlagos tényleges teljesítményérték pedig 215,68 Wp. A tényleges teljesítménysorok átlagos eltérése 19,27 Wp, a szórás pedig 34,49 Wp. Az értékek 3%-a van 250 W és 260 W között (313 modul). Az MPP teljesítményértékek körülbelül 98%-a kisebb, mint 252,2 W (1043 modul), 92%-a pedig kevesebb, mint 244,63 W (976 modul). Továbbá a modulok 76%-a (811 modul) több mint 10%-os teljesítménycsökkenést szenvedett el.



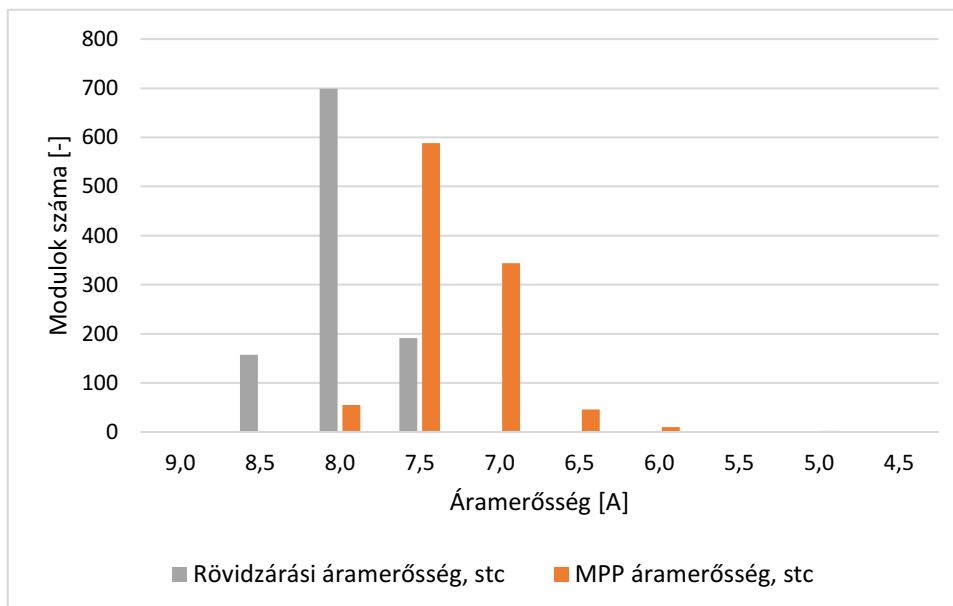
53. ábra. A mért tényleges és MPP teljesítményértékek eloszlása.

Az 54. ábra a mért feszültség sorok eloszlását mutatja. Az MPP feszültség sorok mediánja 34,44 V, az átlagos MPP feszültség érték pedig 33,56 V. Az MPP feszültség sorok átlagos eltérése 1,78 V, a szórása 4,34 V. Az értékek 45%-a 34 V és 35 V között van (476 modul), az értékek 51%-a pedig 34,4 V alatt van (gyártói adat az 6. táblázatból). A nyitott áramköri feszültség sorok mediánja 36,7 V, az átlagos értéke 36,01 V. A üresjárás i feszültség sorok átlagos különbsége 1,43 V, a szórás pedig 4,30 V. Az értékek 55%-a 36 V és 37 V között van (583 modul), az értékek 61%-a pedig 36,54 V alatt van (gyártói adat a 6. táblázatból).



54. ábra. A mért üresjárásos és MPP feszültségértékek eloszlása.

A 55. ábra a mért áramsorok eloszlását mutatja. Az MPP áramsorok mediánja 7,53 A, az átlagos MPP áramérték pedig 7,38 A. Az MPP áramsorok átlagos különbsége 0,34 A, a szórása 0,93 A. Az értékek 56%-a 7,5 A és 8,0 A között van (594 modul), és 37%-a 7,47 A alatt van (gyártói adatok a 6. táblázatból). A rövidzárlati áramsorok mediánja 8,24 A, az átlagos zárlati áramérték pedig 8,13 A. A rövidzárlati áramsorok átlagos különbsége 0,33 A, a szórása 0,97 A. Az értékek 66%-a 8,0 A és 8,5 A között van (699 modul), az értékek 11%-a pedig 7,92 A alatt van (gyártói adatok az 6. táblázatból).



55. ábra. A mért rövidzárlati és MPP áramerősségértékek eloszlása.

### 6.3. Elektrolumineszcens vizsgálatok

Az elektrolumineszcens (EL) vizsgálatok során átfogó és rendkívül szemléletes képet kaphatunk akár egy teljes napelemmodul állapotáról. A vizsgálat végeredménye valóban egy digitális fénykép. A felvétel elkészítéséhez a fényérzéken szilícium rétegnek fényt kell kibocsátania annak abszorbeálása helyett. Ez úgy lehetséges, hogy a vizsgálat során a modulra feszültséget kell kapcsolni, amely hatására áram indul meg, ekkor a modul fogyasztóként működik a generátoros üzem helyett. A manapság egyre népszerűbb LED fényforrások látható fényt bocsátanak ki fogyasztóként, azonban a napelemek szilícium cellái az emberi szemmel nem érzékelhető infravörös közeli sugárzást bocsátanak ki. A napelemcellák hibáinak feltárásához olyan kamera szükséges, amely érzékeli ezt a sugárzást és láthatóvá teszi. A felvételeken már jól elkülöníthetővé válnak a fényes és működő, valamint a működésképtelen és sötét felületű cella részek [81, 82, 83].

#### 6.3.1. A EL teszt mérőberendezése

A flash teszt berendezéshez hasonlóan a burkolat (black box) felső vagy egyik oldalsó része nyitott vagy nyitható, ahová a vizsgálandó panel felerősíthető. Előnyös, ha a rögzítésre szolgáló szorító mechanizmus nem igényel szerszámot, valamint zárása és oldása is gyors és egyszerű.

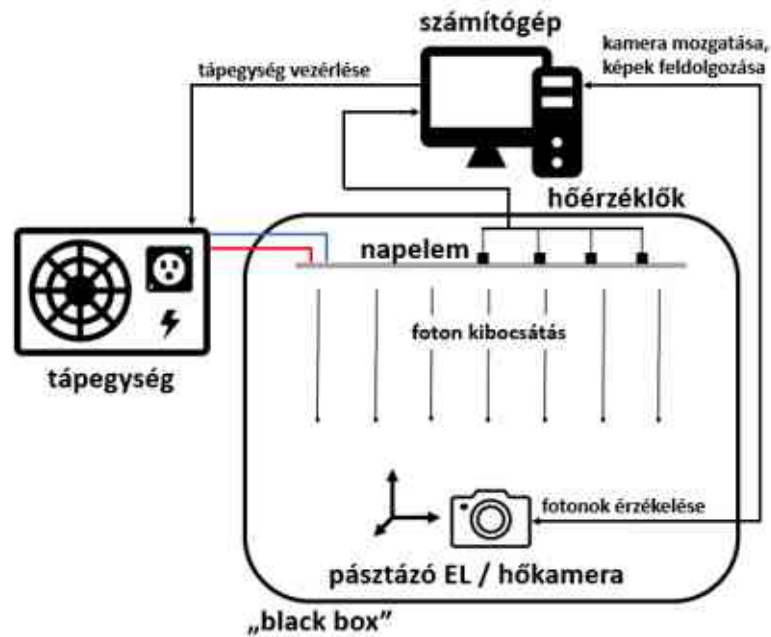
A mérőrendszerben egy tápegység szolgáltatja a szükséges feszültséget és áramot, ami a szilícium cellákat átjárva a fotonok emisszióját okozza. Normál fényképezőképek nem, csak speciális típusok használhatók (55. ábra). Az alkalmazott kamera típusa leggyakrabban monokróm, így érzékelheti az infravörös sugárzási intenzitással érkező fotonokat. Számos hőkamera váltható át monokróm üzemmódra, ezzel kiszélesítve az alkalmazhatóságukat. Ugyanakkor, egy hétköznapi életben használatos kamera is átalakítható a feladat elvégzéséhez az infra-szűrő eltávolításával [84, 85].

A gyakorlatban jelentős bevizsgálandó mintaszám esetén célszerű, ha a mérés számítógép által vezérelt. Beleértve a tápegység vezérlését, az EL kamera irányítását, valamint szükség esetén az eredmények feldolgozását és kiértékelését egyaránt. Ebben az esetben minden egyes mérési ciklus mindössze pár másodpercig tart. Kutatómunka során a vezérlés elhagyható, valamint a flash teszthez hasonlóan akár egy egész besötétített helyiség berendezhető a vizsgálatok elvégzéséhez.

A keskeny mikropedések detektálásához nagyon magas felbontású kamerák szükségesek. Igazán nagy felbontás esetén elegendő lehet egy felvétel készítése, amelyen az egész modul látható. Amennyiben alacsony a felbontás, pásztázó mechanikával a kamera végig járja a panelt (56. ábra). A művelet során több felvételt készít, amelyet a vezérlő számítógép egy képszerkesztő programban automatikusan összeilleszt. Utóbbi esetben előfordulhatnak illesztési hibák és egyéb anomáliák, melyek a kép minőségét rontják. A legmodernebb berendezések kiegészítő tulajdonsága a szoftveres képelemzés és hibakeresés, adott esetben mesterséges intelligencia használatával.

A korszerű EL mérőberendezéssel szemben támasztható követelmények:

- kamera: 100 MP;
- áramerősség automatikus beállítása: 0 – 20 A;
- felvétel elkészülésének ideje: 1 – 5 s (cellatípus és felbontás függvénye);
- automatikus hibakeresés (szoftveres).

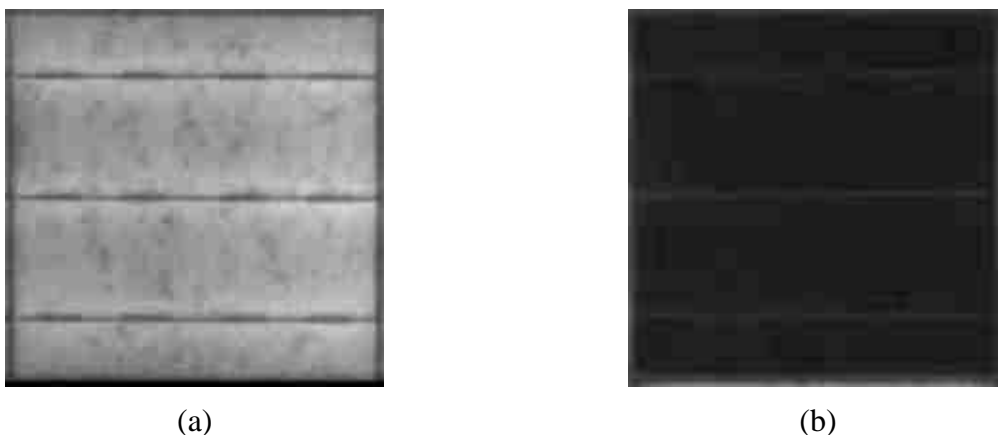


56. ábra. A elektrolumineszcencia tesztberendezés elvi felépítése.

### 6.3.2. Leggyakoribb EL teszttel azonosítható szilícium cella hibák

A továbbiakban olyan napelempanel cella lapkáiról készült képek következnek, amelyek tanúsítvánnyal rendelkező mozgó (mobilis) laboratóriumban készültek egy helyszíni mérés során. A napelemcellák leggyakoribb hibái közé tartoznak a repedések, törések és elektródahibák. Számos jól kivehető hiba nem feltétlenül okoz teljesítmény csökkenést, azonban a hibák halmozódása és súlyosbodása extrém esetben a teljes napelemmodul tönkremeneteléhez vezethet.

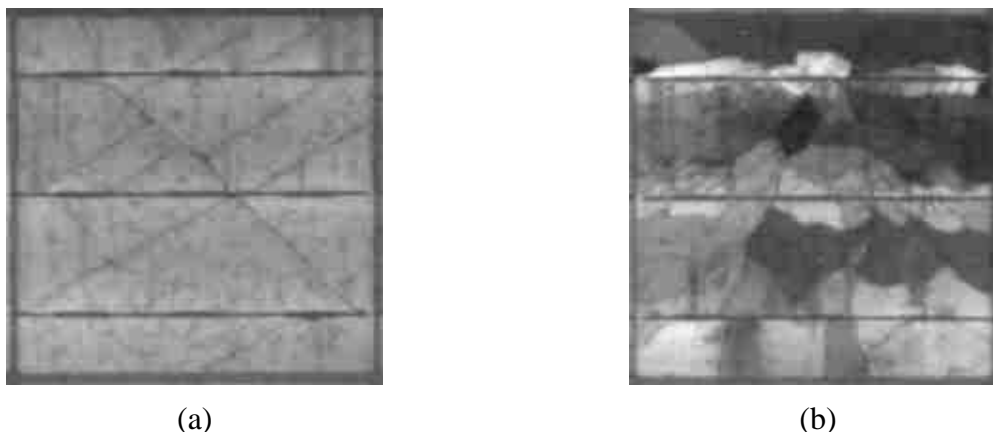
Ezek a kiválasztott napelemcellák nem minden esetben kapcsolódnak ahhoz a 6 db panelhez, amelyek teljes egészében bemutatásra kerülnek. Ennek oka, hogy a tipikus hibákat igazán jól bemutató felvételeket kerestem, melyeket egyéb panelek felvételein találtam. Összesen több mint ezer panelről készültek flash és elektrolumineszcencia eredmények.



57. ábra. (a) A hibamentes napelemcella EL képe; (b) teljesen kiégett cella képe.

Etalonként az 57. (a) ábra egy hibamentes cella lapkát mutat be. Ki lehet jelenteni, hogy az egész lapka világos, a szilícium cellák fény kibocsátását semmilyen jelentős hiba nem befolyásolja. Az ábrán kisebb homályos foltok is felfedezhetők, amelyek kristályszerkezet béli

különbségeket mutatnak. Egy teljes modul vizsgálata során megfigyelhető, hogy a szomszédos lemezek hasonló, közel azonos mintázatot vesznek fel. A jelenség annak eredménye, hogy a kikristályosodott és felszeletelt szilícium tömb azonos részéből származnak (a szeleteléskor egymást követték a lemezek). Ezeknek a kis anyagminőség béli eltérések nincs jelentős teljesítménycsökkentő hatása, ugyanakkor könnyen összetéveszthetők kisebb anyaghibákkal vagy más sérülésekkel. Az ábrán látható három vízszintes vonal sem sérülés, hanem az áramgyűjtő fém sínek, melyek összekötik az egymás mellé rendezett szilícium lemezeket. Az 57. *b) ábra* ellenben egy teljes egészében inaktív, működésképtelen cellát mutat [86].



**58. ábra.** (a) Hosszú, keskeny repedések; (b) Számos repedés által eredményezett, különböző mértékben elszigetelődött szilícium cella töredékek.

Az 58. (a), 58. (b) és 59. (a) ábra egy folyamat ábrázolására alkalmas, aminek tanulmányozása során eljutunk a nem jelentős vékony törésektől egészen a jelentős/ nagy cellarész leválásig. Az 58. a) ábrán látható nem kritikus törések, nem csökkentik le jelentős mértékben a teljesítményt. Közel az összes cella képes fény emittálásra, ami azt bizonyítja, hogy fordított esetben energiatermelésre is képesek. Idővel ezek a törések szélesebbre nőhetnek, akár jelentős területek elszigetelődését eredményezve (pl. 58. b) és 59. a) ábra). Az 59. b) ábra mutat halvány elektródahibákat („finger interruption” hibákat), melyek még a kialakulásuk kezdetén vannak. Ezek a gyűjtősínekre merőlegesen, azokból kiindulva figyelhetők meg [81, 87, 88, 89].

Az 58. (b) ábrán egy súlyosan sérült napelem lemez látható. Pókhálószerű elrendeződésben láthatók cella repedések, melyek számos egymástól elkülönített cella töredéket hozott létre. Ezen cella töredékek közül számos elektromos értelemben is elszeparálódott, így fekete és sötét szürke árnyalatban jelennek meg a képen. Jól ismert, hogy ezek a cella töredékek meglehetősen már jelentős mértékben képesek csökkenteni a teljesítményt. Ez a veszteség idővel növekedhet, mikor több töredék is elkezd elszigetelődni az áramgyűjtő sínektől és színük a vizsgálat során teljesen fekete lesz [81, 88, 90].

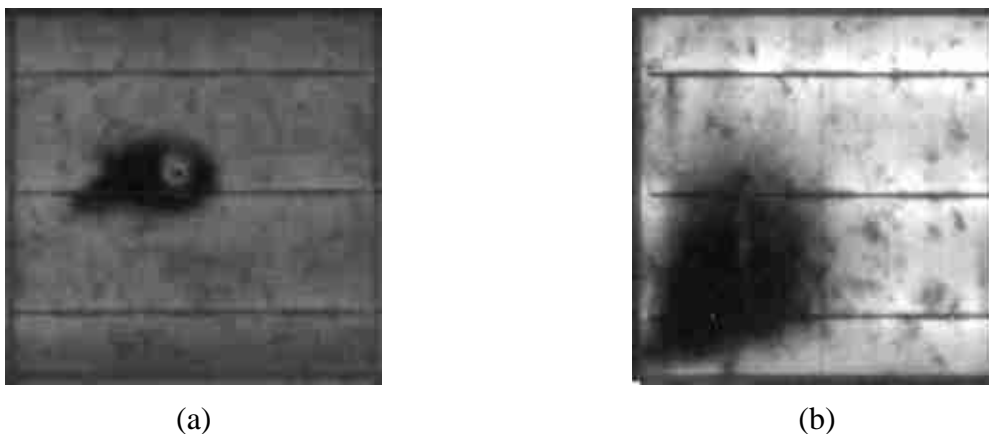
Az 59. (a) ábra egy olyan esetet mutat be, amikor már egy a napelem lapka méretéhez képest viszonyítva nagy cellarészlet teljesen leválik és áramtermelési szempontból tönkrement. Ezt a hibát tekinthetjük egy keskeny repedéssel kezdődött hibaként, mely repedés idővel kiszélesedett és a cellarészlet levált az áramgyűjtő sínről is. Magyarán a repedések a súlyosabb meghibásodások előfutárjai. Hasonló sérülések megjelenése az anyagban igen jelentős teljesítmény csökkenést eredményezhet. A kiesés mértéke hozzávetőlegesen azonos a hibával érintett terület és a teljes cellalapka területének arányával.



**59. ábra.** (a) Széles törés által okozott, teljesen levált cellatöredék; (b) példák elektróda hibákra.

Az 59. (b) ábra az úgynevezett elektróda megszakadásokat mutatja, amely anyagsérülések jellemzően a gyártási folyamatra vezethetők vissza. Az elektróda hibák nem feltétlenül csökkentik a teljesítményt, kivéve azt az esetet, amikor forrasztási hibák hatására jelennek meg. Utóbbi esetben bizonytalan mértékű teljesítményvesztéssel lehet számolni. Komplex összefüggés mutatkozik a méretük, pozíciójuk és darabszámuk, valamint az áramtermelésre gyakorolt hatásuk között. A repedések megjelenése is eredményezhet elektróda hibákat, és akadályozhatja az áramátvitelt, ami befolyásolja a fényérzékeny lemezek működését és végül a modulok részleges vagy teljes meghibásodását okozza [86, 89, 90].

A 60. (a) ábra a hot-spot jelenség képét mutatja, amely a lerakódott felületi szennyeződés hőszigetelő hatásának következménye lehet. (pl. por, madárürülék, felületre tapadt falevél). Ezenkívül ezt a sérülés típust forrasztási hiba is okozhatja. Utóbbi esetben közvetlenül a gyűjtősínek mellett alakul ki. A néhány fokkal eltérően túl magas hőmérséklet is kialakulhat (gyakran akár 140-160 °C körüli). Extrém esetben a megnövekedett hőmérséklet akár a modul hátlapját is megolvashatja [91, 92]. Ez a hőmérséklet-eloszlás inhomogenitása teljesen károsítja a fényérzékeny szilíciumcellákat, akár a napelemlemez felületéhez képest nagy mértékű anyagkárosodást és teljes tönkremenetelt okozhat. Az elmúlt években az infravörös termográfia bizonyult a legjobb technikának a forrópont (hot-spot) hibák azonosítására [83, 93]. A forrópont jelenség a legkönnyebben észlelhető teljesítménycsökkentő hibaforrás a helyszíni felmérések során.



**60. ábra.** (a) A hot-spot jelenség eredménye; (b) tojás formájú anyaghiba.



A 60. (b) ábra az anyaghiba tipikus jelét mutatja, amely jellemzően kagyló vagy tojás alakú. Ez a sérülés mintázat számos alkalommal volt megfigyelhető, amikor a napelemmodulok jelentős felületi szennyeződésnek voltak kitéve. A fényérzékeny anyagot érintő hiba típus csökkenti a csúcsteljesítményt, valamint a modul élettartamát is jelentős mértékben csökkentheti. A napelemmodulok felületén összegyűlt szennyeződés komoly probléma, amely a villamos hálózatban termelők többségére hatást gyakorol. Ez azt jelenti, hogy a teljesítmény kiesés könnyen elérheti a 10%-ot, extrém esetben 20-25%-ot [4], ami nagyon rossz eredmény a befektetők számára. A vártnál gyorsabb cella öregedés és lecsökkent élettartam a beruházások sikerességét fenyegethetik.

### 6.3.3. Megengedett hibahatárok

A 10. táblázat tartalmazza a felsorolt hibatípusokra a szabvány által előírt maximálisan megengedett előfordulások számát. A táblázatban felsorolt hibaszámok egy 60 db cellából álló 260 Wp csúcsteljesítményű erőművi panelra vonatkozik. A hibatípusok felsorolása a leggyakoribb és legártalmatlanabb hibákkal kezdődik és a legsúlyosabb hibatípusokkal végződik. Számos esetben az EL felvétel nem tükrözi egyértelműen a valós villamos teljesítőképességet. Nélkülözhetetlen, hogy az EL képeket kiegészítse a villamos paraméterek felmérésével (flash teszt).

10. táblázat. A megengedett hibamennyiség határértékek erőművi napelemmodulok esetében.

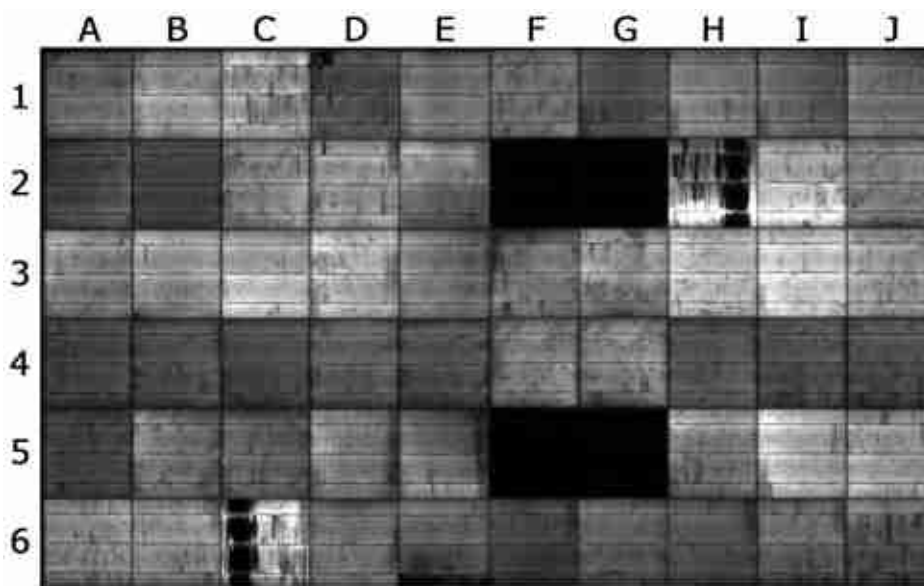
Hibatípus megnevezése	Maximális hibaszám (cella/modul)	Arány (%)
1. Kisebb cella repedések	60	100%
2. Nemkritikus mikrorepedések	30	50%
3. Elektróda hibák repedés nélkül	30	50%
4. Elektróda hibák repedéssel	12	20%
5. Kritikus repedések <20% potenciális teljesítmény veszteséggel	12	20%
6. Kritikus repedések <20% teljesítmény veszteséggel	12	20%
7. Kritikus repedések >20% potenciális teljesítmény veszteséggel	6	10%
8. Kritikus repedések >20% teljesítmény veszteséggel	6	10%
9. Forrasztási hiba	6	10%
10. Nem működő cellák	3	5%
11. Pókháló szerű törés	3	5%
12. Többtörédes törés teljesítményvesztés nélkül	3	5%
13. Többtörédes törés teljesítményvesztéssel	0	0%
14. PID	0	0%
15. Karcolás a hátoldalon	0	0%

### 6.3.4. Erőművi modulok elektrolumineszcencia alapú teljes kiértékelése

Az erőművi modulok elektrolumineszcencia (EL) vizsgálata során számos hibatípus előfordulása nyert egyértelmű bizonyítást. A korábbi fejezetben példaként felsorolt 6 db modul flash tesztjeihez kapcsolódó EL képek bemutatása következik. A képek sorrendje megegyezik a flash teszt

karakterisztikák és a 9. táblázat sorrendjével, mely a teljesítmény veszteség mértéke szerint rendezi sorba a modulokat.

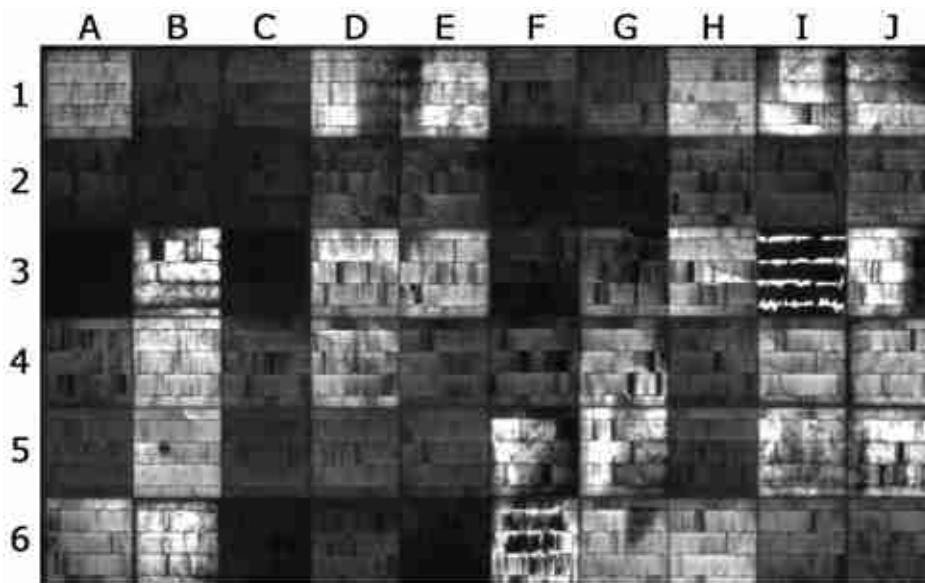
A 61. ábra a PV23160 EL képe, amely egy rendkívül gyengén teljesítő modul volt a flash teszt során. Első pillantásra kizárólag a felvétel alapján nem tűnne ilyen rossznak az állapot, mivel szép számmal figyelhetőek meg ép cellák minden sorban. A 2. és 5. sorban van 2-2 teljesen kiégett cella (F2, G2, F5 és G5), melyek ellehetetlenítik az egész modul működését. A 10. táblázat értelmében a 4 db nemműködő cella miatt a modul nem megy át az EL teszten, mivel ebben a 10. kategóriában a megengedett hibaszám 3 db cella, azaz 5%. A három cellafüzérből érdemben kettő is kiesik a termelésből. A feszültség a gyártó adatainak 27,4%-a. Sok cella jó állapotban van, de a H2-ben és C6-ban kritikus repedések is megfigyelhetők.



61. ábra. A PV23160 modul EL képe, mely leggyengébben teljesített a flash teszten.

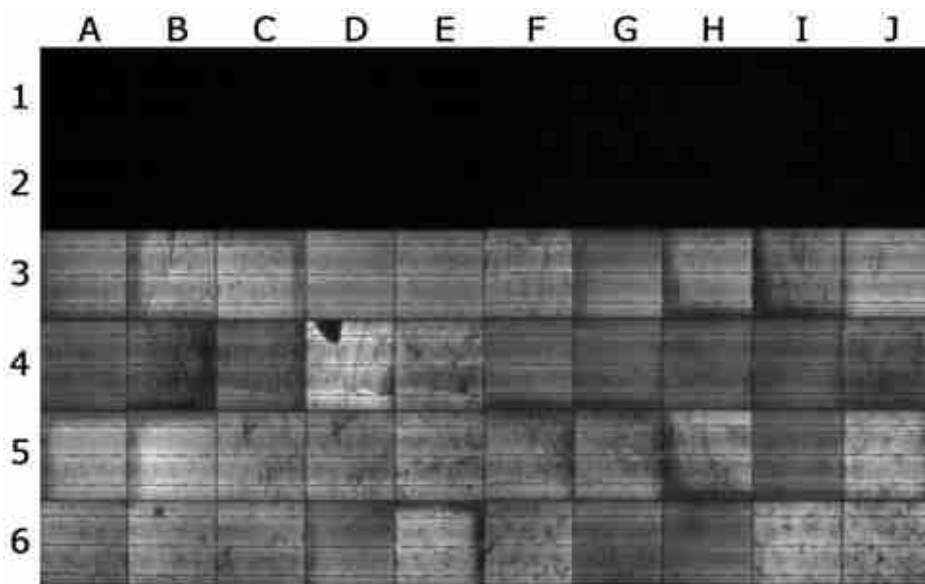
A 62. ábrán a PV73760 napelemmodul elektrolumineszcencia képe látható, amelynek teljesítménye körülbelül a fele volt az elvárható névleges csúcsteljesítményének (144 Wp, 55,5%, 9. táblázat) a flash teszt során. Láthatóak teljes cella kiégések (A3 és C3), nem kritikus mikrorepedések (B4, C4) és kritikus repedések (I3) egyaránt, valamint hotspot jelenségre (felületi szennyeződés, forrasztási hiba) utaló jel az egyik gyűjtősín közelében (B5) [82, 94]. Szinte minden egyes cella elektródahibákat tartalmaz (például A4, D3, H3), azonban a 10 táblázat 3. kritériuma alapján ennek maximálisan megengedhető mértéke 50%, valamint ezek közül 12 db cella tartalmaz repedéseket is. Ezen megállapítások alapján azt a következtetést kell levonni, hogy a modul nem teljesíti az EL teszt feltételeit.

A 63. ábra egy olyan panelt (PV02310) mutat, amely minden bizonnyal egy erőművi string (asztal) alsó sorából származhat. Ez lehet bypass dióda hiba is, azonban, ha a jelenség nagy számban lép fel egymás melletti modulokban, akkor valószínűbb, hogy a telepítési hibából eredő árnyékhatás eredménye. Lehet, hogy az 1. és 2. sor túl közel volt a talajhoz, az előtte lévő másik string felső moduljai leárnyékolták őket. Ez egy olyan telepítési hiba eredménye, amikor a két string közötti távolság nem volt megfelelően meghatározva, vagy kimérve.



62. ábra. A PV73760 EL képe, mely számos cellájában hordoz károsodásokat.

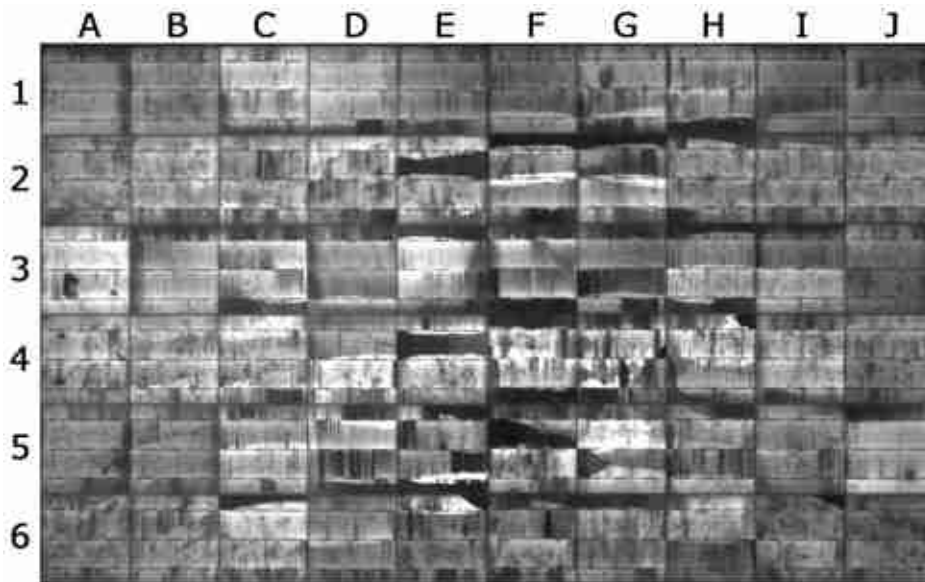
Ezenkívül 62. ábra által bemutatott számos cellában repedések láthatók, több esetben pókháló szerű repedések, törések (B3, B4, H5, I3,...) növelik a hibalistát. A D4 cellán celladarab leválás és helyi forrasztási hiba (B6) figyelhető meg. A teljesen nem működő két sor miatt a mért feszültség 20,91 V (a normál érték 60,1%-a, 9. táblázat). A másik négy sor továbbra is képes áramot termelni. A számos működésképtelen cella egyértelműen azt eredményezi, hogy a panel nem felel meg az EL teszt kritériumainak.



63. ábra. A PV02310 modul EL képe egy teljesen inaktív cellafüzérrel.

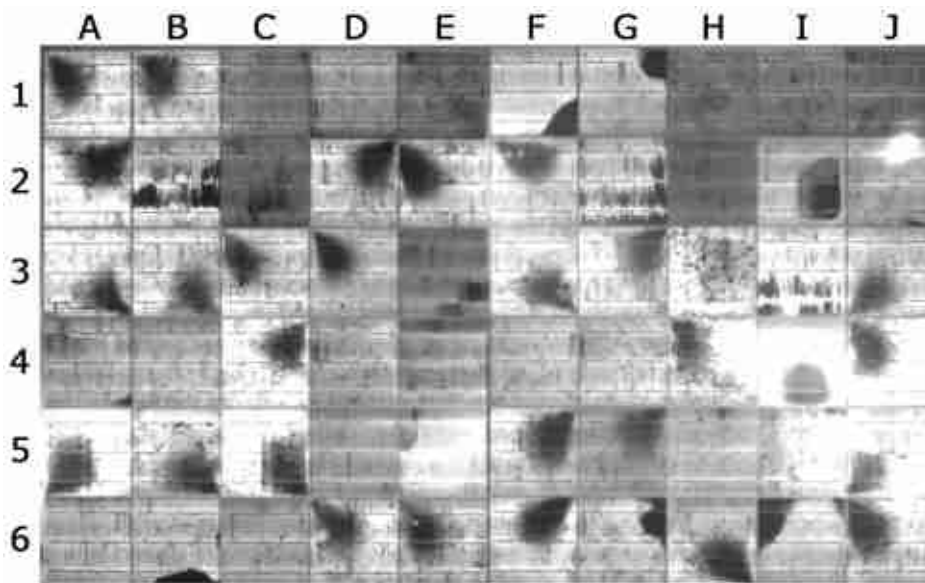
A 64. ábra PV41140 modult mutatja, melynek teljesítménye nem felelt meg a flash teszten, azonban a teljesítmény veszteség a gyári értékhez képest 10%-volt. A mért maximális munkaponti teljesítmény STC körülmények között 226,7 Wp volt (9. táblázat). Az E, F, G és H oszlopok széles repedések okozta „vakfoltokat”, azaz működésképtelen cellaszakaszokat (pl. C6, E4, F5) tartalmaznak [94]. Az említett cellák minden bizonnyal jelentős teljesítmény veszteséggel

rendelkeznek. 20%-nál kevesebb veszteséggel bíró cellák megengedett száma 12 db, a 20%-ot meghaladó veszteséggel rendelkező celláké 6 db. Ezen kritériumok okán a panel megbukik a teszten. Továbbá, sok cella elektródahibákat tartalmaz a teljes képen (pl. C2, D5, H5,...) [82] és több cellában is vannak repedések (A6, B6, C4,...), valamint forrasztási hiba (A3, A4, J5) [82, 84, 85, 89, 94, 95].



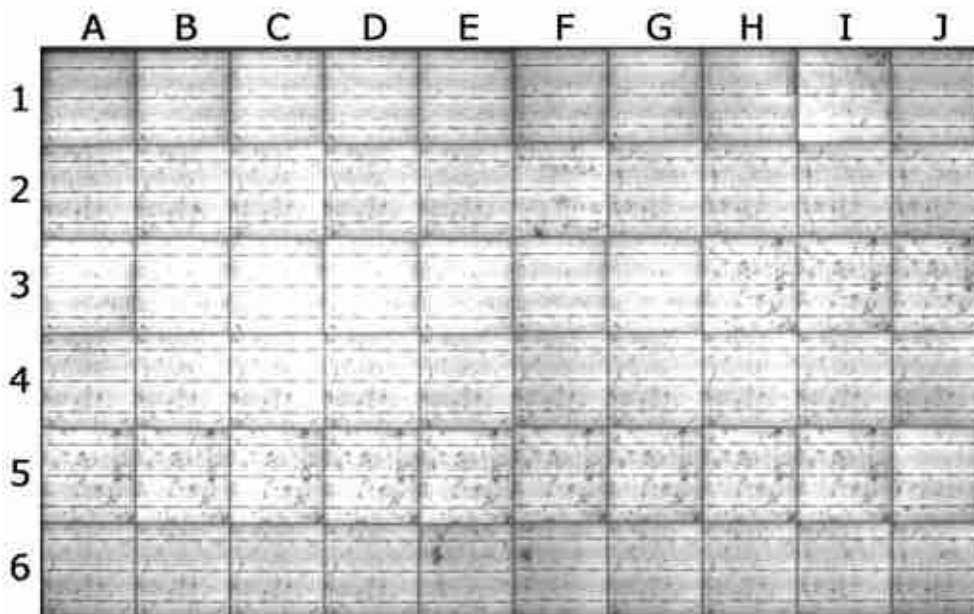
64. ábra. A PV41140 modul EL képe, mely átlagos mértékben károsodott.

A 65. ábra egy olyan napelem (PV64260) elektrolumineszcencia felvételét mutatja, amely porlerakódás okozta anyaghiba jeleit mutatja. Ezek a nagy sötét kagyló, tojás alakú foltokként jelennek meg (A1, B1, C3, D3,...). Fontos megjegyezni, hogy az anyaghiba foltok széles forma és árnyalat változatossága teljes mértékben nem tisztázott. A B6, F1 és I3 cellákban cellatörés figyelhető meg [101]. További öt cellánál nagy kiterjedésű, inaktív cellaelemek figyelhető meg (B2, F1, G1, G6 és I6), valamint a forrasztási hibákat tartalmaz számos cella (C1, E1, D3 és H5) [96-100].



65. ábra. A PV64260 napelemmodul EL képe, mely számos helyen anyaghibát mutat.

A 66. ábrán a **PV50239** napelemmodul elektrolumineszcencia képe látható, amelynek teljesítménye képes volt a gyártói értéket biztosítani a flash során. Minden cella világos, repedés vagy törés nem látható. Kizárólag három cella esetében figyelhető meg kisebb hotspot okozta kiégett terület (F2, E6 és F6). Számos cellán hasonló mintázatú apró sötét foltok láthatók. Amikor a szilícium tömböt szeletelték, ezek a cellák (szeletek) egymás szomszédos szeletei voltak és a kristálytömbben lévő anyagminőségi egyenetlenségek a szeletek vékonysága okán eredményezte ezt a hasonlóságot. Az ilyen mintázatokat a szakértők többsége nem tekinti jelentős gyártási hibának. Ezek az apró hibák nem akadályozzák a modul megfelelő működését.



66. ábra. A **PV50239** modul közel hibátlan EL képe.

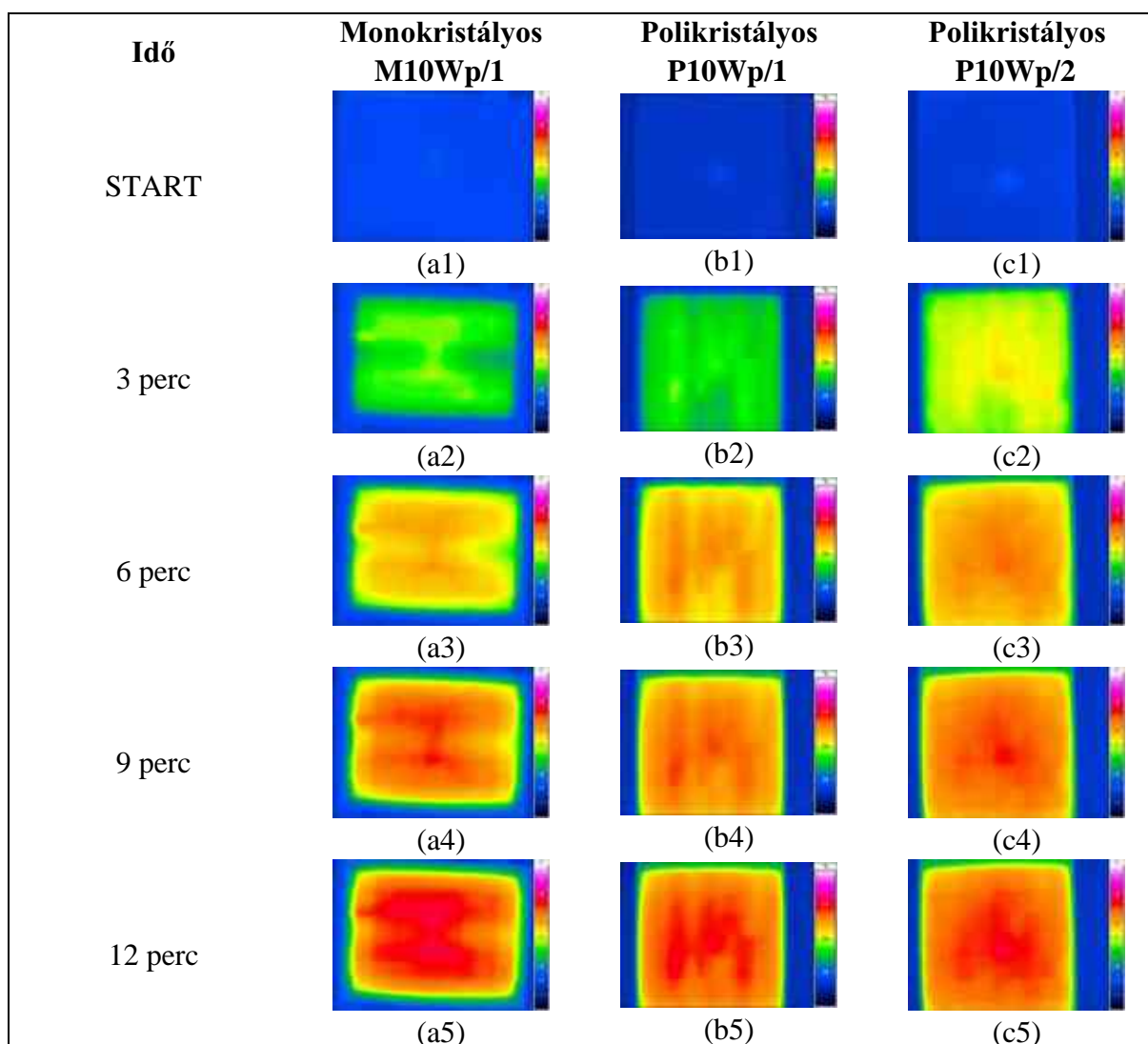
Az állapotfelmérések alkalmával le lehet vonni azon következtetéseket, miszerint az erőművet forgalmas utaktól és ipari parkoktól távol kell elhelyezni. Továbbá az elmúlt évek száraz időjárása okán, az intenzív mezőgazdasági termelés is károsan érinti a naperőművek termelését.

A telepítési területek kiválasztásakor költségcsökkentés céljából magától értetődő, hogy elsődleges szempont a tervezett erőművek egyszerű és gyors becsatolása a villamosenergetikai rendszerbe.

Jelen esetben, amikor már egy megépült erőműről beszélünk, szóba jöhet a modulok felületének rendszeres tisztítása. [2, 101]. Már elérhetőek az automatikusan vezérelt tisztítórobotok és -mechanizmusok prototípusai [102].

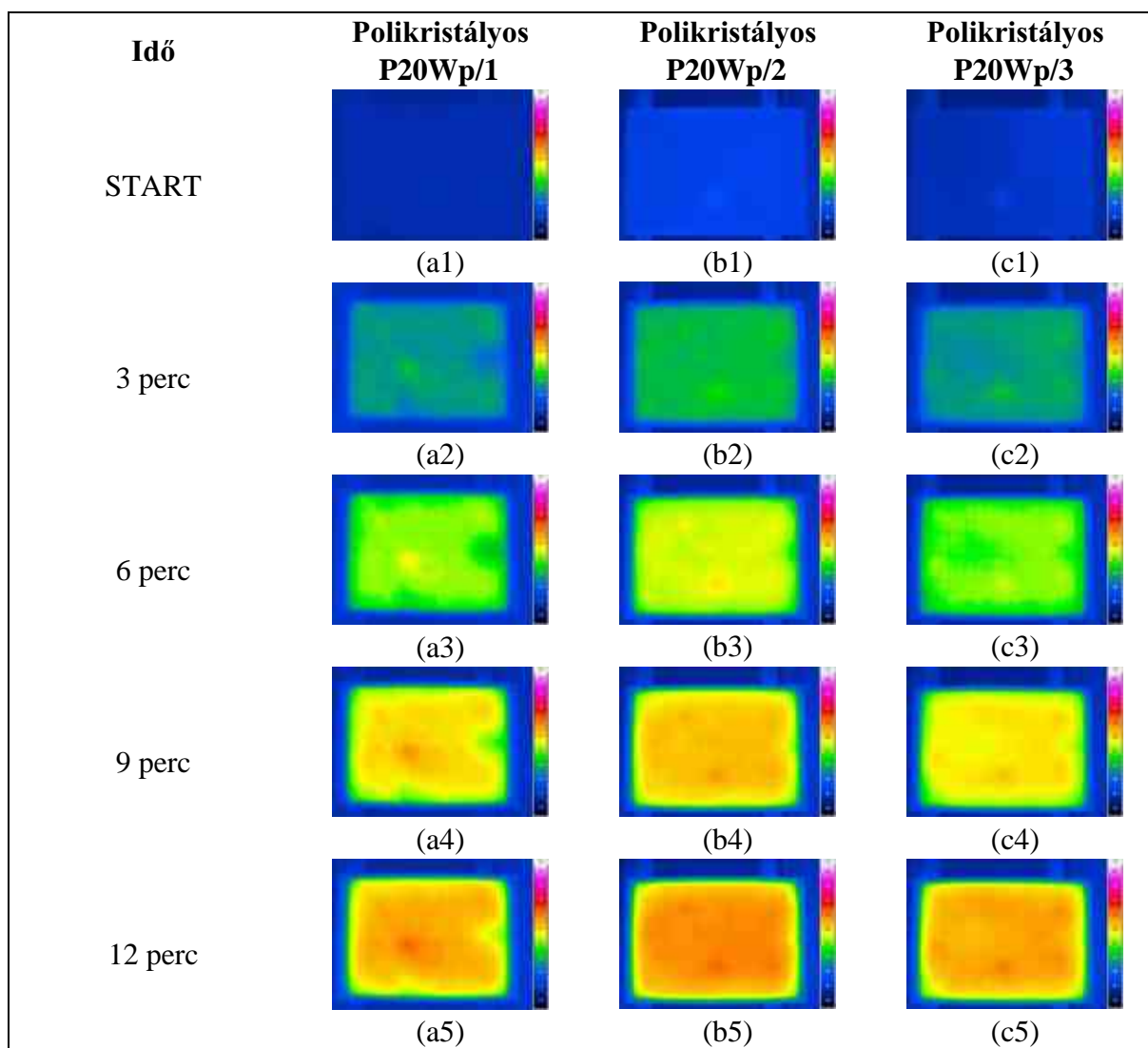
6.4. EL kamera kiváltása hőkamerával

Szeretném bebizonyítani, hogy a termográfia és az elektrolumineszcencia képek kompatibilisek egymással. A hasonlóság alapja a Joule-hő. Ahogy korábban leírtam, a sérült cellarészek ellenállása megváltozik, így több hőt termelnek. Mivel a különbségek az EL-képeken láthatók, a termográfiai vizsgálat során is hasonló eredményt kell elérni [103, 104]. A kutatómunkát a tanszéki laboratórium kisebb és nagyobb teljesítményű paneljein kezdtem el. A 10 Wp teljesítmény kategóriában monokristályos és polikristályos paneleket is teszteltem. A termográfiai képeken jól láthatóak a különbségek, eltérő a panelek hőeloszlásának mintázata. A kilencedik percben a legjobban meg lehet állítani a különbségeket (67. (a4), (b4), (c4) ábra). Ebből arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált paneleken különböző cellakárosodások lehetnek. Továbbá bebizonyosodott, hogy a termográfiai vizsgálat hatékony módszer. EL-képek azonban még nem készültek a panelekről.



67. ábra. 10 Wp teljesítményű napelempanelek hőkamerás felvételei.

A 20 Wp teljesítmény kategóriában jelenleg csak polikristályos paneleket tudtam tesztelni. Mindhárom minta ugyanattól a gyártótól származik. A végeredmény és a panelek közötti különbségek nem olyan látványosak, mint a 10 Wp-s paneleknél. Kisebb eltérések azonban kimutathatók (68. ábra). A P20Wp/2 panel már a harmadik percben több hőt bocsátott ki, mint a másik két panel. A képek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a panelek jobb állapotban vannak, mint a 10 Wp teljesítményűek. A panelekről még nem készült elektrolumineszcencia felvétel, mert jelenleg csak az egyik iparági partnerünk rendelkezik ezzel a technológiával.



68. ábra. 20Wp teljesítményű napelempanelek hőkamerás felvételei.

## 7. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1. A napelemek felületére számos por állagú szennyező anyag kiszórása lett megismételve különböző eszközökkel a különböző természetes lerakódás mintákat lehető legjobban közelítő vizsgálatok érdekében, amire nem volt fellelhető példa a hazai és nemzetközi szakirodalmakban. Kétféle minta lett vizsgálva, a foltszerű és a felületen egyenletesen szétszóródó lerakódás minták. Az kapott eredmények kettéválasztották a kutatási irányvonalat, a foltszerű lerakódásokat az állapotfelmérés témakörében, míg az egyenletes lerakódási képet teljesítményvizsgálati témakörben alkalmaztam tovább.

Bizonyítást nyert, hogy minden szennyezőanyag-típusnál az egyenletesen szétszóró minta nagyobb csökkenést okozott, mint a foltszerű lerakódási minták. Valamint egyenletes kiszórás esetén a szita lyukátmérőjének csökkenése fordított arányosságban állt a kiváltott teljesítményvesztéssel. A megállapításokat alátámasztják, a mért villamos paraméter változások:

a) Az alkalmazott kiszóró eszköz és a lyukátmérő függvényében a **feszültségcsökkenés** 75 g/panel felületi szennyeződés-koncentráció esetében a következők szerint alakult:

	<i>hamu</i>	<i>városi por</i>	<i>föld</i>	<i>homok</i>
<i>foltszerű lerakódás</i>	10%	8%	7,8%	3%
<i>egyenletes, nagyobb lyukátmérő</i>	19%	<i>n.a.</i>	8,5%	7%
<i>egyenletes, kisebb lyukátmérő</i>	24%	14%	10%	8%

b) Az alkalmazott kiszóró eszköz és a lyukátmérő függvényében az **áramerősségcsökkenés** 75 g/panel felületi szennyeződés-koncentráció esetében a következők szerint alakult:

	<i>hamu</i>	<i>városi por</i>	<i>föld</i>	<i>homok</i>
<i>foltszerű lerakódás</i>	84%	58%	27%	14%
<i>egyenletes, nagyobb lyukátmérő</i>	91%	<i>n.a.</i>	44%	21%
<i>egyenletes, kisebb lyukátmérő</i>	95%	77%	53%	30%

**A kutatási eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy a foltszerű szennyeződési minták a napelempanelek feszültségére 50-70%-al, az áramerősségére 10-50%-al kisebb hatást gyakorolnak, mint az egyenletesen lerakódó szennyeződés minták.** Ennek eredményeképp a további teljesítménycsökkenést vizsgáló kutatások során már csak az egyenletes lerakódási minta lett alkalmazva. Ugyanakkor, **a foltszerű lerakódások vastag, pontszerű termikus szigetelőréteget képeznek a panel felületén, valamint teljesen inaktívvá teszik a lefedett napelem cellákat.** Ezen hatásokat az állapotfelmérés témakörében lehet tovább vizsgálni.

A T1 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S8], [S13]



T2. *A napelem felületén lerakódó szennyeződések fizikai, kémiai tulajdonságaitól függ a napelem működésére gyakorolt hatásuk. A szakirodalmat figyelembe véve egyedülálló, hogy szerves anyagok is vizsgálva lettek, mint a felületen gyakran lerakódó szennyező anyagok. Az előző T1. tézis megállapításai alapján egyenletesen lettek szétszórva a szennyezőanyagok a felületen, valamint ugyanazt a Korax Solar 80 Wp napelempanelt használtam.*

A szennyezés vizsgálat által keresett és beazonosított jelenég a napelemre kapcsolt töltésvezérlő szabályozó áramkör közbelépése volt.

Megállapítást nyert, hogy a töltésvezérlő áramkör beavatkozásához kötődő szennyezőanyag koncentrációk sorra a következők:

	<i>levél</i>	<i>föld</i>	<i>szalma</i>	<i>fűrészpor</i>
	8 g/panel	10 g/panel	11 g/panel	12 g/panel
vagy	16 g/m <sup>2</sup>	20 g/m <sup>2</sup>	22 g/m <sup>2</sup>	24 g/m <sup>2</sup>

**Bebizonyosodott, hogy egy 16-24 g/m<sup>2</sup> mértékű, a napelemes erőművek állapotfelmérésekor tapasztalt (60-80g/m<sup>2</sup>) szintnél kisebb, szennyezőanyag-koncentráció elérésekor már a szabályozó elektronika beavatkozására volt szükség, az elérhető maximális teljesítményű munkapont fenntartása érdekében.** Az eredmények alapján megerősítést nyert, hogy ezek a szabályozások, 8-12%-os ugrásszerű csökkenést jelentenek a szolgáltatott villamos energia mértékében és ez közvetlen hálózati visszahatást eredményez.

A T2 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S2], [S8], [S13]

T3. *A termográfias hibakeresés módszertanát számos kritika éri, melyek kételkednek annak hitelességében. Tény, hogy az állapotfelmérés során számos, a végeredmény helyességét garantáló ajánlást be kell tartani, mint például a kamera nézeti szögének megválasztása, valamint a panelektől számított távolsága. A szakirodalom áttekintése során azt tapasztaltam, hogy a tanulmányok jellemzően inkább beszámolók, amelyekben elsősorban csak bemutatnak eltérő hőképeket, azok kialakulásával vagy előidézésével kevésbé foglalkoznak.*

**Ezzel szemben a kutatómunka során bebizonyításra került, hogy mesterségesen, kontrollált körülmények között is elő lehet állítani olyan állapotokat, amelyek különböző okoknál fogva hőképző hatást eredményeznek,** mint például a felületi szennyeződés, vagy éppen a természetes és mesterséges árnyékhatás, illetve a fényérzékeny anyagban rejlő belső törések és repedések. Az előbbiekhöz hasonló állapotok regisztrálásra kerülhetnek tényleges erőművi állapotfelmérések során is. **A vizsgálati eredmények alapján kijelenthető, hogy a 15 °C-nál kisebb hőmérséklet differencia még előfordulhat ép panelek esetében, azonban a felületen lerakódó folt- és pontszerű szennyeződés minták, vagy a növényzet árnyékhatása előidézhet akár 30-60 °C-os különbségeket is.** Az ilyen nagy mértékű hőhatások visszafordíthatatlan károkat okoznak a félvezető anyagban, amelyek gyors degradációt és várható üzemidő csökkenést váltanak ki. Ugyanakkor a hőkamerával végzett vizsgálat önmagában nem elegendő pontos hiba-beazonosításra, többféle teszt kombinálásával lehet átfogó képet kapni egy napelemes erőmű állapotáról.

A T3 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S5], [S6], [S11]

T4. *A flash teszt témakörében egyedülálló, hogy a bemutatott nagy mintaszámon alapuló eredményeket mutassanak be. Egy ilyen ezer mintát meghaladó felmérés számos kérdésre adhat választ egy napelemes erőmű működési problémáinak megértése során. A vizsgált naperőmű telepítését követő években az üzemeltető állandóan fennálló, éves szinten 10-12%-os termeléskiesésre lett figyelmes.*

- a) **A négy éve működő magyarországi napelemes erőmű állapotfelmérése egyértelműen alátámasztja, hogy a napelemes erőművel szomszédos biomassza erőmű tüzelőanyagának előkészítése során megnövekedett légszennyezettség növelte az ahhoz közeli napelempanellek közti meghibásodások számát, a felületi szennyeződések okozta cella kiégések, tönkremenetelek miatt.** Megállapítható, hogy a károsodott napelemek maximális teljesítményű munkapontja csökkent, mert a károsodás miatt a bevizsgált panelek U-I karakterisztikája megváltozott.
- b) **Továbbá megállapítható, hogy a különböző hibajelenségek másként torzítják az U-I karakterisztikát a hibátlanul működő napelemekéhez képest. Elektrolumineszcencia teszt által szolgáltatott képek elemzése után kijelenthető, hogy a félvezető szilícium anyagban megjelenő hibahelyek száma és elrendeződése kapcsolatban áll a karakterisztika torzulásával.**

A T4 tézishez kapcsolódó saját publikációk: [S3], [S5], [S6], [S11]

T5. *Hőkamerával elvégzett termográfia és az elektrolumineszcencia kapcsolatának vizsgálata abszolút hiánypótló. A villamos tápegységre kapcsolt napelempanelleket átjáró áram nem csak az infravörös tartományhoz közeli fotonok emittálását váltja ki, hanem melegevést okoz a sérült, repedt akár töredezett szilícium alapú fényérzékeny anyagban.*

A különböző panelek esetében eltérő hőképek, teljesen egyedi mintázatok alakultak ki. Az eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy a panelek más-más pontokon károsodtak. Az elektrolumineszcencia során csak a hibák helye látható, valamint azok típusa nagy pontossággal meghatározható, ellenben a hibák által generált hő mértékére nem lehet következtetni csak termográfias vizsgálat által.

**Bizonyított, hogy a két vizsgálati módszer összekapcsolása és összehasonlítása nagy segítséget jelent a hot-spot jelenségek mélyre ható tanulmányozása és megértése terén.**

Végezetül meg kell jegyezni, hogy a három vizsgálati módszer (termográfia, flash, elektrolumineszcencia) együttes alkalmazása képes átfogó képet adni a napelemek állapotáról, károsodottsági fokáról.

A T5 tézishez kapcsolódó saját publikációk: [S4], [S5], [S6], [S12]

## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

A disszertációm megírása során sikerült bemutatnom és alátámasztanom azt a vélekedést, miszerint nem szabad félvállról venni a napelemes erőművek működtetését. Mivel meghibásodásokra egy nagyon hajlamos energiatermelő eszközzel van szó. Ezzel nem volt célom a napenergia hasznosítás ellen beszélni. Támogatom a társadalmunk megújuló energiák felé fordulását, azonban mint mindent, ezt a témát is megfontoltan, tudatosan kell megközelíteni és azáltal lehet biztosítani a lehető legjobb hatékonyságot.

Megvizsgáltam a napelemek hőmérsékletfüggését, valamint szennyeződések okozta teljesítmény veszteségét. A hőmérsékleti tranziens jelenség bemutatása során arra törekedtem, hogy alátámasszam az elméleti alapfeltevéseket. Továbbá a hűtés lehetőségére hívjam fel a figyelmet, valamint a túlmelegedést lehetséges hibaforrásként mutassam be.

Különböző szennyezőanyagokat is felhasználtam, valamint azok eltérő szemcseméreteit, valamint a napelem hasznos felületén eloszló koncentrációját. A felületi szennyeződéseknek van egy másik, súlyosabb következménye, amely hot spot formájában jelentkezik és inkább már a hőtérképezéssel vizsgálható.

A napelemes erőművek állapotfelmérése során alkalmazható tesztelési módszertanok közül bemutattam a hőkamerával zajló termográfiás hibakeresést, a villamos paraméterek meghatározására szolgáló flash tesztet és nem utolsósorban a hiba beazonosításra alkalmas, a konkrét állapotvizsgálatot szolgáló elektrolumineszcencia vizsgálatot.

Kiemeltem, hogy az elektrolumineszcencia helyettesíthető, illetve kiegészíthető termográfiával. Ugyanis azon túl, hogy a napelem képes fotonok emittálására, egyben hősugarakat is kibocsát, így a hibás vagy sérült részek megnövekedett ellenállásuk okán több többlet hőt termelnek.

Jövőbeli célkitűzésem a kutatómunka folytatására, hogy a legtöbb tudományos forrás is elismeri, hogy elsősorban az elektrolumineszcencia hiba beazonosításban a felvételeken látható foltok és törések értékelése során még vannak bizonytalanságok.

## 9. SUMMARY

During the writing of my dissertation, I managed to present and support the opinion that the operation of solar power plants should not be taken lightly. Because it is an energy-generating device that is very prone to breakdowns. It was not my intention to speak against the use of solar energy. I support the transition of our society towards renewable energies, however, like everything, this topic must be approached carefully and consciously, in order to ensure the best possible efficiency.

I examined the temperature dependence of solar cells and the loss of performance caused by contamination. During the presentation of the temperature transient phenomenon, I tried to support the basic assumptions of the mind. I should also draw attention to the possibility of cooling, as well as introduce overheating as a possible source of error.

I also used different pollutants, as well as their different particle sizes, as well as their concentration distributed on the useful surface of the solar cell. However, there is another, more serious consequence of surface dirt, which appears in the form of a hot spot and can be investigated with heat mapping.

Among the testing methodologies that can be used during the condition assessment of solar power plants, I presented the thermographic fault finding with a thermal camera, the flash test for determining the electrical parameters and, last but not least, the electroluminescence test that is suitable for fault identification and provides a specific condition test.

I emphasized that electroluminescence can be replaced or supplemented by thermography. In addition to the fact that the solar cell can emit photons, it also emits heat rays, so defective or damaged parts generate more heat due to their increased resistance.

My future goal for continuing the research work is that most scientific sources admit that there are still uncertainties in the evaluation of stains and breaks visible in the recordings, especially in electroluminescent fault identification.

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Első sorban köszönettel tartozom témavezetőmnek Dr. habil. Bodnár Istvánnak, aki fáradhatatlanul és a rá jellemző szorgalommal és magas fokú szakértelemmel segítette a munkámat. Továbbá, szeretném köszönetemet kifejezni az Intézet valamennyi oktató-kutató és dolgozó munkatársának, valamint hallgatóinak, akik a kutatómunkám során folyamatosan segítségemre voltak.

Szeretném megköszönni a családomnak és a barátaimnak a támogatásukat, segítségüket és a szűnni nem akaró türelmüket, amiért végig mellettem álltak és mindenben támogattak.

Köszönet illeti meg az MVM cégcsoport, a Rena Solar Kft, a ConformiticsLab Kft. és a PV Napenergia Kft. kollektíváját, akik napelemeket, valamint mérési infrastruktúrát biztosítottak.

## PUBLIKÁCIÓS LISTA

*A disszertációhoz köthető minőségi publikációk:*

- [S1] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, R.R. Boros, *Monitoring of MPPT regulation during temperature transient phenomenon in off-grid solar system*, 2023 24nd International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 269-272, 2023, **(SCOPUS indexált)**
- [S2] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, R.R. Boros, *Exploration of Solar Panel Damage and Service Life Reduction Using Condition Assessment, Dust Accumulation, and Material Testing*, Sustainability, vol. 15, no. 12, 9615, 2023, **(SCOPUS, Q2, IF: 3.9)**
- [S3] G. Kozsely, I. Bodnar, D. Matusz-Kalász, R. Lipták: *Determination of Solar Panel's Characteristics by Flash Testing*, 2022 23nd International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 233-238, 2022, **(SCOPUS indexált)**
- [S4] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, *Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Cells by Electroluminescence*, 2022 23nd International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 158-161, 2022, **(SCOPUS)**
- [S5] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, R.R. Boros, R. Lipták, *Condition Assessment of Solar Modules by Flash Test and Electroluminescence Test*, Coatings, vol. 11, no. 11, 1361, 2021, **(SCOPUS, Q2, IF: 2.881)**
- [S6] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, *Statistical Comparison Between Experimental and Numerical Simulation Results of The Solar Cell*, 2021 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 1-6, 2021, **(SCOPUS)**
- [S7] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, D. Koos, *Experimental and numerical analysis of solar cell temperature transients*, Pollack Periodica. An International Journal for Engineering and Information Sciences, vol. 16. no. 2. pp. 104–109, 2021, **(SCOPUS, Q3)**
- [S8] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, *Operation Problems of Solar Panel Caused by the Surface Contamination*, Energies, vol. 14, no. 17, 5461, 2021, **(SCOPUS, Q1, IF: 3.004)**

*A disszertációhoz köthető egyéb publikációk:*

- [S9] D. Matusz-Kalász, *Hűtött napelemek laboratóriumi és szabadtéri vizsgálata*, Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022, 2. December, 2022, Miskolc-Egyetemváros, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, pp. 98-103.
- [S10] D. Matusz-Kalász, *A napenergia szerepe a magyarországi villamosenergiatermelésben*, Acta Academiae Nyiregyhaziensis 7 pp. 99-104, 2022
- [S11] D. Matusz-Kalász, P. Balázs, *Napelemek hibáinak feltárása hőkamerás vizsgálattal*, Multidiszciplináris tudományok, vol. 11, no. 3, pp. 112-122, 2021
- [S12] D. Matusz-Kalász, R. Lipták, P. Tóth: *Napelemek tönkremenetele*, Multidiszciplináris Tudományok, évf. 11 sz. 3. pp. 94-101, 2021

- [S13] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, R.R. Boros, *Range-Reducing Effect of Contaminants in Case of Solar Vehicles*, Lecture Notes in Mechanical Engineering 22 pp. 38-48, 2021 (SCOPUS)
- [S14] I. Bodnár, R.R. Boros, D. Matusz-Kalász, *Solar powered electric car with VVVF drive control*, GÉP évf. 71, sz. 3-4, pp. 55-60, 2020
- [S15] D. Matusz-Kalász, *Napelemről táplált vízszivattyú mezőgazdasági felhasználásának lehetősége*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 2019. november 21. Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa, Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Rektorhelyettesi Titkárság, 188 p. pp. 122-126.
- [S16] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, *Napelemek laboratóriumi és szimulációs vizsgálata*, Multidiszciplináris Tudományok, vol. 9 no. 4. pp. 261-268, 2019
- [S17] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász, M. Bíró, *Napelemes erőmű feszültségviszonyai*, ENELKO 2019 SzámOkt 2019, XX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, XXIX. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2019) pp. 8-13.

ÁBRÁK JEGYZÉKE

<b>1. ábra.</b> A különböző energiaforrások százalékos részesedése a világ villamosenergia-termeléséből.....	8
<b>2. ábra.</b> A legnagyobb villamosenergia-termelést biztosító energiaforrások Magyarországon 2014-2021 között [9]. .....	9
<b>3. ábra.</b> A megtermelt bruttó villamos energia százalékos megoszlása energiaforrások szerint 2021-ben [11]. .....	10
<b>4. ábra.</b> A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia százalékos megoszlása 2021-ben [11]..	12
<b>5. ábra.</b> A naperőművekből származó villamos energia és a fogyasztási igények kapcsolata. ....	12
<b>6. ábra.</b> A szilícium alapú (a) mono- és (b) polikristályos napelemmodul; (c) a szilícium monokristály növesztésének folyamata és (d) eredménye, a szilíciumtömb. ....	15
<b>7. ábra.</b> (a) A szerves napelem ablakként történő felhasználása és (b) üvegház borításaként történő felhasználása.....	16
<b>8. ábra.</b> A telepített napelemes HMKE teljesítmények összeg (oszlopdiaagram) és a rendszerek darabszámának összege (vonaldiagram) Magyarországon áramszolgáltatók szerint 2021-ben [23]......	18
<b>9. ábra.</b> A hálózatra tápláló napelemes rendszer elvi felépítése. ....	19
<b>10. ábra.</b> A hálózatfüggetlen szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése. ....	19
<b>11. ábra.</b> A csak vételezi tudó szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése. ....	20
<b>12. ábra.</b> A hibrid napelemes rendszer elvi felépítése. ....	20
<b>13. ábra.</b> Az elektromágneses spektrum felosztása a jellemző hullámhossztartományok szerint. ....	21
<b>14. ábra.</b> A Napból érkező sugárzás spektrális eloszlása. ....	22
<b>15. ábra.</b> (a) A napelem ideális és (b) valóságos elektronikai helyettesítő képe R terhelő ellenállással. ..	24
<b>16. ábra.</b> A napelem áramerősség-feszültség karakterisztikája. ....	25
<b>17. ábra.</b> Cellahőmérséklet megváltoztatja az I-U karakterisztikát [30]. ....	27
<b>18. ábra.</b> A napsugárzás intenzitása megváltoztatja az I-U karakterisztikát [30]......	28
<b>19. ábra.</b> A ventilátoros hűtés szabadtéri tesztelésének hőkamerás felvétele (bal alsó ventilátor nem lett bekapcsolva).....	30
<b>20. ábra.</b> A különböző fényintenzitás-értékek esetében mért üresjárásifeszültség-értékek. ....	31
<b>21. ábra.</b> A különböző fényintenzitás értékek esetében mért hőmérséklet értékek. ....	32
<b>22. ábra.</b> a) A S1; b) A S2 mérési összeállítás során mért villamos értékek. ....	33
<b>23. ábra.</b> a) A S3; b) A S4 mérési összeállítás során mér villamos értékek. ....	34
<b>24. ábra.</b> A maximális munkaponti feszültség mérési sorozatainak összehasonlítása. ....	34
<b>25. ábra.</b> A napszimulátor által megvilágított napelempanel. ....	38
<b>26. ábra.</b> A felületi szennyeződés üresjárás feszültség csökkentő hatása. ....	40
<b>27. ábra.</b> A felületi szennyeződés rövidzárási áramerősség csökkentő hatása. ....	41
<b>28. ábra.</b> A felületi szennyeződés munkaponti áramerősség csökkentő hatása. ....	43
<b>29. ábra.</b> Erőművi napelemmodulok (a) fényérzéken oldali és (b) hátlapi mérése. ....	47
<b>30. ábra.</b> Erőművi modulok hőkamerás állapotfelmérése repülő drónnal. ....	47
<b>31. ábra.</b> Az előírt mérésnek megfelelő (a) távolság és kameraállás beállítása, (a) valamint a fényerősség mérő alkalmazása. ....	48
<b>32. ábra.</b> Hot-spot jelenség hőkamerával készített felvételen. ....	49
<b>33. ábra.</b> A nagy felületen árnyékolt panelek hőmérséklet eloszlása. ....	49



<b>34. ábra.</b> Két sarokponton szennyezett panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel. ....	50
<b>35. ábra.</b> Egy sarokponton szennyezett panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel. ....	51
<b>36. ábra.</b> Egy működésképtelen modul hőkamerás képe. ....	51
<b>37. ábra.</b> Jégkár okozta sérülés a modul üvegborításán. ....	52
<b>38. ábra.</b> Elszíneződött napelemmodul. ....	52
<b>39. ábra.</b> A delamináció jelenségének különböző esetei: (a) gázbuborék; (b) panel széleit érintő rétegelválás. ....	53
<b>40. ábra.</b> Mismatch hiba megjelenése (a) a hőkamerás felvétlen, (b) szemmel is látható kristályszerkezeti hibák és eltérő szilícium színárnyalatok. ....	54
<b>41. ábra.</b> A napelemmodulok kapcsolódobozainak melegedése. ....	55
<b>42. ábra.</b> A talajhoz közeli napelemmodul (a) egy celláját növényzet árnyékolja, (b) több celláját növényzet árnyékolja. ....	55
<b>43. ábra.</b> A növényzet árnyékhata vizsgálata (a) kezdőállapota, (b) hot-spot jelensége. ....	56
<b>44. ábra.</b> A növényzet árnyékhata (a) növelése, (b) az árnyékhata megszűnése utáni állapot. ....	56
<b>45. ábra.</b> (a) Az erőművi modul árnyékolása faággal, (b) az erőművi modul árnyékolásának megszüntetése utáni állapot. ....	57
<b>46. ábra.</b> a) Hőkamerás felvétel, b) a napelempanel szabad szemmel látható képe. ....	58
<b>47. ábra.</b> Felmelegedett, felület szennyezett és egyéb sugárzás forrástól elzárt napelempanel hőkamerás felvétele. ....	58
<b>48. ábra.</b> Sarokcellák felületi szennyeződés okozta melegedés hátoldali, laboratóriumi körülmények között végzett mérésének eredménye. ....	58
<b>49. ábra.</b> A flash tesztberendezés elvi felépítése. ....	60
<b>50. ábra.</b> (a) A PV23160 modul és (b) a PV73760 modul I-U karakterisztikája. ....	64
<b>51. ábra.</b> (a) A PV02310 modul és (b) a PV41140 modul I-U karakterisztikája. ....	64
<b>52. ábra.</b> (a) A PV64260 modul és (b) a PV50239 modul I-U karakterisztikája. ....	65
<b>53. ábra.</b> A mért tényleges és MPP teljesítményértékek eloszlása. ....	66
<b>54. ábra.</b> A mért üresjárás és MPP feszültségértékek eloszlása. ....	67
<b>55. ábra.</b> A mért rövidzárs és MPP áramerősségértékek eloszlása. ....	67
<b>56. ábra.</b> A elektrolumineszcencia tesztberendezés elvi felépítése. ....	69
<b>57. ábra.</b> (a) A hibamentes napelemcella EL képe; (b) teljesen kiégett cella képe. ....	69
<b>58. ábra.</b> (a) Hosszú, keskeny repedések; (b) Számos repedés által eredményezett, különböző mértékben elszigetelődött szilícium cella töredékek. ....	70
<b>59. ábra.</b> (a) Széles törés által okozott, teljesen levált cellatöredék; (b) példák elektróda hibákra. ....	71
<b>60. ábra.</b> (a) A hot-spot jelenség eredménye; (b) tojás formájú anyaghiba. ....	71
<b>61. ábra.</b> A PV23160 modul EL képe, mely leggyengébben teljesített a flash teszten. ....	73
<b>62. ábra.</b> A PV73760 EL képe, mely számos cellájában hordoz károsodásokat. ....	74
<b>63. ábra.</b> A PV02310 modul EL képe egy teljesen inaktív cellafüzérrel. ....	74
<b>64. ábra.</b> A PV41140 modul EL képe, mely átlagos mértékben károsodott. ....	75
<b>65. ábra.</b> A PV64260 napelemmodul EL képe, mely számos helyen anyaghibát mutat. ....	75
<b>66. ábra.</b> A PV50239 modul közel hibátlan EL képe. ....	76
<b>67. ábra.</b> 10 Wp teljesítményű napelempanelek hőkamerás felvételei. ....	77
<b>68. ábra.</b> 20Wp teljesítményű napelempanelek hőkamerás felvételei. ....	78

**TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE**

<b>1. táblázat.</b> Hőmérsékleti együtthatók különböző típusú napelemeknél. ....	29
<b>2. táblázat.</b> A vizsgált napelempanel gyártói paraméterei. ....	30
<b>3. táblázat.</b> A vizsgálatok során mért kiinduló és záró értékek. ....	31
<b>4. táblázat.</b> A vizsgálatok során felhasznált szóróeszközök és szennyezőanyagok kapcsolata. ....	38
<b>5. táblázat.</b> A különböző felhasznált anyagok fizikai jellemzői. ....	39
<b>6. táblázat.</b> A vizsgált paraméterek és az erőművi modulok paraméterei. ....	61
<b>7. táblázat.</b> A 10 kiválasztott modul teljesítmény és flash teszt értékei. ....	61
<b>8. táblázat.</b> A 10 kiválasztott modul teljesítményértékeinek összehasonlítása. ....	62
<b>9. táblázat.</b> A kiválasztott erőművi modulok flash teszt során mért paraméterei. ....	63
<b>10. táblázat.</b> A megengedett hibamennyiség határértékek erőművi napelemmodulok esetében. ....	72

## IRODALOM

- [1] J. Alonso-Montesinos, F.R. Martínez, J. Polo, N. Martín-Chivelet, F.J. Batlles, *Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production*, *Energies*, vol. 13, no. 23, 6376, 2020, doi: 10.3390/en13236376
- [2] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Wael, K. Sopian, *A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems*, *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, 123187, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123187
- [3] I. Bodnár, P. Iski, D. Koós, Á. Skribanek, *Examination of electricity production loss of a solar panel in case of different types and concentration of dust*, in M. Al Ali, M. Platko (Eds.): *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III*, Taylor & Francis Group: London, UK, pp. 313-318, 2019, doi: 10.1201/9780429021596
- [4] Z. Kherici, N. Kahoul, H. Cheghib, M. Younes, B.C. Affari, *Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates*, *Solar Energy*, vol. 224, pp. 279-284, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.033
- [5] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M.A. Radiz, M.I. Rezaadad, S. Hajighorbani, *Power loss due to soiling on solar panel: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307-1316, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.044.
- [6] M. Abderrezek, M. Fathi, *Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield*, *Solar Energy*, vol. 142, pp. 308-320, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2016.12.040
- [7] M. Gürtürk, H. Benli, N.K. Ertürk, *Effects of different parameters on energy—Exergy and power conversion efficiency of PV modules*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 426-439, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.117
- [8] S.A.M. Said, G. Hassan, H.M. Walwil, N. Al-Aqeeli, *The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 743-760, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.042
- [9] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal,* 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/eves-adatok>
- [10] I. Bodnár, *Villamosenergetika és biztonságtechnika*, Miskolc: Miskolci Egyetem, 2019.
- [11] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal,* 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/energiastatisztika-riport>
- [12] H. Zsiborács, *Hűtött napelemek alkalmazásának műszaki-ökonómiai vizsgálata*, Ph.D. értekezés, Pannon Egyetem, 2018, doi: 10.18136/PE.2017.659
- [13] T. Fábrián, *Napelemek*, *A Rádiótechnika Évkönyve 2015*, pp. 101-107, 2015.
- [14] I. Bodnár, *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*, Miskolci Egyetem, 2019, ISBN 978-615-00-456-65.

- [15] A. Agresti, S. Pescetelli, E. Magliano, G. Bengasi, C. Conelli, C. Gerardi, H. Pazniak, F. Bonaccorso, M. Foti, A. Di Carlo, *Highly Efficient 2D Materials Engineered Perovskite/Si Tandem Bifacial Cells Beyond 29%*, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 12, no. 6, pp. 1273-1281, 2022, doi: 10.1109/jphotov.2022.3214345
- [16] D. Pourjafari, S.M.P. Meroni, D. Peralta Domínguez, R. Escalante, J. Baker, A. Saadi Monroy, A. Walters, T. Watson, G. Oskam, *Strategies towards Cost Reduction in the Manufacture of Printable Perovskite Solar Modules*, Energies, vol. 15, no. 2, 641, 2022, doi: 10.3390/en15020641
- [17] H. Yao, J. Hou, *Recent Advances in Single-Junction Organic Solar Cells*, Angewandte Chemie, vol. 134, no. 37, 2022, doi: 10.1002/ange.202209021
- [18] A. Mahmood, J-L. Wang, *Machine learning for high performance organic solar cells: current scenario and future prospects*, Energy & Environmental Science, vol. 14, iss. 1, pp. 90-105, 2021, doi: 10.1039/d0ee02838J
- [19] L. Meng, Y. Zhang, X. Wan, C. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Ke, Z. Xiao, L. Ding, R. Xia, H-L. Yip, Y. Cao, Y. Chen, *Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency*, Science, vol. 361, iss. 6407, pp. 1094-1098, 2018, doi: 10.1126/science.aat2612
- [20] Z. Zheng, J. Wang, P. Bi, J. Ren, Y. Wang, Y. Yang, X. Liu, S. Zhang, J. Hou, *Tandem organic solar cell with 20.2% efficiency*, Joule, vol. 6, no. 1, pp. 171-184, 2022, doi: 10.1016/j.joule.2021.12.017
- [21] <https://www.muszaki-magazin.hu/2021/06/02/napelempark-kaposvar-hataraban/>
- [22] [https://audi.hu/hu/hirek/hirek/reszletek/646\\_van\\_uj\\_a\\_nap\\_alatt\\_gyorben\\_adtak\\_at\\_europa\\_legnagyobb\\_teton\\_kial/](https://audi.hu/hu/hirek/hirek/reszletek/646_van_uj_a_nap_alatt_gyorben_adtak_at_europa_legnagyobb_teton_kial/)
- [23] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/nem-engedelykoteles-kiseromuvek-es-haztartasi-meretu-kiseromuvek-adatai>
- [24] P. Würfel, U. Würfel, *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*, 3rd Edition, 2016 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany, 2016, Online ISBN: 9783527618545, doi: 10.1002/9783527618545
- [25] I. Réti, *Nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek*. Ph.D. értekezés, Szent István Egyetem, 2015, doi: 10.14751/SZIE.2015.025
- [26] E. Földvály-Bándy, *Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata*, Ph.D. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2015, <http://hdl.handle.net/10890/1441>
- [27] A. Laudani, F. R. Fulginei, A. Salvini, *High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms*, Solar Energy, vol. 103, no. 3, pp. 316–326, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.014
- [28] I. Bodnár, *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 15, no. 4, pp. 59-82, 2018.
- [29] Y.R. Golive, A. Kottantharayil, N. Shiradkar, *Improving the accuracy of temperature coefficient measurement of a PV module by accounting for the transient temperature difference between cell and backsheet*, Solar Energy, vol. 237, pp. 203-212, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.03.049

- [30] V. Varjú, *Napelemes energia és környezet*, MTA Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont Regionális Kutatások Intézete, 2014. ISBN 978 963 9899 76 6
- [31] J. Siecker, K. Kusakana, B.P. Numbi, *A review of solar photovoltaic systems cooling technologies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 192-203, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.053
- [32] A. Sahay, V.K. Sethi, A.C. Tiwari, M. Pandey, *A review of solar photovoltaic panel cooling systems with special reference to Ground coupled central panel cooling system (GC-CPCS)*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 306-312, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.009
- [33] F. Grubišić-Čabo, S. Nižetić, T.G. Marco, *Photovoltaic panels: A review of the cooling techniques*, *Transactions of FAMENA*, vol. 40, pp. 63-74, 2016, ISSN: 1333-1124
- [34] N. Gökmen, W. Hu, P. Hou, Z. Chen, D. Sera, S. Spataru, *Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations*, *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 283-290, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.017
- [35] S.H. Hanzaei, S.A. Gorji, M. Ektesabi, *A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature*, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182229-182239, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3028580
- [36] J. Ramos-Hernanz, I. Uriarte, J.M. Lopez-Guede, U. Fernandez-Gamiz, A. Mesanza, E. Zulueta, *Temperature based maximum power point tracking for photovoltaic modules*, *Scientific Reports*, vol. 10, 12476, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-69365-5
- [37] W. Widjanarko, N. Alia, A. Dani, F.A. Perdana, *Experimental analysis of temperature, light intensity, and humidity on rooftop standalone solar power plant*, *The 2nd Annual Technology Applied Science and Engineering Conference (ATASEC 2020) 5 August, 2020, Malang, Indonesia*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1073, 012047, doi: 10.1088/1757-899X/1073/1/012047
- [38] R.B. Roy, Md. Rokonzaman, N. Amin, M.K. Mishu, S. Alahakoon, S. Rahman, N. Mithulanathan, K.S. Rahman, M. Shakeri, J. Pasupuleti, *A Comparative Performance Analysis of ANN Algorithms for MPPT Energy Harvesting in Solar PV System*, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102137-102152, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3096864
- [39] A. Ndiaye, C.M.F. Kébe, B.O. Bilal, A. Charki, V. Sambou, P.A. Ndiaye, *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*, vol. 204, pp. 31-42, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-72965-7\_3
- [40] H. Jiang, L. Lu, K. Sun, *Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules*, *Atmospheric Environment*, vol. 45, iss. 25, 4299-4304, 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.084
- [41] E. Klugmann-Radziemska, *Shading, dusting and incorrect positioning of photovoltaic modules as important factors in performance reduction*, *Energies*, vol. 13, no. 8, 1992, 2020, doi: 10.3390/en13081992
- [42] X. Liu, S. Yue, L. Lu, J. Li, *Study on dust deposition mechanics on solar mirrors in a solar power plant*, *Energies*, vol. 12, no. 23, 4550, 2019, doi: 10.3390/en12234550

- [43] A. Rao, R. Pillai, R. Mani, M. Ramamurthy, *Influence of Dust Deposition on Photovoltaic Panel Performance*, Energy Procedia, vol. 54, pp. 690-700, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.310
- [44] M.J. Adinoyi, S.A.M. Said, *Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules*, Renewable Energy, vol. 60, pp. 633-636, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.06.014
- [45] C. Zhang, C. Shen, Q. Yang, S. Wei, G. Lv, C. Sun, *An investigation on the attenuation effect of air pollution on regional solar radiation*, Renewable Energy, vol. 161, pp. 570-578, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.07.146
- [46] K.I. Abass, D.S.M. Al-Zubaidi, A.A.K. Al-Waeli, *Effect of pollution and dust on PV performance*, International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science, vol. 3, pp. 181-185, 2017, doi: 10.24001/ijcmes.3.4.1
- [47] H.H. Saber, A.E. Hajiah, S.A. Alshehri, H.J. Hussain, *Investigating the effect of dust accumulation on the solar reflectivity of coating materials for cool roof applications*, Energies, vol. 14, no. 2, 445, 2021, doi: 10.3390/en14020445
- [48] I. Al Siyabi, A. Al Mayasi, A. Al Shukaili, S. Khanna, *Effect of soiling on solar photovoltaic performance under desert climatic conditions*, Energies, vol. 14, no. 2, 659, 2021, doi:10.3390/en14030659.
- [49] T. Bhattacharya, A.K. Chakraborty, K. Pal, *Influence of environmental dust on the operating characteristics of the solar PV module in Tripura, India*, International Journal of Engineering Research, vol. 4, pp. 141-144, 2015, doi: 10.17950/ijer/v4s3/313
- [50] A.S. Alghamdi, A.S. Bahaj, L.S. Blunden, Y. Wu, *Dust removal from solar PV modules by automated cleaning systems*, Energies, vol. 12, no. 15, 2923, 2019, doi: 10.3390/en12152923
- [51] R. Siddiqui, R. Kumar, K.G. Jha, M. Morampudi, P. Rajput, S. Lata, S. Agariya, G. Nanda, S.S. Raghava, *Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability*, Energy, vol. 107, pp. 550-561, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.04.054
- [52] F. Hussain, M.Y.H. Othman, B. Yatim, H. Ruslan, K. Sopian, Z. Anaur, S. Khairuddin, *Fabrication and irradiance mapping of a low cost solar simulator for indoor testing of solar collector*, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, no. 4, 044502, 2011, doi: 10.1115/1.4004548
- [53] P. Singh, N.M. Ravindra, *Temperature dependence of solar cell performance—An analysis*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 101, pp. 36-45, 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2012.02.019
- [54] Bodnár, I.; Koós, D. Determination of temperature coefficient and transient electrical characteristics of a cooled and non-cooled solar module. In Proceedings of the 2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC), Szilvasvarad, Hungary, 28-31 May 2018; pp. 570-573, doi:10.1109/CarpathianCC.2018.8399695.
- [55] Kádár, P.; Varga, A. Measurement of spectral sensitivity of PV cells. In 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia, 20-22 September 2012; pp. 549-552.
- [56] S.A. Sadat, J. Faraji, M. Nazififard, A. Ketabi, *The experimental analysis of dust deposition effect on solar photovoltaic panels in Iran's desert environment*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 47, 101542, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101542

- [57] S. Oh, B.W. Figgis, S. Rashkeev, *Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels*, Solar Energy, vol. 211, pp. 412-417, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.053
- [58] X. Li, F. Wagner, W. Peng, J. Yang, D.L. Mauzerall, *Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 114, no. 45, pp. 11867-11872, 2017, doi: 10.1073/pnas.1711462114
- [59] Bodnár I, Csehi B, Sukály B, Ács G (2019) 'Examination of power loss and voltage drop of a solar panel as a function of environmental factors', 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), p. 5. Doc Nr. 107. (IEEE) ISBN 978-1-7281-0702-8.
- [60] Á.H. Herraiz , A.P. Marugán , F.P.G. Márquez, *Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images analysis by convolutional neural network-based structure*, Renewable Energy, vol. 153, pp. 334-348, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.148
- [61] I. Szabó, *Napelemes tápellátó rendszerekben alkalmazott növelt hatásfokú, analóg maximális teljesítménykövető áramkör analízise*. Ph.D. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1997, <http://hdl.handle.net/10890/92>
- [62] K.A.K. Niazi, W. Akhtar, H.A. Khan, Y. Yang, S. Athar, *Hotspot diagnosis for solar photovoltaic modules using a Naive Bayes classifier*, Solar Energy, vol. 190, pp. 34-43, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.07.063
- [63] M. Cubukcu, A. Akanalci, *Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey*, Renewable Energy, vol. 147, pp. 1231-1238, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.075
- [64] F.P.G. Márquez, I.S. Ramírez, *Condition monitoring system for solar power plants with radiometric and thermographic sensors embedded in unmanned aerial vehicles*, Measurement, vol. 139, pp. 152-162, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.02.045
- [65] K. Kun, D. Léder, *Napelemek vizsgálata pilóta nélküli légi járműre integrált kompakt hőkamera segítségével*, Gradus, vol. 8, no. 1, . pp. 278-285, 2021, doi: 10.47833/2021.1.ENG.009
- [66] F. Haraszti, *Hőkamera alkalmazása kontaktkorrózió vizsgálatára pilóta nélküli repülőgéppel*. Bánki Közlemények, vol. 2, no. 1, pp. 11-15, 2019
- [67] A. Dhoke, R. Sharma, T.K. Saha, *An approach for fault detection and location in solar PV systems*, Solar Energy, vol. 194, pp. 197-208, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.10.052
- [68] V.S.B. Kurukuru, A. Haque and M.A. Khan, A.K. Tripathy, *Fault Classification for Photovoltaic modules using Thermography and Image Processing*, in 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), 03-04 April, 2019, Sakaka, Saudi Arabia, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCISci.2019.8716442
- [69] C. Henry, S. Poudel, S.-W. Lee, H. Jeong, *Automatic Detection System of Deteriorated PV Modules Using Drone with Thermal Camera*, Applied Sciences, vol. 10, no. 11, 3802, 2020, doi: 10.3390/app10113802
- [70] M. Jemmali, A. K. Bashir, W. Boulila, L. K. B. Melhim, R. H. Jhaveri, J. Ahmad, *An Efficient Optimization of Battery-Drone-Based Transportation Systems for Monitoring Solar Power Plant*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-9, 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3219568
- [71] M.U. Ali, S. Saleem, H. Masood, K.D. Kallu, M. Masud, M.J. Alvi, A. Zafar, *Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared*

- thermography study*, International Journal of Energy Research, vol. 45, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1002/er.7201
- [72] O.E. Ikejiofor, Y.E. Asuamah, H.O. Njoku, S.O. Enibe, *Detection of hotspots and performance deteriorations in pv modules under partial shading conditions using infrared thermography*, Engineering Proceedings, vol. 2, no. 1, 71, 2020, doi: 10.3390/ecsa-7-08201
- [73] A.M. Salazar, E.Q.B. Macabebe, *Hotspots detection in photovoltaic modules using infrared thermography*, MATEC Web of Conferences, vol. 70, 10015, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20167010015
- [74] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, M.C. Alonso-García, J.D. Santos, J.I. Morales-Aragónés, V. Alonso-Gómez, Á. Moretón-Fernández, M.Á. González-Rebollo, O. Martínez-Sacristán, *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, 117930, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117930
- [75] J. Ballestín-Fuertes, J. Muñoz-Cruzado-Alba, J.F. Sanz-Osorio, L. Hernández-Callejo, V. Alonso-Gómez, J.I. Morales-Aragones, S. Gallardo-Saavedra, O. Martínez-Sacristan, Á. Moretón-Fernández, *Novel utility-scale photovoltaic plant electroluminescence maintenance technique by means of bidirectional power inverter controller*, Applied Sciences, vol. 10, no. 9, 3084, 2020, doi: 10.3390/app10093084
- [76] A.S. Rajput, J.W. Ho, Y. Zhang, S. Nalluri, A.G. Aberle, *Quantitative estimation of electrical performance parameters of individual solar cells in silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging*, Solar Energy, vol. 173, pp. 201-208, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.046
- [77] F. Khan, J.H. Kim, *Performance degradation analysis of c-Si PV modules mounted on a concrete slab under hot-humid conditions using electroluminescence scanning technique for potential utilization in future solar roadways*, Materials, vol. 12, no. 24, 4047, 2019, doi: 10.3390/ma12244047
- [78] H.-H. Lin, H.K. Dandage, K.-M. Lin, Y.-T. Lin, Y.-J. Chen, *Efficient cell segmentation from electroluminescent images of single-crystalline silicon photovoltaic modules and cell-based defect identification using deep learning with pseudo-colorization*, Sensors, vol. 21, no. 13, 4292, 2021, doi: 10.3390/s21134292
- [79] H. Chen, H. Zhao, D. Han, K. Liu, *Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells*, Optics and Lasers in Engineering, vol. 118, pp. 22-33, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.01.016
- [80] H.R. Parikh, Y. Buratti, S. Spataru, F. Villebro, G.A.D. Reis Benatto, P.B. Poulsen, S. Wendlandt, T. Kerekes, D. Sera, Z. Hameiri, *Solar cell cracks and finger failure detection using statistical parameters of electroluminescence images and machine learning*, Applied Sciences, vol. 10, no. 24, 8834, 2020, doi: 10.3390/app10248834
- [81] A.S. Rajput, C.D. Rodríguez-Gallegos, J.W. Ho, S. Nalluri, S. Raj, A.G. Aberle, J.P. Singh, *Fast extraction of front ribbon resistance of silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging*, Solar Energy, vol. 194, pp. 688-695, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.013
- [82] K. Drabczyk, G. Kulesza-Matlak, A. Drygała, M. Szindler M., Lipiński, *Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts*, Solar Energy, vol. 126, pp. 14-21, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.029



- [83] H. Wang, N. Zhao, Z. Bi, S. Gao, Q. Dai, T. Yang, J. Wang, Z. Jia, Z. Peng, J. Huang, Y. Wan, X. Guo, *Clear representation of surface pathway reactions at ag nanowire cathodes in all-solid Li-O<sub>2</sub> batteries*, ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 13, no.33, pp. 39157-39164, 2021, doi: 10.1021/acsami.1c02923
- [84] D. Fontani, P. Sansoni, F. Francini, M. Messeri, G. Pierucci, M. DeLucia, D. Jafrancesco, *Electroluminescence test to investigate the humidity effect on solar cells operation*, Energies, vol. 11, no. 10, 2659, 2018, doi: 10.3390/en11102659
- [85] F. Khan, B.D. Rezgui, J.H. Kim, *Reliability study of c-Si PV module mounted on a concrete slab by thermal cycling using electroluminescence scanning: application in future solar roadways*, Materials, vol. 13, no. 2, 470, 2020, doi: 10.3390/ma13020470
- [86] S. Alagoz, Y. Apak, *Removal of spoiling materials from solar panel surfaces by applying surface acoustic waves*, J. Clean. Prod., vol. 253, 119992, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.119992
- [87] B. Parrott, P.C. Zanini, A. Shehri, K. Kotsovos, I. Gereige, *Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush*, Solar Energy, vol. 171, pp. 526-533, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.06.104
- [88] A. Ürmös, Z. Farkas, L. Dobos, S. Nagy, Á. Nemeccsics, *Contact problems in GaAs-based solar cells*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 15, pp. 99-124, 2018.
- [89] S. Tang, Y. Xing, L. Chen, X. Song, F. Yao, *Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels*, Solar Energy, vol. 214, pp. 51-61, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.11.047
- [90] M. Frazão, J.A. Silva, K. Lobato, J.M. Serra, *Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera*, Measurement, vol. 99, pp. 7-12, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2016.12.017
- [91] S. Deitsch, V. Christlein, S. Berger, C. Buerhop-Lutz, A. Maier, F. Gallwitz, C. Riess, *Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images*, Solar Energy, vol. 185, pp. 455-468, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.067
- [92] W. Tang, Q. Yang, K. Xiong, W. Yan, *Deep learning based automatic defect identification of photovoltaic module using electroluminescence images*, Solar Energy, vol. 201, pp. 453-460, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.03.04
- [93] D. Olivares, P. Ferrada, J. Bijman, S. Rodríguez, M. Trigo-González, A. Marzo, J. Rabanal-Arabach, J. Alonso-Montesinos, F.J. Batlles, E. Fuentealba, *Determination of the soiling impact on photovoltaic modules at the coastal area of the Atacama desert*, Energies, vol. 13, no. 15, 3819, 2020, doi: 10.3390/en13153819
- [94] M.W. Akram, G. Li, Y. Jin, X. Chen, C. Zhu, X. Zhao, A. Khaliq, M. Faheem, A. Ahmad, *CNN based automatic detection of photovoltaic cell defects in electroluminescence images*, Energy, vol. 189, 116319, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116319
- [95] I. Berardone, J. Lopez Garcia, M. Paggi, *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, pp. 478-486, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.055
- [96] H. Chen, H. Zhao, D. Han, K. Liu, *Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells*, Optics and Lasers in Engineering, vol. 118, pp. 22-33, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.01.016

- 
- [97] C. Duan, J. Li, Z. Liu, Q. Wen, H. Tang, K. Yan, *Highly electroluminescent and stable inorganic CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cell enabled by balanced charge transfer*, Chemical Engineering Journal, vol. 417, 128053, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.128053
- [98] M.R.U. Rahman, H. Chen, *Defects Inspection in Polycrystalline Solar Cells Electroluminescence Images Using Deep Learning*, IEEE Access, vol. 8, pp. 40547-40558, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2976843
- [99] J. Xu, Y. Liu, Y. Wu, *Automatic Defect Inspection for Monocrystalline Solar Cell Interior by Electroluminescence Image Self-Comparison Method*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70. pp. 1-11, 2021, doi: 10.1109/tim.2021.3096602
- [100] M. Dhimish, V. Holmes, P. Mather, M. Sibley, *Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 179, pp. 72-79, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.02.019
- [101] S. Deng, Z. Zhang, C. Ju, J. Dong, Z. Xia, X. Yan, T. Xu, G. Xing, *Research on hot spot risk for high-efficiency solar module*, Energy Procedia, vol. 130, pp. 77-86, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.399
- [102] I. Bodnár, D. Koós, P. Iski, Á. Skribanek, *Design and Construction of a Sun Simulator for Laboratory Testing of Solar Cells*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 17, no. 3, pp. 165-184, 2020
- [103] A. Gerber, V. Huhn, T.M.H. Tran, M. Siegloch, Y. Augarten, B.E. Pieters, U. Rau, *Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 135, pp. 35-42, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2014.09.020S.
- [104] Luciani, G. Coccia, S. Tomassetti, M. Pierantozzi, G. Di Nicola, *Use of an Indoor Solar Flash Test Device to Evaluate Production Loss Associated to Specific Defects on Photovoltaic Modules*, International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, vol. 15, no. 5, pp. 639-646, 2020, doi:10.18280/ijdne.150504