

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK 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

Prof. Dr. Bognár Gabriella
DSc, egyetemi tanár

Tématerület vezető

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi tanár

Témavezető

Dr. habil. Bodnár István
egyetemi docens

Miskolc
2023

TARTALOM

TARTALOM	I
TERVEZÉSVEZETŐ AJÁNLÁSA	III
JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK LISTÁJA	V
1. BEVEZETÉS	7
2. A NAPELEMEK ÉS NAPELEMES RENDSZEREK BEMUTATÁSA	9
2.1. <i>A napelemek fejlődéstörténete</i>	9
2.2. <i>A napjainkban széleskörben alkalmazott és kutatott napelem típusok</i>	10
2.2.1. <i>Szilícium napelemek</i>	10
2.2.2. <i>Perovszkit napelemek</i>	12
2.2.3. <i>Organikus napelemek</i>	12
2.3. <i>A napelemes rendszerek típusai</i>	14
2.3.1. <i>Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény feletti napelemes erőművek</i>	14
2.3.2. <i>Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény alatti napelemes erőművek</i>	14
3. A NAPELEMES ENERGIATERMELÉS HELYZETE MAGYARORSZÁGON	18
3.1. <i>A villamos erőművi rendszer felépítése</i>	18
3.2. <i>A villamosenergetikai elosztórendszer működése</i>	20
3.3. <i>A villamosenergia termelés és felhasználás egymáshoz igazítása</i>	21
4. A NAPELEMEK MŰKÖDÉSE ÉS ELEKTRONIKAI MODELLJE	23
4.1. <i>Félvezetők hőmérsékletfüggése</i>	25
4.2. <i>Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terheletlen napelem panelen</i>	27
4.3. <i>Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terhelt napelem panelen</i>	30
4.3.1. <i>Terhelt napelem panel hőtranzien্স jelensége 700 W/m² fényintenzitás mellett</i>	31
4.3.2. <i>Terhelt napelem panel hőtranzien্স jelensége 900 W/m² fényintenzitás mellett</i>	31
5. A FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA	33
5.1. <i>Szennyeződések és forrásaik</i>	33
5.2. <i>A lerakódások formái a napelem felületén</i>	33
5.3. <i>Szennyezők hatása</i>	35
5.4. <i>A mérések menete</i>	35
5.5. <i>Terheletlen napelem panel szennyeződésvizsgálata</i>	37
5.5.1. <i>Feszültségesés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén</i>	37
5.5.2. <i>Aramerősség csökkenés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén</i>	39
5.6. <i>A szennyeződésvizsgálat értékelése felületre való kijuttatási mód szerint</i>	40
5.6.1. <i>Szennyeződésvizsgálat földdel</i>	40
5.6.2. <i>Szennyeződésvizsgálat homokkal</i>	40
5.6.3. <i>Szennyeződésvizsgálat hamuval</i>	40
5.6.4. <i>Szennyeződésvizsgálat városi porral</i>	41
5.7. <i>Terhelt napelem panel szennyeződésvizsgálata organikus anyagokkal</i>	41
6. ÁLLAPOTFELMÉRÉS ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLAT	42
6.1. <i>Termográfias hibakeresés</i>	43
6.1.1. <i>A napelemek üzemi hőmérséklete és a hő keletkezésének okai</i>	44
6.1.2. <i>Az optimális mérési körülmények</i>	44
6.1.3. <i>Hőkamerás állapotfelméréssel azonosítható hibák (kültéri mérések)</i>	47
6.1.4. <i>Laboratóriumi mérések hőkamerával</i>	55
6.2. <i>Flash teszt</i>	57
6.2.1. <i>A flash teszt mérőberendezése</i>	57

6.2.2. <i>A flash teszt eredménye</i>	58
6.2.3. <i>A flash teszt során kapott eredmények kiértékelése</i>	61
6.2.4. <i>A flash teszt eredmények statisztikai alapú bemutatása</i>	63
6.3. <i>Elektrolumineszcens vizsgálatok</i>	66
6.3.1. <i>A EL teszt mérőberendezése</i>	66
6.3.2. <i>Leggyakoribb EL teszttel azonosítható szilícium cella hibák</i>	67
6.3.3. <i>Megengedett hibahatárok</i>	71
6.3.4. <i>Erőművi modulok elektrolumineszcencia alapú teljes kiértékelése</i>	71
6.4. <i>EL kamera kiváltása hőkamerával</i>	76
7. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	78
8. ÖSSZEFOGLALÁS	81
9. SUMMARY	82
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	83
PUBLIKÁCIÓS LISTA	84
ÁBRÁK JEGYZÉKE	86
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	88
IRODALOM	89

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

E_g	félvezető anyag tiltott sávjának energiája
E_{foton}	foton energiája
$U_{ü}$	üresjárási feszültség
I_{rz}	rövidzárási áram
U_{mp}	maximális munkaponti feszültség
I_{mp}	maximális munkaponti áram
I_R	a napelem kivezetésén mérhető áramerősség
I_0	fotoáram
I_d	diódaáram
I_s	telítési áramerősség
R_s	soros ellenállás
R_p	párhuzamos ellenállás
e	a napelem anyagára jellemző tiltottsáv szélesség
K	Boltzmann állandó
T	hőmérséklet
U_T	termikus feszültség
P	hatásos villamos teljesítmény
P_{max}	maximális teljesítmény, a napelem csúcsteljesítménye
P_{mp}	maximális munkaponti teljesítmény
φ	kitöltési tényező
η	hatásfok
T_{nf}	a napelem felületi hőmérséklete
T_n	a napelem névleges hőmérséklete
T_k	a környezeti hőmérséklet
E	a megvilágítás intenzitása
E_{STC}	a sztenderd megvilágítás intenzitása

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

PV–	<i>photovoltaic (angol)</i> , fotovoltaikus
HMKE –	háztartási méretű kiserőmű
DSC –	<i>dye-sensitised cells (angol)</i> , fényérzékeny festett cellák
MVM–	Magyar Villamos Művek
MAVIR–	Magyar Villamosenergia-ipari Rendszerirányító
VER–	villamos energia rendszer
KDSZ–	központi diszpécser szolgálat
ÜIK–	központi üzemirányító
PV/T–	<i>photovoltaic/thermal (angol)</i> , napelem-kollektoros
PWM–	<i>pulse-width modulation (angol)</i> , impulzus szélesség moduláció
MPPT–	<i>maximum power point tracking (angol)</i> , maximális munkapont keresés

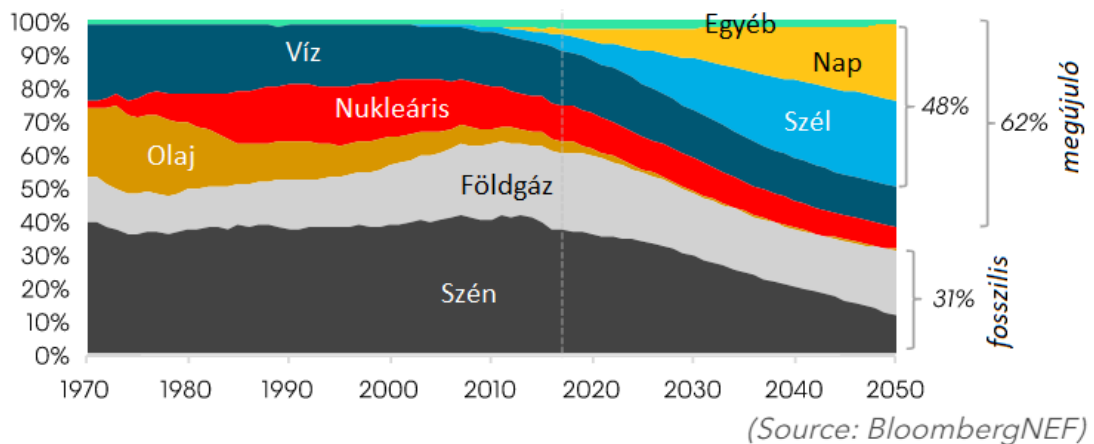
1. BEVEZETÉS

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 dinamikusan 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 hasznosításához. A hazai HMKE termelés éveken át dominálta a magyar napelemes energiatermelést, manapság a teljes kapacitás közel harmadát teszi ki. Azonban a HMKE 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, stratégia 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 vádeményt, 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 napelem modulok 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 [3]. Ezek közül számos tényező hatása csökkenthető, vagy akár teljesen kiküszöbölhető.

Kazem és társai [1] 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 [2]. A földrajzi adottságoktól függően ez a veszteség akár a 17% -ot is elérheti [4, 5]. Amennyiben Magyarország elsősorban a napenergia kiaánázás mellett tör ládsát, a meglévő és tervezett erőművek maximális hatékonyságát biztosítani kell az energiatárolási lehetőségek kialakítás 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 hatákonyságok 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 hibabeazonosítás - 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, hihangsúlyozva, hogy a megszokott normáktól eltérően nagyobb figyelmet kell fordítani a teljesítményromlásra, élettartam csökkenésre, tehát nem csak a gazdasági aspektusok számítanak.

2. 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.

2.1. 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 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-oxidul alapú napelemmel működő elektromotort mutatott be, majd C. W. Wagner-rel 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 (Cu_2O), 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 (GaInAsP), réz-indium-diszelenid (CuInSe_2), réz-indium-diszulfid (CuInS_2), valamint a réz-indium-gallium-diszelenid (CuInGaSe_2) vékonyréteg napelemekre összpontosult. Ezek a vékonyréteg napelem típusok jelentik a második generációt a p-n átmenetes első generációhoz képest. [9, 10]

2.2. *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. Azonban a perovszkit és az organikus napelemek kutatása olyan ütemben halad, hogy a közeljövőben alternatívát jelenthetnek a szilícium alapú napelemekkel szemben.

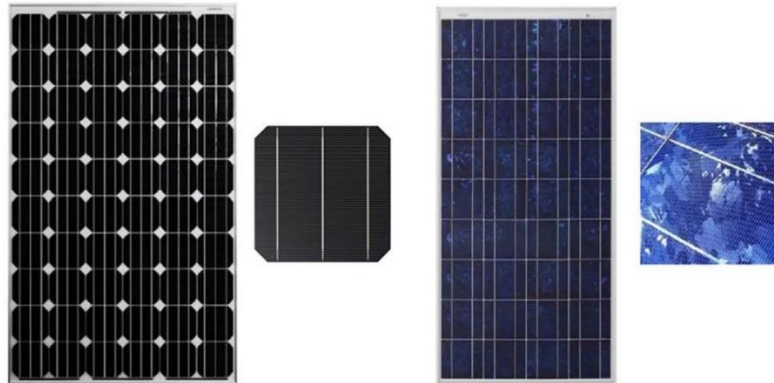
2.2.1. *Szilícium napelemek*

Jelenleg a legszelesebb körben alkalmazott napelem alapanyag a szilícium, amit nagy tisztaságú homokból (szilícium-dioxid) nyernek ki. A városi játszótéren található homok természetesen nem alkalmas feltétlenül napelem cellák gyártásához, és a félvezető-gyártáshoz kibányászott homokot is több mint 100 lépcsős gyártási folyamaton dolgozzák fel, mire az alkalmas lesz napelem cellák 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 CO₂ (szén-dioxid) jön létre, mint melléktermék. A napelemcella-gyártáshoz minimum 6 N, azaz 99,999999% tisztaságú szilícium szükséges. A 6-9 N közötti tisztaságú szilíciumot napelemgyártáshoz, míg a 9 és 11 N (99,9999999999%) 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 szomszédiakhoz, 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.

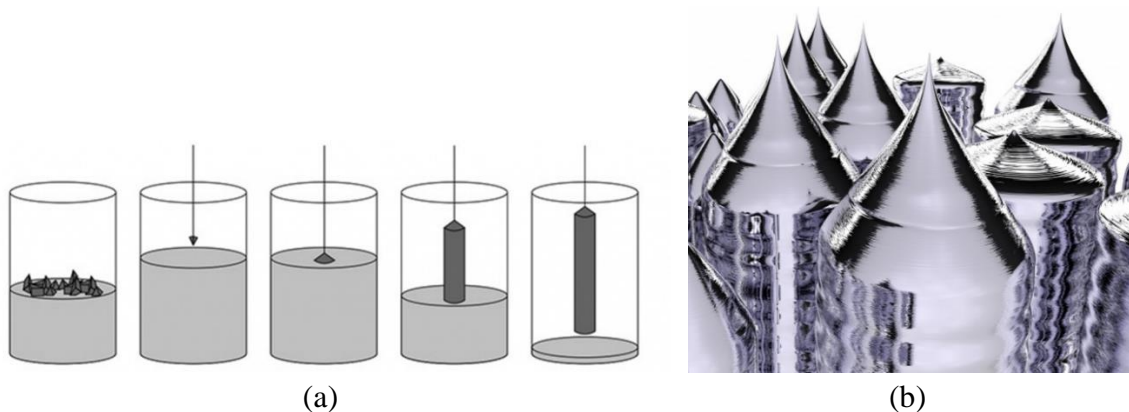
Manapság a háztartási méretű és közcélú erőművek esetében egyaránt a polikristályos napelemek használata a legjellemzőbb. Ez köszönhető annak, hogy a megtermelt energiára vetített költségük a legkedvezőbb. A polikristályos cellákhoz a szilíciumot négyszögletes alakú tömbbe öntik, miközben a szilícium 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 (156x156 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, mint a monokristályos tömbök, és ez az ár-előny végig követhető egészen a kész napelemekig. 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 (2. ábra). [11, 12]



2. ábra. A szilícium alapú mono- és polikristályos napelem modulok közti eltérés

A legnagyobb hatásfokot a monokristályos napelemek produkálják. Gyártási technológiájuk (Czochralski-eljárás, 3. ábra (a)) 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 szennyeződések megkössék (CO – szénmonoxid, ami a szén fűtőszálakból szabadul fel, illetve H₂ – 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 szilícium kristályt lógnak be, amire a szilíciumolvadékból kicsapódik, kikristályosodik az anyag. Miután a szilíciumkristályokat egy hengerben húzzák, növesztik, így egy henger alakú szilícium tömböt kapunk eredményül, aminek az átmérője 156 mm. Ha a szilícium hengerünket merőlegesen felfűrészeljük, akkor egy-egy szelet (wafer) egységes kristályszerkezetű lesz, nem lesznek benne töréspontok, és ezt nevezzük monokristályos szilíciumnak. Szerkezeti felépítése hasonló a polikristályos napeleméhez, jól elkülöníthető, egymással összekötött cellákból áll. Hatásfoka elérheti a 20 – 25%-ot is.



3. ábra. (a) A szilícium monokristály növesztésének folyamata és (b) eredménye a szilíciumtömb

2.2.2. 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 kristály, amely ezerszer vékonyabb, mint a hagyományos szilícium (4. ábra). 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. 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 piacképesé tétele. [13, 14]



4. ábra. A perovszkit napelemek alapanyaga

2.2.3. 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:

- félvezető organikus polimerek,
- 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 vörös 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 piacon megtalálható napelemek jelentős hátránya, hogy nem környezetbarát anyagok felhasználásával készülnek, valamint megcáfolódni látszik az a tévhit, hogy a szilícium alapú napelem panelek újrahasznosíthatók, mivel a folyamat gazdaságilag veszteséges. 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%-ra, míg élettartamuk 3-5 évről 7-8 évre emelkedett. Ugyanakkor a nagyüzemi gyártási módszer kidolgozása még várat magára, valamint egyelőre még magasabb gyártási költségek. Bizakodásra adhat okot, hogy amerikai kutatók nemrég arról számoltak be tanulmányukban, hogy jelentősen sikerült a szerves polimerekből készített napelemek hatásfokán javítaniuk. Olyan módon, hogy különböző hullámhossz-tartomány elnyelésében hatékony polimereket kombináltak össze egyetlen cellává. A fejlesztés hatásfoka 8,62%, amely messze túlszárnyalja minden eddigi szerves anyagból készült napelem hatásfokát. Továbbá kínai kutatóknak sikerült 17,3 százalékra növelniük organikus napelemek energia-átalakítási hatékonyságát, ami újabb lépést jelent a zöld napelem széleskörű használatának elterjedéséhez. Jelenleg az építészetben való kísérleti alkalmazásuk tűnik a legkézenfekvőbb megoldásnak (5. ábra), mivel [15, 16, 17]:

- beesési szögre kevésbé érzékenyek,
- déli tájolástól való eltérés esetén is jól működnek,
- számos hordozóanyag típusra felvihetők,
- egyenetlen felületen is használhatók,
- színezhethők, mintázhatók igény szerint (5. ábra),
- fényáteresztők, üvegfelületek pótlására alkalmasak (5. ábra),
- nagy felületeket lefedésére alkalmasak.



(a)



(b)

5. ábra. (a) A szervas napelem ablakként történő felhasználása és (b) üvegház borításaként történő felhasználása

2.3. *A napelemes rendszerek típusai*

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

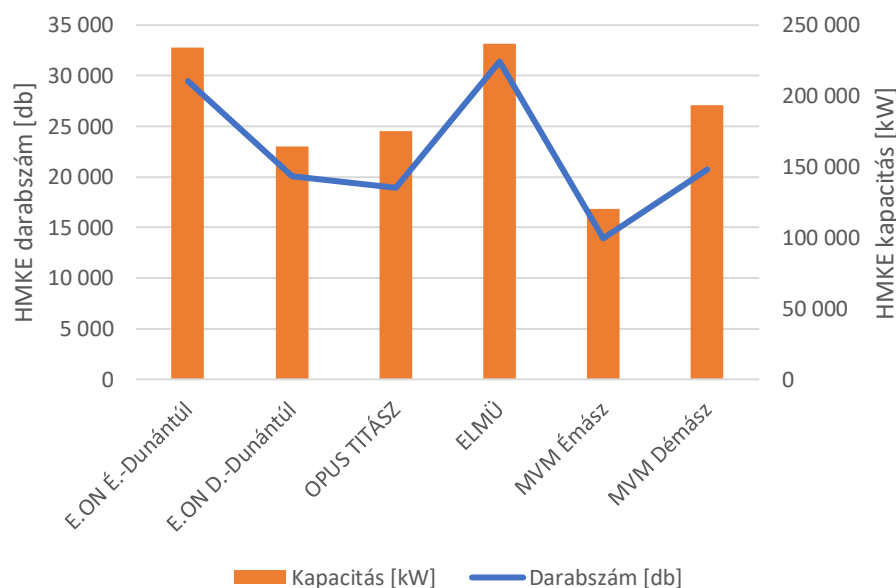
2.3.1. *Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény feletti napelemes erőművek*

A napelemes rendszereket csoportosíthatjuk a csatlakozási teljesítményük alapján is. 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 teljesítményéértéig. Ritkább esetben ezek lehetnek a hálózattal nem kooperáló üzemi erőművek is. Ezek az erőművek rendkívül nagy csúcsteljesítményükből adódóan jellemzően a föld felszínen, 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 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. [18]

Európa legnagyobb tetőre telepített napelemes erőműve a győri AUDI HUNGARIA Zrt. és az E.ON Hungária Csoport együttműködésében valósult meg. Az egész kontinensünket figyelembevéve páratlan erőmű 12 MW kapacitású, 160 000 m² tetőfelületen terül el, így gyakorlatilag is karbonsemlegessé téve az Audi AG hazai üzemét. [19]

2.3.2. *Az 50 kVA csatlakozási teljesítmény alatti napelemes erőművek*

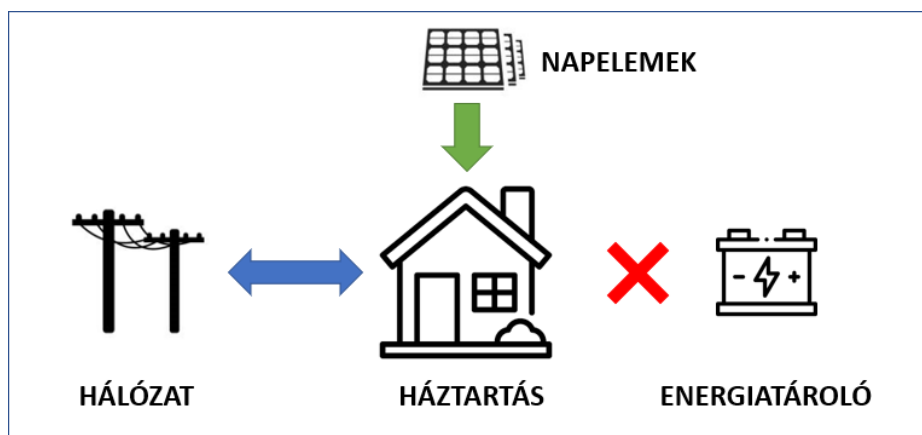
A háztartási méretű kiserőművekre is érvényesek a korábban vázolt tervezési irányelvek, valamint a telepítés módjában (tetőn, talajszinten) is eltérhetnek. Az engedélyköteles hazai HMKE-k darabszáma 2011-ben 657 volt, míg 2021-ben 134 625 volt. Ebből napelemes 2011-ben 629 volt, míg 2021-ben 134 449 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 (6. ábra). [20]



6. ábra. A napelemes HMKE eloszlása Magyarországon áramszolgáltatók szerint 2021-ben [21]

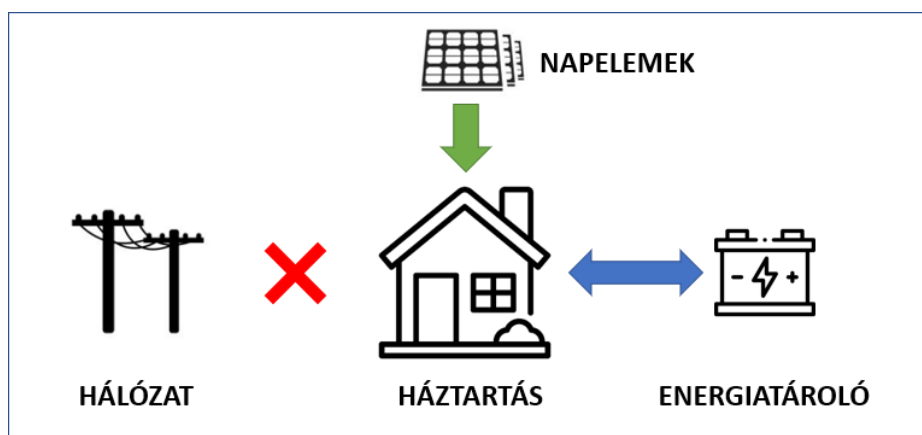
A háztartási méretű napelemes rendszerek típusait alapjában véve a közcélú hálózattal történő kapcsolatuk alapján csoportosítjuk az alábbi módon: hálózatra termelő, vagy szigetüzemű, vagy hibrid üzemű napelemes rendszer. Az első csoportot képviselik az olyan rendszerek (7. ábra), amelyek közvetlen összeköttetésben állnak a közcélú hálózattal. A villamos energia áramlás iránya két-irányú 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 hálózatról pótoljuk. Ezt a kialakítást nevezzük (közcélú) hálózatra tápláló napelemes rendszernek. Az ilyen rendszerek telepítése áramszolgáltatói engedélyköteles, egyben a legelterjedtebb. A legfontosabb építőeleme az engedélyes inverter, amely az építési engedély megadásának alapfeltétele. A szolgáltatók előnyben részesítik a háromfázisú invertereket (de nem feltétel), valamint számos további paraméter tekintetében kell megfelelnie, többek között tudnia kell kontrollálni a kimeneti áram teljesítménytényezőjét ($\cos\varphi$) és felharmonikustartalmát. 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 napelem rendszer 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 napelem rendszerrel ezt nem lehet biztosítani (szigetüzem tiltása). A hálózatba tápláló napelem rendszer csatlakozási dokumentációjának elkészítését csak az áramszolgáltatónál tervezői jogosultsággal rendelkező villamosmérnök végezheti. A szolgáltatók közzéteszik az elfogadott inverterek listáját, amelyek megfelelnek a magas műszaki elvárásoknak. A másik nagyon lényeges eszköz az ad-vesz mérőóra, amely nem a napelemes rendszer része, de a rendszer léte teszi szükségessé.



7. ábra. A hálózatra tápláló napelemes rendszer elvi felépítése

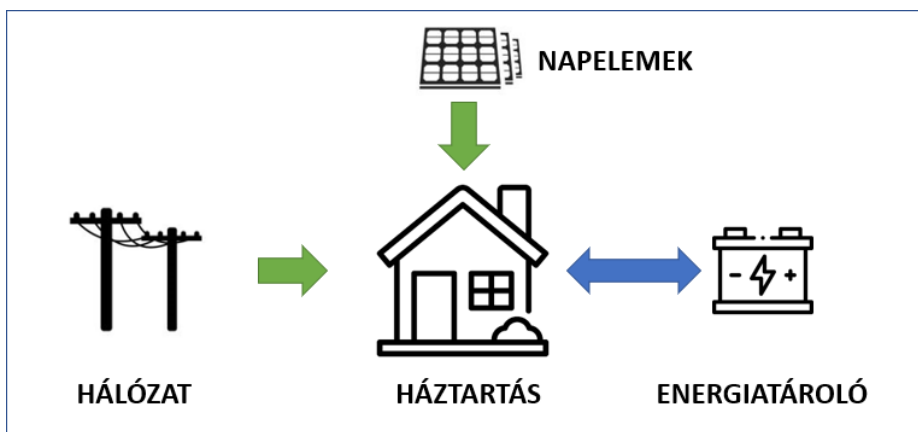
A második típus, a szigetüzemű valójában két altípust is magába foglal (8. ábra). Az egyik altípust nevezzük hálózatifüggetlen sziget-üzemű rendszernek, mikor a háztartásnak nincs kapcsolatban a közcélú hálózattal. A hálózatifüggetlen sziget-üzemű napelemes rendszerek telepítése olyan helyen javasolt, 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.



8. ábra. A hálózatifüggetlen szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése

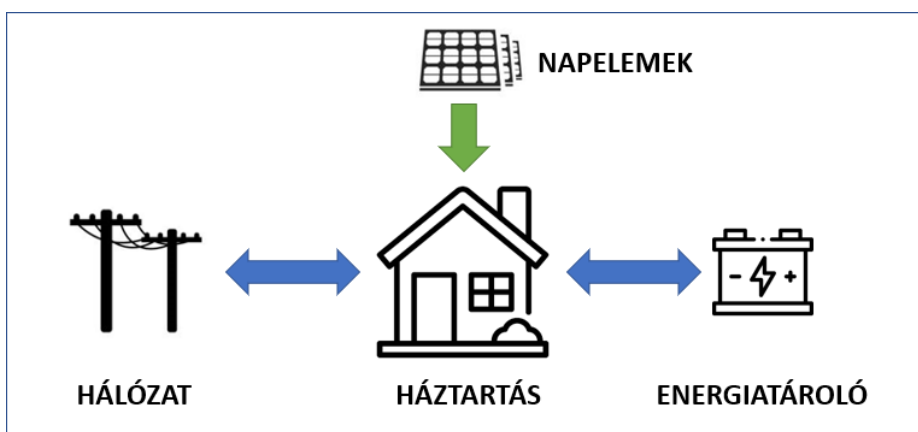
A másik, kizárólag vételezni tudó altípus (9. ábra) ugyan kapcsolatban áll a közcélú hálózattal, azonban az energia áramlás iránya csak egyféle lehetséges, tehát a közcélú

hálózatra nem tud rátáplálni, de a helyi fogyasztók energiaigényét, illetve az energiahiányt onnan képes felvenni, azaz a kapcsolat közvetett. Mivel a hálózat csak rásegít a napelemes rendszerre, ezért a napelemes rendszer csak kiegészíti a hálózatot. Fontos, hogy a hálózat és a napelem által termelt energia nem használható fel egyidejűleg, mert a két energiaforrás között 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.



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

A valódi hibrid rendszerek (10. ábra) legfontosabb feladata, hogy a rendszerbe integrált akkumulátoros tároló egység kiváltsa a közcélú villamoshálózat energiatároló 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 akkumulátor telepeket tölti, amikor azok teljesen feltöltődtek, végső esetben táplálni kezd a hálózatra. Amikor a napelem panelek 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. Azonban A valódi hibrid rendszerek távvezérelhetők, intelligensek és a villamosenergia optimális elosztására fókuszálnak.



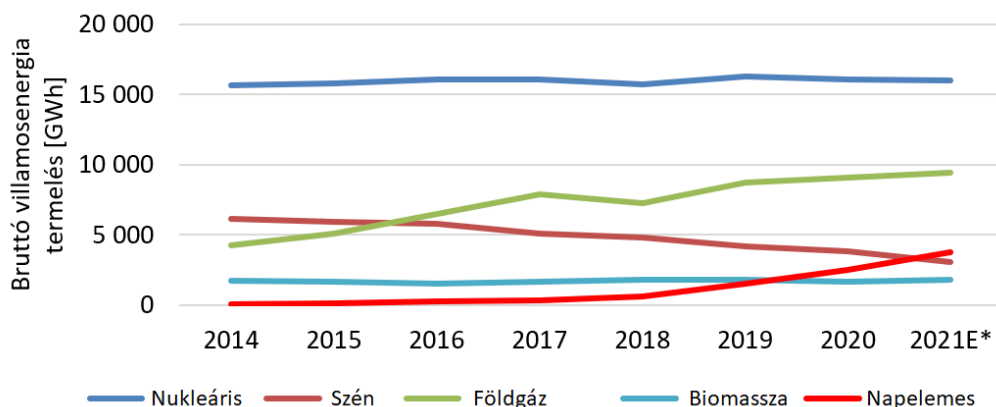
10. ábra. A hibrid napelemes rendszer elvi felépítése

3. A NAPELEMES ENERGIATERMELÉS HELYZETE MAGYARORSZÁGON

Az utóbbi időszakban számos rendelet és jogszabály módosítás szigorította a napelemes rendszerek üzembehelyezésének 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.

3.1. A villamos erőművi rendszer felépítése

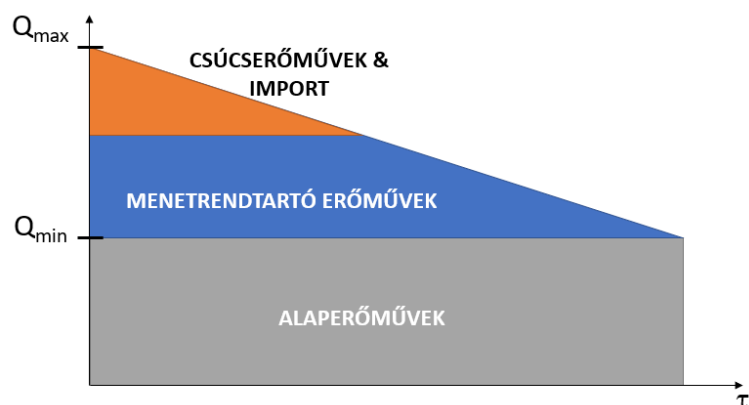
Ahogy azt a 11. ábra mutatja, az utóbbi években a hazai villamosenergia termelés jelentős részét a Paksi Atomerőműben állították elő. A széntüzelés visszaszorulásával a földgáz üzemű menetrendtartó erőművek léptek elő a képzeletbeli dobogó második fokára, valamint 2021-ben a napelemes energiatermelés is megelőzte a széntüzelést, ezzel előrelépett a harmadik helyre. Jól észrevehető a napenergia dinamikus térnyelése, 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 nap szinten csak 1-2 órán át termel ezen csúcserőérték közelében.



11. ábra. A legnagyobb villamosenergia termelést biztosító energiaforrások Magyarországon 2014-2021 között [21]

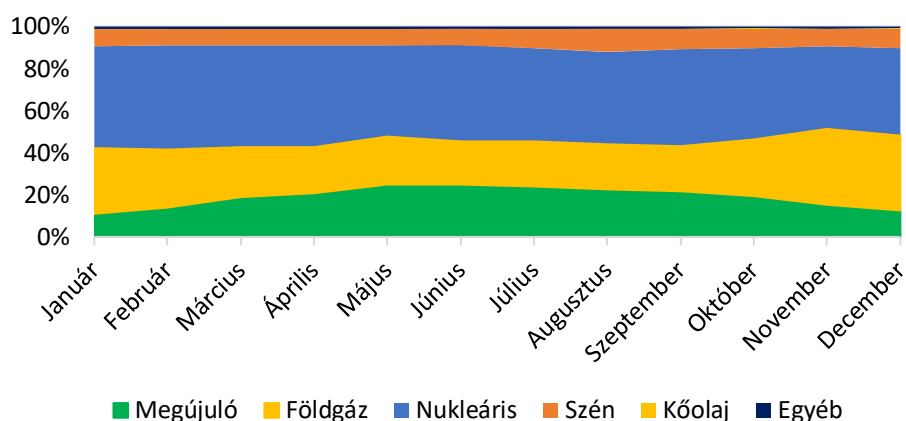
A 12. ábra hivatott bemutatni és összehasonlítani egy általános közcélú erőművi rendszer erőműtípusainak éves kihasználtságát. Ezen ábra mutatja, hogy minden közcélú villamosenergia termelő rendszernek rendelkeznie kell megbízható alaperőművekkel, amelyek éjjel-nappal az év minden évszakában közel állandó 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 kőolaj üzemű 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 [22].



12. ábra. A közcélú erőművi rendszer erőműtípusainak éves kihasználtsága

A 13. ábrán jó megfigyelhető a szén és nukleáris tüzelőanyagú erőművek alaperőművi szerepe, mivel szinte egész évben közel állandó villamos energiát szolgáltatottak. A nukleáris forrásból származó energia részaránya 2021-ben februárban volt a legmagasabb 49%, míg novemberben volt a legalacsonyabb 38%. A megújuló energiák és a földgáz menetrendtartó szerepe is könnyen belátható. Földgáz esetén az maximális és minimális részesedés között jóval nagyobb különbség állt fenn. Novemberben 37%-os részarában 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.



13. ábra. A megtermelt bruttó villamos energia százalékos megoszlása energiaforrások szerint 2021-ben [23]

3.2. A villamosenergetikai elosztórendszer működése

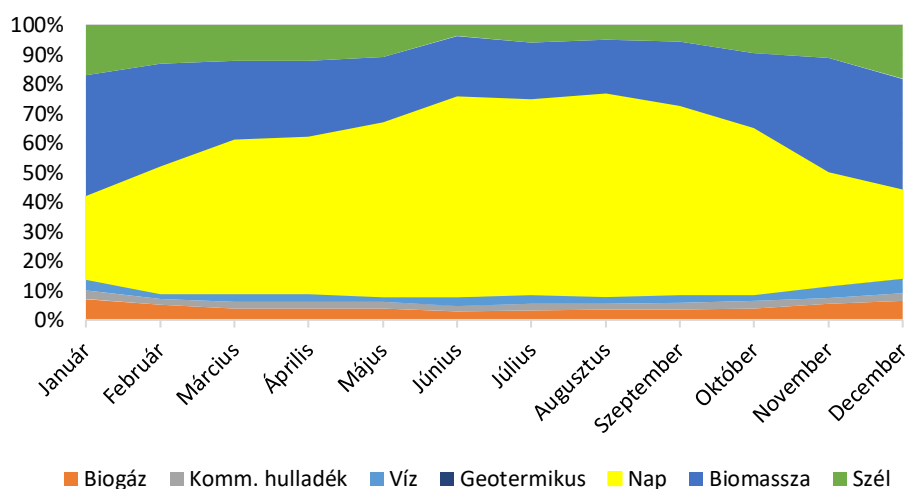
Az erőművekben megtermelt villamos energiát el kell juttatni a fogyasztókhoz, amely feladat a nagyfeszültségű villamos hálózatra hárul. Az erőművekben a megtermelt villamos energiát nagy feszültség szintre transzformálják fel. Szabvány szerint nagyfeszültségnek tekintjük az 1 kV feletti vonalifeszültségű hálózati rendszerszakaszokat. A gyakorlatban az 1 kV és 100 kV közötti hálózatelemeket szokás középfeszültségűnek nevezni és csak a 100 kV felettieket nagyfeszültségűnek. A kiefeszültségű (400 V) hálózaton keresztül érkezik meg a villamos energia a kiefogyasztókhoz. A fogyasztók az elosztóhálózattal és a villamosenergia rendszerrel szemben támasztott legfontosabb igényei, hogy a villamos energia folyamatosan, a megfelelő minőségben (feszültség tűrés, időbeli állandóság, lüktetésmentesség és felharmonikus mentesség frekvencia állandóság 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 világpiaci árain múlik, mint sem 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), áramszolgáltatásokat, amelyek a középfeszültségű hálózatok közvetlen üzemirányítását átadják az üzemirányító központoknak (ÜIK). A KDSZ-ek irányítják a kiserőműveket és nagyobb fogyasztókkal tartják a kapcsolatot, míg az ÜIK a középfogyasztókért 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) vezeték szakaszok 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 feszültség szintű főelosztóhálózat, amelynek rendeltetése a villamos energia elosztása az alaphálózati csomópontokból a középfeszültségű elosztóhálózatok táppontjaihoz, amelyek általában a fogyasztói körzetek súlypontjában helyezkednek el. Szakmai körökben szokás középfeszültségű elosztóhálózatnak nevezni az állomási gyűjtősíneket a fogyasztói transzformátorokkal összekötő távvezetékeket, amelynek feszültség szintje közcélú esetben 11 és 22 kV, ritkábban 35 kV (ipari fogyasztók esetében 3 és 6 kV). Végezetül a kiefeszültségű hálózatok rendeltetése mindenkor a villamos energia közvetlen elosztása a fogyasztók között, ezért ezeket a hálózatszakaszokat összefoglalóan kiefeszültségű elosztóhálózatoknak nevezzük [22].

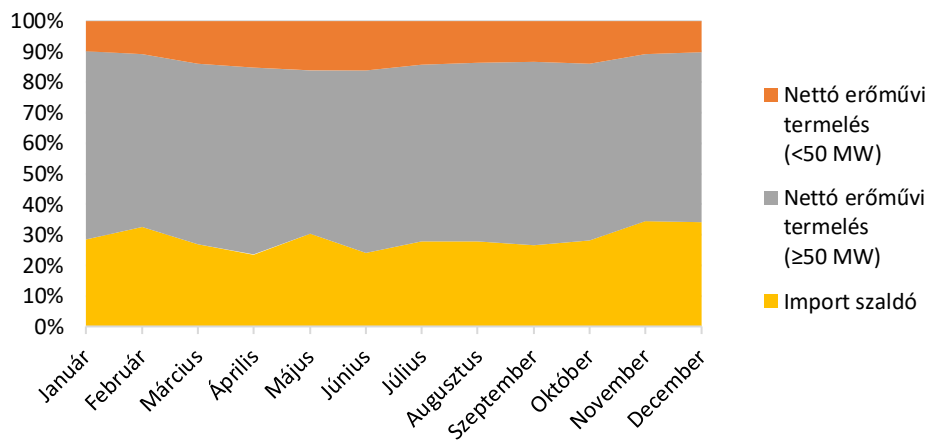
3.3. A villamosenergia termelés és felhasználás egymáshoz igazítása

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 14. 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 biomassza volt 2021-ben. Éppen ellentétes tendenciát mutatott a napenergiával, mivel maximális 41%-os részesedését januárban, míg minimális 18%-os részesedését augusztusban érte el.



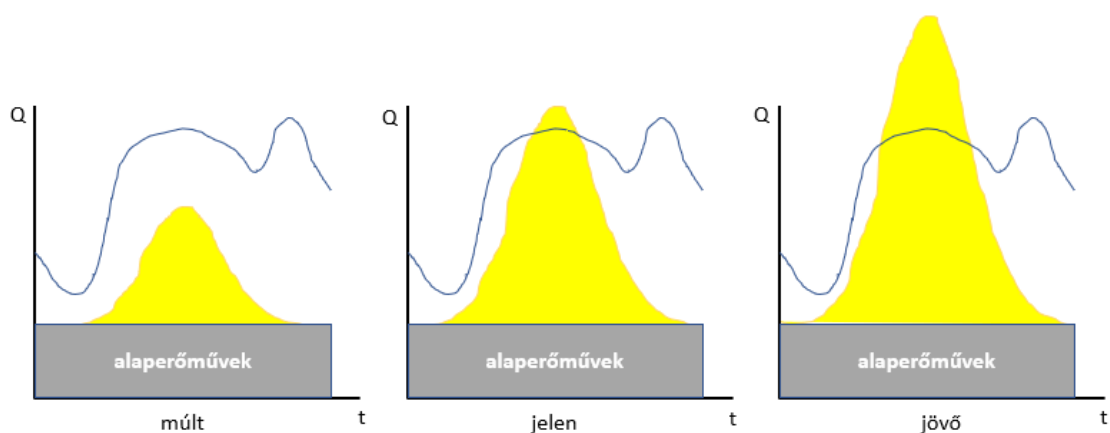
14. ábra. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia százalékos megoszlása 2021-ben [23]

A 15. ábra a magyar villamosenergia rendszer importfüggőségét mutatja be a 2021. adatai alapján. 2021-ben a hazai fogyasztói igényeket 30%-ban külföldről importált villamosenergia szolgáltatta ki. Az import mértéke április és június hónapokban volt a legalacsonyabb, ami 24%-os arányt jelentett. Megfigyelhető, hogy a nyári hónapokban az import mértéke mérséklődött, és inkább csak a téli hónapok során ért el 30%-nál nagyobb értéket. Továbbá, az 50 MW-nál kisebb erőművi állomány jellemzően márciustól októberig termelt nagyobb mértékben, amit a nagy számban előforduló napelemes erőművi kapacitás eredményez ezen kategórián belül, mivel a hazai HMKE (háztartási méretű kiserőmű) kapacitás túlnyomó része napelemes, valamint a nagyobb (közcéltű) napelemes erőművek többsége 50 MW alatti. Ez a tendencia a 13. és 14. ábrákon is megfigyelhető volt.



15. ábra. A hazai villamos energia rendszer által szolgáltatott energia származásának megoszlása 2021-ben [24]

A 16. ábra szematikusan ábrázolja a villamosenergia termelés és fogyasztás kapcsolatát, átlagos napi jellegét a nyári időszakban. Az import függőség csökkenése a naperőművek menetrejtartó jellegéből következik (16. 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 legrésztesebb 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.



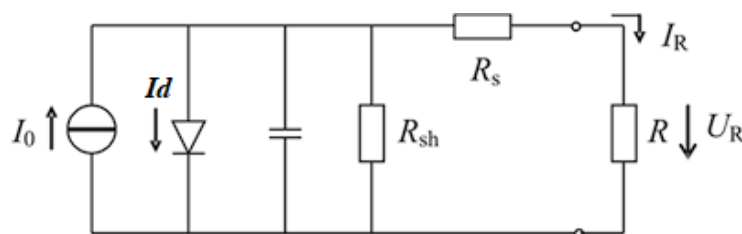
16. ábra. A naperőművekből származó villamos energia és a fogyasztási igények kapcsolata

4. A NAPELEMEK MŰKÖDÉSE ÉS ELEKTRONIKAI MODELLJE

A napelem cellák belsejében az energiaátalakítás oly módon történik, hogy az elnyelt sugárzás közvetlenül villamos töltéseket hoz létre az anyagban. A p-n átmenetre jellemző E_g tiltott-sávszélességnél nagyobb energiával becsapódó fotonok generálják a töltéshordozókat. Ezek a töltéshordozó párok a p-n átmenetnél szétválasztódnak a kialakított villamos tér hatására. Az elektronok a félvezető egyik oldalára az n-tartományba, míg a lyukak a másik oldalára a p-tartományba sodródnak. A létrejött fotoáram a külső áramelvezető kontaktusokon keresztül elvezethető. Ha süt a Nap a napelemet, annak alsó és felső rétege között egyenfeszültség keletkezik és elkezdnek a töltések áramolni. Az eszközt úgy tekinthetjük, mint egy galván elemet [25, 26].

A keletkezett fotoáram hatására a napelem kapcsain $U_{\bar{u}}$ üresjárási feszültséget és I_{rz} rövidzárási áramot mérhetünk. Amennyiben a kivezetésre egy fogyasztót (R 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 feszültség és I áram mérhető. A kivezetésen mérhető I_R áram az I_0 fotoáram és az I_d diódaáram különbségéből adódik (17. ábra) [25, 27].

A napelem ideális elektronikai kapcsolása nem tartalmaz kapacitív és ohmikus jellegű elemeket csak egy dióda és egy vele párhuzamosan kapcsolt áramgenerátorból áll. A valós kapcsolást a belső ellenállás, vezetékek ellenállása és parazita kapacitás jelképezik. A parazita kapacitás kellően nagy, így zavarás nélkül elhanyagolható az I_c kapacitásáram és az I_R ellenálláson folyó árammal együtt [27].



17. ábra. Napelem valóságos elektronikai helyettesítő képe

A fotoáram egyenesen arányos a megvilágítás erősségével, másrészt a fotófeszültség logaritmikus mértékben függ tőle. Ebből kaphatjuk meg a rövidzárási áramot is $U=0$, illetve az üresjárási feszültséget $I=0$ helyettesítéssel (1. képlet). Tehát a napelem villamos paraméterei jelentősen függenek a hőmérséklettől (18. ábra) [27, 28, 29].

$$I_{foto} = I_0 \quad (1)$$

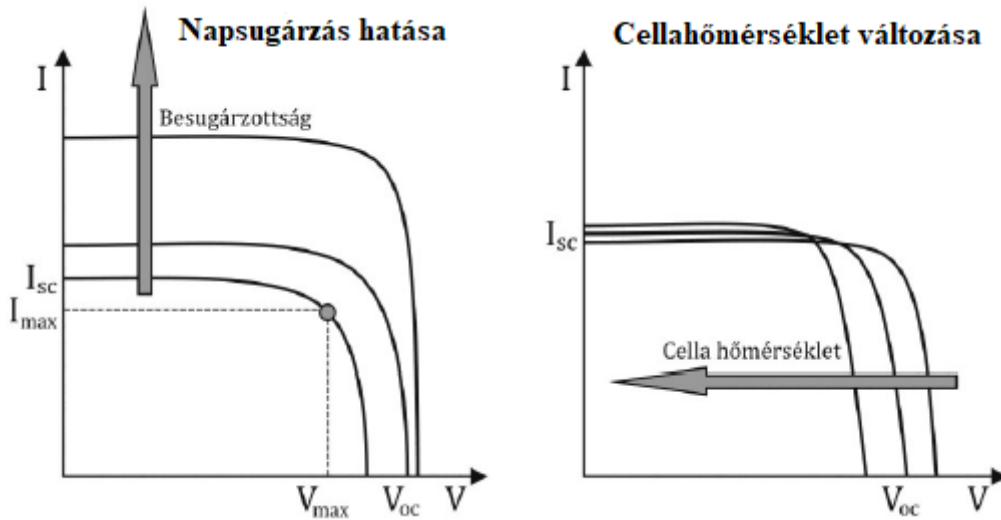
$$I_R = I_0 - I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_R = I_0 - I_d \quad (4)$$

Ennek megfelelően az $U_{\bar{u}}$ üresjáratú feszültség az 5. képlet alapján szállítható.

$$U_{\bar{u}} = \frac{K \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{foto}}{I_s} + 1\right) = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{foto}}{I_s} + 1\right) \quad (5)$$



18. ábra. Besugárzottság, cellahőmérséklet hatása

Az üresjáratú kapocsfeszültség ($U_{\bar{u}}$) logaritmikusan növekszik a háttérsugárzás növekedésére, míg a rövidzárási áram (I_{rz}) lineáris függvénye a háttérsugárzásnak. 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 [27, 30].

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

$$P = U \cdot I = U \cdot I_{foto} - U \cdot I_s \left(\exp\frac{e \cdot U}{K \cdot T} - 1 \right) \quad (6)$$

Megkeressük az egyenlet szélső értékét, a $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$ feltétellel. Ebből fejezhető ki a maximális teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség (I_m) és feszültség (U_m) [27]. 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 [27].

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

$$\eta(\%) = \frac{U_m \cdot I_m}{P_{foto}} \cdot 100\% = \frac{U_{\ddot{u}} \cdot I_r \cdot \varphi}{P_{foto}} \cdot 100\% \quad (7)$$

A napelem hatásfokának kiszámításánál nagyon fontos paraméter a félvezető anyagra jellemző (E_g) tiltott sáv nagysága. Ha a beeső foton energiája (E_{foton}) kisebb, mint az anyagra jellemző tiltott sáv szélessége, akkor az nem fog töltéshordozókat kelteni. A töltéshordozógenerálás elengedhetetlen feltétele, hogy a beeső foton energiája legalább akkora legyen, mint a tiltott sáv szélessége. Ha több, akkor az a többletenergia ($E_g - E_{foton}$) nagyságú hőmennyiségként disszipálódik [27].

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 vegyünk, hogy a napsugárzási spektrumban nem csak a félvezető szempontjából jótékony tartomány található, hanem az infra tartomány is. Hatására azonos megvilágítás mellett a rövidzárási áram jelentéktelen növekedését tapasztalhatjuk, viszont az üresjáratú feszültség hőmérsékleti tényezője anyagfüggő. Tehát a napsugárzás növekedésével a napelemnek teljesítménye ugyan nő, viszont belőle energiát kinyerni csak kisebb hatásfokkal tudunk.

4.1. Félvezetők hőmérsékletfüggése

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. A félvezető eszközök hőmérsékletfüggését gyakorlatilag a felhasznált anyagok anyagtulajdonságai határozzák meg. A különböző félvezetők tiltott sávszélessége 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 hosszát 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 [27].

Összességében tehát elmondható, hogy egy napelem fotoáramának hőmérsékletfüggését az abszorpciós tényező, a diffúziós hossz és tiltott sávszélesség hőmérsékletfüggése befolyásolja.

A napelem egydiódás modelljéből (17. ábra) láthattuk, hogy a p-n átmenet beépített tere által létrehozott áram egyrészt az eszköz által leadott áramból, illetve a diódán és 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 idealitási tényező és a telítési áram hőmérsékletfüggésétől is. Az üresjárási feszültség hőmérsékletfüggését valamennyi tag befolyásolhatja, de gyakorlatilag a telítési áram hőmérsékletfüggése változtathatja.

Röviden megfogalmazva, számunkra fontos az energiatermelés szempontjából a teljesítmény, amelyet a rövidzárási áram és az üresjárási 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 meghatározhatunk 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 érő napsugárzás tehető felelőssé. A növekvő megvilágítással a hasznos intenzitás mellett a napelem melegedéséért felelő sugárzás is növekszik.

Növekvő hőmérséklet hatására az $U_{\bar{u}}$ feszültség csökken. Tehát adott megvilágítás mellett, különböző hőmérsékleten I-U karakterisztikák láthatók. A feszültség esésből 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 üresjárási feszültség $U_{\bar{u}}$ lecsökkenését.

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]:

$$T_{nf} = \frac{T_n - T_k}{E_{STC}} \cdot E + T_k \quad (8)$$

Ebből meghatározható a fotoáram, amiből következik, hogy a megvilágítás intenzitása lineárisan befolyásolja a napelemen 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 egy Kelvin (Celsius fok) 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 teljesítmény csökkenést és így hatásfok csökkenést eredményez [27].

1. táblázat. Hőmérsékleti együtthatók különböző típusú napelemeknél

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

4.2. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terheletlen napelem panelen

Amikor egy napelem modul hátoldalára ragasztott termékcímkére pillantunk, leolvashatjuk róla a legfontosabb paramétereket. Többek között az üresjárású és maximális munkaponti feszültséget, amelyekre a 25°C-os STC (Standard Test Condition) hőmérséklet gyakorol hatást. Valamint megtaláljuk a rövidzárási és maximális munkaponti áram értékét, amiket elsősorban az 1000 W/m² STC megvilágítás befolyásol. Azonban 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.

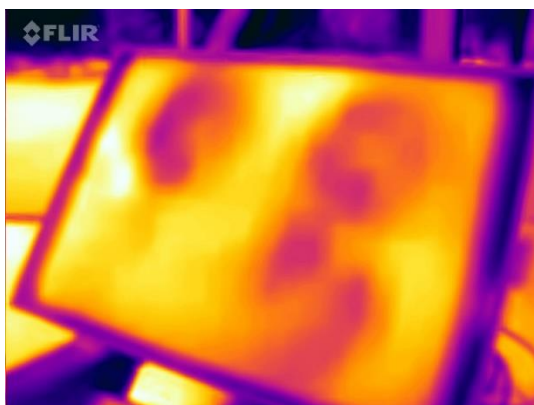
A napelemek hűtésére már számos megoldást kipróbáltak különböző kutatócsoportok. Az alkalmazott hűtőközeg leggyakrabban víz, levegő, vagy valamilyen fázisváltozásra alkalmas közeg. Ez utóbbi egy nagyon izgalmas tématerület, amikor a kutatócsoportok a legmegfelelőbb hűtőanyag típusát igyekeznek megtalálni. 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 hűtőmódok 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 villamos energia, valamint hő igényének egy részét egyaránt kiváltható napenergiával.

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

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

A kutatómunkám a hűtött napelem panel (2. táblázat) vizsgálata 2022. augusztusában kezdődött kültéren, természetes napfény által megvilágítva. Az első vizsgálat végeredménye sikeresnek volt mondható, mivel a ventilátorok viszonylag rövid idő alatt (15 perc) visszahűtötték a felmelegedett panelt, ezáltal az üresjárású 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/m² között ingadozott. A külső hőmérséklet 23°C volt, azonban a szélmozgás befolyásolhatta a hőmérsékletértékeket [34].



19. ábra. A ventilátoros hűtés szabadtéri tesztelésének hőkamerás felvétele

2. táblázat. A vizsgált napelem panel gyártói paramétereit

Megnevezés	Jele	Mértékegysége	Értéke
Csúcsteljesítmény	P _{max}	Wp	20
Üresjárású feszültség	U _ü	V	21,67
Rövidzárási áram	I _{rz}	A	1,22
Maximális munkaponti feszültség	U _{mpp}	V	17,49
Maximális munkaponti áram	I _{mpp}	A	1,144

A laboratóriumi vizsgálatok során különböző (700 W/m² és 900 W/m²) megvilágítottsági szintnek (fényintenzitás) vettem alá a napelem panelt. 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 szabadtérben tapasztalt átlagosan jellemző értéket, ami hozzávetőleg 45-50°C volt.

A 3. táblázat mutatja a mért kiinduló értékeket, amelyek üresjárású feszültség esetében a maximális értékek, míg a hőmérséklet esetében a minimális értékek, valamint a mérések befejezésekor mért értékek. 900 W/m² fényintenzitás mellett a hűtés 4,6°C -al csökkentette a panel felületének hőmérsékletét, ami közel 0,614 V feszültségnyereséget jelentett. 700

W/m² megvilágítottság mellett a két mérés hőmérséklet különbsége 2,9°C, míg a feszültség esetében 0,214 V különbséget lehetett tapasztalni.

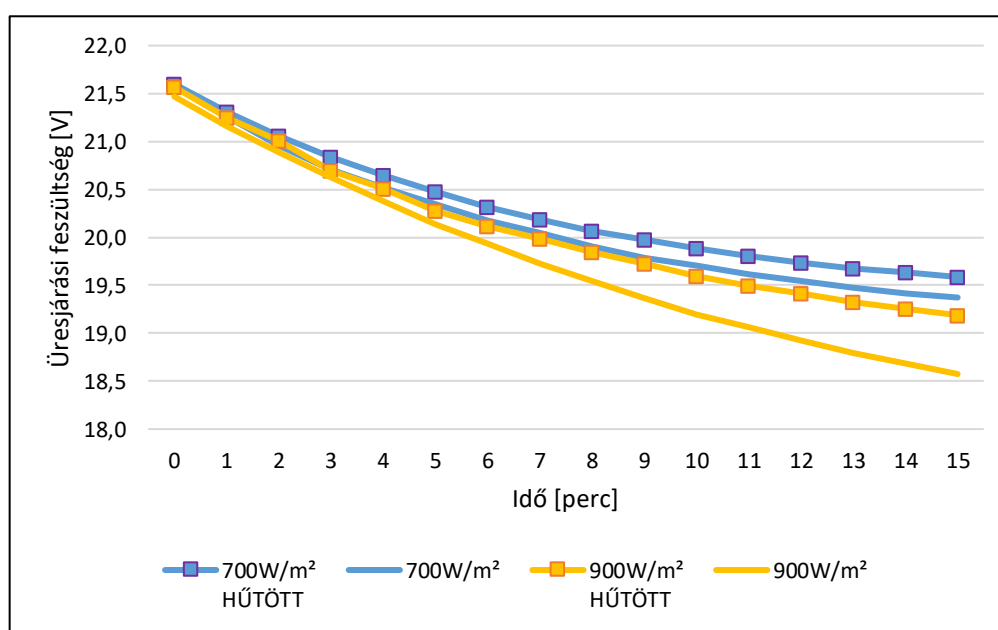
Az eredmények azt mutatják, hogy esetlegesen a hűtés optimalizálásakor megeshet, hogy bizonyos fényintenzitás határérték elérése esetén a hűtést ki lehet kapcsolni. A hűtés építésekor lényeges szempontnak tekintetem, hogy impulzusszélesség-modulációval (PWM) vezérelhető ventilátorokat válasszak.

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

Vizsgált jellemző paraméter	900 W/m ²		700 W/m ²	
	nem hűtött	hűtött	nem hűtött	hűtött
Maximális üresjárési feszültség [V]	21,469	21,567	21,577	21,599
Minimális üresjárési 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

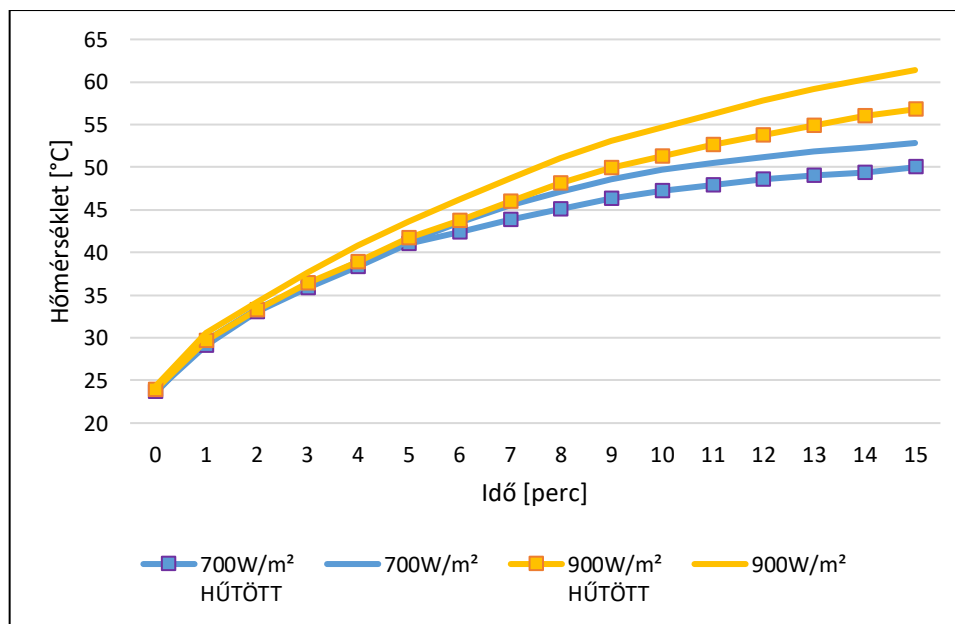
A hőmérséklet tranziens jelenség lefutásának hatását jól szemlélteti a 20. ábra. A panel üresjárési feszültsége minden alkalommal közel azonos értékről indult. Az előzetes várakozásoknak megfelelően a nagyobb fényintenzitás hatására a panel gyorsabban és intenzívebben melegedett át (21. ábra). A 15 perces mérések első 5 percében sem a hőmérséklet, sem az üresjárési feszültség értékek esetében nem alakultak ki számottevő különbségek. Amennyiben az utolsó 5 perces szakaszt vizsgáljuk szembevetve, hogy a 900 W/m² fényintenzitás mellett a hűtés hatása erőteljesebben megmutatkozott.

A 20. és a 21. ábráról is egyértelműen leolvasható, hogy 700 W/m² megvilágítás mellett a melegedési folyamat és az ezzel járó feszültség logritmikus jellegű csökkenése már szinte teljesen lecsengett, de még nem lépett át állandósult fázisba. A hűtés látszólag nem bizonyult olyan aktívnak mint 900 W/m² 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 feszültség változás közel azonos volt a magasabb fényintenzitás mellett hűtött panel feszültségváltozásával.



20. ábra. A különböző fényintenzitás értékek esetében mért üresjárési feszültség értékek

Fontos kiemelni grafikonok logaritmusos jellegét az idő függvényében való ábrázolás adja, ellenben, mind a négy esetben a feszültség és a hőmérséklet kapcsolata közel lineáris volt. Továbbá, mind a négy esetben ez a feszültség-hőmérséklet közti linearitást leíró függvények minimális mértékben tértek el.



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.

4.3. Hőmérsékleti tranziens lefutásának vizsgálata terhelt napelem panelen

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

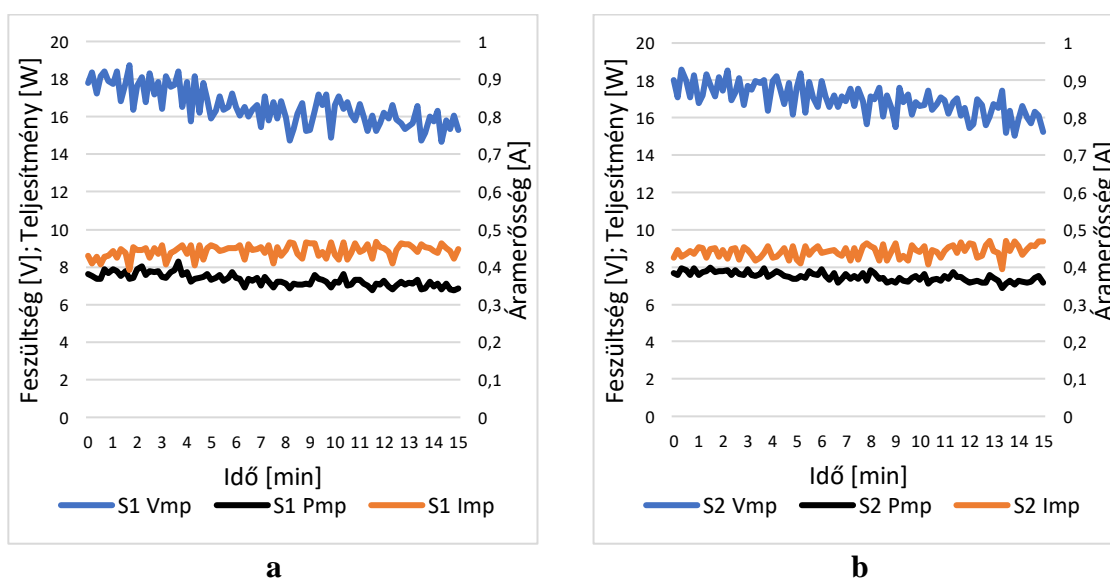
Négy mérési összeállítás lett vizsgálva:

- S1: 700 W/m² megvilágítás
- S2: 700 W/m² megvilágítás és hűtés
- S3: 900 W/m² megvilágítás
- S4: 900 W/m² megvilágítás és hűtés

4.3.1. Terhelt napelem panel hőtranzien্স jelensége 700 W/m² fényintenzitás mellett

Az első és második mérési összeállítás mérsékelt hőmérséklet növekedést eredményezett, mivel az alacsonyabb fényintenzitás kevésbé melegítette fel a napelem panelt. 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-et. 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 természetes napfénytől jelentősen eltérő mesterséges fénytől. 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 mér villamos értékek

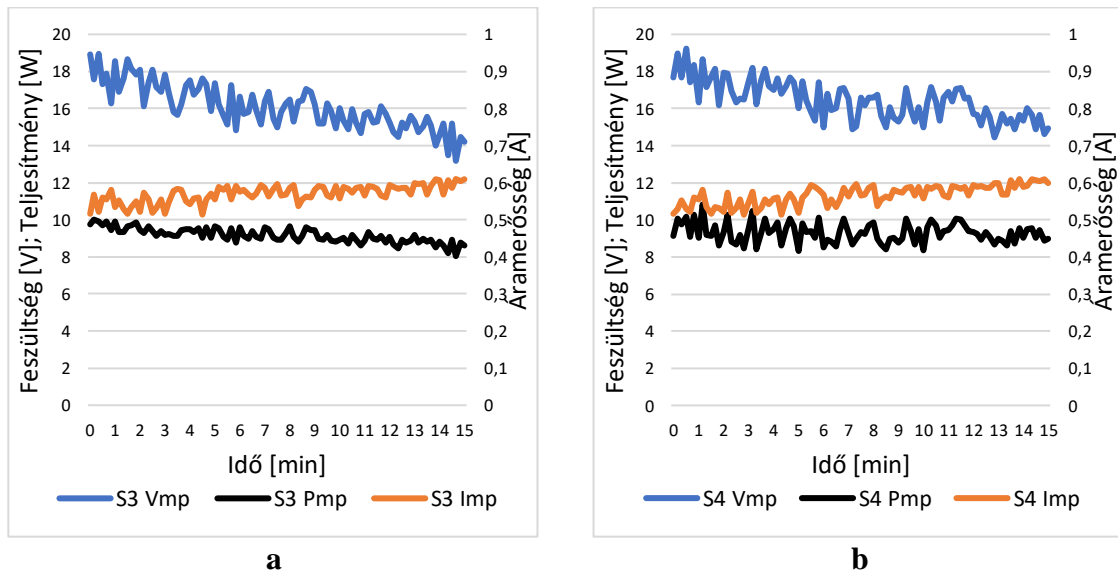
A 22. b) ábra mutatja a S2-et. Ebben az esetben a munkaponti feszültség kezdetben 18 V körül ingadozott, ez az érték a melegedés hatására 16 V körüli értékre csökkent. Ezzel szemben az áramerősség kezdetben csak 0,4 A volt, ami az I-U karakterisztikából adódóan 0,47 A körüli értékre emelkedett. A generált 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.

4.3.2. Terhelt napelem panel hőtranzien্স jelensége 900 W/m² fényintenzitás mellett

Az harmadik és negyedik mérési összeállítás jelentős hőmérséklet növekedést eredményezett, mivel nagyobb fényintenzitás érte a napelem panel 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-et. 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.

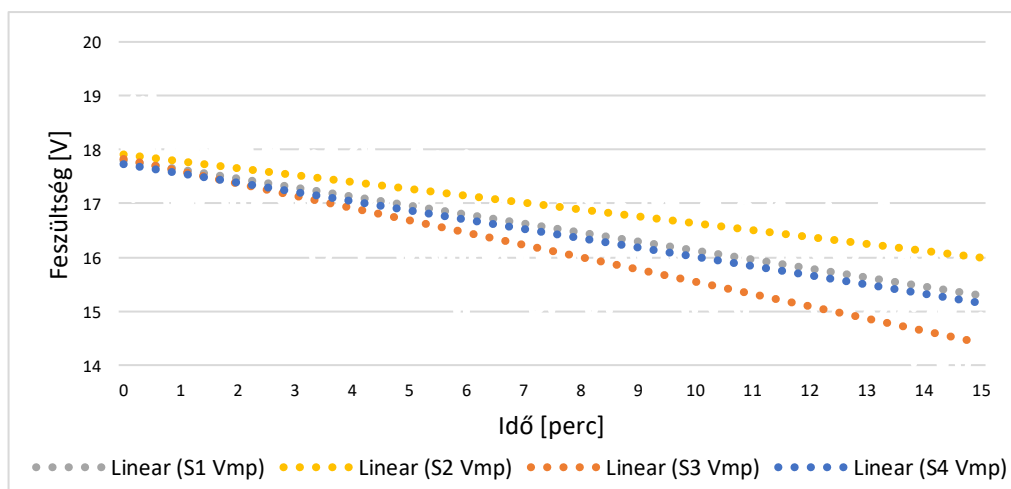
A magasabb fényintenzitás eredménye. A generált teljesítmény csökkenő tendenciát mutat, a hőmérsékletnövekedés negatív hatását a vizsgálat igazolta [35, 36, 37, 38].



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

A 23. b) ábra mutatja a S4-et. 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 szemléltetni a különbségeket a különböző esetek között. Mindkét megvilágítási érték mellett jól működött a hűtés, hasonlóképp mérsékelte a teljesítményt veszteséget. Ugyanakkor a 22. és 23. ábra között megfigyelhetőek olyan különbségek, hogy a feszültség változás üresjárás esetében polinom, 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 [39, 40]. A napelem modulok 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 termelékiesést okozhatnak a szennyeződések, extrém nagy szennyezettségénél (pl. sivatagi környezetben) akár az 50-70%-ot is [41, 42]. A napelemcellák hőmérséklete az átmeneti ellenállásnövekedés okozta hőképződés és a hőszigetelő réteggént viselkedő szennyezőséd miatt jelentősen megnőhet. A folyamat jellemzése nem egyszerű, hisz rengeteg tényező befolyásolja [43–48]. 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, 47, 49–54].

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 foltszerű 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 [39,43,49,52,55,56].

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- kissetemcsés anyagok mellett, hogy elektrosztatikusan tapadnak a napelem felületéhez, képesek bediffundálni a napelempanelt 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 temékek, 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 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 napelem panel 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 vízkő foltokat 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 hatása

A napelem működésének megértéséhez a félvezetőkkel foglalkozó elméleti anyagot kell megismerni. Amikor a nappól 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 17. 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 üresjárású 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 csúcserővel jellemzik a termékeiket. Ezt a csúcserőket, 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 napelem panel 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 feltevésem 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 Elektrikai Intézeti Tanszék napelemes laboratóriumában végeztem el. A KS-85 típusú monokristályos napelem panelt egy asztalra fektettem, ami fölé egy 8 reflektorból álló „napszimulátort” illesztettem [55,57–59]. 1000 W-os halogén izzók világították meg a napelemet, azonban a megvilágítottság nem egyenletes a reflektorok közötti tér miatt (25. ábra). A megvilágítás medián értéke 874 W/m² volt [59, 60]. A napelemet jellemző paraméterek:

P_{\max} : 85 W, A_{hasznos} : 1,5 m². 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. [39,58,61,62]. Ez azt jelenti, hogy halogén reflektoros szoláris szimulátorral a természetes 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 ismételt 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 napelem panel

Minden mérést 17,5 V üresjárási feszültség 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 [58].

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

	1. eszköz	2. eszköz	3. eszköz
Elnevezés	E1	E2	E3
Jelölés diagramon	háromszög	négyzet	kör
Eszköz típusa	kanál	szita	szita
A szita lyukátmérője	-	0,9 mm	0,5 mm
Kiszórt szennyező szemcsemérete	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 napelem panel 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 garázsból 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 napelem panelen.

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 napelemen panelen (5. táblázat).

5. táblázat. A különböző felhasznált anyagok fizikai jellemzői

Szennyező	Színkód (diagramon)	Sűrűség [g/cm ³]	Fajlagos felület [mm ² /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

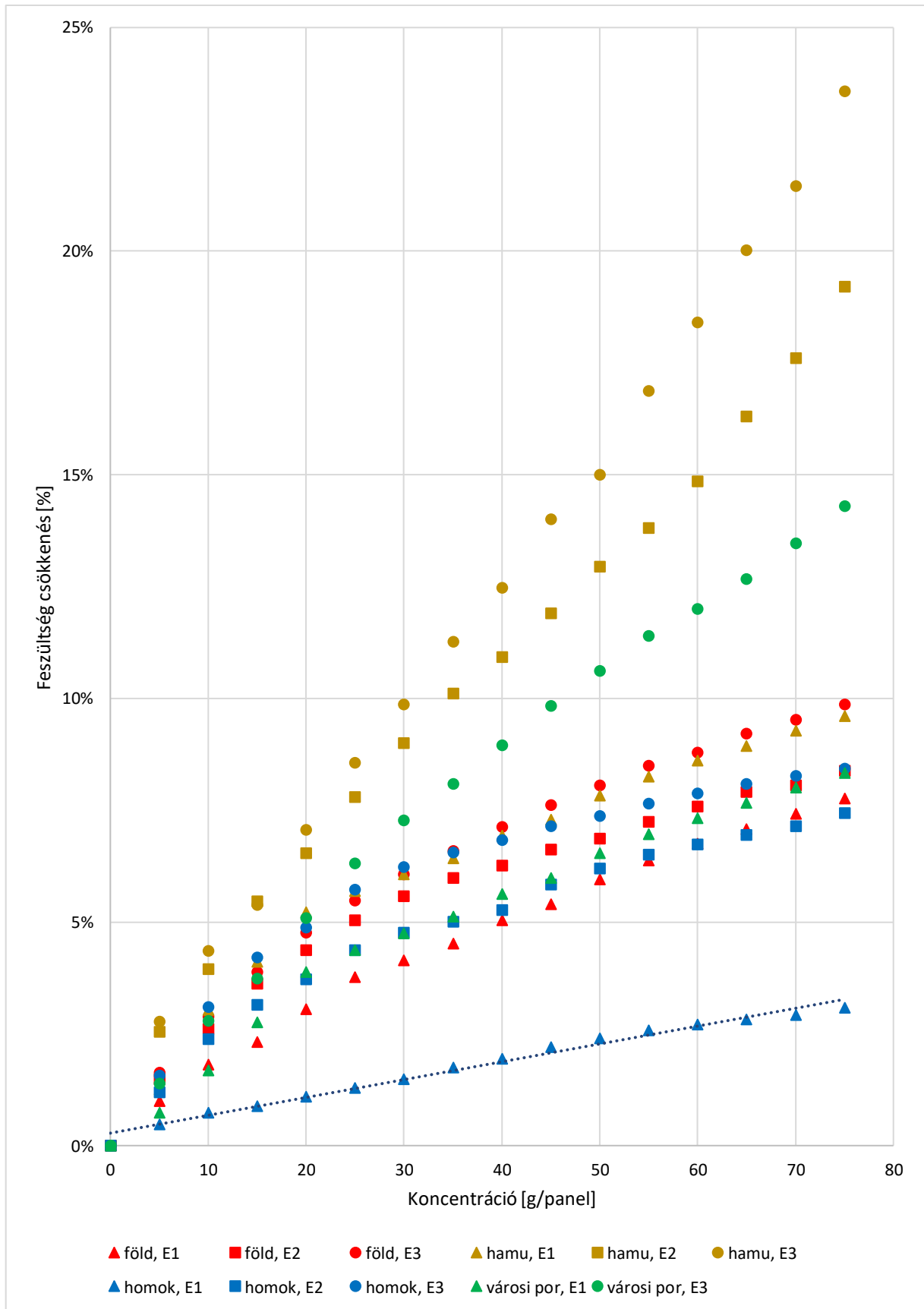
5.5.1. Feszültségesítés a koncentráció függvényében eltérő szennyezők esetén

Mivel számos mérési sorozat eredményét kellett egy ábrába (26. ábra) belesűríteni ezért az anyag típusokat 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 megjelentősebb csökkentő hatása 8%-v 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 megjelentősebb csökkentő hatása 8%-v volt, ellenben homok esetén ez az érték 7% volt.

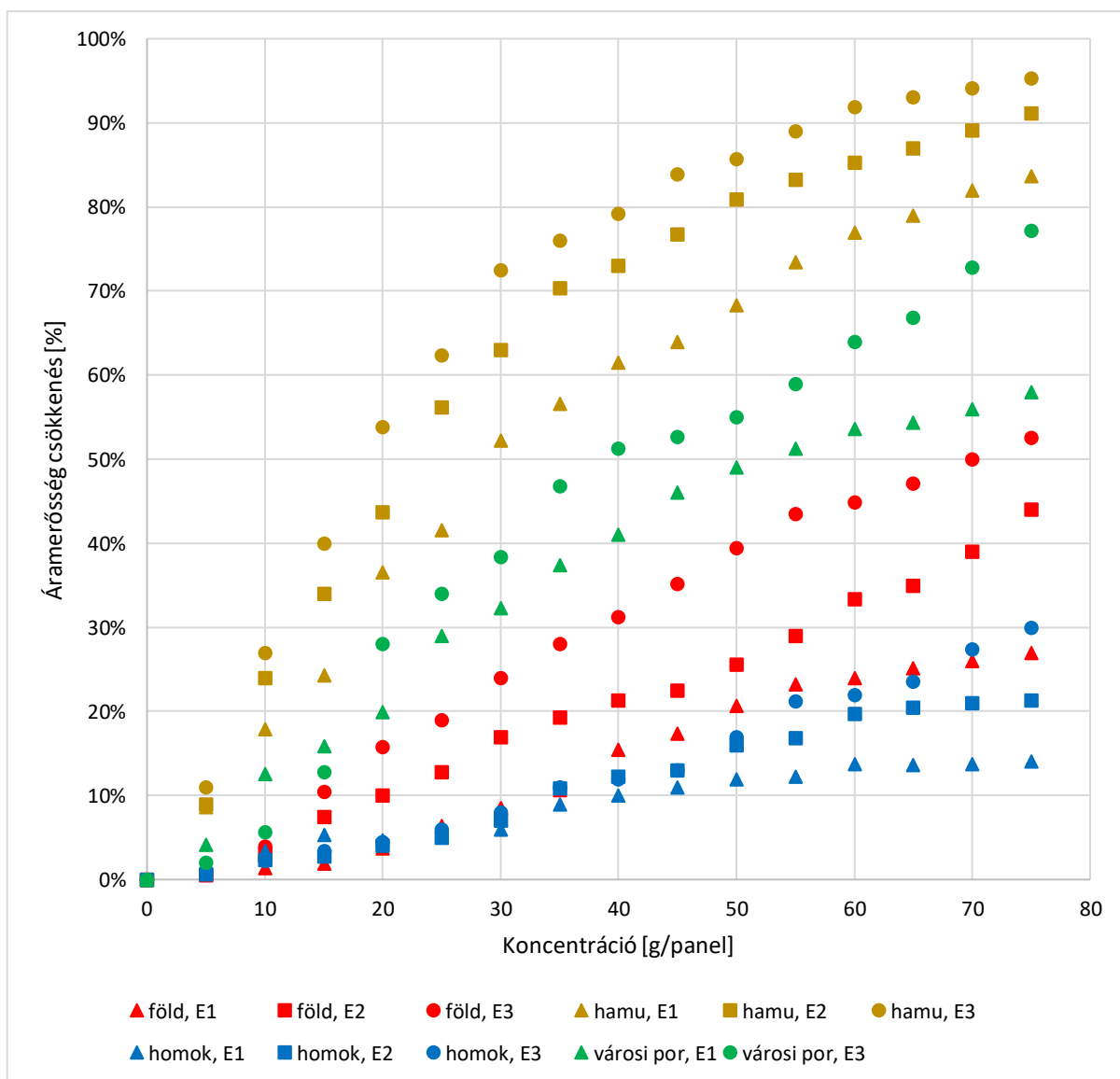
A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 24%-os feszültségesítés a legfinomabb szemcseméret és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por megjelentősebb csökkentő hatása 14%-v volt, ellenben föld esetén ez az érték 10%, homok esetén 8% volt. A városi porral kapott eredmény kevésbé marad 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 száolt be Abderrezek és társai [43], Bhattacharya és társai [55], valamint Oh és társai [63].



26. ábra. A felületi szennyeződés 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 megjelentősebb 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 megjelentősebb 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 megjelentősebb 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 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 [64, 65].

Másodsorban, az áramerősség csökkenését a megvilágítottság mértéke befolyásolja. A napelem panel felületén jobban szétterülő szitált szennyező nagyobb árnyékoló hatása jelentősebb csökkenést eredményezett. A termőfölddel való bekoszolódás 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 polinomiális függvény 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 szitálással elért eredményekhez képest [64].

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 [64].

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 eredmények kevésbé zavarosak, 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.

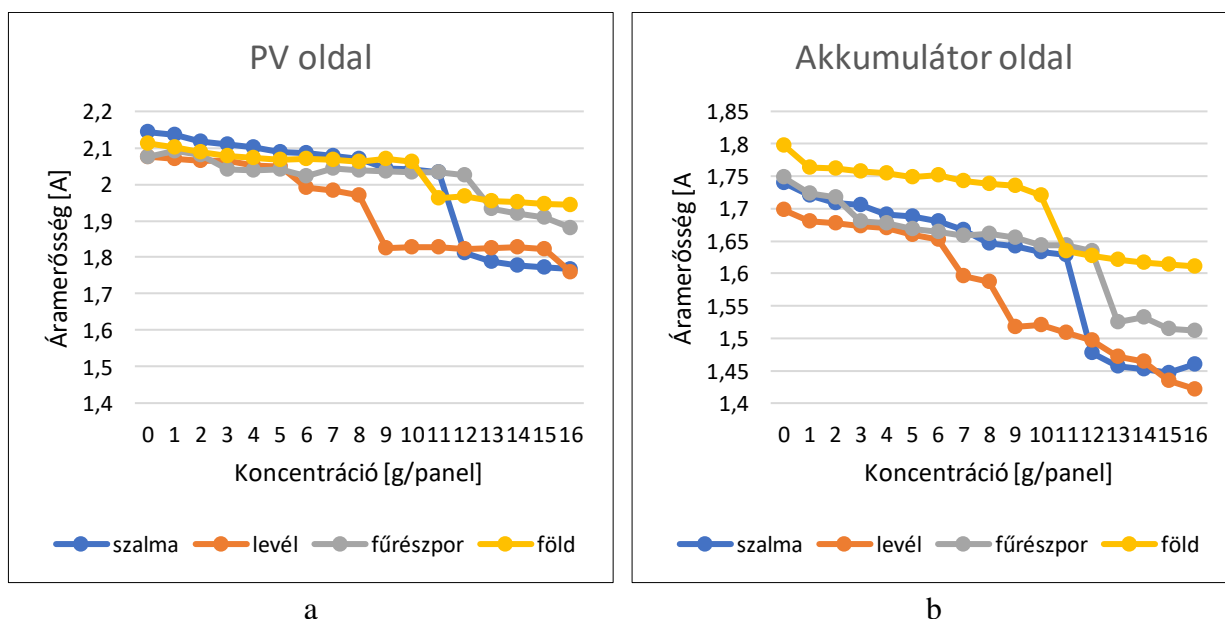
5.6.4. Szennyeződésvizsgálat városi porral

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. Azonban a két mérés megfelelően bizonyítja a szitálás hatását, miszerint számottevően jelentősebb csökkenést okozott az üresjárás feszültség 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 napelem panel szennyeződésvizsgálata organikus anyagokkal

Ugyanazzal a 80 Wp monokristályos napelemmel végeztem méréseket, azonban MPPT töltésvezérlővel történő csatlakoztatással lemerült akkumulátort töltöttem a napelemmel. 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 szabályozó kör 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 naplem által szolgáltatott áramerősség és a töltőáram változását egyaránt mértem (28. b) ábra). Értelemszerűen ez egyben drasztikus teljesítményvesztést is jelentett.



28. ábra. A felületi szennyeződés 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 fotovoltaiikus 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 napelem paneleknek 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 termográfiai 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 üzembehelyezett napelemes rendszerek 70%-nak esetében található kisebb-nagyobb mértékű hibák [66].

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 [67]. 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 napelem panel 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 μm). 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 [71, 72, 73].

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

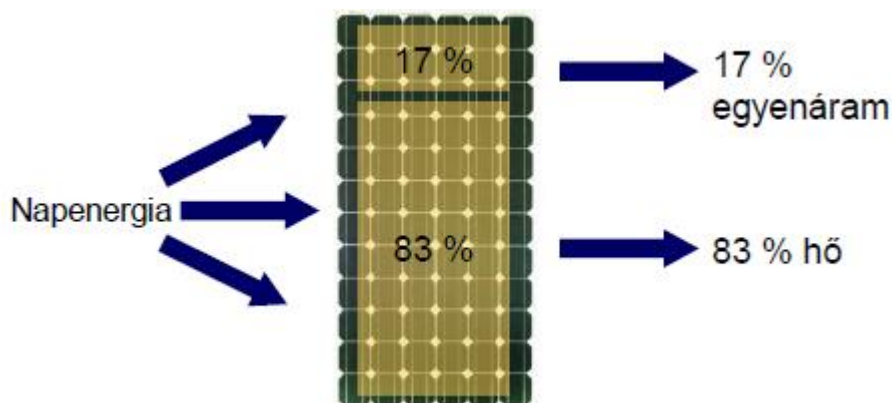
- *Hőkamerával felszerelt drónok alkalmazása a vadgazdálkodásban:*
 - Megfigyelése
 - Megszámlálása.
- *Hőkamerával felszerelt drónok alkalmazása az építőiparban:*
 - Hőszigetés vizsgálata
 - Ipari balesetek
- *Hőkamerával felszerelt drónok alkalmazása a határvédelemben:*
 - Határsértő tevékenységek
 - Rendfentartó szervek munkájának segítése
- *Hőkamerával felszerelt drónok alkalmazása napelemparkok vizsgálatára:*
 - karbantartás
 - hibadetektálás [68]

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 (29. ábra). 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/m² 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.



29. ábra. A szilícium alapú napelemem panelek energiaátalkítási hatékonysága

A modulokon keletkező hőnek több forrása is beazonosítható. A felületről visszaverődő hő nem járul hozzá az energitermeléshez, 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 közbe játszik 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.

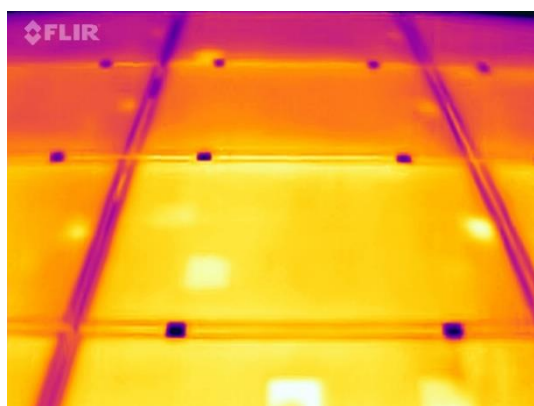
6.1.2. Az optimális mérési körülmények

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 közvetítőközegre 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 érték 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 [69]

A termográfiai hibakeresésnek két módja ismeretes. Az egyik lehetőség a kézi hőkamerával végzett művelet, amely során az operátor gyalogosan térképezi fel az erőművet (306. a ábra). E módszer előnye az egyszerűsége, azonban nagy alapterületű (20-50 ha) erőműparkok esetében fárasztó és időigényes. Továbbá az átlagos emberi testmagasságot figyelembe véve nehéz betartani az előírt kamera nézeti szöget, ami 15-25 %-os reflexiók 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 (30. a. és 32. a. ábra). A gyalogosan végzett hibakeresés számára nehézséget jelent a háztetőre (nem lapostetőre) szerelt napelemek vizsgálata, azonban lehetőséget ad úgynevezett hátoldali mérés elvégzésére (30 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 [70, 71, 72].



a

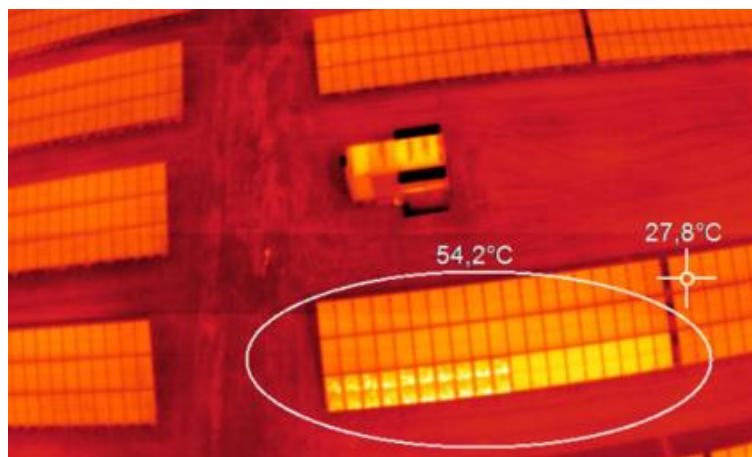


b

30. ábra. Erőművi napelem modulok (a) fényérzéken oldali és (b) hátoldali mérése

A másik lehetőség az erre a célra fejlesztett és felszerelt repülő drón alkalmazása (31. 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 napelem cellákból sugárzó infravörös sugárzás reflektálódik. Ezt a problémát érzékenyebb kamerák beszerzésével lehet orvosolni, amelynek legalább ≤ 80 mK hőérzékenységgel kell rendelkezni. Nagyobb távolságok esetén figyelni kell a kamerák felbontásának megfelelőségére is. További kényelmi funkció lehet az auto fókusz, a

forgatható kijelző, cserélhető lencse (különböző látószög pl. 9°, 23°, 32°), valamint mobiltelefonos applikáció [66, 73, 74, 75, 76].



31. ábra. Erőművi modulok hőkamerás állapotfelmérése repülő drónnal

A vizsgálatok során minkét ismertett esetben lényeges, hogy napfényes, tiszta időben a napelem panelek 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 500-600 W/m² besugárzási értéket vegyen fel a sikeres detektálás érdekében (32. b ábra). A vizsgált felület emissziós tényezője elhanyagolható, mivel kizárólag a hőmérséklet különbségeket megállapítására használatos eljárás.



a



b

32. 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 előírászerűen 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 napelem modulok károsodására, sérült csatlakozók korróziójára, esetleg gyártási hibáira, valamint az inverter vagy a kapcsolószekérny 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 [72, 74, 77, 78].

Működésképtelen modul

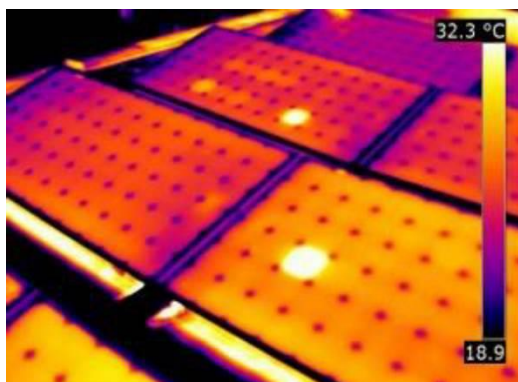
A nem működő modulok hőképe eltér a környezetükben lévő többi modul hőképétől. A hőmérséklet eloszlásuk feltűnően homogén, valamint hőmérsékletük alacsonyabb (33. ábra). A hiba oka lehet a nem megfelelő bekötés, vagy hibás csatlakozók vagy szakadt szolár vezetékek.



33. ábra. Egy működésképtelen modul hőkamerás képe

Hot-Spot hatás

Hot spot (forró pont) melegedésről akkor beszélünk, ha valamely kis terület a napelemben 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 (34. ábra), amely visszafordíthatatlan károkat okoz a napelemben [70, 74, 77, 78, 80]. Ilyenek például a cella vagy üvegtörés, repedés, forrasztások fémes kontaktok olvadása, deformálódása, napelem öregedés.

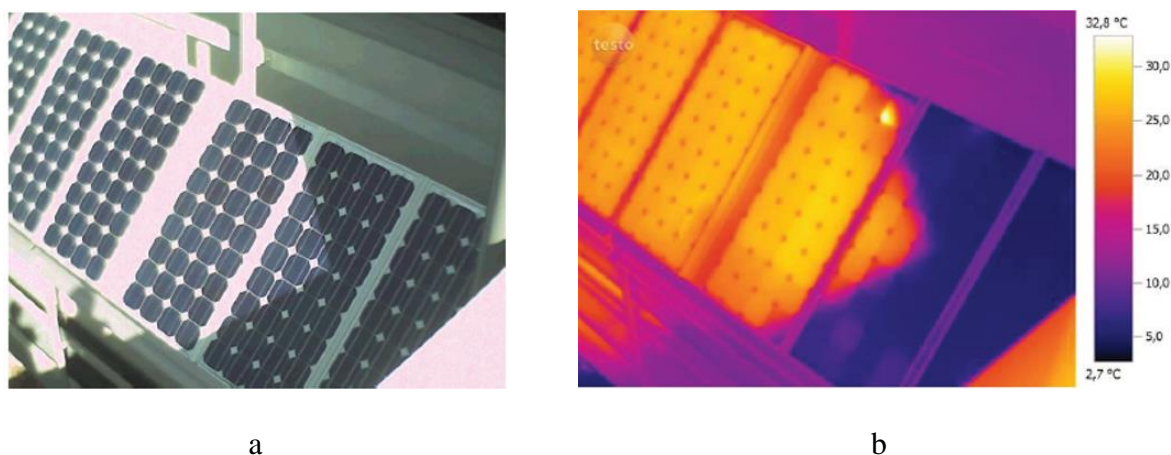


34. ábra. Hot-spot jelenség hőkamerával készített felvételen

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 háttérében valójában számos kiváltó ok állhat, így inkább tekinthető egy összefoglaló fogalomnak.

Árnyékhatás – szennyeződés

Nagy alapterületű erőmű parkok esetében előfordulhat, hogy a felhőzet a napelem modul sztringek bizonyos hányadát leárnyékolják, 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 (35. a) ábra).

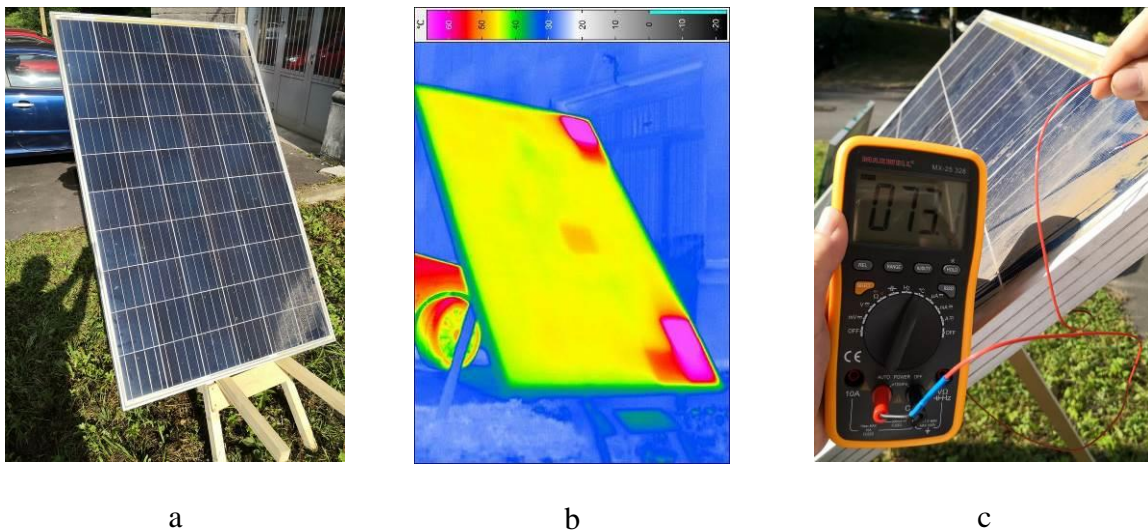


35. ábra. A nagy felületen árnyékolt panelek hőmérséklet eloszlása

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 (35. 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.

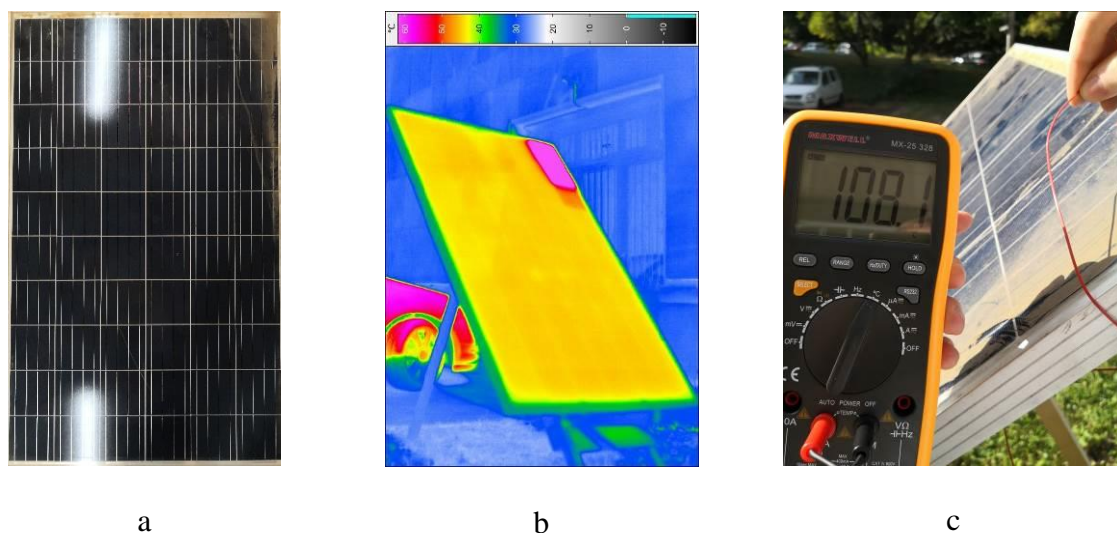
A 36. ábrán által bemutatott felvételek nem egy erőművi felmérés során, hanem egy a Miskolci Egyetemen elvégzett referenciakísérlet során készültek. A vizsgált 260 Wp napelem modulok ugyan egy erőműből származnak, azonban leszerelésre kerültek. A 36. a) ábrán (a modul normál, vizuális képén) megfigyelhető, 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. Azonban a két sarokban a szennyeződés miatt jelentős túlmelegedés volt tapasztalható. A 36. b) hőkamerás képen, melyet egy Jenpotik Variocam használatával készült, láthatóvá válnak a hot-spot

jelenségek. A maximális hőmérséklet meghaladta a 73°C -ot (36. c) ábra), ami kontakt hőmérséssel lett ellenőrizve [72, 77, 78].



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

A 37. 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 (37. a ábra). Mivel ennek a közel azonos teljesítményű panelnek csak egy forrópontja keletkezett (37. 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 (37. c ábra).



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

Fizikai sérülések

Törött üvegfelület alatt mikrorepedések jelenhetnek meg (pl. jégcső hatására, 38. ábra). A cellatörések cellazárlatot okozhatnak. A fényvezékes félvezetőréteg széleinek letöredezése teljesítményvesztést eredményez [70, 74].



38. ábra. Jégcső okozta sérülés a modul üveghorításán

Elszineződés és delamináció

A modult felépítő rétegek közti ragasztóanyag (etilén-vinil-acetát, EVA) elszineződése egyrészt esztétikailag rontja a panel értékét, másrészt az anyag fényáteresztőképességét csökkenti (39. 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 elszineződés. Az elszineződés az EVA bomlásának eredménye, melyet az UV sugárzás indikál.



39. ábra. Elszineződött napelem modul

Delaminációnak nevezzük azt a jelenséget, amikor nagy kiterjedésű tapadásvesztés következik be a napelem panel 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. 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.



a



b

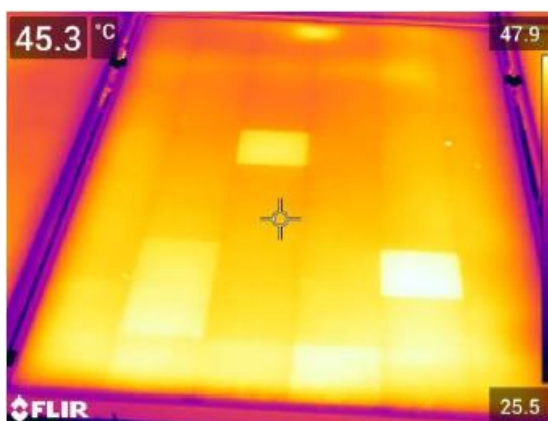
40. ábra. A delamináció jelenségének különböző esetei

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 párát. 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 [74].

Mismatch / patchwork mintázat

A mismatch azt jelenti, hogy egy modulba többféle, különböző paraméterekkel rendelkező napelem cellák kerültek gyárilag beépítésre. Az eltérő teljesítményű napelem cellák esetében a soron belül a leggyegébb cella határozza meg a maximális áramot, továbbá eltérő módon fognak melegedni (41. 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 $\pm 3\%$. Azonban idővel az eltérések értéke megnőhet, ezáltal a káros hatásuk is felerősödhet. Számos modul esetében emberi szemmel, a látható fénytartományban is megfigyelhetőek kristályhibák, amikor nem homogén a fényzéken anyag színe. Valamint panelen belül is szemmel láthatók a szilícium lemezek közti színárnyalatbeli különbségek (41. b ábra) [74].



a



b

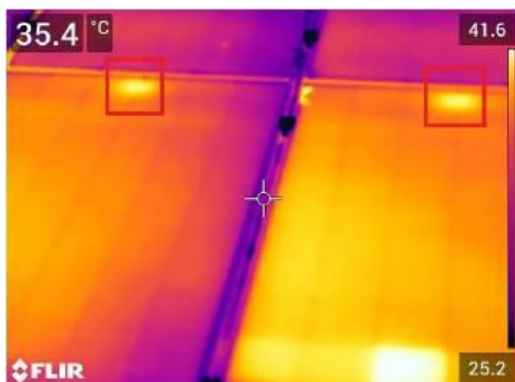
41. ábra. Mismatch hiba megjelenése (a) a hőkamerás felvételen, (b) szemmel is látható kristályszerkezeti hibák és eltérő szilícium színárnyalatok

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.

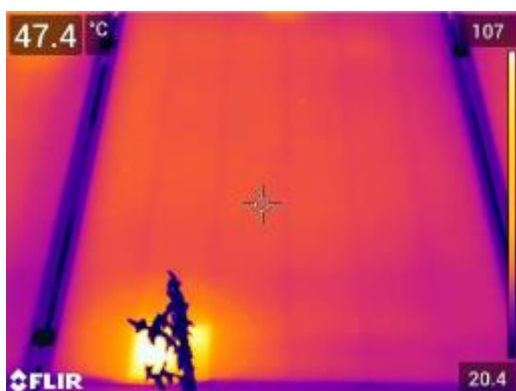
Egy hibás bypass dióda szükségtelenül is letilthatja a teljes cellasort, akár az egész modult is. A hot spot hatást vagy az árnyékolás hatását nem tudja kiküszöbölni. A termelt áram a modulon túlmelegedést okozhat, sőt még a sértetlen cellák is túlmelegedhetnek, sérülhetnek (magas záróirányú áram). Továbbá, 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 (42. 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 teljesítmény csökkenést okoz a kimeneten. Hosszútávon a cella átlagosan megemelkedett hőmérsékletű működése, lassú fokozatos öregedéshez és meghibásodáshoz vezet, állandó hozam csökkenéssel [70, 72, 74, 77, 78].



42. ábra. A napelem modulok kapcsolódobozainak melegedése

A következő hibaforrás gyakori probléma a talajszinre telepített rendszereknél, azonban kiküszöbölhető az aljnövényzet rendszeres gyomirtásával, vagy kaszálásával. A 43. ábra képein lévő modulok legalsó cellái az elburjánzott növényzet árnyékatásának vannak kitéve. A két modul átlaghőmérséklete között nincs jelentős különbség, azonban a maximális hőmérséklet értékek között már rendkívül nagy. Az ok, hogy az 43. a) képen a növényzet egyetlen egy cellát takar, amely esetben a legintenzívebb a melegedés, mivel a leárnyékolt cellában összpontosul az összes többi a modult felépítő ép cella energiája. Ilyen esetben fennáll a cella teljes tönkremenetelének lehetősége. Ellenben a 43. b) képen szinte a teljes alsó cellasor melegszik, így a modul többi cellájának energiája a takart cellák elleneállításainak arányában eloszlik. Ebből kifolyólag a maximális forrópont hőmérséklete alacsonyabb. A kontrolláltabb melegedés kevésbé károsítja a fényérzékeny anyagot, viszont melegedés és árnyékatás érinti mindhárom bypass diódát, ezért mindhárom cellafűzér lekapcsolódhat, ennek megfelelően a teljes panelben megszűnhet az enegiatemelés.



a

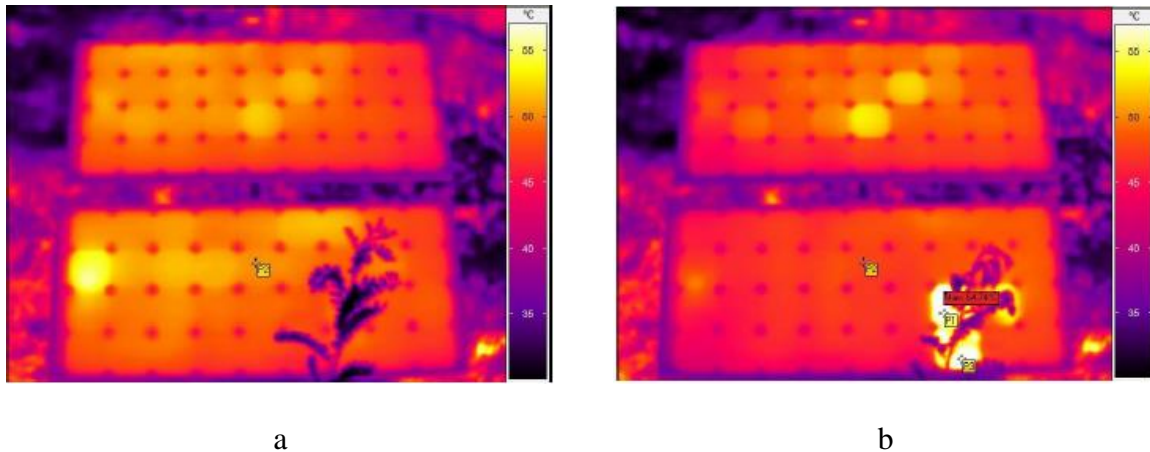


b

43. ábra. A talajhoz közeli napelem modul (a) egy celláját növényzet árnyékolja, (b) több celláját növényzet árnyékolja

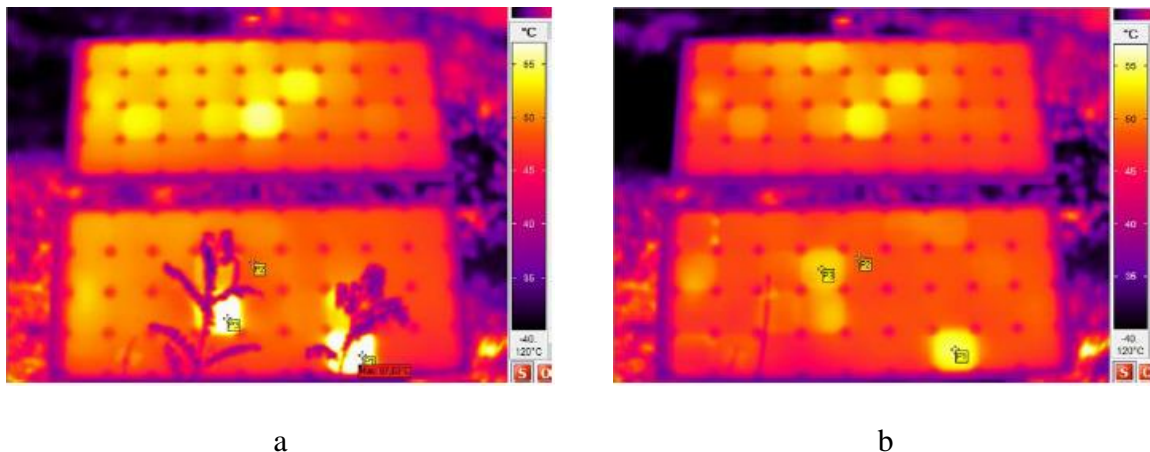
A növényzet hatásának vizsgálatára szolgáló referencia mérések elvégzése egyszerű feladat. Az első esetben két 80 Wp csúcsteljesítményű modul lett elhelyezve egy állványon. A modulok nem lettek összekapcsolva, valamint egyenként rövidre lettek zárva. A felső modul működése nem lett befolyásolva, ellenben az alsó modul árnyékatás vizsgálatnak lett alávetve (44. és 45. ábrák).

A 44. a) ábra a kísérlet kiinduló állapotát mutatja, amikor még minden cella hőmérséklete közel azonos (50 °C), azonban megjeleni egy árnyékhatás. A növényzet által okozott hotspot hőmérséklete 64 °C, a jelenség 3 db szomszédos cellát is érint (44. b) ábra). A modulok képének 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 [72, 74].



44. ábra. A növényzet árnyékhatás vizsgálatának (a) kezdőállapota, (b) hot-spot jelensége

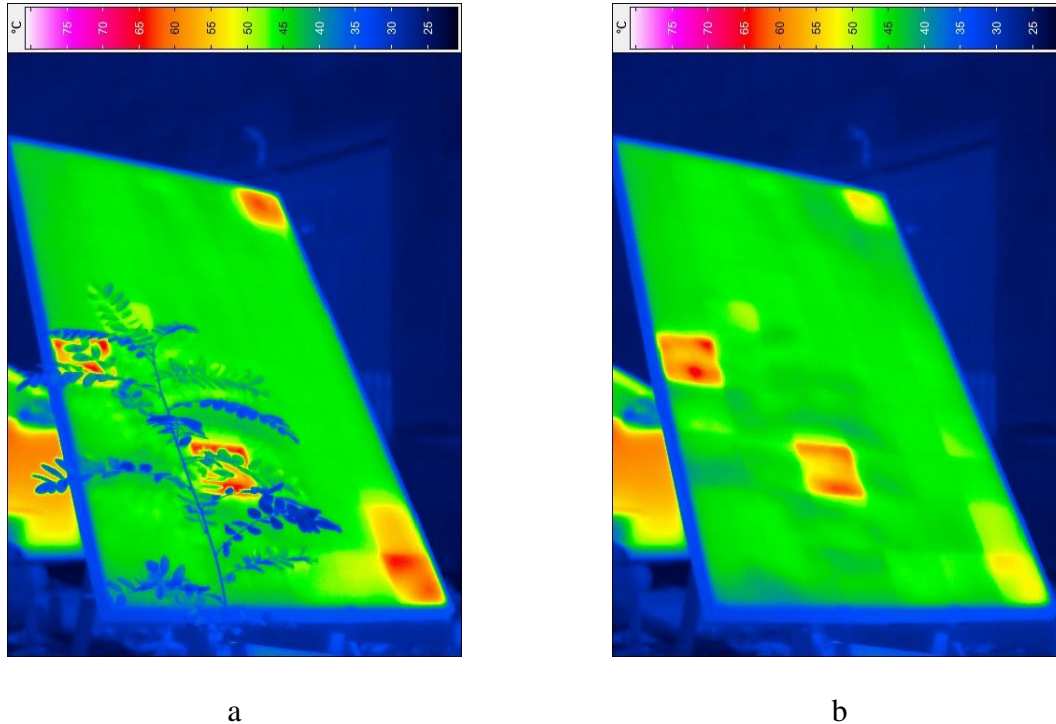
A 45. a) ábra mutatja azt az állapotot, amikor egy újabb árnyékoló növény lett a modul elé helyezve. A 45. b) ábra mutatja az árnyékhatások megszűnése utáni állapotot. A zavaró hatás megszűnése után is hosszú időn át fennmarad a cellák túlhevültsége és emiatt képes negatívan befolyásolni az energiatermelést.



45. ábra. A növényzet árnyékhatásának (a) növelése, (b) az árnyékhatás megszűnése utáni állapot

Erőművi méretű és onnan származó modullal is elvégeztem a kísérlet (46. 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

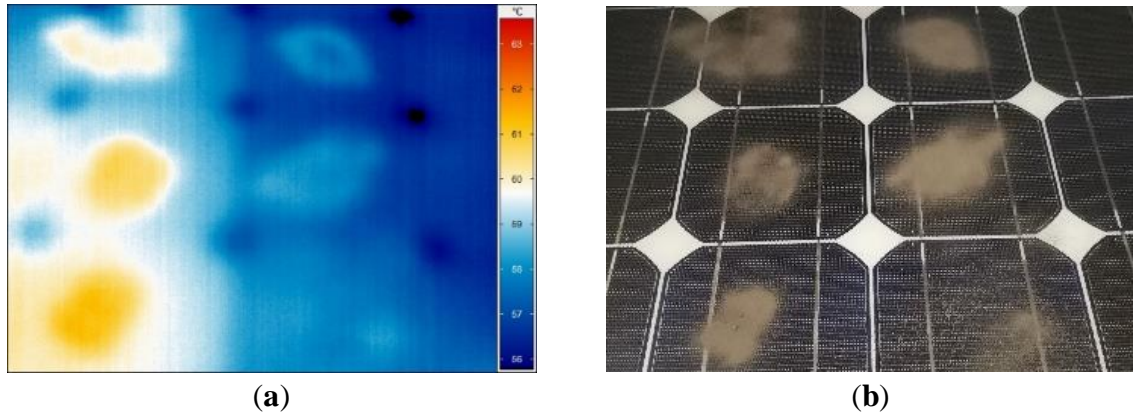
feltárni a napelem panelek állapotát, illetve az esetleges árnyékjelenségeket, továbbá évi rendszerességgel ellenőriztetni. Amennyiben már a telepítést követően, az első használat során is tapasztalhatók cella-defektusok, akkor célszerű egyből a forgalmazóhoz/gyártóhoz fordulni, mert akkor még érvényesíthető lehet a garancia.



46. 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 fényhőt halmoznak fel (47. 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 [71, 73, 74].



47. ábra. a) Thermográf felvétel, b) a napelem panel szabad szemmel látható képe

Az elektrolumineszcens kísérletekhez hasonló méréseket hőörögzítő kamerával 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 47. ábra a szennyező anyagok hatásának mérési felvételeit mutatja. A képek a panel hűtési folyamata során készültek, zárt dobozban. A világítást már lekapcsoltam. 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.

6.2. Flash teszt

A flash teszt (magyar szövegkörnyezetben gyakran villanólámpa tesztként említve) egy ex-situ módszer, amely során a rendszer megbontásával a napelem panel 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 koszos üvegfelülettel mért tényleges értékkel [41, 57, 63].

6.2.1. A flash teszt mérőberendezése

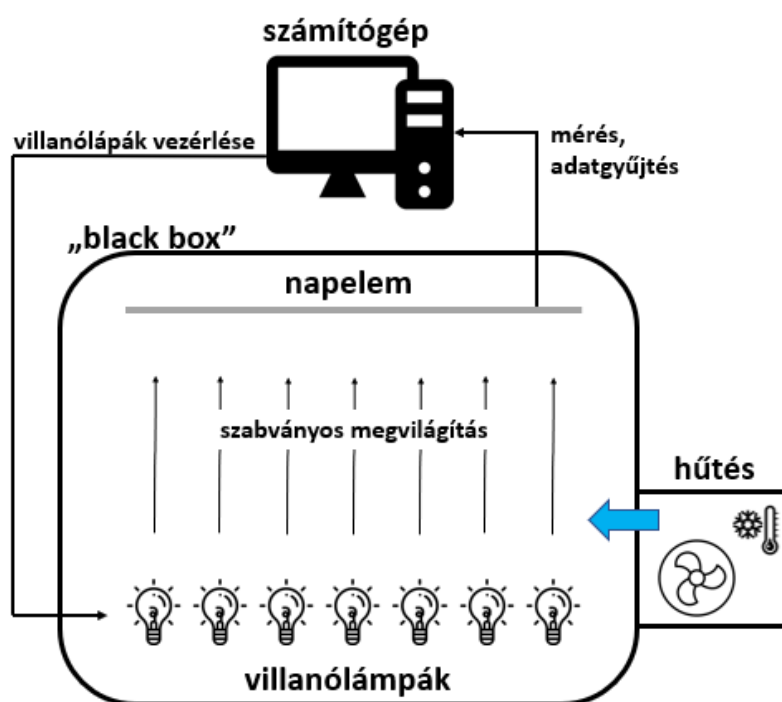
A napelem modul által generált kimeneti teljesítmény megfelelésének mérésére használt készülék egy villanófény-teszt gép vagy napszimulátor. Ebből kifolyólag flash tesztet számos forrás napszimulátor tesztnek is nevezi. A villanófény teszt során a PV-modult egy xenonnal töltött ívlámpa rövid (1 ms és 30 ms közötti), erős (100 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°C -os cella hőmérsékletet és 1000 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° -os dőlésszögű felületre esik, miközben a Nap $41,81^\circ$ -os szöget zár be a horizont felett [81, 82].

A használt szabványok nem feltétlenül tükrözik a tényleges működési feltételeket. A gyorsított eredménylapja általában felsorolja az összes tesztelt modult 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 egyenetlensége: $< \pm 1\%$;
- megvilágítás ereje: $200 - 1200 \text{ W/m}^2$, akár 1 W/m^2 felbontással;
- fényimpulzus ideje: $30 - 60 \text{ ms}$;
- fény spektrum 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 48. ábra a leggyakoribb elrendezési sémát mutatja be. Ez a kompakt elrendezés, amikor a villanólámpák egy zárt és teljesen lesötítített 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 napelem modulok, amelyek mérete már meghaladhatja a 2,5 métert is. Ilyen nagy modulok vizsgálatára egyszerűbb megoldás lehet egy lesötítített 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.



48. 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 referenci 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 (tiszta modul*)	aP (W)	-
Tényleges teljesítmény (koszos modul**)	aP' (W)	
Maximális munkaponti teljesítmény	P _{mpp} (Wp)	260±3%
Maximális munkaponti feszültség	U _{mpp} (V)	34,40
Maximális munkaponti áramerősség	I _{mpp} (A)	7,47
Üresjárási feszültség	U _{oc} (V)	36,54
Rövidzárási áramerősség	I _{sc} (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 vizsgálatott 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 _{mpp}	U _{mpp}	I _{mpp}	U _{oc}	I _{sc}	FF
	(W)	(W)	(Wp)	(V)	(A)	(V)	(A)	(%)
PV4115	200,24	212,31	254,73	34,02	7,49	36,40	7,99	87,60
PV9146	189,79	201,24	250,58	33,43	7,50	36,81	7,73	88,10
PV4092	185,63	208,85	255,80	33,79	7,57	36,64	7,88	88,60
PV4032	192,28	215,29	260,33	34,28	7,59	36,38	7,98	89,60
PV4160	201,89	219,48	257,07	33,56	7,66	36,34	7,81	90,60
PV4179	178,14	209,03	245,33	32,48	7,55	35,23	7,95	87,60
PV4133	169,58	220,57	261,74	34,13	7,67	36,50	8,30	86,40
PV4658	168,59	196,17	238,45	33,56	7,10	36,61	7,81	83,50
PV4661	180,11	196,19	239,15	33,09	7,23	35,80	7,84	85,20
PV3930	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). Azonban, ha jobban megvizsgáljuk a tényleges teljesítmény értékeket az eredmény már elgondolkodtató [41, 57, 63].

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)
PV4115	200,24	212,31	254,73	12,07	42,42	54,49
PV9146	189,79	201,24	250,58	11,45	49,34	60,79
PV4092	185,63	208,85	255,80	23,22	46,95	70,17
PV4032	192,28	215,29	260,33	23,01	45,04	68,05
PV4160	201,89	219,48	257,07	17,60	37,59	55,18
PV4179	178,14	209,03	245,33	30,89	36,30	67,19
PV4133	169,58	220,57	261,74	50,98	41,17	92,16
PV4658	168,59	196,17	238,45	27,57	42,28	69,86
PV4661	180,11	196,19	239,15	16,07	42,96	59,04
PV3930	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 koszos 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 koszosan és tisztán mért tényleges teljesítmények különbségét, a tiszta tényleges és MPP teljesítmény különbségét (5. oszlop), valamint a koszos 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 tükrözik, hogy a felületi szennyeződés leradódásának mértéke véletlenszerű a légkör sajátosságai okán. Az MPP teljesítményértékek és tisztán mért tényleges teljesítményértékek szórása jóval kisebb. Az átlagos teljesítménykülönbség 42,74 W volt. A legkisebb különbség 36,3 W, míg a legnagyobb 49,34 W volt. A koszosan 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 koszos aktuális teljesítmény és az MPP teljesítmény között, ami 92,16 W. Ennek oka, hogy a modul kimagaslóan koszos volt. Ennek a modulnak növekedett legnagyobb mértékben a teljesítménye a tisztítás hatására, számszerűen 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.

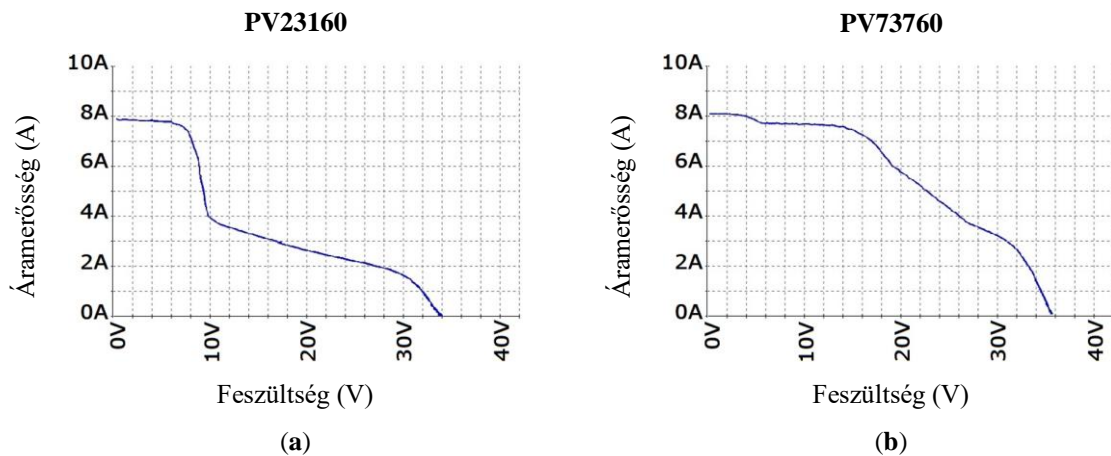
6.2.3. *A flash teszt során kapott eredmények kiértékelése*

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

A 49. 50. és 51. ábra hat eltérően viselkedő napelem modullal végzett flash teszt során kapott I-U karakterisztikát szemlélteti [81]. Jól megfigyelhető, hogy a PV23160 modul (49. a ábra) és a PV73760 modul (49. b ábra) I-U görbéje nem felel meg sem a hibamentes szolármodul 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 napelem modulra. 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.

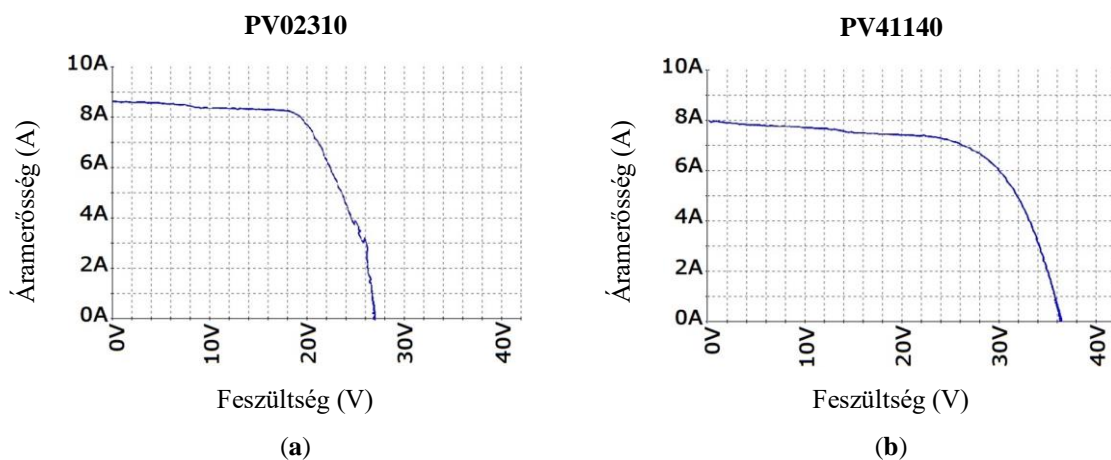


49. ábra. (a) A PV23160 modul és (b) a PV73760 modul I-U karakterisztikája

A PV02310 modul (50. 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 (50. a) ábra) arra lehet következtetni, hogy a modul többnyire ép cellákból épül fel, a hiba mindenképp egy cellafüzért érint.

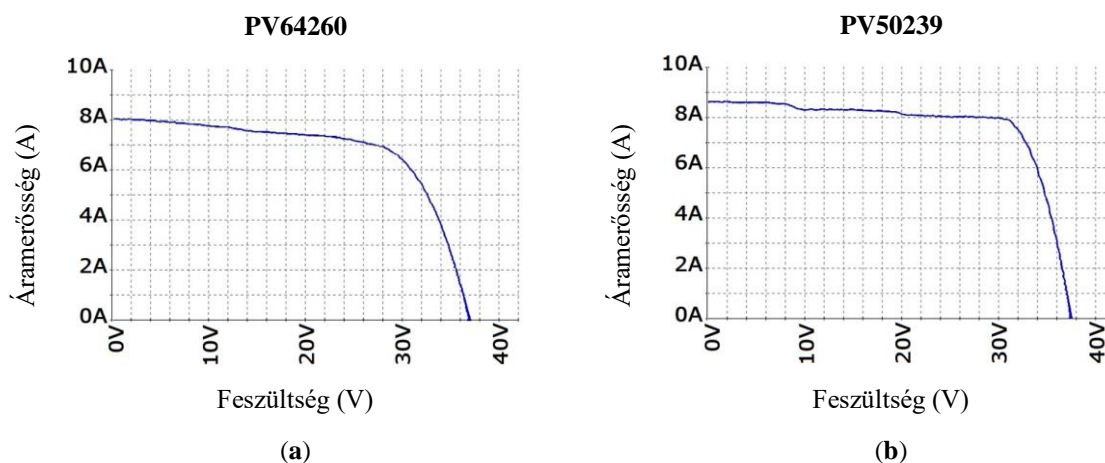
Mivel ezeknek az erőművi moduloknak 60 cellából épülnek fel, a modulok a belsejében 3 cellafűzér van, amelyek egyenként 20-20 db cellát kötnek össze. Ezek közül egy biztosan inaktív. A feltételezést a modul elektroluminescens képe (63. ábra) egyértelműen mutatja, hogy két egész sorban is (ez egy cella fűzér) nem működő cellák vannak [82].

A PV41140 modul görbéje azt mutatja, hogy a modul kis mértékű teljesítmény csökkentés ellenére is jól működik (50. b) ábra) [82]. 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 lelerítésében 14 V-nál. Ennek okán a kitöltési tényező alacsony, a munkaponti értékek elmaradnak az elvárt értéktől.



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

A PV64260 modul flash tesztjének eredménye (51. a) ábra) nagyon hasonlít a PV41140 jelleggörbéjére, hogy a modul kis mértékű teljesítmény csökkentés ellenére is jól működik [82]. Az 51. b) ábrán látható gyakorlati jelleggörbe (PV50239) már kifejezetten jól közelíti a napelem modul elméleti karakterisztikáját. Azonban el a jelleggörbe is csak közelítőleg felel meg, a görbe tartalmaz kisebb egyenetlenségeket az áramerősség csökknése során, ettől eltekintve villamos értelemben a modul teljesítőképessége hibátlan [82].



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

Ki kell jelenteni, hogy a hőkémerás hibafeltáráshoz hasonlóan a flash teszt eredménye a hibák pontos beazonosításában elsősorban csak sejtésekre, sok esetben bizonytalan következtetésekre ad lehetőséget [82]. Ugyanakkor kétségtelen, hogy a villamos paraméterek tekintetében pontos és a jelleggörbének köszönhetően szemléletes képet ad. Azonban, 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 [83, 84, 85, 86, 87, 88]. [82].

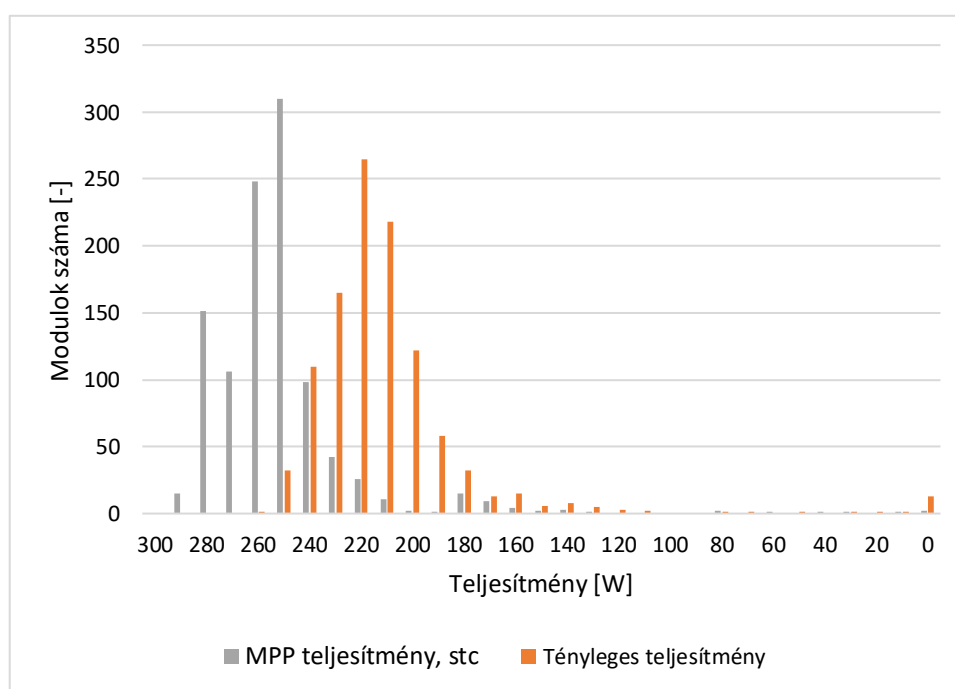
6.2.4. A flash teszt eredmények statisztikai alapú bemutatása

Mivel az emőmű 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 52. 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

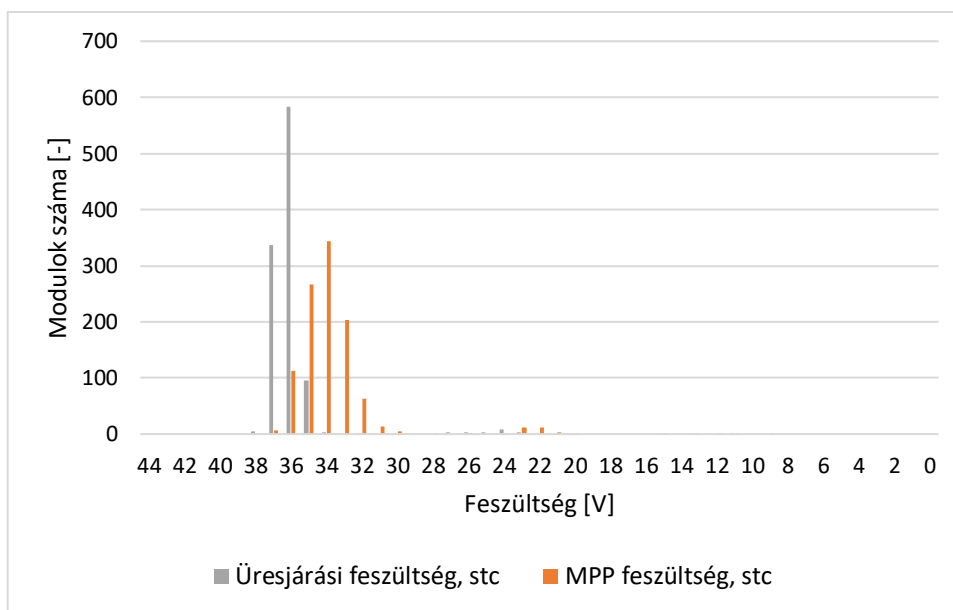
értékek 29%-a 250 W és 260 W között van (313 modul). Az MPP teljesítményértékeinek körülbelül 27%-a kisebb, mint 252,2 W (282 modul), 16%-a pedig kevesebb, mint 244,63 W (173 modul). A panelekre az első 10 évre 90%-os, a következő 15 évre pedig 80%-os teljesítménygarancia vonatkozik. Négy év elteltével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



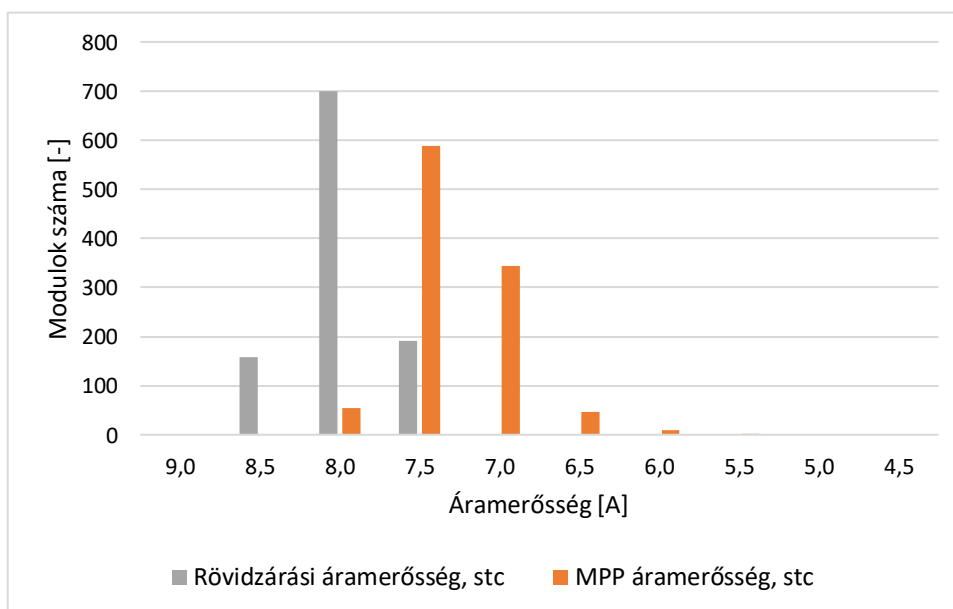
52. ábra. A mért tényleges és MPP teljesítményértékek eloszlása

Az 53. ábra a mért feszültségsorok eloszlását mutatja. Az MPP feszültségsorok mediánja 34,44 V, az átlagos MPP feszültségérték pedig 33,56 V. Az MPP feszültségsorok 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 feszültségsorok mediánja 36,7 V, az átlagos értéke 36,01 V. A üresjárási feszültségsorok 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).



53. ábra. A mért üresjárásos és MPP feszültségértékek eloszlása

A 54. 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).



54. ábra. A mért rövidzárlati és MPP áramerősségértékek eloszlása

6.3. Elektrolumineszcens vizsgálatok

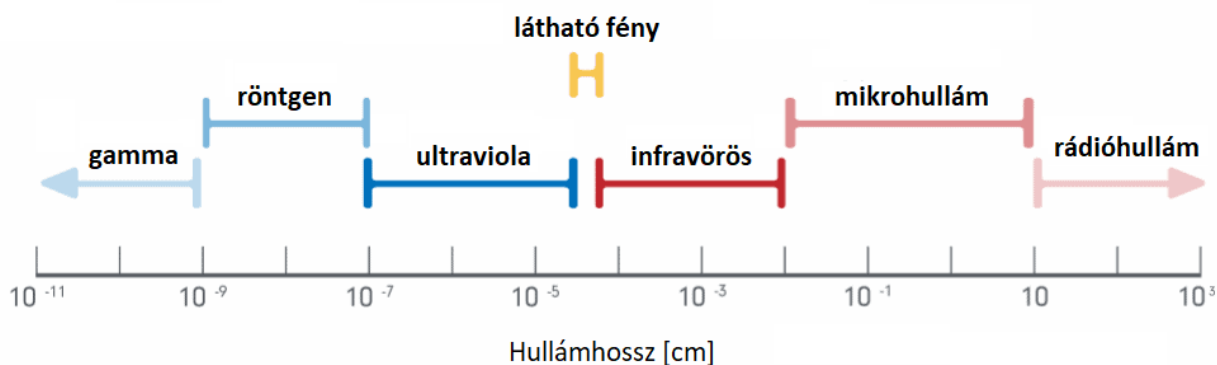
Az elektrolumineszcens (EL) vizsgálatok során átfogó és rendkívül szemléletes képet kaphatunk akár egy teljes napelem modul állapotáról. A vizsgálat végeredménye valóban egy digitális fénykép. A felvétel elkészítéséhez a fényérzéken szilícium rétegnek fényt kell kibocsátania annak abszorbeálása helyett. 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 bocsájtanak ki. A napelem cellák 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 [88, 89, 90].

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 árjárva 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 [91, 92].

A gyakorlatban jelentős bevizsgálandó mintaszám esetén célszerű, ha a mérés számítógép által vezérelt. Beleérté a tápegység vezérlését, az EL kamera irányítását, valamint szükség esetén az eredmények feldolgozását és kiértékelését egyaránt 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 besötített helyiség berendezhető a vizsgálatok elvégzéséhez.

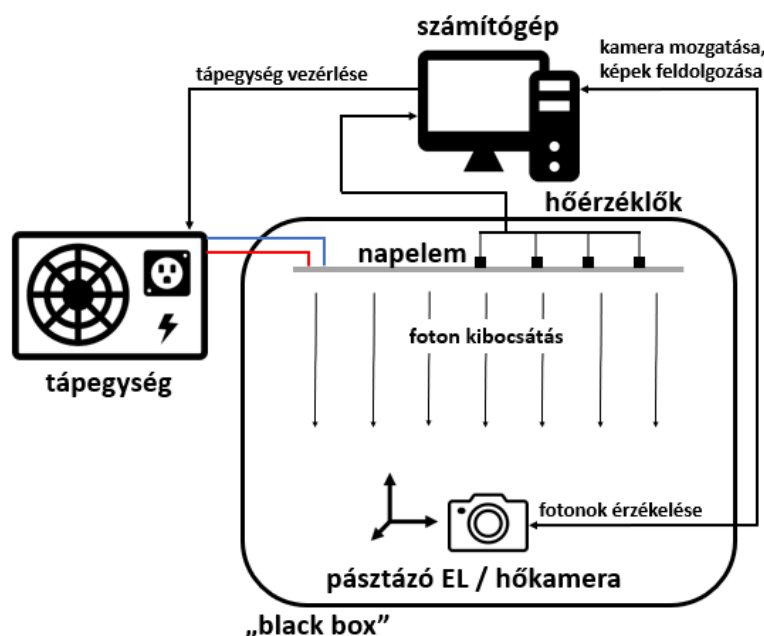


55. ábra. Az elektromágneses spektrum felosztása

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 végigjárja 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).

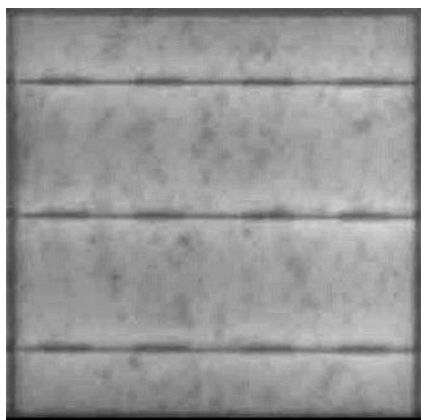


56. ábra. A elektrolimeszcencia tesztberendezés elvi felépítése

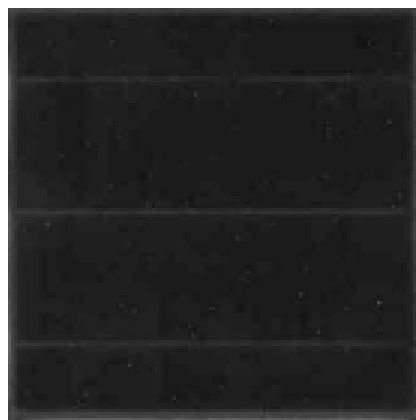
6.3.2. Leggyakoribb EL teszttel azonosítható szilícium cella hibák

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

Ezek a kiválasztott napelem cellák 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 elektrolimeszcencia eredmények.



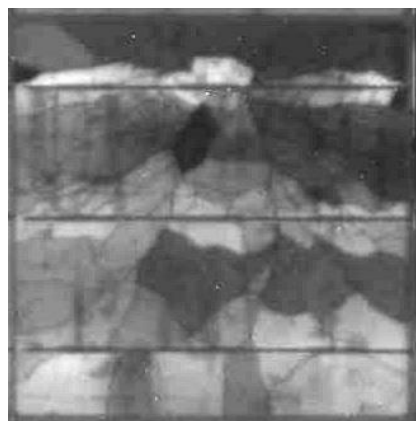
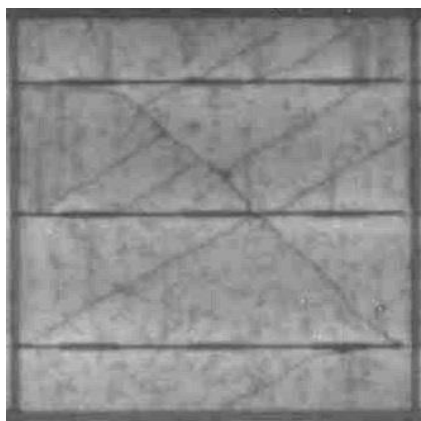
a



b

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

Etalonként az 57. a) ábra egy hibamentes cellalapkát mutat be. Ki lehet jelteni, hogy az egész lapka világos, a szilícium cellák fény kibocsátását semmilyen jelentős hiba nem befolyásolja. Azonban az ábrán kisebb homályos foltok is felfedezhetők, amelyek kristályszerkezeti 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 részből származnak (a szeleteléskor egymást követték a lemezek). Ezeknek a kis anyagminőségbeli 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 [93].



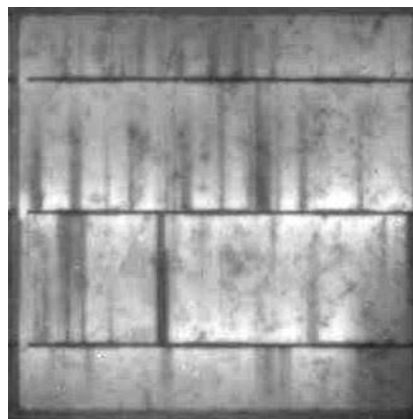
58. ábra. a) Hosszú, keskeny repedések; b) Számos repedés által eredményezett, különböző mértékben elszigetelődött szilícium cella töredékek

Az 58. a, 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. Azonban, idővel ezek a törések szélesebbre nőhetnek, akár jelentős területek elszigetelődését eredményezve (pl. 58. b) és 59. a) ábra). Az 59. b) ábra mutat halvány

ujjmegszakításokat („finger interruption” hibákat), melyek még a kialakulásuk kezdetén vannak. Ezek a gyűjtősínekre merőlegesen, azokból kiindulva figyelhetők meg [88, 94, 95, 96].

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 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 [88, 96, 97].

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

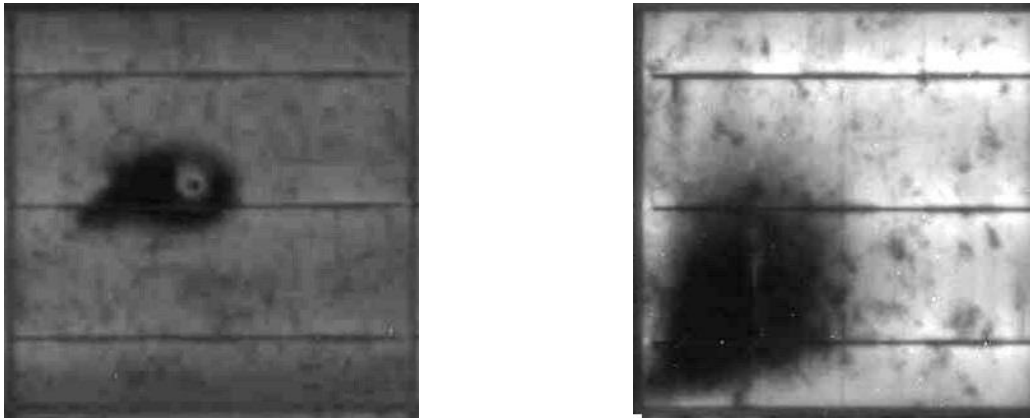


59. ábra. a) Széles törés által okozott, teljesen levált cellatöredék; b) példák ujszerű hibákra

Az 59. b) ábra az úgynevezett ujjmegszakításokat mutatja, amely anyagsérülések jellezően a gyártási folyamatra vezethetők vissza. Az ujjmegszakítások nem feltétlenül csökkentik a teljesítményt, kivéve azt az esetet, amikor forrasztási hibák hatására jelennek meg. Utóbbi esetben bizonytalan mértékű teljesítmény veszteséggel lehet számolni. Komplex összefüggés mutatkozik a méretük, pozíciójuk és darabszámuk valamint az áramtermelésre gyakorolt hatásuk között. A repedések megjelenése is eredményezhet ujjmegszakításokat, és akadályozhatja az áramátvitelt, ami befolyásolja a fényérzékeny lemezek működését és végül a modulok részleges vagy teljes meghibásodását okozza [93, 96, 97].

A 60. a) ábra a hot-spot jelenség képét mutatja, amely a lerakódott felületi szennyeződés hőszigetelő hatásának következménye lehet. (pl. por, madár ürülék, felületre tapadt falevél). Ezenkívül ezt a sérülés típusát forrasztási hiba is okozhatja. Utóbbi esetben közvetlenül a gyűjtősín 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 [98, 99]. Ez a hőmérséklet-eloszlás inhomogenitása teljesen károsítja

a fényérzéken szilícium cellákat, akár a napelem lemez 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 [90, 100]. 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 napelem modulok jelentős felületi szennyeződésnek voltak kitéve. A fényérzékeny anyagot érintő hiba típus csökkenti a csúcsteljesítményt, valamint a modul élettartamát is jelentős mértékben csökkentheti. A napelem modulok 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 fenyegetheti.

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 cücszeljesítményű erőművi panelra vonatkozik. A hibatípusok felsorolása a leggyakoribb és legártalmatlanbb 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).

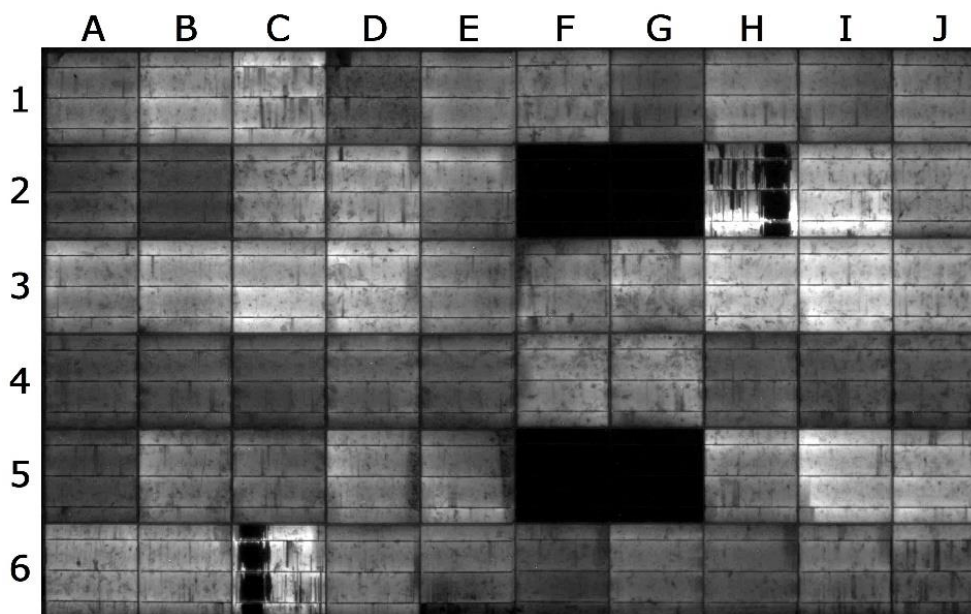
10. táblázat. *A megengedett hibamennyiség határértékek erőművi napelemmodulok esetében*

Hibatípus megnevezése	Maximális hibaszám (cella/modul)	Arány (%)
1. Kisebb cella repedések	60	100%
2. Nemkirtikus mikrorepedések	30	50%
3. Ujjszerű hibák repedés nélkül	30	50%
4. Ujjszerű 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 teljesítményveszteség nélkül	3	5%
13. Többtörédes törés teljesítményveszteséggel	0	0%
14. PID	0	0%
15. Karcolás a hátoldalon	0	0%

6.3.4. *Erőművi modulok elektrolumineszcencia alapú teljes kiértékelése*

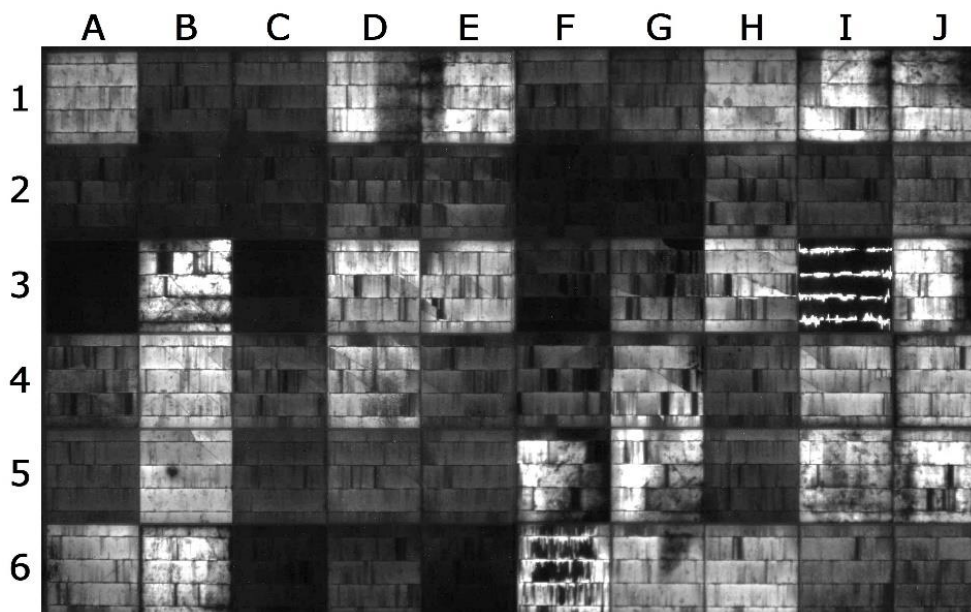
Az erőművi modulok elektrolumineszcencia (EL) vizsgálatai során számos hibatípus előfordulása nyert egyértelmű bizonyítást. A korábbi fejezetben példadént felsorolt 6 db modul flash tesztheihez kapcsolódó EL képek bemutatása következik. A képek sorrendje megegyezik a flash teszt karakterisztikák és a 9. táblázat sorrendjével, mely a teljesítmény veszteség mértéke szerint rendezi sorba a modulokat.

A 51. 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. Azonban 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

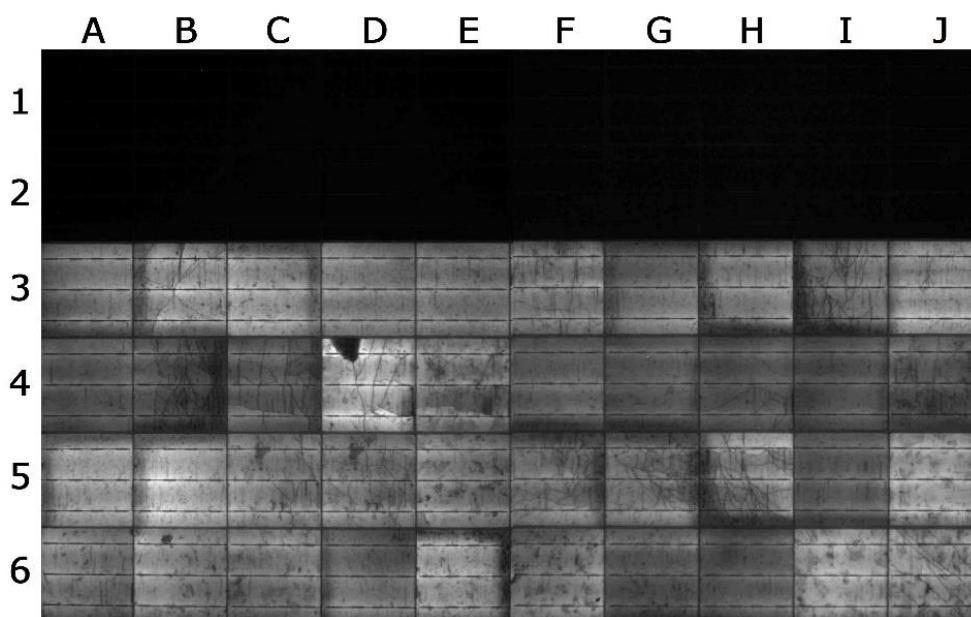
A 62. ábrán a PV73760 napelem modul elektrolumineszcencia képe látható, amelynek teljesítménye körülbelül a fele volt az elvárható névleges csúcsteljesítményének (144 Wp, 55,5%, 9. táblázat) a flash teszt során. Láthatók teljes cella kiégések (A3 és C3), nem kritikus mikrorepedések (B4, C4) és kritikus repedések (I3) egyaránt, valamint hotspot jelenségre (felületi szennyeződés, forrasztási hiba) utaló jel az egyik gyűjtősín közelében (B5) [89, 101]. Szinte minden egyes cella ujjmegszakításokat 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.



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

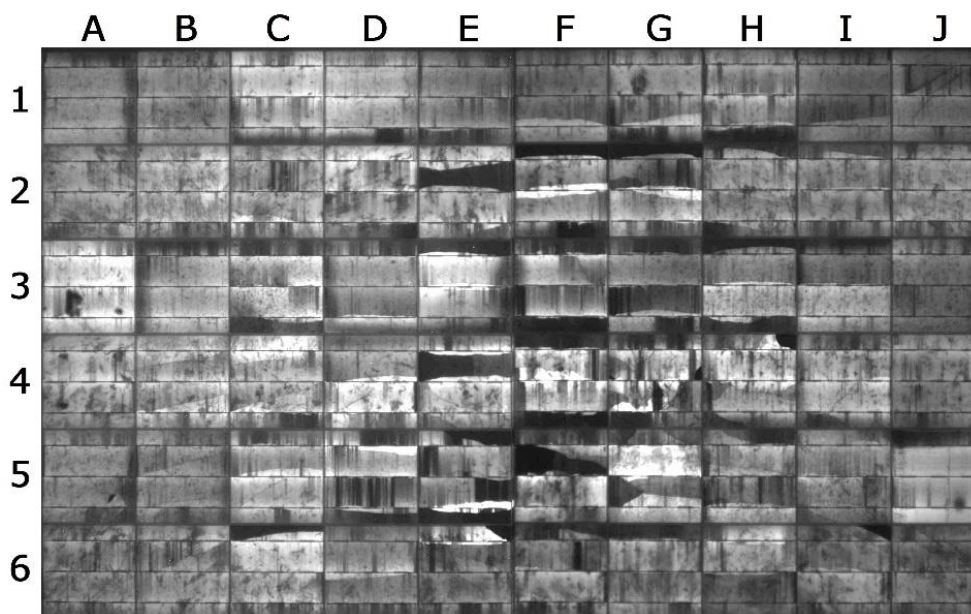
A 63. ábra egy olyan panelt (PV02310) mutat, amely minden bizonnyal egy erőművi string (asztal) alsó sorából származhat. Ez lehet bypass dióda hiba is, azonban ha a jelenség nagy számban lép fel egymás melletti modulokban, akkor valószínűbb, hogy a telepítési hibából eredő árnyékhatás eredménye. Lehet, 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.

Ezenkívül 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.



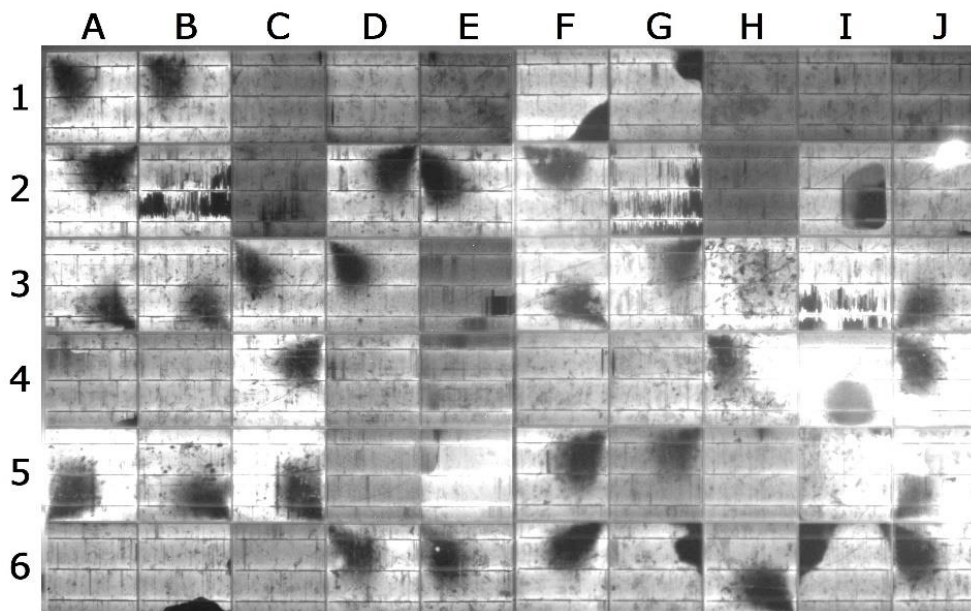
63. ábra. A PV02310 modul EL képe egy teljesen inaktív cellafüzérrel

A 64. ábra PV41140 modult muatja, 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 [101]. 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 ujjmegszakításokat tartalmaz a teljes képen (pl. C2, D5, H5,...) [89] és több cellában is vannak repedések (A6, B6, C4,...), valamint forrasztási hiba (A3, A4, J5) [89, 91, 92, 96, 101, 102].



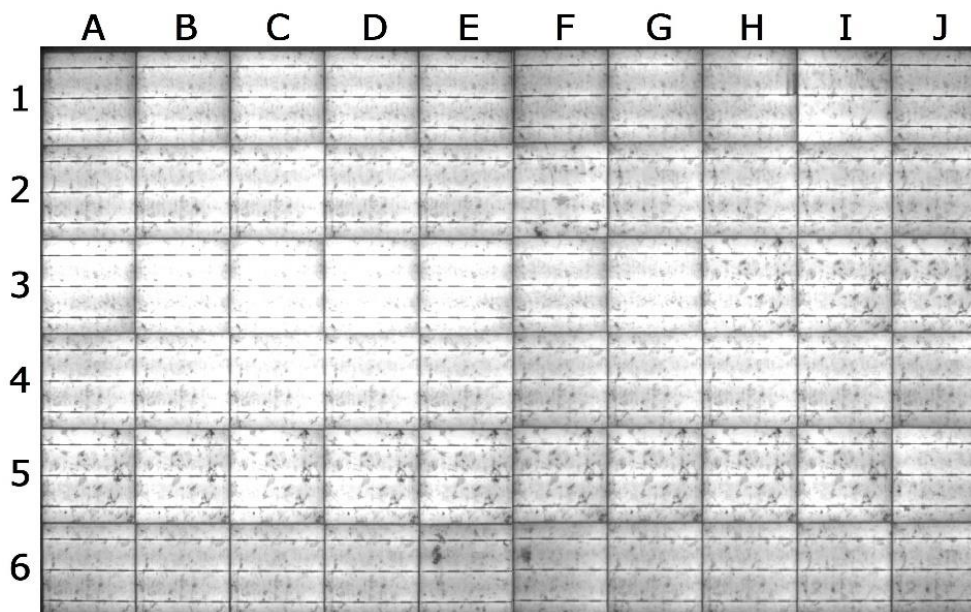
64. ábra. A PV41140 modul EL képe, mely átlagos mértékben károsodott

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) [103, 104, 105, 106, 107].



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

A 66. ábrán a **PV50239** napelem modul 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

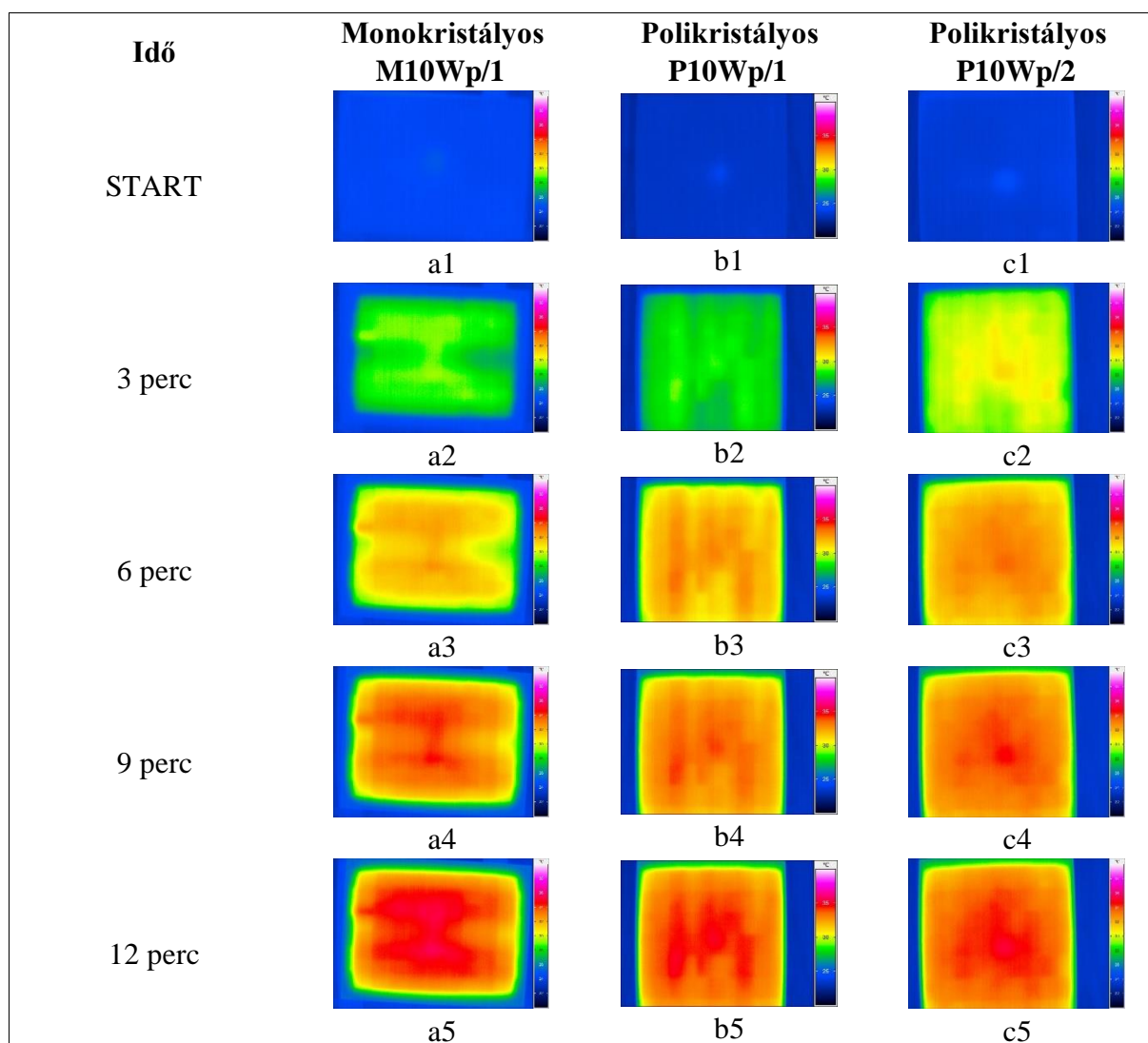
Az állapotfelmérések alkalmával le lehet vonni azon következtetéseket, miszerint az erőművet forgalmas utaktól és ipari parkoktól távol kell elhelyezni. Továbbá az elmúlt évek száraz időjárása okán, az intenzív mezőgazdasági termelés is károsan érinti a naperőművek termelését.

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. [1, 108]. Már elérhetőek az automatikusan vezérelt tisztítórobotok és -mechanizmusok prototípusai [109].

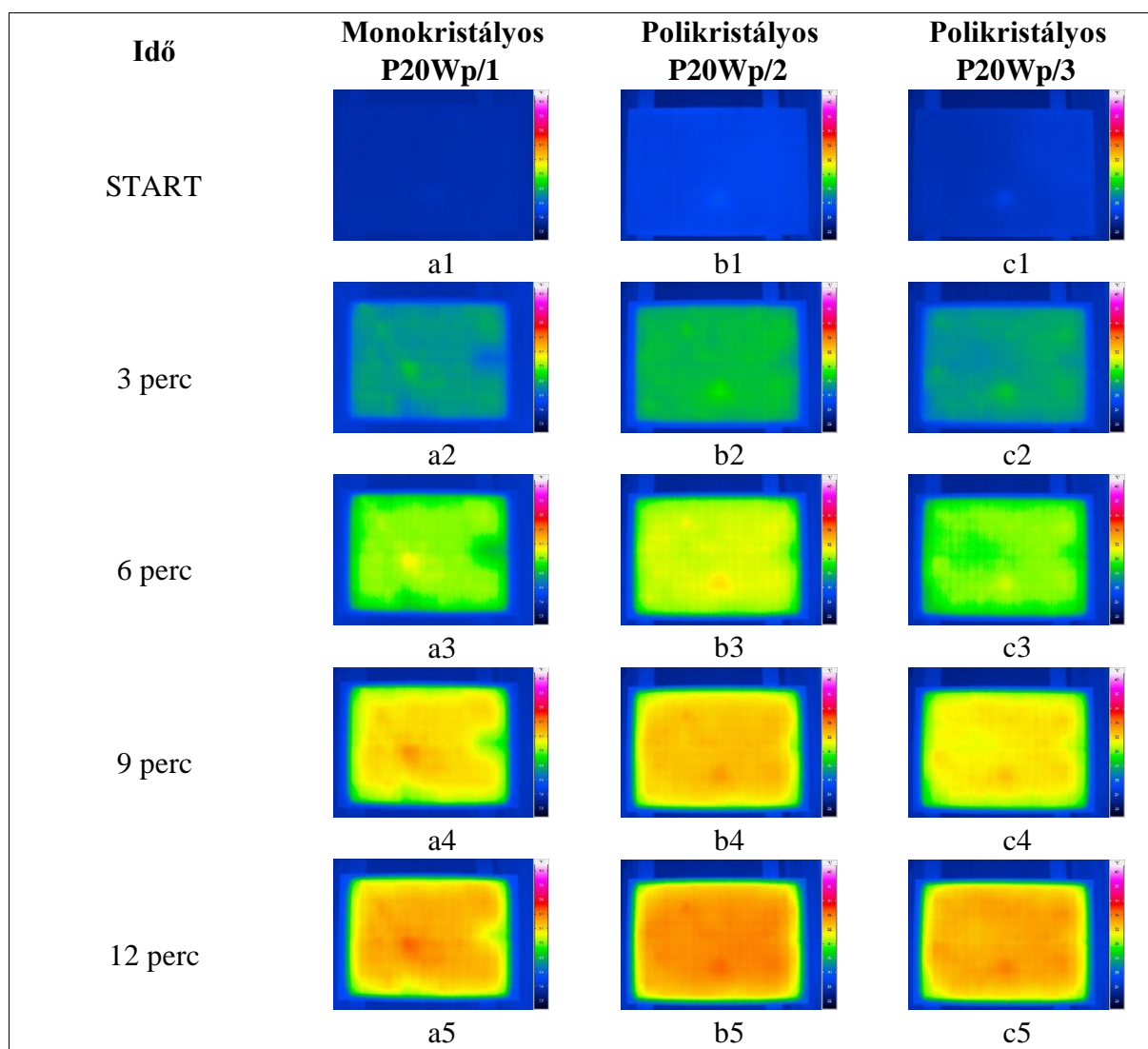
6.4. EL kamera kiváltása hőkamerával

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 [79, 110]. 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. ábra a4, b4, c4). 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 napelem panelek 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 napelem panelek hőkamerás felvételei

7. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1. A napelemekre lerakódó felületi szennyeződések vizsgálata során számos por állagú szennyező anyag esetében végeztem el különböző szemcseméret kiszórásával a kísérleteket, amikre nem volt fellelhető példa a hazai és nemzetközi szakirodalmakban. Bizonyítottam, hogy minden anyagtípusnál a szemcseméret csökkenése fordított arányosságban áll a kiváltott teljesítményvesztéssel.

Megállapítottam, hogy a szemcseméret 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>legnagyobb szemcseméret</i>	10%	8%	8%	3%
<i>legkisebb szemcseméret</i>	24%	14%	10%	7%

Megállapítottam, hogy a szemcseméret 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>legnagyobb szemcseméret</i>	84%	58%	27%	27%
<i>legkisebb szemcseméret</i>	95%	77%	53%	30%

Továbbá a kutatási eredményeim alátámasztották azt a feltételezést, miszerint a kisebb szemcseátmérőjű por nagyobb felületen és egyenletesebben rakódik le. Ennek eredményeképp a laboratóriumi vizsgálatok során pontosabb, a természetes kosz lerakódás által előidézett állapothoz jobban hasonlító eredményeket kaptam.

A T1 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S6], [S11]

T2. A napelem felületén lerakódó szennyeződések fizikai, kémiai tulajdonságaitól függ a napelem működésére gyakorolt hatásuk. A szakirodalmat figyelembe véve egyedülálló, hogy szerves anyagokat is vizsgáltam, mint a felületen gyakran lerakódó szennyezőt. A szennyezés által keresett és vizsgált jelenég a napelemre kapcsolt töltésvezérlő szabályozó áramkör közbelépése volt.

Megállapítottam, 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

Bizonyítottam, hogy egy bizonyos mértékű szennyezőanyag-koncentráció elérésekor már a szabályozó elektronika beavatkozására volt szükség, az elérhető maximális teljesítményű munkapont fenntartása érdekében. Ugyanakkor ezek a szabályozások, nagy ugrásszerű csökkenést jelentenek a szolgáltatott villamos energia mértékében és ez közvetlen hálózati visszahatást eredményez. Ezek alapján megállapítottam, hogy már kis szennyezőanyag koncentráció is hatást gyakorol a teljes napelemes rendszer működésére.

A T2 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S6], [S11]

- T3. A termográfias hibakeresés módszertanát számos kritika éri, melyek kételkednek annak hitelességében. Tény, hogy az állapotfelmérés során számos, a végeredmény helyességét biztosítani képes ajánlást be kell tartani, mint például a kamera nézeti szöge 60-120° között, valamint a panelektől számított távolsága 2-3 méter között legyen.

A szakirodalom áttekintése során azt tapasztaltam, hogy a tanulmányok jellemzően inkább beszámoló, amelyekben elsősorban csak bemutatnak eltérő hőképeket, azok kialakulásával vagy előidézésével kevésbé foglalkoznak. Ezzel szemben a kutatómunkám során bebizonyítottam, 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. Megállapítottam, hogy 15 °C-nál kisebb hőmérséklet differencia még előfordulhat ép panelek esetében, azonban a felületen lerakódó szennyeződés, madárürülék, 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 élettartam csökkenést váltanak ki. Ugyanakkor a hőkamerával végzett vizsgálat önmagában nem elegendő, több teszt kombinálásával lehet átfogó képet kapni az erőmű állapotáról.

A T3 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S3], [S4], [S9]

- 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 termelés kiesésre lett figyelmes. A felmérés eredményei alapján bizonyítottam, hogy a napelemes erőművel szomszédos biomassza erőmű tüzelőanyagának előkészítése során megnövekedett légszennyezettség növelte az ahhoz közeli napelem panelek közti meghibásodások számát, a felületi szennyeződések okozta cella kiegészések, tönkremenetelek miatt.

Megállapítottam, hogy a károsodott napelemek maximális teljesítményű munkapontja csökkent, mert a károsodás miatt az U-I karakterisztikája megváltozott. Továbbá megállapítottam, hogy a különböző hibajelenségek másként torzítják az U-I karakterisztikát a hibátlanul működő napelemekéhez képest.

A T4 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S1], [S3], [S4], [S10]

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

Bebizonyítottam, hogy különböző panelek esetében eltérő hőképek alakultak ki, amely bizonyítják, 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. Megállapítottam, hogy a két vizsgálati módszer összekapcsolása és összehasonlítása nagy segítséget jelent a hot-spot jelenségek mélyre ható tanulmányozása és megértése terén.

Továbbá bizonyítottam, hogy az elektrolumineszcencia képeken látható hibatípusok hatásai összhangban vannak az U-I karakterisztikákat torzító jelenségekkel. A három vizsgálati módszer (termográfia, flash, elektrolumineszcencia) együttes alkalmazása képes átfogó képet adni a napelemek állapotáról, károsodottsági fokáról.

A T5 tézishoz kapcsolódó saját publikációk: [S2], [S3], [S4], [S10]

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 eszközről 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. Azonban felületi szennyeződéseknek vagy 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 hibabeazonosításra 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 hibabeazonosításban 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 szünni nem akaró türelmüket, amiért végig mellettem álltak és mindenben támagattak.

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] G. Kozsely, I. Bodnar, D. Matusz-Kalász, R. Lipták: Determination of Solar Panel's Characteristics by Flash Testing, 2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), 2022, pp. 233-238, **(SCOPUS indexált)**
- [S2] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár: Monitoring and Diagnostics of Photovoltaic Cells by Electroluminescence, 2022 23rd International Carpathian Control Conference (ICCC), 2022, pp. 158-161, **(SCOPUS)**
- [S3] 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)**
- [S4] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász: Statistical Comparison Between Experimental and Numerical Simulation Results of The Solar Cell, 2021 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC), 2021, pp. 1-6. **(SCOPUS)**
- [S5] 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)**
- [S6] 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:

- [S7] D. Matusz-Kalász, Hűtött napelemek laboratóriumi és szabadtéri vizsgálata, in 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.
- [S8] D. Matusz-Kalász A napenergia szerepe a magyarországi villamosenergiatermelésben, Acta Academiae Nyiregyhaziensis 7 pp. 99-104. 2022
- [S9] D. Matusz-Kalász, P. Balázs, Napelemek hibáinak feltárása hőkamerás vizsgálattal, Multidiszciplináris tudományok, vol. 11, no. 3, pp. 112-122, 2021
- [S10] D. Matusz-Kalász, R. Lipták, P. Tóth: Napelemek tönkremenetele, Multidiszciplináris Tudományok, évf. 11 sz. 3. pp. 94-101, 2021
- [S11] 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
- [S12] 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

- [S13] 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.
- [S14] I. Bodnár, D. Matusz-Kalász: Napelemek laboratóriumi és szimulációs vizsgálata, Multidiszciplináris Tudományok, vol. 9 no. 4. pp. 261-268, 2019
- [S15] 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

1. ábra. A különböző energiaforrások százalékos részesedése a világ villamosenergia termeléséből.....	8
2. ábra. A szilícium alapú mono- és polikristályos napelem modulok közti eltérés.....	11
3. ábra. (a) A szilícium monokristály növesztésének folyamata és (b) eredménye a szilíciumtömb.....	11
4. ábra. A perovszkit napelemek alapanyaga	12
5. ábra. (a) A szervas napelem ablakként történő felhasználása és (b) üvegház borításaként történő felhasználása.....	13
6. ábra. A napelemes HMKE eloszlása Magyarországon áramszolgáltatók szerint 2021-ben [21]	15
7. ábra. A hálózatra tápláló napelemes rendszer elvi felépítése	16
8. ábra. A hálózatfüggetlen szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése	16
9. ábra. A csak vételezi tudó szigetüzemű napelemes rendszer elvi felépítése	17
10. ábra. A hibrid napelemes rendszer elvi felépítése.....	17
11. ábra. A legnagyobb villamosenergia termelést biztosító energiaforrások Magyarországon 2014-2021 között [21].....	18
12. ábra. A közcélú erőművi rendszer erőműtípusainak éves kihasználtsága	19
13. ábra. A megtermelt bruttó villamos energia százalékos megoszlása energiaforrások szerint 2021-ben [23].....	19
14. ábra. A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia százalékos megoszlása 2021-ben [23]..	21
15. ábra. A hazai villamos energia rendszer által szolgáltatott energia származásának megoszlása 2021-ben [24]	22
16. ábra. A naperőművekből származó villamos energia és a fogyasztási igények kapcsolata.....	22
17. ábra. Napelem valóságos elektronikai helyettesítő képe	23
18. ábra. Besugárzottság, cellahőmérséklet hatása	24
19. ábra. A ventilátoros hűtés szabadtéri tesztelésének hőkamerás felvétele.....	28
20. ábra. A különböző fényintenzitás értékek esetében mért üresjárási feszültség értékek	29
21. ábra. A különböző fényintenzitás értékek esetében mért hőmérséklet értékek	30
22. ábra. a) A S1; b) A S2 mérési összeállítás során mér villamos értékek	31
23. ábra. a) A S3; b) A S4 mérési összeállítás során mér villamos értékek	32
24. ábra. A maximális munkaponti feszültség mérési sorozatainak összehasonlítása	32
25. ábra. A napszimulátor által megvilágított napelem panel	36
26. ábra. A felületi szennyeződés feszültség csökkentő hatása.....	38
27. ábra. A felületi szennyeződés áramerősség csökkentő hatása.....	39
28. ábra. A felületi szennyeződés áramerősség csökkentő hatása.....	41
29. ábra. A szilícium alapú napelemem panelek energiaátviteli hatékonysága.....	44
30. ábra. Erőművi napelem modulok (a) fényérzéken oldali és (b) hátlapi mérése	45
31. ábra. Erőművi modulok hőkamerás állapotfelmérése repülő drónnal.....	46
32. ábra. Az előírt mérésnek megfelelő (a) távolság és kameraállás beállítása, (a) valamint a fényerősség mérő alkalmazása	46
33. ábra. Egy működésképtelen modul hőkamerás képe	47
34. ábra. Hot-spot jelenség hőkamerával készített felvételen	47
35. ábra. A nagy felületen árnyékolt panelek hőmérséklet eloszlása.....	48
36. ábra. Két sarokponton koszos panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel	49
37. ábra. Egy sarokponton koszos panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel	49

38. ábra. Jégkár okozta sérülés a modul üvegborításán	50
39. ábra. Elszíneződött napelem modul	50
40. ábra. A delamináció jelenségének különböző esetei	51
41. ábra. Mismatch hiba megjelenése (a) a hőkamerás felvétlen, (b) szemmel is látható kristályszerkezeti hibák és eltérő szilícium színárnyalatok	52
42. ábra. A napelem modulok kapcsolódobozainak melegedése.....	53
43. ábra. A talajhoz közeli napelem modul (a) egy celláját növényzet árnyékolja, (b) több celláját növényzet árnyékolja	53
44. ábra. A növényzet árnyékhataás vizsgálatának (a) kezdőállapota, (b) hot-spot jelensége	54
45. ábra. A növényzet árnyékhataásának (a) növelése, (b) az árnyékhataás megszűnése utáni állapot.....	54
46. ábra. (a) Az erőművi modul árnyékolása faággal, (b) az erőművi modul árnyékolásának megszüntetése utáni állapot.....	55
47. ábra. a) Thermográf felvétel, b) a napelem panel szabad szemmel látható képe.....	56
48. ábra. A flash tesztberendezés elvi felépítése	58
49. ábra. (a) A PV23160 modul és (b) a PV73760 modul I-U karakterisztikája.....	62
50. ábra. (a) A PV02310 modul és (b) a PV41140 modul I-U karakterisztikája.....	62
51. ábra. (a) A PV64260 modul és (b) a PV50239 modul I-U karakterisztikája.....	63
52. ábra. A mért tényleges és MPP teljesítményértékek eloszlása	64
53. ábra. A mért üresjárási és MPP feszültségértékek eloszlása	65
54. ábra. A mért rövidzárási és MPP áramerősségértékek eloszlása	65
55. ábra. Az elektromágneses spektrum felosztása.....	66
56. ábra. A elektrolimineszcencia tesztberendezés elvi felépítése	67
57. ábra. (a) A hibamentes napelem cella EL képe; (b) teljesen kiégett cella képe.....	68
58. ábra. a) Hosszú, keskeny repedések; b) Számos repedés által eredményezett, különböző mértékben elszigetelődött szilícium cella töredékek.....	68
59. ábra. a) Széles törés által okozott, teljesen levált cellatöredék; b) példák ujjszerű hibákra	69
60. ábra. a) A hot-spot jelenség eredménye; b) tojás formájú anyaghiba	70
61. ábra. A PV23160 modul EL képe, mely leggyengébben teljesített a flash teszten.....	72
62. ábra. A PV73760 EL képe, mely számos cellájában hordoz károsodásokat.....	72
63. ábra. A PV02310 modul EL képe egy teljesen inaktív cellafüzérral	73
64. ábra. A PV41140 modul EL képe, mely átlagos mértékben károsodott	74
65. ábra. A PV64260 napelem modul EL képe, mely számos helyen anyaghibát mutat.....	74
66. ábra. A PV50239 modul közel hibátlan EL képe	75
67. ábra. 10 Wp teljesítményű napelem panelek hőkamerás felvételei	76
68. ábra. 20Wp teljesítményű napelem panelek hőkamerás felvételei	77

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat. Hőmérsékleti együtthatók különböző típusú napelemeknél	27
2. táblázat. A vizsgált napelem panel gyártói paraméterei.....	28
3. táblázat. A vizsgálatok során mért kiinduló és záró értékek	29
4. táblázat. A vizsgálatok során felhasznált szóróeszközök és szennyezőanyagok kapcsolata	36
5. táblázat. A különböző felhasznált anyagok fizikai jellemzői	37
6. táblázat. A vizsgált paraméterek és az erőművi modulok paraméterei	59
7. táblázat. A 10 kiválasztott modul teljesítmény és flash teszt értékei	59
8. táblázat. A 10 kiválasztott modul teljesítményértékeinek összehasonlítása.....	60
9. táblázat. A kiválasztott erőművi modulok flash teszt során mért paraméterei	61
10. táblázat. A megengedett hibamennyiség határértékek erőművi napelemmodulok esetében	71

IRODALOM

- [1] Kazem, H.A.; Chaichan, M.T.; Al-Wael, A.H.A.; Sopian, K. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production* 2020, 276, 123187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>
- [2] Bodnár, I.; Iski, P.; Koós, D.; Skribanek, Á. Examination of electricity production loss of a solar panel in case of different types and concentration of dust. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III*, 1st ed.; Al Ali, M., Platko, M., Eds.; Taylor & Francis Group: London, UK, 2019; pp. 313–318, doi:10.1201/9780429021596.
- [3] Alonso-Montesinos, J.; Martínez, F.R.; Polo, J.; Martín-Chivelet, N.; Batlles, F.J. Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production. *Energies* 2020, 13, 6376, doi:10.3390/en13236376.
- [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*. 2021. Vol. 224. pp. 279-284.
- [5] Maghami, M.R.; Hizam, H.; Gomes, C.; Radiz, M.A.; Rezadad, M.I.; Hajjighorbani, S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 59, 1307–1316, doi:10.1016/j.rser.2016.01.044.
- [6] Abderrezek, M.; Fathi, M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels’ energy yield. *Sol. Energy* 2017, 142, 308–320.
- [7] Gürtürk, M.; Benli, H.; Ertürk, N.K. Effects of different parameters on energy—Exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 92, 426–439.
- [8] Said, S.A.M.; Hassan, G.; Walwil, H.M.; Al-Aqeeli, N. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 82, 743–760.
- [9] Zsiborács Henrik, Hűtött napelemek alkalmazásának műszaki-ökonómiai vizsgálata, Doktori értekezés, Keszthely, 2017
- [10] Fábrián, T., Napelemek, *A Rádiótechnika Évkönyve* 2015, pp. 101-107, 2015.
- [11] B. István, Napelem működésének alapjai, *A napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*, Miskolc, 2019.
- [12] 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.
- [13] A. Agresti *et al.*, "Highly Efficient 2D Materials Engineered Perovskite/Si Tandem Bifacial Cells Beyond 29%," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3214345.

- [14] Pourjafari, D.; Meroni, S.M.P.; Peralta Domínguez, D.; Escalante, R.; Baker, J.; Saadi Monroy, A.; Walters, A.; Watson, T.; Oskam, G. Strategies towards Cost Reduction in the Manufacture of Printable Perovskite Solar Modules. *Energies* **2022**, *15*, 641. <https://doi.org/10.3390/en15020641>
- [15] Asif Mahmood, Jin-Liang Wang Machine learning for high performance organic solar cells: current scenario and future prospects, *Energy Environ. Sci.*, 2021, *14*, 90-105
- [16] Lingxian Meng, Yamin Zhang, Xiangjian Wan, Chenxi Li, Xin Zhang, Yanbo Wang, Xin Ke, Zuo Xiao, Liming Ding, Ruoxi Xia, Hin-Lap Yip, Yong Cao, Yongsheng Chen Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency, Meng et al., *Science* **361**, 1094–1098 (2018)
- [17] L., Meng, et al. Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency, *Science*, Vol 361, Issue 6407, pp. 1094-1098, 2018.
- [18] <https://www.muszaki-magazin.hu/2021/06/02/napelempark-kaposvar-hataraban/>
- [19] https://audi.hu/hu/hirek/hirek/reszletek/646_van_uj_a_nap_alatt_gyorben_adtak_at_europa_legnagyobb_teton_kial/
- [20] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/nem-engedelykoteles-kiseromuvek-es-haztartasi-meretu-kiseromuvek-adatai>
- [21] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/eves-adatok>
- [22] I. Bodnár, *Villamosenergetika és biztonságtechnika*, Miskolc: Miskolci Egyetem, 2019.
- [23] MEKH, *Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal*, 2022. [Online]. Available: <http://www.mekh.hu/energiastatisztika-riport>
- [24] MAVIR, *Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/havi-piac-jelentesek>
- [25] Réti, I. (2015). *Nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek*. Ph.D. értekezés, SZIE, p. 114.
- [26] Földváry-Bándy, E. (2015). *Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata*. Ph.D. értekezés, BME, p. 109.
- [27] Bodnár, I. (2019). *Napelemek működésének alapjai, a napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. ME, p. 108. ISBN 978-615-00-456-65.
- [28] Bodnár, I. (2018). *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*. *Acta Polytechnica Hungarica*, *15*(4), 59-82.
- [29] Bodnár, I. (2017). *Transient electrical characteristics of a solar cell in the case of a cooling and non-cooling solar cell*. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedora - International Journal of Engineering*. *XV*(4), 175-178.
- [30] Varjú, V. (2014). *Napelemes energia és környezet*. MTA KRTK Regionális Kutatások Intézete, p. 152.
- [31] SIECKER, J., KUSAKANA, K., NUMBI, B.P: *A review of solar photovoltaic systems cooling technologies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*. kötet, pp. 192–203, 2017.
- [32] SAHAY, A., SETHI, V.K., TIWARI, A.C., PANDEY M: *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, 42. kötet, pp. 306–312, 2014.
- [33] GRUBIŠIĆ-ČABO, F., NIŽETIĆ, S., MARCO, T.G: *Photovoltaic panels: A review of the cooling techniques*, Transactions of Famena XL - Special issue 1, pp. 63-74, 2016.
- [34] Gökmen, N., Hu, W., Hou, P., Chen, Z., Sera, D., Spataru, S: *Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations*, Renewable Energy, 90. kötet, pp.283-290, 2016.
- [35] S. H. Hanzaei, S. A. Gorji and M. Ektesabi, "A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature," in IEEE Access, vol. 8, pp. 182229-182239, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028580.
- [36] Dinakar Yeddu, Sarada Kota, Pakkiraiah Bhupanapati Enhanced PV Solar Power System Design with a MPPT Controller as a Function of Temperature, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-5 March, 2019
- [37] W Widjanarko, N Alia, A Dani and F A Perdana, Experimental analysis of temperature, light intensity, and humidity on rooftop standalone solar power plant, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1073, The 2nd Annual Technology Applied Science and Engineering Conference (ATASEC 2020) 5th August 2020, Malang, Indonesia
- [38] Roy, Rajib Baran and Rokonuzzaman, Md. and Amin, Nowshad and Mishu, Mahmuda Khatun and Alahakoon, Sanath and Rahman, Saifur and Mithulananthan, Nadarajah and Rahman, Kazi Sajedur and Shakeri, Mohammad and Pasupuleti, Jagadeesh "A Comparative Performance Analysis of ANN Algorithms for MPPT Energy Harvesting in Solar PV System," in IEEE Access, vol. 9, pp. 102137-102152, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3096864.
- [39] Bodnár, I.; Iski, P.; Koós, D.; Skribanek, Á. Examination of electricity production loss of a solar panel in case of different types and concentration of dust. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III*, 1st ed.; Al Ali, M., Platko, M., Eds.; Taylor & Francis Group: London, UK, 2019; pp. 313–318, doi:10.1201/9780429021596.
- [40] Alonso-Montesinos, J.; Martínez, F.R.; Polo, J.; Martín-Chivelet, N.; Batlles, F.J. Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production. *Energies* **2020**, *13*, 6376, doi:10.3390/en13236376.
- [41] Ndiaye, A.; Kébe, C.M.F.; Bilal, B.O.; Charki, A.; Sambou, V.; Ndiaye, P.A. Study of the correlation between the dust density accumulated on photovoltaic module's surface and their performance characteristics degradation. *Innov. Interdiscip. Solut. Underserved Areas* **2018**, *204*, 31–42, doi:10.1007/978-3-319-72965-7_3.
- [42] Maghami, M.R.; Hizam, H.; Gomes, C.; Radiz, M.A.; Rezadad, M.I.; Hajighorbani, S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *59*, 1307–1316, doi:10.1016/j.rser.2016.01.044.
- [43] Abderrezek, M.; Fathi, M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Sol. Energy* **2017**, *142*, 308–320.
- [44] Gürtürk, M.; Benli, H.; Ertürk, N.K. Effects of different parameters on energy—Exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *92*, 426–439.

- [45] Said, S.A.M.; Hassan, G.; Walwil, H.M.; Al-Aqeeli, N. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *82*, 743–760.
- [46] Jiang, H.; Lu, L.; Sun, K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmos. Environ.* **2011**, *45*, 4299–4304.
- [47] Klugmann-Radziemska, E. Shading, dusting and incorrect positioning of photovoltaic modules as important factors in performance reduction. *Energies* **2020**, *13*, 1992, doi:10.3390/en13081992.
- [48] Liu, X.; Yue, S.; Lu, L.; Li, J. Study on dust deposition mechanics on solar mirrors in a solar power plant. *Energies* **2019**, *12*, 4550, doi:10.3390/en12234550.
- [49] Rao, A.; Pillai, R.; Mani, R.; Ramamurthy, M. An experimental investigation into the interplay of wind, dust and temperature on photovoltaic performance in tropical conditions. In Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Hong Kong, China, 26–29 August 2013; pp. 2303–2310.
- [50] Adinoyi, M.J.; Said, S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renew. Energy* **2013**, *60*, 633–636.
- [51] Zhang, C.; Shen, C.; Yang, Q.; Wei, S.; Lv, G.; Sun, C. An investigation on the attenuation effect of air pollution on regional solar radiation. *Renew. Energy* **2020**, *161*, 570–578.
- [52] Abass, K.I.; Al-Zubaidi, D.S.M.; Al-Waeli, A.A.K. Effect of pollution and dust on PV performance. *Int. J. Civ. Mech. Energy Sci.* **2017**, *3*, 181–185.
- [53] Saber, H.H.; Hajiah, A.E.; Alshehri, S.A.; Hussain, H.J. Investigating the effect of dust accumulation on the solar reflectivity of coating materials for cool roof applications. *Energies* **2021**, *14*, 445, doi:10.3390/en14020445.
- [54] Al Siyabi, I.; Al Mayasi, A.; Al Shukaili, A.; Khanna, S. Effect of soiling on solar photovoltaic performance under desert climatic conditions. *Energies* **2021**, *14*, 659, doi:10.3390/en14030659.
- [55] Bhattacharya, T.; Chakraborty, A.K.; Pal, K. Influence of environmental dust on the operating characteristics of the solar PV module in Tripura, India. *Int. J. Eng. Res.* **2015**, *4*, 141–144.
- [56] Alghamdi, A.S.; Bahaj, A.S.; Blunden, L.S.; Wu, Y. Dust removal from solar PV modules by automated cleaning systems. *Energies* **2019**, *12*, 2923, doi:10.3390/en12152923.
- [57] Siddiqui, R.; Kumar, R.; Jha, K.G.; Morampudi, M.; Rajput, P.; Lata, S.; Agariya, S.; Nanda, G.; Raghava, S.S. Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability. *Energy* **2016**, *107*, 550–561.
- [58] Bodnár, I. Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient. *Acta Polytech. Hung.* **2018**, *15*, 59–82.
- [59] Hussain, F.; Othman, M.Y.H.; Yatim, B.; Ruslan, H.; Sopian, K.; Anaur, Z.; Khairuddin, S. Fabrication and irradiance mapping of a low cost solar simulator for indoor testing of solar collector. *J. Sol. Energy Eng.* **2011**, *133*, 4.
- [60] Singh, P.; Ravindra, N.M. Temperature dependence of solar cell performance—An analysis. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2012**, *101*, 36–45.
- [61] 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.

- [62] 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.
- [63] Oh, S.; Figgis, B.W.; Rashkeev, S. Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels. *Sol. Energy* **2020**, *211*, 412–417.
- [64] Li X, Wagner F, Peng W, Yang J, Mauzerall DL (2017) '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. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711462114>
- [65] 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.
- [66] Álvaro Huerta Herraiz , Alberto Pliego Marugán , Fausto Pedro García Márquez, Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images analysis by convolutional neural network-based structure, *Renewable Energy*, Volume 153, June 2020, Pages 334-348
- [67] d. S. István, Szerző, Napelem karakterisztika mérése. [Performance].
- [68] L. D. Kun Krisztián, Szerző, NAPELEMEK VIZSGÁLATA PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰRE INTEGRÁLT KOMPAKT HŐKAMERA SEGÍTSÉGÉVEL. [Performance].
- [69] Ö. A. Haraszi Ferenc, Hőkamera alkalmazása kontaktkorrózió vizsgálatára pilóta nélküli repülőgéppel.
- [70] Amit Dhoke, Rahul Sharma, Tapan Kumar Saha, An approach for fault detection and location in solar PV systems, *Solar Energy*, Volume 194, 2019, Pages 197-208,
- [71] Kamran Ali Khan Niazi, Wajahat Akhtar, Hassan A. Khan, Yongheng Yang, Shahrukh Athar, Hotspot diagnosis for solar photovoltaic modules using a Naive Bayes classifier, *Solar Energy*, Volume 190, 15 September 2019, Pages 34-43
- [72] M. Cubukcu, A. Akanalci, Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey, *Renewable Energy*, Volume 147, Part 1, 2020, Pages 1231-1238,
- [73] Fausto Pedro García Márquez, Isaac Segovia Ramírez, Condition monitoring system for solar power plants with radiometric and thermographic sensors embedded in unmanned aerial vehicles, *Measurement*, Volume 139, 2019, Pages 152-162,
- [74] V. S. Bharath. Kurukuru, A. Haque and M. A. Khan, "Fault Classification for Photovoltaic modules using Thermography and Image Processing," 2019 **IEEE** Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1-6.
- [75] Henry, C.; Poudel, S.; Lee, S.-W.; Jeong, H. Automatic Detection System of Deteriorated PV Modules Using Drone with Thermal Camera. *Appl. Sci.* 2020, *10*, 3802. <https://doi.org/10.3390/app10113802>
- [76] M. Jemali, A. K. Bashir, W. Boulila, L. K. B. Melhim, R. H. Jhaveri and J. Ahmad, "An Efficient Optimization of Battery-Drone-Based Transportation Systems for Monitoring Solar Power Plant," in **IEEE** Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10.1109/TITS.2022.3219568.
- [77] Ali, M.U.; Saleem, S.; Masood, H.; Kallu, K.D.; Masud, M.; Alvi, M.J.; Zafar, A. Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An

- infrared thermography study. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45, 1–12, doi:10.1002/er.7201.
- [78] Ikejiofor, O.E.; Asuamah, Y.E.; Njoku, H.O.; Enibe, S.O. Detection of hotspots and performance deteriorations in pv modules under partial shading conditions using infrared thermography. *Eng. Proc.* 2020, 2, 71. <https://doi.org/10.3390/ecsa-7-08201>.
- [79] Gerber, A.; Huhn, V.; Tran, T.M.H.; Sieglösch, M.; Augarten, Y.; Pieters, B.E.; Rau, U. Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2015, 135, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.020>.
- [80] Salazar, A.M.; Macabebe, E.Q.B. Hotspots detection in photovoltaic modules using infrared thermography. *MATEC Web Conf.* 2016, 70, 10015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167010015>.
- [81] Gallardo-Saavedra, S.; Hernández-Callejo, L.; Alonso-García, M.C.; Santos, J.D.; Morales-Aragón, J.I.; Alonso-Gómez, V.; Moretón-Fernández, Á.; González-Rebollo, M.Á.; Martínez-Sacristán, O. Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: Experimental study and comparison. *Energy* 2020, 205, 117930. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117930>.
- [82] Ballestín-Fuertes, J.; Muñoz-Cruzado-Alba, J.; Sanz-Osorio, J.F.; Hernández-Callejo, L.; Alonso-Gómez, V.; Morales-Aragones, J.I.; Gallardo-Saavedra, S.; Martínez-Sacristan, O.; Moretón-Fernández, Á. Novel utility-scale photovoltaic plant electroluminescence maintenance technique by means of bidirectional power inverter controller. *Appl. Sci.* 2020, 10, 3084. <https://doi.org/10.3390/app10093084>.
- [83] Rajput, A.S.; Ho, J.W.; Zhang, Y.; Nalluri, S.; Aberle, A.G. Quantitative estimation of electrical performance parameters of individual solar cells in silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging. *Sol. Energy* 2018, 173, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.046>.
- [84] Khan, F.; Kim, J.H. 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* 2019, 12, 4047. <https://doi.org/10.3390/ma12244047>.
- [85] Lin, H.-H.; Dandage, H.K.; Lin, K.-M.; Lin, Y.-T.; Chen, Y.-J. Efficient cell segmentation from electroluminescent images of single-crystalline silicon photovoltaic modules and cell-based defect identification using deep learning with pseudo-colorization. *Sensors* 2021, 21, 4292. <https://doi.org/10.3390/s21134292>.
- [86] Chen, H.; Zhao, H.; Han, D.; Liu, K. Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells. *Opt. Lasers Eng.* 2019, 118, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.01.016>.
- [87] Parikh, H.R.; Buratti, Y.; Spataru, S.; Villebro, F.; Reis Benatto, G.A.D.; Poulsen, P.B.; Wendlandt, S.; Kerekes, T.; Sera, D.; Hameiri, Z. Solar cell cracks and finger failure detection using statistical parameters of electroluminescence images and machine learning. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8834. <https://doi.org/10.3390/app10248834>.
- [88] Rajput, A.S.; Rodríguez-Gallegos, C.D.; Ho, J.Wei.; Nalluri, S.; Raj, S.; Aberle, A.G.; Singh, J.P. Fast extraction of front ribbon resistance of silicon photovoltaic

- modules using electroluminescence imaging. *Sol. Energy* 2019, 194, 688–695, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.013>.
- [89] Drabczyk, K.; Kulesza-Matlak, G.; Drygała, A.; Szindler, M.; Lipiński, M. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera of metallization parameters for solar cell metal contacts. *Sol. Energy* 2016, 126, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.029>.
- [90] Wang, H.; Zhao, N.; Bi, Z.; Gao, S.; Dai, Q.; Yang, T.; Wang, J.; Jia, Z.; Peng, Z.; Huang, J.; Wan, Y.; Guo, X. Clear representation of surface pathway reactions at ag nanowire cathodes in all-solid Li–O₂ batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13, 39157–39164. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02923>.
- [91] Fontani, D.; Sansoni, P.; Francini, F.; Messeri, M.; Pierucci, G.; DeLucia, M.; Jafrancesco, D. Electroluminescence test to investigate the humidity effect on solar cells operation. *Energies* 2018, 11, 2659. <https://doi.org/10.3390/en11102659>.
- [92] Khan, F.; Rezgui, B.D.; Kim, J.H. Reliability study of c-Si PV module mounted on a concrete slab by thermal cycling using electroluminescence scanning: application in future solar roadways. *Materials* 2020, 13, 470. <https://doi.org/10.3390/ma13020470>.
- [93] Alagoz, S.; Apak, Y. Removal of spoiling materials from solar panel surfaces by applying surface acoustic waves. *J. Clean. Prod.* 2020, 253, 119992. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119992>.
- [94] Parrott, B.; Zanini, P.C.; Shehri, A.; Kotsovos, K.; Gereige, I. Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush. *Sol. Energy* 2018, 171, 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.104>.
- [95] Ürmös, A.; Farkas, Z.; Dobos, L.; Nagy, S.; Nemeccsics, Á. Contact problems in GaAs-based solar cells. *Acta Polytech. Hung.* 2018, 15, 99–124.
- [96] Tang, S.; Xing, Y.; Chen, L.; Song, X.; Yao, F. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Sol. Energy* 2021, 214, 51–61.
- [97] Frazão, M.; Silva, J.A.; Lobato, K.; Serra, J.M. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. *Measurement* 2017, 99, 7–12.
- [98] Deitsch, S.; Christlein, V.; Berger, S.; Buerhop-Lutz, C.; Maier, A.; Gallwitz, F.; Riess, C. Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Sol. Energy* 2019, 185, 455–468.
- [99] Tang, W.; Yang, Q.; Xiong, K.; Yan, W. Deep learning based automatic defect identification of photovoltaic module using electroluminescence images. *Sol. Energy* 2020, 201, 453–460.
- [100] Olivares, D.; Ferrada, P.; Bijman, J.; Rodríguez, S.; Trigo-González, M.; Marzo, A.; Rabanal-Arabach, J.; Alonso-Montesinos, J.; Batlles, F.J.; Fuentealba, E. Determination of the soiling impact on photovoltaic modules at the coastal area of the Atacama desert. *Energies* 2020, 13, 3819, doi:10.3390/en13153819.
- [101] Akram, M.W.; Li, G.; Jin, Y.; Chen, X.; Zhu, C.; Zhao, X.; Khaliq, A.; Faheem, M.; Ahmad, A. CNN based automatic detection of photovoltaic cell defects in electroluminescence images. *Energy* 2019, 189, 116319.
- [102] Berardone, I.; Lopez Garcia, J.; Paggi, M. Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle. *Sol. Energy* 2018, 173, 478–486.

-
- [103] H. Chen, H. Zhao, D. Han, K. Liu, "Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells," in *Optics and Lasers in Engineering*. 2019. Vol. 118. pp. 22-33.
- [104] C. Duan, J. Li, Z. Liu, Q. Wen, H. Tang, K. Yan, "Highly electroluminescent and stable inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cell enabled by balanced charge transfer," in *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 417. Art. nr. 128053
- [105] M. R. U. Rahman and H. Chen, "Defects Inspection in Polycrystalline Solar Cells Electroluminescence Images Using Deep Learning," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 40547-40558, 2020.
- [106] J. Xu, Y. Liu and Y. Wu, "Automatic Defect Inspection for Monocrystalline Solar Cell Interior by Electroluminescence Image Self-Comparison Method," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021. Vol. 70. pp. 1-11.
- [107] M. Dhimish, V. Holmes, P. Mather, M. Sibley, "Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance," in *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2018. Vol. 179. pp. 72-79.
- [108] 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," in *Energy Procedia*. 2017. Vol. 130. pp. 77-86.
- [109] I. Bodnár , D. Koós , P. Iski , Á. Skribanek, "Design and Construction of a Sun Simulator for Laboratory Testing of Solar Cells." *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020. Vol. 17. No. 3. pp. 165-184.
- [110] Silvia Luciani, Gianluca Coccia, Sebastiano Tomassetti, Mariano Pierantozzi, Giovanni 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, October, 2020, pp. 639-646