

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



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

PhD értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE

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

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

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

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

TÉMACSOPORT VEZETŐ
Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ
Dr. habil. Bodnár István
egyetemi docens

Miskolc
2023

JUDGING COMMITTEE

chair:

secretary:

members:

OFFICIAL REVIEWERS

TARTALOM

1. Bevezetés és célkitűzések.....	3
2. Vizsgált alapanyagok és technológiák	5
2.1. Szennyezők hatásának vizsgálata	5
2.1.1. A mérések menete	5
2.1.2. Terheletlen napelempanel szennyeződésvizsgálata	6
2.1.3. Feszültségesés a koncentráció függvényében	7
2.1.4. Áramerősség csökkenés a koncentráció függvényében	8
2.1.5. Terhelt napelempanel szennyeződésvizsgálata organikus anyagokkal	9
2.2. Felületi szennyeződések és árnyékhatások hőkamerás vizsgálata	9
2.3. Nagy mintaszámú flash teszt kiértékelés.....	12
2.4. EL kamera kiváltása hőkamerával.....	15
3. Új tudományos eredmények – Tézisek	17
4. Az eredmények hasznosításának és tovább fejlesztésének lehetőségei	20
5. A kutatási területhez kapcsolódó saját publikációk listája.....	21
6. A téziszűzetben hivatkozott irodalom	22

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

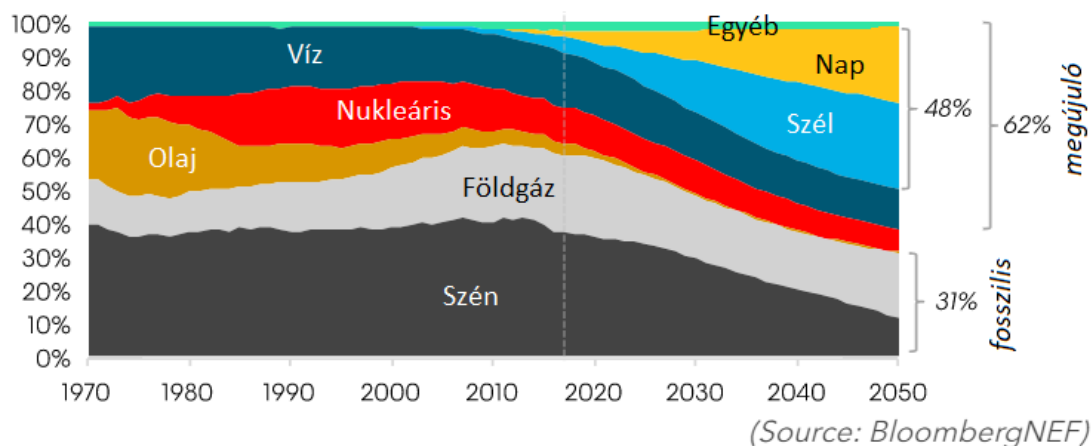
Régóta ismert tény, hogy a napenergia a legnagyobb potenciállal rendelkező energiaforrás, amely a Föld teljes energiaigényének sokszorosát is képes lenne kielégíteni. Amellett, hogy bőségesen rendelkezésre áll, tiszta és megújuló energiaforrás, ennek megfelelően illeszkedik a jelenleg érvényben lévő 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 távolkeleti országok energiaéhsége óriási, amit célszerű minél több forrásból fedezni, akár napenergiával is. Továbbá a jelenleg legkörnyezetszennyezőbb országok közül több is ebben a régióban található, így érthető módon exponenciálisan nő az ázsiai napelemes erőművi potenciál. Csak Kínában az utóbbi években éves szinten több tíz gigawatt mennyiségben bővült a napelemes kapacitás. Ez a bővülési érték számos év során a már megépített, teljes németországi kapacitással volt egyenértékű.

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

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

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA



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

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

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

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

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

2. VIZSGÁLT ALAPANYAGOK ÉS TECHNOLÓGIÁK

2.1. SZENNYEZŐK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

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

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

A szitálás szükségességét igazoló várt következmények:

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

2.1.1. A MÉRÉSEK MENETE

A méréseket a Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék napelemes laboratóriumában végeztem el. A Korax Solar 80 Wp típusú monokristályos napelempanelt egy asztalra fektettem, ami fölé egy 8 reflektorból álló „napszimulátort” illesztettem [9, 10, 11, 12]. 1000 W-os halogén izzók világították meg a napelemet, azonban a megvilágítottság nem egyenletes a reflektorok közötti tér miatt (2. ábra). A megvilágítás medián értéke 874 W/m^2 volt [12, 13]. A napelemet jellemző paraméterek: P_{\max} : 85 W, A_{hasznos} : $1,5 \text{ m}^2$. Mért villamos paraméterek: a napelem üresjárású feszültsége, valamint a rövidzárási árama. A fény spektrális összetételének állandója 0,532, ami a spektrofotométerrel meghatározott görbe alatti területek hányadosa. [2, 9, 14]. Ez azt jelenti, hogy halogén reflektoros szoláris szimulátorral a napfényhez képest a mért áram 53,2%-a a valós értéknek. Ezen villamos paraméterek mérése egy METRIX MX-59HD típusú digitális multiméterrel történt. A szennyező anyagok kiszórása háromféle eszközzel ismételt meg, két eltérő lyukátmérőjű szitával, valamint egy konyhai műanyag kanállal. A szennyezőanyag adagok kimérését egy Voltcraft PS-200B típusú ékszermérleggel végeztem el.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA



2. ábra. A napszimulátor által megvilágított napelempanel.

Minden mérést 17,5 V üresjárásifeszültség-érték elérésekor kezdtem el. A kísérletek során a szennyező mennyiségét 5 g-ként növeltem egészen 75 g-ig. A por adagokat a korábbi fejezetben megemlített mérleggel kifejezetten pontosan ki tudtam mérni. Négy anyagot vizsgáltam, termőföldet, homokot, hamut és városi port, továbbá három eszközt, két különböző lyukátmérőjű szitát, valamint kanalat (*1. 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 lejajlottak 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 [9].

1. táblázat. A vizsgálatok során felhasznált szűrőeszközök 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

2.1.2. TERHELETLEN NAPELEMPANEL SZENNYEZŐDÉSVIZSGÁLATA

A felhasznált négy anyag közül három nem igényel komoly ismertetést, azonban a negyedik definiálása elkerülhetetlen. Az anyagnak a városi por nevet adtuk, mivel egy garázsból lett gyűjtve. Ennek magyarázata, hogy a garázsban az autóról származó, lehulló por számos különböző anyag keveréke. Tartalmazhat földet, az autókból származó olajmaradványokat, gumi-kopadékokat és minden olyan szennyezőt, amelynek jelenléte a városi környezetben és forgalomban felmerülhet. Az anyag használatának célja az volt, hogy városi

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

környezetben hasonló szálló por lehet jelen a levegőben, ami adott esetben lerakódást képezhet bármilyen napelempanelen.

Mivel a szennyező anyagok pontos adagjainak beállítására tömegméréssel volt megoldható, így a sűrűség, mint fizikai paraméter jelentős szerepet kapott. Például a hamu és a homok közti sűrűség különbség majdnem háromszoros, így a hamu a homokhoz képest sokkal alacsonyabb koncentráció mellett, sokkal nagyon felületet boríthatott be a napelempanelen (2. táblázat).

2. 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

2.1.3. FESZÜLTÉSÉGESÉS A KONCENTRÁCIÓ FÜGGVÉNYÉBEN

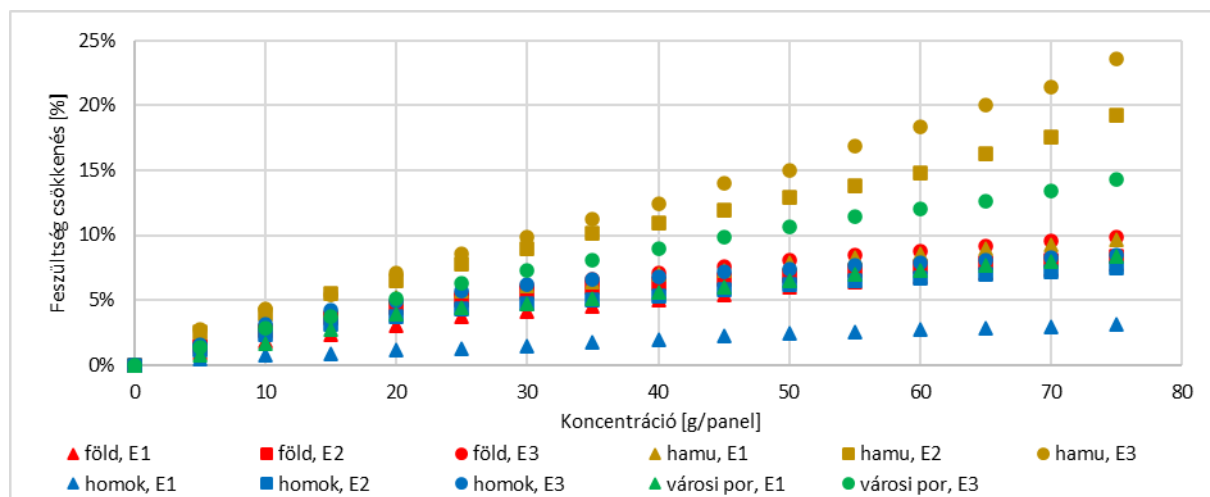
Mivel számos mérési sorozat eredményét kellett egy ábrába (3. ábra) belesűriteni ezért az anyag típusokat színekkel jelöltem: a termőföldet a piros, a hamut a barna, a homokot a kék valamint a városi port a zöld szín jelöli. Továbbá a használt eszközöket (E1, E2 és E3) a sorozatok jelölőjének variálásával különböztettem meg (háromszög, négyzet és kör).

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

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

A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 24%-os feszültségesés a legfinomabb szemcseméret és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por legjelentősebb csökkentő hatása 14%-volt, ellenben föld esetén ez az érték 10%, homok esetén 8% volt. A városi porral kapott eredmény kevésbé marad el a homok és a föld esetén tapasztalt értéktől, azonban a hamu esetén mért csökkenés továbbra is kiugróan magas volt a másik három anyaghoz mérten, ami a különböző anyagok sűrűségére vezethető vissza. A trendvonalak sorrendje és mintázata minden kijuttatási mód esetén hasonlóan alakult. Hasonló eredményekről számolt be Abderrezek és társai [6], Bhattacharya és társai [10], Sadat és társai [15], valamint Oh és társai [16].

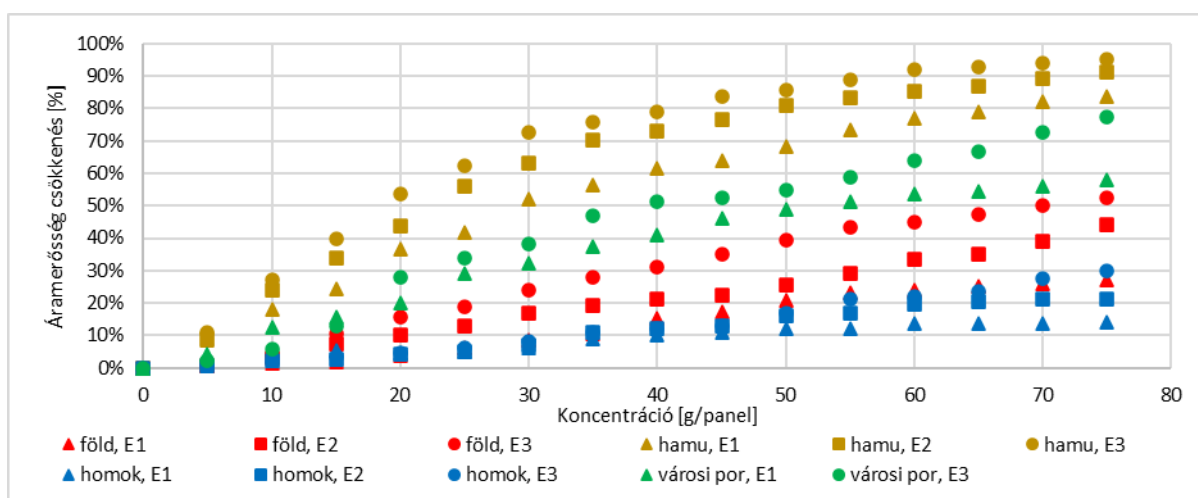
SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA



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

2.1.4. ÁRAMERŐSSÉG CSÖKKENÉS A KONCENTRÁCIÓ FÜGGVÉNYÉBEN

Áramerősség csökkenés esetében az adatsorok jobban elkülönülnek a felhasznált szennyezőanyagok szerint (4. ábra). A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 84%-os áramerősség csökkenés a kanál használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por szennyező legjelentősebb csökkentő hatása 58%-volt, ellenben föld és homok esetén 27% illetve 14% volt. A többi kijuttatási módhoz hasonlóan a hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 91%-os áramerősség csökkenés a nagyobb szemcseméretű frakciót produkáló szita használata és 75 g/panel koncentráció mellett. A föld legjelentősebb csökkentő hatása 44%-volt, ellenben homok esetén ez az érték 21% volt. A hamu szennyező esetén volt tapasztalható maximális, 95%-os áramerősség csökkenés a legfinomabb szemcseméret és 75 g/panel koncentráció mellett. A városi por legjelentősebb csökkentő hatása 77%-volt, ellenben föld esetén ez az érték 53%, homok esetén 30% volt. Ennek magyarázata ismét a szemcseméretre, valamint az anyagok közti sűrűségkülönbségre és jellemző szemcseméretre vezethető vissza. A trendvonalak sorrendje és mintázata minden kijuttatási mód esetén hasonlóan alakult.

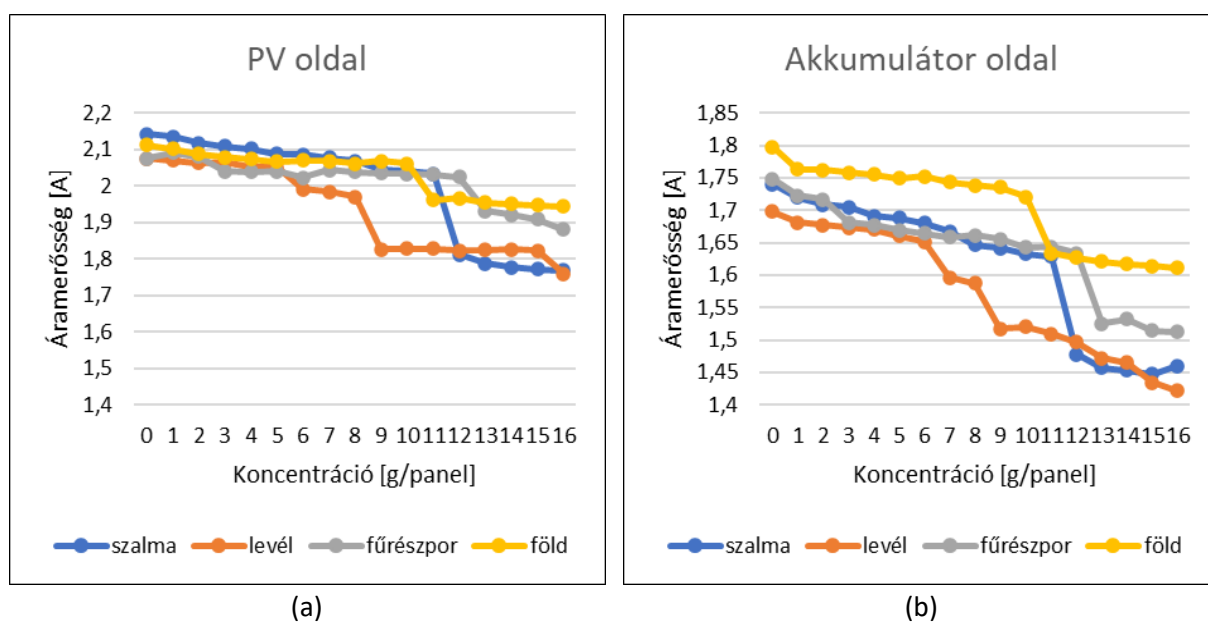


4. ábra. A felületi szennyeződés rövidzárási áramerősség csökkentő hatása.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

2.1.5. TERHELT NAPELEMPANEL SZENNYEZŐDÉSVIZSGÁLATA ORGANIKUS ANYAGOKKAL

Ugyanazzal a 80 Wp monokristályos napelemmel végeztem méréseket, azonban a napelemet MPPT töltésvezérlőre kötöttem és egy akkumulátor töltésére állítottam be. A szennyezőanyag koncentrációját 16 g/panel szintig emeltem, mivel az örölt organikus szennyezőanyagok sűrűsége rendkívül kicsi. A terhelet napelem vizsgálat lényege, hogy az MPPT működését lehet megfigyelni. A grafikonokon jól kivehetők azok a letörések, amelyek a munkapontkövető szabályozókör beavatkozását jelölik. Ekkor a felület szennyezettsége egy olyan kritikus határérték elérését jelentette az áramerősség csökkenésben, mikor új munkapont megválasztására volt szükség (5. (a) ábra). A napelem által szolgáltatott áramerősség és a töltőáram változását egyaránt mértem (5. (b) ábra). Értelemszerűen ez egyben drasztikus teljesítményvesztést is jelentett.

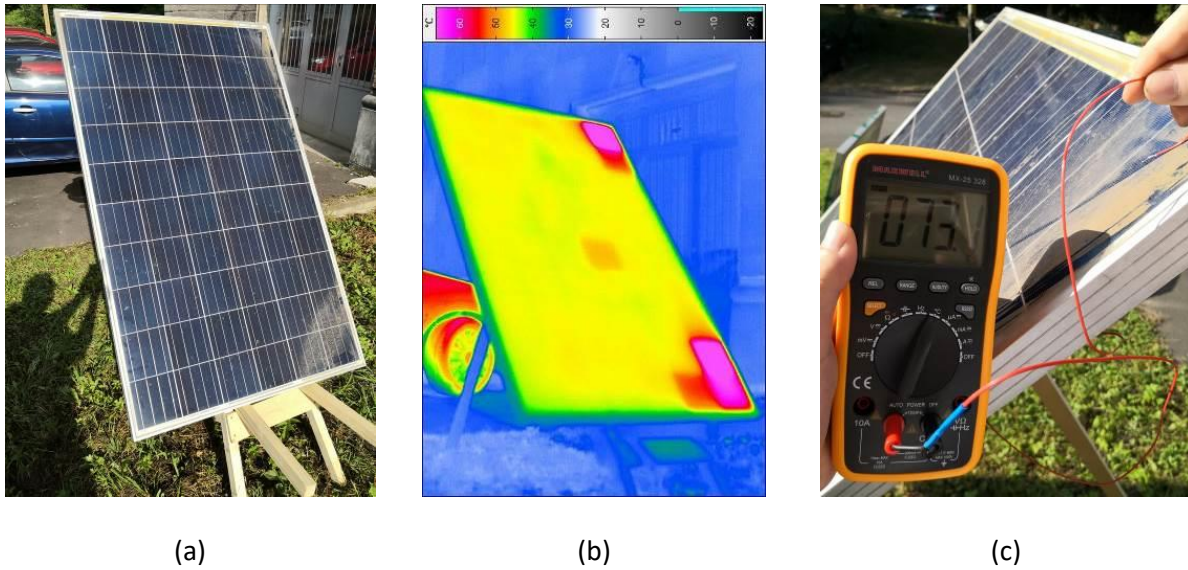


5. ábra. A felületi szennyeződés munkaponti áramerősség csökkentő hatása.

2.2. FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK ÉS ÁRNYÉKHATÁSOK HŐKAMERÁS VIZSGÁLATA

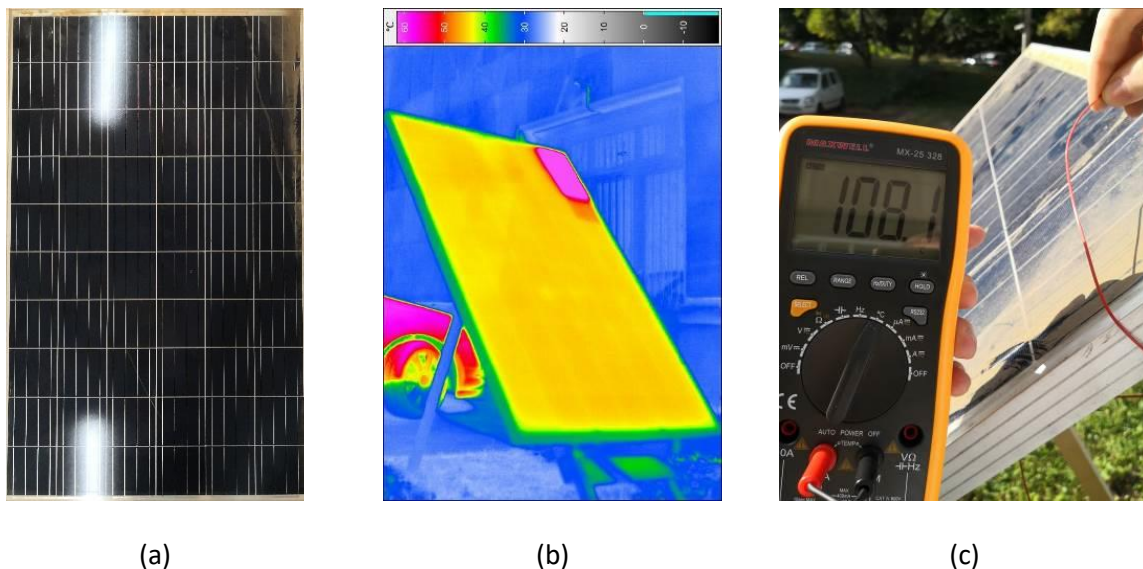
A 6. ábrán által bemutatott felvételek nem egy erőművi felmérés során, hanem egy a Miskolci Egyetemen elvégzett referenciakísérlet során készültek. A vizsgált 260 Wp napelem modulok ugyan egy erőműből származnak, de leszerelésre kerültek. A 6. (a) ábrán (a modul normál, vizuális képén) megfigyelhető, 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. A két sarokban a szennyeződés miatt jelentős túlmelegedés volt tapasztalható. A 6. (b) hőkamerás képen, melyet egy Jenpotik Variocam használatával készült, láthatóvá válnak a hot-spot jelenségek. A maximális hőmérséklet meghaladta a 73°C-ot (6. (c) ábra), ami kontakt hőméréssel lett ellenőrizve [17, 18, 19].

SZILÍCIUMKRISZTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA



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

A 7. 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 (7. (a) ábra). Mivel ennek a közel azonos teljesítményű panelnek csak egy forrópontja keletkezett (7. (b) ábra), annak nagyobb hőfejlődést kellett elviselnie. Ez esetben már az átlagos panel hőmérséklet több mint duplájára melegeedett a hot spot, meghaladta a 108 °C-os hőmérsékletet (7. (c) ábra).

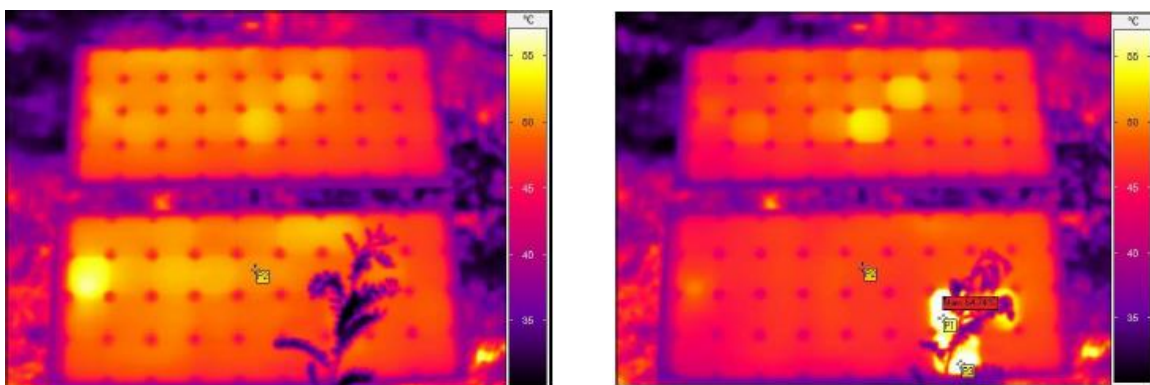


7. ábra. Egy sarokponton szennyezett panel (a) vizuális, (b) hőkamerás képe, valamint (c) a forrópont hőmérsékletének ellenőrzése kontakt hőmérővel.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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 árnyékhatás vizsgálatnak lett alávetve (8. és 9. ábrák).

A 8. (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 (8. (b) ábra). A modulok képeinek bal szélénél hátoldalán található a kapcsolódoboz a bypass diódákkal. Ez a 80 Wp modul két cellafüzérre 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 [17, 20].

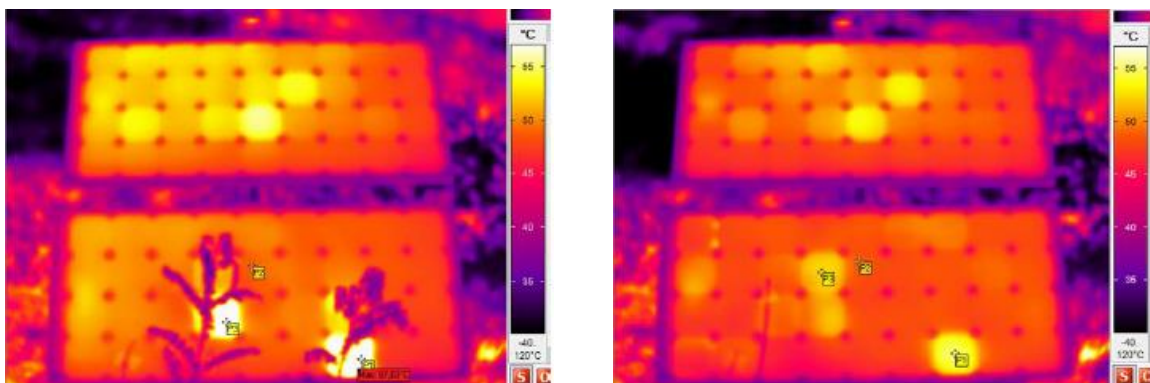


(a)

(b)

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

A 9. (a) ábra mutatja azt az állapotot, amikor egy újabb árnyékoló növény lett a modul elé helyezve. A 9. (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.



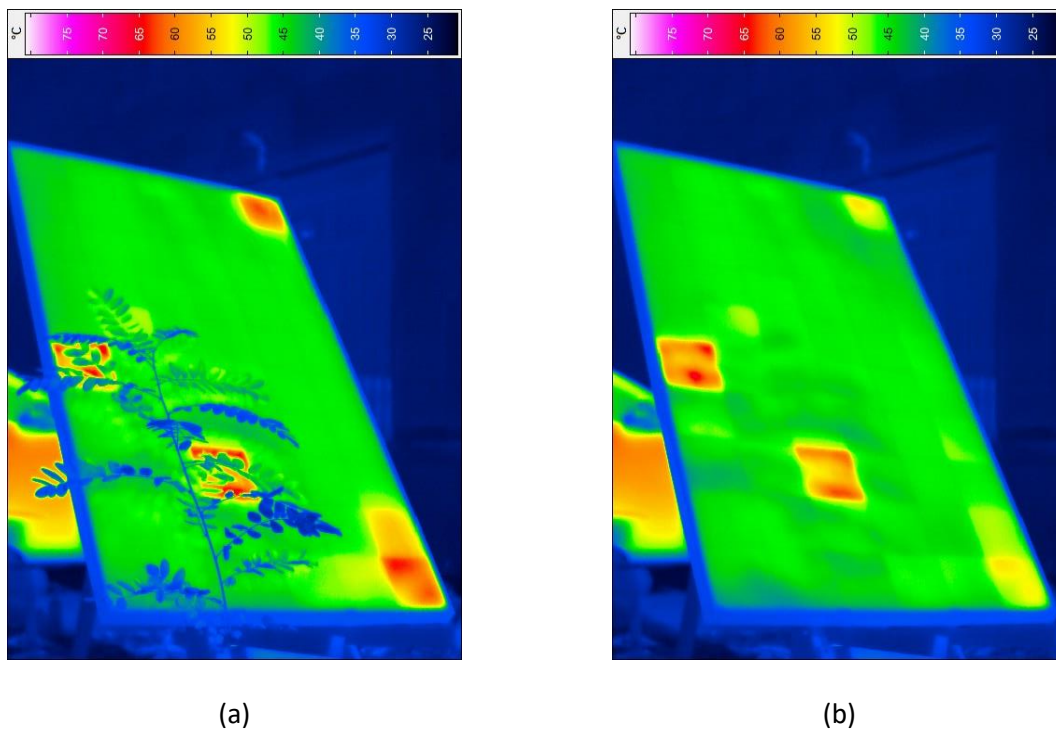
(a)

(b)

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

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

Erőművi méretű és onnan származó modullal is elvégeztem a kísérlet (10. ábra), amely azonos gyártmányú, mint amiken a flash és elektrolumineszcens tesztek készültek. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az árnyékhathatások által okozott napelem-meghibásodás esetén garanciális cserére nem számíthatunk, mert a meghibásodás nem gyártói, hanem üzemeltetői hiba következménye. Javasolt tehát egyrészt még a telepítéskor, megfelelő érzékenységű hőkamerával feltárni a napelempanellek állapotát, illetve az esetleges árnyékjelenségeket, továbbá évi rendszerességgel ellenőriztetni. Amennyiben már a telepítést követően, az első használat során is tapasztalhatók cella-defektusok, akkor célszerű egyből a forgalmazóhoz/gyártóhoz fordulni, mert akkor még érvényesíthető lehet a garancia.



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

2.3. NAGY MINTASZÁMÚ FLASH TESZT KIÉRTÉKELÉS

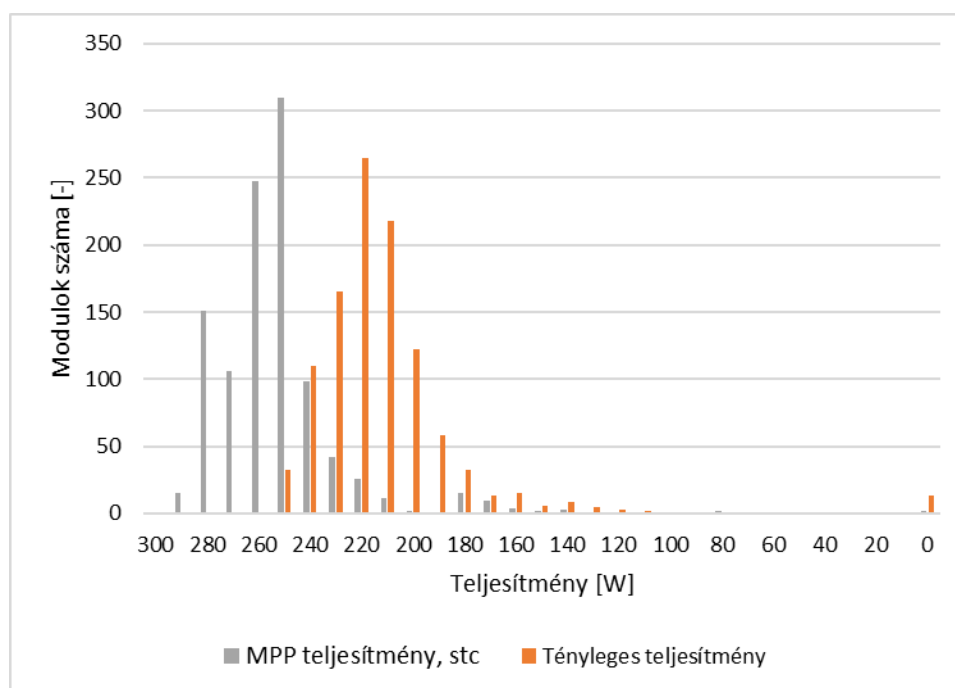
Mivel az erőmű állapotfelmérése során 1000-nél több panel lett bevizsgálva, azok adatait nem lehet olyan részletesen közölni, mint ez előző bekezdésekben. Ezért sokkal célszerűbb a statisztikai összesítés. Ebben az összefoglalóban az egyes modulokhoz elérhető flash teszt eredményeit hasonlítottam össze. Az 11. 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 termékcímke adattáblájában 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

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMENEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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.

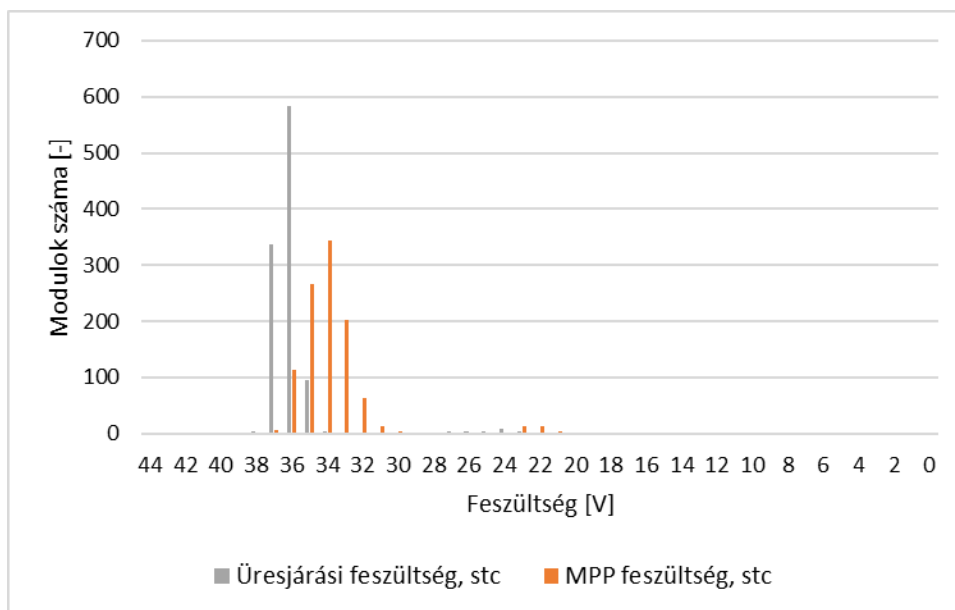
Ha a tényleges teljesítményértékeket vesszük figyelembe, akkor az adatok összegzése után sokkal rosszabb végeredményt kapunk. A tényleges teljesítménysorok mediánja 221,55 Wp, az átlagos tényleges teljesítményérték pedig 215,68 Wp. A tényleges teljesítménysorok átlagos eltérése 19,27 Wp, a szórás pedig 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.



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

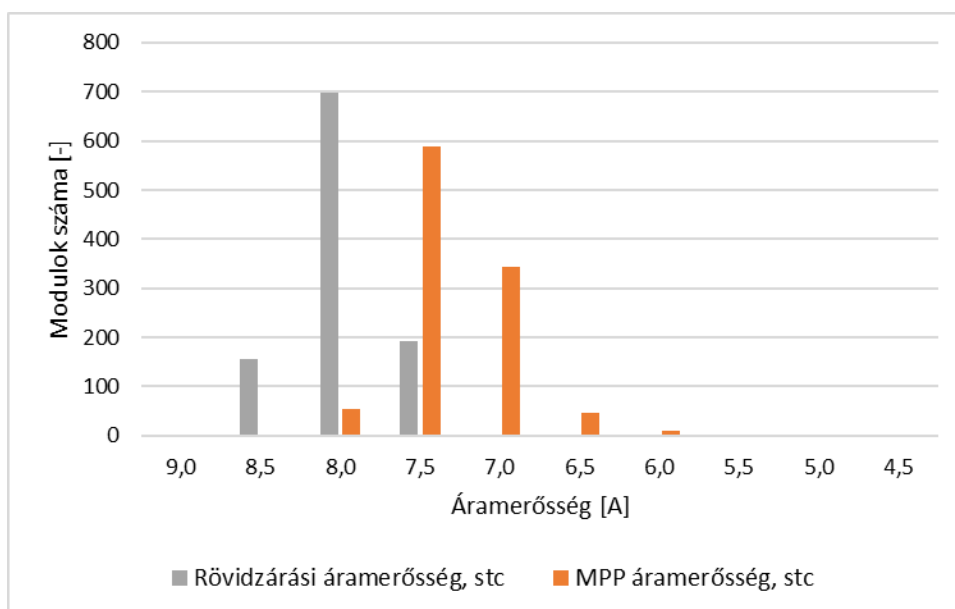
Az 12. ábra a mért feszültségsorok eloszlását mutatja. Az MPP feszültségsorok mediánja 34,44 V, az átlagos MPP feszültségérték pedig 33,56 V. Az MPP feszültségsorok átlagos eltérése 1,78 V, a szórása 4,34 V. Az értékek 45%-a 34 V és 35 V között van (476 modul), az értékek 51%-a pedig 34,4 V alatt van (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.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMES MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA



12. ábra. A mért üresjárás és MPP feszültségértékek eloszlása.

A 13. 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. 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.

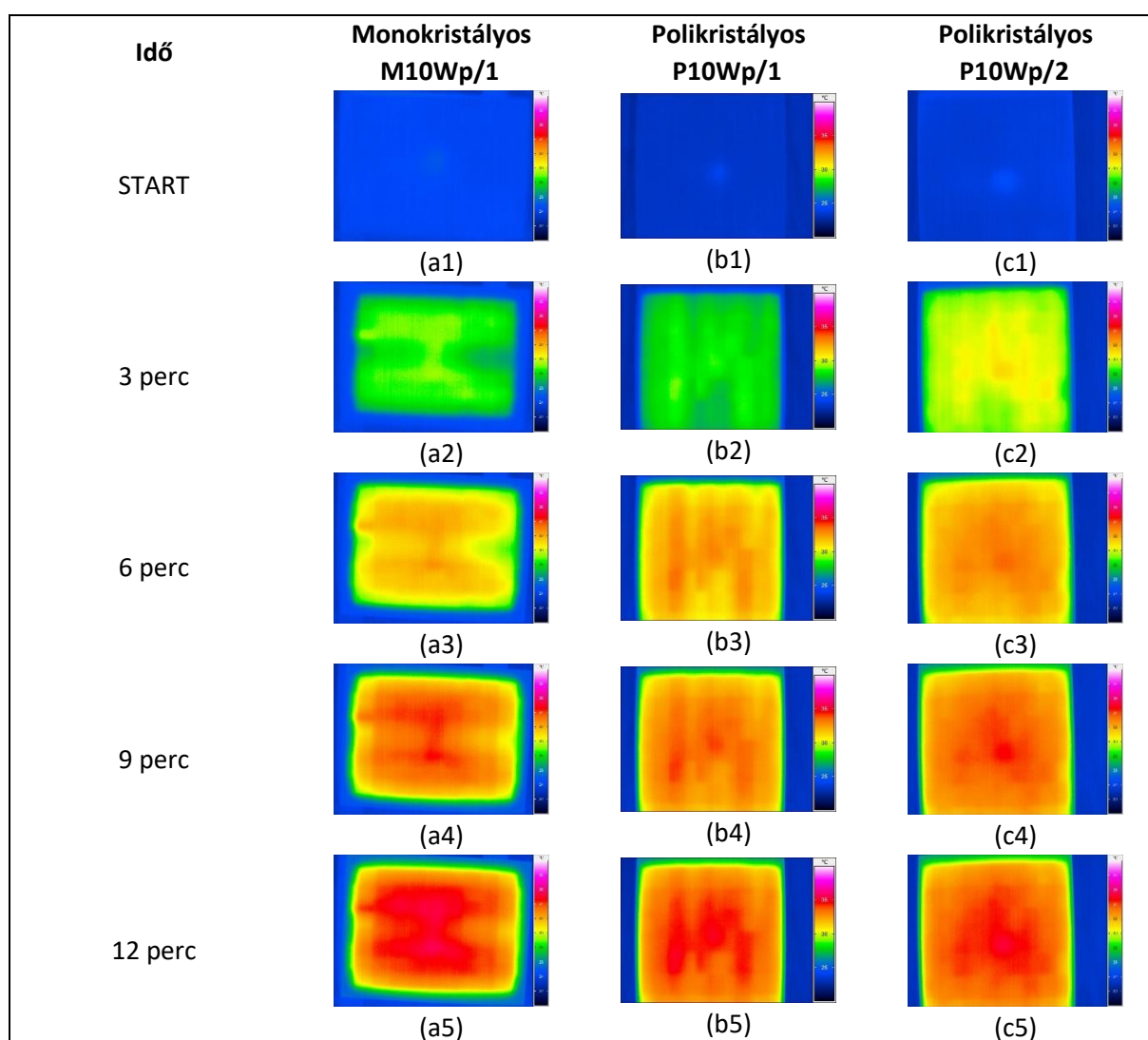


13. ábra. A mért rövidzárlási és MPP áramerősségértékek eloszlása.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

2.4. EL KAMERA KIVÁLTÁSA HŐKAMERÁVAL

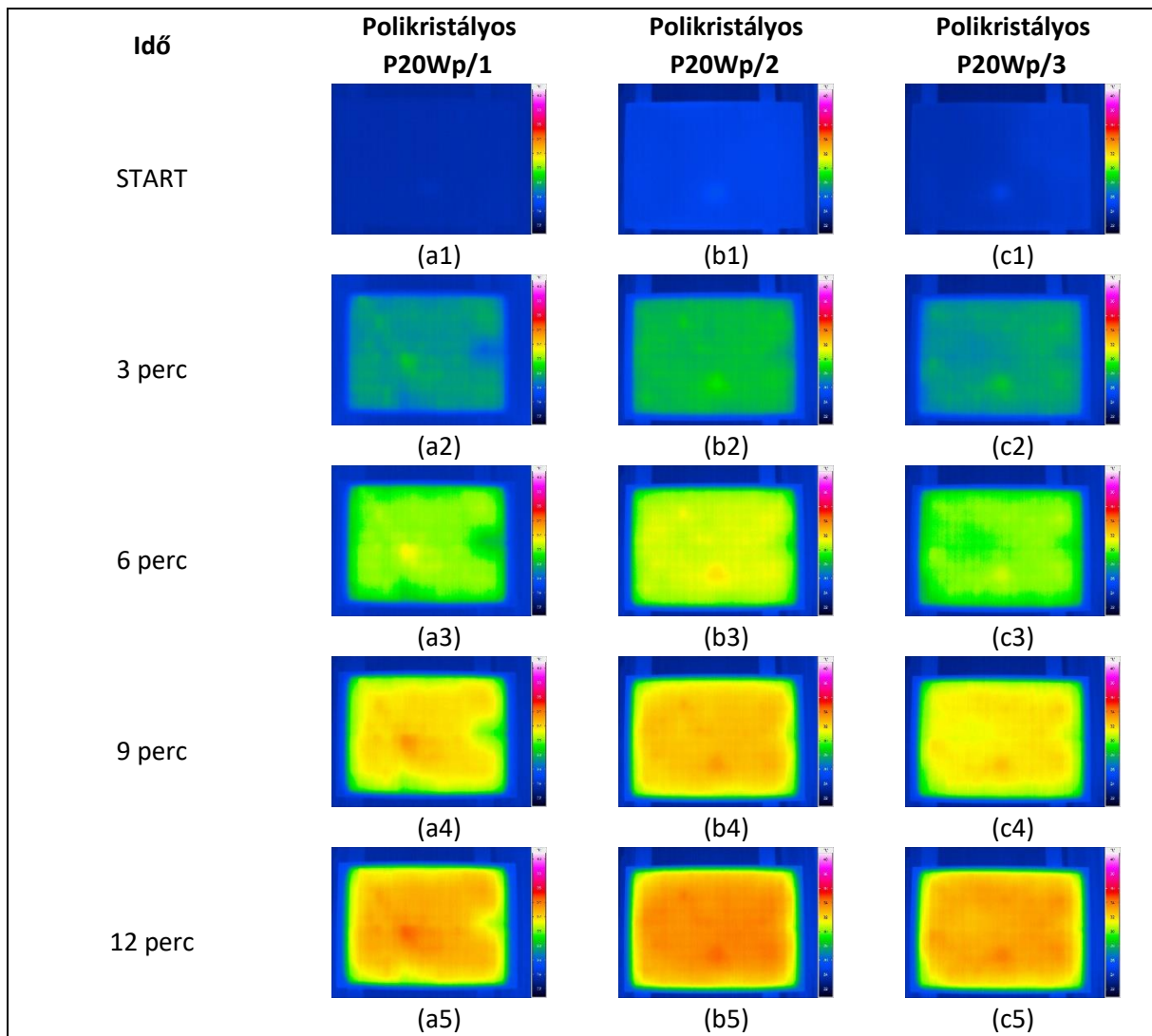
Szeretném bebizonyítani, hogy a termográfia és az elektrolumineszcencia képek kompatibilisek egymással. A hasonlóság alapja a Joule-hő. Ahogy korábban leírtam, a sérült cellarészek ellenállása megváltozik, így több hőt termelnek. Mivel a különbségek az EL-képeken láthatók, a termográfiai vizsgálat során is hasonló eredményt kell elérni [21, 22]. A kutatómunkát a tanszéki laboratórium kisebb és nagyobb teljesítményű paneljein kezdtem el. A 10 W_p 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 (14. (a4), (b4), (c4) ábra). Ebből arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált paneleken különböző cellakárosodások lehetnek. Továbbá bebizonyosodott, hogy a termográfiai vizsgálat hatékony módszer. EL-képek azonban még nem készültek a panelekről.



14. ábra. 10 W_p teljesítményű napelempanelék hőkamerás felvételei.

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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. Kisebbsé eltérések azonban kimutathatók (15. 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.



15. ábra. 20Wp teljesítményű napelempanelok hőkamerás felvételei.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

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

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

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

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

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

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

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

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

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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

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

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

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

Bebizonyosodott, hogy egy 16-24 g/m² mértékű, a napelemes erőművek állapotfelmérésekor tapasztalt (60-80g/m²) szintnél kisebb, szennyezőanyag-koncentráció elérésekor már a szabályozó elektronika beavatkozására volt szükség, az elérhető maximális teljesítményű munkapont fenntartása érdekében. Az eredmények alapján megerősítést nyert, hogy ezek a szabályozások, 8-12%-os ugrásszerű csökkenést jelentenek a szolgáltatott villamos energia mértékében és ez közvetlen hálózati visszahatást eredményez.

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

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

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

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

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMÉK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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

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

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

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

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

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

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

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

4. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSÁNAK ÉS TOVÁBB FEJLESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

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. A felületi szennyeződéseknek van egy másik, súlyosabb következménye, amely hot spot formájában jelentkezik és inkább már a hőterképezéssel vizsgálható.

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

Kiemeltem, hogy az elektrolumineszcencia helyettesíthető, illetve kiegészíthető termográfiaival. 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 elektrolumineszcens hiba beazonosításban a felvételeken látható foltok és törések értékelése során még vannak bizonytalanságok. A felvételek elemzését meg lehet tanítani különböző algoritmusoknak és szoftveresen nagyobb pontossággal és gyorsabban lehet nagy adatmennyiséget kielemezni.

A jövőben folytatni tervezem a fényérzékeny szilíciumkristályos réteg tönkremenetelének folyamatait. Úgy feltételezem, hogy fel lehet gyorsítani tönkremenetelt stressz tesztekkel, miközben folyamatosan dokumentálni lehet a változásokat. A dokumentálás során a termográfias és elektrolumineszcens kamerák alkalmazása egyaránt alkalmazható.

5. A KUTATÁSI TERÜLETHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

A disszertációhoz köthető minőségi publikációk:

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

A disszertációhoz köthető egyéb publikációk:

- [S9] D. Matusz-Kalász, *Hűtött napelemek laboratóriumi és szabadtéri vizsgálata*, Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022, 2. December, 2022, Miskolc-Egyetemváros, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, pp. 98-103.
- [S10] D. Matusz-Kalász, *A napenergia szerepe a magyarországi villamosenergiatermelésben*, Acta Academiae Nyiregyhaziensis 7 pp. 99-104, 2022
- [S11] D. Matusz-Kalász, P. Balázs, *Napelemek hibáinak feltárása hőkamerás vizsgálattal*, Multidiszciplináris tudományok, vol. 11, no. 3, pp. 112-122, 2021
- [S12] D. Matusz-Kalász, R. Lipták, P. Tóth: *Napelemek tönkremenetele*, Multidiszciplináris Tudományok, évf. 11 sz. 3. pp. 94-101, 2021
- [S13] D. Matusz-Kalász, I. Bodnár, R.R. Boros, *Range-Reducing Effect of Contaminants in Case of Solar Vehicles*, Lecture Notes in Mechanical Engineering 22 pp. 38-48, 2021 **(SCOPUS)**

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

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

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] J. Alonso-Montesinos, F.R. Martínez, J. Polo, N. Martín-Chivelet, F.J. Batlles, *Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production*, *Energies*, vol. 13, no. 23, 6376, 2020, doi: 10.3390/en13236376
- [2] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Wael, K. Sopian, *A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems*, *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, 123187, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123187
- [3] I. Bodnár, P. Iski, D. Koós, Á. Skribanek, *Examination of electricity production loss of a solar panel in case of different types and concentration of dust*, in M. Al Ali, M. Platko (Eds.): *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III*, Taylor & Francis Group: London, UK, pp. 313-318, 2019, doi: 10.1201/9780429021596
- [4] Z. Kherici, N. Kahoul, H. Cheghib, M. Younes, B.C. Affari, *Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates*, *Solar Energy*, vol. 224, pp. 279-284, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.06.033
- [5] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M.A. Radiz, M.I. Rezadad, S. Hajighorbani, *Power loss due to soiling on solar panel: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307-1316, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.044.
- [6] M. Abderrezek, M. Fathi, *Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield*, *Solar Energy*, vol. 142, pp. 308-320, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2016.12.040
- [7] M. Gürtürk, H. Benli, N.K. Ertürk, *Effects of different parameters on energy—Exergy and power conversion efficiency of PV modules*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 426-439, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.117
- [8] S.A.M. Said, G. Hassan, H.M. Walwil, N. Al-Aqeeli, *The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 743-760, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.042
- [9] I. Bodnár, *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 15, no. 4, pp. 59-82, 2018.
- [10] T. Bhattacharya, A.K. Chakraborty, K. Pal, *Influence of environmental dust on the operating characteristics of the solar PV module in Tripura, India*, *International*

SZILÍCIUMKRISTÁLYOS NAPELEMEK MŰKÖDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA ÉS ÁLLAPOTFELMÉRÉSÜK MÓDSZERTANA

- Journal of Engineering Research, vol. 4, pp. 141-144, 2015, doi: 10.17950/ijer/v4s3/313
- [11] R. Siddiqui, R. Kumar, K.G. Jha, M. Morampudi, P. Rajput, S. Lata, S. Agariya, G. Nanda, S.S. Raghava, *Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability*, Energy, vol. 107, pp. 550-561, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.04.054
- [12] F. Hussain, M.Y.H. Othman, B. Yatim, H. Ruslan, K. Sopian, Z. Anaur, S. Khairuddin, *Fabrication and irradiance mapping of a low cost solar simulator for indoor testing of solar collector*, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, no. 4, 044502, 2011, doi: 10.1115/1.4004548
- [13] P. Singh, N.M. Ravindra, *Temperature dependence of solar cell performance—An analysis*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 101, pp. 36-45, 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2012.02.019
- [14] 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.
- [15] S.A. Sadat, J. Faraji, M. Nazififard, A. Ketabi, *The experimental analysis of dust deposition effect on solar photovoltaic panels in Iran's desert environment*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 47, 101542, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101542
- [16] S. Oh, B.W. Figgis, S. Rashkeev, *Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels*, Solar Energy, vol. 211, pp. 412-417, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.053
- [17] M. Cubukcu, A. Akanalci, *Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey*, Renewable Energy, vol. 147, pp. 1231-1238, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.075
- [18] M.U. Ali, S. Saleem, H. Masood, K.D. Kallu, M. Masud, M.J. Alvi, A. Zafar, *Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study*, International Journal of Energy Research, vol. 45, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1002/er.7201
- [19] O.E. Ikejiofor, Y.E. Asuamah, H.O. Njoku, S.O. Enibe, *Detection of hotspots and performance deteriorations in pv modules under partial shading conditions using infrared thermography*, Engineering Proceedings, vol. 2, no. 1, 71, 2020, doi: 10.3390/ecsa-7-08201
- [20] V.S.B. Kurukuru, A. Haque and M.A. Khan, A.K. Tripathy, *Fault Classification for Photovoltaic modules using Thermography and Image Processing*, in 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS), 03-04 April, 2019, Sakaka, Saudi Arabia, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCISci.2019.8716442
- [21] A. Gerber, V. Huhn, T.M.H. Tran, M. Siegloch, Y. Augarten, B.E. Pieters, U. Rau, *Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques*, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 135, pp. 35-42, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2014.09.020S.
- [22] Luciani, G. Coccia, S. Tomassetti, M. Pierantozzi, G. Di Nicola, *Use of an Indoor Solar Flash Test Device to Evaluate Production Loss Associated to Specific Defects on Photovoltaic Modules*, International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, vol. 15, no. 5, pp. 639-646, 2020, doi:10.18280/ijdne.150504