



A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetei
Informatikai Tudományok Tudományági Habilitációs Bizottság

**NAPELEMEK ÜZEMI HATÉKONYSÁGÁT CSÖKKENTŐ TÉNYEZŐK
SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT VIZSGÁLATA, ÁLLAPOTFELMÉRÉSE
ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLATA**

Tudományos munkásság áttekintő összefoglalása

Készítette

Dr. Bodnár István

egyetemi docens

aki az

Informatikai Tudományok Tudományágban

„dr. habil.” cím elnyerésére pályázik

Miskolc, 2022.

TARTALOM

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	4
RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....	7
ELŐSZÓ.....	8
1. BEVEZETÉS	10
2. NAPELEM VISELKEDÉSE HŐMÉRSÉKLETI TRANZIENS-FOLYAMATOK SORÁN	12
2.1. A NAPELEM MŰKÖDÉSE, VILLAMOS-ÁRAMKÖRI MODELLJE	12
2.2. A NAPELEM VILLAMOS PARAMÉTEREINEK MATEMATIKAI MEGHATÁROZÁSA	14
2.2.1. A NAPELEM TELJESÍTMÉNYE.....	14
2.2.2. A NAPELEM HATÁSFOKA.....	16
2.2.3. HŐMÉRSÉKLET ÉS INTENZITÁS HATÁSA AZ ÁRAMERŐSSÉGRE ÉS FESZÜLTΣÉGRE	17
2.2.4. A SZIMULÁCIÓS MODELL MATLAB KÖRNYEZETBEN	18
2.3. NAPSZIMULÁTOR FEJLESZTÉSE NAPELEM PANELEK ÉS NAPELEM CELLÁK VIZSGÁLATÁHOZ.....	24
2.3.1. NAPSZIMULÁTOR KIALAKÍTÁSA NAPELEM MODULOK VIZSGÁLATÁRA	24
2.3.2. NAPSZIMULÁTOR KIFEJLESZTÉSE NAPELEM CELLA VIZSGÁLATÁRA	26
2.4. NAPELEM PANEL LABORATÓRIUMI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA	43
2.4.1. A SZIMULÁCIÓ SORÁN FIGYELEMBE VETT KONSTANSOK ÉS ALAPADATOK	45
2.4.2. A MÓDOSÍTOTT SZIMULÁCIÓS MODELL PARAMÉTEREI.....	46
2.4.3. TRANZIENS VIZSGÁLAT TERHELETLEN NAPELEM ESETÉBEN	47
2.4.4. TRANZIENS VIZSGÁLAT TERHELT NAPELEM ESETÉBEN	51
2.5. NAPELEM CELLA LABORATÓRIUMI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA	56
2.5.1. HŐMÉRSÉKLETI TRANZIENSFOLYAMATOK VIZSGÁLATA.....	58
2.5.2. ÁLLANDÓ HŐMÉRSÉKLETEN VETT KARAKTERISZTIKÁK MEGHATÁROZÁSA	62
2.5.3. HŐMÉRSÉKLETI ÁLLANDÓK MEGHATÁROZÁSA	71
3. FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK HATÁSAI A NAPELEMEK VILLAMOS PARAMÉTEREIRE.....	74
3.1. KISMÉRETŰ NAPELEM PANELEN VÉGZETT SZENNYEZŐDÉSI KÍSÉRLETEK	76

3.2.	KÖZEPES MÉRETŰ NAPELEM PANELEN VÉGZETT SZENNYEZŐDÉSI KÍSÉRLETEK.....	81
4.	NAPELEMEK ÁLLAPOTFELMÉRÉSE ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLATA.....	86
4.1.	TERMOVÍZIÓS ÁLLAPOTFELMÉRÉS – FORRÓ PONTOK FELTÁRÁSA	91
4.2.	FLASH-TEST – VILLAMOS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA.....	97
4.3.	ELEKTROLUMINESZCENCIA MÓDSZER – KÁROSODÁSELEMZÉS.....	100
4.4.	KÍSÉRLETI VIZSGÁLAT – HATÁSELEMZÉS.....	105
5.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK	112
6.	ÖSSZEFOGLALÁS	115
7.	SUMMARY.....	116
8.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	117
9.	A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB PUBLIKÁCIÓK.....	118
9.1.	MINŐSÉGI FOLYÓIRATCIKKEK.....	118
9.2.	TOVÁBBI FOLYÓIRATCIKKEK	118
9.3.	MINŐSÉGI KONFERENCIACIKKEK	119
9.4.	TOVÁBBI KONFERENCIACIKKEK	120
9.5.	TANKÖNYV	122
10.	FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM.....	122

JELÖLÉSJEGYZÉK

Latin betűk jelölése	
a	Reflexiós tényező
A_{cell}	Napelem cella felülete
$A_{solar\ module}$	Napelem modul (panel) felülete
c	Fénysebesség vákuumban
C	Megvilágítás spektrális összetételének állandója
D	Számítási konstans
e	Napelem anyagára jellemző tiltotsáv szélessége
E	Intenzitás
$E_{AM\ 1,5}$	Napsugárzás spektrális intenzitása
$E_{average}$	Napelemre eső átlagos fényintenzitás értéke
E_{foton}	Foton energiája
E_g	Félvezető tiltott sávjának energiája
E_{ij}	Egyes cellákra eső fényintenzitás értéke
E_{ill}	Megvilágítás intenzitása
E_{max}	Maximális fényintenzitás
E_{min}	Minimális fényintenzitás
E_{NOCT}	Megvilágítás intenzitása NOCT körülmények között
E_{NSz}	Napszimulátor spektrális intenzitása
E_{ref}	Megvilágítás referencia értéke
E_{STC}	Napsugárzás intenzitása sztenderd tesztkörülmények között
f	Futókonstans
h	Boltzmann-állandó
I	Áramerősség
I_0	Működési áramerősség
I_{0ref}	Működési áramerősség referencia értéke
I_D	Diódaáram
I_M	Munkaponti áramerősség
I_{mpp}	Maximális Teljesítményű Pont áramerőssége
I_{ph}	Fotóáram
$I_{ph,ref}$	Fotóáram referencia érték
I_S	Szaturációs áramerősség

I_{SC}	Rövidzárási áramerősség
I_{SCN}	Névleges rövidzárási áramerősség
I_T	Telítési áram
k	Boltzmann-állandó
K	Hőmérsékleti állandó
K_{ISC}	Rövidzárási áramerősség hőmérsékleti állandója
K_{PM}	Teljesítmény hőmérsékleti állandója
K_{UOC}	Üresjárási feszültség hőmérsékleti állandója
m	Egyenes meredeksége
n	Dióda idealitási tényező
N_p	Párhuzamosan kapcsolt cellák száma
N_s	Sorba kapcsolt cellák száma
P	Teljesítmény
P_{light}	Fényteljesítmény
P_{max}	Maximális teljesítmény
P_{th}	Elméleti teljesítmény
q	Számítási konstans
Q_c	Hűtési teljesítmény
Q_{cmax}	Maximális hűtési teljesítmény
R_{CP}	Párhuzamos parazitakapacitás ellenállása
R_i	Belső ellenállás
R_M	Munkaponti ellenállás
R_P	Párhuzamos ellenállás
R_S	Soros ellenállás
T	Hőmérséklet
T_a	Külső hőmérséklet
T_{aNOCT}	Külső hőmérséklet NOCT esetén
T_A	Környezeti hőmérséklet
T_c	Cellahőmérséklet
T_{cNOCT}	Cellahőmérséklet NOCT esetén
$T_{c\ ref}$	Referencia cellahőmérséklet
T_N	Névleges működési hőmérséklet
$T_{N-range}$	Működési hőmérséklettartomány
U	Feszültség

U_0	Működési feszültség
U_D	Diódafeszültség
U_L	Hőátbocsátási tényező
U_M	Munkaponti feszültség
U_{mpp}	Maximális munkaponti feszültség
U_{OC}	Üresjárat feszültség
U_S	Szaturációs feszültség
U_T	Termikus feszültség
$U_{táp}$	Tápfeszültség
$SE(\lambda_a, \lambda_f)$	Spektrumeltérés az adott hullámhossz-tartományra
x_n	Áramerősség, feszültség vagy teljesítmény értéke egy adott pontban
x_{n-1}	Áramerősség, feszültség vagy teljesítmény értéke egy adott pont előtt

Görög betűk jelentése	
α_{ref}	Referencia tényező
γ	Számítási konstans
ΔE	Megvilágítás inhomogenitásának mértéke
ΔE_{egy}	Fényintenzitás eloszlásának egyenletesség
ΔT_{max}	Maximális hőmérsékletkülönbség
η	Hatásfok
η_{max}	Maximális hatásfok
η_{mpp}	Munkaponti hatásfok
λ	Fény hullámhossza
λ_a	Hullámhossz-tartomány alsó határa
λ_f	Hullámhossz-tartomány felső határa
$\mathcal{A}$	Számítási tényező
μ_{ISC}	Rövidzárási áramerősség százalékos hőmérsékleti állandója
μ_{PM}	Teljesítmény százalékos hőmérsékleti állandója
μ_{OC}	Üresjárási feszültség százalékos hőmérsékleti állandója
τ	Transzmissziós tényező
φ	Fill faktor

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

AM	Air Mass	Légtömeg
EVA	Ethylene Vinyl Acetate	Etilén-Vinil-Acetát
LED	Light-Emitting Diode	Fényt Kibocsátó Dióda
MPP	Maximum Power Point	Maximális Teljesítményű Pont
MPPT	Maximum Power Point Tracking	Maximális Teljesítményű Pontra Szabályozó
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature	Névleges Működési Cella Hőmérséklet
NMPS	Non-true Maximum Point Seeking	Nem valós Maximális Teljesítményű Pontkeresés
PID	Potential-induced degradation	Feszültség Indukálta Degradáció
PV	Photovoltaic	Napelem
STC	Standard Test Conditions	Standard Teszt Körülmények
TMPS	True Maximum Point Seeking	Valódi Maximális Teljesítményű Pontkeresés
UV	Ultraviolet	Ultraibolya

ELŐSZÓ

A kutatómunkám előzménye még 2009-re nyúlik vissza, amikor villamosmérnök BSc alapszakos hallgatóként napelemről működtethető frekvenciaváltós aszinkronmotorhajtásról készítettem szakdolgozatot. Gépészmérnöki MSc mesterszakos hallgatóként ugyan új kutatási irányvonalat választottam, azonban tovább folytattam a kutatást a napenergiával működtethető rendszerek és a napelemes erőművek menetrendszámítási lehetőségeinek témájában.

Ph.D. képzésem során számos hallgatót konzultáltam napelemes témában, amely eredményeként TDK, valamint szakdolgozatok születtek. Ph.D. képzésem befejezését követően a napelemek kutatása újra elsődleges irányvonallá lépett elő. Egyre több hallgató és oktató kolléga kapcsolódott be a kutatómunkámba, aminek eredményeként több tucat TDK és szakdolgozat, valamint diplomamunka született a témában. A publikációk és konferenciaelőadások száma és minősége is rohamosan növekedni kezdett. Hallgatóim az „Új Nemzeti Kiválósági Program” keretében ösztöndíjakat nyertek el, amelyek tovább erősítették a napelemekkel kapcsolatos kutatások fejlődését, szakmai és infrastrukturális értelemben is.

2016-ban az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézetben Napelemes Laboratórium fejlesztésébe kezdtük az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetben működő Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézett Tanszékkal közösen. Az egyetemi és ipari támogatásoknak köszönhetően a laboratórium hamar kinőtte magát, így jelenleg 2 laboratóriumban folytatjuk a kutatómunkát, de körvonalazódni látszik egy új laboratórium kialakítása, amely az ipari igények kielégítésére is alkalmas lehet az oktatási és kutatási célokon felül.

Az Intézet életében 2019-ben bekövetkező oktatói létszám drasztikus csökkenése miatt 2019. november 1.-től visszatértünk a Selmeci gyökerekhez, így Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék néven folytattuk tovább. Intézeti tanszékvezetőként úgy vettem át akkor a Tanszéket, hogy 3 főállású és 1 fő 25%-ban foglalkoztatott oktatója volt engem is beleértve. 2021. őszén már 9 főállású, 2 fő részmunkaidős és 1 fő állandó óraadó az oktatói-kutatói létszám, amely jelentős előrelépést jelent, mind oktatásügyi, mind szakmai, mind pedig tudományos és közösségi tevékenység szempontjából.

A Tanszék dolgozói és hallgatói kollektívája nagyban hozzájárult ehhez a fejlődéshez, amely további kiemelkedő eredményeként 2021-ben akkreditáltuk a „Napelemeserőmű- és napkollektor-létesítő” szakmérnök, illetve szakember szakirányú továbbképzési szakot. A jövőben tovább szeretném növelni e kutatási téma színvonalát, annak érdekében, hogy a legjobbak legyünk a napelemek állapotfelmérése, diagnosztikája és károsodásvizsgálata terén.

A napelemek és napelemes rendszerek vizsgálatára irányuló kutatómunkám során a szoftveres szimulációk mellett számítógéppel támogatott mérés technikai és jelfeldolgozási módszereket, valamint statisztikai adatelemzési eljárásokat is alkalmaztam.

A szimulációk, számítások és adatelemzések részben Excell felhasználásával, részben pedig MATLAB környezetben készített programkóddal történt. Továbbá az alkalmazott mérőeszközök saját szoftvereit használtam fel a mérési eredmények feldolgozása és kiértékelése során.

Az általánosíthatóság érdekében különböző méretű napelem cellákat és napelem paneleket vizsgáltam, mind szimulációs, mind pedig mérési úton. A számítások és szimulációk alapját a napelem cella elektronikai modellje jelentette, amely alapvetően állandó hőmérsékletű napelemek vizsgálatára alkalmas. Ezt a modellt továbbfejlesztettem és általánosítottam napelemek hőmérsékleti transziensfolyamatainak szimulációs és kísérleti vizsgálatára vonatkozóan, amely újdonságnak tekinthető. A szimulációs eredmények validálása céljából kialakítottam egy mérőrendszert, amely központi eleme a szabványos Napfény szimulátor. Statisztikai elemzést végeztem a mért és a számított értékeken, amelyek felhasználásával pontosítani tudtam a felállított modellt.

A napelemek felületén lerakódó szennyeződések villamos paraméterekre, valamint a napelem hőmérsékletére gyakorolt hatásának kísérleti vizsgálatára kialakítottam egy számítógéppel támogatott mérőrendszert. Az így szerzett adatokat Excell segítségével dolgoztam fel és vontam le következtetéseket, amelyek a napelemes erőműveket üzemeltetők számára jelent hasznos információkat, első sorban a napelemek tisztítási igényének és gyakoriságának meghatározása céljából.

Végezetül a napelemek állapotfelmérésével foglalkoztam, amelyek során a fentebb említett kiváltó okok napelem állapotára és várható élettartamára gyakorolt hatását próbáltam felderíteni. A vizsgálatok eredményei és az azokból levont következtetések nemzetközi szakirodalmi szinten is kiemelkedőnek tekinthetők, mivel csak nagyon kis számú kutatási eredmény áll rendelkezésre ilyen mélységű vizsgálatokról. A mérések egy része valós üzemi körülmények között, más részük pedig akkreditált laboratóriumban készültek. A mérések nem csak új, hanem eltérő üzemkörülményű, azaz használt napelemeken történtek. A mérési eredményeket szoftverek segítségével dolgoztam fel és statisztikai információkinyerés céljából értékeltem ki.

Tézisfüzetemben jelen kutatómunka legfontosabb eredményeit kívánom bemutatni.

1. BEVEZETÉS

A napelemes villamosenergia-termelés az 1970-es évekbeli gyakorlati megjelenése óta folyamatosan növekvő tendenciát mutat. Magyarországon az utóbbi 10 évben történt jelentős előrelépés. 2010-ben 2 MW, 2018-ban már 660 MW volt a napelemes erőművek összeteljesítménye hazánkban. 2020 évvégére a csúcskapacitás meghaladta az 2.100 MW-ot. 2022 évelején pedig már csaknem 3.000 MW a hazai napelemes erőművek csúcskapacitása. 2030-ig további 4.000 – 6.000 MW-nyi kapacitásnövekedés várható, így a hazai napelemes rendszerek összkapacitása elérheti a 7.000 – 9.000 MW-ot. Azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a napelemek igen szélsőséges időjárási körülmények között üzemelnek, amelyek így nagyban befolyásolják a hatásfokukat és az élettartamukat. Ilyen tényező a megvilágítás intenzitása és spektrális összetétele, a környezet és a napelem felületi hőmérséklete, a légkör és a napelem felületi szennyezettségének mértéke, valamint a természetes és indukált öregedés. Minden felsorolt tényező a napelem hatékonyságát közvetlenül befolyásolja, rendszerint rontja.

A megvilágítás spektruma jellemző időtávlatban nem változik, az intenzitása pedig a Nap járásól függően Gauss-eloszlást mutat fixen telepített rendszerek esetében. A napelem hőmérséklete a napelem félvezető volta miatt jelentős mértékben befolyásolja annak élettartamcsökkenését. A felületi szennyeződések hatása kettős, egyrészt az árnyékhataás révén a szennyezett cella belső ellenállását növeli, amely a rajta átfolyó áram hatására többlet Joule-hőt termel, másrészt a szennyezőanyag hőszigetelő réteggént is viselkedhet, így tovább növelve a cella hőmérsékletét.

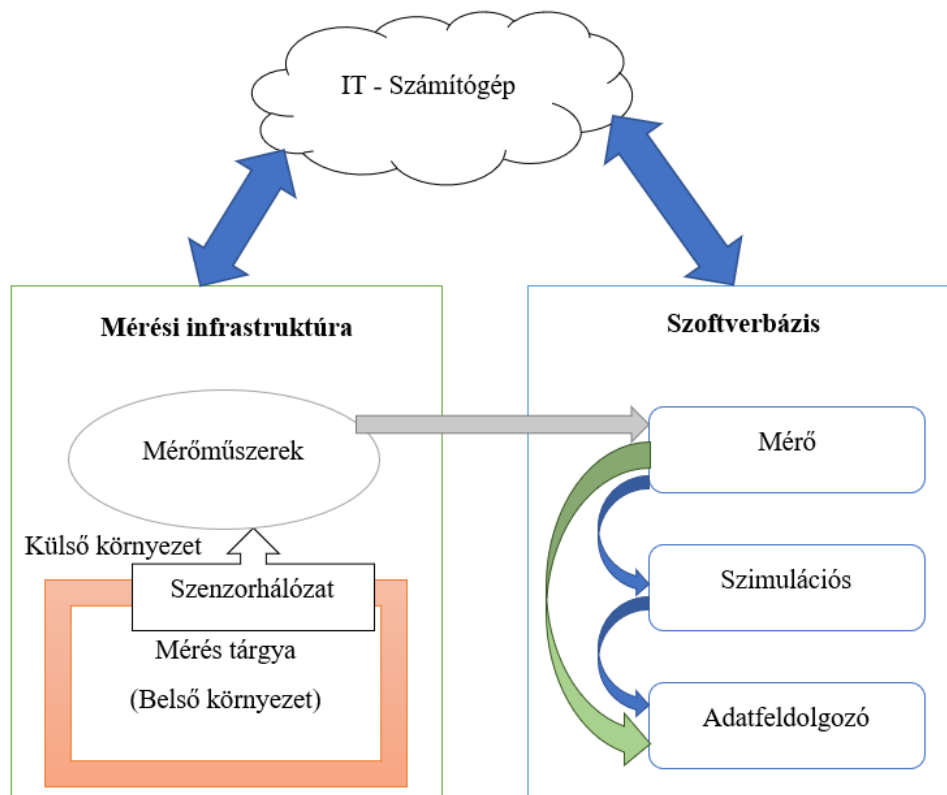
A legmeghatározóbb élettartamot befolyásoló, csökkentő tényező a hőmérséklet. Minél nagyobb a napelem hőmérséklete, annál intenzívebb a cellaöregedés. A túlhevült napelemek kristályszerkezete és/vagy anyagfolytonossága megváltozik, amely így élettartam csökkentő hatást is gyakorol. Tartósan nagyobb hőmérsékleten üzemelő cella esetében a kiégéssel, azaz az azonnali tönkremenetellel is számolni kell. Mindezek mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni e tényezők villamos paraméterekre gyakorolt hatását sem. A napelem panelen belüli hőmérsékletkülönbségek megváltoztathatják a panel karakterisztikáit is.

Kutatómunkám során a napelem hőmérsékleti tranziens során bekövetkező paraméterváltozásokat, valamint a felületi szennyeződések hatásait vizsgálom, továbbá mindezek élettartamra gyakorolt hatását. A bemutatásra kerülő eredményekhez kísérleti mérések és szimulációs vizsgálatok útján jutottam el.

A kutatómunka legfőbb újdonsága a hőmérsékleti tranziens folyamatok vizsgálatában rejlik, hiszen a rendelkezésre álló szakirodalmak szinte kizárólag az állandó hőmérsékletű napelemek kísérleti és szimulációs vizsgálatára koncentrálnak. Kivételt jelentenek Singh et al. [28], Malik et al. [31] és Wood et al. [64], akiknél már megjelenik a tranziens jelenség. Ugyanakkor a hőmérsékleti tranziens közvetlen és közvetett következményei még csak kezdődő kutatások tárgyát képezi, ez is indokolta, hogy a napelem hőmérsékletének egyik változását okozó hatást, a felületen lerakódó szennyezőanyagokat vizsgáltam kísérleti úton.

A napelemek szimulációs vizsgálatára rendszerint MATLAB simulink programot alkalmaznak mint például Ali et al. [39] és Dasgupta et al. [128]. Vizsgálataim során saját programkódot alkalmaztam, amely használatával kapott eredmények jobban közelítették a mért adatokat.

Az 1. ábra szemlélteti a mérési infrastruktúra és az alkalmazott szoftverbázis kapcsolatát. A számítástechnika nem csak a szoftveres szimulációk, hanem a mérések, valamint a mérési és szimulációs eredmények feldolgozása során is segítségemre voltak, ezzel egy komplex rendszer, laboratóriumi háttér alapjait sikerült összeállítanom.



1. ábra: A mérési infrastruktúra és az alkalmazott szoftverbázis kapcsolata az IT rendszerrel.

2. NAPELEM VISELKEDÉSE HŐMÉRSEKLETI TRANZIENS-FOLYAMATOK SORÁN

2.1. A NAPELEM MŰKÖDÉSE, VILLAMOS-ÁRAMKÖRI MODELLJE

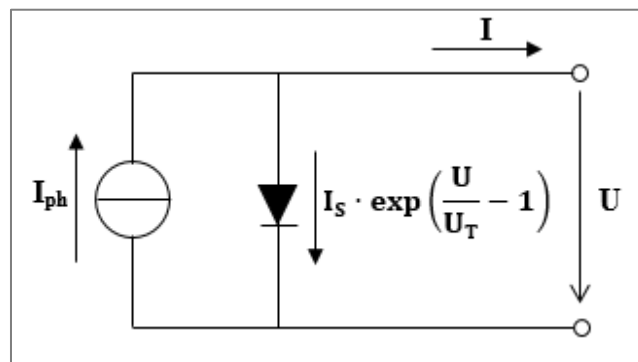
A napelem működésének megértéséhez vegyünk egy p-n átmenetes félvezető cellát. A legtöbb napelem konstrukciónak ez az alapja. Ha a napból érkező fotonok energiája meghaladja a félvezető tiltott sávjának E_g energiáját, akkor töltéshordozó párokat generálnak. A napelem p-n átmenetében képződött feszültség az elektronokat és lyukakat szétválasztja, megakadályozza a rekombinációt. Az elektronok az n-réteg felé a lyukak a p-réteg irányába vándorolnak. Tehát a megfelelő energiájú fotonok hatására a napelemben ún. fotoáram jön létre. A keletkezett fotoáram azonos irányú az átmenetzáró irányú sötétáramával [1].

A folyamat során a napelem kivezetésein U_{OC} üresjárási feszültséget és kapocszárlat esetén I_{SC} rövidzárási áramot mérhetünk. Ha terhelést kötünk a napelem sarkaira, akkor U feszültséget és I áramot tapasztalhatunk, amelyek rendre kisebbek, mint a terhelés nélküli esetben tapasztalt értékek. A kivezetéseken mérhető I áram az I_{ph} fotoáram és az I_D diódaáram (sötétáram) különbségéből adódik, ezt a 1-es képlet írja le [1, 5, 9]:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Az I_D diódaáram meghatározható az I_s dióda telítési áramerősség felhasználásával konstansok és a feszültség függvényében.

A napelem egyszerűsített, elektronikai modellje minden ohmikus és kapacitív jellegű elemet elhanyagolva egy diódából és egy vele párhuzamosan kötött áramgenerátorból áll, amely által előállított áram áramerőssége a megvilágítás mértékétől függ [5, 12, 13]. Ezt a modellt és a korábbiakban említett I , I_D , I_{ph} áramirányokat az 2. ábra tartalmazza.



2. ábra: Ideális, terheletlen napelem villamosáramkörti modellje.

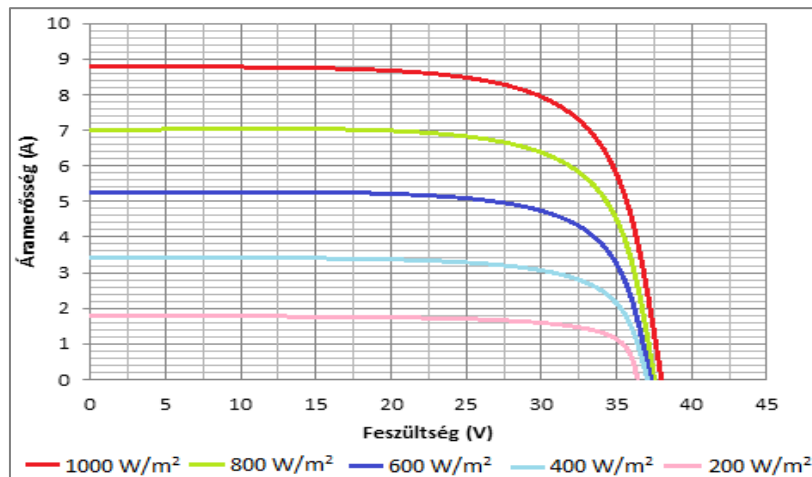
Az $U=0$, illetve az $I=0$ behelyettesítéssel könnyen kifejezhető a rövidzárási áram (2) és az üresjárási feszültség (3) [5, 9, 10, 12, 13]:

$$I_{SC} = I_{ph}, \quad (2)$$

$$U_{OC} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right), \quad (3)$$

ahol: $U_T = \frac{k \cdot T}{e}$ – a termikus feszültség.

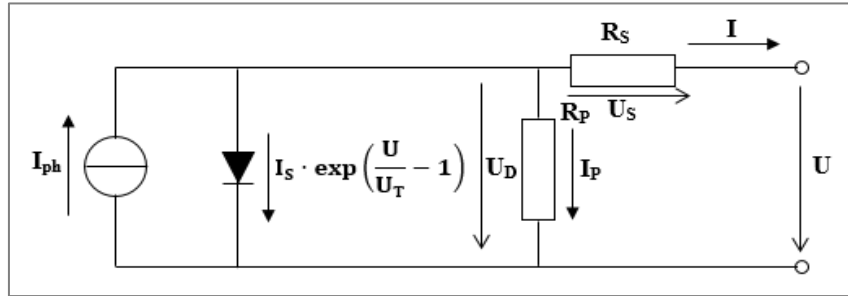
Látható, hogy a rövidzárási áram egyenesen arányos a megvilágítás erősségével, hisz a fotoáram nagysága a fényintenzitással nő és a (2) képlet kimondja, hogy a fotoáram megegyezik a rövidzárási árammal. A (3) összefüggésből láthatjuk, hogy a kivezetéseken mérhető üresjárási feszültség pedig logaritmikusan függ a felületre érkező fényintenzitás nagyságától, és egyenesen arányos a termikus feszültséggel. Az U_T termikus feszültség a hőmérséklet hatására bekövetkező feszültségváltozást reprezentálja. Az üresjárási feszültség és a rövidzárási áram ismeretében vázolható a napelem U - I jelleggörbéje. A 3. ábrán megfigyelhetők ezen U - I karakterisztikák eltérő fényintenzitások esetén. Látható, hogy ha jelentős mértékben csökken a fényintenzitás, akkor ugyan olyan mértékben csökken a rövidzárási áram is, azonban az üresjárási feszültséget csak néhány voltos csökkenés jellemzi, így az jó közelítéssel állandónak tekinthető az intenzitás függvényében [1, 5, 9, 10, 12, 13].



3. ábra: Napelem feszültség-áramerősség jelleggörbéi eltérő fényintenzitások esetén.

Tekintsük a napelem elektromos modelljét a veszteségek elhanyagolása nélkül. Ekkor a belső ellenállás és a vezetékek ellenállását egy-egy ohmos ellenállás jelképezi. Továbbá a dióda két rétege közötti parazitakapacitást jelképezve egy kondenzátor is kapcsolható a diódával párhuzamosan, azonban annak értéke elhanyagolhatóan kicsi. Mindezeknek megfelelően a

felírt egyenletek kis mértékben módosulnak. A leírt modell kapcsolási vázlatát mutatja be a 4. ábra [1, 5, 12, 13, 33].



4. ábra: A napelem valós villamos áramköri modellje.

A valóságot jobban közelítő modell az egyenleteket is módosítja. Az áramerősségek és feszültségek rendre a következők [5, 9, 10, 12, 13, 33]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (4)$$

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_D}{n \cdot k \cdot T \cdot N_s}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$I_P = \frac{U_D}{R_p} = \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \quad (6)$$

$$U = U_D - U_s \quad (7)$$

Ideális esetben $R_p \approx \infty$ és rövidzárási mérésnél $R_D \gg R_s$ ($R_{Cp} \gg R_s$) [5].

2.2. A NAPELEM VILLAMOS PARAMÉTEREINEK MATEMATIKAI MEGHATÁROZÁSA

2.2.1. A NAPELEM TELJESÍTMÉNYE

A napelem kapcsaira kapcsolt R ellenállással modellezhető terhelésen átfolyó I áramerősség és a rajta eső U feszültség szorzataként számolható a napelem hasznos P teljesítménye. Az egyszerűsített modell alapján [5, 7, 33]:

$$P = I \cdot U = I_{sc} \cdot U - I_s \cdot U \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T} - 1\right), \quad (8)$$

A napelemről az adott megvilágítás mellett a maximális teljesítmény levétele terhelésillesztési feladattal oldható meg. A (8) összefüggés szélsőértékének megkereséséhez parciálisan deriváljuk a függvényt U szerint és keressük a $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$ egyenlet megoldását. Ebből kifejezhető a maximális teljesítményhez tartozó munkaponti- áramerősség (9) és feszültség (10) [5, 7, 9, 10, 12, 13, 33].

$$I_M = I_{ph} - \frac{U_M}{U_T} \cdot I_s \cdot \exp\left(\frac{U_M}{U_T}\right) \approx I_{ph} \cdot \left(1 - \frac{U_T}{U_M}\right), \quad (9)$$

$$U_M = U_{OC} - U_T \cdot \ln\left(1 + \frac{U_M}{U_T}\right). \quad (10)$$

Az Ohm törvény alapján a (9) egyenletből kifejezhető az optimális (munkaponti) R_M terhelés értéke (11) [5, 9, 10, 12, 13, 32, 33]:

$$R_M = \frac{U_M}{I_M} = \frac{U_T}{I_s \cdot \exp\left(\frac{U_M}{U_T}\right)} = \frac{U_T}{I_M + I_s + I_{ph}}, \quad (11)$$

A terhelő ellenállás értéke ideális esetben megegyezik a napelem belső ellenállásának az értékével. Amennyiben ez a gyakorlatban is megvalósul, akkor a napelem a maximális teljesítményű munkapontban (MPP) működik [5, 7].

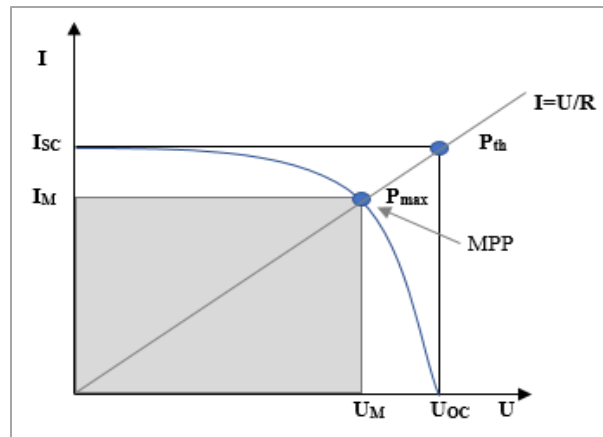
Az MPPT vezérlők különböző algoritmusokat használnak, amelyek két fő típusa a True Maximum Point Seeking (TMPS) és a Non-true Maximum Point Seeking (NMPS) maximális pontkereső. A legelterjedtebbek a hegyre mászó és oszcilláló algoritmus. A maximális teljesítmény eléréséhez a napelem terhelését dinamikusan kell változtatni. Hasonló algoritmusokat használ Precup et al. [22] és Ürmös et al. [23] és Shams et al. [24].

Az úgynevezett φ térkitöltési tényező mutatja meg azt, hogy az U_M munkaponti feszültség- és I_M áramerősség szorzata hogyan viszonyul az U_{OC} üresjárási feszültség- és I_{SC} áramerősség szorzatához (12) [5, 7, 14, 17, 32]:

$$\varphi = \frac{P}{P_{th}} = \frac{U_M \cdot I_M}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (12)$$

A 5. ábrán megfigyelhető, hogyan aránylik egymáshoz a maximálisan levehető teljesítmény téglalapja (szürke téglalap, $I_M \cdot U_M$) és az elméleti teljesítmény ($I_{SC} \cdot U_{OC}$ szorzata) által meghatározott téglalap területe [12, 13, 14, 32, 33].

A φ térkitöltési tényező, vagy más néven forma tényező (fill factor) értéke függ a napelem megvalósításától és a megválasztott munkaponttól. A φ értéke a gyakorlatban használt napelemek esetén 0,75 és 0,85 értékek között mozog, azonban értéke jelentősen függ a napelem életkorától. A napelem öregedésének következtében a térkitöltési tényező folyamatosan csökken, amely a hatásfokának csökkenését eredményezi [5, 7, 9, 10, 32].



5. ábra: A maximálisan levehető teljesítmény munkapontja a napelem U - I jelleggörbéjén.

2.2.2. A NAPELEM HATÁSFOKA

A napelem modul η_{max} maximális hatásfoka a napelem által leadott P_{max} maximális teljesítmény és a hasznos felületre eső P_{light} fényteljesítmény hányadosából számítható ki (13). Tekintve, hogy az összefüggésben szereplő tagok hőmérsékletfüggők, így a hatásfok is erőteljesen függ a hőmérséklettől. A hatásfok-görbén a lokális maximumok mellett létezik egy globális maximum is, amely az elérhető legnagyobb hatásfokot jelenti [6, 14, 15, 16, 27, 32].

$$\eta_{max}(T) = \frac{P_{max}(T)}{P_{light}} = \frac{I_M(T) \cdot U_M(T)}{P_{light}} = \frac{\varphi \cdot P_{th}(T)}{P_{light}} = \frac{\varphi \cdot I_{sc}(T) \cdot U_{oc}(T)}{P_{light}} \quad (13)$$

Mivel a napelem teljesítménye a hőmérséklettől függ, hatásfoka is a hőmérséklet függvénye. Itt kell megjegyezni, hogy a napelem akkor működik maximális hatékonysággal, ha a megvilágítás intenzitása alacsony és a hőmérséklete a lehető leghidegebb [28, 39]. A maximális teljesítmény és a maximális hatásfok egyszerre garantálható, ha a napelemet működés közben hűtjük, továbbá eközben dinamikusan optimalizáljuk a terhelés értékét. Guo et al. [37] és Farshchimonfared et al. [38] bemutatja ennek egy lehetőségét, ahol a napelemeket napkollektorokkal kombinálják.

A napelem hatásfokának meghatározásánál fontos paraméter a félvezető E_g tiltott sáv energiájának a nagysága. Ha a beeső foton E_{foton} energiája nem éri el a tiltott sáv energiáját, akkor a potenciális vezetési elektron nem képes a vegyértéksávból a vezetési sávba lépni és így nem jön létre a fotó áram. Tehát a foton energiáját meghaladó tiltott sáv szélesség kialakítása szükséges a töltéshordozó párok generálódásához. A többlet energia ($E_{foton} - E_g$) hővé alakul [4, 5, 28].

2.2.3. HŐMÉRSÉKLET ÉS INTENZITÁS HATÁSA AZ ÁRAMERŐSSÉGRE ÉS FESZÜLTSÉGRE

A napelem T_S üzemi hőmérséklete az alábbi (14) összefüggéssel határozható meg [3, 4, 17, 18, 26]:

$$T_S = (T_N - T_A) \cdot \frac{E_{ill}}{E_{STC}} + T_A, \quad (14)$$

ahol: T_N – a napelem névleges hőmérséklete [K],

T_A – a környezeti hőmérséklet [K],

E_{ill} – a megvilágítás intenzitása [W/m^2].

Ezek figyelembevételével meghatározható a fotóáram a hőmérséklet függvényében [3, 4, 17, 18, 25, 26, 33]:

$$I_{ph} = I_{SCN} \cdot [1 + \mu_{ISC} \cdot (T_N - T_A)] = I_{SCN} + K_{ISC} \cdot (T_N - T_A) \quad (15)$$

ahol: μ_{ISC} – a rövidzárási áram százalékos hőmérsékleti együtthatója [%/K],

K_{ISC} – a rövidzárási áram hőmérsékleti együtthatója [A/K],

E_{STC} – a sztenderd megvilágítás intenzitása [$1.000 W/m^2$].

Amennyiben az intenzitás is változik, a fotó áram értéke az alábbiak szerint írható le [3, 4, 17, 18, 25, 26, 33]:

$$I_{ph} = \frac{E_{int}}{E_{STC}} \cdot I_{SCN} \cdot [1 + \mu_{ISC} \cdot (T_N - T_A)] = \frac{E_{int}}{E_{STC}} \cdot I_{SCN} + K_{ISC} \cdot (T_N - T_A) \quad (16)$$

Az (16) összefüggés alapján elmondható, hogy a megvilágítás intenzitása és a hőmérséklet változása is lineárisan befolyásolja a napelemen átfolyó áram erősségét, amiről arra lehet következtetni, hogy ha nő a megvilágítás intenzitása, és/vagy a napelem hőmérséklete, akkor a feszültség csökken, így a napelem hatásfoka is csökken.

A telítési áram értéke a hőmérséklet függvényében a két dióda modell alapján írható fel (17) [3, 4, 9, 10, 12, 13, 17, 18, 25, 30, 33]:

$$I_s = \frac{I_{ph}}{\left[\exp \left(\left(\frac{e \cdot U_{OC}}{n \cdot k \cdot T \cdot N_s} \right) \cdot (1 + \mu_{UOC} \cdot (T_N - T_A)) \right) \right] - 1}, \quad (17)$$

ahol: μ_{UOC} – az üresjárat feszültség százalékos hőmérsékleti együtthatója (%/K).

Az üresjárat feszültség hőmérsékletfüggése [3, 4, 17, 18, 25, 26, 33]:

$$U_{OCT} = U_{OCN} \cdot [1 + \mu_{UOC} \cdot (T_N - T_A)] = U_{OCN} + K_{UOC} \cdot (T_N - T_A), \quad (18)$$

ahol: K_{UOC} – az üresjáratú feszültség hőmérsékleti együtthatója [V/K].

A kapocsfeszültség és az áramerősség függvényében meghatározható a napelem teljesítménye (8) és hatásfoka (13). A szakirodalmi eredmények egyaránt azt mutatják, hogy mind a hőmérséklet, mind a megvilágítás intenzitásának a növekedése a napelem hatásfokának csökkenését eredményezi [8, 11].

2.2.4. A SZIMULÁCIÓS MODELL MATLAB KÖRNYEZETBEN

A (16) összefüggés ismeretlen paramétereinek meghatározásakor figyelembe kell vennünk, hogy a napelem működését a hőmérséklet és a besugárzott fényintenzitás függvényében szeretnénk modellezni. A négy ismeretlen paraméter meghatározására – figyelembe véve a besugárzás és a hőmérséklet változását – a következő egyenletek írhatók fel [13, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 49, 50, 52, 108]:

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}} \cdot (I_{ph_{ref}} + \mu_{Isc} \cdot (T_c - T_{c_{ref}})), \quad (19)$$

$$I_0 = I_{0_{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{c_{ref}}} \right)^3 \exp \left(\frac{e \cdot N}{q \cdot a_{ref}} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_{c_{ref}}} \right) \right), \quad (20)$$

$$R_s = \frac{\frac{1}{\Lambda} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \right) + U_{oc} + U_{mpp}}{I_{mpp}}, \quad (21)$$

$$\gamma = \frac{q}{\Lambda \cdot k \cdot T_c}, \quad (22)$$

ahol: e – a napelem anyagára jellemző tiltotsáv szélessége [eV],

E – az aktuális besugárzás fényintenzitása [W/m^2],

E_{ref} – a referencia besugárzás fényintenzitása [W/m^2],

T_c – az aktuális cellahőmérséklet [$^{\circ}C$],

$T_{c_{ref}}$ – a referencia cellahőmérséklet [$^{\circ}C$].

A referencia hőmérséklet- és fényintenzitás értékét célszerű az úgynevezett Standard Teszt Körülmények (Standard Test Conditions: STC) értékeinek választani, amelyek: $T_{c_{STC}} = 25^{\circ}C$, $E_{STC} = 1.000 W/m^2$. E célszerű megválasztást az indokolja, hogy a napelemek adattábláján megadott jellemző paramétereket leggyakrabban STC esetre határozzák meg.

A (20) összefüggésben látható a_{ref} tényező és a (21), valamint a (22) összefüggésekben látható Λ tényező csak az egyenletek felírását egyszerűsítik, meghatározásukat a következő egyenletek alapján tehető meg [13, 39, 40, 54, 55, 56, 57, 58]:

$$\Lambda = \frac{\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mpp}} + \ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}\right)}{2U_{mpp} - U_{oc}}, \quad (23)$$

$$a_{ref} = \frac{(\mu_{U_{oc}} T_{c_{ref}} - 1)U_{oc} + \frac{e}{q} N}{\mu_{I_{sc}} T_{c_{ref}} - 3}. \quad (24)$$

Továbbá szükséges a feladat megoldásához a $I_{ph_{ref}}$ foto-áram referenciaértékének és az $I_{0_{ref}}$ dióda telítési áram referencia értékének meghatározása [13, 39, 57, 58]. E két paraméter kifejezhetővé válik az üresjárás és a rövidzár esetének (19) egyenletbe történő behelyettesítésével. A két paraméter értékét további rendezések után a következő módon fejezhetjük ki [13, 39, 54, 57, 58]:

$$I_{ph_{ref}} = I_{sc}, \quad (25)$$

$$I_{0_{ref}} = I_{sc} \exp(-DU_{oc}). \quad (26)$$

A leírt egyenletek segítségével (19) – (26) a napelem ekvivalens elektronikai áramkörének fő egyenlete (16) implicit módon megoldhatóvá válik, vagyis a napelem jelleggörbéje a modell segítségével meghatározható, a hőmérséklet és a fényintenzitás függvényében [47, 48, 56].

Az eddigiekben csak a napelem cella hőmérsékletének hatását vettük figyelembe, azonban a gyakorlatban felhasználás érdekében érdemes a külső hőmérséklet és a környezeti hőmérséklet közötti kapcsolatot felírni. A kiindulási pont a napelemre felírt energiamérleg [60]:

$$Elektromos\ Energia = Elnyelt\ Energia - Kibocsájtott\ Energia \quad (27)$$

A (28) egyenlet egységnyi napelem felületre a következő módon konkretizálható [57, 58]:

$$E \eta = E \tau a - U_L (T_A - T_c), \quad (28)$$

ahol: E – fényintenzitás értéke [W/m^2],

η – napelem hatásfoka [%],

τ – napelem transzmissziós tényezője [-],

a – napelem emissziós tényezője [-],

U_L – a napelem hőátbocsátási tényezője [W/m^2K],

T_A – külső hőmérséklet [$^{\circ}C$],

T_c – cellahőmérséklet [$^{\circ}C$].

A (28) egyenlet rendezésével kifejezhető a cellahőmérséklet a környezeti hőmérséklet függvényében [56, 57]:

$$T_c = T_A + \frac{E \tau a}{U_L} \left(1 - \frac{\eta}{T_A}\right). \quad (30)$$

A (30) egyenletben még több ismeretlen található, amelyek közül a τa szorzat értéke 0,9 a szakirodalmi ajánlások alapján. Amint azt a korábbiakból láthatjuk, a napelem hatásfoka függ a hőmérséklettől, így pontos meghatározása csak iteratív módon tehető meg. Nem követünk el nagy hibát, ha MPP esetére érvényes hatásfokkal végezzük a számításokat, amely a következő módon írható fel [59]:

$$\eta_{mpp} = \frac{I_{mpp} U_{mpp}}{E a}. \quad (31)$$

Az utolsó hiányzó paraméter az U_L hőátbocsátási tényező meghatározása az úgynevezett Névleges Működési Cella Hőmérséklet (Nominal Operating Cell Temperature: NOCT) segítségével történik, amelyet a napelem adattábláján találhatunk meg. Az ehhez szükséges összefüggés a következő módon írható [45, 46, 59]:

$$U_L = \frac{E_{NOCT} \tau a}{T_{c_NOCT} - T_{a_NOCT}}, \quad (32)$$

ahol: E_{NOCT} – fényintenzitás NOCT esetén, jellemzően $800 \text{ W/m}^2 - 1.000 \text{ W/m}^2$;

T_{a_NOCT} – külső hőmérséklet NOCT esetén, jellemzően $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

T_{c_NOCT} – cellahőmérséklet NOCT esetén, jellemzően $40 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$; illetve NOCT esetén 1 m/s szélsébséget is feltételezünk a napelem felületén.

A leírtak alapján tehát a kapcsolat megteremthető a cellahőmérséklet és a környezeti hőmérséklet között [45, 46, 51, 55, 59]:

$$T_c = T_a + \left(\frac{E(T_{c_NOCT} - T_{a_NOCT})}{E_{NOCT}} - \frac{(T_{c_NOCT} - T_{a_NOCT})I_{mpp} U_{mpp}}{0,9E_{NOCT} a} \right). \quad (33)$$

A napelem matematikai modelljének megalkotása után a következő lépés az egyenletek megoldása, vagyis a modell átültetése egy alkalmas szoftveres környezetbe. Esetünkben a szimulációs program MATLAB környezetben került megírásra.

A program szerkezetét tekintve több blokkból épül fel, amelyek a következők [13, 29, 39, 40, 48, 53, 56, 58, 59, 61]:

- napelem jellemzőinek megadása (adattáblán szereplő paraméterek értékei),
- környezeti tényezők bekérése (hőmérséklet, fényintenzitás),
- az egyes változók referenciaértékeinek meghatározása,
- az egyes változók referenciaértékeinek korrigálása az aktuális hőmérséklet és fényintenzitás értékek alapján,
- a napelem kivezetéseinek mérhető áramerősséget megadó implicit egyenlet megoldása a vonatkozó feszültségtartományon.

A program első négy blokkja egyértelmű és csupán a modell leírásakor ismertetett egyenletekbe történő behelyettesítést foglalja magában. Az áramerősséget implicit módon kifejező egyenlet megoldásához a következők szükségesek: célfüggvény kreálása a (19) egyenletből (34) egyenlet és ezen I változójú függvény zérusértékének keresése. MATLAB környezetben egy célfüggvény zérusértékének keresése az 'fzero' parancs segítségével egyszerűen elvégezhető [39, 49, 59, 61]:

$$f = I - \left[I_{ph} - I_T \exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{\gamma k T_c} - 1 \right) \right]. \quad (34)$$

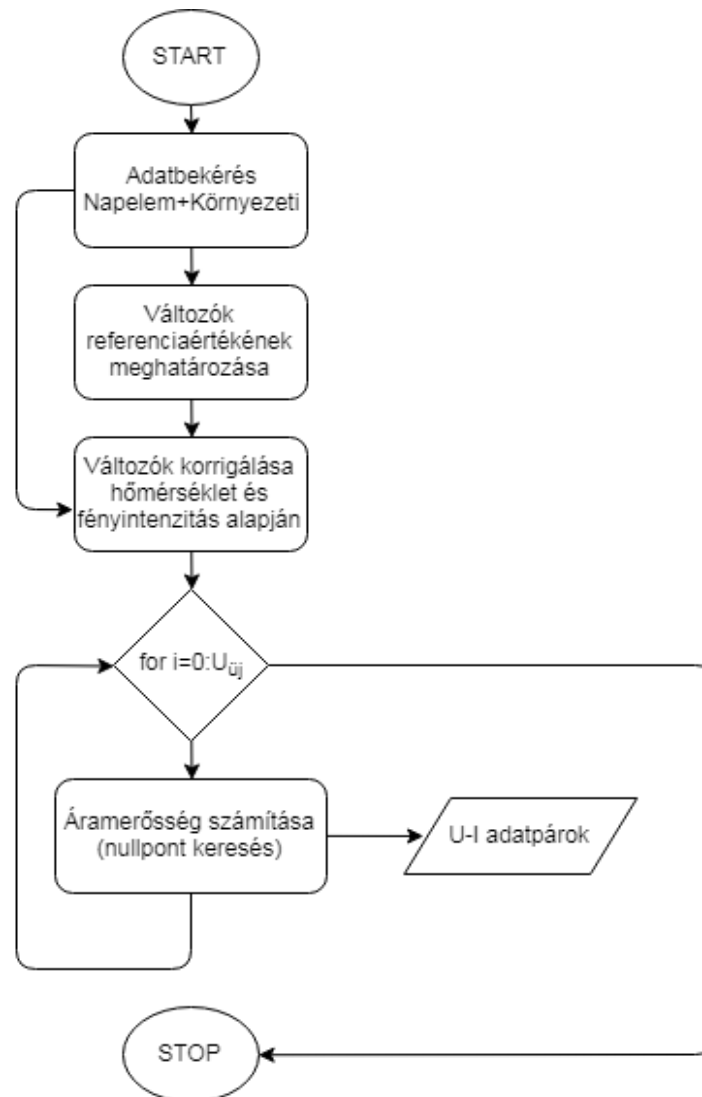
A napelem feszültség-áramerősség jelleggörbéjének meghatározásához a kimeneti I áramerősség meghatározása a $0-U_{OC}$ teljes feszültségtartományra szükséges. Ezen probléma numerikus megoldásához elegendő egy ciklus készítése, amely adott felbontással (U lépésköz) újra és újra elvégzi a (34) egyenlet zéruspontjának keresését és regisztrálja az adott feszültséghez tartozó áramerősség értéket [13, 39, 40, 46, 51, 53, 58, 59, 62, 63].

A program működését 6. ábrán látható blokkdiagram szemlélteti. A program működésekor megjelenő párbeszédablakot a 7. ábra mutatja.

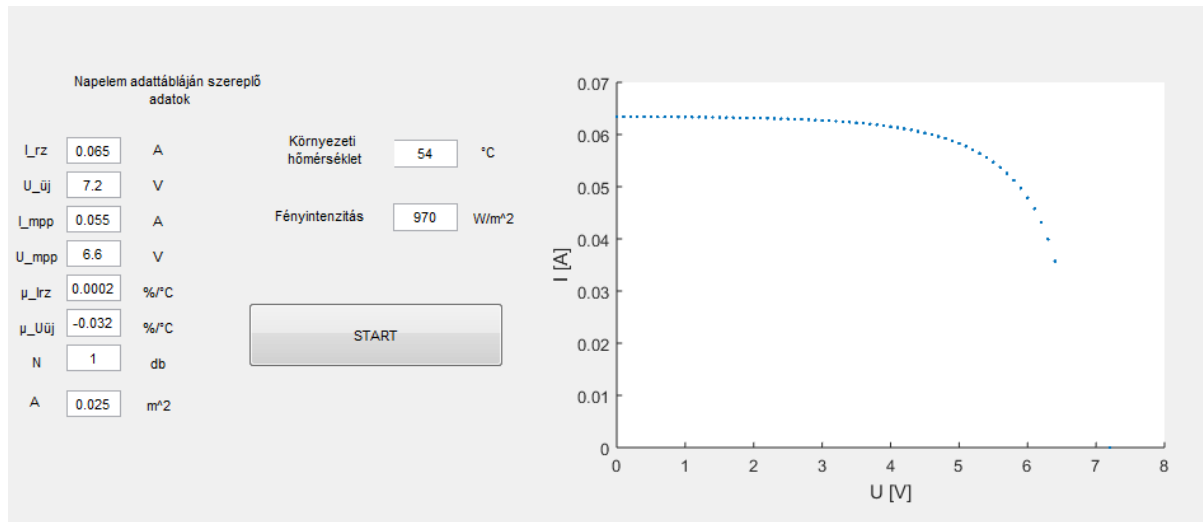
Mivel a méréseink során a napelem elektronikai paramétereinek viselkedését is vizsgáltuk a hőmérsékleti tranziens során, így a szimulációs modell ezen módon történő felhasználása is szükségessé vált [40]. A hőmérsékleti tranziens mérések során állandó megvilágítás, de változó hőmérséklet mellett regisztráltuk a terheletlen napelem üresjárási feszültségét és rövidzárási áramerősségét. A korábbiakban felírt matematikai összefüggések segítségével ezen jelenség is jól leírhatóvá válik, ehhez mindössze a (16) egyenlet rendezésére van szükség rövidzárási és üresjárási állapot esetére. Az üresjárási feszültségre és a rövidzárási áramerősségre előálló egyenletek a következő alakban írhatók [45, 59]:

$$I_{sc} = I_{ph}, \quad (35)$$

$$U_{oc} = \frac{\gamma k T_c}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_T} + 1 \right). \quad (36)$$



6. ábra: A program működése az U-I jelleggörbe meghatározása esetén.



7. ábra: Szimulációs program párbeszédablaka.

A felírt egyenletek megoldásához a már korábban ismertetett összefüggések használhatók, amelyek a hőmérséklet hatását figyelembe véve számítják az I_{ph} foto-áram és az I_T dióda telítési áramot [39].

A hőmérsékleti tranziens számítási módszerének megvalósítása ugyancsak MATLAB környezetben történik. A program a bekért napelem jellemzők és fényintenzitás érték mellett bekéri a hőmérséklet értékeket, amelyek segítségével minden hőmérséklet érték esetére elvégzi a (35) és (36) egyenletek megoldását. Ezen feladat megvalósítása 'for ciklus' alkalmazásával megtehető. A tranziens vizsgálatokat elvégző programkód külön grafikus felületet nem kapott [13, 39].

A számítógépes szimulációk során a feszültség és áramerősség értékek meghatározásán túl meghatározásra kerülnek az elméleti és valóságos teljesítményértékek is. A napelem elméleti teljesítménye a (37) egyenlet alapján számítható, a napelem valóságos teljesítményét pedig a (38) összefüggés adja meg [13].

$$P_{th} = I_{sc}U_{oc}, \quad (37)$$

$$P = IU. \quad (38)$$

A tranziens vizsgálat során az elméleti teljesítmény és a hőmérséklet kapcsolata is meghatározásra kerül (37) egyenlet alapján. A terhelt napelem feszültség-áramerősség karakterisztikája mellett a feszültség-teljesítmény karakterisztika is felvehető a (38) egyenlet ciklikus megoldása által.

2.3. NAPSZIMULÁTOR FEJLESZTÉSE NAPELEM PANELEK ÉS NAPELEM CELLÁK VIZSGÁLATÁHOZ

A megfelelő fényviszonyok kialakítása nagyon fontos része a mérési berendezés megépítésének. A természetben tapasztalható fényviszonyok megközelítése rendkívül nehéz feladat, ugyanis figyelni kell a fény intenzitásának erősségére és eloszlásának egyenletességére, emellett a megvilágítás és a napsugárzás fényspektrumának hasonlóságára. Az IEC 60 904-9 (MSZ EN 60904-9:2008) *Napszimulátor teljesítőképességi követelményei* szabvány alapján három különböző osztályokba sorolható a megvilágítás aszerint, hogy milyen a fényintenzitás-eloszlás homogenitása [79]. A szabvány előírja, hogy AM 1,5 esetén a spektrumegyezést 400 nm – 1.100 nm hullámhossz tartományon kell vizsgálni [19, 20, 26]. E három szempont alapján sorolhatjuk be az adott készüléket annak megvilágítása szerint A, B, illetve C osztályokba, amelyek követelményeit a 1. táblázat tartalmazza [65, 66, 67, 68, 83].

1. táblázat: Szabvány szerinti napfénysszimulátor kategóriák és a besorolás kritériumai.

	A osztály	B osztály	C osztály
Spektrális egyezés a napfényvel	75-125%	60-140%	40-200%
Térbeli egyenetlenség	≤ 2 %	≤ 5 %	≤ 10 %
Időbeli egyenetlenség	≤ 2 %	≤ 5 %	≤ 10 %

A szigorúbb követelményeknek eleget tevő A, illetve B osztályokba sorolható napfénysszimulátorok fejlesztése a költségeket és a fejlesztés idejét jelentős mértékben befolyásolta, így a megvalósíthatóságot szem előtt tartva, a napelem cellákon kísérletek elvégzéséhez az ASTM E972-es (MSZ EN 60904-9) szabványnak megfelelő, C osztályú napfénysszimulátort fejlesztettünk ki. A C típusú eszközöknél a $\pm 10\%$ eltérés még megengedett. Tehát a természetben előforduló maximális 1.000 W/m^2 fényintenzitást alapul véve, $900\text{--}1.100 \text{ W/m}^2$ értékek közt mozoghat a fényintenzitás értéke szabványos megvilágítás esetén [19, 20, 26, 65, 66, 67, 68, 82, 83].

2.3.1. NAPSZIMULÁTOR KIALAKÍTÁSA NAPELEM MODULOK VIZSGÁLATÁRA

A nagyméretű napelemek (modulok) vizsgálatához halogén reflektorokat alkalmaztunk. A rendelkezésre álló reflektorok nem tették lehetővé, hogy a szabvány által előírt, C osztályú napfénysszimulátor kritériumok teljesüljenek, ezért a spektrális energiasűrűségbeli eltéréseket egy konstans tényezővel kell figyelembe venni, amely konstans spektroszkóp segítségével, mérési úton került meghatározásra. A Napszimulátor intenzitás-eloszlását a 8. ábra szemlélteti.

A megvilágítás inhomogenitását a (39) összefüggés írja le [21]:

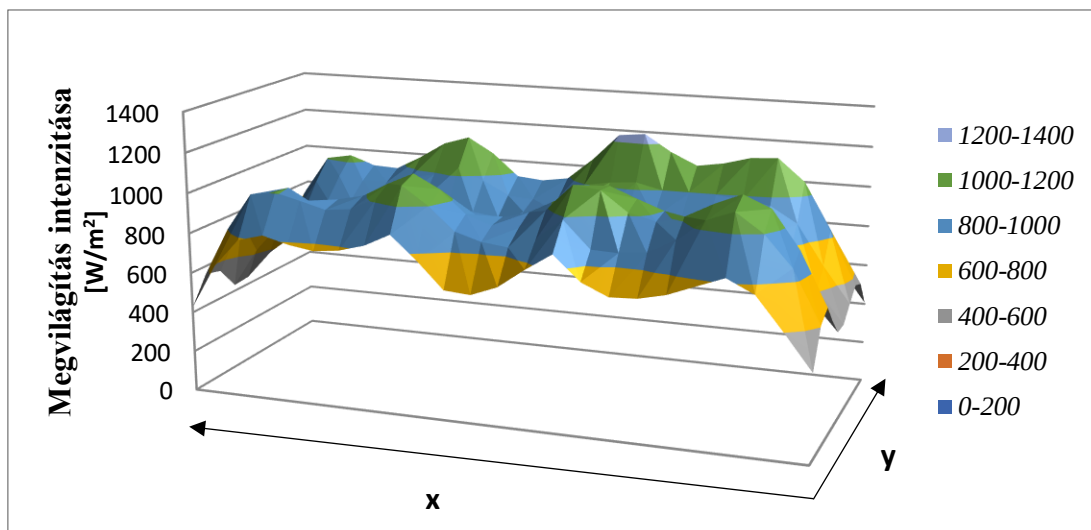
$$\Delta E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \cdot 100 \quad (39)$$

ahol: ΔE – a megvilágítás inhomogenitásának mértéke [%];

E_{max} – a maximális fényintenzitás értéke [W/m^2];

E_{min} – a minimális fényintenzitás értéke [W/m^2].

A mérési összeállításban $E_{max} = 1.245 \text{ W}/\text{m}^2$, $E_{min} = 407 \text{ W}/\text{m}^2$ és $\Delta E = 50,73\%$. A medián $874 \text{ W}/\text{m}^2$, a modulus $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$ értékre adódott. A fénytjeljesítmény $490,48 \text{ W}$.



8. ábra: Reflektorok elrendezési vázlata a hozzátartozó fényintenzitás eloszlással.

A (39) összefüggés alapján megállapított jelentős inhomogenitás abból fakad, hogy a megvilágított felület sarkain drasztikusan lecsökken a fényintenzitás értéke. Azonban, ha megnézzük az ábrázolt fényintenzitás-eloszlást, jól látható, hogy e felület igen kis hányada a hasznos felületnek, tehát a napelem fennmaradó hányadára nézve a fényintenzitás-eloszlás homogenitása kielégítőbb.

A napelemre jutó átlagos fényintenzitás értékét (integrált középérték) a (40) képlet alapján számolhatjuk a korábban megállapított valós fényintenzitás eloszlás-mátrix elemeiből [19]:

$$E_{average} = \left(\sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{24} (E_{ij} \cdot A_{cell}) \right) \cdot \frac{1}{A_{solar\ module}}, \quad (40)$$

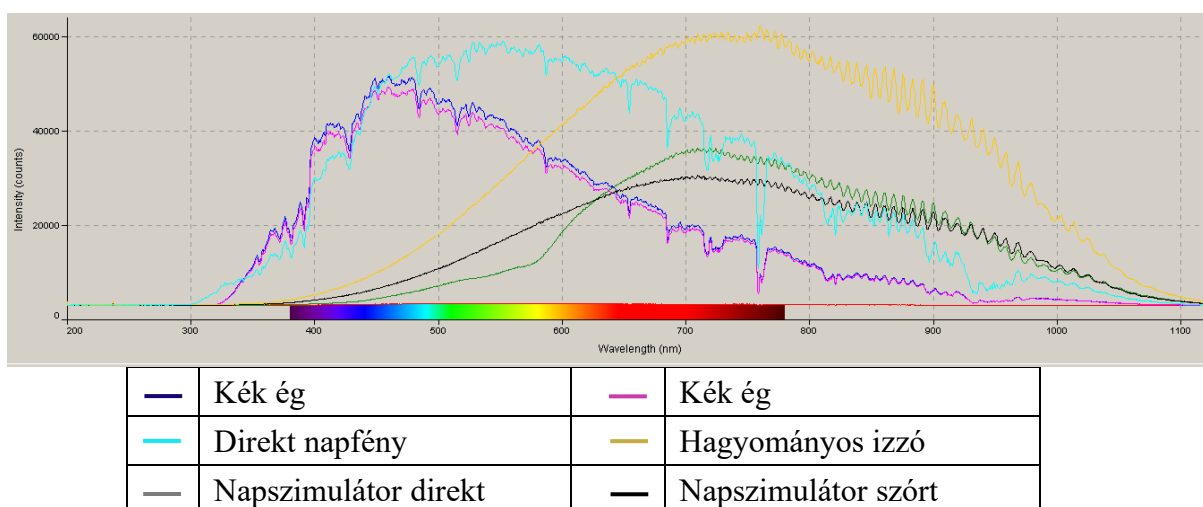
ahol: $E_{average}$ – a napelemre eső átlagos fényintenzitás értéke [W/m^2];

E_{ij} – az egyes cellákra eső fényintenzitás értéke [W/m^2];

A_{cell} – egy cella területe ($A_{cell} = 0,0025 \text{ m}^2$);

$A_{solar\ module}$ – a napelem felületének nagysága ($A_{solar\ module} = 0,5695 \text{ m}^2$).

A mérési összeállításban $E_{average} = 861,267 \text{ W/m}^2$. Ez kissé elmarad a természetben tapasztalható maximális 1.000 W/m^2 -től. Ez a fényintenzitás érték egy napos, de kissé felhős napon tapasztalható fényintenzitás értékével egyezik meg, azonban a természetes fényhez képesti halogén reflektor spektrális energiájának eltolódása miatt a Stefan-Boltzmann és a Wien törvények értelmében egy konstanszt kell figyelembe venni [8, 11, 19, 26, 28]. A 9. ábrán különböző fényforrások spektrális összetételét szemlélteti. Megfigyelhető, hogy az alkalmazott Napszimulátor spektrális összetétele jelentősen eltér a napfényhez képest, tehát valódi napszimulátorként nem alkalmazható, azonban a mérési eredmények szerint különbséti mérésekre megfelelő, mert a változáskövetést lehetővé teszi.



9. ábra: Különböző fényforrások spektrális összetétele.

2.3.2. NAPSZIMULÁTOR KIFEJLESZTÉSE NAPELEM CELLA VIZSGÁLATÁRA

A konstrukció alapját a nagyteljesítményű, színes LED egységek és a halogén lámpák kombinációja adja. E kombináció szükségességét két fő szempont támasztja alá, amelyek a következők:

- a megfelelő színű LED egységek kiválasztásával a napfény spektrumszerkezete jól közelíthető a 400 nm – 700 nm hullámhossz tartományon;
- mindazonáltal csupán LED egységek használatával a szabvány szerint szükséges 1000 W/m^2 fényintenzitás érték esetünkben nem válik elérhetővé, így a megfelelő fényerő érdekében szükségessé vált a halogének beiktatása a koncepcióba.

További pozitívumai ennek a koncepciónak, hogy a LED egységek mátrix szerű elrendezése egy viszonylagosan homogén fényintenzitás eloszlást garantál, a halogén lámpa fényének spektrális eloszlása pedig 700 nm – 1.100 nm hullámhossz tartományon jó egyezést mutat a napfény spektrumszerkezetével [11, 19, 65, 66, 67, 68, 71, 83].

A konstrukció alapjainak lefektetése után is számos olyan paraméter meghatározása vált szükségessé, amelyek lényegesen befolyásolhatták a majdani eredményeket. Esetünkben megkülönböztettünk rögzített paramétereket és úgynevezett tervezési paramétereket. A rögzített paramétereket előzetes mérések, MATLAB szimulációk és megfontolások alapján rögzítjük, míg a tervezési paraméterek optimális értékének meghatározását a tervezés későbbi fázisában végezzük el. A 2. táblázat a rögzített paramétereket és azok értékeit mutatja be.

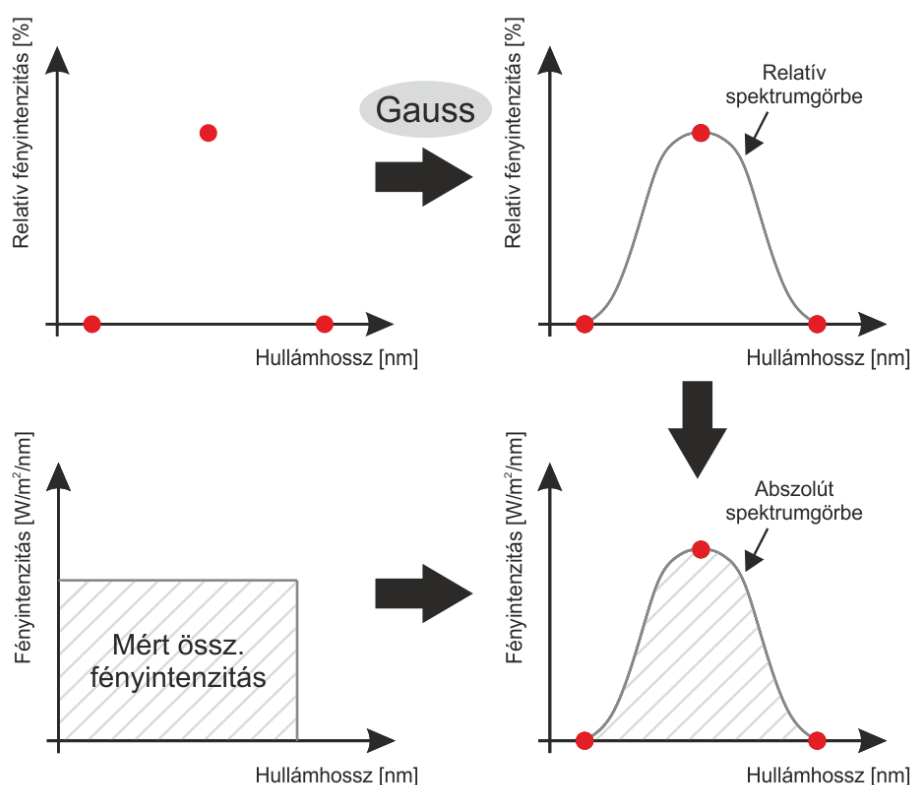
2. táblázat: Rögzített paraméterek a LED-, halogén fényforrásokra, illetve a vizsgálati tartományra vonatkozóan.

LED	
Darabszám	36 db (6x6-os mátrix)
Színek	semleges fehér, piros, kék, zöld
LED egységek távolsága a mátrixban	30 mm
LED egységek maximális teljesítménye	3 W
Halogén	
Halogén lámpák maximális teljesítménye	50 W
Halogén lámpák helye	LED mátrix sarkain és oldalain
Halogén lámpák darabszáma	8 db
Vizsgálati tartomány	
Tartomány mérete	165 mm x 165 mm
LED mátrixtól mért távolság	80 mm

A vizsgálati tartomány méretét a napelemcellák maximális mérete szabja meg, amely jelen esetben 165 mm x 165 mm. A LED darabszámot úgy adtuk meg, hogy a belőlük kialakított mátrix mérete kissé meghaladja a vizsgálati tartomány méretét, mindemellett szükséges a négygyel való oszthatóság is, hiszen négy eltérő LED szín beépítését vesszük alapul. Az alkalmazott LED színek kiválasztásakor az egyes színeknek feltételezett spektrális eloszlása határozta meg. A MATLAB szimulációk és a spektrális mérések alapján kék, zöld, piros és semlegesfehér LED-ek kerültek beépítésre, továbbá halogén reflektorok.

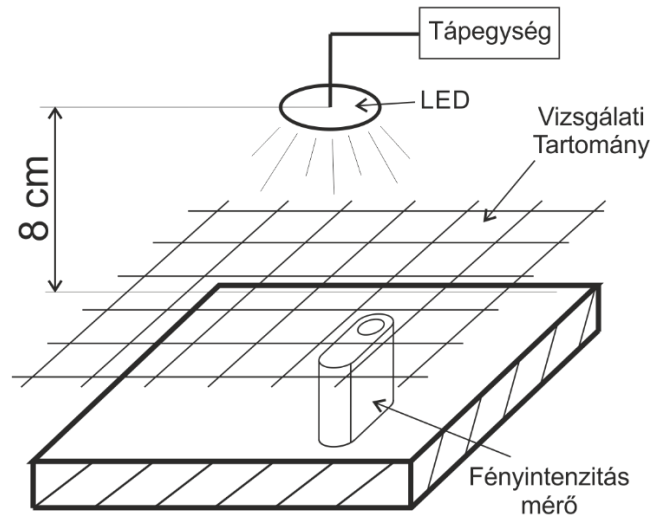
A szabvány által megkövetelt egyik kritérium a megvilágítás spektrumának egyezése a napfényéhez képest. A spektrális egyezés tervezése esetében az első lépés a fényforrások spektrumgörbéinek meghatározása. A tervezés során azonban nem állt rendelkezésünkre abszolút spektrumvizsgálat elvégzésére alkalmas spektrométer, így a spektrumgörbék meghatározását közvetett módon végeztük el. A számítások fényintenzitás próbaméréseken alapulnak, az elvégzésük MATLAB környezetben történik.

A LED egységek esetén a spektrumgörbéket Gauss-görbékkel közelíthetjük. Ehhez szükséges három, célszerűen megválasztott hullámhossz-fényintenzitás pont, amelyekre a MATLAB kód segítségével a kívánt görbét ráilleszthetjük. Hasonló algoritmusokat használ Hussain et al. [83]. A LED egységek esetén a gyártó megadja a sugárzási csúcshoz tartozó hullámhossz értékeket az egyes színekre, illetve ismert minden szín esetén azon hullámhossztartomány, amelyben sugárzása még számottevő. Tehát rendelkezésünkre állnak a szükséges pontok. Ezek után az adott színre előállíthatóvá válik a relatív spektrumgörbe, azonban a tervezéshez számunkra az abszolút spektrális eloszlás meghatározása szükséges. E kalibrációs probléma feloldható, ha figyelembe vesszük, hogy az adott fényforrás abszolút spektrumgörbéjének integrálja jó közelítéssel megegyezik az általa produkált fényintenzitás értékkel. Tehát ha ismerjük adott elrendezés és áramerősség esetén a különböző színű LED egységek fényintenzitás értékét, akkor -a leírtak alapján- minden információ rendelkezésünkre áll az abszolút spektrumszerkezet meghatározásához. A módszer megértését segíti a 10. ábra.

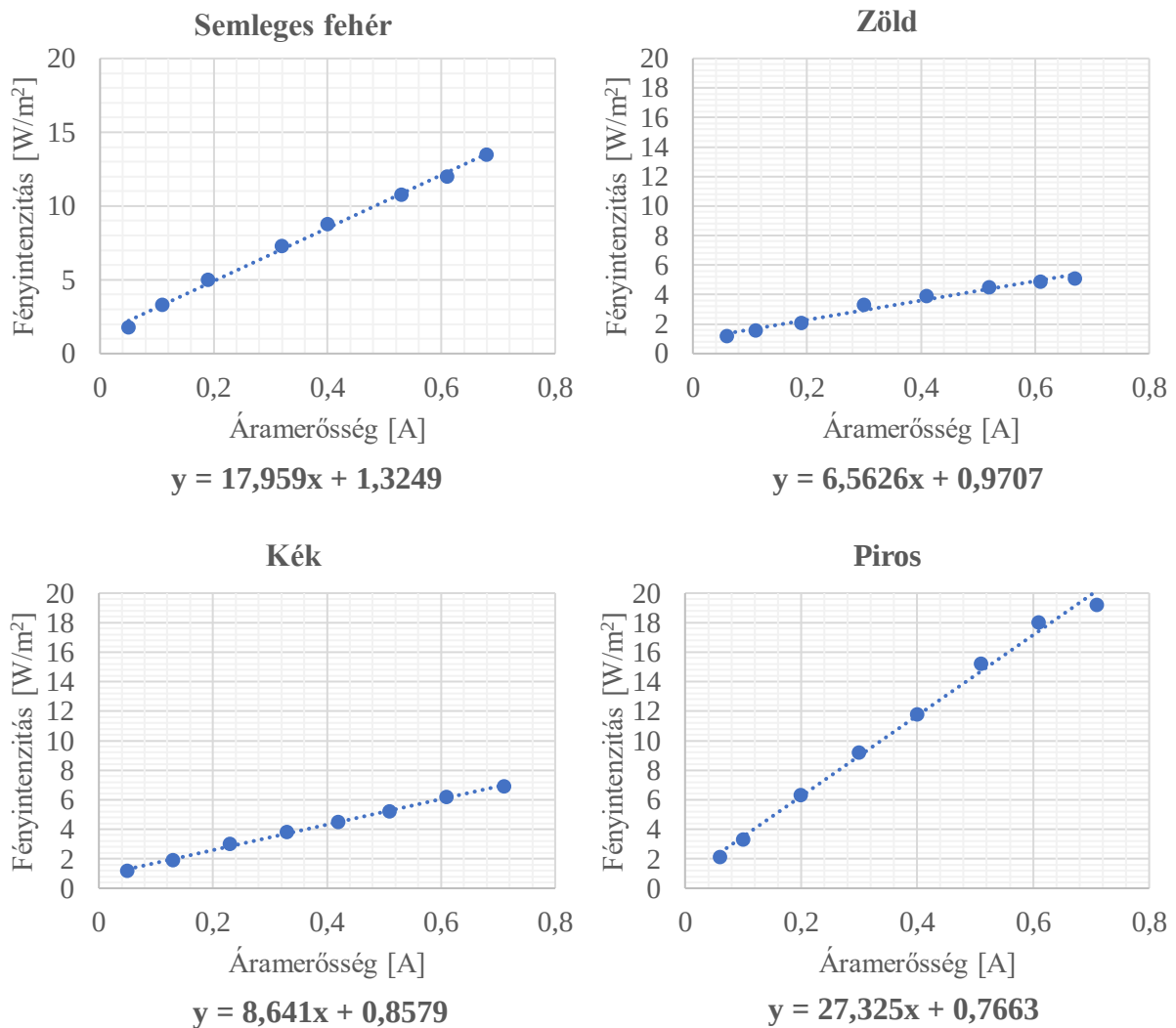


10. ábra: LED abszolút spektrumszerkezet közvetett meghatározásának módszere.

A szükséges fényintenzitás adatok meghatározásához próbaméréseket végeztünk különböző megválasztott áramerősségek mellett az egyes LED színek esetére [19, 69, 70, 74, 81]. A mérésekhez PCE-SPM 1 típusú napenergia mérőt használunk. A mérési elrendezést a 11. ábra mutatja [20, 72, 78]. A mérések eredményeit a 12. ábra ábrázolja a négy LED szín esetére



11. ábra: LED egységek előzetes fényintenzitás mérésének mérési összeállítása.



12. ábra: Különböző színű LED egységek fényintenzitás értékei a megtáplálási áramerősség függvényében.

A halogének esetén az abszolút spektrumszerkezetet a fekete test sugárzása alapján írjuk le, 3.200 K színhőmérsékletet feltételezve, a következő összefüggés alapján [8, 19, 69, 70, 74, 81]:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}, \quad (41)$$

ahol: $E(\lambda, T)$ - spektrális intenzitás [$\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$];

λ - fény hullámhossza [nm];

T - színhőmérséklet [K];

h - Boltzmann-állandó [J/K];

c - fénysebesség vákuumban [m/s].

Az egyes fényforrások spektrumgörbéinek szuperpozíciója adja a napfényszimulátorra jellemző spektrumszerkezetet az adott változó paraméterek esetére. Tehát a további feladat azon LED megválasztási áramerősségek megkeresése volt, amelyek esetén a szabvány által előírt spektrális egyezés a legjobb. A spektrális egyezés számítása a (42) összefüggés alapján történt, -AM 1.5 globálsugárzás esetén- 400 nm – 1.100 nm közötti hullámhossz tartományokra [8, 19, 69, 70, 74, 81]:

$$SE(\lambda_a - \lambda_f) = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_f} E_{NSz}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_f} E_{AM1,5}(\lambda) d\lambda}, \quad (42)$$

ahol: $SE(\lambda_a - \lambda_f)$ - spektrumeltérés az adott hullámhossz-tartományra [-];

λ_a - hullámhossz-tartomány alsó határa [nm];

λ_f - hullámhossz-tartomány felső határa [nm];

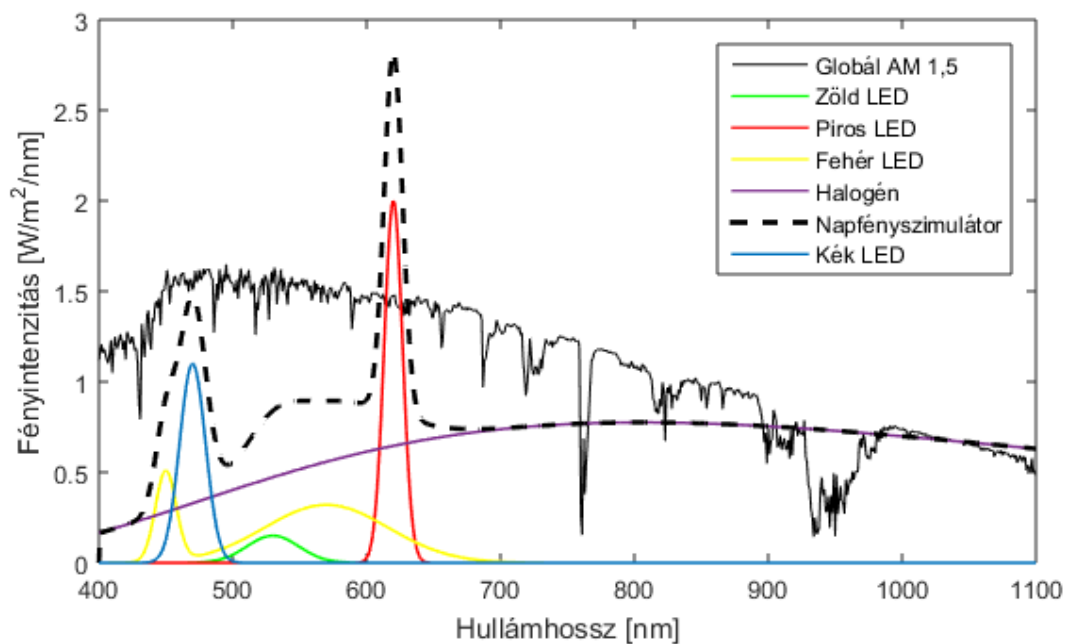
E_{NSz} - napszimulátor spektrális intenzitása [$\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$];

$E_{AM1,5}$ - napsugárzás spektrális intenzitása [$\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$].

A tervezéskor alapul vett 3 W teljesítményű LED egységek maximális terhelhetősége áramerősség szempontjából 700 mA. Az általunk írt MATLAB program minden szín esetére öt megválasztási áramerősség esetet vizsgál, a maximális áramerősség értéktől indulva 100 mA lépésközös csökkentéssel. Ez a négy szín esetére $5^4=625$ kombinációt jelent. Tehát 625 áramerősség kombinációra történik meg az ismertetett számítási módszer: meghatározásra kerülnek az egyes spektrumgörbék, a szuperpozíciójuk által a napszimulátorra jellemző

abszolút spektrális eloszlás és minden esetben megtörténik a spektrális egyezés számítása [22, 23, 65, 66, 67, 68, 74, 83, 84, 85].

A legjobb egyezést eredményező LED megtáplálási áramerősség kombináció tehát kiválasztható az iterációk eredményei közül, így az optimalizációs feladat a leírtak alapján megoldható. A 13. ábra a legjobb egyezést eredményező áramerősség kombinációk esetén mutatja az egyes fényforrások, a napszimulátor és a napsugárzás (globálsugárzás AM 1,5) spektrális eloszlását [8, 19, 69, 70, 74].

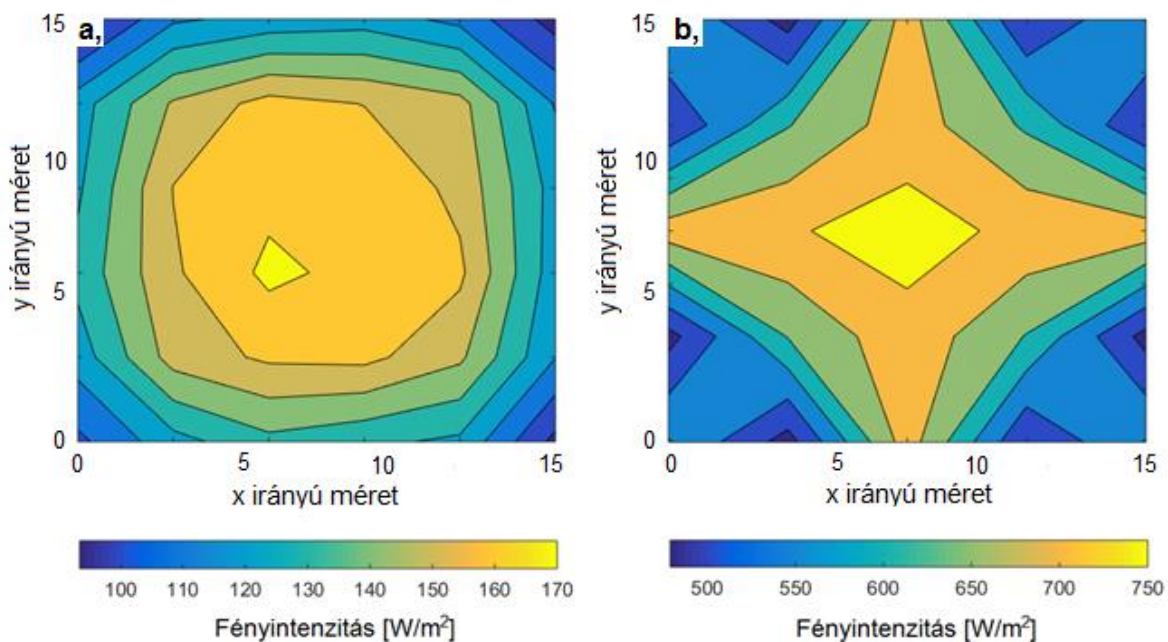


13. ábra: Legjobb spektrális egyezést mutató LED-halogén kombinált spektrális eloszlás.

A megfelelő fényintenzitás eloszlás tervezését próbamérések előzték meg. A LED és a halogén megvilágítás által eredményezett fényintenzitás eloszlások számítása külön történik, majd ezek szuperpozíciója adja a napszimulátor által produkált fényintenzitás eloszlást. A LED egységek esetén méréseket végeztünk a spektrális egyezés vizsgálatakor használt megtáplálási áramerősség értékekkel. A mérési összeállítás az előzetes mérésekkel megegyező módon történt, ami a 11. ábrán figyelhető meg.

A vizsgálati tartományt 3 cm x 3 cm területű négyzetekre osztottuk és minden négyzetben megtörtént a fényintenzitás mérés. Egy ilyen mérés eredményeként előállt az adott áramerősség esetén egyetlen LED egység által kialakított fényintenzitás eloszlás. MATLAB környezetben a LED egységek mátrix elrendezésére számítottuk a várható fényintenzitás eloszlást [74].

A halogének vizsgálatakor változó paraméter a darabszám (4 db vagy 8 db) és a pozíció. 30 db halogén pozícióra és darabszáma vonatkozó kombináció tesztmérése történt meg. Egy mérés során a korábbiakhoz hasonlóan felosztott vizsgálati tartomány sarok pontjában vagy oldalfelező pontjában kap helyet a halogén lámpa, a fényintenzitás mérés ismét minden kis négyzetben megtörtént. Eredményként szolgál egy darab, adott pozíciójú halogén lámpa által kialakított fényintenzitás eloszlás, amiből meghatároztuk a majdani, teljes megvilágítás során kialakuló fényintenzitás eloszlást [75, 77]. A LED és halogén fényforrások által produkált fényintenzitás eloszlásokra mutat példát a 14. ábra.



14. ábra: Fényintenzitás eloszlás (a) LED mátrix, (b) halogén lámpák.

Miután a LED és a halogén fényforrások által produkált fényintenzitás eloszlások szuperponálása megtörtént, a következő lépés azon változó paraméterek megkeresése volt, amelyekre a fényintenzitás eloszlás inhomogenitása a legkisebb. A szabvány által adott összefüggés alapján számíthatjuk a fényintenzitás eloszlás inhomogenitását:

$$\Delta E_{Egy} = \frac{(E_{max} - E_{min})}{(E_{max} + E_{min})} \cdot 100\%, \quad (43)$$

ahol: ΔE_{Egy} - fényintenzitás eloszlás egyenetlensége [%];

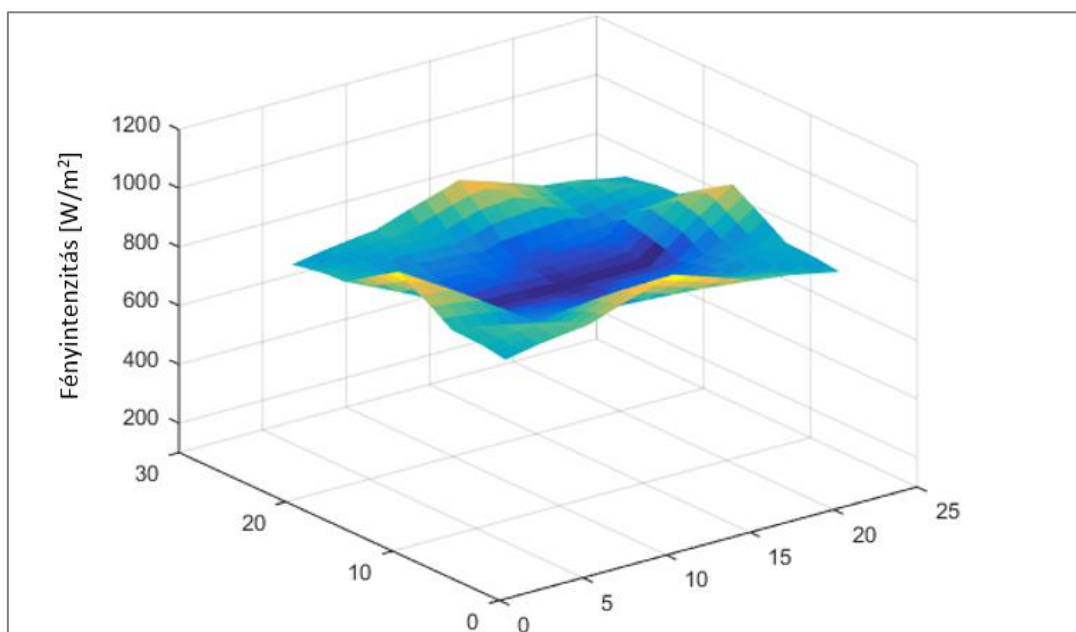
E_{max} - maximális fényintenzitás [W/m²];

E_{min} - minimális fényintenzitás [W/m²].

Az spektrális eloszlás optimalizálása során leírtakhoz hasonlóan jártunk el. A program a 625 áramerősség kombináció és a 30 halogén pozíció esetére meghatározta a várható fényintenzitás

eloszlást, majd számította az aktuális eloszlás inhomogenitását. Az egyes iterációk eredményei alapján a legjobbnak tartott homogenitást mutató változó paraméter értékek kiválaszthatóvá váltak [74]. A 15. ábra mutatja a legjobb homogenitással rendelkező fényintenzitás eloszlást.

(Megjegyzés: a fényintenzitás eloszlás tervezése során azt figyeltük meg, hogy a LED egységek fényerejének változtatása kismértékben befolyásolja a végleges fényintenzitás eloszlást, a halogének pozíciója sokkal erősebb hatással bírt e szempontból [78].)



15. ábra: Legegyenletesebb fényintenzitás eloszlás a vizsgálati területen.

Az tervezési módszer célja az ismertetett változó paraméterek (LED esetén megáramlálási áramerősség, halogén esetén mennyiség és pozíció) optimális értékének meghatározása, ezentúl a megépítésre kerülő eszköz tényleges konstrukciójának felvázolása volt. Az általunk tervezett napszimulátor a tervezési folyamat eredményeként végül 36 db, egyenként 3 W teljesítményű színes LED egység és 8 db egyenként 50 W teljesítményű halogén izzó kombinációjából épült fel [71, 75, 76, 77]. A LED egységek színekre vonatkoztatott megáramlálási áramerősség értékeit a 3. táblázat foglalja össze. (Ezen paraméterek megválasztásakor mind a spektrális egyezés, mind a fényintenzitás eloszlás megfelelőségét figyelembe vettük.) A halogének ideális pozícióját a 4. táblázat mutatja.

3. táblázat: LED egységek megáramlálási áramerősség- és feszültség értékei az eltérő színekre.

Szín	I [mA]	U [V]	Szín	I [mA]	U [V]
Piros	710	2,5	Zöld	670	3,2
Kék	710	3,4	Fehér	680	4,0

4. táblázat: A halogén lámpák tervezett pozíciója.

	Pozíció	
Vízszintes távolság a LED mátrixtól	Sarkon: 30 mm	Oldalt: 34 mm
Vízszintessel bezárt szög	Sarkon: 15°	Oldalt: 45°
Magasság a vizsgálati tartománytól	Sarkon: 75 mm	Oldalt: 60 mm

A tervezési fázis eredményességét a szabvány szerinti megfeleléssel lehet értékelni. Az optimálisnak vélt változó paraméterek esetén a tervezett napszimulátor fényintenzitásának inhomogenitása a számítások alapján 10%-nak adódott és az ekkor tapasztalható átlagos fényintenzitás eloszlás 950 W/m^2 . A spektrális egyezés mértékét az egyes hullámhossz tartományokban a 5. táblázat ismerteti.

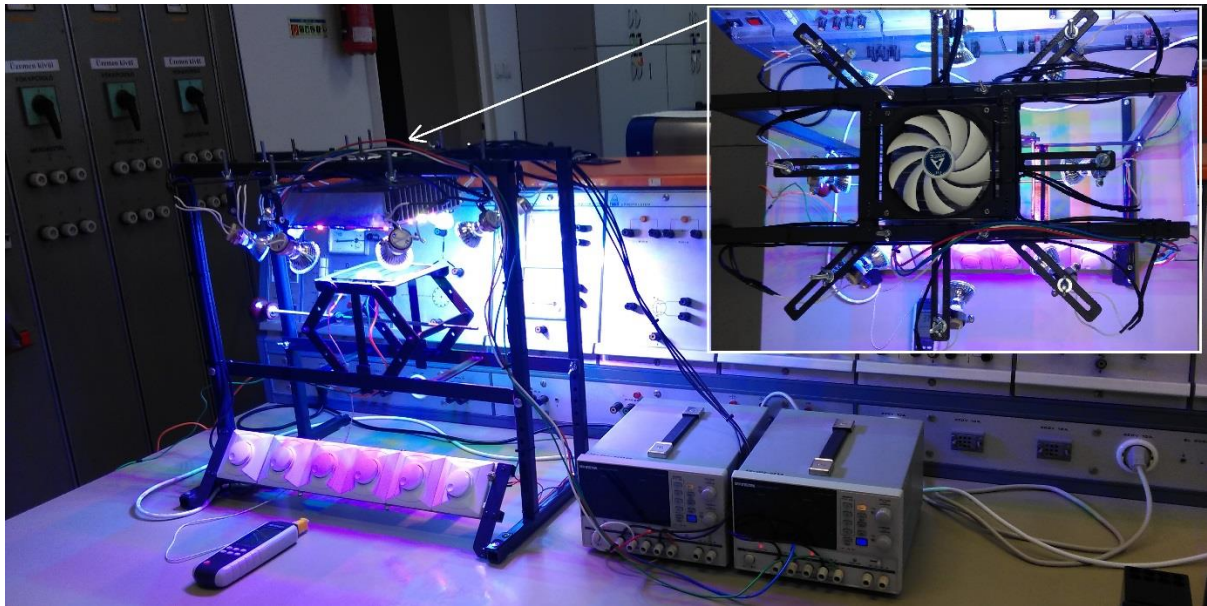
5. táblázat: Számított spektrális egyezés a vizsgált hullámhossz-tartományokban.

	Megengedett tartomány és az egyezés					
Hullámhossz tart. [μm]	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1,1
Spektrális egyezés [%]	12,8	67,0	82,3	67,9	81,5	115,3

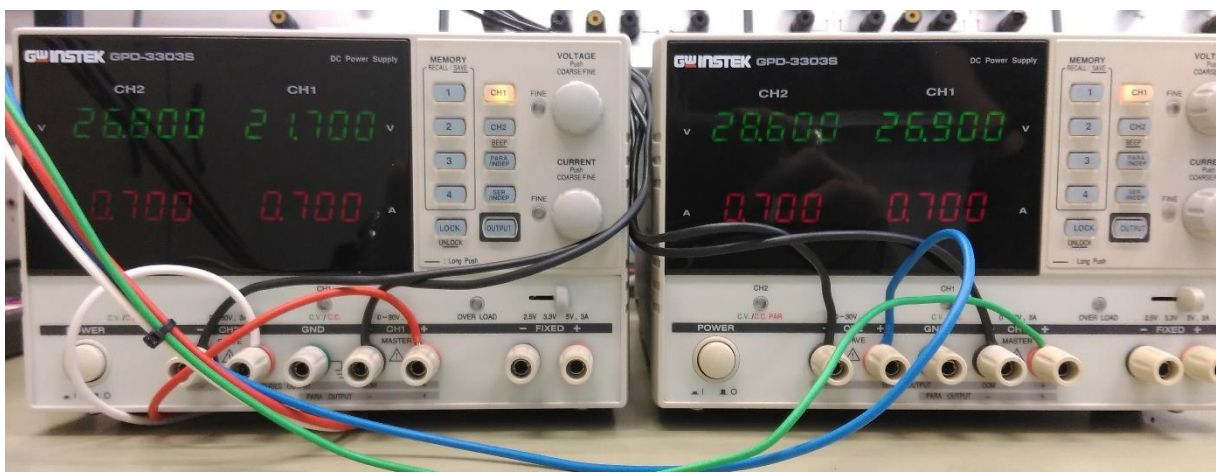
A szabvány szerinti megfelelés tükrében a tervezéssel kapcsolatban a következő konklúzió vonható le:

- A fényintenzitás nagysága és homogenitása tekintetében kismértékben elmarad a szabvány szerinti előírástól. Ez a probléma valószínűleg a halogén lámpák pozíciójának további, a valós konstrukción történő optimalizálásával megoldhatóvá válik.
- A spektrális egyezés esetén a megvilágítás minden hullámhossz-tartományban megfelel a szabvány szerinti C osztály követelményeinek, kivéve a 400 nm – 500 nm intervallumot. Ez az eredmény új, alacsony hullámhosszon domináns LED egység (ultraibolya) beépítésének szükségességét jelzi.

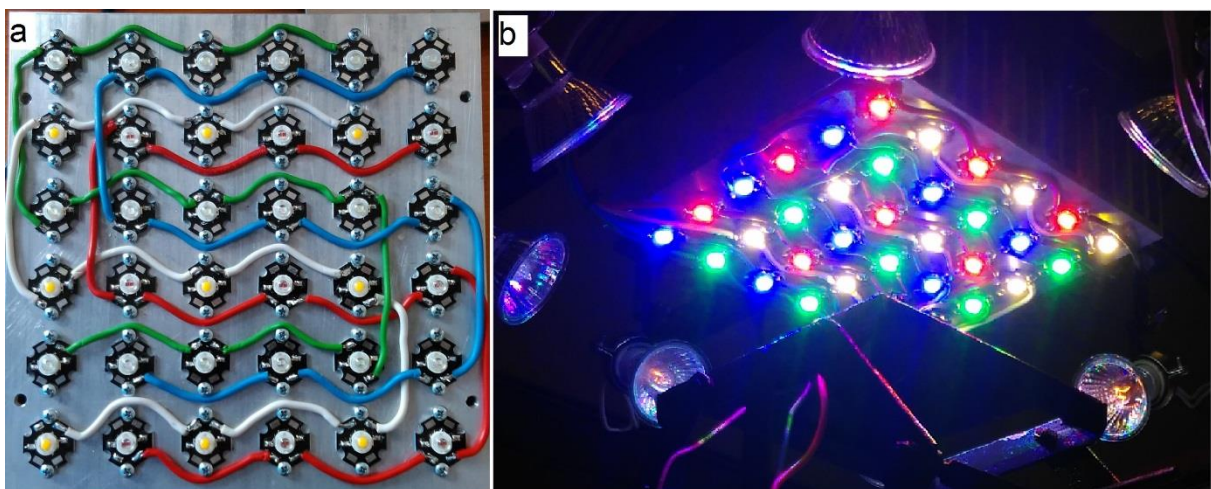
A megvalósított konstrukciót szemlélteti a 16. ábra. A validálási mérések során a LED mátrix megtáplálásához használni kívánt áramgenerátoros tápegységek helyett stabilabb, két darab áramkorláttal rendelkező kétcsatornás labor-tápegységet alkalmaztunk [67, 68], amelyeket a 17. ábra szemléltet. A 18. ábrán a LED mátrix figyelhető meg, működés előtt és működés közben.



16. ábra: Megépített napszimulátor.

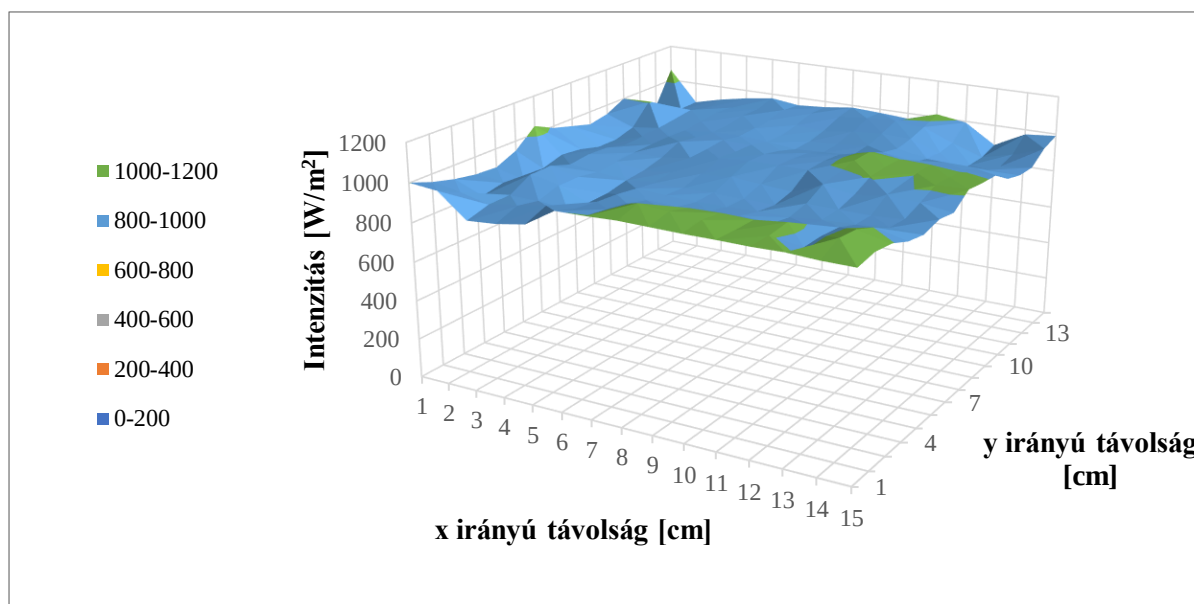


17. ábra: Mérésekhez használt tápegységek.



18. ábra: (a) LED mátrix bekötése, (b) LED mátrix működés közben.

A szabványos napfénysszimulátorok egyik fontos jellemzője a megvilágított tartományon mérhető fényintenzitás nagysága és eloszlása. Az egyik mérés, amelyet az elkészült eszközön végezzünk el, a fényintenzitás mérése. Ehhez a 15 cm szélességű és 15 cm mélységű négyzet alakú vizsgálati tartományt 1 cm^2 -es tartományokra osztottuk fel, majd a már ismertetett kézi intenzitásmérőt használva mértük a fényintenzitás értékét W/m^2 mértékegységben minden négyzetcentiméteren. A már ismertetett 11. ábra szerinti mérési összeállításban végezzük a méréseket, azzal a különbséggel, hogy most az elkészült napszimulátor szolgáltatja a megvilágítást, a tervezés során meghatározott paraméterek szerint. A mérés eredményeként előálló fényintenzitás eloszlást a 19. ábra ismerteti.



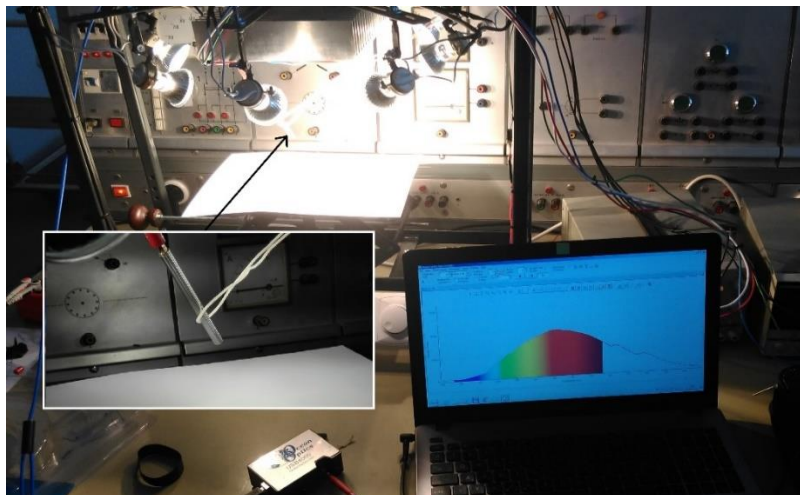
19. ábra: Mért fényintenzitás eloszlás a vizsgálati tartományon.

A mért értékeket vizsgálva látható, hogy a fényintenzitás értékek bizonyos kereteken belül mozognak a mérési pozíció függvényében. A legkisebb mérhető fényintenzitás érték: $E_{\min}=868\text{ W/m}^2$, míg a legnagyobb $E_{\max}=1060\text{ W/m}^2$. A mért fényintenzitás értékek számtani közepe 951 W/m^2 -re adódik, a minta modusa és mediánja is 950 W/m^2 értékű. Az ábrán szemmel látható az intenzitás értékek viszonylagos homogenitása a vizsgálati tartományon, azonban az eloszlás egyenetlenségét a szabvány által megadott (44) összefüggés alapján határoztuk meg pontosan:

$$\Delta E_{Egy} = \frac{(E_{\max} - I_{\min})}{(E_{\max} + I_{\min})} \cdot 100\% = \frac{(1060 - 868)}{(1060 + 868)} \cdot 100\% = 9,96\% . \quad (44)$$

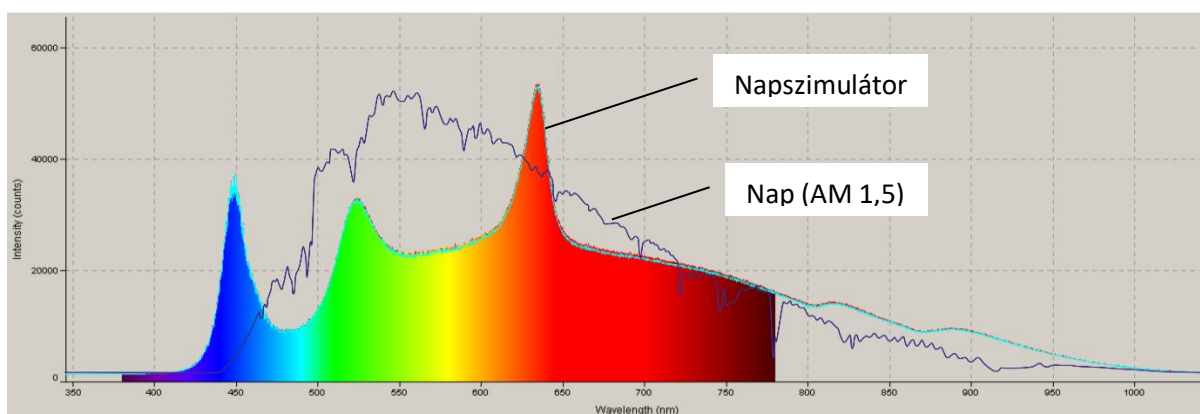
A szabvány szerinti C osztályú napszimulátor esetén az eloszlás egyenetlensége maximum 10% lehet. Az általunk készített napfényszimulátor fényintenzitás eloszlásának egyenetlensége 9,96%, tehát az eszköz megfelel a szabványban előírt követelménynek.

A megvilágítás spektrumszerkezetének ellenőrzéséhez *Ocean Optics USB 4000* típusú spektrométert használtunk. Az eszköz nagymértékű irányfüggősége miatt a megfelelő használat érdekében a vizsgálati tartományra fehér lapot helyezve, a szórt fényre irányítva rögzítettük a szondát [8, 69, 70]. A mérés körülményeit a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra: Spektrumvizsgálat folyamata.

A spektrumvizsgálat során az elkészült napszimulátor spektrumszerkezetét vizsgáltuk. Az alkalmazott spektrométer nem alkalmas abszolút fényintenzitás mérés elvégzésére, azonban lehetőséget nyújt a szimulátor és a napfény spektrumgörbéjének méréssel történő rögzítésére. Ezáltal lehetőség adódott a valós napszimulátor és a napfény spektrumszerkezetének összehasonlítására, spektrális egyezés számítására. A mérés során meghatározott napszimulátor- és nap spektrumgörbét a 21. ábra mutatja. Ugyanez a tendencia figyelhető meg néhány hasonló publikációban, mint például Kádár et al [8]. és Kenny et al. [78].



21. ábra: Napszimulátor- és napsugárzás spektrum szerkezete.

A mért értékek alapján, a szabvány által megadott (42) összefüggéssel számított spektrális egyezést a 6. táblázat ismerteti. Sok más kutató kapott hasonló eredményeket, többek között Kenny et al. [78] és Hussain et al. [83].

6. táblázat: Valós spektrális egyezés a vizsgált hullámhossz-tartományokban.

	Megengedett tartomány és az egyezés					
Hullámhossz tart. [μm]	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1,1
Spektrális egyezés [%]	120,9	59,0	89,3	116,8	160,6	182,7

Megfigyelhető, hogy a mért spektrális egyezés értéke minden esetben a C osztályhoz tartozó 40% - 200% tartományon belül mozog, így a célul kitűzött spektrumszerkezet biztosítható [16].

Ezen alfejezet által összefoglalt munkánk során egy, a vonatkozó szabványnak megfelelő napszimulátor tervezése és megépítése volt a cél. A tervezés során -szem előtt tartva a megfelelő fényintenzitás eloszlást és fény spektrumszerkezetet- meghatározásra kerültek a rögzített paraméterek és optimalizációs számítások révén a változó paraméterek is. A konstrukciós tervezés elvégzése után megépítettük a napszimulátort, amelyet ezután próbamérések alá vetettünk. Fényintenzitás mérővel elvégeztük a vizsgálati tartományon kialakuló fényintenzitás eloszlás vizsgálatát, több halogén pozíció mellett is. A tervezéskor meghatározott pozíciók kismértékű korrigálása révén 9,96%-os inhomogenitást értünk el, amely a szabvány C-osztályának megfelelő mértékű. Az átlagos fényintenzitás értéke ekkor 951 W/m²-nek adódott, amely kismértékben elmarad a maximálisan szükséges 1.000 W/m² értéktől, azonban jó közelítéssel megfelel egy tiszta ég esetén tapasztalható átlagos fényintenzitás értéknek, tehát a napelem cellák vizsgálatára tökéletesen alkalmas.

A másik jelentős kérdés a megvilágítás spektrumszerkezetének ellenőrzése volt, amelyet spektrométer segítségével végeztünk el. A tervezés alapján megfelelő mértékű spektrális egyezést vártunk minden hullámhossz-tartományban, kivéve a 400 nm – 500 nm intervallumban. A mérések által elmondható, hogy a tényleges spektrumszerkezet egyezése a napfényével minden hullámhossz tartományban a szabvány által, C osztály esetére előírt 40 % – 200 % közé esik. Ez az eredmény arra enged következtetni, hogy a tervezés során használt módszer megállja a helyét és a valósághoz közelítő értékek számítására alkalmas. Illetve elmondható, hogy a legkisebb hullámhossz-tartomány előre nem prognosztizált megfelelőségét a beépített kék színű LED várt intenzitáscsúcsának kismértékű eltolódása okozta, így a jövőben nem válik feltétlen szükségessé az ultraviola-tartományban domináns LED egységek vizsgálata. A napszimulátor tervezésekor jelentős szerepet játszott a költségek reális határok

között tartása. Az eredmények alapján elmondható, hogy kisméretű napelemcellák szabványos megvilágítását lehet biztosítani, viszonylag alacsony bekerülési költségű berendezés által.

A napelemcella laboratóriumi mérése során fontos célunk a cellák hőmérsékletének befolyásolása, csökkentése, így egy hűtőmodul tervezése és megépítése is szükségessé vált. A hűtőmodul tervezésének első fázisában a hűtési mód kiválasztása volt az elsődleges feladat. Esetünkben a cél a viszonylagosan egyszerű megvalósíthatóság és a nagyfokú szabályozhatóság. A leírt követelményeknek a Peltier-elemek eleget tesznek, hisz ezen eszközök elektromos áram felhasználásával képesek hő elvonására. A Peltier-elemek alapvetően félvezető alapú termoelektromos hűtőlapok, amely kivezetéseire egyenfeszültséget kapcsolva az egyik oldaluk felmelegszik a másik oldaluk pedig lehül [86, 87, 88].

A használni kívánt Peltier-elemek kiválasztása esetén a lehető legnagyobb hűtési teljesítmény a fő szempont, az adott költség és méretkorlátokon belül. A beépítésre kiválasztott *TEC1-12706* típusú Peltier-elemek 12 V feszültségen működnek és 60 W teljesítményűek. Paramétereit a 6. táblázat tartalmazza. A beépítés során a napelem cella mérete szabta meg az elemek számát. A 15 cm x 15 cm-es területen 4 db, egyenként 40 mm x 40 mm-es modul megfelelő köztes távolság megtartása mellett elhelyezhető. A tervezett hűtő várható maximális teljesítménye így: $4 \times 58 \text{ W} = 232 \text{ W}$.

6. táblázat: *TEC1-12706 típusú Peltier-elem adattáblája.*

Paraméter neve	Paraméter értéke
Max. hőmérséklet különbség: $\Delta T_{max} (Q_c = 0)$	$>60 \text{ }^\circ\text{C}$
Működési áramerősség: I_o	4,5 A (12 V esetén)
Működési feszültség: U_o	12 V DC (max.: 15 V)
Hűtési teljesítmény: Q_{cmax}	56-65 W
Működési hőmérséklet tartomány: $T_{N-range}$	$-55 \text{ }^\circ\text{C} - 82 \text{ }^\circ\text{C}$
Belső ellenállás: R_i	$2,1 \text{ } \Omega - 2,5 \text{ } \Omega (T_o = 23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C})$

A Peltier-elemeken alapuló hűtő berendezés megfelelő működéséhez az elemek meglétén túl szükséges az elemek megáplálását biztosító tápegység, a szabályozhatóságát biztosító szabályozó egység és az elemek 'meleg oldala' által termelt hő elvezetésének biztosítása. A Peltier-elemek tápegységének kiválasztásakor a következő peremfeltételeket vettük figyelembe: a négy darab, párhuzamosan kötött elem maximális feszültségigénye 12 V, az általuk felvett áramerősség $4 \times 4,5 \text{ A} = 18 \text{ A}$, a maximális teljesítmény igény pedig $4 \times 60 \text{ W} = 240 \text{ W}$. Az igények szerint kiválasztott, *Optonica* típusú ipari LED tápegység (360 W, 12 V,

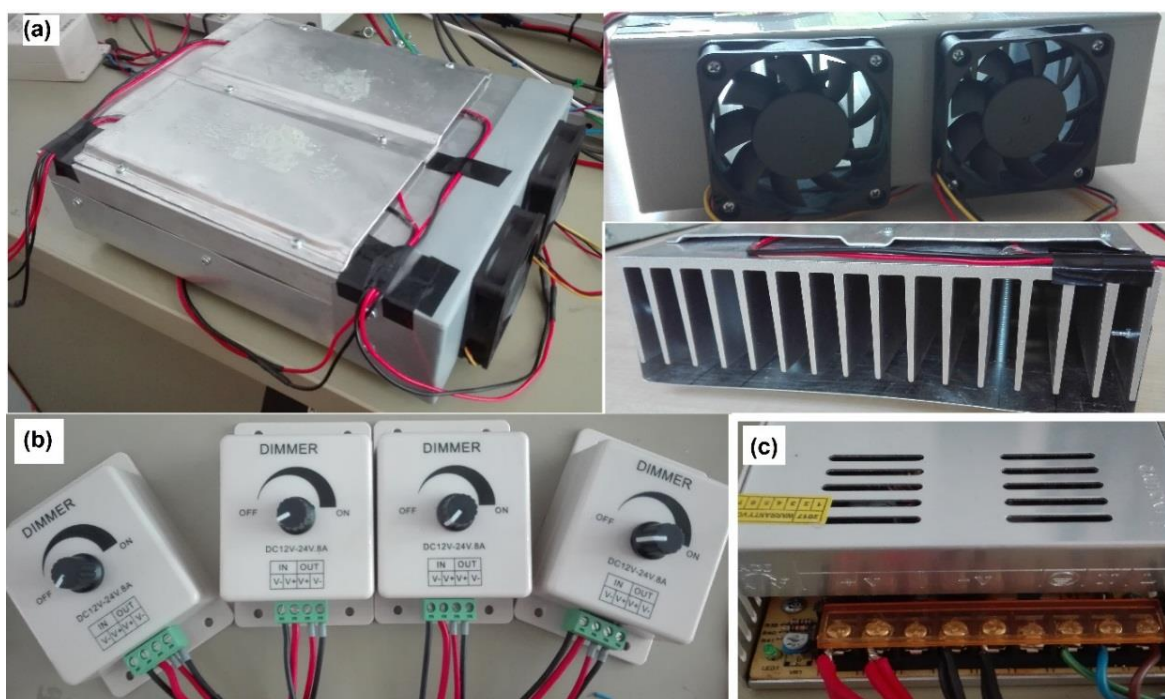
30 A) az elemek megtaplálását megfelelően biztosítja. A feszültség szabályozását minden Peltier-elem esetén külön, *Optonica* típusú potméteres dimmer (12 V -24 V, DC, 8A) biztosítja. A négy darab szabályozó beépítését az indokolta, hogy költséghatékonyabb szabályozást jelentenek, mint egy darab, nagyteljesítményű ipari teljesítményszabályozó alkalmazása.

A hűtőberendezés megfelelő működésének másik szükséges feltétele, hogy a Peltier-elemek 'meleg oldala' által termelt hő megfelelően elvezessük. Amint azt meghatároztuk, az elemek által leadott maximális hőteljesítmény 232 W, amelyet hűtőborda beiktatásával lehet hatékonyan elvezetni. A hűtőborda kiválasztásakor azt vettük alapul, hogy a lehető legnagyobb hűtőteljesítmény eléréshez a hűtőbordával elvezethető hőteljesítménynek is maximálisnak kell lennie. Közelítő összehasonlításként tekintsük a LED egység által leadott körülbelül $36 \times 5 \text{ W} = 180 \text{ W}$ hőteljesítményt, amelyet kényszerkonvekció esetén a hűtőborda kismértékű felmelegedés mellett ($\sim 8^\circ\text{C}$) el tud vezetni [73]. A Peltier-elemek által generált 232 W hőteljesítményt a LED mátrixnál használt hűtőbordának, hasonló kényszerkonvekció mellett megfelelően el kell tudnia vezetni. Megjegyzendő, hogy az esetleges nagyobb hűtőborda választását a méret növekedésével nem lineáris ár növekedés is korlátozza. Tehát a lehető legnagyobb hűtőborda került kiválasztásra, -vagyis a LED mátrixéval azonos-, amely előzetes becslések alapján megfelelően elvezeti a termelt hő és költségvonzata nem irreálisan magas. A kiválasztott hűtőborda tehát: *Stonecold RAD-A6023/190* típus, amely anyagát tekintve extrudált alumínium, befoglaló méretei pedig: 190 mm x 190 mm x 50mm. A hűtőborda kényszerkonvekciójának kialakítása kissé eltér a LED mátrix hűtőbordájánál láthatónál, ugyanis nem a hűtőfelülettel párhuzamosan, hanem arra merőlegesen került kialakításra egy áramlási csatorna, amelyben a levegőt két kisméretű ventilátor áramoltatja. A hűtőberendezés tervét a 21. ábra mutatja, megfigyelhető a levegő áramlási iránya és az áramlást biztosító ventilátorok elhelyezkedése. A beépíteni kívánt két ventilátor típusa: *GEMBIRD D6015SM-3 OEM* és 60 mm lapát átmérővel rendelkeznek.

A tervezés során ismertetett hűtőmodul konstrukciós tervezése során a következő feltételeknek kell megfelelni:

- megfelelő áramlási csatorna kialakítása,
- a ventilátorok stabil rögzítése,
- a teljes hűtőberendezés megfelelő felfogatása, tekintettel a nem elhanyagolható $\sim 2 \text{ kg}$ tömegére.

Az építés során az áramlási csatorna kialakítása 'U' profillal ellátott alumínium lemez hűtőbordára történő csavarozásával történt. A ventilátorok stabil felrögzítése acéllemezből kialakított zárórészre történt. A Peltier-elemek hőpaszta felhasználásával kerültek a hűtőborda hűtőfelületére. A kivitelezés során készült egy alumínium lemez, amely egyrészt rögzíti az elemeket a hűtőbordához, másrészt az egyenletesebb hőmérsékleteloszlást hivatott biztosítani. A teljes hűtőberendezést négy menettel ellátott gömbvas 'láb' segítségével rögzítettünk a napszimulátor állítható magasságú vizsgálati tartomány tartójára. Az elkészült hűtőberendezés az 22. ábrán figyelhető meg.



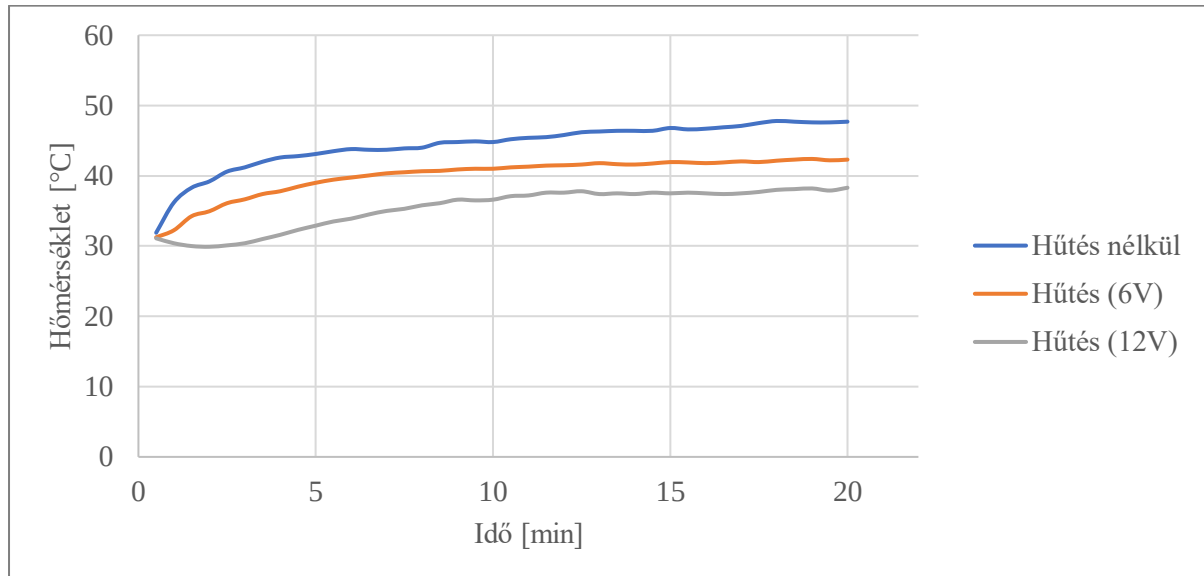
22. ábra: A Peltier-elemes hűtőmodul (a), a hűtőmodul szabályozó egysége (b), a hűtőmodul tápegysége (c).

A kész hűtőberendezés tesztelése során a napszimulátor által előállított közelítőleg 1.000 W/m² intenzitású fénnel világítjuk meg és regisztráljuk a hőmérséklet változását. A mérés minden esetben a hűtőmodul szobahőmérsékletű hidegoldala esetén indult és a világítást bekapcsolva regisztráljuk a hőmérséklet változását az idő függvényében.

A méréseket három esetre végeztük el, amelyek a következők:

- kikapcsolt hűtőmodul ($U_{táp} = 0 \text{ V}$),
- hűtőmodul félteljesítményen ($U_{táp} = 6 \text{ V}$),
- hűtőmodul teljes teljesítményen ($U_{táp} = 12 \text{ V}$).

A hőmérséklet regisztrálását egy négycsatornás digitális hőmérő segítségével végeztük. A hőmérsékletmérés a hűtőfelület két pontján történt, amely pontok hőmérsékletének átlagát vettük figyelembe. A mérés során kapott hőmérséklet-idő görbéket a 23. ábra foglalja össze.



23. ábra: A hűtőmodul hűtőfelületének felmelegedés az idő függvényében különböző hűtőtéljesítmények esetén.

A 23. ábrát megfigyelve láthatjuk, hogy mindhárom esetben a hőmérséklet 20 perc után stabilizálódott, így a mérések időtartamát 20 percben korlátoztuk. A mérések alapján a hűtőmodul működése és szabályozhatósága is megfelelőnek mutatkozik. Az 1.000 W/m^2 fényintenzitású megvilágítás mellett is közelítőleg $10 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletcsökkenést ($48 \text{ }^\circ\text{C}$ -ról $38 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra) garantál a hűtőmodul maximális teljesítmény mellett. Közepes teljesítményen (6V) a hűtőfelület állandósult hőmérséklete $42 \text{ }^\circ\text{C}$, vagyis ekkor a hőmérséklet csökkenés $6 \text{ }^\circ\text{C}$, tehát a tápfeszültség és a hűtőtéljesítmény közötti kapcsolat a mérések alapján kvázi lineárisnak adódik [73].

Összeségében elmondható tehát, hogy a hűtőmodul tervezése és építése sikerrel valósult meg. A Peltier-elemeken alapuló hűtőberendezés megfelelő hűtőtéljesítmény biztosít a vizsgált napelem hőmérsékletének szignifikáns változtatásához, mindezt szabályozott módon.

2.4. NAPELEM PANEL LABORATÓRIUMI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

A vizsgálatok egy Korax Solar által gyártott KS-85 típusú monokristályos napelemen történtek. A napelem egy vele megegyező méretű asztalon lett elhelyezve úgy, hogy a napelem két rövidebb szélé alá egy-egy 50 mm vastagságú faléc került, ezzel kialakítva egy áramlási csatornát a napelem hátlapja és az asztallap között. A hűtésre szolgáló hideglevegőt egy Orion CSHP 9001 C4 típusú mobil klíma biztosította. A klímából kiáramló hideg levegőt az áramlási csatornához egy műanyag fólia vezeti, amely puffer-térként is viselkedve kellően egyenletessé tették az áramlást. Előzetes hőmérsékletvizsgálatok azt mutatták, hogy a napelem hátlapja hasonló mértékben felmelegszik, mint az abszorber felülete. E tapasztalat alapján elmondható, hogy a napelem hátlapján is lehetőség van hőenergia elvonására, tehát a hűtési eljárás működőképessége megalapozott volt. Alapfeltevés, hogy a hűtés alkalmazásával a napelem teljesítménye (hatékonysága) nő. A megvalósított berendezés az 24. ábrán látható.

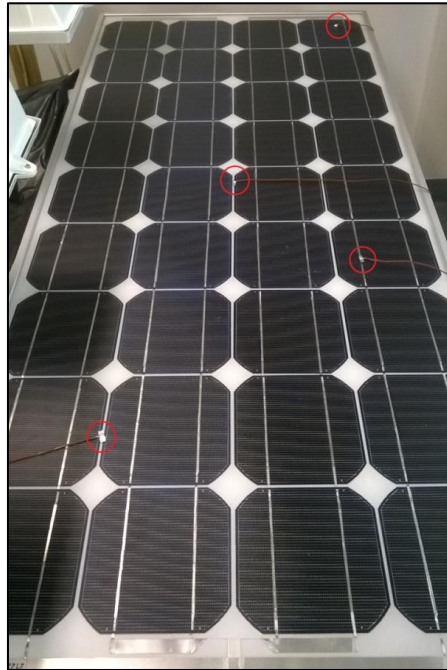


24. ábra: A mérési elrendezés

A napelem felületének hőmérsékletét egy YC-747D típusú négycsatornás digitális hőmérő detektálta. A négy érzékelő a napelem négy különböző pontján helyezkedik el (25. ábra). A továbbiakban a négy vizsgált pont átlagából képzett hőmérséklet tekinthető a napelem hőmérsékletének. Az érzékelőket az eredmények pontossága miatt jó hővezető tulajdonságú alumínium szalaggal kerültek rögzítésre a napelem felületéhez, ügyelve arra, hogy a kitakart felület nagysága elhanyagolhatóan kicsi legyen.

A megvilágított napelem átlaghőmérséklete hűtés nélkül elérte a 80 °C-ot. Ezzel a hűtési eljárással a napelem hőmérsékletét 15 °C-kal sikerült lecsökkenteni. A további hűtés érdekében a napelem abszorber felületén egy TT 150 típusú csőventilátor is elhelyezésre került. A reflektortartó állványhoz rögzített drótkeret (mint kivezető nyílás) és a ventilátor közt az áramlási csatorna a már korábban is használt műanyag fólia segítségével került kialakításra. E megoldás kiszélesítette az áramlási teret, így a napelem nagyobb felületén érvényesült a hűtő hatás, viszont hátrányként meg kell említeni, hogy kis mértékben lelassította az áramlást.

A klíma és a ventilátor együttes használata esetén a napelem átlaghőmérséklete 40 °C-kal csökkent. Ezt követően a ventilátor kivezetésén kiáramló levegő közvetlenül, terelő nélkül a napelem felületére lett irányítva. Ez esetben az áramlás sebessége nem csökkent és további 10 °C hőmérsékletcsökkenést sikerült elérni. Tehát a mobilklíma és a csőventilátor ilyen módú együttes használata 50 °C-os hőmérsékletcsökkenést eredményezett. Ekkor a napelem átlaghőmérséklete 30 °C volt.



25. ábra: A négy érzékelő elhelyezése a napelem abszorber felületén.

A napelem terhelése egy nagyteljesítményű tolóellenállással modellezhető, amelynek ellenállása mérések alapján 0,7–7,2 Ω értékek közt változtatható. A napelem által előállított feszültség és áramerősség egyidejű mérését egy *Protek DM-301* és egy *METEX M-365OD* típusú digitális multiméter tette lehetővé.

A mérés célja a hőmérsékleti tranziens során lejátszódó folyamatok feltárása volt. A szakirodalom által leírtak alapján az mondható el, hogy a napelem üresjárási feszültsége jelentősebb mértékben csökken-, a rövidzárási árama kismértékben nő a félvezető anyagának hőmérsékletnövekedése által. A feszültség nagyobb mértékben csökken, mint ahogy az áramerősség nő, így a melegedés hatására a napelem elméleti teljesítménye csökken.

2.4.1. A SZIMULÁCIÓ SORÁN FIGYELEMBE VETT KONSTANSOK ÉS ALAPADATOK

A numerikus szimuláció az előző fejezetekben említett két-dióda modell egyenletrendszerének felhasználásával készült. A szimuláció során a napelem egyszerűsített áramköri modelljéből indultam ki. A numerikus szimuláció során alkalmazott konstansokat a 7. táblázat a napeleme villamos paramétereit pedig 8. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: Szimulációs konstansok.

Paraméter neve	Jelölés és mértékegység	Mérték
Napsugárzás intenzitása sztenderd tesztkörülmények között	E_{STC} [W/m ²]	1.000
A megvilágítás intenzitása	E_{ill} [W/m ²]	861
Dióda záró irányú szaturációs árama a két-dióda modell alapján	I_s [A/cm ²]	$1 \cdot 10^{-11}$
Napelemre jellemző tiltotsáv szélessége	e [eV]	1,4
Boltzmann állandó	k [J/K]	$1,38 \cdot 10^{-23}$
Dióda idealitási tényező	n [-]	2
A megvilágítás spektrális összetételének állandója	C [-]	0,532

8. táblázat: A vizsgált napelem villamos paramétereit.

Paraméter neve	Jelölés és mértékegység	Mérték
Gyártási év	-	2008
Csúcsteljesítmény	P_{max} [W]	85
Munkaponti áramerősség	I_M [A]	4,88
Munkaponti feszültség	U_M [V]	17,45
Rövidzárlati áram	I_{SC} [A]	5,40
Üresjárási feszültség	U_{OC} [V]	21,20
Névleges Fill faktor	ϕ [-]	0,74
Soros ellenállás	R_s [Ω]	0,0035
Párhuzamos ellenállás	R_p [Ω]	10.000
Sorba kötött cellák száma	N_s [piece]	18
Párhuzamos ágak száma	N_p [piece]	2
Hőmérsékleti állandó P_{max}	K_{PM} [W/°C]	-0,391
Hőmérsékleti állandó I_{sc}	K_{ISC} [A/°C]	0,001674
Hőmérsékleti állandó U_{oc}	K_{UOC} [V/°C]	-0,073776
Százalékos hőmérsékleti állandó P_{max}	μ_{Pm} [%/°C]	-0,460
Százalékos hőmérsékleti állandó I_{sc}	μ_{ISC} [%/°C]	0,031
Százalékos hőmérsékleti állandó U_{oc}	μ_{Uoc} [%/°C]	-0,348
Hatásfok	η [%]	12,75
Névleges működési hőmérséklet	T_N [°C]	25
Működési hőmérséklettartomány	$T_{N-range}$ [°C]	-40...85

A szimuláció során az alábbi megfontolásokkal és elhanyagolásokkal éltem [5, 9, 10, 12, 13, 25]:

- a napelem-modul egy cellára redukálható,
- elhanyagolható a soros és a párhuzamos ellenállás,
- a megvilágítás intenzitásának integrált középértéke a mérvadó,
- a gyártó által megadott üresjáratú feszültséggel, rövidzárlati áramerősséggel, valamint hőmérsékleti állandókkal lehet számolni,
- a Napfényhez viszonyítva a halogén reflektor fényének spektrális összetételbeli különbségét (spektrális energiasűrűségét) egy konstanssal kell figyelembe venni.

2.4.2. A MÓDOSÍTOTT SZIMULÁCIÓS MODELL PARAMÉTEREI

A módosított modell a mérési eredményekből meghatározott hőmérsékleti állandókat használja, azonban a gyártó által megadott rövidzárlati áramerősséget és üresjáratú feszültséget veszi figyelembe. A mérésből származó hőmérsékleti állandókat a 9. táblázat tartalmazza.

A módosított modellel történő szimuláció célja, hogy becslést adjon a napelem öregedése következtében bekövetkező hatékonyságromlásról. Az öregedési vizsgálatok akkor szolgáltatnak pontosabb adatokat, ha állandó intenzitás mellett és változó hőmérsékleten történik. A vizsgálatokat különböző intenzitás mellett célszerű elvégezni és a kapott eredményeket statisztikai módszerekkel átlagolni.

9. táblázat: Mérésből származtatott hőmérsékleti állandók.

Paraméter neve	Jelölés és mértékegység	Mérték
Hőmérsékleti állandó $P_{\max}$	$K_{PM} [W/^{\circ}C]$	-0,5255
Hőmérsékleti állandó I_{sc}	$K_{ISC} [A/^{\circ}C]$	0,000594
Hőmérsékleti állandó U_{oc}	$K_{UOC} [V/^{\circ}C]$	-0,08692
Százalékos hőmérsékleti állandó $P_{\max}$	$\mu_{pm} [%/^{\circ}C]$	-0,459
Százalékos hőmérsékleti állandó I_{sc}	$\mu_{isc} [%/^{\circ}C]$	0,021
Százalékos hőmérsékleti állandó U_{oc}	$\mu_{Uoc} [%/^{\circ}C]$	-0,410

10. táblázat: A napelem elméleti és mérésből származó hőmérsékleti állandói, valamint azok aránya.

	Katalógus adat	Mért adat	Arány
μ_{Pm} (Teljesítményre)	$(-0,46) \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	$(-0,459) \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	99,78%
μ_{Isc} (Áramerősségre)	$0,031 \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	$0,021 \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	66,77%
μ_{Uoc} (Feszültségre)	$(-0,348) \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	$(-0,41) \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right]$	117,82%

Az üresjárási feszültségre vonatkozó hőmérsékleti állandó értéke megközelíti a napelem gyártója által megadott értéket, ez az elvégzett mérések elvi helyességét bizonyítja. Az eltérés a mérés pontatlanságából fakadhat, továbbá a napelem öregedése is befolyásolhatja ezen értéket.

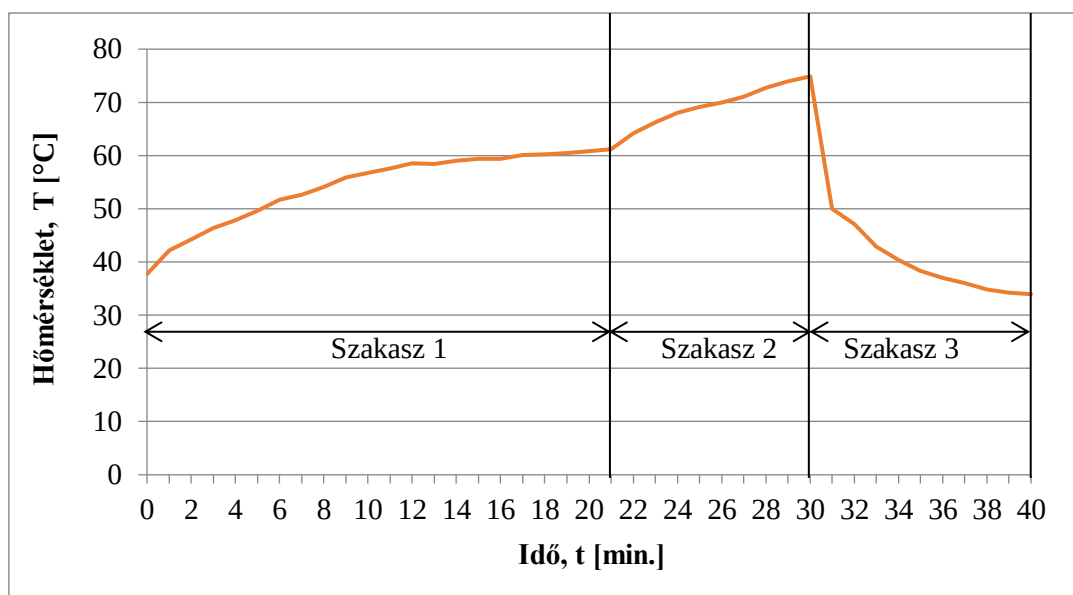
A rövidzárási áramerősségre vonatkozó állandó értéke ezzel szemben nagymértékben eltér a katalógusadattól. Az általam vélt ok a mérés pontatlanságán kívül a megvilágítás minőségében keresendő, hisz az esetemben előállított fényviszonyok nem egyeztek meg a napelem minősítésekor valószínűleg használtakkal. Amennyiben figyelembe vesszük a megvilágítás spektrális összetételéből fakadó különbséget, akkor a mérésből meghatározott rövidzárási áramerősség százalékos hőmérsékleti állandó $0,021 \text{ }^\circ\text{C}$ értékre adódik, amely a gyártó által megadott érték 66,77%-a.

2.4.3. TRANZIENS VIZSGÁLAT TERHELETLEN NAPELEM ESETÉBEN

A tranziens vizsgálatokat először terheletlenül végeztem el. Ez esetben a megvilágítás bekapcsolásával egyidejűleg működésbe hoztam a mobil klímás hűtési rendszert. 20 percen keresztül mértem percenként a napelem négy pontján tapasztalható hőmérsékletet, a cellák által generált üresjárási feszültséget és rövidzárási áramot (1. szakasz). Ezután kikapcsoltam a hűtési rendszert és 10 percen keresztül 10 mérési pontban ismételtam a mintavételezést (2. szakasz). Miután a napelem hőmérséklete állandósult a korábbiakban ismertetett csőventilátoros hűtés beiktatása segítségével a napelemet visszahűtöttem a kiindulási hőmérsékletre (3. szakasz). A hőmérséklet-idő grafikont a 26. ábra tartalmazza. Megfigyelhető, hogy a napelem felületi hőmérséklete hűtés alkalmazása során exponenciális jelleggel változik. A továbbiakban az eredményeket a hőmérséklet függvényében ábrázolom, azonban egy lépték továbbra is egy perc elteltét jelöli, így egyidejűleg a hőmérséklet és idő függvény felírható.

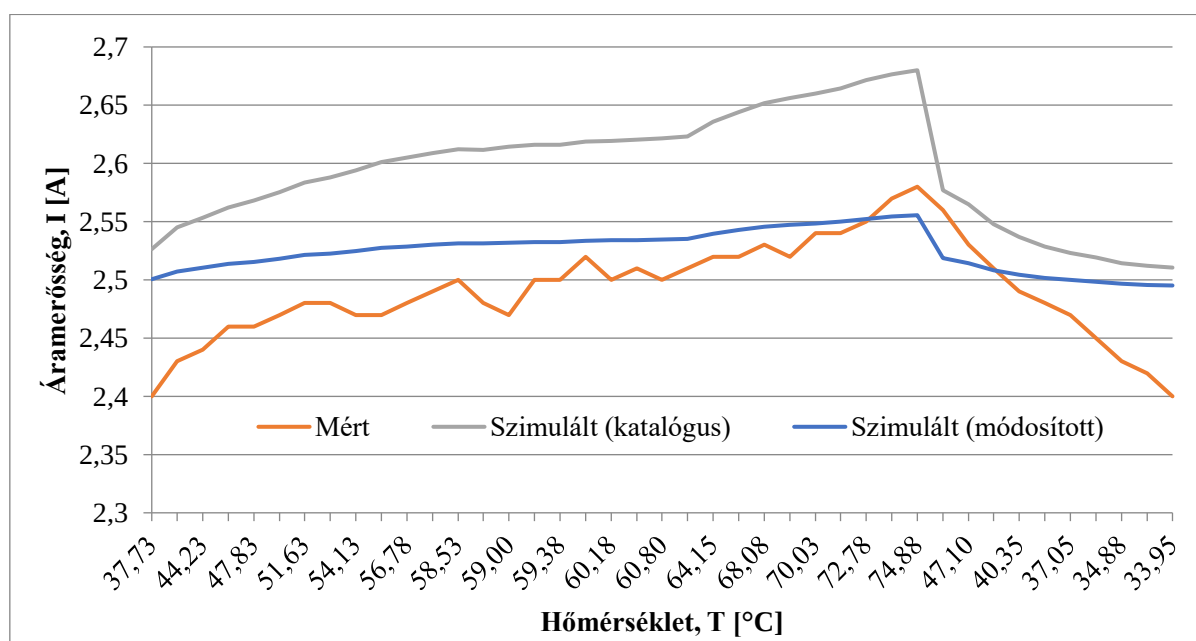
Hűtés nélkül a napelem hőmérséklete az alkalmazott megvilágítás mellett, a négy szenzor átlagából meghatározva $74,88 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál állandósulni látszott. A (33) összefüggéssel meghatározott hőmérséklet $76,66 \text{ }^\circ\text{C}$, így a számított érték 2,38%-kal nagyobb a mértnél.

(A vizsgálatok során hőkamera alkalmazásával kontrolméréseket végeztem, amely lehetővé tette a hőmérsékletváltozás és -eloszlás időbeli lefutásának és felvázolásának követését, láthatóvá tételét.)



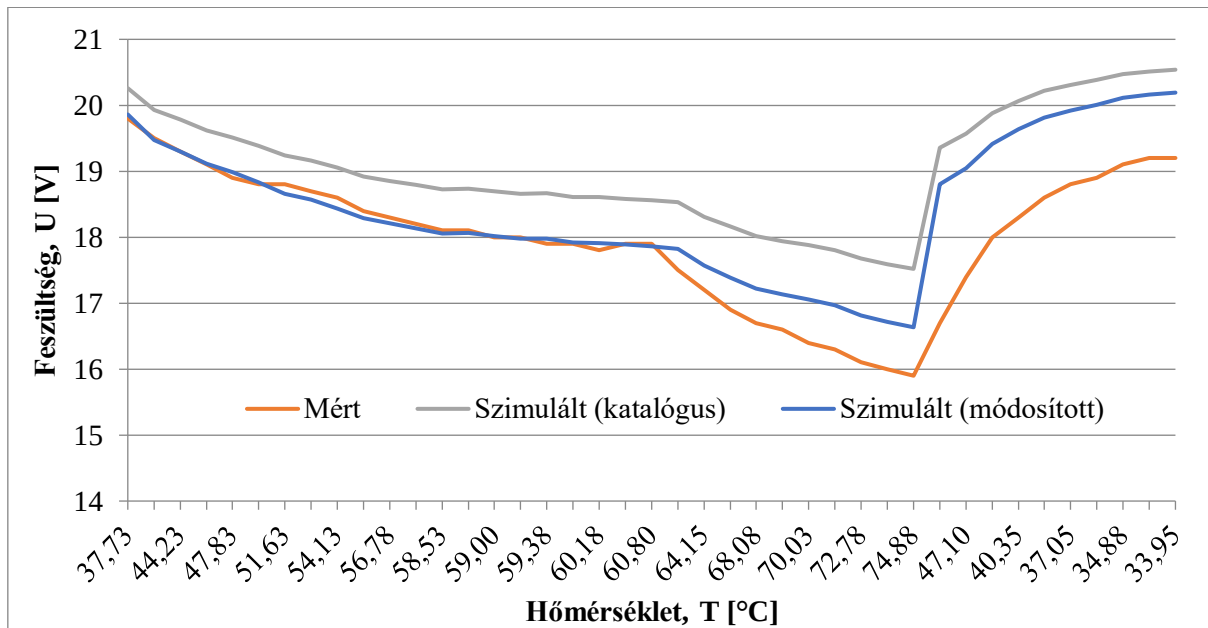
26. ábra: A napelem felületi hőmérsékletének időfüggvénye.

A 27. ábrán a rövidzárlati áram erőssége látható a hőmérséklet függvényében. Megfigyelhető, hogy a mérési eredmények alapján vázolt áramerősség-hőmérséklet (idő) görbe jelleghelyesen követi a katalógusadatokat alapján készült numerikus szimuláció alapján vázolt görbét. Az időátlagolt eltérés 4,14%, míg a módosított modell alapján készült eltérés 1,38%. Tehát a módosított modell összességében pontosabb közelítést ad, de a vázolt görbe kevésbé simul a mért görbéhez. Mindegyik görbe esetében elmondható, hogy a hőmérséklet függvényében a vártaknak megfelelő áramerősség-változás következett be. A napelem hűtése nélkül az áramerősség nőtt, hűtéssel csökkent. Ugyanez a tendencia figyelhető meg néhány hasonló publikációban, mint például Singh és et al. [28]. és Malik et al. [31].



27. ábra: A napelem rövidzárlati áramerőssége a hőmérséklet (idő) függvényében.

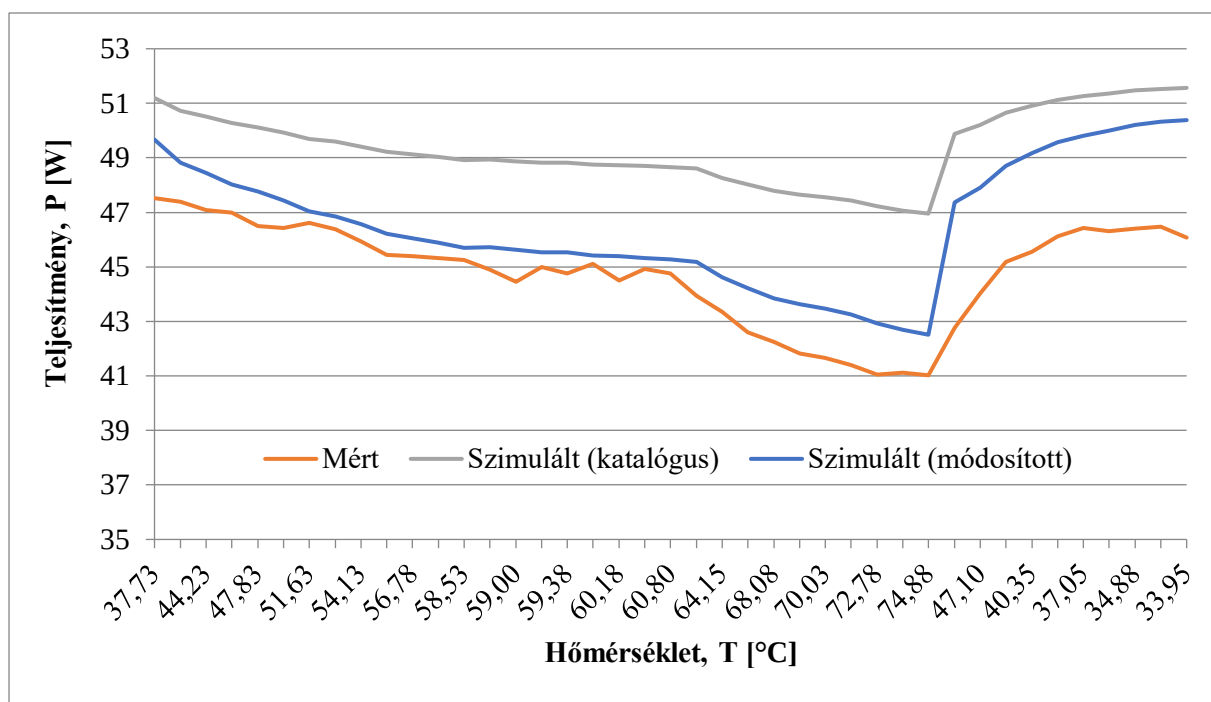
Az üresjáratú feszültség hőmérsékletfüggése a 28. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a módosított modell a napelem gyenge hűtése során a mért eredményekkel csaknem egybeeső eredményeket hozott, míg hűtés nélkül, illetve erős hűtés esetén az alapmodell görbéjéhez simul. A módosított modell időátlagban 2,52%-kal, míg az alapmodell 5,98%-kal becsüli túl a mért eredményeket. Ezek az eredmények nagyon hasonlítanak azokhoz az eredményekhez, amelyeket Singh et al. [28], Chantana et al. [29] és Malik et al. [31] publikációkban láthatunk.



28. ábra: A napelem üresjáratú feszültsége a hőmérséklet (idő) függvényében.

Az elméleti teljesítmény grafikonok a 29. ábrán láthatók. Egyértelműen megállapítható, hogy az elméleti teljesítmény a napelem felületi hőmérsékletének növekedése következtében csökken. E jelenség az elméleti teljesítmény számítási módja alapján feltételezhető volt. A csökkenés oka, hogy a napelem feszültsége nagyobb mértékben csökken, mint amilyen mértékben az áramerőssége nő nagyobb hőmérsékleten üzemelő rendszer esetében. A szimulációs alapmodell 10,34%-kal, a módosított pedig 3,92%-kal becsülte túl az elméleti teljesítményt a mérthez képest.

A katalógusadatok alapján végzett numerikus szimuláció alapján elmondható, hogy a napelem elméleti teljesítménye (és hatásfoka) 9,32%-kal, a módosított modellel történő szimuláció esetében pedig 3,7%-kal kisebb az újkori állapotához képest. Mivel a módosított modell a mérési eredményekből származtatott hőmérsékleti állandók felhasználásával számol, de a gyártó által megadott üresjáratú feszültséget és rövidzárási áramerősséget veszi alapul, ezért a napelem életkorából származó teljesítménycsökkenés erre az értékre vezethető vissza. A 3,7%-os teljesítménycsökkenés és hatásfokromlás jobban közelítheti a valóságot.



29. ábra: A napelem elméleti teljesítménye a hőmérséklet (idő) függvényében.

Összességében elmondható, hogy a hőmérséklet növekedésének hatására az üresjárási feszültség csökkent, míg az áramerősség csak kismértékben növekedett és a szorzatuk, a teljesítmény, csökkent. Fordított esetben, amikor a napelem lehűlt a feszültség nőtt, az áramerősség pedig csökkent, a teljesítmény növekedett hasonló mértékben. Tehát e kísérlet során igazolni tudtam a szakirodalom által leírt jelenséget.

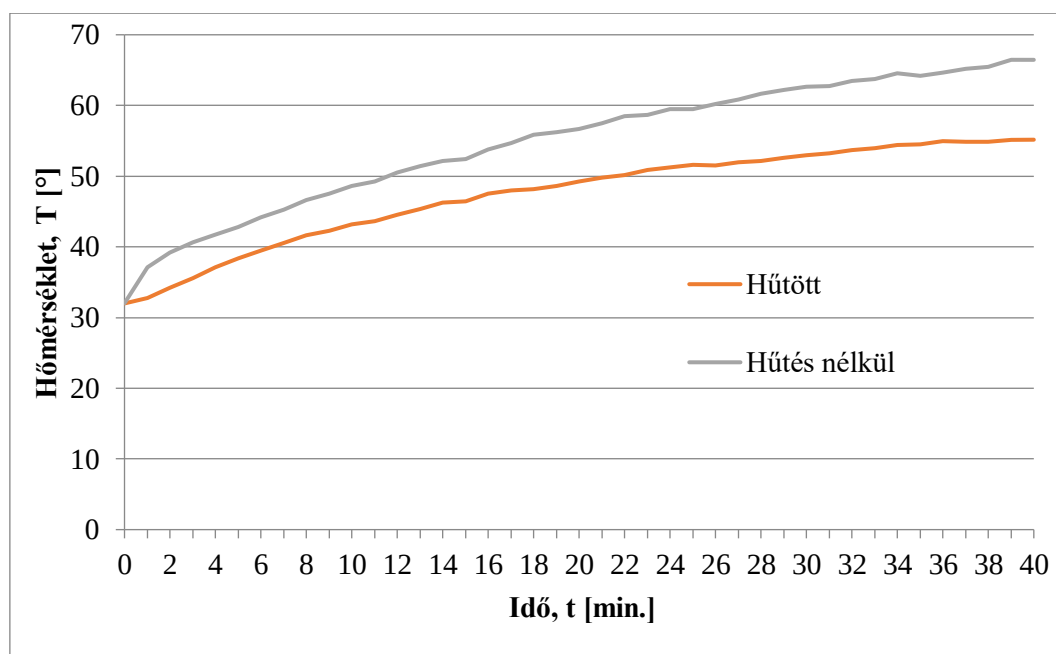
A 11. táblázat összefoglalja a statisztikai adatokat a szimulációs és mért eredmények közötti eltérésekre vonatkozóan, terheletlen napelem tranziensvizsgálata során. Megfigyelhető, hogy a szimuláció és a mérés közötti legnagyobb eltérés az üresjárási feszültség és az elméleti teljesítmény esetében meghaladja a 10%-ot, mind a katalógus, mind a módosított modell esetében. Az eltérésekben ismétlődés (modus) nem tapasztalható.

11. táblázat: Statisztikai adatok a szimulációs és mért eredmények közötti eltérésre vonatkozóan.

	Szimulált (katalógus)					Szimulált (módosított)				
	Min	Max	Medián	Átlag	Szórás	Min	Max	Medián	Átlag	Szórás
I_{sc}	0,66%	5,84%	4,59%	4,14%	1,25%	-1,71%	4,20%	1,31%	1,38%	1,21%
U_{oc}	2,20%	15,92%	4,52%	5,98%	3,33%	-0,87%	12,58%	0,63%	2,52%	3,28%
P	6,60%	16,68%	9,91%	10,34%	2,84%	0,66%	10,77%	2,93%	3,92%	2,75%

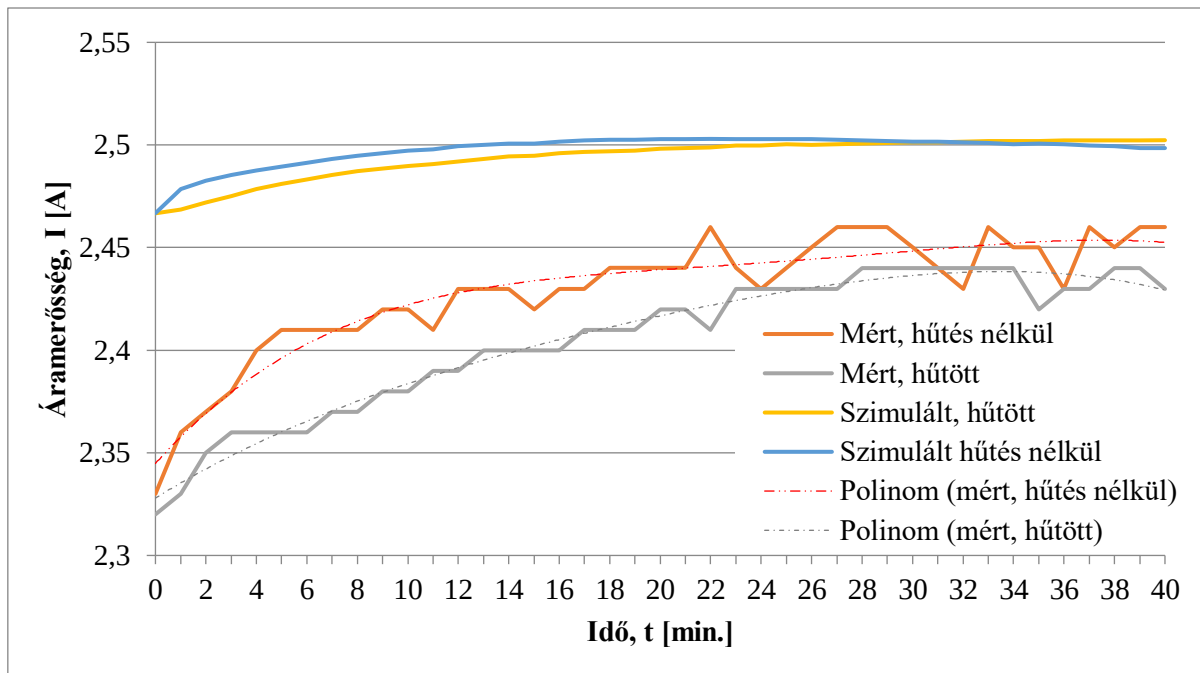
2.4.4. TRANZIENS VIZSGÁLAT TERHELT NAPELEM ESETÉBEN

A hőmérsékleti tranziens vizsgálatokat elvégeztem terhelt állapotban is két esetre vonatkozóan. A napelem kapcsaira egy 4,2 ohmos ellenállást kapcsoltam, amely ellenállás értéke megegyezik a napelem belső ellenállásával a vizsgálati megvilágításérték mellett. Az első esetben a napelemet nem hűtöttem, míg a másik esetben folyamatos volt a hűtés. A napelem által leadott áramot és kapocsfeszültséget, valamint a hőmérsékletet percenként rögzítettem. Jelen mérés célja az volt, hogy feltárjuk, az azonos hőmérsékleten üzemelő, hűtött és hűtetlen napelem villamos paramétereinek változását. A hőmérséklet-idő görbék hűtött és hűtés nélküli napelem esetében a 30. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy mind hűtött, mind hűtés nélküli esetben a hőmérséklet növekedett az idő függvényében.



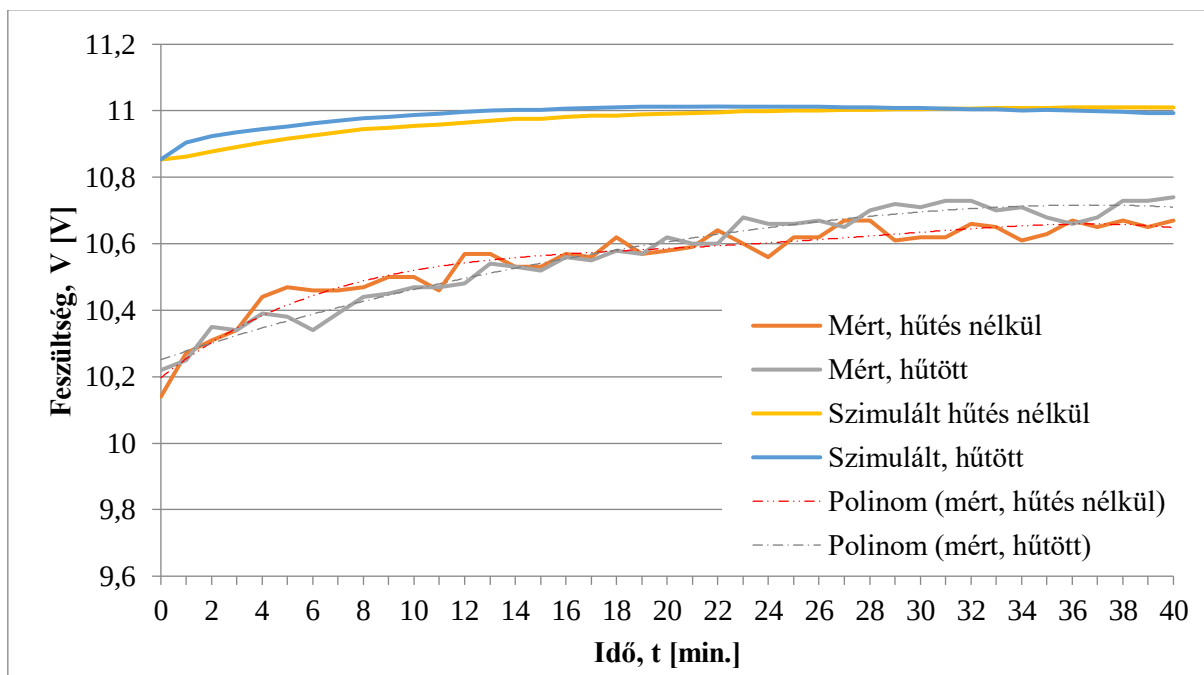
30. ábra: A napelem felületi hőmérsékletének időfüggvénye hűtött és hűtés nélküli esetekben, terhelt állapotban.

A 31. ábra szemlélteti az áramerősség alakulását. Mind a szimulációból, mind a mérésből származó görbék közül az olvasható le, hogy az idő telésével (hőmérséklet növekedésével) a hűtött és a hűtés nélküli görbék egybe simulnak. Az időátlagolt eltérés a szimuláció és a mérési eredmények között, hűtött napelem esetében 2,67%, míg hűtés nélkül 3,85%. Több kutató kapott hasonló eredményeket, például Singh et al. [28] és Malik et al. [31].



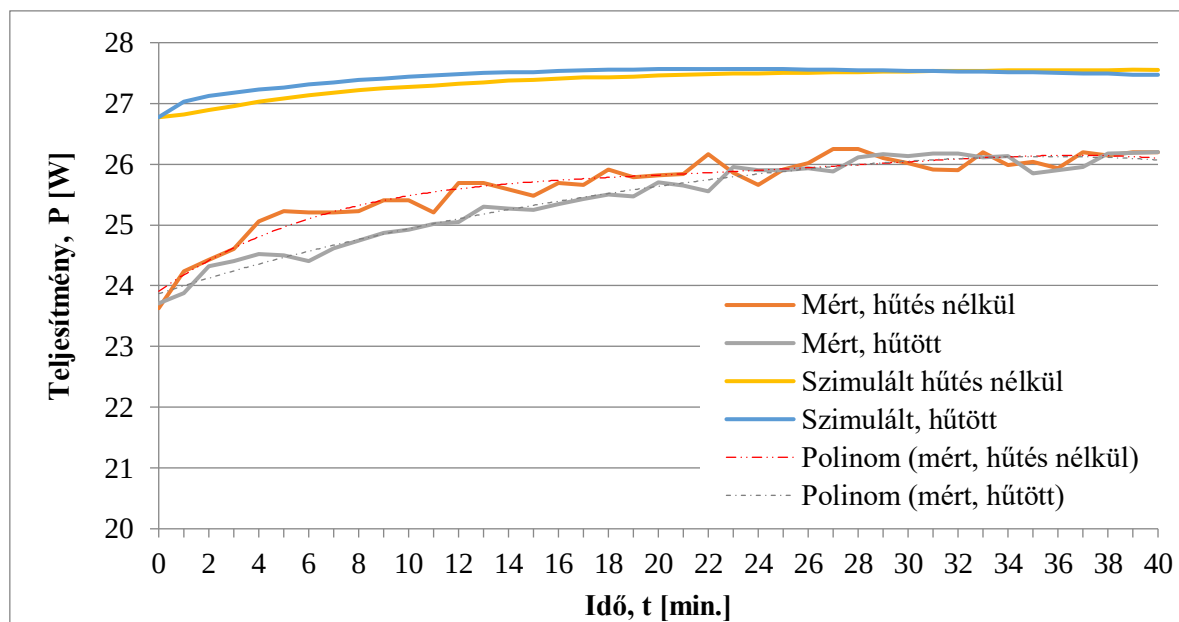
31. ábra: A napelem áramerősségének időfüggvénye hűtött és hűtés nélküli esetekben, terhelt állapotban.

A 32. ábrán a feszültség alakulása látható az idő (hőmérséklet) függvényében. Megfigyelhető, hogy mind a szimuláció, mind a mérési eredmények esetében a hűtött és hűtés nélküli napelem görbéi keresztezik egymást csakúgy, mint más kutatások esetében: Singh et al. [28], Chantana et al. [29] és Malik et al. [31]. Az időátlagolt eltérés hűtött esetben 4%, hűtés nélkül 4,03% a szimuláció javára.



32. ábra: A napelem feszültségének időfüggvénye hűtött és hűtés nélküli esetekben, terhelt állapotban.

A napelem által leadott teljesítményt a 33. ábra szemlélteti. Megfigyelhető, hogy a szimulációból és a mérésből származó görbék azonos jelleget mutatnak. A hűtött és hűtetlen napelem karakterisztikái mind a szimuláció, mind a mérés esetében keresztezi egymást. Az időátlagolt eltérés hűtött napelem esetében 6,79%, hűtés nélkül pedig 8,04%.



33. ábra: A napelem teljesítményének időfüggvénye hűtött és hűtés nélküli esetekben, terhelt állapotban.

A terhelt napelem hőmérsékleti tranziensvizsgálata során a mérésből származó eredmények jobban közelítik a szimulációs eredményeket. A görbék jelleghelyessége legjobban a teljesítmény tekintetében figyelhetők meg.

A 12. táblázat összefoglalja a statisztikai adatokat a szimulációs és a mért eredmények közötti eltérésekre vonatkozóan, terhelt, hűtött és hűtésnélküli napelem tranziensvizsgálata során. Megfigyelhető, hogy a szimuláció és a mérés közötti legnagyobb eltérés a teljesítmény esetében meghaladja a 10%-ot, mind hűtött, mind hűtésnélküli napelem esetében. Az eltérésekben ismétlődés (modus) nem tapasztalható.

12. táblázat: Statisztikai adatok a szimulációs és mért eredmények közötti eltérésre vonatkozóan.

	Hűtött					Hűtés nélkül				
	Min	Max	Medián	Átlag	Szórás	Min	Max	Medián	Átlag	Szórás
I	1,58%	5,87%	2,55%	2,67%	0,87%	2,40%	6,37%	3,82%	3,58%	1,19%
U	3,11%	7,04%	3,78%	4,00%	0,80%	2,36%	6,39%	3,90%	4,03%	1,20%
P	4,80%	11,30%	6,34%	6,79%	1,70%	4,83%	13,18%	7,89%	8,04%	2,49%

Összességében elmondható, hogy az üresjárási feszültség- és rövidzárási áramerősség értékek a szakirodalomban leírtak alapján alakultak. A mérési eredmények jól közelítették a numerikus szimulációból származó értékeket. Terhelt napelem estében közel azonos mértékben nőtt a feszültség és csökkent az áramerősség a hőmérséklet csökkenés hatására, mint a terheletlen hőmérsékleti tranziens vizsgálatok során. A hűtés hatására nőtt a napelemes rendszer P_{th} elméleti teljesítménye. Tehát a legfőbb célja a napelem hűtésének a napelem energetikai hatékonyságának javítása, valamint az élettartamának növelése. A kísérleti és szimulációs vizsgálatok eredményei jól tükrözik, hogy a hűtés pozitív irányban változtatja a napelem teljesítményét, ezért az alapfeltevés helytállónak bizonyult.

A mérési eredményeket összehasonlítva a szimulációból származó eredményekkel az a következtetés vonható le, hogy a napelem hatásfoka a gyártáskori értékhez képest csökkent. Azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az eredmények jelentősen függenek a műszerek és a mérési módszer pontatlanságából, a mérési hibáitól, így a kapott százalékos eltérések ezekre is visszavezethetők.

A mért és a számolt adatok közötti eltérésnek pontatlanságok mellett számos oka lehet. Az általam használt megvilágítás nem reprodukálja kellő pontossággal a természetben tapasztalható fényviszonyokat (kisebb és nem kellően homogén fényintenzitás, eltérő hullámhossz szerkezet). A spektrális összetételből származó különbségeket a Napszimulátorként használt izzó spektrumának kiméréséből származtatott tényezővel ugyan figyelembe tudtam venni, azonban a fényintenzitás inhomogenitását nem, ennek hatása lehet a kisebb teljesítmény. A napelem öregedése során hatásfok degradáció tapasztalható, amely a teljesítmény csökkenését okozza.

A gyártó garantálja, hogy a gyártástól számított első 10 évben a hatásfok csökkenés értéke nem haladja meg a 10%-ot. Az általam használt napelem a mérések során 7 éves volt, így legfeljebb ekkora mértékű teljesítményromlás tudható be előregedésének. A szimulációból és a mérésből származó eredmények alapján a hatásfokromlás értéke 4%-nál kisebbre tehető.

Nem elhanyagolható tény, hogy minden napelem gyártó STC (Standard Test Conditions), vagyis Standard Mérési Feltételek mellett adja meg a napelem maximális teljesítményét és hatásfokát. Ekkor a fényintenzitás értéke $1,000 \text{ W/m}^2$, a napelem celláinak hőmérséklete 25°C és a légsűrűség értéke AM 1.5. E feltételek csak ideális esetben valósulhatnak meg, kifejezetten a hőmérséklet értéke tér el a valóságban tapasztaltaktól. Ezek alapján elmondható tehát, hogy a napelemek által gyakorlatban leadott teljesítmény az esetek túlnyomó részében kisebb, mint a gyártó által megadott maximális teljesítmény.

Az általam folytatott vizsgálatok során a legalacsonyabb cellahőmérséklet megközelítőleg 30 °C volt, így nem teljesítette az STC hőmérséklet kritériumát. Ez is hozzájárult a mért- és a katalógusban olvasható maximális teljesítmények közti eltérés kialakulásához.

Néhány gyártó ezt korrigálva megad, úgynevezett NOCT mellett érvényes villamos adatokat. Amelyek jobban megközelítik a valóságos értékeket. Az NOTC (Normal Operating Cell Temperature), vagyis a Modul Névleges Működési Hőmérséklete 800 W/m² fényintenzitást, 20 °C hőmérsékletű és 1 m/s sebességű légáramlást feltételezve megadja a modulra jellemző hőmérsékletet működés közben. Ezen érték a gyakorlatban 33 °C és 58 °C között mozog [19, 20, 21]. A vizsgált napelem esetében ezen értékek nem voltak elérhetők.

2.5. NAPELEM CELLA LABORATÓRIUMI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

A napelem cellán végzett laboratóriumi vizsgálatok két részre bonthatók, egyrészt hőmérsékleti tranziens során vizsgáltam a terheletlen napelem elektronikai jellemzőinek változását, másrészt állandó hőmérséklet és besugárzási értékek mellett vizsgáltam a terhelt napelem karakterisztikáit. A mérések minden esetben a korábban ismertetett napszimulátor megvilágítása mellett készültek el, amely szabályozhatósága lehetőséget ad különböző megvilágítási fényintenzitások kialakítására. A mérések során vizsgált polikristályos napelem típusa: *XINPUGUANG Mini module*, adattábláját a 13. táblázat foglalja össze.

13. táblázat: A mérésekhez használt napelem adattábláján szereplő adatok.

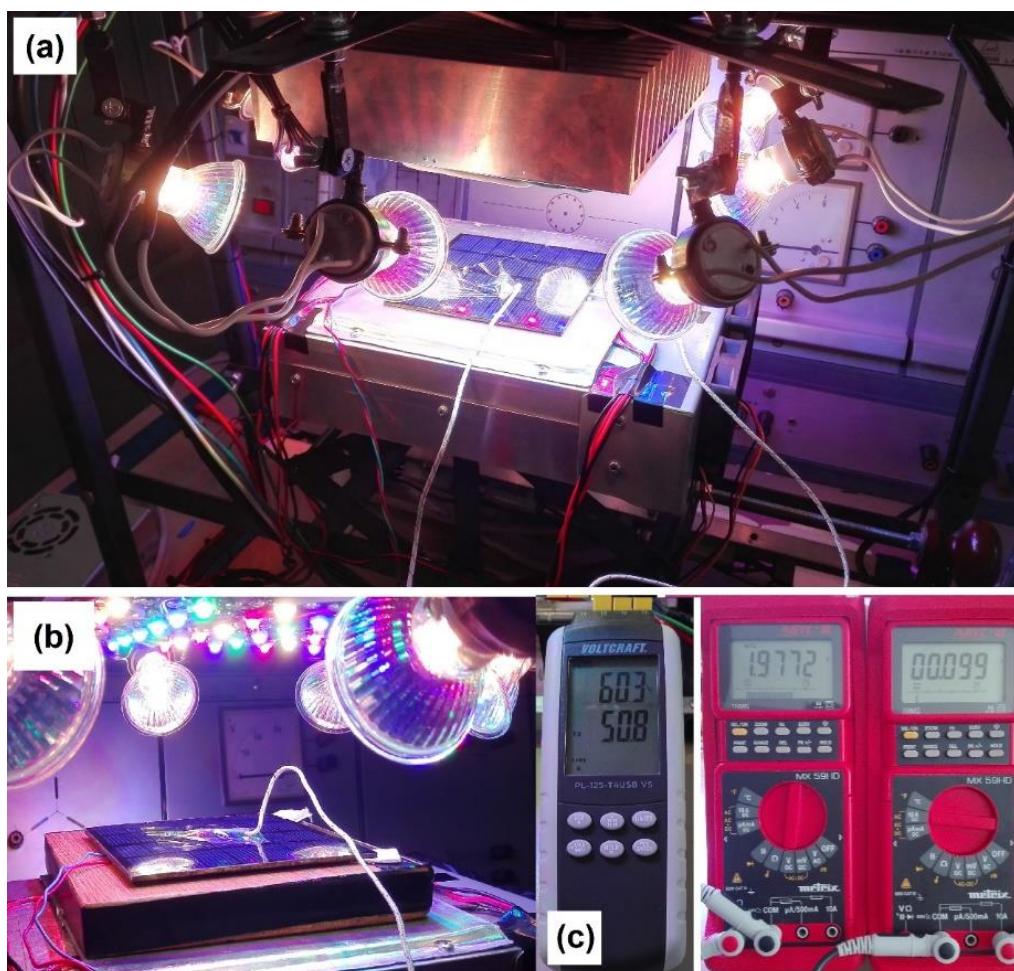
Megnevezés	Jele	Értéke
Maximális (valós) teljesítmény	P_{max}	0,68 W
Maximális Teljesítményű Pont áramerőssége	I_{mpp}	0,094 A
Maximális Munka Pont feszültsége	U_{mpp}	7,2 V
Rövidzárási áramerősség	I_{sc}	0,115 A
Üresjárási feszültség	μ_{OC}	8,4 V
Rövidzárási áramerősség hőmérsékleti állandója	μI_{sc}	0,047 %/°C
Üresjárási feszültség hőmérsékleti állandója	μU_{oc}	-0,32 %/°C

A napelem hőmérsékletének befolyásolását az ismertetett hűtőmodul biztosítja. A napelem hőmérsékletének mérése egy *Voltcraft PL-125-T4* típusú négycsatornás digitális hőmérővel történt, amely másodpercenként méri, illetve menti az eredményeket. A napelem cella hőmérsékletének befolyásolását egy Peltier elemek felhasználásával készített hűtőmodul biztosítja. Az áramerősség és feszültség mérést két darab, *METEIX MX 59H* típusú digitális multiméterrel történt. A 34. ábrán megfigyelhető a kialakított mérő-apparátus.

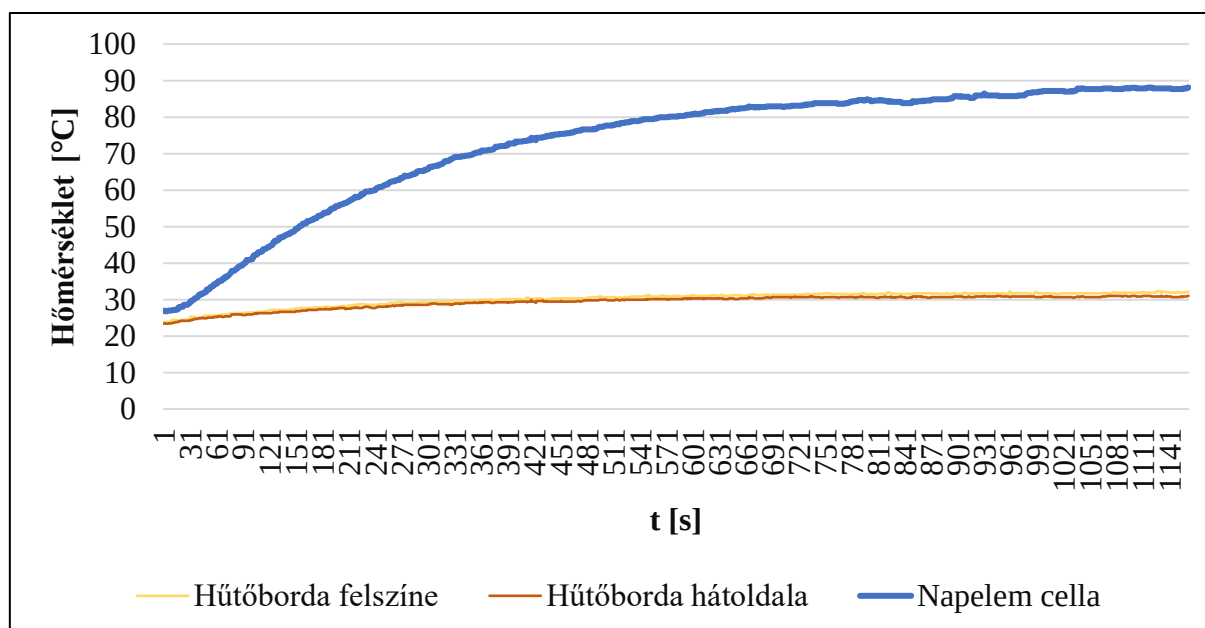
A mérések során a szobahőmérsékletű eszköz három pontján helyeztem el hőmérő szenzorokat, majd ezekben a pontokban vizsgáltam az üzem közben tapasztalható hőmérsékleteket. Egy szenzort helyeztem el a vizsgálati tartományon helyet foglaló napelem cellán, egyet a LED egységeknek helyet adó hűtőborda felületén, egyet pedig a hűtőborda hátoldalán. A hűtőbordát a felette elhelyezett ventilátor hűti. A Napszimulátor vizsgálata során a halogén reflektorok maximális teljesítményük mellett, a LED egységek pedig minden szín esetében 700 mA áramerősség mellett üzemeltek. A vizsgálat során a tranziens folyamat lefutása 20 percig tartott, ekkorra ugyanis állandósult hőmérséklet értékeket regisztrált a hőmérsékletmérő mindhárom mérési pontban.

A mérési eredményeket vizsgálva (35. ábra) azt láthatjuk, hogy az eszköz túlmelegedés szempontjából kritikus pontjain sem tapasztalható veszélyes melegedés. 20 perc üzem után a hűtőborda mindkét oldalán beállt egy-egy állandó hőmérséklet érték, amely mindkét esetben 30 °C körül mérhető.

A napelem cella hőmérséklete jelentősen meghaladja a hűtőbordán mérhető értékeket. Ez érthető, hiszen a vizsgálati tartományon elhelyezett cellát a 8 db halogén izzó mellett a 36 db LED is megvilágítja. A cella hőmérséklete 1.000 W/m^2 átlagos intenzitású megvilágítás során 88 °C-on állandósult. Ez az érték jó közelítéssel megegyezik a természetes fénnel megvilágított napelemek 85 °C-os üzemi hőmérsékletével egy napsütéses nyári napon [56]. Ennek tudatában elmondható, hogy a Napszimulátor képes biztosítani a valós működési körülményeket. Azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a mérés során a laboratórium hőmérséklete 32 °C volt, amely így valóban megközelíti a napsütéses nyári napon mérhető földfelszíni légköri hőmérsékletet.



34. ábra: Mérési összeállítás (a), vizsgált napelem (b), hőmérséklet-, feszültség- és áramerősség mérés (c).



35. ábra: Napelemcella és hűtőborda hőmérsékleti tranziense.

2.5.1. HŐMÉRSÉKLETI TRANZIENSFOLYAMATOK VIZSGÁLATA

A hőmérsékleti tranziens vizsgálatokat három fényintenzitás érték mellett (600 W/m^2 , 800 W/m^2 és 1.000 W/m^2) és három hűtési fokozat (hűtés nélkül, közepes hűtés és teljes hűtés) esetére végeztem el. A mérések során tapasztaltam, hogy a laboratóriumban mérhető hőmérséklet jelentősen befolyásolja a napelemcella felmelegedését, valamint a Peltier-elemes hűtőrendszer működését. Nagyobb szobahőmérsékleten a hűtőmodul teljesítménye drasztikusan visszaesik, ezért a méréseket csak úgy lehetett elvégezni, hogy a laboratórium hőmérsékletét közel állandó értéken kellett tartani. Ez legegyszerűbben a téli, fűtési időszakban volt kivitelezhető, amikor is a szobahőmérséklet 22 °C körül mozgott. Ilyen szobahőmérséklet mellett a cella hőmérsékletét a vizsgált 9 esetre vonatkozóan a 14. táblázat tartalmazza.

14. táblázat: A napelem cella maximális hőmérsékletei.

	600 W/m^2	800 W/m^2	1.000 W/m^2
Hűtés nélkül	68 °C	70 °C	78 °C
Közepes hűtéssel	54 °C	55 °C	58 °C
Teljes hűtéssel	40 °C	43 °C	47 °C

A 14. táblázatban megfigyelhető a hűtés és az intenzitás-változás hatása. Az 1.000 W/m^2 intenzitású megvilágításnál 22 °C szobahőmérsékleten hűtés nélkül a napelem cella hőmérséklete elérte a 78 °C -ot, míg teljes hűtéssel csak 47 °C -ig melegedett fel. 800 W/m^2 és 1.000 W/m^2 megvilágítási intenzitás között azonos hűtési fokozatban nagyobbak a

hőmérsékletkülönbségek, mint 600 W/m^2 és 800 W/m^2 . Mindezek alapján arra lehet következtetni, hogy kisebb intenzitású megvilágítás esetében kevésbé tud felmelegedni a napelem cella.

A mérési és a szimulációs eredmények az egyes megvilágítási intenzitások során hasonló tendenciát mutattak, azzal a különbséggel, hogy a kisebb intenzitású megvilágítást alkalmazó méréseknél a hőmérsékleti tranziens hamarabb futott le, ezért a továbbiakban csak az 1.000 W/m^2 intenzitáson végzett kísérletek eredményét mutatom be ábrák segítségével.

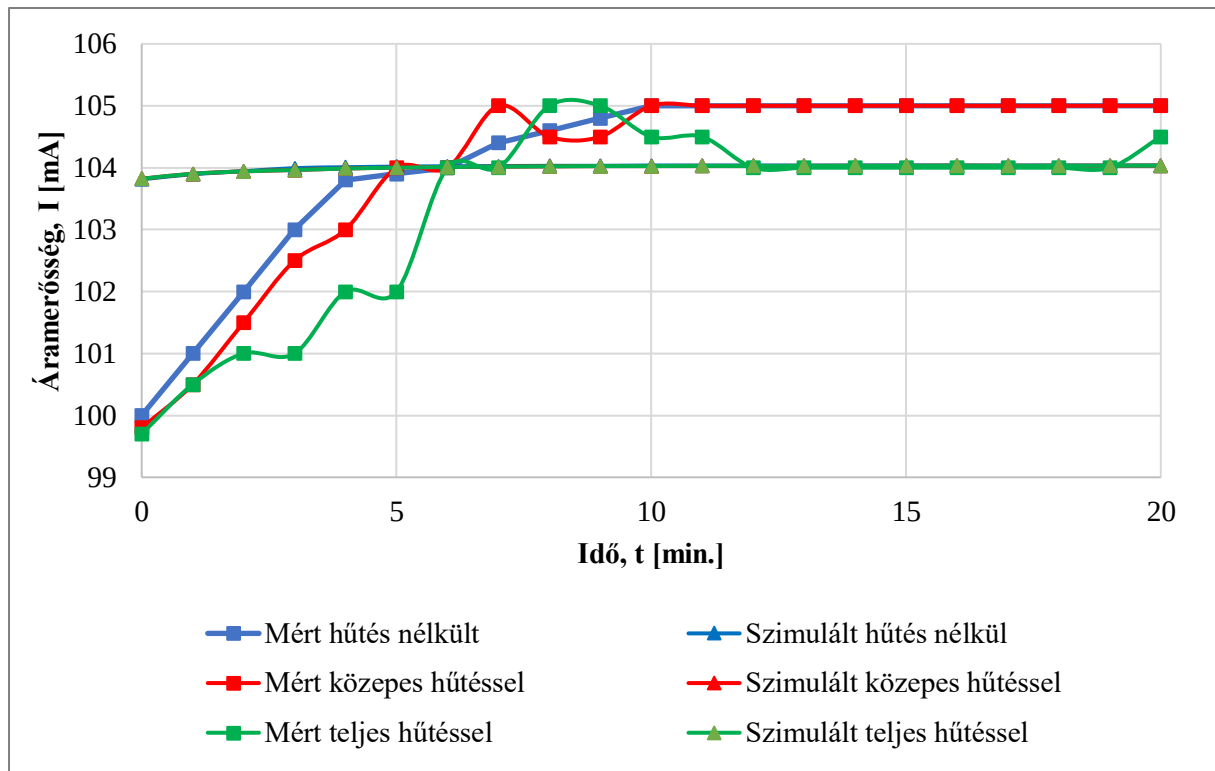
A vizsgálatokat elvégeztem terheletlen és terhelét napelem cella esetében is. A hőmérsékleti tranziens terhelt napelemcella esetében 3-6 perc alatt, míg terheletlen cellánál 4-10 perc alatt futott le és állt be állandósult állapotba a jelleggörbe. A hűtés intenzitásának növelésével a folyamat felgyorsult. Mivel a vizsgált napelemcella kis méretű, kis tömegű, ezért kicsi a hőtehetetlensége, így az eredmények visszaigazolták az alapfeltevést.

A terhelt napelem cellánál a kis méretnek még egy (negatív, pontosságot csökkentő) hatása volt. A belső ellenállása nagyobb mértékben változott a megvilágítási intenzitás- és a hőmérsékletváltozás során, mint egy napelem panelnek, ezért a terhelt vizsgálatokat többféle értékű ellenállásokkal kellett elvégezni.

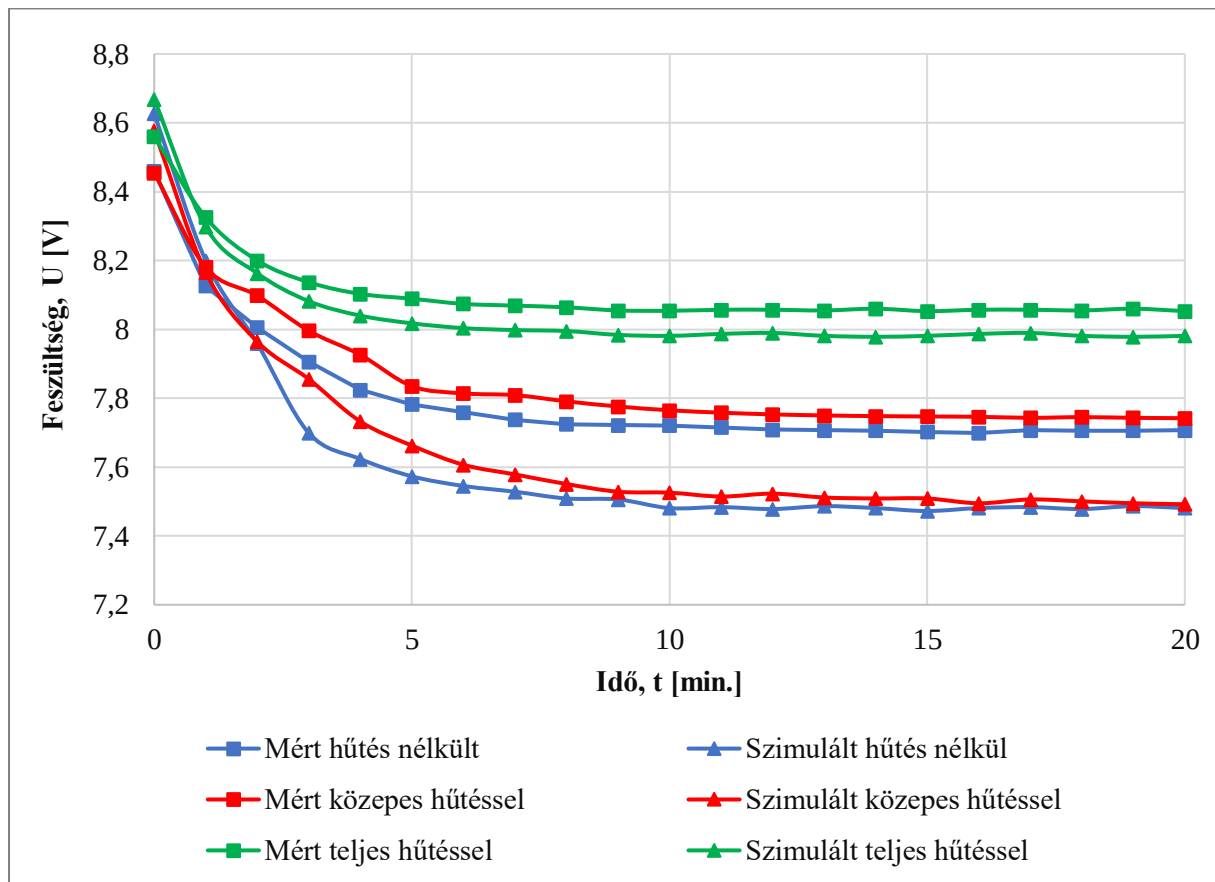
A 36. *ábra* a napelem cella rövidzárási áramerősségét mutatja a hőmérsékleti tranziens folyamatok során 1.000 W/m^2 intenzitású megvilágítás mellett, hűtés nélküli, közepesen hűtött és teljes hűtés során. A szimulációs értékek szinte teljes mértékben egybe esnek. A szimuláció alapján a hőmérsékleti tranziens folyamat 5 percen belül lefut. A mérési eredmények között részben a mérési pontatlanságból adódóan figyelhetők meg hullámlázások, részben pedig a hűtés, hűtőberendezés időbeni tehetetlenségéből és egyenletlenségéből. Szintén befolyásoló tényező a megvilágítást biztosító napfénysszimulátor ingadozásai is.

A 37. *ábra* ugyan ezen esetekre az üresjárású feszültséget szemlélteti. Teljes hűtés esetében a feszültség mért és számított értékei jobban közelítik egymást. Minden görbe azonos jelleget mutat. Megfigyelhető, hogy teljes hűtésnél a hőmérsékleti tranziens folyamat mintegy 5 perc alatt lefutott.

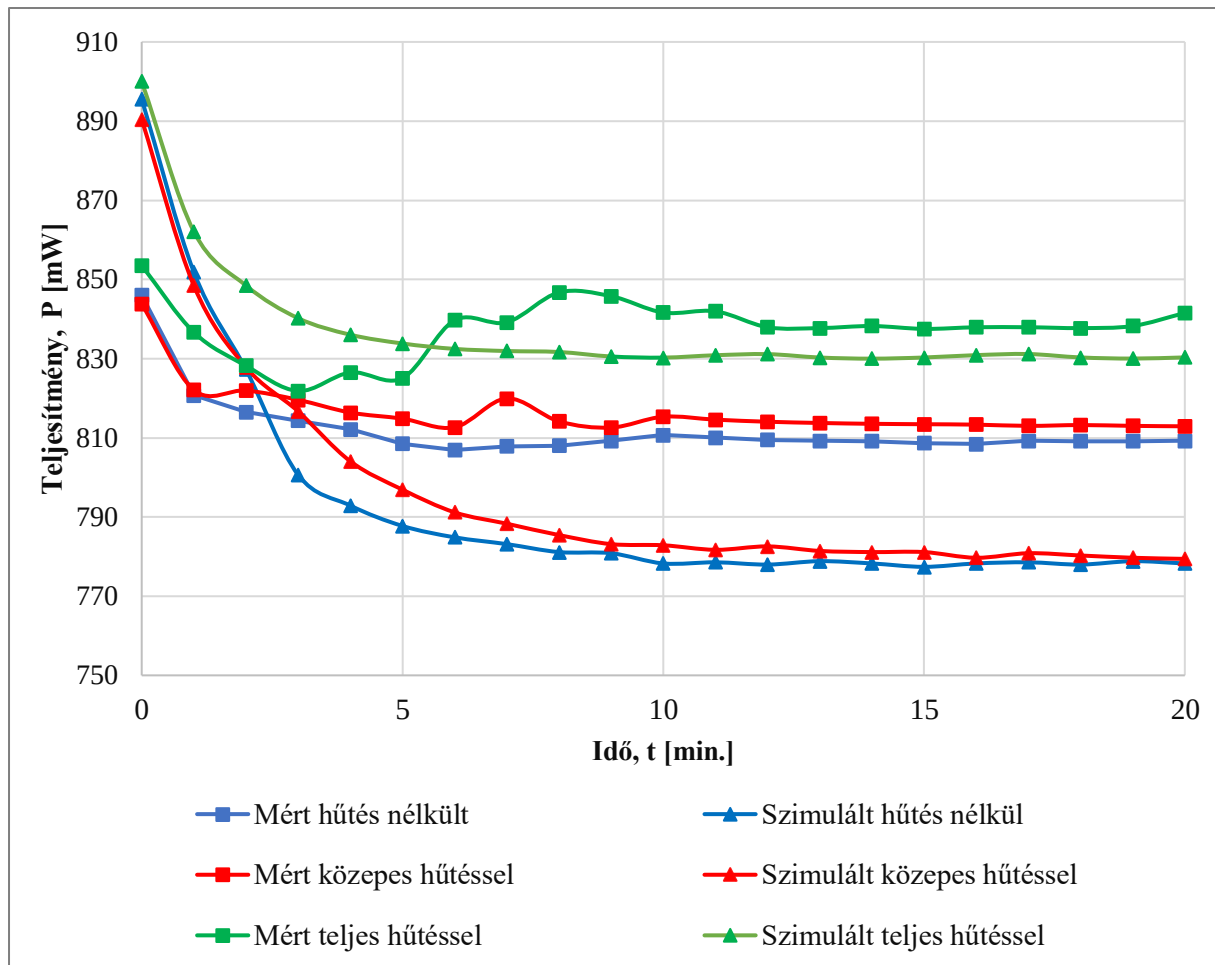
A 38. *ábra* a napelem cella elméleti teljesítményét szemlélteti, ahol megfigyelhető az áramerősség okozta ingadozás hatása. Teljes hűtésnél a mért és a szimulált értékek jobban közelítik egymást. Sok más kutató is kapott hasonló eredményeket, pl. példa Singh et al. [28], Malik et al. [31] és Wood et al. [64].



36. ábra: A napelem cella rövidzárási áramerőssége az idő függvényében.



37. ábra: A napelem cella üresjárási feszültsége az idő függvényében.



38. ábra: A napelem cella elméleti teljesítménye az idő függvényében.

Ha megfigyeljük a 36-38. ábrákat, azt láthatjuk, hogy minden esetben a mérés első szakaszában figyelhető meg nagyobb mértékű eltérés, amely trend a következő módon magyarázható: a mérések során az adatrögzítés manuálisan történik, vagyis a hőmérséklet, az áramerősség és a feszültség érték regisztrálása néhány másodperc időeltéréssel történhet; ezen tényező nagyobb differenciát okoz a tranziens elején, amikor a hőmérséklet változása a legerőteljesebb, így az elektronikai paraméterek változása is a leggyorsabb. Ezen kismértékű probléma teljesen automatikus mérő/adatrögzítő rendszer kiépítésével kiküszöbölhető.

A 15. táblázat a mérési és a szimulációs eredmények statisztikai mutatóit tartalmazza. A táblázatban nem csak az 1.000 W/m^2 , hanem a 600 W/m^2 megvilágítási intenzitásra vonatkozó statisztikát is feltüntettem. Ha megfigyeljük a táblázat adatait láthatjuk, hogy a napelem cella hőmérsékleti tranziensét a szimuláció kiválóan leírja, a mért és a számított eredmények közötti eltérés nem jelentős. Minden esetben az eltérés adathalmazának modusa és átlaga is 100% körül ingadozik; szórása pedig 3%-nál kisebb. A megvilágítás intenzitásának csökkenésével a szimulációs modell jobban közelíti a mérési eredményeket [28, 29, 31].

Tehát ezen szimulációk validálása sikeresnek tekinthető, a program megfelelően számítja az üresjárási feszültség, a rövidzárási áramerősség és elméleti teljesítmény értékeket a vizsgált hőmérséklet tartományban és fényintenzitások esetén.

15. táblázat: A tranziens szimulációk és mérések közötti eltérést jellemző adathalmaz statisztikai jellemzői két fényintenzitás esetére.

		600 W/m ²			1.000 W/m ²		
		I arány [%]	U arány [%]	P arány [%]	I arány [%]	U arány [%]	P arány [%]
Hűtés nélkül	Min	95,73%	100,43%	96,28%	99,08%	96,89%	96,00%
	Max	101,73%	100,69%	99,26%	103,81%	101,97%	105,90%
	Módusz	-	-	-	99,08 %	-	-
	Medián	96,19 %	100,60 %	96,08 %	99,08 %	97,10 %	96,27 %
	Átlag	96,58 %	100,59 %	97,07 %	100,03 %	97,67 %	97,71 %
	Szórás	1,13 %	0,08 %	0,81 %	1,37 %	1,36 %	2,69 %
Közepes értékű hűtés	Min	95,58%	100,27%	95,84%	98,14%	96,76%	95,01%
	Max	98,13%	100,55%	98,58%	103,82%	101,44%	105,30%
	Módusz	-	-	-	100,03 %	96,79 %	-
	Medián	95,94 %	100,37 %	96,28 %	100,03 %	96,92 %	96,55 %
	Átlag	96,06 %	100,36 %	96,40 %	100,56 %	97,48 %	98,03 %
	Szórás	0,49 %	0,07 %	0,54 %	1,60 %	1,18 %	2,68%
Teljes hűtés	Min	97,25%	99,41%	97,22%	98,14%	98,99%	97,15%
	Max	101,20%	100,21%	100,91%	104,87%	101,26%	106,20%
	Módusz	98,18 %	100,14 %	-	-	99,13 %	-
	Medián	98,00 %	100,02 %	97,96 %	99,08 %	99,13 %	98,22 %
	Átlag	98,18 %	99,96 %	98,14 %	99,48 %	99,27 %	99,12 %
	Szórás	0,79 %	0,21 %	0,78 %	1,64 %	0,48 %	2,09 %

2.5.2. ÁLLANDÓ HŐMÉRSÉKLETEN VETT KARAKTERISZTIKÁK MEGHATÁROZÁSA

A napelem karakterisztikák meghatározása különböző terhelések esetén mért áramerősség és feszültség értékek alapján történik. A méréseket és a szimulációkat három fényintenzitás és négy stabilizált hőmérséklet esetére végeztem el. A vizsgálati hőmérsékletek megegyeznek a tranziens folyamatok során mért, állandósult hőmérsékletekkel, azzal a különbséggel, hogy negyedik mérési pontként kis mértékű hűtés is alkalmazásra került, ezzel elősegítve a pontosabb statisztikai kiértékelést. A 16. táblázat tartalmazza a vizsgált hőmérsékleteket.

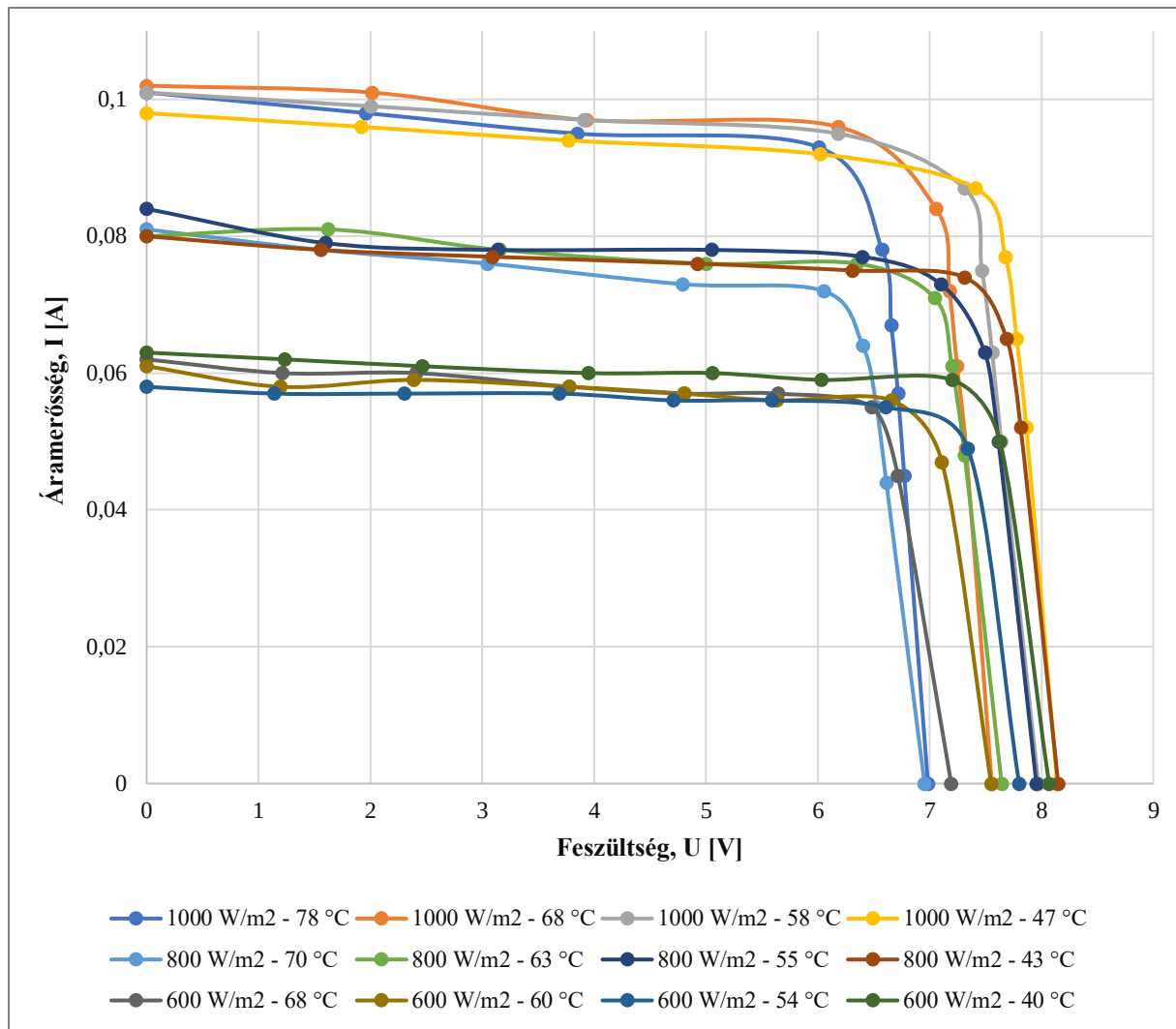
16. táblázat: *A napelem cella hőmérsékletei a vizsgálatok során.*

	600 W/m²	800 W/m²	1.000 W/m²
Hűtés nélkül	68 °C	70 °C	78 °C
Kis mértékű hűtéssel	60 °C	63 °C	68 °C
Közepes hűtéssel	54 °C	55 °C	58 °C
Teljes hűtéssel	40 °C	43 °C	47 °C

A 39. ábra az áramerősséget mutatja a feszültség függvényében az összes hőmérséklet és fényintenzitás érték esetére. A hőmérséklet értékek esetén eltérések tapasztalhatók adott hűtési mód esetére a megvilágítás intenzitásának függvényében. A négy hőmérséklet értéket a következő módokon biztosítjuk: a legmagasabb hőmérséklet elérése érdekében a napelemet egy falap segítségével elszigeteljük a hűtőmodultól, hisz az a Peltier-elemek működése nélkül is hőt von el a hűtőborda által; a következő hőmérséklet érték elérésekor a hűtőmodulon helyezkedik el a napelem, de az nem működik; a hűtés első fokozata során a hűtőmodul maximális teljesítményen működik; a legalacsonyabb hőmérséklet eléréséhez a hűtőmodul hűtését a napelem felületének ventilátoros hűtése biztosítja.

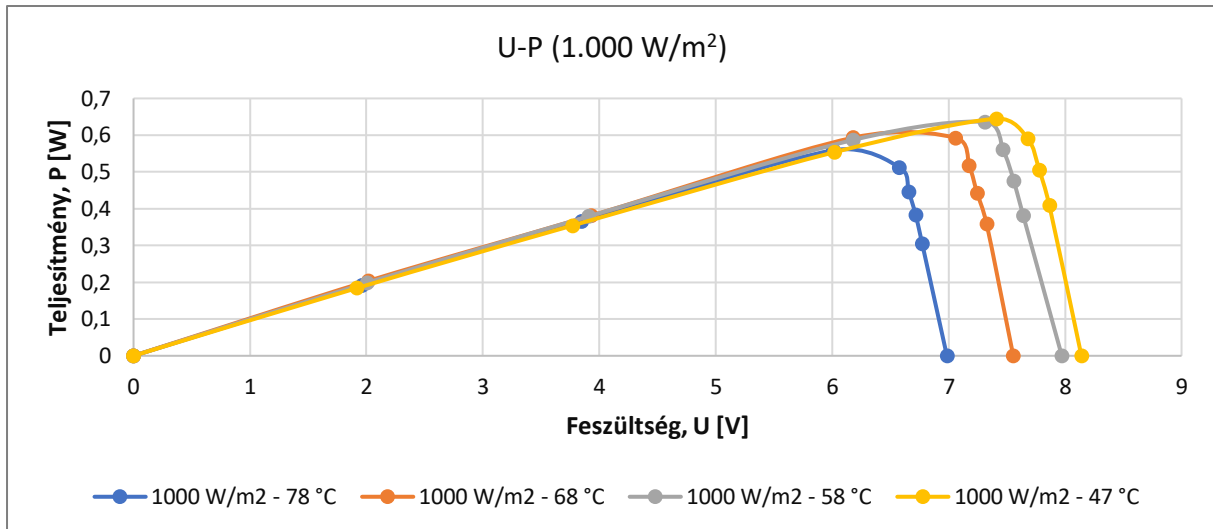
A napelem cella U-I jelleggörbéit (39. ábra) megfigyelve egyértelmű trendeket vehetünk észre. Egyrészt látható, hogy a hőmérséklet csökkenése az üresjárási feszültség növekedését eredményezi, illetve az áramerősség kismértékű csökkenése is észrevehető. Látható, hogy amikor előfordul közel azonos hőmérséklet különböző fényintenzitás értékek esetén akkor az üresjárási feszültségek szinte megegyeznek. Ez az üresjárási feszültség hőmérséklet függésének erős- és fényintenzitás függésének gyenge mivoltával magyarázható. Egyértelmű trendként jelenik meg, hogy az üresjárási feszültség nagymértékben függ a fényintenzitástól és ez a függés lineáris, hasonlóan az üresjárási feszültség hőmérsékletfüggéséhez.

A másik fontos információkat hordozó napelem jelleggörbe a teljesítmény-feszültség grafikon. A teljesítményt a feszültség és az áramerősség szorzataként számíthatjuk. A 40. ábra a teljesítmény alakulását mutatja a feszültség függvényében, az átláthatóság kedvéért egy fényintenzitásnál (1.000 W/m²) a különböző hőmérsékletértékekre. A 41. ábra mindezt 800 W/m² fényintenzitás esetén, a 42. ábra pedig 600 W/m² fényintenzitás esetén és a vizsgált különböző hőmérsékletértékekre vonatkozóan.

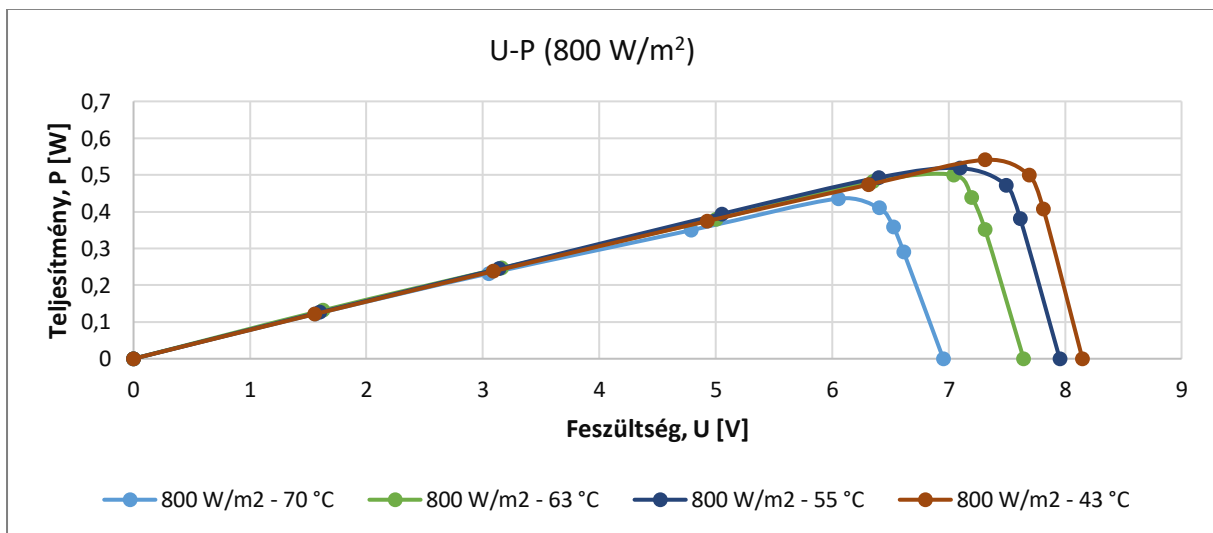


39. ábra: A napelem U - I jelleggörbéi különböző fényintenzitás- és hőmérséklet értékek esetére.

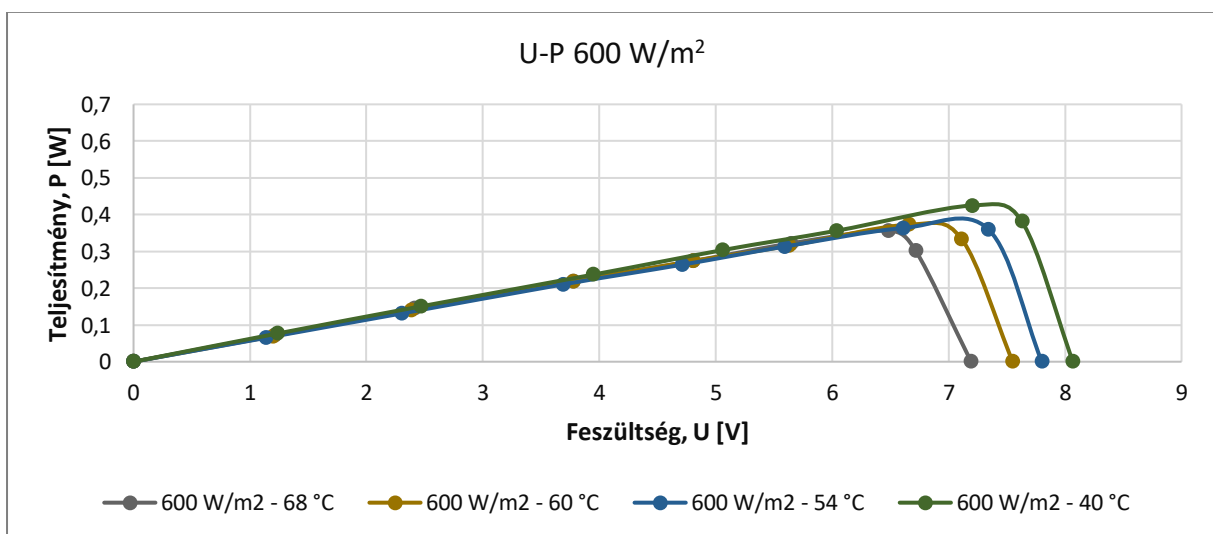
A feszültség-teljesítmény ábrákat (39.-41.) megfigyelve ugyancsak észrevehető a hőmérséklet és a fényintenzitás maximális teljesítményre gyakorolt hatása. A hőmérséklet növekedésével csökken a napelem maximális teljesítménye (belső ellenállással megegyező terhelés), amelyet a feszültség nagymértékű csökkenése és az áramerősség kismértékű növekedése okoz, amely szorzatuk így csökken. A fényintenzitás csökkenésével -a várható módon- csökken a napelem által maximálisan biztosítható teljesítmény. A leírt hőmérséklet és fényintenzitás függések is lineáris viselkedést mutatnak [64, 108].



40. ábra: U-P jelleggörbék 1.000 W/m² fényintenzitás esetén különböző hőmérsékleteken.

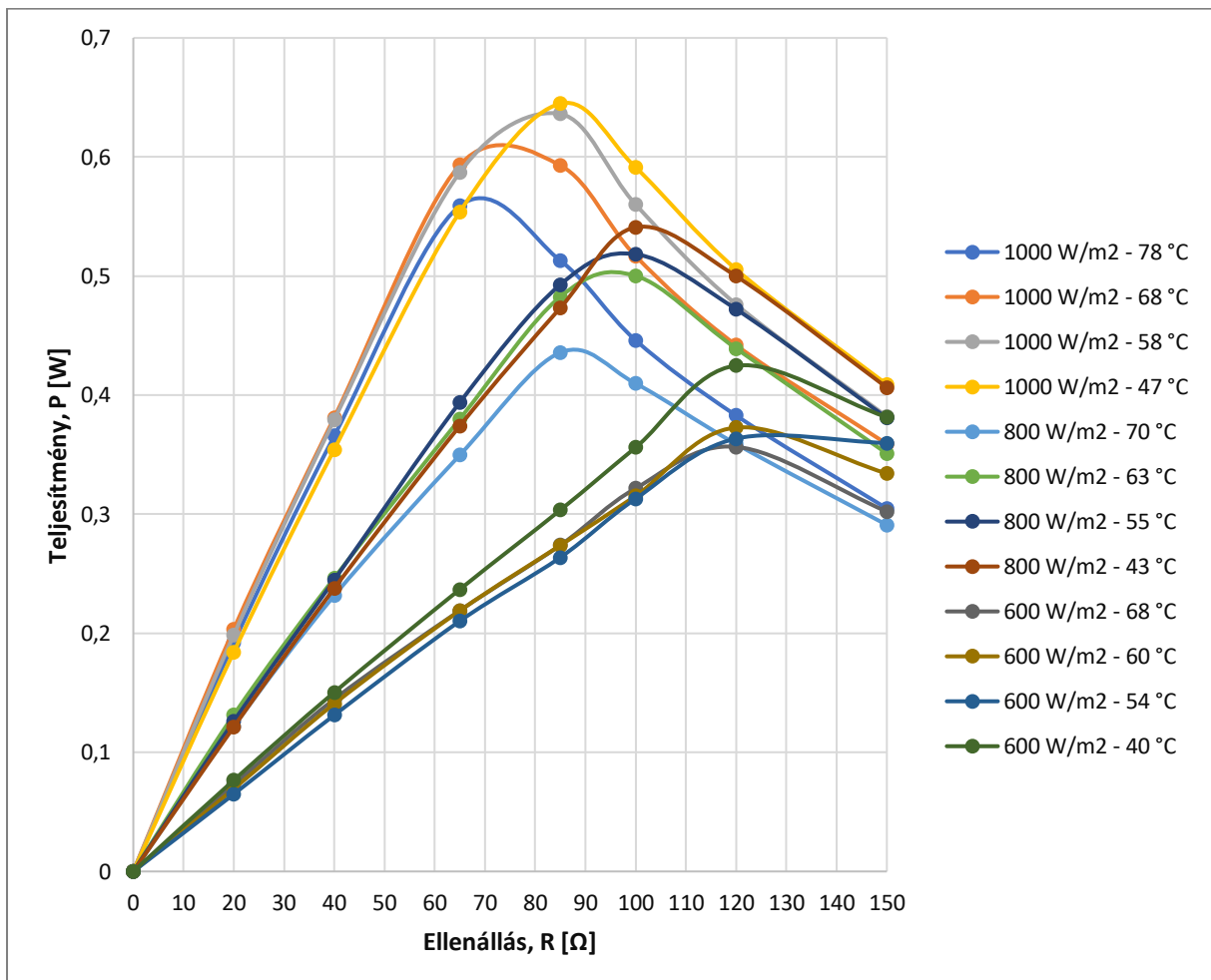


41. ábra: U-P jelleggörbék 800 W/m² fényintenzitás esetén különböző hőmérsékleteken.



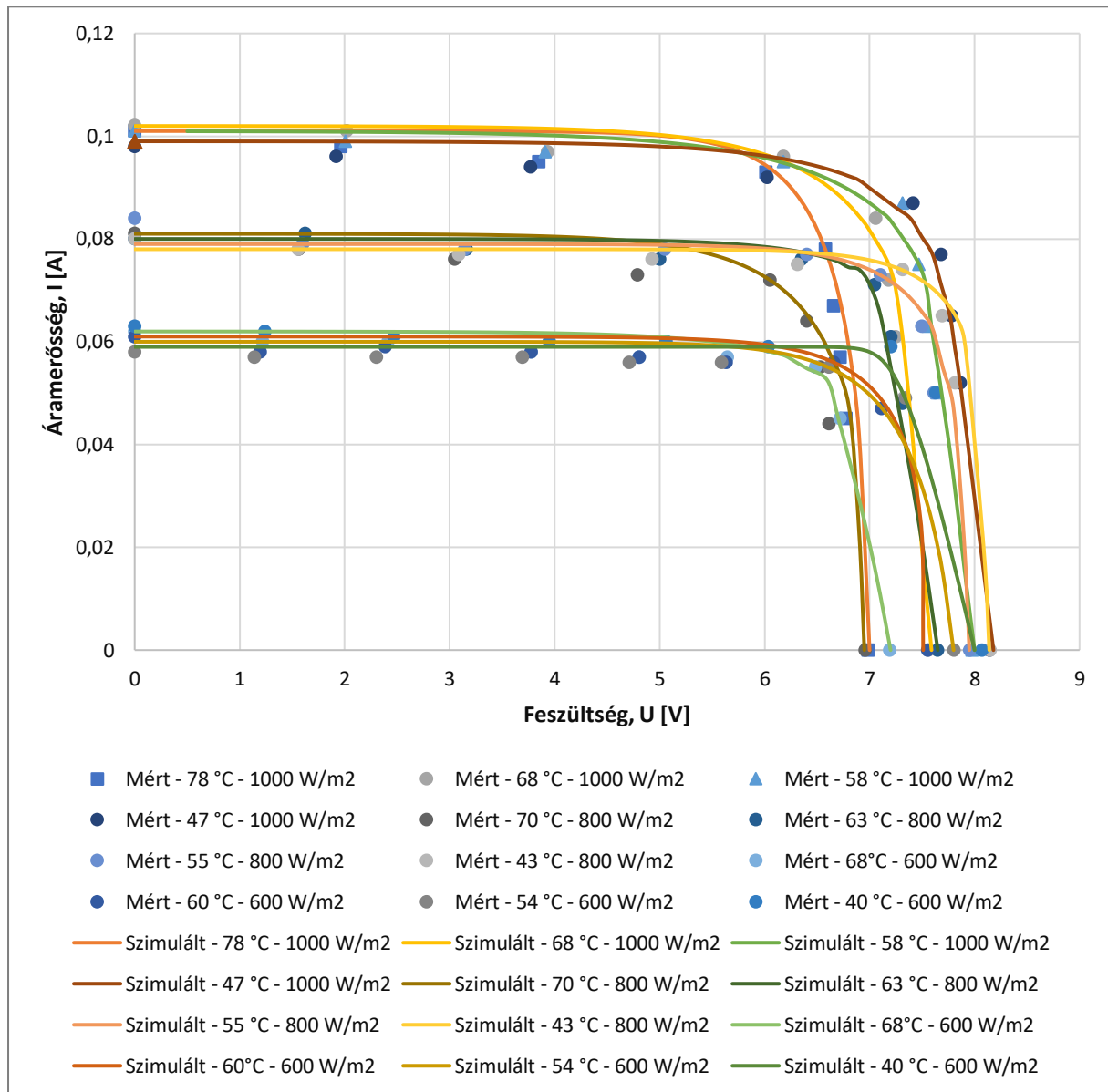
42. ábra: U-P jelleggörbék 600 W/m² fényintenzitás esetén különböző hőmérsékleteken.

Fontos információkat ad a napelem működési jellemzőiről a teljesítmény ábrázolása a terhelő ellenállás függvényében. A 43. ábra a vizsgált hőmérséklet- és fényintenzitás értékek esetére mutatja az R-P görbéket. Az ábrán megfigyelhető a kapcsolat hőmérséklet és a fényintenzitás változása, illetve a napelem Maximum Teljesítmény Pontjához (MPP) tartozó optimális terhelés értéke között. Látható, hogy a csökkenő fényintenzitás az optimális terhelés értékét növeli. A hőmérséklet növekedése pedig az ideális terhelés értékét kismértékben csökkenti. Ez a hatás 600 W/m^2 fényintenzitás esetén már csak elhanyagolható mértékben jelentkezik, mindezekből lehet következtetni a napelemek hatékonyságára, annak terhelés- és hőmérsékletfüggésére. Nagyobb megvilágítási intenzitás és hőmérséklet esetében a napelem belső ellenállás intenzívebben változik, amely közvetlen hatást gyakorol a napelem üzemi hatékonyságára, hatásfokára, tehát nagyobb intenzitások és hőmérsékletek esetében a napelem cella hatásfoka csökken.

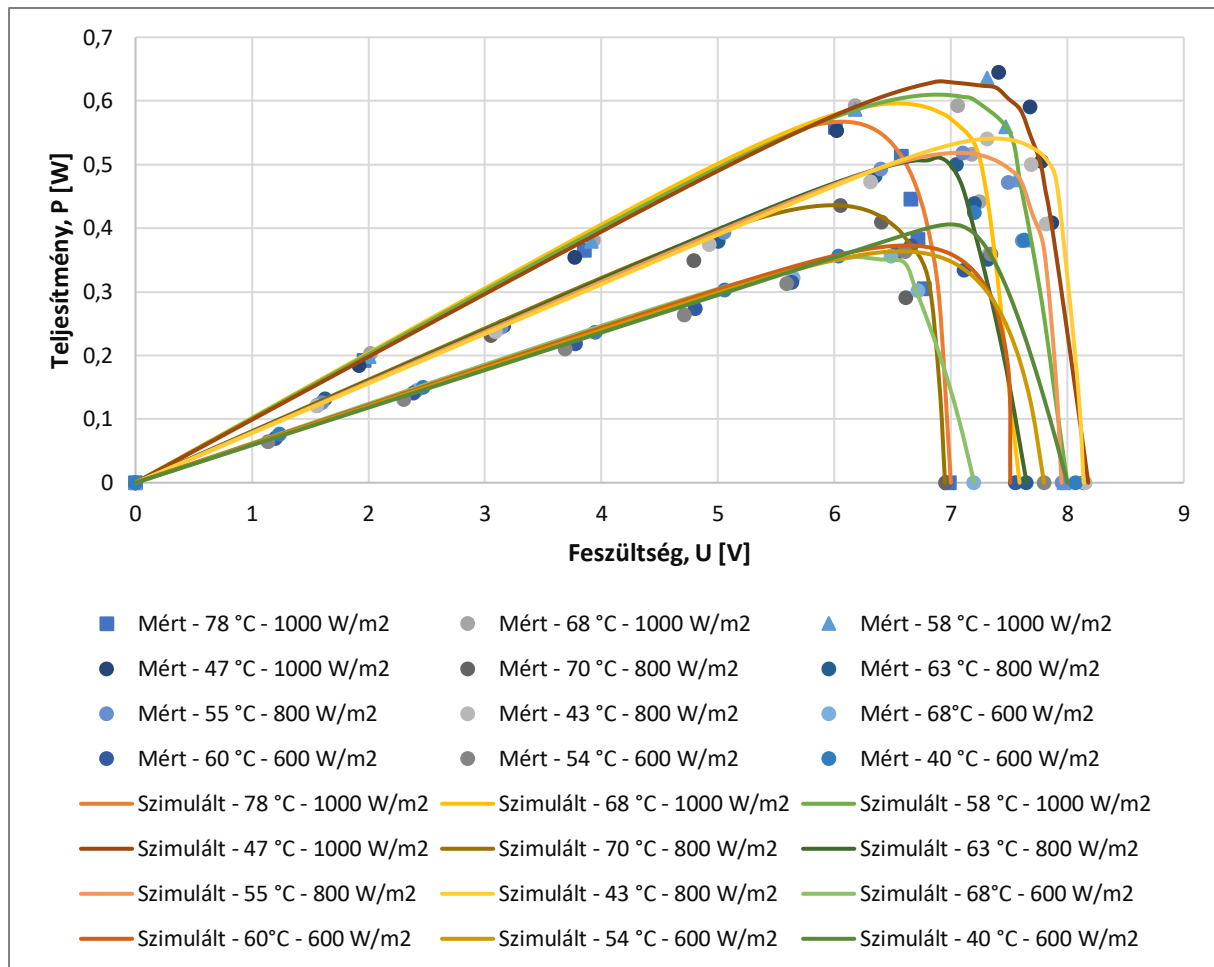


43. ábra: Terhelő ellenállás - teljesítmény görbék a vizsgált hőmérséklet- és fényintenzitás értékek esetén.

A következőkben a terhelt napelem különböző fényintenzitás és hőmérséklet értékek esetén felvett napelem karakterisztikák szimulációs közelítéseit mutatja be a mérési eredményekkel összehasonlítva. A 44. ábra a szimulált és mért feszültség-áramerősség görbéket mutatja be a vizsgált hőmérséklet és fényintenzitás értékek esetére. A 45. ábra a mért és szimulált feszültség-teljesítmény görbéket szemlélteti a vizsgált hőmérséklet és fényintenzitás értékekre nézve.



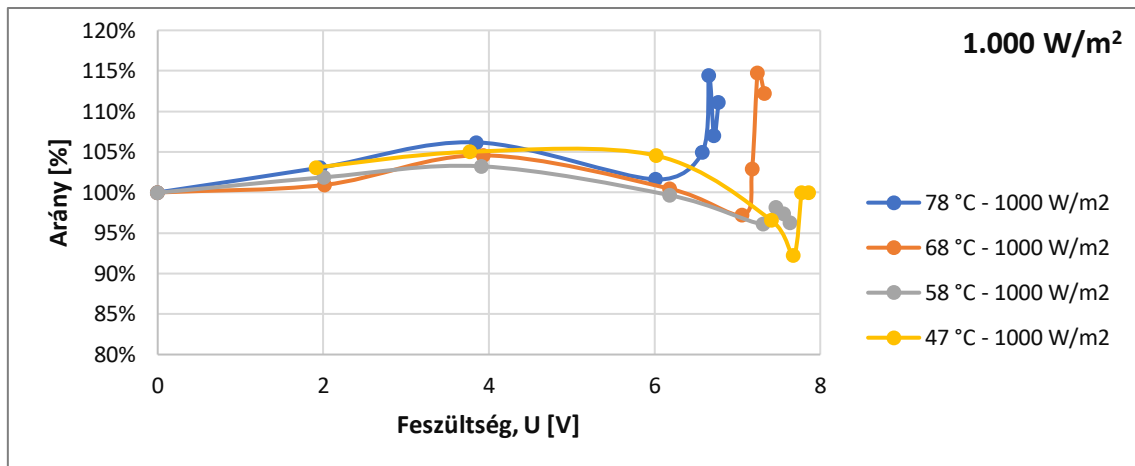
44. ábra: Mért és szimulált U-I jelleggörbék.



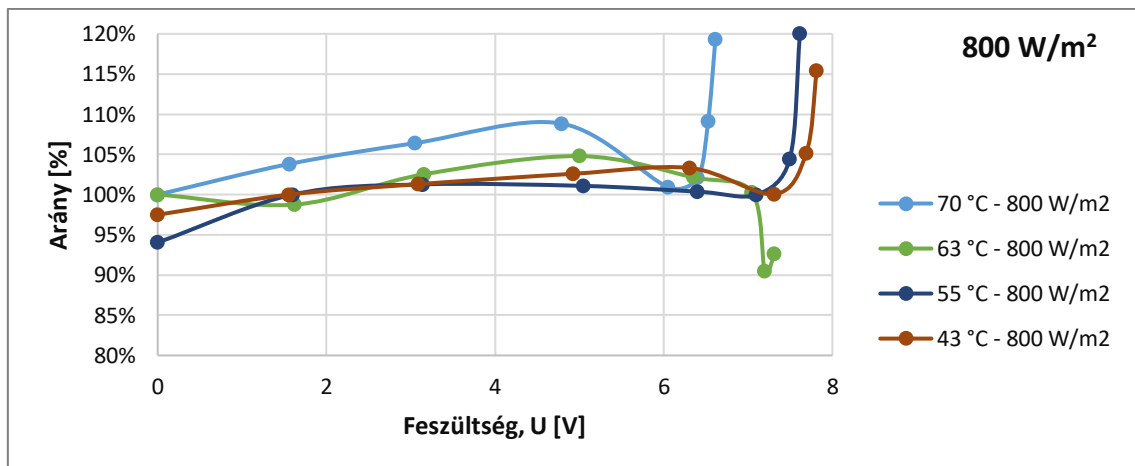
45. ábra: Mért és szimulált U-P jelleggörbék.

Ahogy az a tranziens vizsgálatok eredményeinél látható, a mért és a számított értékek eltérését jelen esetben is vizsgáltam. A 46. ábra diagramja 1.000 W/m² fényintenzitás esetén, a vizsgált hőmérséklet értékekre mutatja a számított és mért áramerősség százalékos arányát a feszültség függvényében [108]. (Megjegyzendő, hogy a szimulációs program mindig adott feszültség értékhez keresi a hozzátartozó áramerősség értéket, a feszültségérték adott felbontású léptetésével. Ebből kifolyólag a mért és a számított jelleggörbék eltérésének meghatározása csak az adott feszültséghez számított és az adott feszültséghez mért áramerősség értékek összehasonlítása révén lehetséges. Mivel a teljesítmény az áramerősség és a feszültség szorzata, így a teljesítmény-eltérés feszültség függvényében történő ábrázolása felesleges, hisz értéke megegyezik az áramerősség-eltérés értékeivel.)

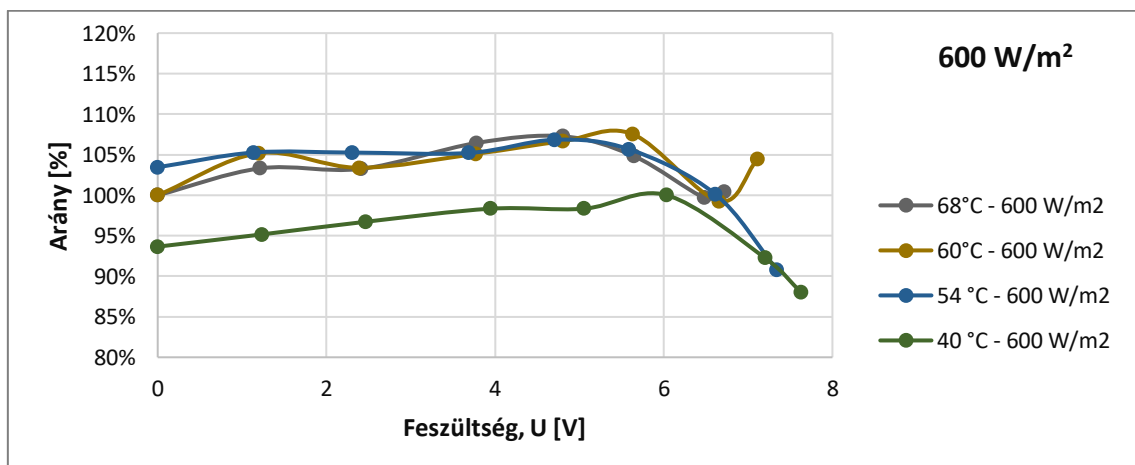
A 47. ábra diagramja 800 W/m², a 48. ábra pedig 600 W/m² fényintenzitás esetén, a vizsgált hőmérséklet értékekre mutatja a számított és mért áramerősség százalékos arányát a feszültség függvényében.



46. ábra: A mért és számított áramerősség értékek aránya a feszültség függvényében 1.000 W/m² fényintenzitás esetén.



47. ábra: A mért és számított áramerősség értékek aránya a feszültség függvényében 800 W/m² fényintenzitás esetén.



48. ábra: A mért és számított áramerősség értékek aránya a feszültség függvényében 600 W/m² fényintenzitás esetén.

A 46. ábra görbéit tekintve észrevehető, hogy a szimuláció jó egyezést mutat a mérésekkel a kisebb feszültség tartományban, az eltérés a nagyobb feszültség (és terhelés) tartományában jelentős. Ha a napelem U-I jelleggörbét tekintjük, ezen tartományon az áramerősség a feszültség növekedésének hatására jelentősen csökken, amely nagymértékű pontosságot követel a méréstől és a szimulációtól is a jó egyezés érdekében. Valószínű a mérési eredményekben hordozott hiba ezen tartományban összeadódik a szimuláció hibáival, így fordulhat elő akár 20%-os eltérés is.

A 47. és 48. ábrák görbéinek eltérését tekintve a következő trend vehető észre: a fényintenzitás csökkenésével a kisfeszültségű- kis áramerősség változással rendelkező tartomány eltérés arányainak szórása az egyes hőmérsékletekre tekintve növekszik. Tehát pontatlanabb a rövidzárási áramerősség és az innen történő csökkenő tartomány meghatározása. Ennek oka lehet, hogy a gyártók 1.000 W/m^2 -től eltérő fényintenzitásokra nem adnak meg hőmérsékleti állandókat, így a szimulációkat a mért állandókon alapulva végeztem el. Ezen tény okozhatja azt is, hogy a 800 W/m^2 és 600 W/m^2 esetén az üresjárási feszültség közeli értékek eltérése is szignifikánsabb. 1.000 W/m^2 fényintenzitás esetén, ahol ez a tényező nem áll fent, az figyelhető meg, hogy a hőmérséklet növekedésével a szimulált és mért üresjárási feszültséget közelítő értékek eltérése a hőmérséklet növekedésével nő. Ez azt jelzi, hogy a szimulációs modell a nagyobb hőmérsékletekre ezen tartományon növekvő hibát produkál.

A 17. táblázat a tranziens szimulációkhoz hasonlóan foglalja össze a mért és számított értékek közötti eltérés statisztikai jellemzőit. A terhelt napelem szimulációs vizsgálatát összefoglalva elmondható, hogy sikeresen reprodukáltam a napelem jelleggörbéit, azonban nagyobb eltérés mutatkozott a mért és szimulált eredmények között, mint a tranziens vizsgálatok esetében. Ennek oka lehet, hogy ezen számítások sokkal komplexebbek, mint a rövidzárási áramerősség és üresjárási feszültség meghatározását végző módszer. Az implicit függvény megoldása minimumkereséssel hibalehetőséget rejthet magában. A szimulációk során előfordultak olyan esetek, amikor nem talált megfelelő értéket, ilyen esetekben a szomszédos értékek alapján képzett interpolált értékkel helyettesítettük azt. Ezen jelenség okozhatja egyes szimulált görbék esetében megfigyelhető torzulást is.

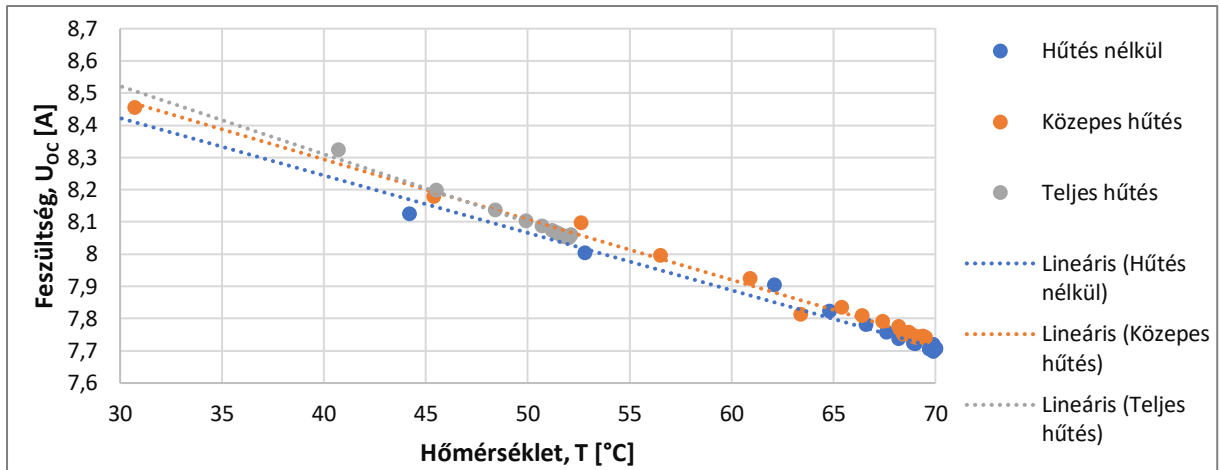
17. táblázat: Megegyező feszültségeken mért és számított áramerősség értékek eltérésének statisztikai jellemzői.

		I arány [%]			
Hőmérséklet		78 °C	68 °C	58 °C	47 °C
1000 W/m ²	Medián	105,56 %	101,94 %	98,93 %	100,00 %
	Átlag	106,05 %	104,14 %	99,09 %	100,02 %
	Szórás	4,83 %	6,20 %	2,57 %	4,61 %
Hőmérséklet		70 °C	63 °C	55 °C	43 °C
800 W/m ²	Medián	105,11 %	100,16 %	100,73 %	101,94 %
	Átlag	106,31 %	98,95 %	102,65 %	103,16 %
	Szórás	6,28 %	4,96 %	7,58 %	5,46 %
Hőmérséklet		68 °C	60 °C	54 °C	40 °C
600 W/m ²	Medián	103,28 %	104,77 %	105,24 %	95,94 %
	Átlag	103,15 %	103,94 %	102,83 %	95,31 %
	Szórás	2,93 %	2,96 %	5,26 %	3,92 %

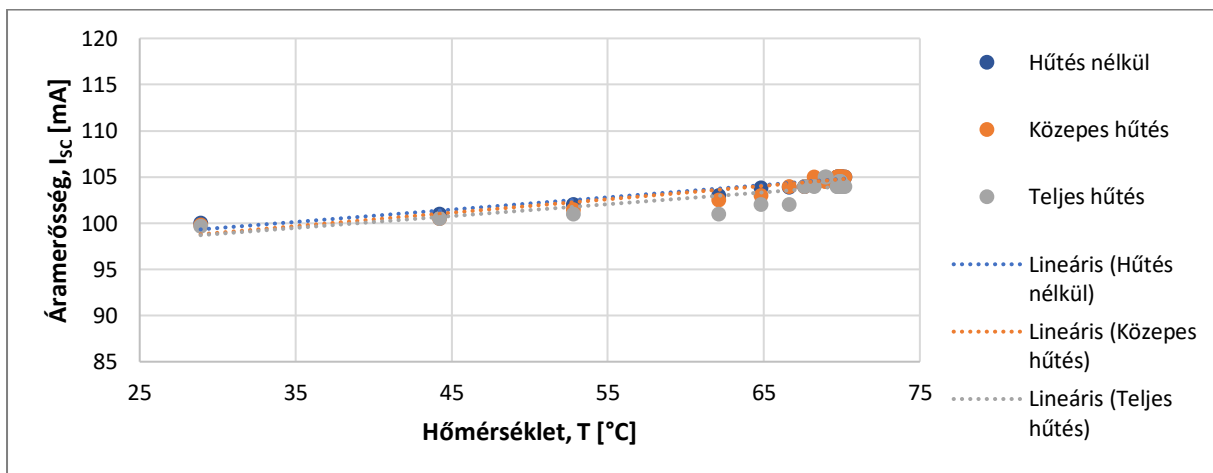
2.5.3. HŐMÉRSÉKLETI ÁLLANDÓK MEGHATÁROZÁSA

Mivel a napelem hőmérsékleti állandói információt adnak a napelem rövidzárási áramerősségének és üresjárási feszültségének hőmérsékletfüggéséről, ezen keresztül pedig a terhelt napelem munkaponti áramerősségének, feszültségének, teljesítményének és hatásfokának alakulásáról, ezért ezen értékek meghatározásához a tranziens és az állandó hőmérséklet mérései során regisztrált I_{SC} és U_{OC} értékeket használtam fel. Ezzel a céлом a lehető legnagyobb adathalmaz felhasználása, így pontosítva a szimulációs modellt és a vele előállítható eredményeket.

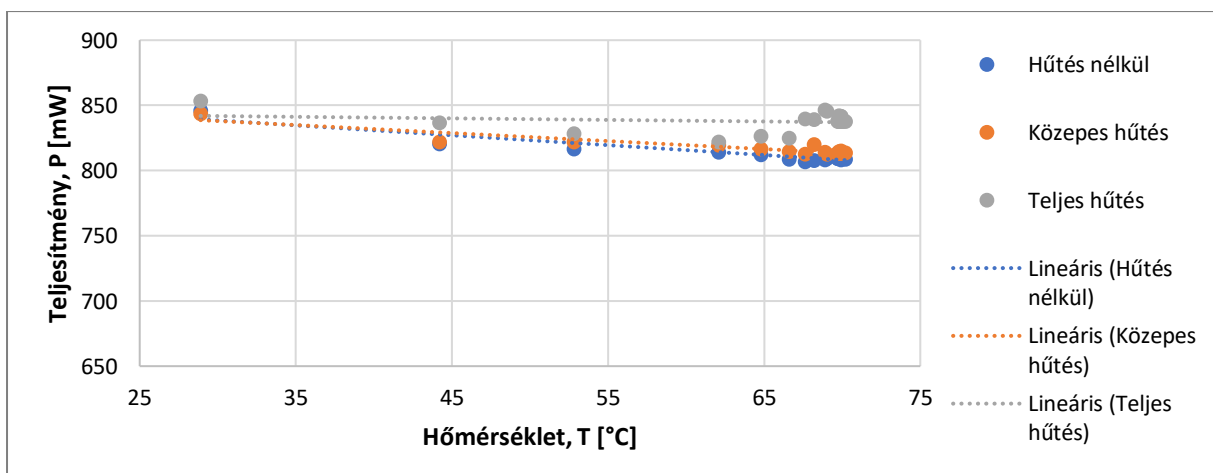
Azon feltevést helyességét, hogy különböző hűtési állapotok során, a napelem hőmérsékleti állandója nem változik, vagyis a mért hőmérsékleti tranziensek adatai egy adathalmazként kezelhetők, a tranziens vizsgálatok során felvázolható T- U_{OC} grafikonok lineáris közelítéseinek egybevágó meredeksége igazolja. Az áramerősség eredő mérési pontatlansága miatt ugyan a T- I_{SC} grafikonok lineáris közelítéseinek meredeksége olykor eltér, azonban a nagyobb mért adathalmaz valószínűleg nagyobb pontosságot is eredményez majd, így itt is minden mért adatot felhasználunk. Példaként tekintsük a $U_{OC}(T)$, az $I_{SC}(T)$ és a $P(T)$ függvényeket (49.-51. ábra) a hőmérsékleti állandók meghatározásához.



49. ábra: Az üresjáratú feszültség hőmérsékleti állandójának jelleggörbéje 1.000 W/m^2 fényintenzitás esetén.



50. ábra: A rövidzárási áramerősség hőmérsékleti állandójának jelleggörbéje 1.000 W/m^2 fényintenzitás esetén.



51. ábra: A teljesítmény hőmérsékleti állandójának jelleggörbéje 1.000 W/m^2 fényintenzitás esetén.

A 49.-51. ábrákon a hőmérsékleti állandók meghatározásához szükséges görbék láthatók. Egyértelműen megfigyelhető az áramerősségnél az enyhén növekvő, a feszültségnél az erősen csökkenő, végül pedig a teljesítménynél a szintén csökkenő tendencia.

Az állandók értékeinek meghatározásához először ábrázoltam a vizsgált elektronikai paramétert a hőmérséklet függvényében adott fényintenzitás esetén (49.-51. ábra). Ezen ponthalmazra lineáris közelítéssel egyenest fektettem, majd meghatároztam az egyenes meredekségét. Ezután a (45.) összefüggés alapján számíthatjuk a hőmérsékleti állandó értékét:

$$K = \frac{x_{n+1} - x_n}{x_n} \cdot \frac{100}{T_{n+1} - T_n} = 100 \cdot \frac{m}{x_n} [\%/^{\circ}\text{C}], \quad (45.)$$

ahol: x_n - feszültség vagy áramerősség értéke egy tetszőleges pontban [V vagy A],

m - adott egyenes meredeksége [V/ $^{\circ}\text{C}$ vagy A/ $^{\circ}\text{C}$],

T_n - értéke az adott tetszőleges pontban [$^{\circ}\text{C}$].

A 18. táblázat összefoglalja a meghatározott hőmérsékleti állandókat, továbbá megfigyelhető a gyártó által megadott hőmérsékleti állandó 1.000 W/m² fényintenzitás esetére.

18. táblázat: A napelem mért- és a gyár által adott hőmérsékleti együtthatói

	Hőmérsékleti állandó	Mért	Adattábla	Eltérés
1000 W/m²	$\mu_{\text{ISC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	0,057	0,047	21 %
	$\mu_{\text{UOC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	-0,300	-0,320	6 %
800 W/m²	$\mu_{\text{ISC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	0,063	-	-
	$\mu_{\text{UOC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	-0,390	-	-
600 W/m²	$\mu_{\text{ISC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	0,076	-	-
	$\mu_{\text{UOC}} [\%/^{\circ}\text{C}]$	-0,540	-	-

A 18. táblázat alapján elmondható, hogy az üresjárási feszültség esetében a mérések alapján számított és a gyártó által megadott hőmérsékleti állandó jó egyezést mutat. A rövidzárási áramerősség esetében a két adat közötti eltérés nagyobb, ezt a már korábban részletezett mérési pontatlanság okozhatja. Meghatározásra kerültek továbbá a hőmérsékleti állandók további fényintenzitás értékek esetére is. Látható, hogy mind a rövidzárási áramerősség, mind az üresjárási feszültség esetén a hőmérsékleti állandók értéke kismértékben változik a fényintenzitás értékének változásával [80].

3. FELÜLETI SZENNYEZŐDÉSEK HATÁSAI A NAPELEMEK VILLAMOS

PARAMÉTEREIRE

A napelem működését befolyásoló és hőmérsékletének növekedését eredményező környezeti hatásokat két fő csoportra oszthatjuk [89]. Az egyik csoportot a területi adottságok a másik csoportot a szennyezőanyag-források alkotják. Mindkét főcsoport árnyékhatast fejt ki.

A leggyakoribb területi adottsági tényezők [93, 94, 99, 101, 102, 103, 104]:

- épületek,
- növényzet – cserjék és fák,
- a napelemek és tartószerkezeteik önárnyékolása.

A leggyakoribb szennyezőanyag-források és típusok [93, 94, 99, 101, 102, 103, 104]:

- közlekedés – gumiabroncs kopadék és koromszemcsék,
- fűtés – pernye,
- növényzet – falevél és pollen,
- mezőgazdaság – talajszemcse és homok,
- ipar – szálló por,
- állatvilág – madárürülék.

Az első csoportba tartozó tényezők kizárólag árnyékolási problémát vetnek fel, ezért azok részben, vagy teljesen kiküszöbölhetők a tervezési folyamat során. A második csoportba tartozó tényezők, mivel közvetlenül fizikai kapcsolatba kerülnek a napelemmel, ezért az árnyékhatast mellett hőszigetelési problémákat is felvetnek, amelyek előre nem pontosan ismertek, dinamikusán változnak, ezért nehezen számszerűsíthetők. A valós hatások első sorban kísérleti úton ismerhetők meg [14, 89, 91, 94, 96, 97, 98].

Magyarországon a leggyakoribb szennyezőanyag a szálló por. Az Egyenlítőhöz közeledve a sivatagi homok, míg a nagyvárosokban a közlekedésből származó légszennyezőanyagok okozzák a legnagyobb problémát [104]. Mivel az egyes szennyezőanyagforrások szemcseméretében, sűrűségében és fényáteresztőképességében jelentős eltérések tapasztalhatók, ezért azok napelem termelésére gyakorolt hatásai is igen széles skálán mozognak. Európában éves szinten akár 5-20%-os termelés kiesést is okozhatnak a szennyeződések. Sivatagi környezetben egy-egy homokvihar után a napelemek termelőképessége 75-90%-kal is csökkenhet [14, 89, 90, 94].

Egyes szennyezőanyagok, mint például a homok, formájukat és keménységüket tekintve karcoló, koptató hatást is kifejtenek a napelem felületén, ami a felületi struktúra megváltozását és maradó hatásfokromlást eredményez (mert megnövekedik a visszatükröződés). A szerves, növényi, vagy állati eredetű lerakódások bediffundálhatnak a napelemet borító üveglap szerkezetébe, így tartós árnyékhatast eredményezhetnek, továbbá az üveglapot is elszínezhetik [91, 92, 93, 94, 96, 97, 98]. Eltávolításuk száraz tisztítási módszerekkel nem célszerű. Ilyen szennyezőanyagoknál lágyvíz, vagy speciális tisztítófolyadék alkalmazása javasolt [89, 90].

A szálló porok jelentős része egy esőzést követően lefolyik a napelem felületéről, azonban a napelem sarkain feltorlódhat és iszapos réteget képezhet. Ez további problémákhoz vezethet, első sorban túlhevülést eredményez. A szálló pornál nagyobb problémát a madárürülék okoz, amely a napelem felületén megszilárdul és hőszigetelő kérget képez. Amennyiben csak egy kis része szennyeződik a napelemnek és nem az egész beárnyékolódik, akkor a Bypass diódák nem aktiválódnak és a Hot-Spot (Forró-Pont) jelenség is kialakulhat, ami hosszabb távon visszafordíthatatlan kárt okoz a napelem működésében [106].

Mivel az árnyékhatastnak kitett cella árnyékoláskor ellenállásként 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, azonnali tönkremenetelét okozhatja, amely a teljes napelem panel működésére hatással van. Csökken a panel áramerőssége, feszültsége és a teljesítménye, tehát a hatásfoka. Amennyiben egy panelen belül több cella is kiég, akkor az a panel működésképtelenségéhez vezet és elkerülhetetlen a panel cseréje. Ezért célszerű ezeket a szennyeződések mihamarabb eltávolítani. A madárürülék eltávolítása a legnehezebb feladat. Hatékonyan csak napelem-tisztítófolyadék, vagy nagynyomású lágyított víz alkalmazásával távolítható el. A túl kemény víz a száradást követően vízkő foltokat hagy a napelem felületén, ami szintén csökkentheti annak teljesítményét. A napelemek tisztítására erőműmérettől függően különböző módszereket dolgoztak ki. A kisméretű robotoktól kezdve a takarító járművekig széles választék áll a rendelkezésünkre.

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

3.1. KISMÉRETŰ NAPELEM PANELEN VÉGZETT SZENNYEZŐDÉSI KÍSÉRLETEK

A laboratóriumi kísérleteket a 2.3.1. *alfejezetben* bemutatott halogén Napszimulátor segítségével végeztem el. A napelem panelt és a mérőeszközöket egy asztalon helyeztem el. A napelem hőmérsékletét egy 4 csatornás, PL-125-T4 típusú digitális hőmérővel mértem. A 4 db hőmérőszenzort a panel felületén különböző pontokban helyeztem el. A korábbi mérések során bebizonyosodott, hogy a napelem hátsó felület ugyan úgy felmelegszik, tehát a felületen mért hőmérséklet megegyezik a napelem teljes keresztmetszetében is tapasztalható hőmérséklettel [26]. Az áramerősséget és a feszültséget egy-egy *Protek DM-310* és egy *METEX M365OD* típusú digitális multiméterrel mértem. Minden mérést állandósult üzemi állapotban és stabilizálódott hőmérsékleten végeztem. A vizsgált panel hőmérsékleti tranziens folyamat mintegy 20 perc alatt futott le. Állandósult állapotban a panel átlaghőmérséklete 65,6 °C, míg a szobahőmérséklet 20 °C volt. A vizsgált napelem panel polikristályos típusú és 505x353x25 mm befoglaló méretű, adatait a 19. táblázat tartalmazza. A mérési összeállítást az 52. ábra szemlélteti.

19. táblázat: A vizsgált napelem villamos paraméterei.

Paraméter neve	Jelölés és mértékegység	Mérték
Gyártási év	-	2019
Csúcsteljesítmény	$P_{\max}$ [W]	20
Munkaponti áramerősség	I_M [A]	1,14
Munkaponti feszültség	U_M [V]	17,49
Rövidzárlati áram	I_{SC} [A]	1,22
Üresjárási feszültség	U_{OC} [V]	21,67
Névleges Fill faktor	φ [-]	0,7542
Soros ellenállás	R_s [Ω]	0,0035
Párhuzamos ellenállás	R_p [Ω]	10.000
Sorba kötött cellák száma	N_s [piece]	18
Párhuzamos ágak száma	N_p [piece]	2
Hőmérsékleti állandó $P_{\max}$	K_{PM} [W/°C]	-0,1137
Hőmérsékleti állandó I_{sc}	K_{ISC} [A/°C]	0,00057
Hőmérsékleti állandó U_{oc}	K_{UOC} [V/°C]	-0,06963
Százalékos hőmérsékleti állandó $P_{\max}$	μ_{PM} [%/°C]	-0,43
Százalékos hőmérsékleti állandó I_{sc}	μ_{ISC} [%/°C]	0,047
Százalékos hőmérsékleti állandó U_{oc}	μ_{Uoc} [%/°C]	-0,32
Hatásfok	η [%]	15,00
Névleges működési hőmérséklet	T_N [°C]	45±2
Működési hőmérséklettartomány	$T_{N-range}$ [°C]	-40...85



52. ábra: A mérési összeállítás.

A méréseket különböző típusú szennyezőanyagokkal végeztem el. A vizsgált szemcsés anyagok nevét és fizikai tulajdonságait a 20. táblázat tartalmazza.

20. táblázat: A szemcsés szennyezőanyagok fizikai tulajdonságai.

Szennyező- anyag	Sűrűség [g/cm ³]	Fajlagos felület [mm ² /g]	Szemcse- méret [mm]	Hő- kapacitás [kJ/kg K]	Hővezetési tényező [W/m K]
Homok	1,45	~0,30	0,2...0,8	0,8	1,28
Pernye	0,6	~0,66	0,1...1,4	1,2	0,12
Föld	0,8	~0,35	0,1...6	0,88	0,27
Só	2,16	~0,06	0,4...4	0,86	0,25
Cement	3,15	~0,32	0,1...0,8	0,8	0,93

A porkoncentráció 0-28 g/panel (0-157 g/m²) határok között 3 g/panel léptékben került meghatározásra. A 9 g/panel 50 g/m², a 18 g/panel 100 g/m² koncentrációnak felel meg. Az 53. ábra szemlélteti a különböző porokkal szennyezett napelemet 28 g/panel koncentrációnál. Megfigyelhető, hogy a különböző fizikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok eltérő lefedettséget (árnyékhatást) okoznak [14, 89, 90, 94].

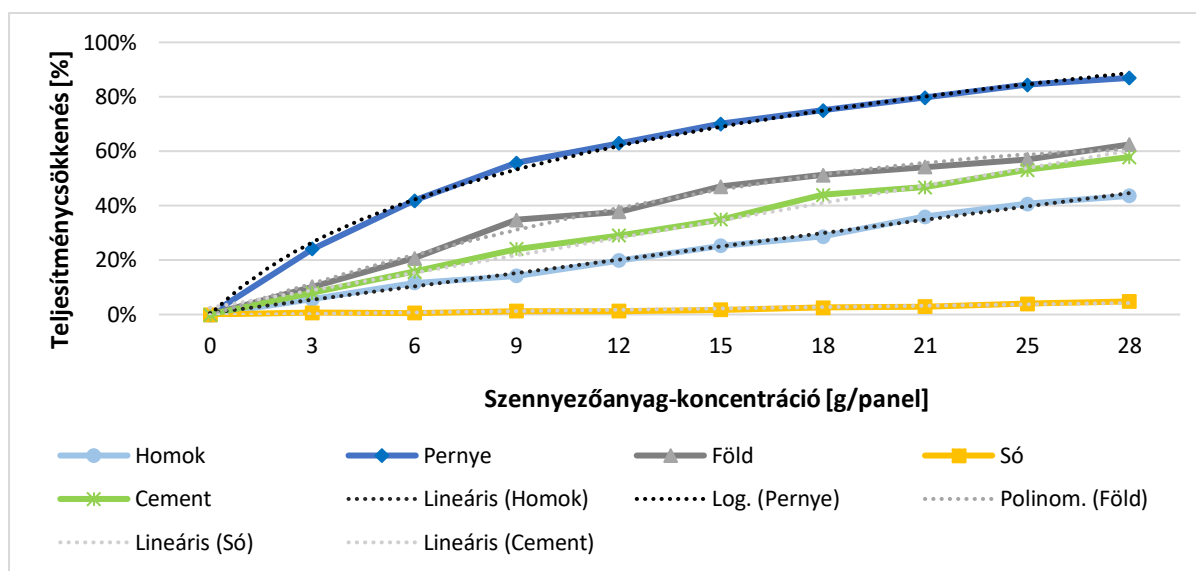
Alapfeltevés, hogy a nagyobb Blaine-féle fajlagos felülettel rendelkező szennyezőanyag nagyobb takartságot eredményez, ezáltal jelentősebb a napelem termelőkiesése. A kis sűrűségű anyagok hasonlóan hatnak. A kis hővezetési tényezővel rendelkező anyagok hőszigetelőként viselkednek, így tovább növelik a szennyezett napelem cella hőmérsékletét.

**Homok****Pernye****Föld****Só****Cement**

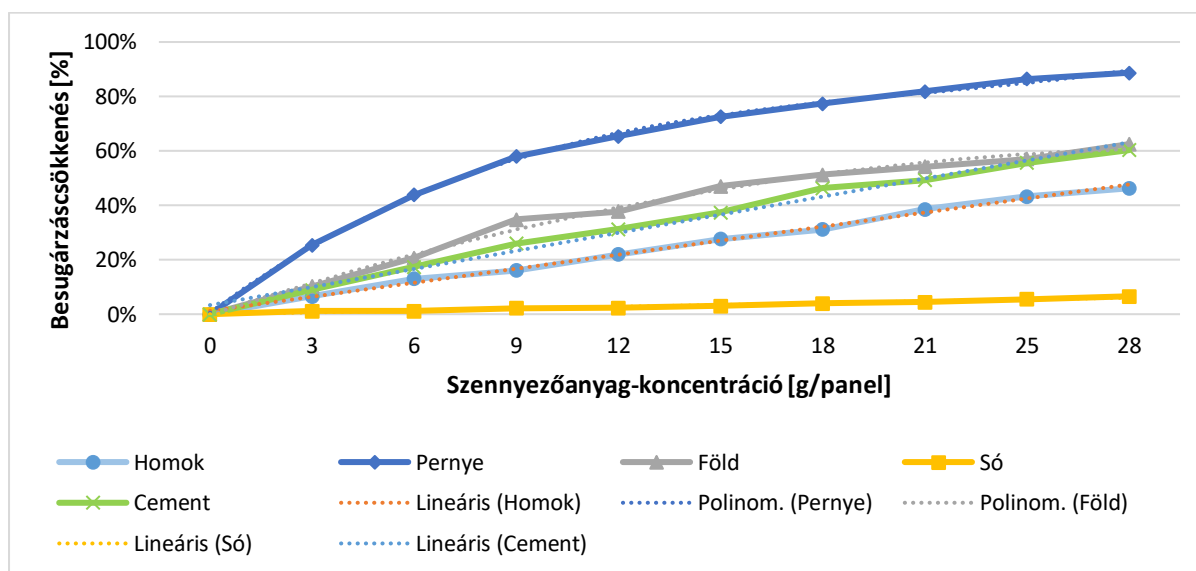
53. ábra: Különböző anyagokkal szennyezett napelemek 28 g/panel (157 g/m^2) koncentrációnál.

Az 54. ábra szemlélteti a teljesítménycsökkenést az egyes portípusok és koncentrációjuk függvényében. Megfigyelhető, hogy a szennyező anyagok jellemzően lineáris hatást gyakorolnak a teljesítménycsökkenésre. Kivételt a pernye és a föld jelent. Pernyénél a nemlinearitás okát az eredményezhette, hogy a napelem felülete már 9 g/panel (50 g/m^2) koncentrációnál elkezdett telítődni és egyes részekben a porréteg vastagsága nagyobb volt. Földnél a jelentős szemcseméreteltérésből adódó inhomogén szóródás lehet a nemlinearitás oka. A legnagyobb teljesítménycsökkenés a pernyével, a legkisebb az útszóró sóval történt mérésnél jelentkezett. 18 g/panel (100 g/m^2) koncentrációnál közel 20-szoros a különbség. Az eredmények visszavezethetők arra, hogy az útszóró só fajlagos felülete tized akkora, mint a hamunak, valamint nagyobb a fényáteresztőképessége is [93].

Az 55. ábra a besugárzás csökkenés mértékét szemlélteti. Ugyan az a tendencia figyelhető meg, mint az 54. ábránál. A teljesítménycsökkenés két részből tevődik össze. A besugárzás csökkenéséből és a porréteg okozta hőmérsékletnövekedés hatására bekövetkező feszültségesésből. Az 55. ábra alapján elmondható, hogy a koszos napelem teljesítménycsökkenésének a meghatározóbb részét a besugárzás csökkenése okozza. A besugárzás-csökkenés a fényáteresztőképességgel és a fajlagos felülettel arányos.

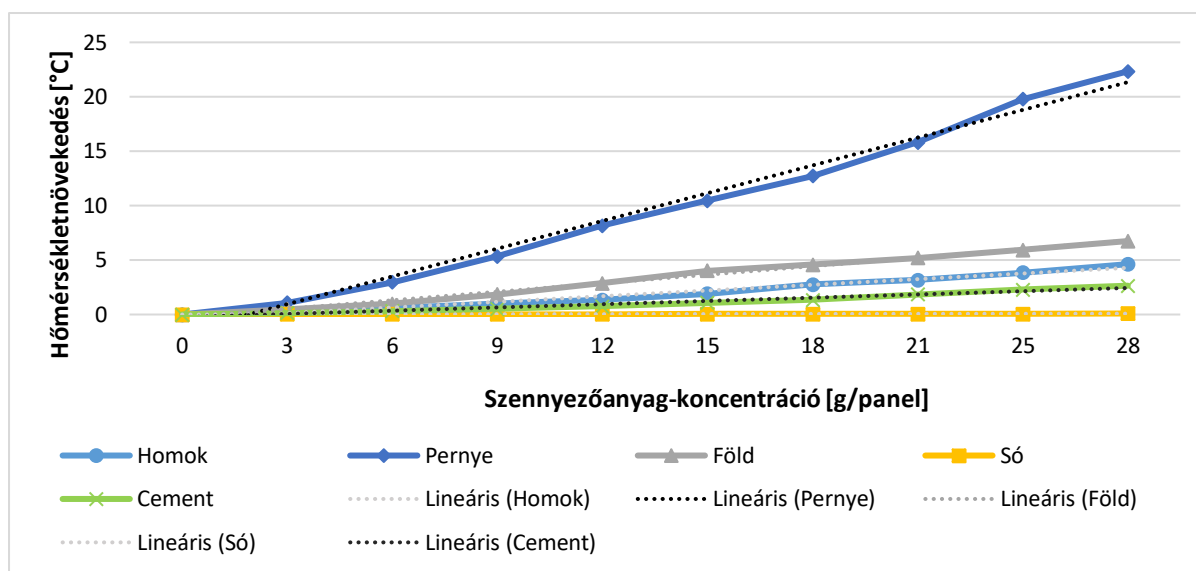


54. ábra: A napelem teljesítményének csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

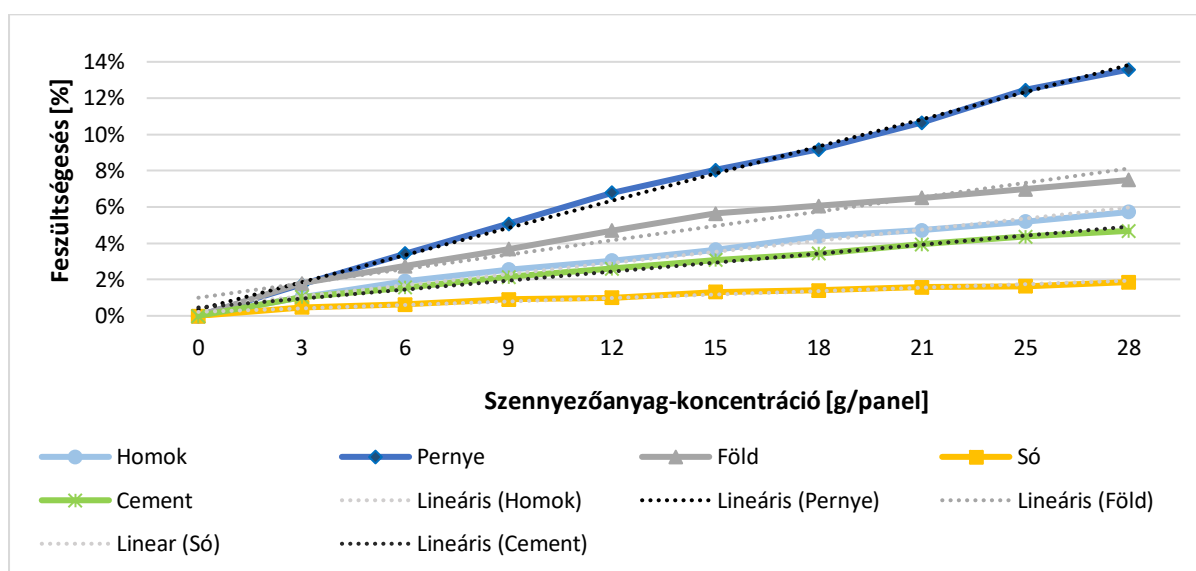


55. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

Az 56. ábra a napelem hőmérsékletnövekedését szemlélteti a szennyeződés függvényében. Megfigyelhető, hogy a hőmérsékletnövekedés oka az egyes anyagok hőszigetelőképességével és a sűrűségével áll összefüggésben. A kisebb sűrűségű anyagok azonos porkoncentráció esetében vastagabb szigetelő réteget alkotnak a napelem felületén, ezáltal jobban szigetelik azt. Mivel a napelem nem tudja megfelelő intenzitással kisugározni a Joule-hőt, ezért annak melegítő hatása érvényesül. 18 g/panel (100 g/m²) koncentráció esetében a hamuval szennyezett napelem csaknem 13 °C-al volt melegebb, mint tiszta állapotban [19]. Az útszóró sóval szennyezett napelem hőmérséklete a mérés során szinte nem változott. Mivel a feszültségesést a hőmérsékletnövekedés okozta, ezért az 57. ábrán ugyan ez a tendencia figyelhető meg.



56. ábra: A napelem felületén mérhető hőmérsékletnövekedés különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.



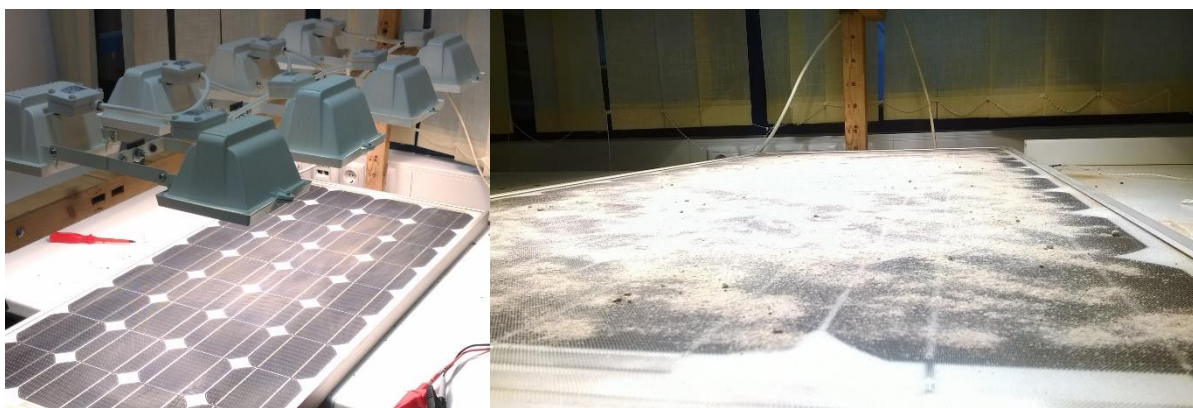
57. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

Összességében elmondható, hogy az alaphipotézis a mérések során visszaigazolódott. A nagyobb Blain-féle fajlagos felülettel rendelkező szennyezőanyagok nagyobb mértékben csökkentik a napelem teljesítményét azonos koncentráció esetében. A legkisebb fajlagos felülettel rendelkező útszóró a vizsgált koncentrációk esetében gyakorlatilag nem befolyásolja a napelem működését. A legnagyobb fajlagos felületű pernye jelentősen befolyásolja a napelem működését és ezáltal az élettartamát. A kisebb sűrűségű szennyezőanyagok vastagabb szigetelő réteget képeznek a napelemen, aminek eredményeként a napelem tovább melegszik. Hasonló eredmények figyelhetők meg Rao et al. [91] és Ndiaye et al. [93].

3.2. KÖZEPES MÉRETŰ NAPELEM PANELEN VÉGZETT SZENNYEZŐDÉSI KÍSÉRLETEK

A laboratóriumi kísérletek másik szakaszát a közepes méretű napelem panelen végeztem el. A méréseket a 2.3.1. *alfejezetben* bemutatott halogén Napszimulátor alkalmazásával végeztem el. A napelem panelt az összehasonlíthatóság érdekében szintén vízszintes helyzetben egy asztalon helyeztem el. A napelem hőmérsékletét egy 4 csatornás, *PL-125-T4* típusú digitális hőmérővel mértem. A 4 db hőmérőszenzort a panel felületén különböző pontokban helyeztem el, annak megfelelően, ahogyan azt a tranziens folyamatoknál is vizsgáltam és a 25. *ábrán* is szemléltettem. Az áramerősséget és a feszültséget egy-egy *METEX M365OD* típusú digitális multiméterrel mértem. Minden mérést állandósult üzemi állapotban és stabilizálódott hőmérsékleten végeztem. A megvilágított napelem átlaghőmérséklete hűtés nélkül elérte a 80 °C-ot. A napelem adattáblája a 8. *táblázatban* bemutatottal egyezik meg.

A vizsgált szemcsés szennyezőanyagok megegyeztek a kisméretű napelempanelnél mértekkel, tehát az adataikat a 20. *táblázat* tartalmazza. A vizsgált szemcsés anyagokon felül lágú és fás szárú növényi eredetű porok is találhatók, valamint városi szállópor. Az 58. *ábra* szemlélteti a mérési összeállítást és példa gyanánt az 50 g/panel (100 g/m²) koncentrációjú cementtel szennyezett napelemet.

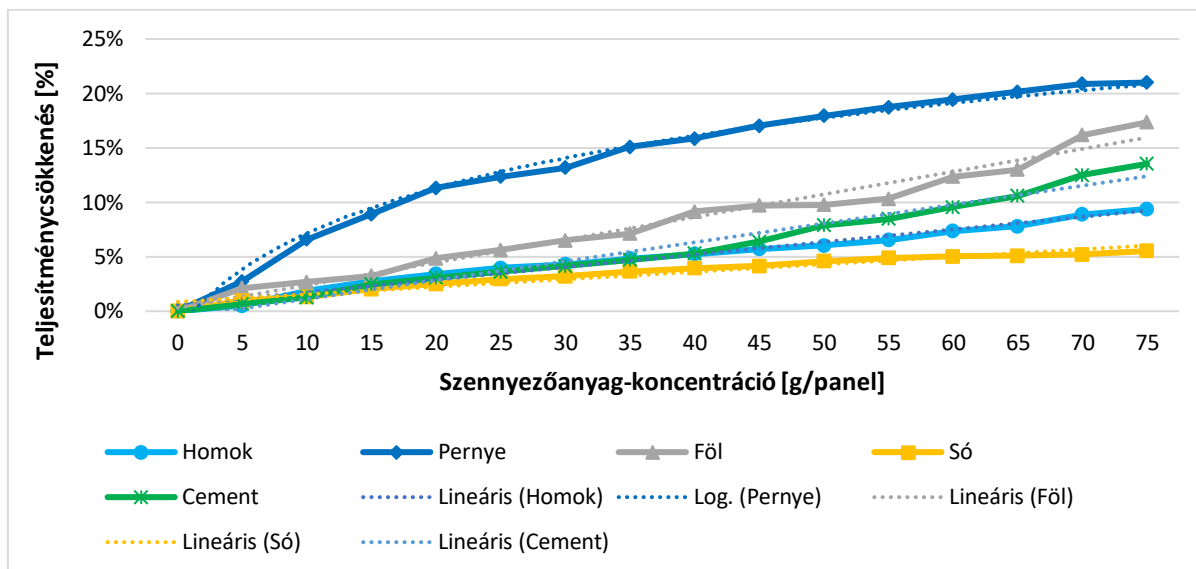


58. ábra: A mérési összeállítás, valamint a 100 g/m² koncentrációjú cementtel szennyezett napelem.

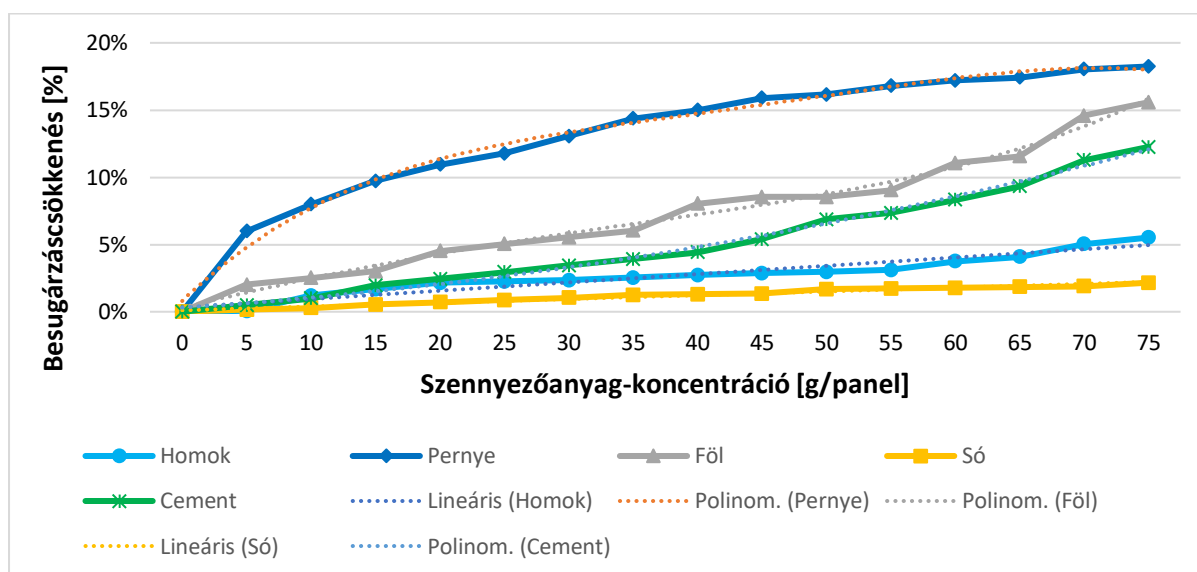
A porkoncentráció 0-75 g/panel (0-150 g/m²) határok között 5 g/panel léptékben került meghatározásra. A 25 g/panel 50 g/m², a 50 g/panel 100 g/m² koncentrációnak felel meg.

Az 59.-62. *ábrák* a közepes méretű napelemen végzett kísérletek eredményét tartalmazzák. A mérések során ugyan azon anyagok kerültek felhasználásra, mint a kis méretű napelem panel esetében. Megfigyelhető, hogy minkét napelem panelnél hasonló tendenciális jelleget mutatnak

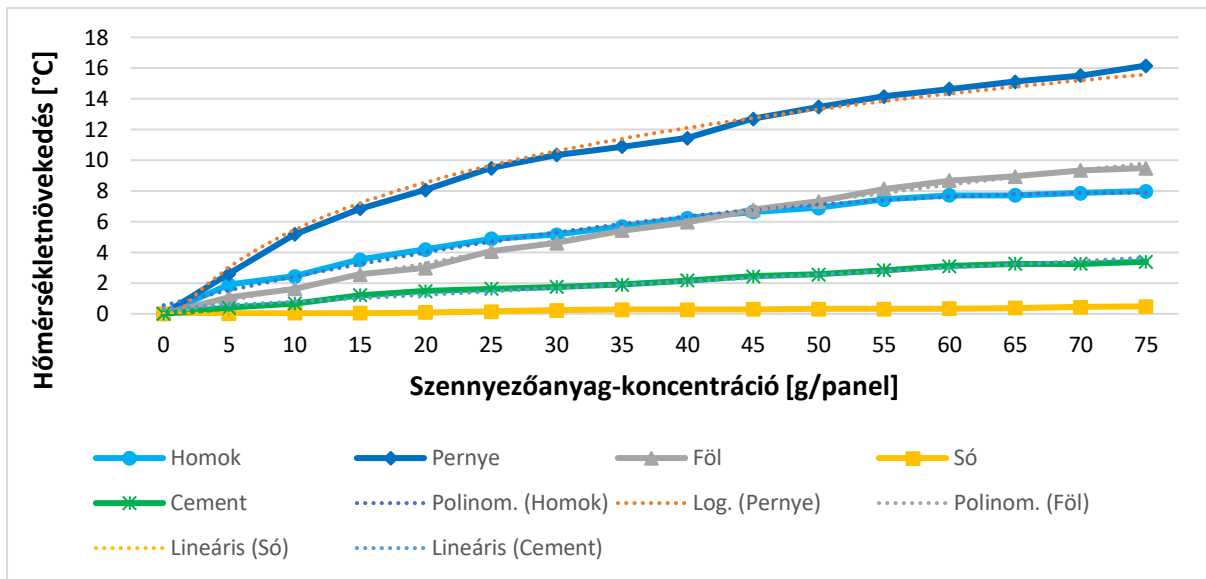
az egyes portípusok. A legnagyobb mértékű működési hatékonyságcsökkenés a pernyével, a legkisebb az útszóró sóval szennyezett napelem panelnél tapasztalható.



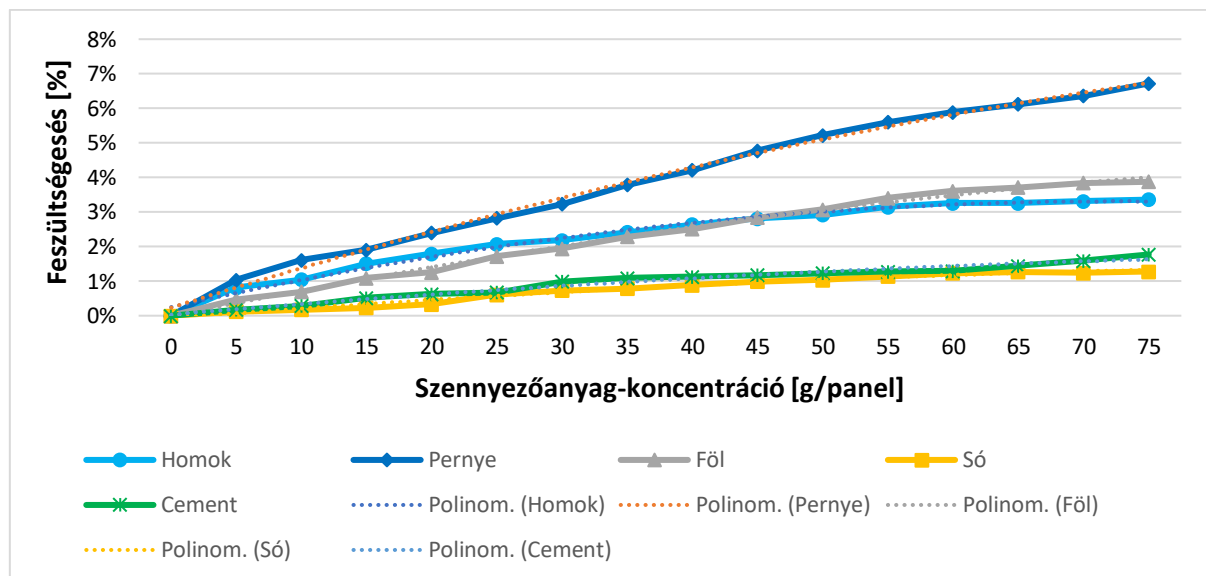
59. ábra: A napelem teljesítményének csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.



60. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

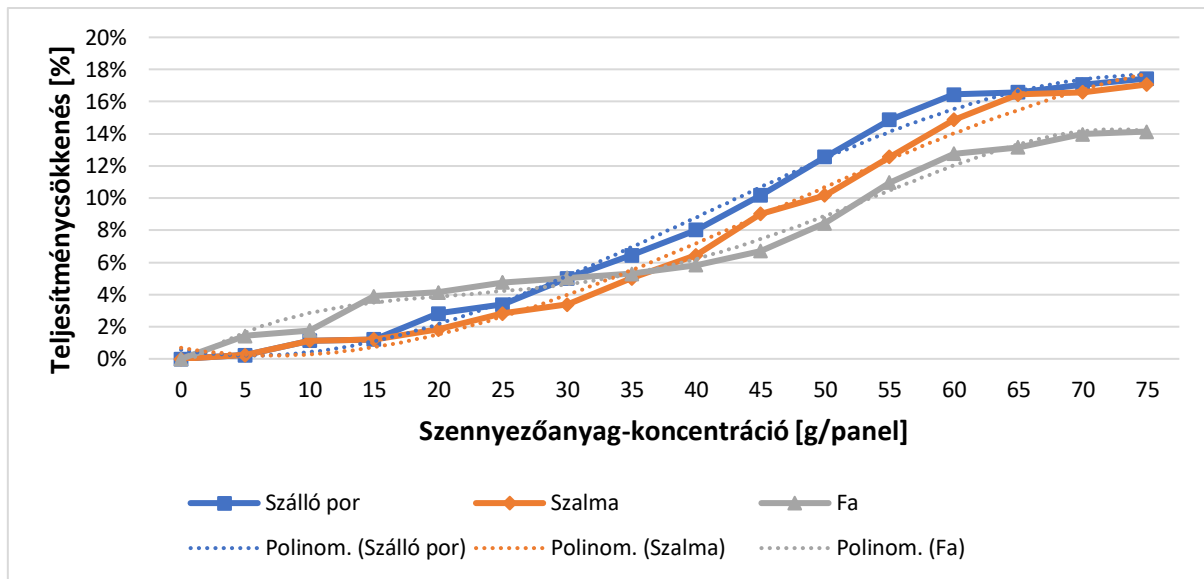


61. ábra: A napelem felületén mérhető hőmérsékletnövekedés különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

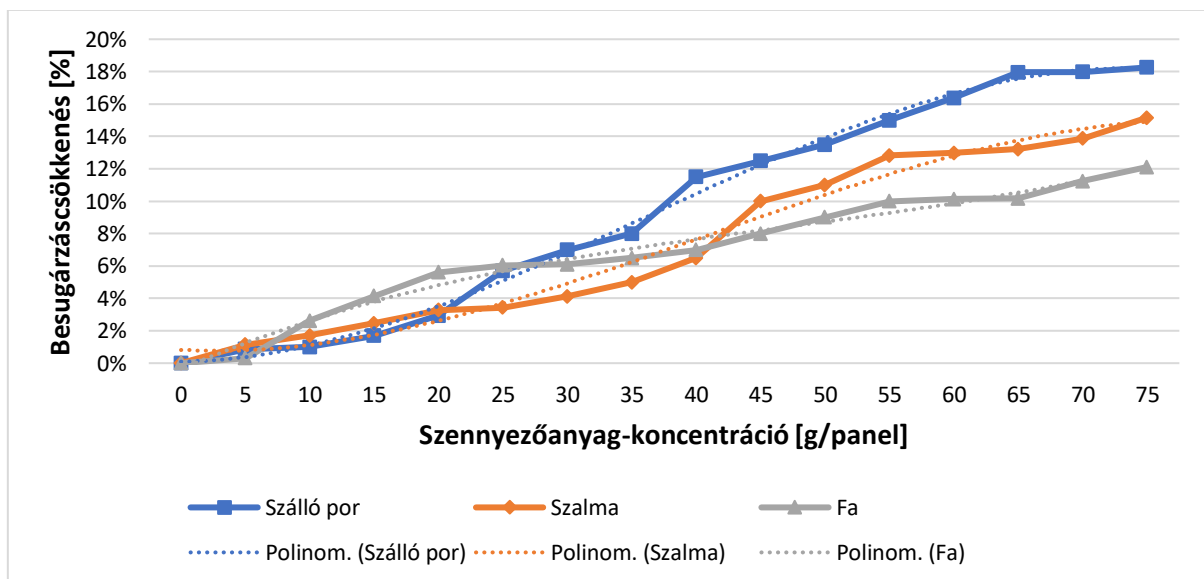


62. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

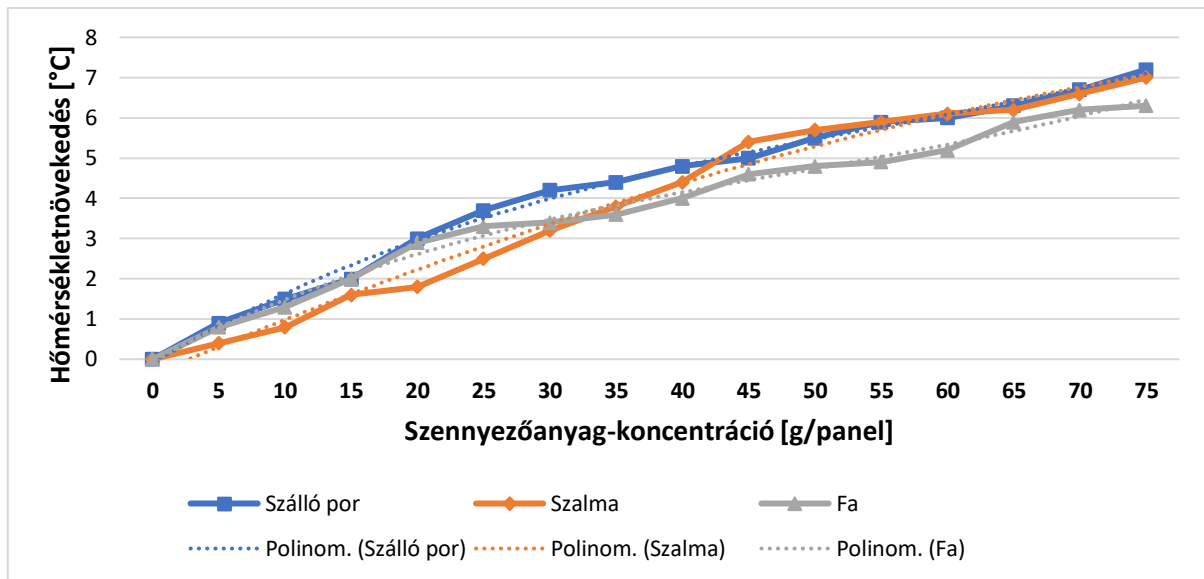
A napelemek felületén üzem közben legnagyobb valószínűséggel a levegőben szálló por rakódik le. Ritkábban növényi eredetű, szerves anyagok. A kísérleteim során megvizsgáltam a szállópor és a szalma, valamint a fa alapú porok hatását is. Minhárom vizsgált portípus 0,5 mm-nél kisebb szemcsékből állt. A 63.-66. ábrák a kapott eredményeket szemléltetik. A besugárzáscsökkenés mértékét tekintve a három különböző típusú por eredményei között nem figyelhető meg számottevő különbség.



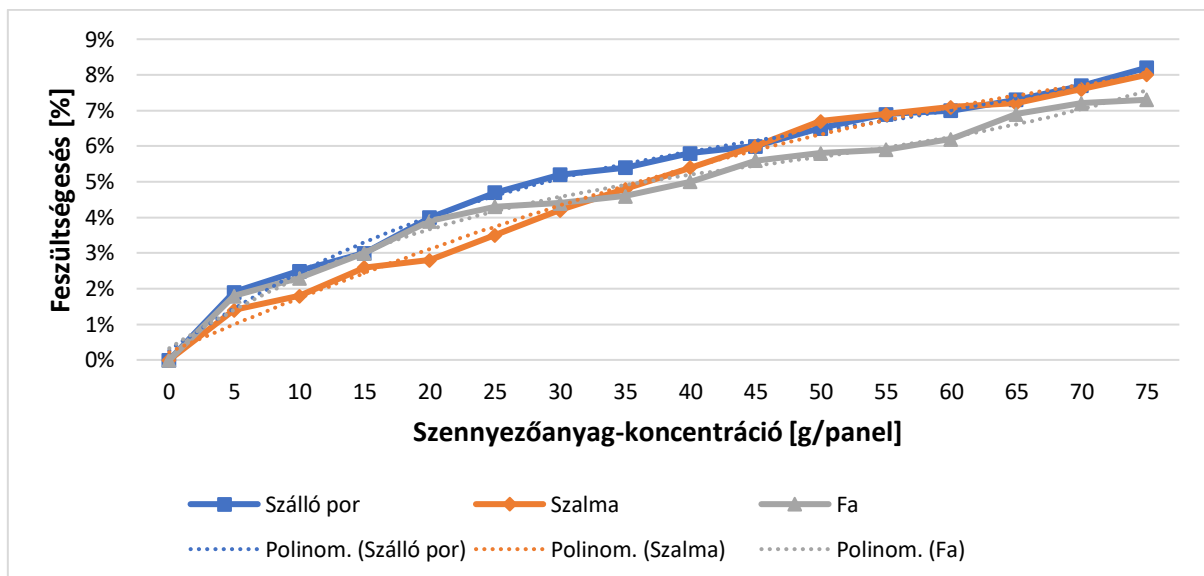
63. ábra: A napelem teljesítményének csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.



64. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.



65. ábra: A napelem felületén mérhető hőmérsékletnövekedés különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.



66. ábra: A napelem felületére jutó besugárzás csökkenése különböző típusú és koncentrációjú szennyezőanyagok esetében.

A közepes méretű napelem végzett felületi szennyeződések hatásvizsgálata során hasonló tendenciák figyelhetők meg, mint a kis méretű napelem végzett mérések során. Ezek alapján elmondható, hogy a felületen lerakódó szennyeződések hatása független a napelem méretétől. Hasonló tendenciák figyelhetők meg Abderrezek et al. [89], Bhattacharya et al. [90] és Oh et al. [95] tanulmányaiban.

4. NAPELEMEK ÁLLAPOTFELMÉRÉSE ÉS KÁROSODÁSVIZSGÁLATA

A degradáció egy alkatrész vagy egy rendszer jellemzőinek a fokozatos romlása, amely befolyásolja annak működését, hogy az elfogadhatóság határain belül működjön. A degradáció a napelemeknél a dióda jellegből adódóan egyrészt természetes alapon, másrészt a környezeti hatások révén indukált módon játszódik le. A napelem a degradációs folyamat során továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a modul problematikusvá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet. Ami a gyártók szerint akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára. Ez várhatóan 25 év alatt következik be. [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

Egy napelem teljesítménye (hatékonysága) különböző tényezők miatt romolhat, mint például: hőmérséklet, páratartalom, besugárzás mértéke vagy mechanikai behatás. Ezek különféle indukált öregedést, anyagszerkezeti átalakulást idézhetnek elő [105]. Tipikusan korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon, de nem elhanyagolható a napelemeket borító edzett üveg térfogati és/vagy felületi struktúrájának a megváltozása sem. A napelemek degradációját szimulációs modellezéssel próbálják megjósolni, amelyek első sorban anyagtechnológiai modelleket alkalmaznak. A teljesítménycsökkenési arány akár 0,6%-5%/év is lehet, de a szimulációs értékek nem feltétlen a legpontosabbak ugyanis a degradáció mértéke nemcsak a környezeti feltételektől, hanem az alkalmazott napelemtechnológiáktól is függ [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

Az amorf és a vékonyrétegű napelem jelentősen nagyobb lebomlási sebességgel rendelkezik, mint egy polikristályos szilícium modul. Az a tény, hogy a PV modulok degradációs foka lineáris hosszú távú működés során ma már széles körben elfogadott, de a működés megkezdésének első néhány évében ez az arány eltér ettől a linearitástól. Ezt a jelenséget több napelemes modulra megvizsgálták. A legszembetűnőbb eredmény, hogy az első évben az amorf szilícium 13,8%-kal, míg a kristályos szilícium rendszerek 7,9-9%-kal szolgáltatnak kisebb teljesítményt [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

A napelemek tönkremenetelének időbeni lefutását a gyártók jellemzően két értékpárral adják meg. A napelemek első 10 évében 90%-os, az azt követő 15 évben pedig 80%-os teljesítménygaranciát adnak. A valóságban az üzemeltetés és karbantartás jellegétől ezen értékek jelentősen eltérhetnek. A gyakorlatban a napelemek hőmérséklete a leggyakoribb degradációs ok. A napelemeknek is van hőtehetetlensége, így a változó megvilágítások során ún. hőmérsékleti tranziens folyamatok játszódnak le. Ezek a folyamatok egyfajta hőkezelési

ciklusnak tekinthetők, amely folyamat során indukált degradáció alakul ki. Egy panel részleges árnyékba kerülése vagy megnövekedett degradációja hőmérsékletkülönbséget hoz létre a napelempanelen, ami tovább fokozza a teljes panel tönkremenetelét. E hatások lényegében gyorsító paraméterként tekinthetők, így a napelemek gyártó által garantált használati időhöz képest hamarabbi tönkremenetelét eredményezik. Ezen indukált tönkremenetel mikrorepedések megjelenésével, a korábbi mikrorepedések kiszélesedésével, cellarész-leválásával járhat [129].

A leggyakoribb degradációs hibák [129, 130, 131, 132, 133]:

- rétegenkénti leválás,
- korrózió,
- elszíneződés,
- árnyékolás,
- mikro- és ujjnyi méretű repedések,
- PID.

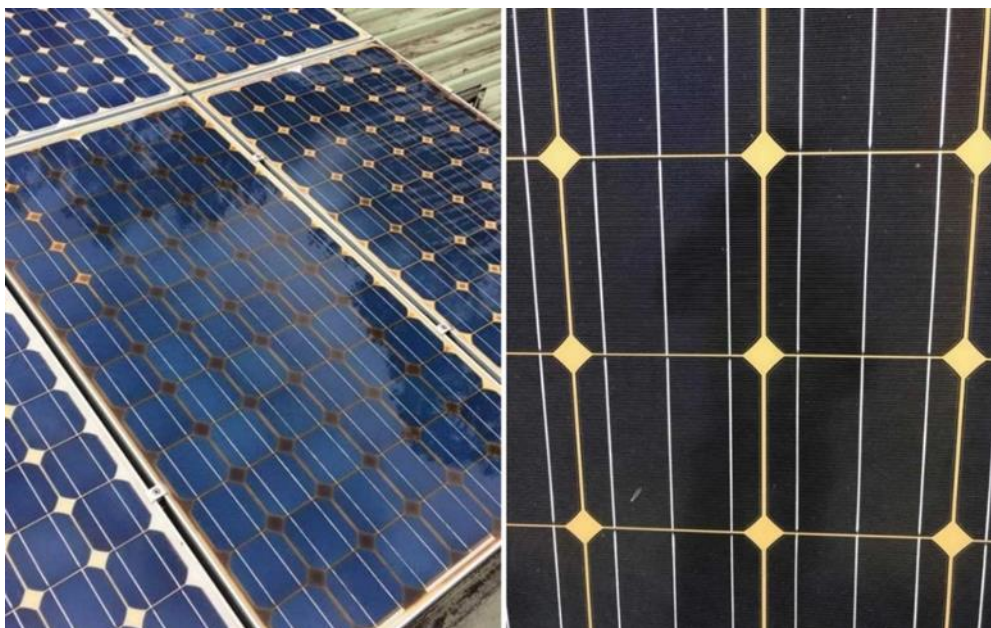
Delaminációnak, vagy rétegenkénti leválásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a tapadásvesztés a cellák között vagy a cella és az elülső üveg között következik be (67. ábra). Ez a jelenség két komoly problémát is kivált, ugyanis növeli a fényvisszaverődést és víz behatolásának esélyét a modul szerkezetébe. A rétegeltávolodás akkor a legsúlyosabb amikor a modul szélein fordul elő ugyanis nemcsak teljesítmény romlást okoz, de elektromos kockázatot is jelent. Ez a leválás meleg és nedves környezeti feltételek mellett a leggyakoribb. Mérések követően azt állítják, hogy a delaminálódást a só felhalmozódása és a nedvesség behatolása okozhatja a modulokban [129, 130, 131, 132, 133].

A nedvesség, amely a modulba a laminált szélein bejut korróziót okoz. A megnövekedett nedvesség növeli az anyag elektromos vezetőképességét. A korrózió megtámadja a cellák fémes csatlakozásait, és a szivárgási áramok növekedése miatt teljesítményvesztés lép fel. Károsítja a cellák és a fémkeret közötti tapadást. Egy kutatás vizsgálta a cellák lebomlását egy adott páratartalom és hőmérséklet esetén. Tesztet végeztek 85 °C és 85%-os páratartalom mellett. A teszt kiértékelése után megállapították, hogy a korrózió 1.000 óra után jelentkezett. Bizonyos modulokon végzett tesztek után kimutatták, hogy az üvegben lévő nátrium a nedvességre reagál és ez a modulok széleinek korróziójának fő tényezője. A nedvesség behatolásának megakadályozása a megfelelő tömítés, alacsony diffuzivitású, nagy mennyiségű szárítószert tartalmazó tömítések használatával [129, 130, 131, 132, 133].



67. ábra: A delamináció, vagy rétegleválás jelensége napelemeken.

Az elszíneződés, másnéven opálosodás általában az EVA (etilén-vinil-acetát) ragasztóanyag bomlása okozza az üveg és a cellák között (68. ábra). Az elszíneződés a cella színváltozása, amely sárga vagy néha barna színként jelenik meg. Ez a jelenség módosítja a cellákba jutó fény áteresztőképességét, ezért csökken a modul által generált energia. Kutatások szerint az EVA lebomlásának fő okai az UV sugarak. Az elszíneződés a napelem különböző pontjain is felléphet ennek oka, a különböző karakterisztikájú polimerek. Ezek vizsgálatára mesterséges sugárzást használtak, ahol csak az UV sugarak hozzájárulást vizsgálták 280 nm és 380 nm között. Amikor 4.000 W/m^2 volt a sugárzás akkor a moduloknak a degradációja felgyorsult és 400 óra után fényérzékenység és áteresztőképesség is növekedett. Ennek oka az UV abszorber nyomása, amelynek meg kell védenie a cellákat a fotodegradációtól. Ezeken felül a cellák sárgulni kezdtek, ami teljesítmény csökkenést is okozott. Azonban 1.000 W/m^2 sugárzásnál nem történt változás. További UV tesztek végeztek a paneleken 60°C hőmérséklet mellett és azt állapították meg, hogy elszíneződés csak akkor következik be, amikor a globális UV sugárzás eléri a 15 kWh/m^2 anélkül, hogy meghaladná a 250 W/m^2 expozíciót. Az elszíneződés hatással van a rövidzárlati áramra. A degradáció az elszíneződés mértékében lehet akár 6-8%-ig, illetve akár 10-13%-ig is terjedhet. A panel maximális teljesítményére is negatív hatással van az elszíneződés [129, 130, 131, 132, 133].

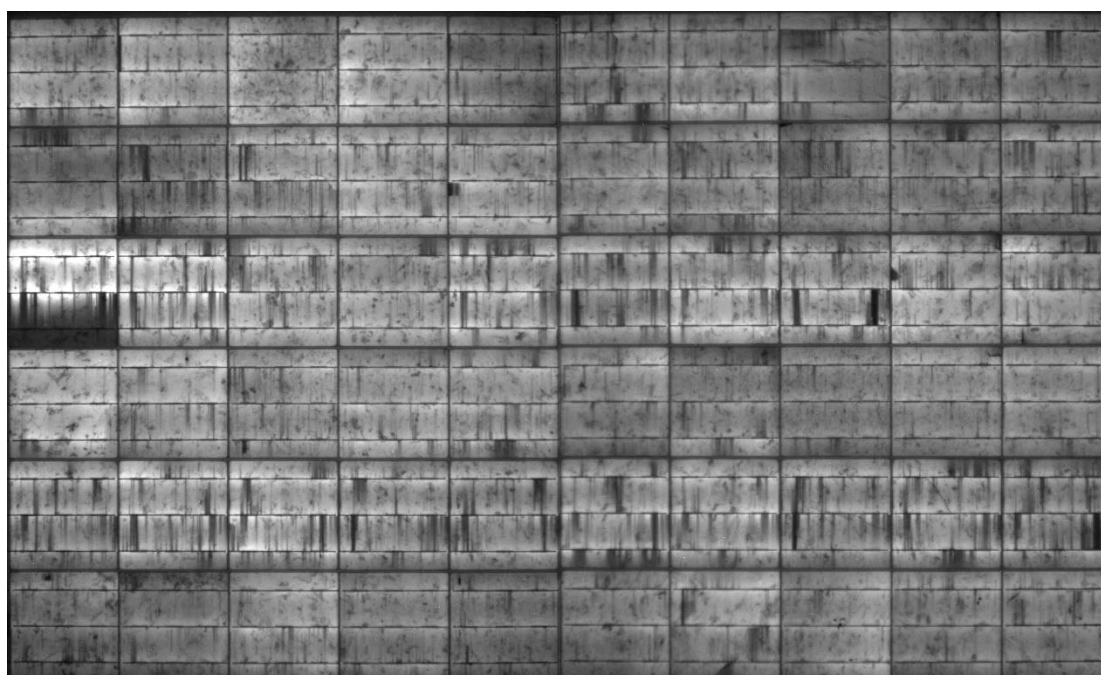


68. ábra: *A napelemek elszíneződése.*

A napelemek részleges árnyékolása nagyobb problémát jelent, ugyanis túlmelegedést és gyorsan bekövetkező meghibásodást is okozhat, ami kihat az egész modul működésére. Egy kutatás különböző típusú fotovoltaiikus panelekre vizsgálta a részleges árnyékolást, különböző mértékű és helyzetű árnyakkal a modul hosszanti és kereszt irányba. Arra a következtetésre jutottak, hogy az árnyék növekedésével a kimeneti teljesítmény csökken a különböző anyagú és szerkezetű napelemek esetén. Általánosságban elmondható, hogy a keresztirányú árnyékolás a modulon nagyobb teljesítménycsökkenést okozott. A kutatás eredményeként arra jutottak, hogy a vékonyrétegű modulok jobban tolerálták a részleges árnyékolást, mint egy monokristályos napelem. Az ilyen árnyékolásban az amorf szilíciumú napelem teljesített a legjobban, ezt követte a Kadmium-tellurid napelem. Ezért érdemes a napelemek úgy telepíteni, hogy ne legyen rájuk hatással semmilyen árnyékoló objektum vagy ha ez nem megvalósítható akkor az árnyékolás hosszanti irányban történjen, hogy minimalizálva legyen a teljesítmény veszteség [129, 130, 131, 132, 133].

A repedések valódi problémát jelentenek a fotovoltaiikus modulok számára. Az újtípusú modulokon viszonylag alacsony befolyása van a repedéseknek mindaddig amíg a cellák elektromos kapcsolatban maradnak. De, ahogy a napelem „előregszik”, hő, illetve mechanikai hatásoknak van kitéve repedések keletkezhetnek. Különböző repedésirányok nagyon eltérő hatást gyakorolhatnak a modulok teljesítményére, akár egy repedés is a cella megfelelő részén jelentősen csökkentheti a teljesítményt. A mikrorepedések akár 3-4%-os teljesítményvesztést is eredményezhetnek, ami jelentős gazdasági veszteséget is okozhat [132, 133].

A repedések orientációja nagy szerepet játszik, hogy mekkora lesz ez a teljesítményromlás. Legjelentősebb egy függőleges vagy több irányú repedés. Felmérések alapján a repedések 6%-a gyártás és a szállítás folyamán keletkezik ezért is fontos a telepítés előtti ellenőrzés és jóváhagyás, hogy mekkora a súlyossága az esetleges repedés vagy repedéseknek. Repedés akár teljes elválasztást is eredményezhet, ami inaktív cellát fog maga után vonni. Egyes típusú repedések akár növekedhetnek is alakjuk és elhelyezkedésük szerint. Ennek többféle oka is lehet akár szállítás közbeni sérülés, környezeti terhelés, nem megfelelő telepítés. A repedések feltárásának egyik módszere az elektrolumineszcens vizsgálat. A 69. ábra egy napelem elektrolumineszcens felvételét mutatja, amin szabadszemmel is jól láthatók a repedések, cellatörések [129, 130, 131, 132, 133].



69. ábra: Egy napelem elektrolumineszcens felvétele.

A napelemes rendszer egyes moduljai leggyakrabban sorba vannak kapcsolva a rendszer feszültségének a növelése érdekében. Ennek következtében a potenciál különbség időként akár több száz volt is lehet. Ezért a védelem érdekében minden fém szerkezetet leföldelnek. A potenciál különbség miatt lehetséges, hogy a napelemes modulokhoz használt anyagokból a földelt kereteken keresztül elektronok szivárognak amikor a szerkezet és az aktív réteg kapcsolata nem tökéletes és ekkor szivárgási áram jön létre. Ez a jelenség ronthatja a cellák villamos jellemzőit. Ezt nevezzük PID-nek (Potential Induced Degradation), azaz feszültség indukálta lebomlásnak (teljesítmény fokozatos romlása a kristályos szilícium modulok esetén). Kutatások kimutatták, hogy ez a jelenség a nedves éghajlaton sokkal nagyobb valószínűséggel fordul elő. Illetve a szivárgási áram nagysága a növekvő páratartalom hatására nő [130, 131].

4.1. TERMOVÍZIÓS ÁLLAPOTFELMÉRÉS – FORRÓ PONTOK FELTÁRÁSA

Az állapotfelmérésre számos módszer terjedt el az „in-situ” és az „ex-situ” módszereket ideértve [106, 107, 108]. A napelemek úgynevezett in-situ, azaz helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérésének egyik lehetséges módszere a hőkamerás felvételekkel történő hibaazonosítás. Az elv azon alapul, hogy a felületi sérülések, árnyékhatások és kiégések okozta tönkremeneteli pontokon, zónákban a napelem érintkezési, átmeneti, vagy állandósult ellenállása nagyobb, mint az ép celláké, pontoké, felületeké. A nagyobb ellenálláson az átfolyó áramok hatására felszabaduló Joule hő tovább melegíti a hibás (sérül, vagy szennyezett) cellákat, így a napelempanelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

A gyártási hibák rendszerint mikorepedésként jelentkeznek, amely a forrasztási helyeken alakulnak ki és csak a hőhatásövezetben, kis hatótávon okoznak átmeneti ellenállást, így a túlmelegedés is csak lokális, azaz egy cellán belül is változó a hőmérsékleteloszlás. Az árnyékhatás rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérsékletdifferenciát okoz. Az árnyékhatás származhat telepítési és üzemeltetési problémákból [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

Egy napelempanelen belül még teljesen ép (gyári) állapotban is előfordulhat 15 °C hőmérsékletkülönbség. Ezt számos tényező befolyásolja, mint például a telepítés jellege, a jellemző széljárás, annak eloszlása. Ennél nagyobb hőmérsékletkülönbség csak akkor jöhet létre, ha a panelen belül gyártási, telepítési, vagy üzemeltetési hibák miatt károsodott cellák találhatók [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 111, 112].

A 70. a ábrán nagy kiterjedésű, közel egyenletes eloszlású (madárürülék) szennyezettség figyelhető meg, valamint a kis intenzitású esőzés miatti kosz-megfolyás. A legnagyobb szennyezettségi ponton lévő cella kiégett. A 70. b ábrán növényzet okozta árnyékhatás miatti cella túlmelegedés és kiégés figyelhető meg.

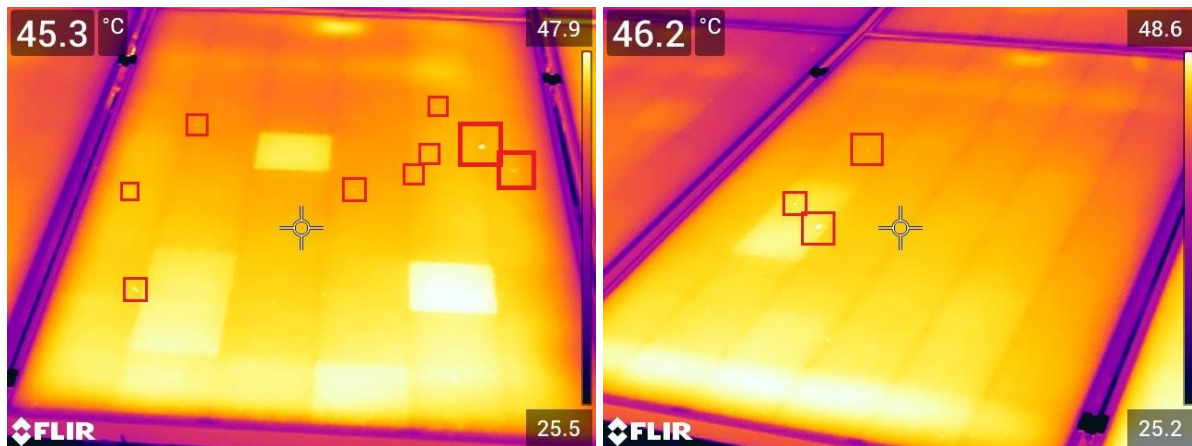
A 71. ábrán a piros négyszögekkel jelölt részeken apró meleg pontok figyelhetők meg. Külső sérülés hiányában, ezek a pontok valószínűleg gyártásból adódnak. A kisméretű repedések idővel nagyobbodhatnak és ezzel az egész cellát tönkre tehetik.

A kis forró pontok több problémát is okozhatnak. A napelem már kisebb hőmérsékleten is képes delaminálódni. A nagy hőmérséklet, az anyagban lévő szennyező anyagokat megolvasztja, ezek diffundálnak és így egy rövidzárt hoznak létre, amin a nagy áram még

nagyobb hőt hoz létre és így képes megolvasztani a szilíciumot. A megolvadt félvezető képes kilyukasztani a napelem hátsó részét és így tüzet is okozni.



70. ábra: Napelempanelekről készült hőkamerás felvételek, koszhatás (a) és növényzet okozta árnyékhatás (b) következményeinek detektálására vonatkozóan.

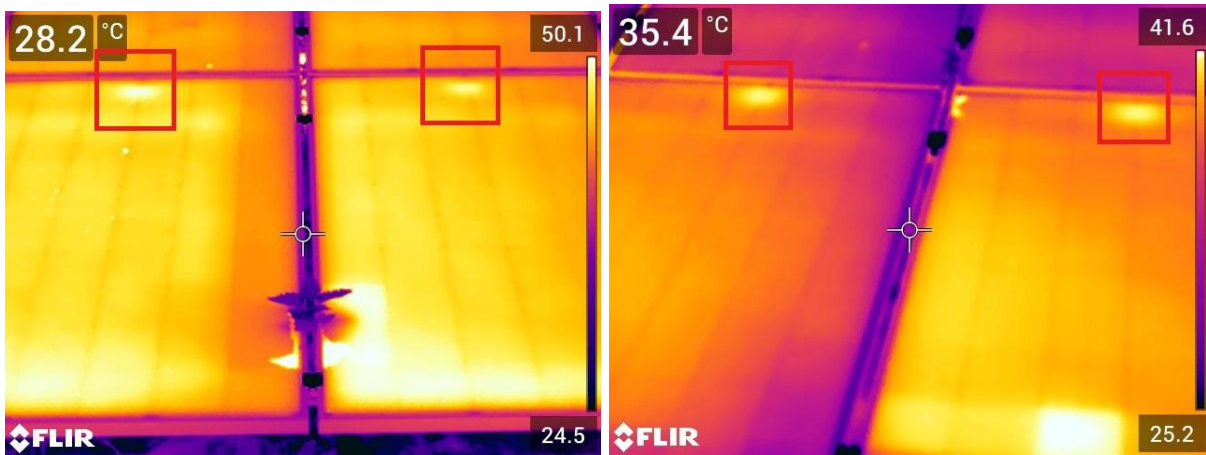


71. ábra: Mikrorepedések melegedése.

A gyártó a napelem hátuljára rögzíti a vízhatlan csatlakozó dobozt. Ez tartalmazza a bypass diódákat, és a celláktól érkező energia kivezetésére innen két speciális csatlakozó ad lehetőséget. A napelemek csatlakozó dobozában hő keletkezik, ez a csatlakozási veszteségnek köszönhető, amely szinte minden villamosan aktív részen fennál. A bypass diódák meghibásodása ezen is felül, hőt generálhat. A csatlakozó doboz hőmérséklete eltér a napelem átlag hőmérsékletétől, ez jól látható a 72. ábrán. A képeken piros négyzettel jelölve.

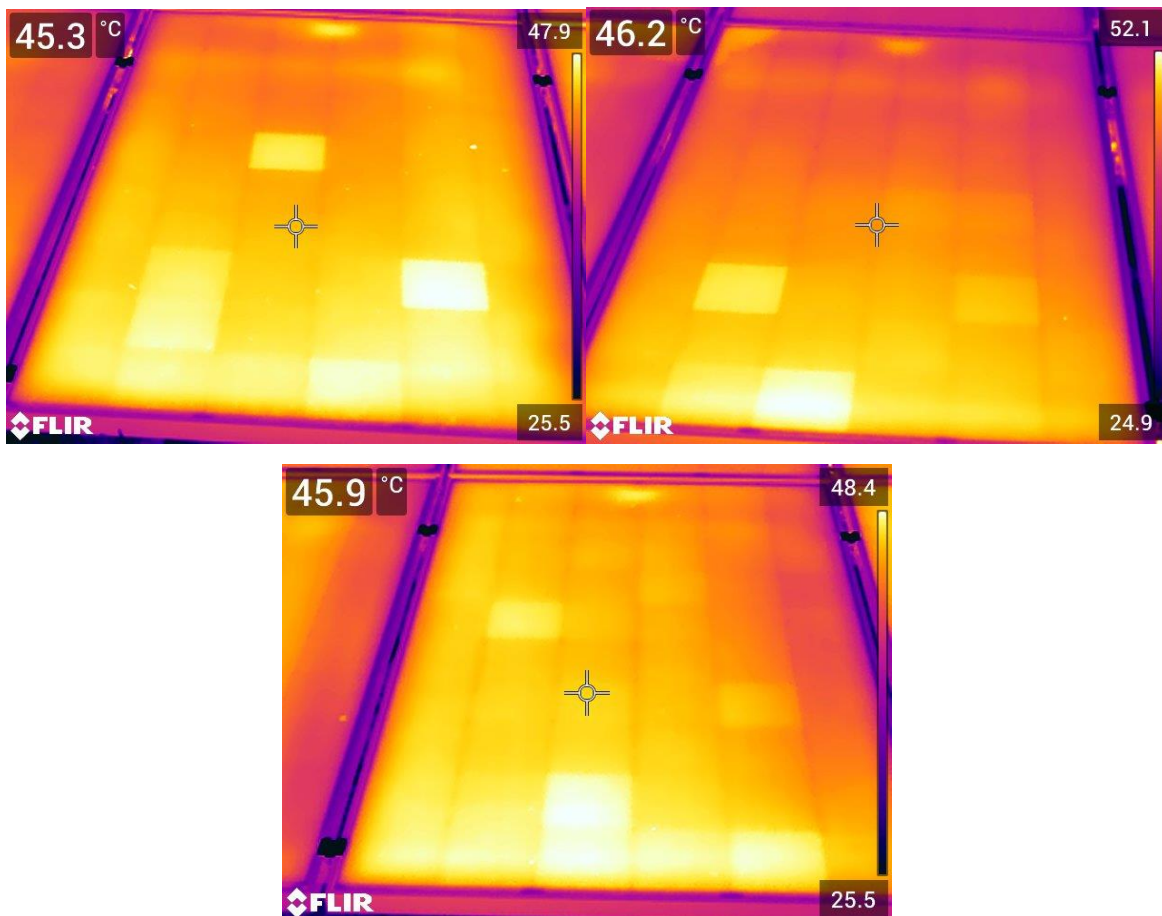
A melegedés megemeli a felette elhelyezkedő cellák hőmérsékletét, ami feszültség különbséget idéz elő a cellákon a többihez képest. Ez megegyező hatás a cella részleges letakarásával, ami teljesítmény csökkenést okoz a kimeneten.

Hosszútávon a cella átlagosan megemelkedett hőmérsékletű működése lassú, fokozatos öregedéshez és meghibásodáshoz vezet, állandó hozam csökkenéssel.



72. ábra: Csatlakozó dobozok melegedése.

A 73. ábra három képet mutat, mindegyike külön napelemről készült, de egyszerűen megfigyelhető rajtuk, a hasonlóság. Mind három képen látható, hogy több cella felmelegedett az átlag panel hőmérséklet felé, és ezek elszórva helyezkednek el. Mivel szabadszemmel külső befolyásoló tényező nincs, így arra lehet következtetni, hogy a cellák eltérő paraméterűek a gyártásból adódóan, és emiatt a nagyobb mértékű disszipáció lép fel ezeken a cellákon.

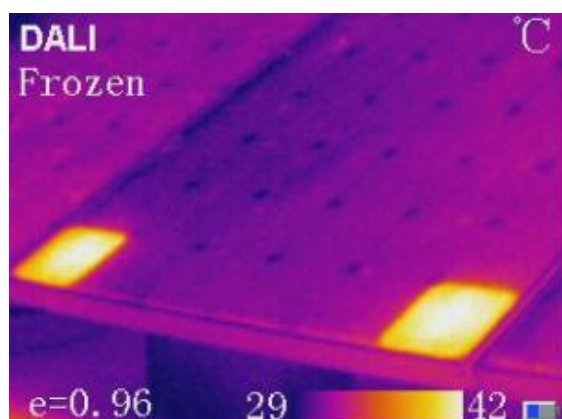


73. ábra: Eltérő cellák melegedése.

A panelek átlaghőmérsékletei ($45,3^{\circ}\text{C}/46,2^{\circ}\text{C}/45,9^{\circ}\text{C}$). A legmelegebb pont mind közül ($52,1^{\circ}\text{C}$), ez a cella $5,9^{\circ}\text{C}$ -al melegebb a többihez képest. A szórt elhelyezkedés miatt mindegyik cellafűző teljesítményét befolyásolják a melegedő cellák, ezáltal a modul összteljesítményét is.

A napelemek felületére számos szennyeződés lerakódhat a környezetüktől függően, vagy függetlenül. A szél például mindenhol egy olyan tényező, amely számos anyagot szállíthat a levegőben, por, homok stb. Emellett a közvetlen környezet hatása is nagyban befolyásoló lehet. Ilyen szennyeződés lehet a gyártelepek kibocsátása, építkezések pora, mezőgazdasági műveletek, közlekedés hatása, stb.

A felületet egységesen betérítő szennyeződések gátolják a sugárzás hasznosulását, és ez által redukálják a rendszer hatékonyságot. A felület dőlése miatt az esőzés mossza, és lefelé szállítja a lerakódott szennyeződést. Ez foltokat okozhat, melyek árnyékoló hatással bírnak és a korábban említett forró pont keletkezhet miattuk. A mosó hatás következtében a panel alsó részén, a keret mentén és a sarkokban koncentrálódhat a teljes felületről érkező szenny, és emiatt a letakarás szintén melegedést okozhat, ez figyelhető meg a 74. ábrán.



74. ábra: Sarok cellák melegedése [19].

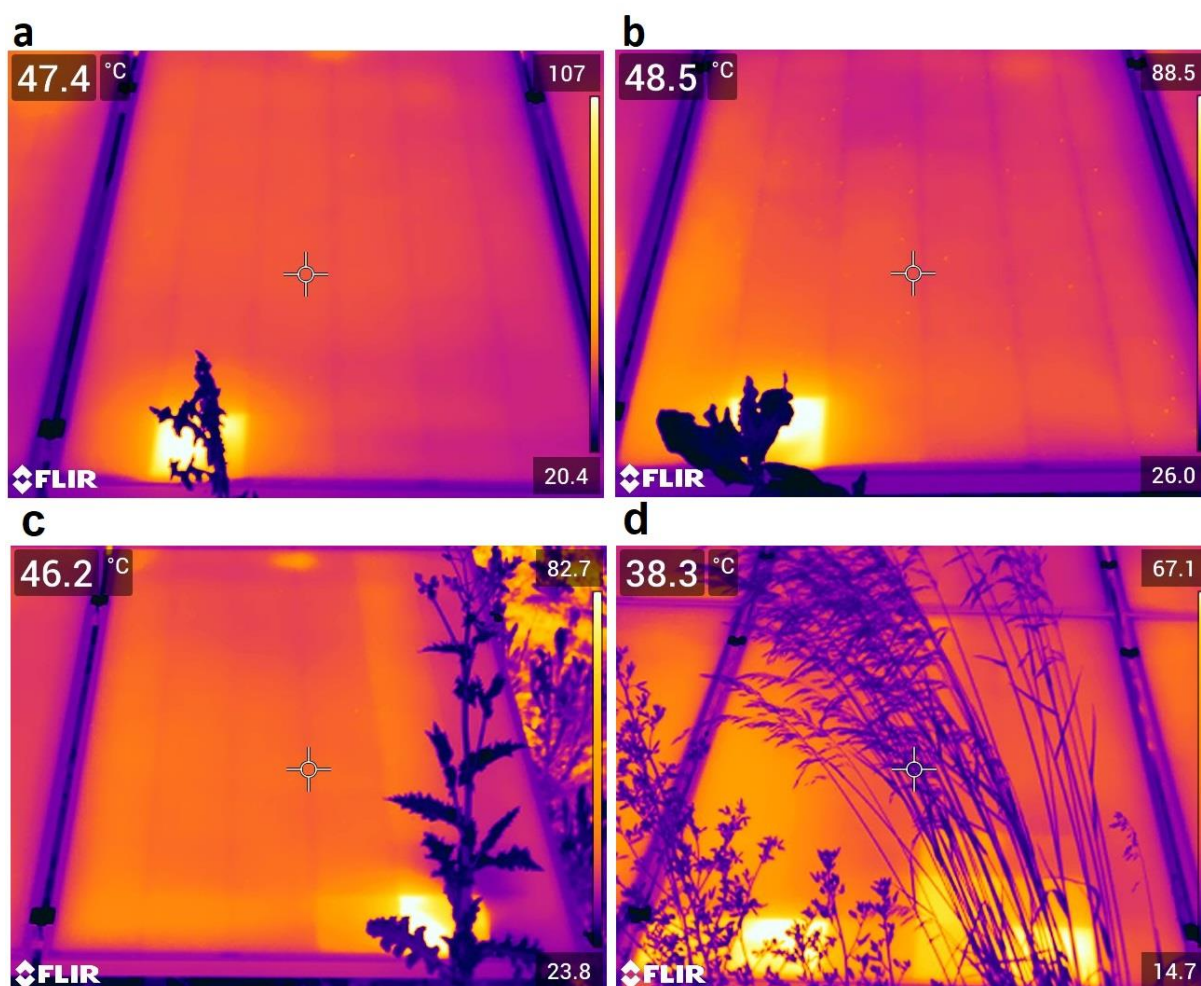
A következőkben olyan esetet szeretnék ismertetni, amelyek gyakran előfordulnak földfelszíni telepítésű napelemes parkok, rendszerek esetében. Ebben a részben a modulon túlmagasodó növényzet, árnyékoló hatását fejtem ki, ami a képeken is látszik.

Az árnyék sokféle lehet, annak kiterjedtsége, formája, állandósága alapján. Mind más-más hatással van ezek függvényében az energiatermelésre és a napelem hosszútávú károsodására.

A földfelszíni telepítésű rendszereknél fordul elő, hogy az aljnövényzet megnő a napelem aljánál magasabbra, és így árnyékot vet a felületére. A földi telepítés tartószerkezetén általában 2-4 sorban helyezkednek el a modulok. Leggyakrabban az alsó sorban lép fel ez a probléma, de

gyakran olyannyira felmagasodnak a növények, hogy a panelek közül kibújva a felső sorban lévő modulokat is árnyékolják.

A 75. ábra felvételein lévő napelemek mind az alsó sorban helyezkednek el. A felületükön egyéb szennyeződés, hiba, és eltérő melegedés a vizsgálatokon kívül nem látható. A panelek átlaghőmérséklete közel azonos, (47,4 / 48,5 / 46,2 °C / 38,3°C). Az egyik legrosszabb eset, amikor a keletkezett árnyék csak egy cellát takar, mert ekkor itt koncentrálódik az összes többi ép cella energiája hő formájában. Ez három képen látható (a, b, c). A legmagasabb hőmérséklet a képeken a hőskála legnagyobb értéke, ezek az árnyékolt cellák alapján (107/ 88,5/ 82,7°C). Ezek a cellák olyannyira drasztikusan felmelegedtek, hogy szinte biztosra vehető a teljes károsodásuk és ezzel a funkciójuk vesztese.



75. ábra: Növényzet árnyékoló hatásának következménye.

Az utolsó képen látható (d), hogy a nagyon magasra nőtt növényzet a panel alját teljesen árnyékolja. Feltételezhető, hogy a legnagyobb hőmérséklet ($67,1^{\circ}\text{C}$), azért alacsonyabb az előzőekhez képest, mert itt több cellát érint a melegedés, ezek megnövekedett ellenállásain arányosan alakul hővé az ép cellák (lecsökkent) energiája. Látható, hogy mind három cellafüzért érinti a melegedés, ami a bypass diódák működése esetén teljes modul kapcsolását áthidalja, így kimaradva a termelésből. Ezen felül amennyiben az árnyékoló hatás nem szűnik meg, idővel a melegedő cellák tovább károsíthatják magukat és a körülöttük lévőket, élettartamuk csökken, a teljes panel tönkremegy.

Az eddigiek alapján, az árnyékoló növényzet súlyos hatással van a napelemek működésére és élettartamára. Ez egy gyakori probléma földfelszíni telepítésű rendszereknél, amit csak rendszeres ellenőrzéssel és a talaj megfelelő gyomtalanításával lehet megelőzni.

Összességében tehát elmondható, hogy hőkamerás vizsgálatokkal kimutathatók az úgynevezett forró pontok (Hot-Spot), valamint a napelem modul teljes felületére vonatkoztatott hőmérsékleteloszlás, amely a hibadetektálás első lépése.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az árnyékhatások által okozott napelem-meghibásodás esetén garanciális cserére nem számíthatunk, mert a meghibásodás nem gyártói, hanem üzemeltetői hiba következménye. Javasolt tehát egyrészt még a telepítéskor, megfelelő 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.

Hőkamerás vizsgálatokkal a hiba megléte ugyan detektálható, azonban annak típusa és közvetlen hatása a napelem villamos paramétereire és tulajdonságaira nem egyértelműen definiálhatók, ezért további mérések végzése szükséges. Ezen mérések az ún. „ex-situ” módszerek, amelyek elsődlegesen a Flash-teszteket (villamos tulajdonságok mérése) és az Elektrolumineszcencia-vizsgálatokat (hibatípus feltárása) jelenti. Ezen vizsgálatokat a következő alfejezetek részletesen tartalmazzák.

4.2. FLASH-TESTT – VILLAMOS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

A Flash-teszt a napelemek állapotfelmérésének egyik „ex-situ” módszere. Lényege, hogy villamos mérések útján határozzuk meg egy Napszimulátor segítségével megvilágított napelem villamos paramétereit. A mérés során a napelem aktuális feszültségének, áramerősségének és teljesítmények meghatározása mellett felvázolásra kerül az U-I karakterisztika is. Flash-teszt során a napelemet egy fekete dobozban helyezik el, ahol rendszerint egy LED-Halogén reflektorokból kialakított Napszimulátorral világítják meg. A Napszimulátor és a vizsgálati elv megegyezik a 2. fejezetben leírtakkal.

Kutatómunkám során lehetőséget kaptam, hogy egy 4 éve üzemelő napelemes erőműből származó napelemek akkreditált laboratóriumban történő bevizsgálásában és a bekövetkező meghibásodások, illetve károsodások okának feltárásában aktívan részt vegyek. Ennek köszönhetően sikerült e szakterületen kompetenciát kiépítenem.

A 21. és a 22. táblázat 6 darab napelemen végzett Flash-teszt eredményeit mutatja be. A mérések során meghatározásra kerültek a napelemek üresjáratú és munkaponti feszültségei, a rövidzárási és munkaponti áramerősségei, a munkaponti teljesítmény és a Fill faktor, továbbá felvázolásra kerültek az U-I jelleggörbék.

A 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 [108, 113, 114, 115, 116, 117]. 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 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 ($260 \text{ Wp} + 3\%$). A modul összes paramétere megfelel az adatlapon szereplő információknak.

21. táblázat: A vizsgált napelem panelek Flash-tesztel kapott villamos paramétereit.

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

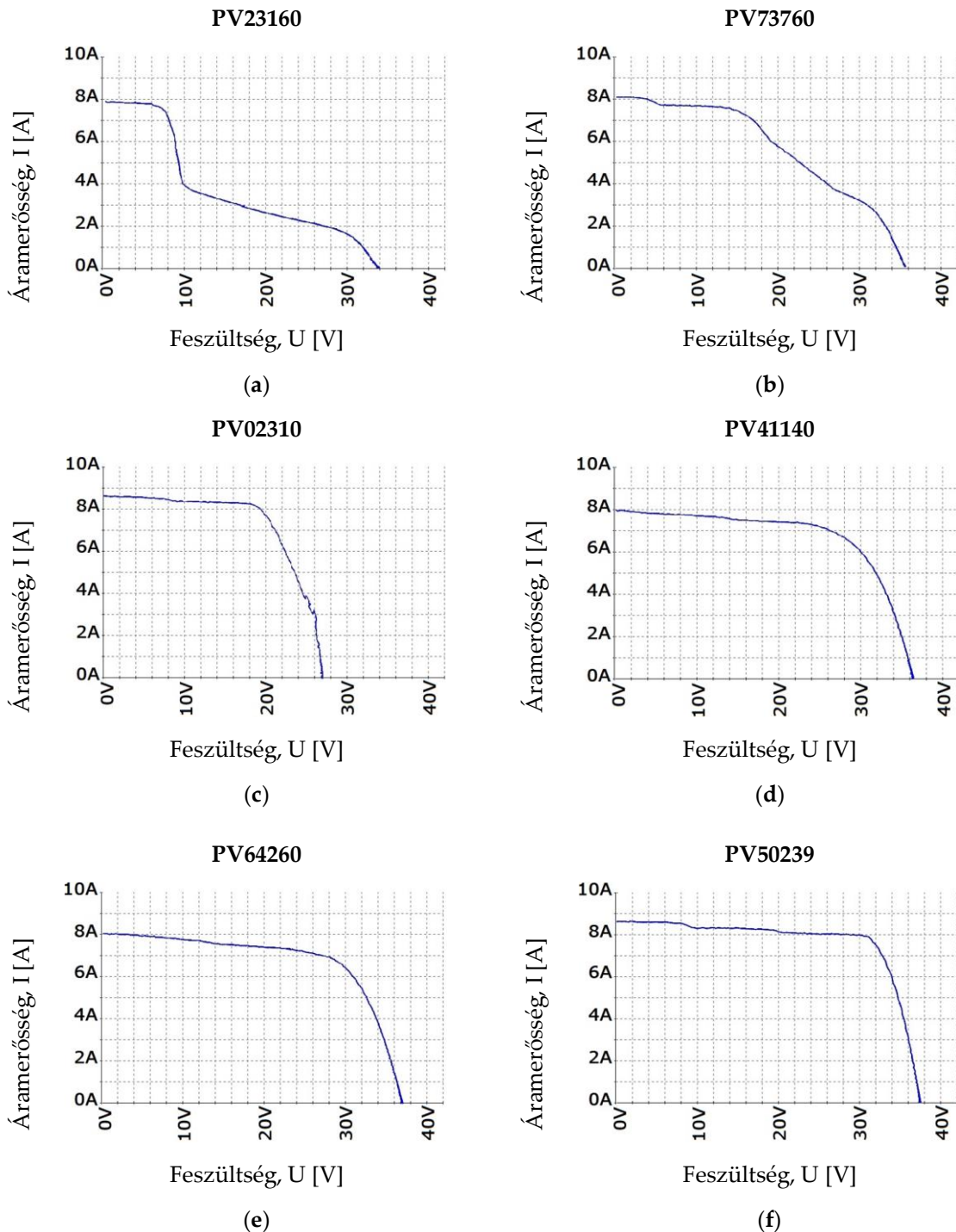
22. táblázat: A vizsgált napelem panelek Flash-tesztel kapott villamos paramétereit.

Paraméter neve, mértékegysége	PV41140	PV64260	PV50239	Adattábla
Munkaponti teljesítmény [Wp]	226,74	231,92	268,99	260±3%
Munkaponti feszültség (MPP) [V]	32,90	34,09	35,08	34,80
Munkaponti áramerősség (MPP) [A]	7,38	7,63	7,67	7,47
Üresjárat feszültség [V]	37,09	36,82	37,63	37,70
Rövidzárlati áramerősség (A)	8,40	8,00	8,63	7,92
Fill faktor (%)	86,10	89,60	88,70	-

A 76. ábra a mérések során felvételre került U-I karakterisztikákat szemlélteti a fentebb is megnevezett hat, eltérő viselkedésű napelempanelre vonatkozóan. Jól megfigyelhető, hogy a PV23160 panel (76. a ábra) és a PV73760 panel (76. b ábra) U-I görbéje nem felel meg a hibamentes napelem panel jellemzőinek, sőt igencsak messze van mind az ideális, mind a gyakorlati görbétől. A PV02310 modulnál (76. c ábra) ugyan jellegét tekintve hasonlít a gyakorlati görbéhez, azonban a letörés már kisebb feszültség szinten megtörténik, amely szintén nem működő cellák jelenlétére utal. A PV41140 és PV64260 panelek görbéje azt mutatja, hogy ezek a modulok kis teljesítménycsökkenés mellett is jól működnek (76. d-e ábra). A 76. f ábrán már jól felismerhető a napelem panel (PV50239) gyakorlati jellegű görbéje [98].

A napelem panelek gyártói adatok alapján 260 Wp teljesítményűek és 3%-os teljesítménytoleranciára garantáltak, továbbá az első 10 üzemi évben 90%-os, az azt követő 10-25 év közötti időszakban pedig 85%-os teljesítménygarancia érvényes a panelekre. Lineáris ütemű természetes öregedést feltételezve, az üzembe helyezés és a bemérés között eltelt mintegy 4 éves időszak alatt a toleranciát is figyelembe véve maximálisan 17,888 Wp teljesítménycsökkenés engedhető meg. Ez azt jelenti, hogy a panelek mérési teljesítménye hibátlan, tiszta panelek esetében 242,112 Wp teljesítményt meghaladónak kell lennie. Amennyiben 3%-os mérési bizonytalanságot vesszük figyelembe, akkor az elvárt teljesítményérték 234,849 Wp. Az ettől kisebb teljesítményt nyújtó napelem panel gyorsabban öregedett, mint ahogy az várható lenne, vagy üzemeltetési problémákból adódóan

meghibásodott. Ezen panelek esetében a hőkamerás vizsgálatok 15 °C-nál nagyobb hőmérsékleteltéréseket mutattak a napelem panelek belül, így a Flash-tesztek visszaigazolták, hogy egyes napelem panelek valóban nem teljesíti az elvárt teljesítményt. A gyorsabb öregedés, illetve károsodás okának meghatározására készültek el az Elektrolumineszcencia-vizsgálatok.



76. ábra: U - I karakterisztikák: (a) PV23160 panel; (b) PV73760 panel; (c) PV02310 panel; (d) PV41140 panel; (e) PV64260 panel; (f) PV50239 panel.

4.3. ELEKTROLUMINESZCENCIA MÓDSZER – KÁROSODÁSELEMZÉS

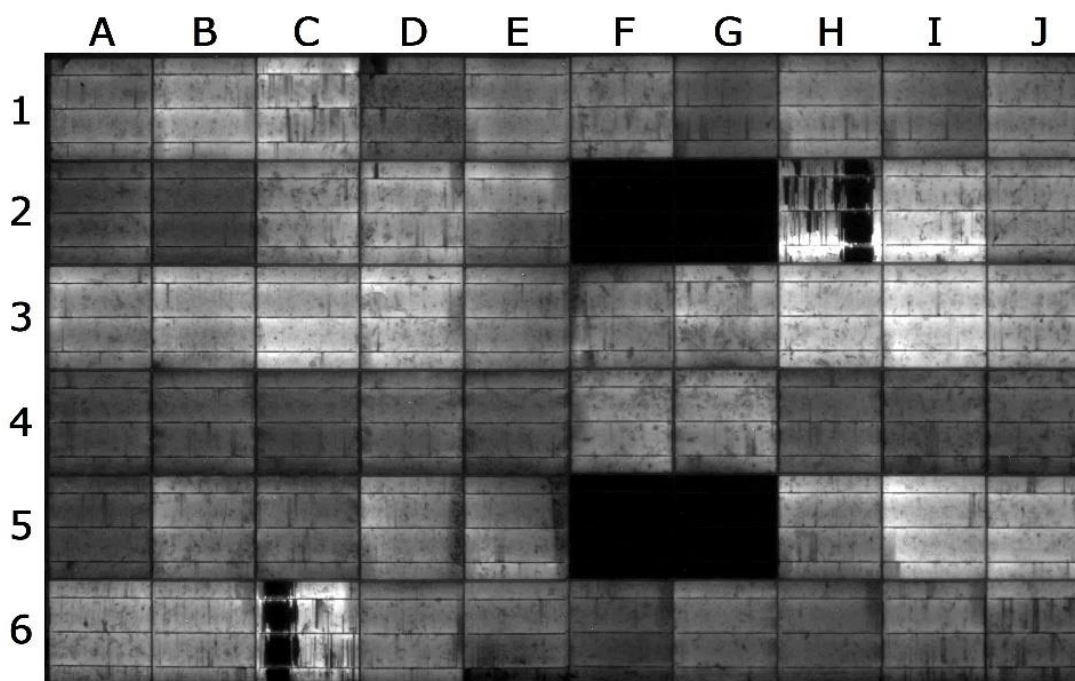
Az elektrolumineszcencia vizsgálat lényege, hogy a napelemeket fordított üzemben működtetjük, azaz egy egyenfeszültségű tápegységről tápláljuk meg. Ilyenkor a napelem fogyasztóként működik és fényt/hőt bocsát ki. Ezt a kibocsátást kamerával pásztázva feltárhatók a napelem hibái. A kibocsátott fény/hő intenzitása a napelem ellenállásának függvénye. A nagyobb ellenállással rendelkező részek fekete foltként jelennek meg a felvételeken, ezáltal a hibák egyértelműen beazonosíthatók [108, 110, 112, 114, 116, 119].

A vizsgált napelem panelek 60 db cellát tartalmaznak. Az első 10 üzemévükben 10%-os maximálisan megengedett hatásfokvesztés esetén 6 db cellányi teljesítménykiesés megengedett. Ez jelentkezhet a forrasztás hibájából is, amely első sorban érintkezési hiba révén jelent kiesést. 30 db cella esetében megengedett a repedés nélküli cellasérülés, amely első sorban az üzem közbeni hőingadozás miatti átkristályosodással valósulhat meg. 3 db cella teljes kiégése szintén határátéken belül elfogadható. Maximum 12 db cellában keletkezhetnek új repedések, amelyek nagy valószínűséggel lehetségesen áramvesztéssel, teljesítménykieséssel járnak, valamint biztosan termelőkieséssel járnak. 3 db cellánál elfogadható a pókháló jellegű repedés. 30 db cella esetében megengedett a kritikussággal, azaz az áramvesztéssel és teljesítménykieséssel nem járó repedések. 6 db cellánál következhetnek be olyan repedések, amely 20%-nál kisebb energiatermelőkiesést okoznak, illetve szintén 6 db cellánál engedhető meg a 20%-nál nagyobb termelőkieséssel járó repedések.

Tekintve, hogy a napelemek a telepítésükhöz képest mintegy 4 évet üzemeltek, így ezen jelenségeknek maximálisan a fele jelenhetett volna meg lineáris természetes öregedést feltételezve. Az elektrolumineszcencia vizsgálatok során a bemutatásra került napelem paneleken minden felsorolt hibafajta észlelésre került.

A következő 77. – 82. ábrák az előző fejezetben bemutatott napelem panelek elektrolumineszcencia módszerrel történő vizsgálat eredményeit szemléltetik. A képek jól összeegyeztethetők a panelek Flash-tesztekkel kapott U-I görbéihez. A 21. és a 22. táblázatokhoz hasonlóan az elektrolumineszcencia felvételek a károsodás mértékének sorrendjét követik. A sötét részek a hibákat, a világos területek a jól működő cellarészeket mutatják. Először szemléljük meg a 77. ábrát, amely a PV23160 jelű panel elektrolumineszcencia felvételét mutatja. A Flash-teszt alapján ez a panel a leginkább károsodott, de legalábbis nem tudta reprodukálni az elvárt teljesítményt. A második és ötödik sorban (F2, G2, F5 és G5) vannak nem működő cellák. Ezért ezek a cellák egyáltalán nem termelnek áramot, sőt ellenállásként hatnak a velük sorba kötött cellákra nézve [114, 120, 121].

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

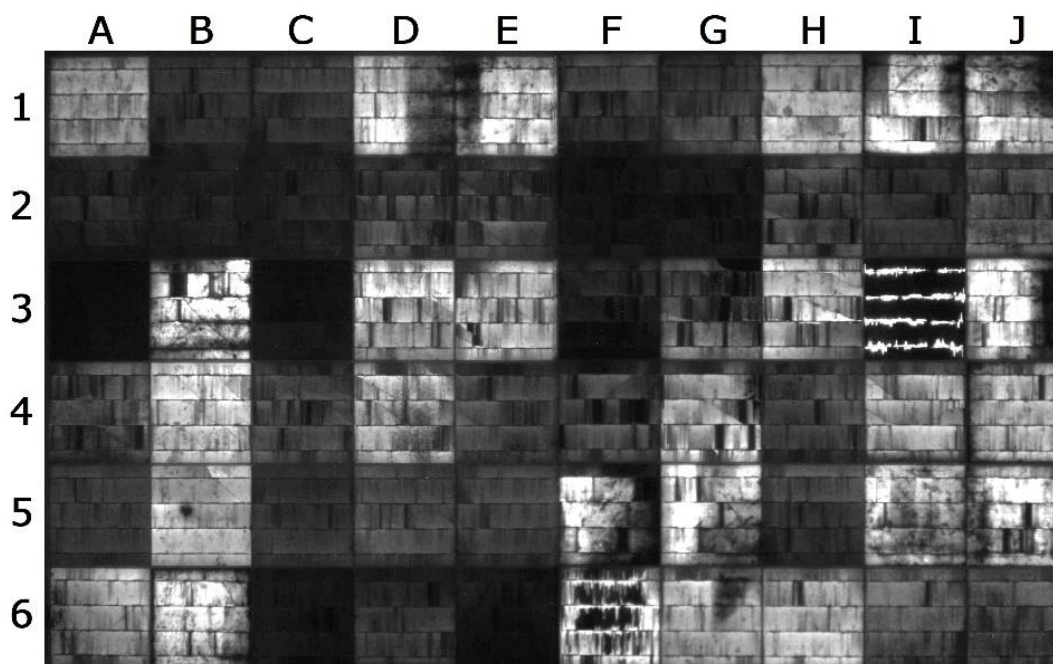


77. ábra: A PV23160 jelű napelem panel elektrolumineszcencia felvétele, amely a Flash-teszt alapján meghibásodottnak minősül.

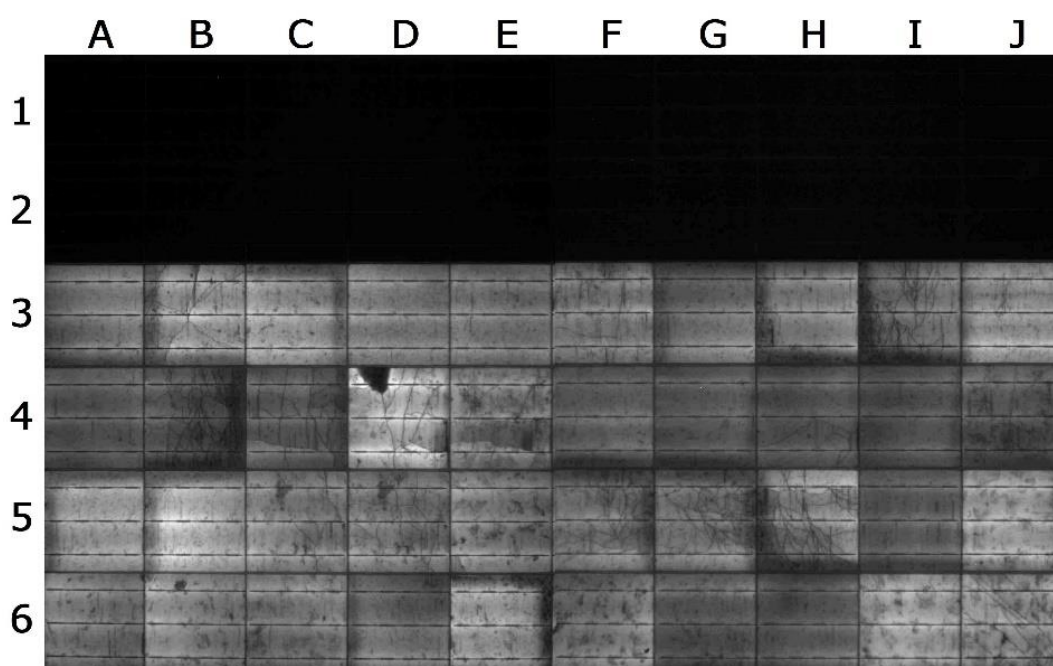
A 78. ábrán egy olyan napelem panel (PV73760) elektrolumineszcencia képe látható, amelynek teljesítménye körülbelül a fele a névleges csúcsteljesítményének (144 Wp, 55,5%, lásd 21. táblázat) a Flash-teszt alapján. Látható teljes cellás kiégés (A3), nem kritikus mikrorepedések (B4, C4), kritikus repedések (I3), lokális forrasztási hiba (B5). Számos cella ujjnyi méretű repedéseket tartalmaz (például A4, D3, H3) [118, 119].

A 79. ábra egy olyan panel (PV02310) elektrolumineszcencia felvételét mutatja, amely egy napelemtartó asztal legalsó sorában üzemelt. Minden bizonnyal a napelemtartó asztalok közötti távolság nem megfelelően lett kiszámítva, vagy helytelenül lett kimérve a telepítés során, ezáltal az 1. és 2. cellasor túl közel volt a talajhoz, így az előtte lévő asztal felső sorában lévő paneljei gyakran árnyékolták (főleg a kis beesési szögű napsütéses időszakokban). Ez egy igen

gyakori tervezési és/vagy telepítési hiba eredménye. Ezenkívül sok cellán repedések és ún. pókhálóstörések láthatók (B3, B4, H5, I3). A D4 cellán celladarab-leválás, a B6 cellán pedig helyi forrasztási hiba figyelhető meg. A nem működő két sor miatt a mért feszültség 20,91 V (a normál érték 60,1%-a, lásd 21. táblázat). A másik négy sor továbbra is képes áramot termelni [118, 119, 120, 121, 122, 123].

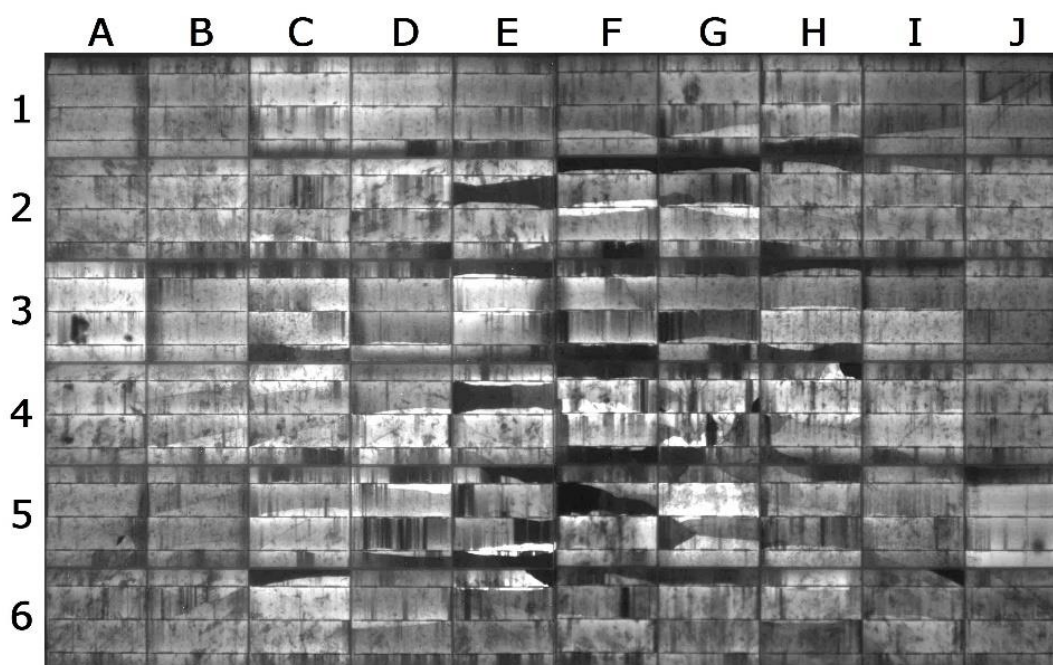


78. ábra: A PV73760 jelű, súlyosan károsodott napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.



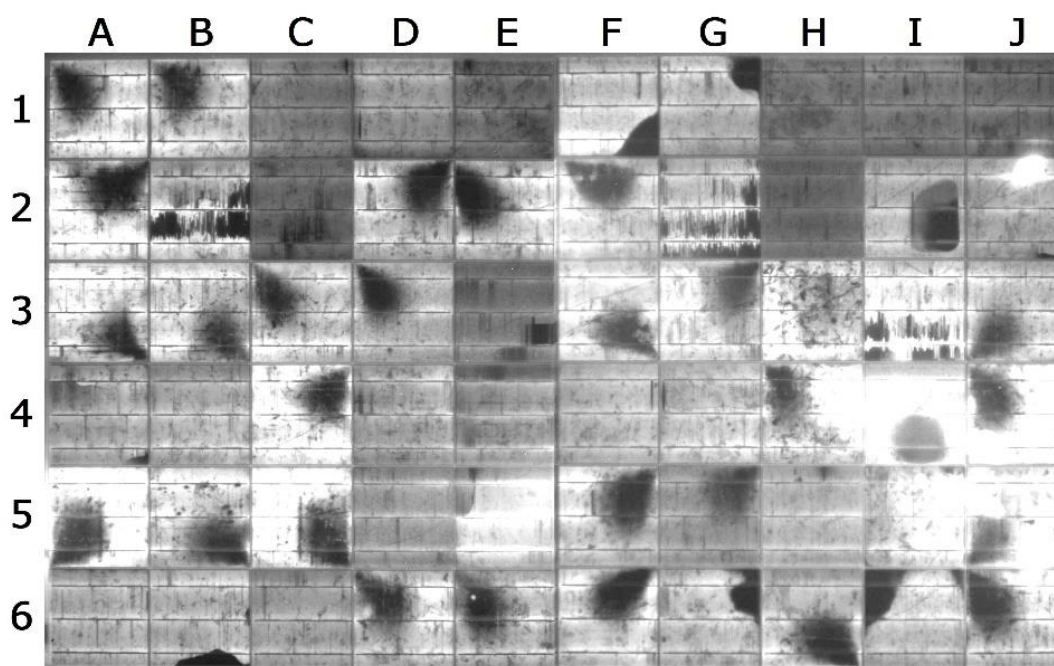
79. ábra: A PV02310 jelű, állandó részleges árnyékhataásnak kitett napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

A 80. ábrán a PV41140 jelű napelem panel elektrolumineszcencia képe látható, amely ugyan nem érte el az elvárt teljesítményszintet, de már jobban közelítette a gyártói adatot. Ennek a modulnak a teljesítménycsökkenése több mint 12,8%, amely a 3%-os tűrést is figyelembe véve csak 10 üzemév után következhetett volna be. A mért maximális teljesítmény 226,7 Wp volt (lásd 22. táblázat). Megfigyelve a 80. ábrát az E, F és G oszlopokban széles (kritikus) repedések, leválások láthatók, azaz részlegesen működésképtelen cellák. Hasonló részleges cellaszakaszleválások okozta „vakfoltokat” tartalmaznak pl. a C6, E4, F5 cellák. Sok cella ujjnyi méretű repedéseket tartalmaz (pl. C2, D5, H5), továbbá számos cellán mikrorepedések is jól kivehetők (A6, B6, C4,...). Lényegében ez a panel sem teljesíti az állapotára vonatkozó előírásokat, de működése nem tekinthető kritikusan alacsonynak [118, 124, 125, 126, 127].



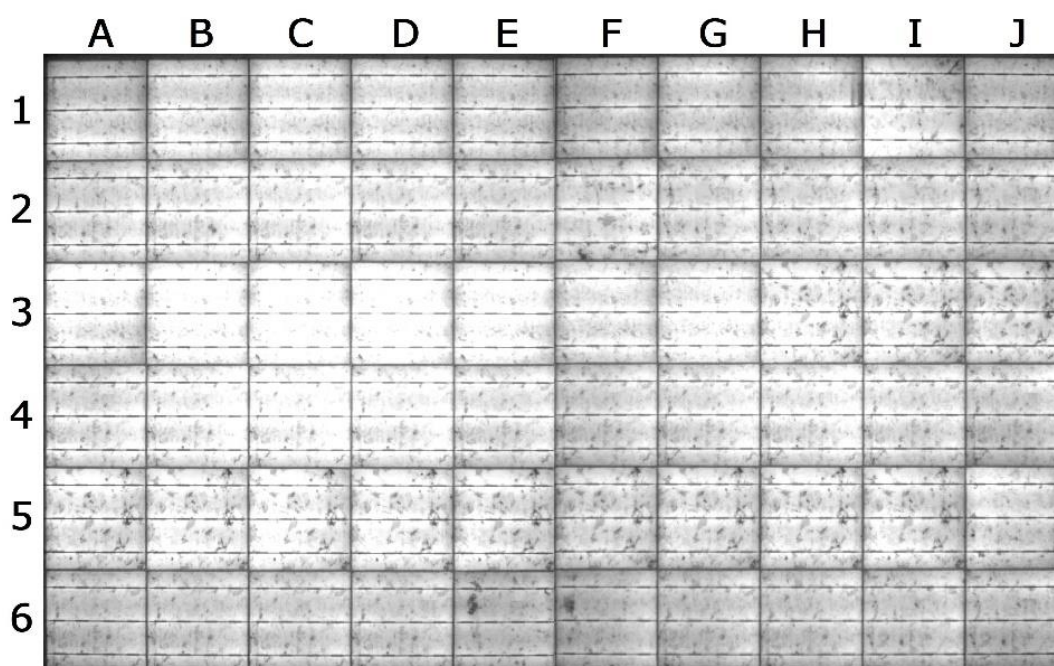
80. ábra: A PV41140 jelű, átlagosan sérül (öregedett) napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

A 81. ábra egy olyan napelem (PV64260) elektrolumineszcencia felvételét mutatja, amelyen porlerakódás miatti anyaghiba jelei figyelhetők meg. A károsodott cellákon a nagyobb méretű sötét foltok tölcsérek formájában vannak jelen (A1, B1, C3, D3,...). Ezen hibafajták üzemeltetési problémákra utalnak, azaz a panel felülete hosszú ideig szennyezett volt és ezáltal a szennyezőanyagok elkezdtek bediffundálni a napelem panel szerkezetébe. A B6, F1 és I3 cellákon kritikus méretű repedések, további öt cellánál nagy méretű cellaleválás, cellatörés figyelhető meg (B2, F1, G1, G6 és I6).



81. ábra: A PV64260 jelű napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

A 82. ábra annak a napelem panelnek (PV50239) az elektrolumineszcencia felvételét mutatja, amely képes volt a Flash-teszt során a gyártó által megadott teljesítményét reprodukálni. Minden cella világos, repedés vagy törés nem látható. Az apró sötét foltok több cellán hasonló mintázatot mutat, így azok forrasztási- (pl. 5. sor), és anyaghibával (pl. E6 és F6) magyarázhatók. Ezek nem tekinthetők jelentős gyártási hibának, így nem is akadályozzák a panel megfelelő működését.



82. ábra: A PV50239 jelű, hibátlanul működő napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.

4.4. KÍSÉRLETI VIZSGÁLAT – HATÁSELEMZÉS

A napelemes erőművek üzemeltetése során az időjárási adottságok révén rendszeresen és akár nagy mennyiségű porlerakódást, illetve egyéb felületi szennyeződés-lerakódásokat tapasztalhatunk. A csekély mennyiségű (<2 mm) csapadék a napelem felületére érkezés után rövid időn belül elpárolog, így az tisztító hatást nem tud okozni. A közepes mennyiségű, 2-4 mm csapadékmennyiség szintén nem elegendő az intenzívebben szennyezett napelemek tisztítására, azok inkább csak „átrendezik” a szennyeződéseloszlást. Általában minimálisan 5 mm eső szükséges ahhoz, hogy a napelempanelék valóban letisztítottak bizonyulhassanak.

Magyarországon éves szinten átlagosan 60-80 esős nappal kell számolni. Ez átlagosan heti egy esős napot jelent. De nem minden alkalommal fordul elő olyan csapadékmennyiség, amely alkalmas lehet a napelem felületén lévő szennyezőanyagok letisztítására. Azonban az átlagképzés nem tükrözi a valóságot. Mivel a nagy intenzitású esőzésű napok rendszerint egymást követik. Előfordulnak olyan időszakok is, amikor 30 napon keresztül egyáltalán nem, vagy csak csekély mennyiségű csapadék hullik. Hazai körülmények között egy napelem panelen akár 10 cm³-t meghaladó szennyezőanyagmennyiség is lerakódhat, amely egyenletes eloszlást feltételezve 60-100 g/panel porkoncentrációt is eredményezhetnek. A valóságban a porlerakódás csak a mikrométeres (szállópor) szemcseméreteknél tekinthető egyenletesnek és nagyban függ a por típusától, egyéb tulajdonságaitól. A nagyobb szemcseméretetek esetében a koncentrált lerakódás valószínűbb és ezáltal a lokális hibaképzőhatás is.

A 83.-85. ábrák példaként szemléltetik a szennyezőanyag napelem felületén történő jelenlétét. A 83. ábrán a napelem panelen lerakódott mikrométerű, egyenletes eloszlású szállóporlerakódásba bele is lett írva, hogy „kosz”. A 84. és a 85. ábrán növényi eredetű szennyezőanyag figyelhető meg. A 84. ábrán a lerakódás koncentráltódott egy cella felületén. A 85. ábrán a napelemek konstrukciós kialakítása miatt a sarkok-élek mentén feltorlódott szennyezőanyag figyelhető meg. Mindegyik fénykép egy üzemelő napelemes erőműben készült és egy igen gyakori jelenséget szemléltet.

Kísérleteink során a naperőműből származó napelemeken további vizsgálatokat végeztünk, hogy vissza tudjuk igazolni a felületi szennyeződések okozta károsító hatást.



83. ábra: Mikroméretű (szállópor) típusú egyenletes porlerakódás a napelem felületén.



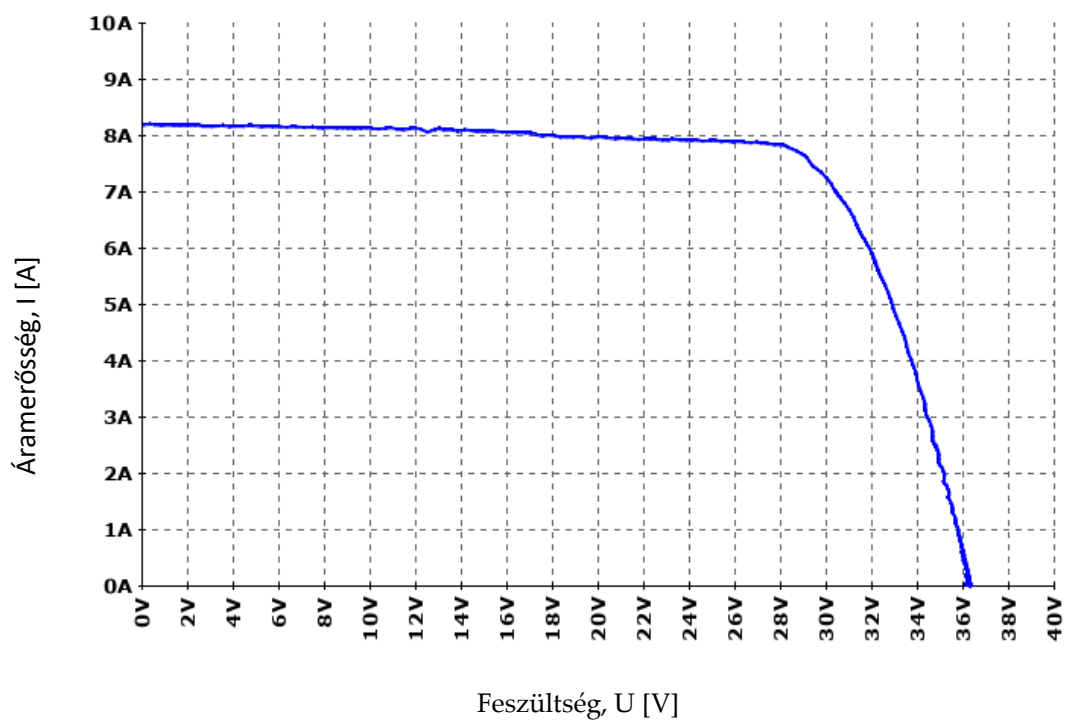
84. ábra: Növényi eredetű, koncentrált szennyezőanyag lerakódása a napelem felületén.



85. ábra: A napelem alsó sarkában és élében felhalmozódott szennyezőanyag.

A PV46740 jelű napelem panelen további vizsgálatokat végeztünk a Miskolci Egyetemen. A panel aktuális munkaponti teljesítménye a Flash-teszt alapján 267,69 W, a munkaponti feszültsége 34,67 V a munkaponti árama pedig 7,72 A. A panel két sarkában szennyeződést tartalmaz, amely még az erőműből történő leszerelése előtt rakódott le. A panel Flash-tesztjének eredményét a 86. ábra, az elektrolumineszcencia felvételét pedig a 87. ábra szemlélteti. Az elvégzett mérések eredményei alapján elmondható, hogy a panel jó állapotúnak tekinthető, csak kisebb mikrorepedéseket és nem kritikus, ujjnyi cellaleválásokat tartalmaz.

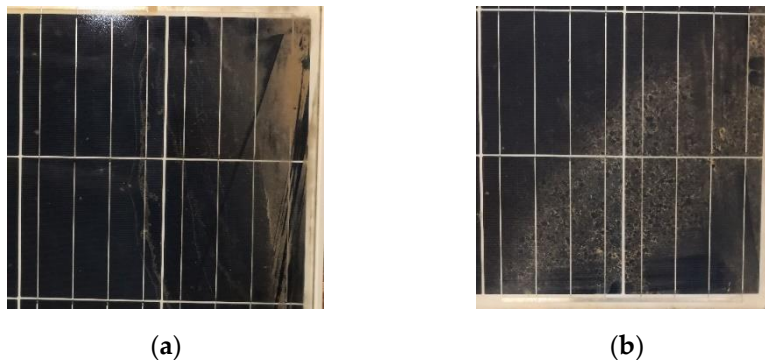
A sarkokban lerakódott szennyeződés azonban hosszabb távon károkat okozhat [106, 107, 108]. A 88. ábrán látható a két szennyezett sarok, amelyet csak egy-egy vékony rétegű lerakódott por fed. A hatás felmérése érdekében az egyetemen további méréseket végeztünk.



86. ábra: A PV46740 jelű napelem panel Flash-tesztel kapott U-I jelleggörbéje.

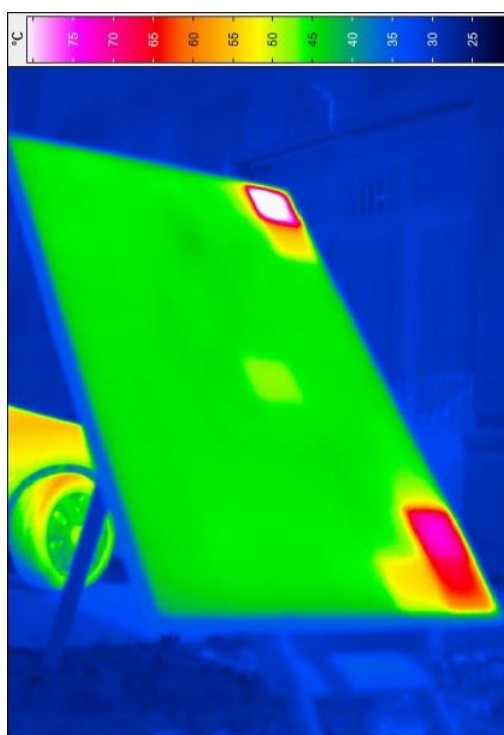


87. ábra: A PV46740 jelű napelem panel elektrolumineszcencia felvétele.



88. ábra: A PV46740 jelű napelem panel két sarkában lerakódott por.

A vizsgálatok 2021. szeptember 28-án 14:00 órakor kezdődtek. Ekkor a napelem panel nyitott kapcsain 33,38 V feszültség, rövidzárlatban pedig 6,46 A áramot mértünk, 792 W napsugárzási intenzitás érték mellett. A panel 15 perc alatt melegedett fel 40 °C átlaghőmérsékletre (hőmérsékleti tranziens lefutásának ideje). A környezeti hőmérséklet 21,3 °C volt. A napelemről készült hőkamerás felvétel a 89. ábrán figyelhető meg.

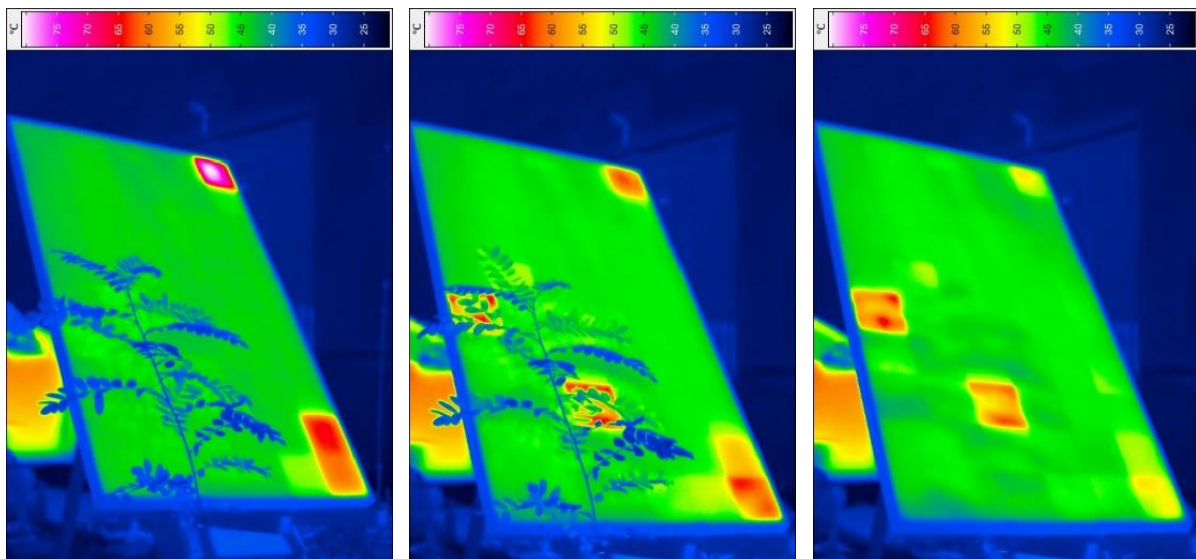


89. ábra: A PV46740 jelű napelem panel hőkamerás felvétele.

A két sarokban, ahol szennyeződés lerakódás figyelhető meg, jelentősen megemelkedett a hőmérséklet. A felső sarokban lévő kontakthőmérővel mért érték több mint kétszerese (73,1 °C) az átlagnak. A kontakthőmérő és a hőkamera által mért érték között ugyan tapasztalható különbség, azonban a hőmérsékleteloszlás, illetve a tendencia egyértelműen jelzi a szennyeződés meglétét. (Kontakt hőmérővel referencia értéket is mértünk a panel közepén.)

Az erősen szennyezett jobb felső cella alatti cella kisebb mértékben szennyeződött, így ott a hőmérsékletemelkedés is kisebb. Ennek hatása a felvételen is látható. Az alsó sarokban három cellát is jelentősen borít szennyeződés. Mindhárom cellánál túlmelegedés figyelhető meg. Emellett meg kell említeni a teljesítmény csökkenését is. (A naperőműben tesztelt koszos modulok átlagosan 10-20%-kal alacsonyabb teljesítményt tudtak produkálni, mint tiszta állapotban [18, 93, 95, 98, 102, 109, 110, 11, 112].)

A 90. ábrán a szennyeződés változó hatásának helytállóságát igazoló további tesztek eredményei láthatók. Első lépésben egy faágat helyeztünk a panel elé (90. a. ábra). A faág okozta árnyékhata újabb felmelegedést okozott. Második lépésként megtisztítottuk a sarkokat, így azok elkezdtek lehűlni (90. b. ábra). Végül eltávolítottuk a faágat (90. c. ábra), amely hatása még egy ideig jelen volt. Pár perc elteltével a nevezett cellák elkezdtek lehűlni, azonban a sarkokon korábban jelen lévő porok hatása nem tűnt el teljesen. Mivel a panel elektrolumineszcencia felvételén nem figyelhető meg tölcséres sérülés a poros celláknál, valószínűleg csak rövid ideig üzemelt porosan, de az éppen elegendő volt, hogy a károsodási folyamat elinduljon. Tekintve, hogy a panel teljesítménye a felső táréshatárt körüli, valószínűsíthető, hogy nem olyan régóta üzemelhetett az erőműben, tehát cserepanelként került be egy esetlegesen fizikailag sérült panel helyére. Az eredmények arra utalnak, hogy a vizsgált panel hosszabb élével vízszintes elrendezésben és a koszolódott cellákkal alsó irányban voltak beépítve az erőműben.



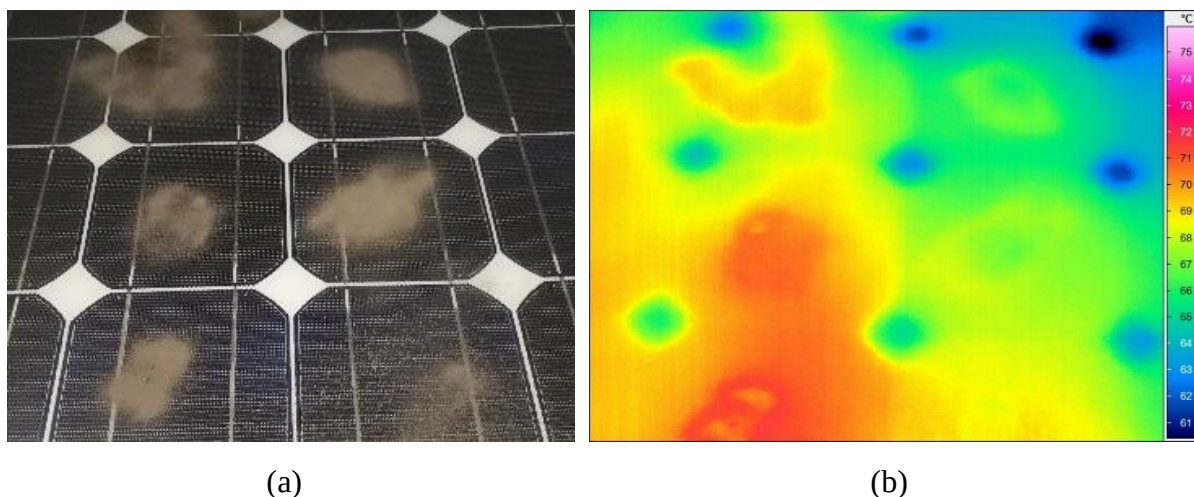
(a)

(b)

(c)

90. ábra: (a) a PV46740 jelű napelem panel elé helyezett faág; (b) a panel a sarkok tisztítása után; (c) a panel a faág eltávolítása után lehűlt sarkokkal.

A szennyezőanyagok hőmérsékletnövelő hatását laboratóriumi körülmények között is vizsgáltuk. A napelem panelt egy fekete dobozban helyeztük el. A napelemet Napfényszimulátor segítségével világítottuk meg. A panelen különböző alakzatban szórt porlerakódásokat hoztunk létre. A lerakódások hőmérsékletnövelő hatása egyértelműen beazonosítható a panelről készült hőkamerás felvételen (91. ábra). Ezen mérések visszaigazolták a 3. fejezetben elvégzett mérések helyességét.



91. ábra: Porlerakódás modellezése (a) és annak hatása a hőkamerás felvételen (b).

Összességében tehát elmondható, hogy a szennyezett napelem panelek hőkamerával készült vizsgálatok eredményei visszaigazolták a szennyezett panel villamos úton történő, és kontakt hőmérővel mért eredményeinek helyességét. A nagy elemszámú és eltérő üzemi körülményekből, szennyezettségi állapotból származó napelemeken végzett vizsgálatok eredményeire támaszkodva következtetésként levonható, hogy a szennyezőanyagok tartós jelenléte a napelem anyagszerkezetében gyorsított öregedést vált ki, tehát közvetlen hatása érvényesül, a napelem élettartamát csökkenti, továbbá a napelemes rendszerek működését is befolyásolják. Minden bizonnyal ezen hatások jelentkezhetnek hálózati visszahatások formájában is.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

T1. Napelemek szoftveres szimulációs és számítógéppel támogatott laboratóriumi vizsgálata céljából kidolgoztam egy kibővített és általánosított matematikai modellt, valamint egy mérőrendszert, amelyek lehetővé tették a hőmérsékleti tranziens folyamatok vizsgálatát.

a. A kidolgozott szimulációs modell segítségével meghatároztam az átmeneti állapotok során bekövetkező paraméterváltozások hatását, annak számíthatóságát.

b. Kidolgoztam egy LED-Halogén lámpa alapú Napfényszimulátort, amely alkalmas 400 – 1.100 nm hullámhossz tartományban 9,96%-os inhomogenitással a Nap fényének laboratóriumi körülmények között történő szimulálására. A fényszimulátor alkalmazható a maximálisan 165x165 mm méretű napelem cellák szabvány előírásai szerinti vizsgálatára, valamint hőmérsékleti tranziens folyamatok és a felületen lerakódó szennyeződések hatásainak elemzésére is.

c. Kialakítottam egy Halogén reflektor alapú Napfényszimulátort, amely alkalmas 300 – 1.100 nm hullámhossz tartományban 46,5%-os inhomogenitással a Nap fényének laboratóriumi körülmények között történő szimulálására. Ugyan ez a fényszimulátor szabvány szerinti abszolút mérések elvégzésére nem alkalmas, de összehasonlító, azaz különbozoti mérések elvégzésének céljára használható különböző méretű napelem panelek vizsgálatára.

d. Fényszimulátor alkalmazásával, számítógéppel támogatott laboratóriumi mérések segítségével validáltam a kidolgozott szimulációs modellt és bebizonyítottam, hogy a megvilágítás intenzitásának csökkenésével, illetve a napelem hűtésével a szimulációs modell megbízhatósága nő, szórása csökken.

e. A saját összeállítású mérőrendszer alkalmazásával mérés útján meghatároztam a napelemek hőmérsékleti állandóit, amelyekkel módosítottam a szimulációs modellt. A módosított modellel felvázolt karakterisztikák jobban közelítik a mérésből származókat.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [SF3], [SF5], [SF6], [SF7], [SF8], [SF9], [SF10], [SF11], [SF12], [SF13], [SF14], [SF15], [SF16], [SK1], [SK2], [SK3], [SK5], [SK7], [SK8], [SK9], [SK11], [SK12], [SK13], [SK14], [SK15], [SK16], [SK17], [SK18], [SK19], [SK20], [SK21], [ST1]

- T2. A saját fejlesztésű mérőrendszer segítségével végzett mérések alapján bebizonyítottam, hogy a napelem felületén lerakódó szennyeződések hatásai nem csak a koncentráció, hanem az egyéb fizikai-kémiai tulajdonságaik (sűrűség, áttetszőség, szemcseméret, fajfelület) függvénye.
- a. Megállapítottam, hogy a különböző típusú, de azonos koncentrációjú szennyeződéslerakódások során a szennyezőanyag fajlagos felülete és a napelem teljesítménycsökkenése között egyenes arányosság áll fenn.
 - b. Bizonyítottam, hogy a legkisebb fajlagos felülettel rendelkező és áttetsző útszóró só a vizsgált lerakódás-koncentrációk esetében (maximum 150 g/m^2) gyakorlatilag nem befolyásolja a napelem villamosenergia-termelő képességét, nem csökkenti a teljesítményét és nem növeli a hőmérsékletét.
 - c. Megállapítottam, hogy a legnagyobb fajlagos felülettel rendelkező pernye logaritmikusan befolyásolja a napelem teljesítménycsökkenését a szennyezőanyag-koncentráció függvényében.
 - d. Megállapítottam, hogy a $0,5 \text{ mm}$ -nél kisebb méretű szennyezőanyagok, szállóporok napelem teljesítménycsökkenésre gyakorolt hatása harmadfokú polinommal jellemezhető a szennyezőanyag-koncentráció függvényében.
 - e. Megállapítottam, hogy a felületen lerakódó szennyeződések hatására a napelem hőmérséklete növekszik, teljesítménye csökken. A hőmérsékletnövekedés függ a szennyező anyag fizikai-kémiai tulajdonságaitól és a lerakódás-koncentrációtól.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [SF2], [SF4], [SF17], [SK4], [SK6], [SK10], [SK16], [ST1]

- T3. Meghatároztam a napelemek hatékonyságcsökkenésére és tönkremenetelére alkalmazott vizsgálati módszerek és mérőeszközök körét, amelyek segítségével feltárhatóvá és láthatóvá tehetők a napelemek aktuális állapotát jellemző egyes tényezők (teljesítmény, U-I karakterisztika, sérülések), valamint létrehoztam egy adatbázist az állapotfelmérésből származó mérési eredmények feldolgozása és kiértékelése céljából.
- a. A termovíziós feltérképezés láthatóvá teszi a napelem felületi hőmérséklet-eloszlását, amely felületen lerakódott szennyezőanyagok valamint károsodások jeleire utal. A termovíziós képeket összehasonlítottam a Flash-tesztek eredményével és az elektrolumineszcens felvételekkel, amelyek alapján megállapítottam, hogy 15 °C-nál kisebb hőmérsékletkülönbség az elvárt (gyártói garanciális) teljesítménnyel működő napelemeknél is kialakulhat. Ettől nagyobb hőmérsékletkülönbség szennyeződött, illetve károsodott napelemnél alakul ki.
 - b. Flash-tesztek eredményeire alapozottan meghatároztam a napelemek aktuális villamos paramétereit (feszültség, áramerősség, teljesítmény, fill-faktor, hatásfok) és felvázoltam az U-I karakterisztikákat. Megállapítottam, hogy a károsodott napelemek áramleadóképessége csökkent, valamint U-I karakterisztikája megváltozott, torzult a hibátlanul működő napelemekhez képest.
 - c. Elektrolumineszcencia-vizsgálattal láthatóvá váltak a meghibásodások, így be tudtam azonosítani az egyes hibatípusokat. Megállapítottam, hogy a vizsgált napelemeken a származási helytől, pozíciótól és szennyezettségtől függően különböző hibatípusok jelentek meg. Az azonos elhelyezkedésben és pozícióban lévő, valamint szennyezettségű napelemeknél jellemzően azonos hibatípusok dominálnak, amelyek a Flash-tesztekkel összehasonlítva a villamos paraméterváltozások tekintetében is hasonló változásokat mutattak. Mindezek alapján megállapítottam, hogy az egyes napelemmeghibásodások milyen okra vezethetők vissza.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [SF1], [SF2]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ismertetett kutatómunka az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék keretein belül működő Villamosenergetikai Kutatócsoport és Napelemes Laboratórium nélkül nem valósulhatott volna meg. A kutatócsoport tagjai között szerepelnek a Ph.D hallgatóim, név szerint Matusz-Kalász Dávid, Lipták Róbert és Boros Rafael Ruben, valamint a tehetséges villamosmérnök alapszakos, villamosenergetika specializációs hallgatók.

A napelemek hőmérsékleti tranziens viselkedésének, valamint állandó hőmérsékleten vett működésének számítására kidolgozott modell a szoftveres szimulációs és a számítógéppel támogatott mérések eredményei alapján elmondható, hogy pontosabb az alapmodellnél. A validációs célú mérések visszaigazolták az általánosított modell alkalmazhatóságát is.

A mérések elvégzéséhez mérőrendszer kialakítására és mérési eljárás kidolgozására volt szükség. A napelem cellák szabvány szerinti vizsgálatához tervezett és megvalósított LED-Halogén Napszimulátort és egy hűtő-fűtő modult tartalmazó mérőrendszer került kifejlesztésre, amely lehetővé tette többek között a szimulációs modell pontosításához szükséges mérések elvégzését.

Kis- és közepes méretű napelem panelek teszteléséhez Halogén reflektorokból felépülő mérőrendszer került kialakításra, amelyek alkalmazásával a napelemek hőmérsékleti tranziens folyamata mellett vizsgálni lehetett a felületen lerakódó felületi szennyeződések hatásait.

A hőmérsékleti tranziens folyamat jelentősége a napelemek villamos paramétereinek matematikailag leírható változásában jelentkeznek. A napelemes rendszerekben alkalmazott invertereknek ezen működést és energiatermelést befolyásoló jelenségeket különböző algoritmusok segítségével ki kell tudniuk kompenzálni. A kompenzációs szabályozás folyamata hálózati visszahatásokat eredményez, amely első sorban túlfeszültség és megnövekedett felharmonikus tartalom formájában jelentkeznek.

Tekintve, hogy a napelemek igen szélsőségek környezeti körülmények között üzemelnek, számos tényező befolyásolja a működésüket. Ezen tényezők lehetnek hasznosak (pl.: eső) és károsak (pl.: szennyeződések). A kísérleti eredmények alapján megfogalmazható, hogy a felületen lerakódó szennyezőanyagok megnövelik a szennyezett cellák hőmérsékletét. Ennek közvetlen hatása a villamosenergia-termelésben és a hálózati visszahatásban jelentkezik. Közvetve azonban a napelemek gyorsabban öregedéséhez, és hamarabbi tönkremeneteléhez vezethetnek.

A kutatómunka során lehetőséget kaptunk napelemes erőműből származó napelemek vizsgálatára, mérési infrastruktúra használatára és a mérési adatok feldolgozására, adatbázisképzésre. A Termografiás feltérképezés, a Flash-teszt és az Elektrolumineszcencia vizsgálat a napelemek állapotfelmérésére és diagnosztikájára, valamint károsodásvizsgálatára alkalmazott módszerek, amelyek alkalmazása révén az előzőekben megfogalmazott hipotézis visszaigazolóódott.

Jövőbeli célkitűzések között szerepel a felületi szennyeződések kialakulási metodikájának kidolgozása és szimulációs modelljének fejlesztése, valamint pontosabb korreláció felállítása a szennyeződés és a károsodás között.

További tervem az eddigi kutatómunka olyan irányban történő folytatása, amely napelemekre vonatkozóan élettartam tervező és meghibásodást előre jelző komplex döntéstámogatórendszer kifejlesztését támogatja és a karbantartás tervezhetőségét segíti elő prediktív algoritmusok alkalmazásával az üzemi hatékonyság és élettartam növelése céljából.

7. SUMMARY

The described research work would not have been possible without the Electricity Research Group operating within the framework of the Department of Electrical Engineering and Electronics. The members of the research group include my Ph.D. students, namely Dávid Matusz-Kalász, Róbert Lipták, and Ruben Rafael Boros, as well as talented electrical engineering undergraduate students specializing in electric energy systems.

The simulation model developed for the calculation of the temperature transient behavior of solar cells as well as their operation at constant temperature can be said to be more accurate than the basic model based on the results of computer-assisted measurements. Measurements for validation purposes also confirmed the applicability of the generalized model.

The measurements required the development of a measurement system and the development of a measurement procedure. We designed and implemented an LED-Halogen Solar Simulator module for standard testing of solar cells and a cooling-heating system has been developed which made it possible to perform the measurements needed to refine the simulation model.

Halogen reflectors were used to test small and medium-sized solar panels, which could be used to study the effects of surface contaminants deposited on the surface in addition to the temperature transient process of the solar cells.

The significance of the temperature transient process is reflected in the mathematically descriptive change in the electrical parameters of solar cells. Inverters used in solar systems must be able to compensate for these phenomena that affect operation and power generation using various algorithms. The process of compensation control provides power grid retroaction, which is primarily occurs in the form of overvoltage and increased harmonic content.

Because solar panels operate in extreme environmental conditions, several factors affect their operation. These factors can be beneficial (e.g., rain) and harmful (e.g., dirt). Based on the experimental results, it can be stated that the contaminants deposited on the surface increase the temperature of the contaminated cells. This has a direct impact on electricity generation and power grid retroaction. However, these effects can lead indirectly to faster aging of solar panels and earlier failure.

During the research work, we had the opportunity to examine solar cells from a solar power plant, use measurement equipment and process the measurement data. Thermographic mapping, flash tests and electroluminescent inspections were used to condition assessment and diagnostics of the solar cells and to examine the extent of their damage and contributed to confirming the above hypothesis.

Future objectives include the development of a methodology for the formation of surface contaminants and the development of this simulation model and establishing a more accurate correlation between contamination and damage.

My further plan is to continue the research work in a direction that supports the development of a complex decision support system (DSS) for life-cycle planning and failure prediction for solar cells and facilitates maintenance predictability using predictive algorithms to increase operational efficiency and lifetime.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném köszönetemet kifejezni az Intézet valamennyi oktató-kutató és dolgozó munkatársának, valamint hallgatóinak, akik a kutatómunkám során folyamatosan segítségemre voltak és a téziszfüzet megvalósításában a maguk területén segítséget nyújtottak.

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.

9. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB PUBLIKÁCIÓK

9.1. MINŐSÉGI FOLYÓIRATCIKKEK

- [SF1] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D., BOROS R.R., LIPTÁK R.: *Condition assessment of solar modules by flash test and electroluminescence test*. Coatings. Vol. 11. Nr. 11. paper 1361. 2021. p. 13. **SCOPUS Q2, IF 2,881**
- [SF2] MATUSZ-KALÁSZ D., BODNÁR I.: *Operation Problems of Solar Panel Caused by the Surface Contamination*. Energies. Vol. 14. Nr. 17. paper 5461. 2021. p. 13. **SCOPUS Q1, IF 3,004**
- [SF3] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D., KOÓS D.: *Experimental and numerical analysis of solar cell temperature transients*. Pollack Periodica. Vol. 16. Nr. 2. 2021. pp. 104-109. **SCOPUS Q3**
- [SF4] MATUSZ-KALÁSZ D., BODNÁR I., BOROS R.R.: *Range-Reducing Effect of Contaminants in Case of Solar Vehicles*. Vehicle and Automotive Engineering 3. VAE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Vol. 22. 2021. pp. 38-48. **SCOPUS Q3**
- [SF5] BODNÁR I., KOÓS D., ISKI P., SKRIBANEK Á.: *Design and Construction of a Sun Simulator for Laboratory Testing of Solar Cell*. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 17. No. 3. 2020. pp. 165-184. **SCOPUS Q2, IF 1,806.**
- [SF6] BODNÁR I.: *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 15. No. 4. 2018. pp. 59-82. **SCOPUS Q2, IF 1,286.**

9.2. TOVÁBBI FOLYÓIRATCIKKEK

- [SF7] BODNÁR I.: *Napelemes kiserőmű feszültségviszonyai a hőmérséklet-változás függvényében*. ELEKTROTECHNIKA 113 évf. 2020. 5-6. sz. pp. 13-17.
- [SF8] BODNÁR I., BOROS, R. R., MATUSZ-KALÁSZ, D.: *Solar powered electric car with VVVF drive control*. GÉP. 71. évf. 2020. 3-4. sz. pp. 55-60.
- [SF9] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ, D.: *Napelemek laboratóriumi és szimulációs vizsgálata*. Multidiszciplináris Tudományok. Miskolci Egyetem kiadványa. 9. kötet. 2019. 4. sz. pp. 261-268.
- [SF10] BODNÁR I.: *Napelemcella laboratóriumi vizsgálata*. Multidiszciplináris Tudományok. Miskolci Egyetem kiadványa. 9. kötet. 2019. 4. sz. pp. 242-249.

- [SF11] BODNÁR I., KOÓS, D.: *Peltier-elemes hűtőberendezés tervezése és megvalósítása napelemcella hűtésére*. Multidiszciplináris Tudományok. Miskolci Egyetem kiadványa. 9. kötet. 2019. 2. sz. pp. 50-55.
- [SF12] BODNÁR I.: *Napelem hőmérsékletfüggésének kísérleten és szimuláción alapuló vizsgálata*. Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok. XII. évfolyam. 4. szám. 2017. pp. 195-206.
- [SF13] BODNÁR I.: *Transient electrical characteristics of a solar cell in the case of a cooling and non-cooling solar cell*. ANNALS of Faculty Engineering Huneodora-International Journal of Engineering. Vol. 15. No. 4. 2017. pp. 175-178.
- [SF14] BODNÁR I., SKRIBANEK Á.: *Operating examination of an off-grid solar system in case of inductive loads*. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering. Vol. 10. No. 4. 2017. pp. 29-33.
- [SF15] KOÓS D., SZASZÁK N., BODNÁR I., BOLDIZSÁR CS.: *Temperature Dependence of Solar Cells' Efficiency*. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering. Vol. 9. No. 2. 2016. pp. 107-110.
- [SF16] BOLDIZSÁR CS., BODNÁR I., SZASZÁK N., KOÓS D.: *Designing Procedure of Innovative Photovoltaic Solar Water Heater System*. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering. Vol. 9. No. 2. 2016. pp. 71-74.
- [SF17] KOÓS D., BODNÁR I.: *Napelem teljesítmény és hatásfok változásának vizsgálata felületi szennyeződés esetén*. Műszaki Tudományos Közlemények 3. A XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak Előadásai. Erdélyi Múzeum- Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, 2015. pp. 179-182.

9.3. MINŐSÉGI KONFERENCIACIKKEK

- [SK1] LIPTÁK R., BODNÁR I.: *Control Problems of Solar Power Plants*. 2021 22th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2021. p. 5. Doc Nr. 36. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**
- [SK2] BOROS R.R., BODNÁR I.: *LLC Resonant Converter Design and Simulation for PV Motor Drives*. 2021 22th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2021. p. 5. Doc Nr. 18. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**
- [SK3] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D.: *Statistical Comparison Between Experimental and Numerical Simulation Results of The Solar Cell*. 2021 22th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2021. p. 6. Doc Nr. 14. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**

- [SK4] BODNÁR I., TÓTH L.T., SOMOGYINÉ MOLNÁR J., SZABÓ N., ERDŐSY D., BOROS R.R.: *Examination the effect of environmental factors on a photovoltaic solar panel*. Solutions for Sustainable Development. 2019. pp. 108-114. **SCOPUS**
- [SK5] BODNÁR I., FARAGÓ D., DOJCSÁK GY.: *Simulation of a solar power plant*. 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2019. p. 6. Doc Nr. 146. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**
- [SK6] BODNÁR I., CSEHI B., SUKÁLY B., GÁSPÁR Á. CS.: *Examination of power loss and voltage drop of a solar panel as a function of environmental factors*. 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2019. p. 5. Doc Nr. 107. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**
- [SK7] FARAGÓ D. BODNÁR I., BENCS P., KOÓS D., ISKI P., SKRIBANEK Á.: *Laboratory measurements and numeric simulation of a solar cell*. 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2019. p. 6. Doc Nr. 105. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**
- [SK8] KOÓS D., ISKI P., SKRIBANEK Á., BODNÁR I.: *Designing procedure of LED-halogen hybrid solar simulator for small size solar cell testing*. Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III. 2019. pp. 419-424. **SCOPUS**
- [SK9] ISKI P., BODNÁR I., KOÓS D., SKRIBANEK Á., BOLDIZSÁR CS.B.: *Characteristic determination of a solar cell by simulation and laboratory measurement*. Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III. 2019. pp. 399-405. **SCOPUS**
- [SK10] 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*. Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III. 2019. pp. 313-318. **SCOPUS**
- [SK11] BODNÁR I., KOÓS D.: *Determination of temperature coefficient and transient electrical characteristics of a cooled and non-cooled solar module*. 2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC). 2018. pp. 570-573. (IEEE) **SCOPUS és Web of Science**

9.4. TOVÁBBI KONFERENCIACIKKEK

- [SK12] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D., BÍRÓ M.: *Napelemes erőmű feszültségviszonyai*. XX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia - ENELKO 2019. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2019. pp. 8-13.

- [SK13] BODNÁR I.: *Napelemes erőmű szimulációs vizsgálata*. Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2019. Konferencia kötet. 2019. pp. 45-48.
- [SK14] KOÓS D., ISKI P., SKRIBANEK Á. BODNÁR I.: *Solar simulator development for small size solar cell measurements*. CD Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2018. p. 4. Doc Nr. 036.
- [SK15] BOLDIZSÁR CS. B., BODNÁR I., ISKI P., KOÓS D., SKRIBANEK Á.: *Characteristic determination of solar cell by numeric simulation and laboratory measurement*. CD Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2018. p. 4. Doc Nr. 009.
- [SK16] 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*. CD Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2018. p. 4. Doc Nr. 008.
- [SK17] SKRIBANEK Á., BODNÁR I.: *Szigetüzemű napelemes rendszer laboratóriumi vizsgálata*. XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2018). Konferencia kiadvány. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Gépészeti Szakosztály, Marosvásárhely, Románia, 2018. pp. 414-417.
- [SK18] SKRIBANEK Á., BODNÁR I., ISKI P.: *Optimizing an uninterruptible solar power system for inductive natured loads*. Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017) Debrecen, 2017. pp. 485-490.
- [SK19] SKRIBANEK Á., BODNÁR I., BLÁGA CS.: *Kazánszivattyú szünetmentes energiaellátásának biztosítása napelemek közbeiktatásával*. Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2017. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2017. pp. 487-494.
- [SK20] BODNÁR I.: *Napelem karakterisztikák hőmérsékletfüggésének meghatározása laboratóriumi körülmények között*. Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2017. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2017. pp. 32-39.
- [SK21] BOLDIZSÁR CS., KOÓS D., BODNÁR I., SZASZÁK N.: *Napelemes és napkollektoros melegvíz-előállító rendszerek összehasonlítása*. Környezet és energia a mindennapokban. MTA DAB Földtudományi Szakbizottság kiadványa. 2016. pp. 59-63.

9.5. TANKÖNYV

- [ST1] DR. BODNÁR I.: *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergia-termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. Miskolci Egyetem. 2019. p. 108. ISBN 978-615-00-4566-5

10.FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1] Hersch, P.: Basic photovoltaic principles and methods. United States Department for Energy. USA, 1982. p. 55.
- [2] King, L.D., Kratochvil, A.J., Boyson, E.W.: Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, 1997. pp. 1183-1186.
- [3] Dubey, S., Sarvaiya, J.N., Seshadri, B.: Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World-A Review. Energy Procedia 33. 2013. pp. 311–321.
- [4] Singh, P., Singh, S.N., Lal, M., Husain, M.: Temperature dependence of I-U characteristics and performance parameters of silicon solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 92. No. 12. 2008. pp. 1611-1616.
- [5] Szász, Cs.: Optimal control of Photovoltaic Modules Energy Efficiency. Journal of Computer Science and Control Systems. Vol. 10. No. 1. 2017. pp. 29-34.
- [6] Zerhouni, Z.F., Zerhouni, H.M., Zegrar, M., Benmesseoud, T.M., Stambouli, B.A., Midoun, A.: Prosed methods to increase the output efficiency of a photovoltaic (PV) system. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 7. No. 2. 2010. pp. 55-70.
- [7] Makhloufi, M.T., Khireddine, M.S., Abdessemed, Y., Boutarafa, A.: Maximum power point tracking of a photovoltaic system using a fuzzy logic controller on DC/DC boost converter. International Journal of Computer Science. Vol. 11. No. 3. 2014. p. 12.
- [8] Kádár, P., Varga, A.: Measurement of spectral sensitivity of PV cells. 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics. 2012. pp. 549-552.
- [9] Chan, D.S.H., Phang, J.C.H.: Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. IEEE Transactions on Electron Drives. Vol. 34. No. 2. 1987. pp. 286-293.

- [10] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H.: Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95. No. 2. 2011. pp. 586-594.
- [11] Chegaar, M., Ouennoughi, Z., Hoffmann, A.: A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-State Electronic*, Vol. 45. No. 2. 2001. pp. 293-296.
- [12] Kurobe, K., Matsunami, H.: New two-diode model for detailed analysis of multicrystalline silicon solar cell. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44. 2005. pp. 8314-8321.
- [13] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Syafaruddin: Modelling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19. No. 7. 2011. pp. 1613-1626.
- [14] Malik, A.Q., Damit, S.J.B.H., Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. *Renewable Energy* 28. 2003. pp. 1433–1445.
- [15] Nagy, D., Rácz, E., Varga, A. Ruf, H., Neuchel, E., R.: Comparison of electric current – voltage, characteristics and maximal power point values of differently and artificially aged solar panels. *Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. 2016. p. 295-300.
- [16] Varga, A., Libor, J., Rácz, E., Kádár, P.: A small laboratory-scale experimental method and arrangement for investigating wavelength dependent irradiation of solar cells. *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. 2014. p. 137-141.
- [17] Radziemska, E.: The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*. Vol. 28. No. 1. 2003. pp. 1-12.
- [18] Skoplaki, E., Palyvos, J.A.: On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. Vol. 83. No. 5. 2009. pp. 614-624.
- [19] Siddiqui, R., Kumar, R., Jha, K.G., Morampudi, M., Rajput, P., Lata, S., Agariya, S., Nanda, G., Raghava, S.S.: Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability. *Energy*. Vol. 107. No. 15. 2016. pp. 550-561.
- [20] Munoz-Garcia, M.A., Marin, O., Alonso-García, M.C., Chenlo, F.: Characterization of thin film PV modules under standard test conditions: Results of indoor and outdoor measurements and the effects of sunlight exposure. *Solar Energy*. Vol. 86. No. 10. 2012. pp. 3049-3056.

- [21] Földváry, Á.: Napelemek laboratórium. Budapest University of Technology and Economics. Performance materials. 2015. p. 32.
- [22] Precup, R.E., Preitl, S., Korondi, P.: Fuzzy Controllers With Maximum Sensitivity for Servosystems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 3. 2007. pp. 1298-1310.
- [23] Ürmös, A., Farkas, Z., Farkas, M., Sándor, T., Kóczy, L.T., Nemcsics, Á.: Application of self-organizing maps for technological support of droplet epitaxy, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 14. No. 4, 2017. pp. 207-224.
- [24] Shams, M., Rashedi, E., Dashti, S.M., Hakimi, A.: Ideal gas optimization algorithm. International Journal of Artificial Intelligence. Vol. 15. No. 2. 2017. pp. 116-130.
- [25] Pareja-Aparicio, M., Pelegrí-Sebastia, J., Sogorb, T., Llario, V.: Modeling of Photovoltaic Cell Using Free Software Application for Training and Design Circuit in Photovoltaic Solar Energy. INTECH World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher. Chapter 6. 2013. p. 21.
- [26] Kandil, M.K., Altouq, M.S., Al-asaad, A.M., Alshamari, L.M., Kadad, I.M., Ghoneim, A.A.: Investigation of the Performance of CIS Photovoltaic Modules under Different Environmental Conditions. Smart Grid and -Renewable Energy. No. 2. 2011. pp. 375-387.
- [27] Mishima, T., Taguchi, M., Sakata, H., Maruyama, E.: Development status of high-efficiency HIT solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 95. 2011. pp. 18-21.
- [28] Singh, P., Ravindra, N.M.: Temperature dependence of solar cell performance – an analysis. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 101. 2012. pp. 36-45.
- [29] Chantana, J., Kato, T., Sugimoto, H., Minemoto T.: Time-resolved photoluminescence of Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin films and temperature dependent current density-voltage characteristics of their solar cells on surface treatment effect. Current Applied Physics. Vol. 17. No. 4. 2017. pp. 461-466.
- [30] Ashi, S., Teranishi, H., Kusaki, K., Kaizu, T., Kita, T.: Two-step photon up-conversion solar cell. Nature Communications. 2017. p. 9.
- [31] Malik, A.Q., Ming, L.C., Sheng, T.K., Blundel, M.: Influence of Temperature on the Performance of Photovoltaic Polycrystalline Silicon Module in the Bruneian Climate. AJSTD Vol. 26 No. 2 2010. pp. 61-72.

- [32] Yadav, P., Pandey, K., Bhatt, V., Kumar, M., Kim, J.: Critical aspects of impedance spectroscopy in silicon solar cell characterization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 76. 2017. pp. 1562-1578.
- [33] Altermatt, P., Reinders, A., Verlinden, P., van Sark W., Freundlich A.: Numerical Simulation of Crystalline Silicon Solar Cells. *Photovoltaic Solar Energy*. 2017. p. 682.
- [34] Sundarabalan, C.K., Selvi, K., Sakeenathul Kubra, K.: Performance Investigation of Fuzzy Logic Controlled MPPT for Energy Efficient Solar PV Systems. *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. Vol. 326. 2014. pp. 761-770.
- [35] Verma, D., Nema, S., Shandilya, A.M., Soubhagya Dash, K.: Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 54. 2016. pp. 1018-1034.
- [36] Gobhinat, S., Ram Abhinav, P.S., Gowtham, V., Lokesh, S.: A Prototype Development of MPPT Algorithm based Solar Photovoltaic Charging System. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*. Vol. 6. No. 2. 2016. 139-143.
- [37] Guo, J., Lin, S., Bilbao, J.I., White, S.D., Sproul, A.B.: A review of photovoltaic thermal (PV/T) heat utilisation with low temperature desiccant cooling and dehumidification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 67. 2017. pp. 1-14.
- [38] Farshchimofared, M., Bilbao, J.I., Sproul, A.B.: Full optimisation and sensitivity analysis of a photovoltaic–thermal (PV/T) air system linked to a typical residential building. *Solar Energy*. Vol. 136. 2016. 15-22.
- [39] Ali, H. A., Hamad, S. H., Abdulrazzaq, A. A.: Performance investigation of grid connected photovoltaic system modeling based on MATLAB simulation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 8. No. 6. 2018. pp. 4847-4854.
- [40] Barukcic, M., Corluka, V., Miklosevic, K.: The irradiance and temperature dependent mathematical model for estimation of photovoltaic panel performances. *Energy Conversion and Management*. Vol. 101. 2015. pp. 229-238.
- [41] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A. A., Nehra, S. P., Dhaka, M. S.: A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature. *Energy Reports*. Vol. 1. 2015. pp. 104-109.
- [42] Benghanem, M., Al-Mashraqi, A. A., Daffallah, K. O.: Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites. *Renewable Energy*. Vol. 89. 2016. pp. 51-59.
- [43] Gonzalez-Diaz, V. R., Romero-Camacho, S., Ambrosio-Lazaro, R. C., Mino-Aguilar, G., Bonizzoni, E., Maloberti, F.: A behavioral model for solar cells with transient irradiation and temperature assessment. *IEEE Access*. Vol. 7. 2019. pp. 90882-90890.

- [44] O'Kane, S. E. J., Richardson, G., Pockett, A., Niemann, R. G., Cave, J. M., Sakai, N., Eperon, G. E., Snaith, H. J., Foster, J. M., Cameron, P. J., Walker, A. B.: Measurement and modeling of dark current decay transients in perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*. Vol. 5. 2017. pp. 452-462.
- [45] Laudani, A., Fulginei, F. R., Salvini, A.: High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms. *Solar Energy*. Vol. 103. No. 3. 2014. pp. 316-326.
- [46] Abbassai, A., Gammoundi, R., Dami, M. A., Hasnaoui, O., Jemli, M.: An improved single-diode model parameters extraction at different operating conditions with a view to modeling a photovoltaic generator: A comparative study. *Solar Energy*. Vol. 155. 2017. pp. 478-489.
- [47] Barth, N., Jovanovic, R., Ahzi, S., Khaleel, M. A.: PV panel single and double diode models: Optimization of the parameters and temperature dependence. *Solar Energy Materials and Solar Energy*. Vol. 148. 2016. pp. 87-98.
- [48] Khanna, V., Das, B. K., Bisht, D. V., Sing, P. K.: A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm. *Renewable Energy*. Vol. 78. 2015. pp. 105-113.
- [49] Zhang, Y., Gao, S., Gu, T.: Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model. *Solar Energy*. Vol. 144. 2017. pp. 349-355.
- [50] Bana, S., Saini, R. P.: Identification of unknown parameters of a single diode photovoltaic model using particle swarm optimization with binary constraints. *Renewable Energy*. Vol. 101. 2017. pp. 1299-1310.
- [51] Orioli, A., Di Gangi, A.: A procedure to evaluate the seven parameters of the two-diode model for photovoltaic modules. *Renewable Energy*. Vol. 139. 2019. pp. 582-599.
- [52] Babu, T. S., Ram, J. P., Sangeetha, K., Laudani, A., Rajasekar, N.: Parameter extraction of two diode solar PV model using Fireworks algorithm. *Solar Energy*. Vol. 140. 2016. pp. 265-276.
- [53] Gao, X., Cui, Y., Hu, J., Xu, G., Wang, Z., Qu, J., Wang, H.: Parameter extraction of solar cell models using improved shuffled complex evolution algorithm. *Energy Conversion and Management*. Vol. 157. 2018. pp. 460-479.
- [54] Fathy, A., Rezk, H.: Parameter estimation of photovoltaic system using imperialist competitive algorithm. *Renewable Energy*. Vol. 111. 2017. pp. 307-320.

- [55] Alam, D. F., Yousri, D. A., Eteiba, M. B.: Flower pollination algorithm based solar PV parameter estimation. *Energy Conversion and Management*. Vol. 101. 2015. pp. 410-422.
- [56] Merchaoui, M., Skaly, A., Mimouni, M. F.: Particle swarm optimization with adaptive mutation strategy for photovoltaic solar cell/module parameter extraction. *Energy Conversion and Management*. Vol. 175. 2018. pp. 151-163.
- [57] Chellaswamy, C., Ramesh, R.: Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy*. Vol. 97. 2016. pp. 823-837.
- [58] Ram, J. P., Babu, T. S., Dragicevic, T., Rajasekar, N.: A new hybrid bee pollinator flower pollination algorithm for solar PV parameter estimation. *Energy Conversion and Management*. Vol. 135. 2017. pp. 463-476.
- [59] Sangeetha, K., Babu, T. S., Sudhakar, N., Rajasekar, N.: Modeling, analysis and design of efficient maximum power extraction method for solar PV system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 15. 2016. pp. 60-70.
- [60] Pusztai, L., Kocsi, B., Budai, I.: Making engineering projects more thoughtful with the use of fuzzy value-based project planning. *Pollack Periodica*. Vol. 14. No. 1. 2019. pp. 25-34..
- [61] Kinczer, T., Sulek, P.: The impact of genetic algorithm parameters on the optimization of hydro-thermal coordination. *Pollack Periodica*. Vol. 11. No. 2. 2016. pp. 113-123.
- [62] Ferencz, E., Goldschmidt, B.: A novel program synthesis approach in test driven software development. *Pollack Periodica*. Vol. 12. No. 2. 2017. pp. 3-15.
- [63] Kovács, G., Yussupova, N., Rizanov, D.: Resource management simulation using multi-agent approach and semantic constraints. *Pollack Periodica*. Vol. 12. No. 1. 2017. pp. 45-58.
- [64] Wood, S., O'Connor, D., Jones, C. W., Claverley, J. D., Blakesely, J. C., Giusca, C., Castro, F. A.: Transient photocurrent and photovoltage mapping for characterization of defects in organic photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 161. 2017. pp. 89-95.
- [65] Wang, W.: Simulate a 'Sun' for Solar Research: A Literature Review of Solar Simulator Technology. Royal Institute of Technology. Department of Energy Technology. Swede. Stockholm. 2014. p. 7.
- [66] Kohraku, S., Kurakowa, K.: A Fundamental Experiment for Discrete-Wavelength LED Solar Simulator. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90. 2006. pp. 3364-3370.

- [67] Bliss, M., Betts, R., T., Gottschlag, R.: An LED-based photovoltaic measurement system with variable spectrum and flash speed. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93. 2009. pp. 825-830.
- [68] Kim, A. K., Dostart, N., Huynh, J., Krein, T., P.: Low-Cost Solar Simulator Design for Multi-Junction Solar Cells in Space Applications. *Power and Energy Conference at Illinois*. 2014. p. 6.
- [69] Kativar, M., Balkom, M., Rindt, C.C.M., Keizer, C., Zondag, H.A.: Numerical model for the thermal yield estimation of unglazed photovoltaic-thermal collectors using indoor solar simulator testing. *Solar Energy*. Vol. 155. No. 10. 2017. pp. 903-919.
- [70] Tawfik, M., Tonnellier, X., Sansom, C.: Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 90. 2018. pp. 802-813.
- [71] González, M.I.: An LED solar simulator for student labs. *Physics Education*. Vol. 52. No. 3. 2017. p. 5.
- [72] Sowmy, D.S., Ara, P.J.S., Prado, R.T.A.: Uncertainties associated with solar collector efficiency test using an artificial solar simulator. *Renewable Energy*. Vol. 108. 2017. pp. 644-651.
- [73] Gu, R., Ding, J., Wang, Y., Yuan, Q., Wang, W., Lu, J.: Heat transfer and storage performance of steam methane reforming in tubular reactor with focused solar simulator. *Applied Energy*. Vol. 233-234. 2019. pp. 789-801.
- [74] Moss, R.W., Shire, G.S.F., Eames P., Henshall P. Hyde T., Arya F.: Design and commissioning of a virtual image solar simulator for testing thermal collectors. *Solar Energy*. Vol. 159. 2018. pp. 234-242.
- [75] Boubault, A., Yellowhair, J., Ho, C.K.: Design and Characterization of a 7.2 kW Solar Simulator. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 139. No. 3. 2017. p. 8.
- [76] Esen, V., Saglam, S., Oral, B.: Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 77. 2017. pp. 1240-1250.
- [77] Wang, W., Aichmayer, L., Garrido, J., Laumert, B.: Development of a Fresnel lens based high-flux solar simulator. *Solar Energy*. Vol. 144. 2017. pp. 436-444.
- [78] Kenny, R.P., Vigan, D., Salis, E., Bardizza, G., Norton, M., Müllejans, H., Zaiman, W.: Power rating of photovoltaic modules including validation of procedures to implement IEC 61853-1 on solar simulators and under natural sunlight. Paper Presented at 27TH EU PVSEC 2012. Frankfurt. Germany. *Photovoltaics*. Vol. 21. No. 6. 2013. pp. 1384-1399.

- [79] Jiang, H., Lu, L., Sun, K.: Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric Environment*. Vol. 45. No. 25. 2011. pp. 4299-4304.
- [80] Chen, F., Wittkopf, S.K., Ng, P.K., Du, H.: Solar heat gain coefficient measurement of semi-transparent photovoltaic modules with indoor calorimetric hot box and solar simulator. *Energy and Buildings*. Vol. 53. 2012. pp. 74-84.
- [81] Hamadani, B.H., Chua, K., Roller, J., Bennahmias, M.J., Campbell, B., Yoon, H.W., Dougherty, B.: Towards realization of a large-area light-emitting diode-based solar simulator. *Photovoltaics*. Vol. 21. No. 4. 2013. pp. 779-789.
- [82] Guo, P., Wang, Y., Meng, Q., Li, J.: Experimental study on an indoor scale solar chimney setup in an artificial environment simulation laboratory. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 107. 2016. pp. 818-826.
- [83] 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. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 133. No. 4. 2011. p. 4.
- [84] Pozna, C., Precup, R.E., Tar, J.K., Skrjank, I., Preitl, S.: New results in modelling derived from Bayesian filtering. *Knowledge-Based Systems*. Vol. 23. No. 2. 2010. pp. 182-194.
- [85] Vrkalovic, S., Lunca, E.C., Borlea, J.D.: Model-free sliding mode and fuzzy controllers for reverse osmosis desalination plants. *International Journal of Artificial Intelligence*. Vol. 16. No. 2. 2018. pp. 208-222.
- [86] Cui, L., Miao, R., Wang, K., Thompson, D., Zotti, L.A., Cuevas, J.C., Meyhofer, E., Reddy, P.: Peltier cooling in molecular junctions. *Nature Nanotechnology*. Vol. 13. 2018. pp. 122-127.
- [87] Pounjar, P., Winston, D.P., Kabeel, A.E., Kumar, B.P., Manokar, A.M., Sathyamurthy, R., Christabel, S.C.: Experimental investigation on Peltier based hybrid PV/T active solar still for enhancing the overall performance. *Energy Conversion and Management*. Vol. 168. 2018. pp. 371-381.
- [88] Tijani, I., Al Hamadi, A.A.A., Al Naqbi, K.A.S.S., Almarzooqi, R.I.M., Al Rahbi, N.K.S.R.: Development of an automatic solar-powered domestic water cooling system with multi-stage Peltier devices. *Renewable Energy*. Vol. 128. 2018. pp. 416-431.
- [89] Abderrezek, M., Fathi, M.: Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Solar Energy* Vol. 142. 2017. pp. 308-320.

- [90] Bhattacharya, T., Chakraborty, A.K., Pal, K.: Influence of Environmental Dust on the Operating Characteristics of the Solar PV Module in Tripura, India. *International Journal of Engineering Research*. Vol. 4. No. 3. 2015. pp. 141-144.
- [91] Rao, A., Pillai, R., Mani, M., Ramamurthy, P.: An experimental investigation into the interplay of wind, dust and temperature on photovoltaic performance in tropical conditions', *Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Energy Technologies*. 2013. pp. 2303-2310.
- [92] Adinoyi, M.J., Said, S.A.M.: Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*. Vol. 60. 2013. pp. 633-636.
- [93] Ndiaye, A., Kébe, C.M.F., Bilal, B.O., Charki, A., Sambou, V., Ndiaye, P.A.: Study of the Correlation Between the Dust Density Accumulated on Photovoltaic Module's Surface and Their Performance Characteristics Degradation. *Innovation and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas*. 2018. pp. 31-42.
- [94] Gürtürk, M., Benli, H., Ertürk, N.K. Effects of different parameters on energy – Exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 92. No. 9. 2018. pp. 426-439.
- [95] Oh, S., Figgis, B.W., Rashkeev, S.: Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels. *Solar Energy*. Vol. 211. 2020. pp. 412-417.
- [96] Abass, K.I., Al-Zubaidi, D.S.M., Al-Waeli, A.A.K.: Effect of pollution and dust on PV performance. *International Journal of Civil. Mechanical and Energy Science (IJCMES)*. Vol. 3. No. 3. 2017. pp. 181-185.
- [97] Al Siyabi, I., Al Mayasi, A., Al Shukaili, A., Khanna, S.: Effect of Soiling on Solar Photovoltaic Performance under Desert Climatic Conditions. *Energies*. Vol. 14. 2021. papr. 659.
- [98] Alghamdi, A.S.. Bahaj, A.S.. Blunden, L.S.. Wu, Y.: Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems. *Energies*. Vol. 12. 2019. paper. 2923.
- [99] 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. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82. No. 1. 2018. pp. 743-760.
- [100] Alonso-Montesinos, J., Martínez, F.R., Polo, J., Martín-Chivelet, N., Batlles, F.J.: Economic Effect of Dust Particles on Photovoltaic Plant Production. *Energies*. Vol. 13. 2020. paper. 6376.

- [101] Liu, X., Yue, S., Lu, L., Li, J.: Study on Dust Deposition Mechanics on Solar Mirrors in a Solar Power Plant. *Energies*. Vol 12. 2019. paper. 4550.
- [102] Klugmann-Radziemska, E. Shading, Dusting and Incorrect Positioning of Photovoltaic Modules as Important Factors in Performance Reduction. *Energies*. Vol. 13. 2020. paper. 1992.
- [103] 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. *Renewable Energy*. Vol 161. 2020. pp. 570-578.
- [104] 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*. Vol. 14. 2021. paper. 445.
- [105] Al Siyabi, I., Al Mayasi, A., Al Shukaili, A., Khanna, S.: Effect of Soiling on Solar Photovoltaic Performance under Desert Climatic Conditions. *Energies*. Vol. 14. 2021. paper. 659.
- [106] Ali, M.U., Saleem, S., Masood, H., Kallu, K.D., Masud, M., Alvi, M.J., Zafar, A.: Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study. *International Journal of Energy Research*. Vol. 1. 2021. p. 12.
- [107] Ikejiofor, O.E., Asuamah, Y.E., Njoku, H.O., Enibe, S.O.: Detection of Hotspots and Performance Deteriorations in PV Modules under Partial Shading Conditions Using Infrared Thermography. *Engineering Proceedings*. Vol. 2. 2020. p. 71.
- [108] Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., Alonso-García, M.C., Santos, J.D., Morales-Aragonés, J.I., Alonso-Gómez, V., Moretón-Fernández, Á., González-Rebollo, M.Á., Martínez-Sacristán, O.: Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: Experimental study and comparison. *Energy*. Vol. 205. 2020. paper. 117930. p. 13.
- [109] Tang, S., Xing, Y., Chen, L., Song, X., Yao, F.: Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*. Vol. 214. 2021. pp. 51-61.
- [110] Gerber, A., Huhn, V., Tran, T.M.H., Siegloch, M., Augarten, Y., Pieters, B.E., Rau, U.: Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 135. 2015. pp. 35-42.
- [111] Salazar, A.M., Macabebe, E.Q.B.: Hotspots Detection in Photovoltaic Modules Using Infrared Thermography. *MATEC Web Conf*. 2016. paper. 10015.

- [112] Berardone, I., Lopez-Garcia, J., Paggi, M.: Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle. *Solar Energy*. Vol. 173. 2018. pp. 478-486.
- [113] Ballestín-Fuertes, J., Muñoz-Cruzado-Alba, J., Sanz-Osorio, J.F., Hernández-Callejo, L., Alonso-Gómez, V., Morales-Aragones, J.I., Gallardo-Saavedra, S., Martínez-Sacristan, O., Moretón-Fernández, Á.: Novel Utility-Scale Photovoltaic Plant Electroluminescence Maintenance Technique by Means of Bidirectional Power Inverter Controller. *Applied Sciences*. Vol. 10. 2020. paper. 3084.
- [114] 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. *Solar Energy*. Vol. 173. 2018. pp. 201-208.
- [115] 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*. Vol. 12. 2019. paper. 4047.
- [116] Tang, W., Yang, Q., Xiong, K., Yan, W.: Deep learning based automatic defect identification of photovoltaic module using electroluminescence images. *Solar Energy*. Vol. 201. 2020. pp. 453-460.
- [117] 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*. Vol. 21. 2021. paper. 4292.
- [118] Chen, H., Zhao, H., Han, D., Liu, K.: Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 118. 2019. pp. 22-33.
- [119] Parikh, H.R., Buratti, Y., Spataru, S., Villebro, F., Reis Benatto, G.A.D., Poulsen, P.B., Wendlandt, S., Kerekes, T., Sera, D., Hameiri, Z.: Solar Cell Cracks and Finger Failure Detection Using Statistical Parameters of Electroluminescence Images and Machine Learning. *Applied Sciences*. Vol. 10. 2020. paper. 8834.
- [120] 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. *Solar Energy*. Vol. 194. 2019. pp. 688-695.

- [121] Drabczyk, K., Kulesza-Matlak, G., Drygała, A., Szindler, M., Lipiński, M.: Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts. *Solar Energy*. Vol. 126. 2016. pp. 14-21.
- [122] Frazão, M., Silva, J.A., Lobato, K., Serra, J.M.: Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. *Measurement*. Vol. 99. 2017. pp. 7-12.
- [123] 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. *Solar Energy*. Vol. 185. 2019. pp. 455-468.
- [124] 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*. Vol. 13. 2020. paper. 3819.
- [125] 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*. Vol. 189. 2019. paper. 116319.
- [126] 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*. Vol. 11. 2018. paper. 2659.
- [127] Khan, F., Rezgoui, 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*. Vol. 13. 2020. paper. 470.
- [128] Dasgupta, K., Ray, S., Mondal, A., Gangopadhyay, U.: Performance analysis of crystalline-Si solar cell using MATLAB simulation. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 39. No. 5. 2021. pp. 1894-1898.
- [129] Carolus, J., Tsanakas, J. A., Heide, A., Voroshazi, E., Ceuninck, W., Daenen, M.: Physics of potential-induced degradation in bifacial p-PERC solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 200. 2019. paper. 109950.
- [130] Barbato, M., Barbato, A., Meneghini, M., Tavernaro, G., Rossetto, M., Meneghesso, G.: Potential induced degradation of N-type bifacial silicon solar cells: An investigation based on electrical and optical measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 168. 2017. pp. 51-61.
- [131] Šlamberger, J., Schwark, M., Van Aken, B. B., Vrtič, P.: Comparison of potential-induced degradation (PID) of n-type and p-type silicon solar cells. *Energy*. Vol. 161. 2018. pp. 266-276.

- [132] Kherici, Z., Kahoul, N., Cheghib, H., Younes, M., Affari, B. C.: Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates. *Solar Energy*. Vol. 224. 2021. pp. 279-284.
- [133] Asadpour, R., Sun, X., Alam, M. A.: Electrical Signatures of Corrosion and Solder Bond Failure in c-Si Solar Cells and Modules. *IEEE Journal of Photovoltaic*. Vol. 9. No. 3. 2019. pp. 759-767.