

## NAPELEMEK HIBÁINAK FELTÁRÁSA HŐKAMERÁS VIZSGÁLATTAL

**Matusz-Kalász Dávid**

egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,  
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [elkmd@uni-miskolc.hu](mailto:elkmd@uni-miskolc.hu)

**Balázs Péter**

villamosmérnök alapszakos hallgató, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,  
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: [balazs.peter98@gmail.com](mailto:balazs.peter98@gmail.com)

### **Absztrakt**

*A tanulmány egy olyan módszert mutat be, ami a napelemes erőművek működését hivatott javítani. A napelemes erőművek nem állandó teljesítményszinten üzemelnek, működésük a napsütéses órák száma szerint ciklikusan változó. Ebből kifolyólag névleges éves teljesítményük csupán 10-15%-át képesek megtermelni. Ez a szám tovább csökkenhet a nem megfelelő üzemi körülmények hatására, a meghibásodott napelem modulok által okozott teljesítménykiesés miatt. A hőkamerás vizsgálatok hatékony és kifizetődő hibakereső módszer, ami az elkövetkező években egyre nagyobb figyelmet fog kapni a napelemes erőmű üzemeltetésben során.*

**Kulcsszavak:** napelem, hőkamerás vizsgálat, állapotfelmérés, hibakeresés

### **Abstract**

*This paper presents a method to improve the operation of solar power plants. Solar power plants do not operate at a constant power level, their operation varies cyclically according to the number of sunny hours. As a result, they are only able to produce 10-15% of their nominal annual output. This number can be further reduced due to improper operating conditions due to power loss caused by faulty solar modules. Thermal imaging tests are an effective and remunerative troubleshooting method, which will receive increasing attention in the operation of the solar power plant in the coming years.*

**Keywords:** solar cell, thermal imaging, condition assessment, troubleshooting

### **1. Bevezetés**

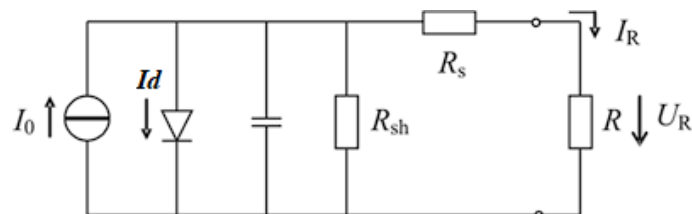
Napjainkra a mindennapjaink szerves és nélkülözhetetlen részévé vált a villamosenergia-felhasználás, amely évről-évre egyre nagyobb mértékeket ölt. A környezet szennyezés és a globális felmelegedés lassításának érdekében fontos, hogy a megtermelt villamosenergia minél inkább megújuló energiaforrásokból származzon, például napenergiából. Ehhez fontos a napenergia megtermelését szolgáló eszközök, berendezések vizsgálata, amely módszerrel, illetve módszerekkel hosszútávú működésükre és hatékonyságukra lehet következtetni, az ismert hibákat feltárni és a negatív hatású körülményeket megszüntetni, illetve megelőzni. Ezen ismeretek gazdasági megtérülés szempontjából is fontosak.

Dolgozatunkban a napelemes rendszerek és napelem panelek szemmel nem észrevehető, ám de annál jelentősebb hibáinak feltárási módszerét szeretnénk bemutatni, amely hibák hosszú távon nagyban befolyásolják, jellemzően csökkentik a napelemek energiatermelést és csökkentik az élettartamát. Hőkamerás felvételekkel szeretnénk rávilágítani a panelek és cellák melegedésére, melyek jelentős teljesítmény és hatásfok csökkenést eredményeznek, valamint azok tönkremeneteléhez vezetnek. Ehhez fontosnak tartjuk ismertetni a napelemek anyagtulajdonságainak és egyéb villamos tulajdonságainak hőmérsékletfüggését, amelyre visszavezethető a melegedés okozta veszteség.

## 2. A napelemek villamos tulajdonságai

A napelemek olyan berendezések, amelyek napenergiából közvetlenül egyenáramot képesek előállítani fényelektromos hatás révén. Ez a hatás a félvezetőkön és a gyártási technológiájukon alapszik. Ilyen félvezetők a szilícium (Si), germánium (Ge), szelén (Se), gallium-arszenid (GaAs) és még sok más. Az előállított egyenáramot inverterrel váltakozóárammá lehet alakítani, helyben felhasználni, vagy közcélú villamos hálózatra táplálni. Közvetlenül akkumulátorban is tárolható, illetve egyből egyenáramot igénylő fogyasztók alkalmazásával felhasználható [1, 2].

A manapság használt napelemek döntő többsége szilícium félvezetőkön alapszik, a folyamatos kutatások eredményeképp maximális hatásfokuk javul, míg gyártásuk egyre olcsóbbá válik. Az elmúlt 10 évben a napelemek hatásfoka csaknem duplájára (10%-ról 18%-ra), gyártási költségük pedig kevesebb, mint a felére csökkent. Alapvetően négy típusát különböztetjük meg, melyek a következők: amorf, monokristályos, polikristályos és organikus napelemek. Jelenleg a polikristályos napelemek a legjobb ár-érték arányúak. Az energiaátalakítás oly módon történik, hogy az elnyelt sugárzás közvetlenül villamos töltéseket hoz létre az anyagban. A p-n átmenetre jellemző Eg tiltott-sáv szélességnél nagyobb energiával becsapódó fotonok generálják a töltéshordozókat. Ezek a töltéshordozó párok a p-n átmenetnél szétválasztódnak a kialakított villamos tér hatására. Az elektronok a félvezető egyik oldalára az n-tartományba, míg a lyukak a másik oldalára a p-tartományba sodródnak. A létrejött fotoáram a külső áramelvezető kontaktusokon keresztül elvezethető. Ha süt a Nap a napelemet, annak alsó és felső rétege között egyenfeszültség keletkezik és elkezdnek a töltések áramolni. Az eszközt úgy tekinthetjük, mint egy galvánelemet [1, 2]. A keletkezett fotoáram hatására a napelem kapcsain  $U_{\text{ü}}$  üresjárású feszültséget és  $I_{\text{r}}$  rövidzárási áramot mérhetünk. Amennyiben a kivezetésre egy fogyasztót (R ellenállást) kapcsolunk, abban a pillanatban a félvezető két oldalán felhalmozódó töltéshordozók mennyisége csökken. Ez pedig az elektromos tér töltéshordozó szétválasztó hatását is csökkenti. Ekkor a terhelő ellenálláson U feszültség és I áram mérhető. A kivezetésen mérhető  $I_{\text{R}}$  áram az  $I_0$  fotoáram és az  $I_{\text{D}}$  diódaáram különbségéből adódik (1. ábra) [1, 3]. A napelem ideális elektronikai kapcsolása nem tartalmaz kapacitív és ohmikus jellegű elemeket csak egy dióda és egy vele párhuzamosan kapcsolt áramgenerátorból áll. A valós kapcsolást a belső ellenállás, vezetékek ellenállása és parazita kapacitás jelképezik. A parazita kapacitás kellően nagy, így zavarás nélkül elhanyagolható az  $I_{\text{c}}$  kapacitásáram és az  $I_{\text{Rsh}}$  ellenálláson folyó árammal együtt [3].



1. ábra. Napelem valóságos elektronikai kapcsolása

A fotóáram egyenesen arányos a megvilágítás erősségével, másrészt a fotófeszültség logaritmikusan mértékben függ tőle. Ebből kaphatjuk meg a rövidzárási áramot is  $U=0$ , illetve az üresjáratú feszültséget  $I=0$  helyettesítéssel (1. képlet). Tehát a napelem villamos paraméterei jelentősen függenek a hőmérséklettől (2. ábra) [3, 4, 7].

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

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

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

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

ahol:  $I_S$  - telítési áramerősség,  $K$  - Boltzmann állandó,  $T$  - hőmérséklet,  $U_T$  - termikus feszültség  $\frac{K \times T}{e}$ . Ennek megfelelően az  $U_{\ddot{u}}$  üresjáratú feszültség az 5. képlet alapján szállítható.

$$U_{\ddot{u}} = \frac{K \times T}{e} \times \ln\left(\frac{I_{Foto}}{I_S} + 1\right) = U_T \times \ln\left(\frac{I_{Foto}}{I_S} + 1\right) \quad (5)$$

Az üresjáratú kapocsfeszültség ( $U_{\ddot{u}}$ , vagy  $U_{oc}$ ) logaritmikusan növekszik a háttérsugárzás növekedésére, míg a rövidzárási áram ( $I_{sc}$ ) lineáris függvénye a háttérsugárzásnak. A besugárzás hatására a cella hőmérséklet nő. A cellahőmérséklet emelkedésének hatására a kapocsfeszültség lineárisan csökken, így a cella hatékonysága is csökken. A rövidzárási áram kismértékben növekszik a cellahőmérséklet növekedésével [3, 9].

A napelem teljesítménye a rákapcsolt terhelésen lévő áram és feszültség szorzatából lehet meghatározni.

$$P = UI = UI_{foto} - UI_S \left( e^{\frac{eU}{KT}} - 1 \right), \quad (6)$$

ahol:  $P$  a hasznos teljesítmény.

Megkeressük az egyenlet szélső értékét, a  $\frac{\partial P}{\partial U} = 0$  feltétellel. Ebből fejezhető ki a maximális teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség ( $I_m$ ) és feszültség ( $U_m$ ) [3].

Ha sikerül a terhelést optimálisan megválasztani, akkor a kivehető teljesítmény a munkaponti feszültség és a munkaponti áram szorzata. Ideális esetben a napelem belső ellenállása és a terhelés ellenállása megegyező értékű és ekkor nyerhető ki a maximális teljesítmény. Ez függ a napelem megvilágításától, a megválasztott munkaponttól és a napelem életkorától. Ugyanis a napelem öregedésével ez az érték csökken, ami által csökken a napelem hatásfoka is [3].

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

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

A napelem hatásfokának kiszámításánál nagyon fontos paraméter a félvezető anyagra jellemző ( $E_g$ ) tiltott sáv nagysága. Ha a beeső foton energiája ( $E_{foton}$ ) kisebb, mint az anyagra jellemző tiltott sáv szélessége, akkor az nem fog töltéshordozókat kelteni. A töltéshordozó-generálás elengedhetetlen feltétele,

hogy a beeső foton energiája legalább akkora legyen, mint a tiltott sáv szélessége. Ha több, akkor az a többletenergia ( $E_g - E_{\text{foton}}$ ) nagyságú hőmennyiségként disszipálódik [3].

A valóságos hatásfok értékek a gyártási technológiától függően többé-kevésbé kisebbek, amik többnyire reflexiós, termikus és rekombinációs veszteségekből adódnak, de a rosszul vezetett kontaktus is beárnyékolhat.

További hatásfokváltozást befolyásoló tényező a félvezető hőmérséklete. Sajnos tudomásul kell veyük, hogy a napsugárzási spektrumban nem csak a félvezető szempontjából jótékony tartomány található, hanem az infratartomány is. Hatására azonos megvilágítás mellett a rövidzárási áram jelentéktelen növekedését tapasztalhatjuk, viszont az üresjárati feszültség hőmérsékleti tényezője anyagfüggő. Tehát a napsugárzás növekedésével a napelemek teljesítménye ugyan nő, viszont belőle energiát kinyerni csak kisebb hatásfokkal tudunk.

### 3. A napelemek jellemzőinek hőmérsékletfüggése

Csakúgy, mint a legtöbb félvezető alapú eszköz esetében, a napelem egyes jellemzői is erős hőmérsékletfüggést mutatnak. A napelem, mint energiatermelő eszköz esetében ezek leglényegesebb megnyilvánulása, hogy a napelem által leadható teljesítmény jelentősen csökken az eszköz hőmérsékletének növekedésével. A félvezető eszközök hőmérsékletfüggését gyakorlatilag a felhasznált anyagok anyagtulajdonságai határozzák meg. A különböző félvezetők tiltott sáv szélessége eltérő, továbbá függ a hőmérséklettől is, és több módon befolyásolja a napelemek tulajdonságainak hőmérsékletfüggését. Az abszorpciós tényező számottevően növekszik a hőmérséklet növekedésével, ugyanakkor növekvő hullámhosszal ez a tényező csökken. A diffúziós hosszát és élettartamot számos paraméter befolyásolja, de általában feltételezhető, hogy a diffúziós hossz a hőmérséklettel valamelyest növekszik, mely befolyásolja többek között a telítési áram és a fotoáram hőmérsékletfüggését [3].

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

A napelem egydiódás modelljéből (1. ábra) láthattuk, hogy a p-n átmenet beépített tere által létrehozott áram egyrészt az eszköz által leadott áramból, illetve a diódán és a párhuzamos ellenálláson átfolyó, energiatermelés szempontjából veszteségnek tekintendő áramokból tevődik össze. Az, hogy egy adott eszköz esetén, a diódán és a párhuzamos ellenálláson mekkora áram folyik, az a napelemre kapcsolt terhelő ellenállástól, azaz a napelem munkapontjától (és természetesen valamelyest a soros ellenállásától) függ. A telítési áram növekedése rontja a napelemek paramétereit, és erősen növekszik a hőmérséklettel, így belátható, hogy a telítési áram eltérő hőmérsékletfüggése változtatja a napelem legtöbb paraméterének hőmérsékletfüggését is. Ebből következőleg a rövidzárási áram hőmérsékletfüggése függ a soros ellenállás, az idealitási tényező és a telítési áram hőmérsékletfüggésétől is. Az üresjárati feszültség hőmérsékletfüggését valamennyi tag befolyásolhatja, de gyakorlatilag a telítési áram hőmérsékletfüggése változtathatja.

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

A napelemek működésük során magas hőmérsékletre felmelegedhetnek, ennek kialakulásáért java-részt az őket érő napsugárzás tehető felelőssé. A növekvő megvilágítással a hasznos intenzitás mellett a napelem melegedéseért felelő sugárzás is növekszik.

Növekvő hőmérséklet hatására az  $U_{\bar{u}}$  feszültség csökken. Tehát adott megvilágítás mellett, különböző hőmérsékleten U-I karakterisztikák láthatók. A feszültség esésből közvetlenül következik a teljesítmény és hatásfok csökkenése is, ha a besugárzást állandónak vettük. Ezen változások magyarázata az, hogy a hőmérséklet növekedése esetén, a p-n átmenetben lejátszódó termikus generáció hatására nagymértékben megnövekszik a kisebbségi töltéshordozók koncentrációja, ez okozza a telítési áramsűrűség  $I_s$  megnövekedését és az üresjárás feszültség  $U_{\bar{u}}$  lecsökkenését.

A megvilágítás hatására a napelem melegszik, ezen felül a nagyobb intenzitás nagyobb átfolyó áramot jelent, amely négyzetes arányban tovább növeli a napelem hőmérsékletét. Emiatt nem csak a környezeti hőmérséklet, hanem a napelem belső ellenállásán hővé alakuló teljesítmény is veszteséget jelent. Ezek alapján elmondható, hogy a megvilágítás intenzitásának növekedésével csökken a napelem hatásfoka. A napelem üzemi hőmérsékletének meghatározása [4, 7]:

$$T_{nf} = \frac{T_n - T_k}{E_{int\ szt}} * E_{int} + T_k \quad (8)$$

Ahol:  $T_{nf}$ -a napelem felületi hőmérséklete (K),  
 $T_n$ -a napelem névleges hőmérséklete (K),  
 $T_k$ - a környezeti hőmérséklet (K),  
 $E_{int}$  - a megvilágítás intenzitása ( $W/m^2$ ),  
 $E_{int\ szt}$  - a sztenderd megvilágítás intenzitása ( $1000W/m^2$ ).

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

A napelemek feszültségének és áramának (ezért teljesítményének is) van hőmérsékleti tényezője, ez a  $T_k$ . A hőmérsékleti együttható mértékegysége %, mely megadja, hogy egy Kelvin (Celsius fok) változás hatására az adott fizikai mennyiség milyen jelleggel (nő vagy csökken) (1. táblázat). A feszültség hőmérsékleti tényezője negatív, az áramé kis mértékben pozitív, ezért a teljesítmény változása magasabb hőmérsékletek esetében eredőben negatív. Ez nem kedvez az energiahozamoknak. Ebből következően elmondható, hogy a hőmérsékletnövekedés teljesítmény csökkenést és így hatásfok csökkenést eredményez [3].

1. táblázat. Hőmérsékleti együtthatók különböző típusú napelemeknél

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

#### 4. A napelem panelek felépítése és az árnyékhathatás

A napelem modulok cellákból állnak, melyek elektromosan fémes összeköttetésben vannak a panelon belül. A standard napelemes modulokat a gyártás során 60 cellából álló füzérbe fűzik össze. Ezt összesen három, dupla oszlopos sor alkotja, amelyek mindegyike általában 20 cellából áll. Az egyenként kis feszültséget előállító cellák (~0,5V), sorosan kapcsolódnak a megfelelő modul-feszültség szint eléréséig, az áramerősséget pedig a cellasorok párhuzamos kapcsolása adja. A feszültség a sorba kapcsolódó cellák számától, míg az áram elsődlegesen a cellák méretétől függ. Lehetnek különböző formájúak és számuk is változó. A 2. táblázat néhány jellegzetes napelem panel adatait tartalmazza [11].

2. táblázat. Tipikus modulok kimeneti értékei a cellák számától függően.

Cellák száma [db]	$P_{max}$	$V_{MPP}$	$I_{MPP}$	$U_{oc}$	$I_{sc}$	Hatásfok [%]
72	340 W	37,9 V	8,97 A	47,3 V	9,35 A	17,5
60	280 W	31,4 V	8,91 A	39,3 V	9,38 A	17,1
36	170 W	19,2 V	8,85 A	24,4 V	9,35 A	17

A szabadtéren elhelyezkedő eszközök esetében az árnyék napfüggő, helyzete és mérete változó, úgy nevezett vonuló árnyék. Ha a napelemes rendszer előtt, a nap irányából tárgyak vannak, akkor nagy valószínűséggel az árnyékuk a napelem felületére képződik le, de lehetnek a napelem felületén lévő tartós árnyékot képző anyagok is.

Leggyakrabban árnyékot képezhetnek [5, 6, 8]:

- Áramszolgáltató hálózati oszlop, pózna, szabadvezetékek.
- Villámhárító, kémény, antenna, tető törései.
- Épület, fa, domborzat.
- Felhő.
- Hó, esőcsepp.
- Madárpiszok.
- Növényzet.
- Napelemes rendszer többi része.
- Por és egyéb piszok a napelem felületén, (tartós árnyékok).

Az árnyékolás az egyik nagy problémája a napelemes rendszereknek. Alapvető dolog a témában, hogy a paneloknak fényre van szükségük az energia előállításához, mivel az árnyék a besugárzás, és intenzitás hatását csökkenti, így semmiféleképpen nem kedvező. A leárnyékolta celláknak megváltoznak a villamos paraméterei. Ha a cellák más-más feszültséget és áramerősséget adnak le, természetesen más és más a belső elektromos ellenállásuk. A sorba kötött cellákon átfolyó áram ennek köszönhetően különböző mértékben fogja az eltérő cellákat felmelegíteni.

Egyetlen cella leárnyékolása akár egy egész modul teljesítményét nullára redukálhatja. A kimeneti teljesítmény csökkenés arányos a leárnyékolta rész nagyságával, ha ez részben áttetsző, akkor ennek a területnek az intenzitás csökkenésével arányosan változik. Ezért, függetlenül attól, hogy az egyik cellának a fele árnyékolva van, vagy a cella egy sorának a fele árnyékolva van, a teljesítmény csökkenése azonos és arányos lesz az árnyékolta terület százalékaival, ebben az esetben 50% -kal (2. ábra) [10].



2. ábra. Cella részleges és teljes letakarása

A sorban lévő cellák közül valamely leárnyékolása, nem csak a feszültségének a hiányaként jelenik meg a teljesítményben. A soros kapcsolás miatt egyazon áram érték van a sztringen. A letakart cella árama lecsökken, és lehúzza a többi vele sorba kötött cella áramát is. A cellák száma lényegtelen abban az esetben, ha egy cella teljesen árnyékolt a sztring teljesítménye 0-ra csökken.

## 5. Hőkamerás vizsgálatok

A hőtérképezés vagyis (termográfia) arra szolgál, hogy vizuális formában is megvizsgálhassuk bizonyos anyagok hőmérsékletét. Minden tárgynak van energiája, amit elektromágneses sugárzással a felületen bocsált ki, ha a hőmérséklete nagyobb az abszolút 0K-nél ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Ez szabad szemmel nem látható tartomány ( $0.78 - 1000 \mu\text{m}$ ). A hőképképező berendezések, mint az ipari hőkamerák ezt térképezik és alakítják át láthatóvá. Ez úgy történik, hogy mesterséges színekkel különböző árnyalatokhoz különböző hőmérsékletet rendelnek. A meleg színek (világossárga) általában a magasabb hőmérsékletűeket, míg a hidegebb színek az alacsonyabbakat jelölik. A számszerűsítés érdekében a hőkamerás képhez, egy színskálát rendel számértékekkel, mellyel leolvasható az adott felület hőmérséklete. A hőkamerás felvételek készítésekor fontos a minőség érdekében a kamera tárgyhoz viszonyított helyzete. A megfelelő képképezőhöz ügyelni kell a kamera magasságára szögére és távolságára a felülethez képest. Mivel a napelemek ideális dőlésszöge kb.  $35-45^{\circ}$ , ehhez képest a kamera szöge  $60-120^{\circ}$  lehet. A távolság a kamera felbontásától függ, de többségében ez 2-3 méter között van.

Egy megfelelő hőkamerás eszközzel és vele rendszeres méréssel a napelemes rendszerek hibái jól feltérképezhetők és időben orvosolhatók. Ezen hibák megállapítási lehetősége és ezek elemzése alapvetően a munkám témája. Ennél a megállapítási módszernél az átlaghőmérséklettől való eltérés, túlmelegedés állapítható meg és ebből lehet a rendellenességre, hibára gyanakodni, amely azért fontos, mert a napelem alapanyaga, a szilícium tulajdonságai megváltoznak hő hatására. Ezeket a későbbiekben részletesebben ábrákkal is szemléltetem.

### A hibadiagnosztika előnyei:

- A rendszer, működés közben érintésmentesen vizsgálható.
- A gyártói hibák felismerhetők telepítés után.
- Gyors és hatékony hibafeltárás, mely által a megelőzés költséghatékonyabb, mint a kezelés.
- A teljes villamos rendszer vizsgálható.
- Láthatatlan hibák is megjeleníthetők.
- A telepítés utáni referenciaképek összehasonlíthatók a későbbi rendszerkörülmenyekkel.
- Garanciális viták bizonyítékaul is szolgálhat.

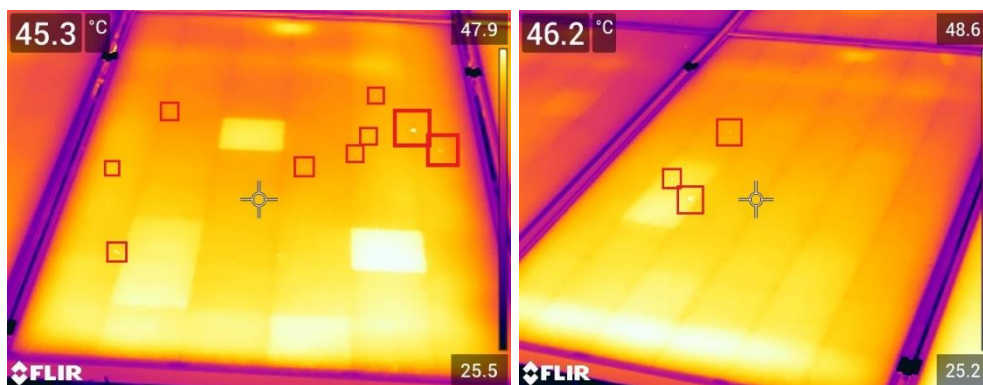
A hőkamerás vizsgálatokat és felvételeket egy hazai napelemes kiserőműben készültek egy állapotfelmérés és karbantartás alkalmával az egy ipari partnerünk a PV Napenergia Kft támogatásának köszönhetően. A képek ugyanolyan típusú napelemekről készültek, azonos időben és körülmények között FLIR System AB E75 típusú hőkamerával 72x72dpi felbontásban. A modulok hőmérséklete nem feltétlenül a valós értéket tükrözi az intenzitás-változásból származó hőmérsékleti tranzienst folyamat lefutásának jellege miatt, ezért inkább a paneleken belüli hőmérsékletkülönbség és hőmérsékleteloszlás a jelentős. Ennek megfelelően az elkészült felvételeken a napelem panel-területek hőmérséklet eloszlását, valamint annak differenciálját lehet megfigyelni rajtuk.

Az elkészült felvételeken jól elkülöníthetők az alábbi hőmérsékletkülönbséget okozó hibatípusok:

- gyártásból adód hibák, mikro repedések,
- csatlakozó doboz hibái, érintkezési és átmeneti ellenállások,
- cellák gyártásából származó különbségek,
- önárnyékolás,
- felületi szennyeződések,
- növényzet által okozott árnyékhatás.

A modulok gyártása nagy precizitású technológiai folyamatok során történik, de így is előfordul, hogy hiba keletkezik a termékben, melyet még a vizsgálatok sem feltétlenül tudnak egyből megállapítani. Ezek az eltérések, hibák idővel a rendszer üzeme közben a valós természeti feltételek hatására felerősödhetnek és egyre nagyobb problémát okoznak. Szembetűnővé csak a megfelelő vizsgálat által válhatnak. A legtöbb esetben már a gyártás során keletkeznek mikro repedések, melyek szemmel nem láthatóak, de idővel egyre nagyobbak lesznek. Ezek pár mikron nagyságúak, melyeket elektrolumineszcens vizsgálattal lehet megfigyelni. A cellák mikro repedései komoly gondot jelentenek a napelem ágazatnak. A szilikoncella anyagának gyengesége miatt a nem megfelelően végzett mozgatás következtében is repedezettség léphet fel, illetve a modul szállítása és beszerelése során. Ez jelentős mértékben csökkenti a modul kimenő teljesítményét már a telepítés előtt.

Amikor a cella fordított előfeszítésben van az elektronok és lyukak eltávolodnak egymástól, és nagy kiürített réteget hoznak létre. Az elektronok energiája megnő. Amikor a feszültség letörik nagy áram lép fel. A repedés terjed az anyagban, és koncentrálja az elektronok elektromos terét. Valahol a repedés miatt a nagy energiájú elektron, melyet a tér is gyorsít, átüt a kiürített szakaszon. Itt kis helyen nagy áram lép fel, ezáltal nagy hő is, és hot spot alakul ki. Ezeket az apró melegedő pontokat lehet megfigyelni a hőkamerás képeken (3. ábra).



3. ábra. Mikrorepedések melegedése



A képen a piros négyzetekkel 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.

Az ábrákon jól látható a felső sor közepén a csatlakozó doboz melegedésének hatása. 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.

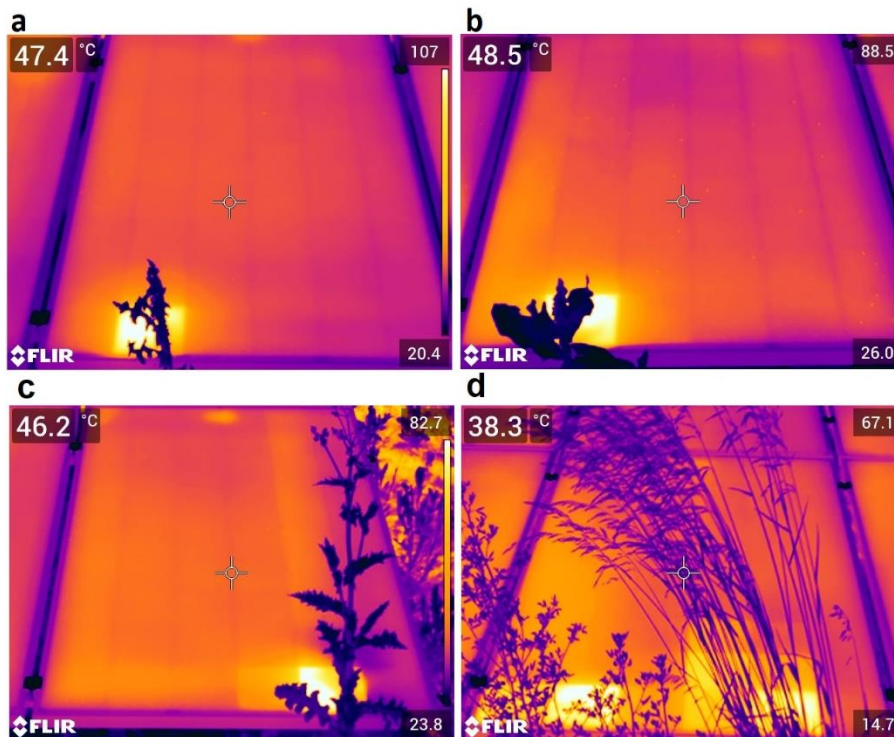
A panelek alsó sorában pedig a tartós önárnyékolás okozta cellaellenállásnövekedés hatása érvényesül. Ez visszavezethető tervezési és/vagy kivitelezési hibára. Amennyiben az egyes napelemtartó asztalok egymáshoz viszonyított távolsága kisebb, mint a Nap legkisebb beesési szögű járásából származó távolság, akkor alacsony Napjárásnál (hajnali-reggeli és késő délutáni-esti időszakban) az asztalok árnyékot vetnek a mögöttük lévő asztalokra. Az árnyékhatás miatt az árnyékolt cellák ellenállása megnövekedik az ép cellákéhoz képest, így a többi cella rajtuk áthajtott árama miatt megnő a Joule-hőképződés. Emiatt a cellák túlmelegednek és tartósan károsodnak (ellenállásnövekedésük állandósul).

Mindkét képen látható, hogy több cella felmelegedett az átlag panel hőmérséklet felé, és ezek elszórva helyezkednek el. Mivel szabadszemmel külső befolyásoló tényező nem észlelhető, így arra lehet következtetni, hogy a cellák eltérő paraméterűek a gyártásból adódóan, és emiatt a korábban említett disszipáció lép fel ezeken a cellákon.

A következőkben olyan esetet szeretnénk ismertetni, amelyek gyakran előfordulnak földi 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, stb. alapján. Mind más-más hatással van ezek függvényében az energiatermelésre és a napelem hosszútávú károsodására. A földi telepítésű rendszereknél fordul elő, hogy az aljnövényzet megnő a napelem aljánál magasabbra, és így árnyékot vet a felületére. A földi telepítés tartószerkezetén általában 2 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 4. ábrán látható felvételen lévő napelemek mind az alsó sorban helyezkednek el. A felületükön egyéb szennyeződés, hiba, és eltérő melegedés a vizsgáltokon kívül nem látható. A panelek átlaghőmérséklete közel azonos, (47,4 / 48,5 / 46,2 °C), (38,3°C esetében valószínűsíthető a benyúló növény zavarása a középpontban). 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. Itt a bypass dióda működése a teljes cellafüzért áthidalja, így a sorban lévő 20 cella kiesik a termelésből.

Az utolsó képen látható (d), hogy a nagyon magasra nőtt növényzet a panel alját teljesen árnyékolja, illetve a fentebbi cellákat is. Feltételezhető, hogy a legnagyobb hőmérséklet (67,1°C), azért alacsonyabb az előzőkhöz képest, mert itt több cellát érint a melegedés, ezek megnövekedett ellenállásain arányosan alakul hővé az ép cellák 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 földi telepítésű rendszereknél, amit csak rendszeres ellenőrzéssel és a talaj megfelelő gyomtalanításával lehet megelőzni. Amennyiben fent áll, minél hamarabb érdemes megszüntetni és hibafeltárást végezni. Hasonló jelenségeket figyelhetünk meg Chaudhary et al. [5], Kernahan et al. [6] és Kaplani [8] munkáiban.



4. ábra. Növényzet árnyékoló hatásának következménye

## 6. Összefoglalás

A dolgozatunkban a napelemek hőkamerás vizsgálatának bemutatására és a készített képek elemzésére törekedtünk. Ezt próbáltuk különböző elméleti alapokkal alátámasztani. A munkánk során tárgyaltuk a szélesebb körben elterjedt napelemek felépítését, működését és villamos tulajdonságait. Ezen felül fontosnak találtuk részletesebben kitérni a modulok, félvezetők anyagtulajdonságainak hőmérsékletfüggésére és ezen változások hatására a napelemek működésére, élettartamára és villamos energiatermelésére.

Ezt követően bemutattuk a napelemet érintő különböző hatásokat, mint például az árnyékolás, az ebből következő hot-spot keletkezés. Itt szó volt az egy cella, modulban való jelentős szerepéről a panelon belül, hozzávetőlegesen a többihez képest.

A termográfias vizsgálat bemutatása után, a hozzá tartozó képek elemzését, leírását több szempontból végeztük. A hőkamerás képeken a modulok melegezése látható és több esetben az ezt okozó degradáló, illetve kiváltó hatás is.

A képek rávilágítanak az olykor semmisnek vett és ártalmatlannak tekintett tényezőkre, hatásokra, amelyek hosszabb fennállása káros a napelemek élettartamára és villamosenergia-termelőképességére.

Ezek a legtöbb esetben kis erőfeszítéssel megelőzhetők, illetve orvosolhatók a nagyobb károk elkerülésének érdekében.

Mivel a napelemes rendszerek telepítése költséges, így hosszútávú működésre és ez alatt mihamarabbi megtérülésre hivatottak. Ehhez fontos az üzemeltetés közbeni teendők elvégzése, az állapotmegóvás és az esetleges hibák bizonyíthatósága, garanciális érvényesítés esetén.

A korszerű és nagy ütemben fejlődő iparágnak köszönhetően az energiatermelés optimalizálása és a berendezések ellenállósága egyre kedvezőbb, de emellett lényeges a meglévő rendszerek időszakos állapotfelmérése is, melyre a munkánkban bemutatott termográfias vizsgálat az egyik legegyszerűbb és legelőnyösebb módszer.

### Irodalom

- [1] Réti, I. (2015). *Nagy hatásfokú félvezető alapú napelemek*. Ph.D. értekezés, SZIE, p. 114.
- [2] Földváry-Bándy, E. (2015). *Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata*. Ph.D. értekezés, BME, p. 109.
- [3] Bodnár, I. (2019). *Napelemek működésének alapjai, a napelemes villamosenergia termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. ME, p. 108. ISBN 978-615-00-456-65.
- [4] Bodnár, I. (2018). *Electric parameters determination of solar panel by numeric simulations and laboratory measurements during temperature transient*. Acta Polytechnica Hungarica, 15(4), 59-82.
- [5] Chaudhary, A. S., Chaturvedi, D. K. (2017). *Observing hotspots and power loss in solar photovoltaic array under shading effects using thermal imaging camera*. International Journal of Electrical Machines and Drives, 3(1), 15-23.
- [6] Kernahan, K., Curzon, P., Stewart, M. (2012). *Solar cell microcracks are inevitable, and idealPV FOZHS makes them irrelevant*. idealPV, p. 8., Article ID v120329.
- [7] Bodnár, I. (2017). *Transient electrical characteristics of a solar cell in the case of a cooling and non-cooling solar cell*. ANNALS of Faculty Engineering Hunedora - International Journal of Engineering. XV(4), 175-178.
- [8] Kaplani, E. (2012). *Detection of degradation effects in field-aged c-Si solar cells through IR thermography and digital image processing*. International Journal of Photoenergy, p. 11., Article ID 396792. <https://doi.org/10.1155/2012/396792>
- [9] Varjú, V. (2014). *Napelemes energia és környezet*. MTA KRTK Regionális Kutatások Intézete, p. 152.
- [10] <http://mcisolutions.ca/effect-of-shade-on-solar-panels/> Letöltés dátuma: 2021.05.22.
- [11] Véghely, T. (2012. május 9.). *Napenergia hasznosító berendezések (rendszerek)*. Előadás.