

NAPELEM HŐTERJEDÉS VIZSGÁLATA ELEKTROMOS PARAMÉTEREINEK A MEGHATÁROZÁSÁHOZ

HEAT PROPAGATION INVESTIGATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR PANEL FOR DETERMINING ITS ELECTRICAL FEATURES

Nagy Ádám^{*}, Bodnár István^{**}, Kovács Endre^{**}

ABSTRACT

Heat transfer processes in a photovoltaic (PV) silicon solar panel are simulated under standard circumstances. A model containing an intricate treatment of the incoming solar radiation, long-wave radiation, conduction, convection, and electrical power output is developed in mathematical form. To solve heat transfer problems, recent explicit numerical methods are utilized by our research group, which are efficient for different real-life problems, for example, simulating heat transfer in photovoltaic panels. Since very realistic results are obtained for the temperature of the silicon layer and the dependent electrical variables such as the power output, one can conclude that our model can adequately predict the electrical quantities.

1. BEVEZETÉS

A környezetbarát energiatermelési- és tárolási módszerek iránt rendkívüli az érdeklődés. Mivel a fosszilis energiahordozókról történő leválás és a napelemes energiatermelés csak az elmúlt néhány évben kezdett meghatározóvá válni, ezért még rengeteg a nyitott kérdés velük kapcsolatban.

A napelemek működését leginkább a hőmérséklet befolyásolja. Amennyiben növekszik a napelemek hőmérséklete, a kapocsfeszültség meredeken csökken, míg az áramerősség enyhén emelkedik. Ebből következik, hogy állandó besugárzás mellett a teljesítmény a hőmérséklet növekedésével csökken [1]. Ugyan ez a hatás figyelhető meg a hatásfoknál is.

A felületen lerakódó szennyeződések árnyékhatás révén átmeneti ellenállás-növekedést eredményeznek. Ilyenkor az érintett cellarészek átmennek fogyasztóba és a többi cella által generált áramot Joule-hővé alakítják. Ezáltal a cellák tovább melegednek és a hatékonyságuk tovább csökken [2]. Hosszú távon a napelemek által termelt villamos

energia mennyisége is csökken, így hosszabb megtérülési idővel kell számolni.

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 problematikussá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet [3]. Ez a gyártók szerint akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára.

A tartósan magas hőmérsékleten üzemelő cellák gyorsabban öregednek, így az ilyen napelemek élettartama lényegesen lerövidülhet. Például a 100°C feletti hőmérséklet elérése következtében a cellák kiéghetnek, azonnal tönkremennek. Normál esetben egy napelem élettartama 25-30 év, azonban a hősokk révén ez akár 10 év alá is csökkenhet [4].

A károsodott cellák miatt a napelemek karakterisztikái ($V-I$ és $P-I$ jelleggörbéi) eltorzulnak. Ez pedig hatással van a villamos hálózatra leadott villamos energia minőségi paramétereire [5].

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 [6]. 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 hőmérsékletváltozás a repedések keletkezésének egyik leggyakoribb oka, ezért fontos a túlmelegedések elkerülése, illetve a hőmérsékleti tranziens-folyamatok időbeni lefutásának szétválasztása [7].

Az állapotfelmérésre számos módszer terjedt el az „in-situ” és az „ex-situ” módszereket ideértve. A napelemek úgynevezett „in-situ”, azaz helyben

^{*} egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet

^{**} egyetemi docens, Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet

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 cellaké, pontoké, felületeké. A nagyobb ellenálláson az átfolyó áramok hatására felszabaduló Joule hő tovább melegíti a hibás (sérül, vagy szennyezett) cellákat, így a napelem-panelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások [8, 9].

A gyártási hibák rendszerint mikro-repedésekként 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 hőmérséklet-eloszlás. Az árnyékhatás rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérsékletdifferenciát okoz. Az árnyékhatás származhat telepítési és üzemeltetési problémákból.

Egy napelem-panelen 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 [4].

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) jelentik [9].

A napelemek által termelt energiával az egyik fő probléma, hogy nem egyenletesen oszlik el az időben, ill. nem a felhasználói igények, hanem a napsütés iránya és intenzitása határozza meg a mennyiséget. A már telepített napelemek döntő többsége hozzávetőlegesen déli tájolású, mert így termel a legtöbb energiát. Viszont mivel a hálózatba a napsütéses déli órákba rengeteg energia kerül, a piaci ár negatív is lehet. Ez utóbbi (rész-) problémára elméletileg megoldást jelentene, ha kikapcsolnák a napelemek egy részét, azonban ez a villamos teljesítmény elvonásának hiányában még nagyobb hőmérsékleteket és még gyorsabb degradációt

eredményezne. Célszerű tehát tárolókapacitásokat létrehozni a megtermelt energia számára.

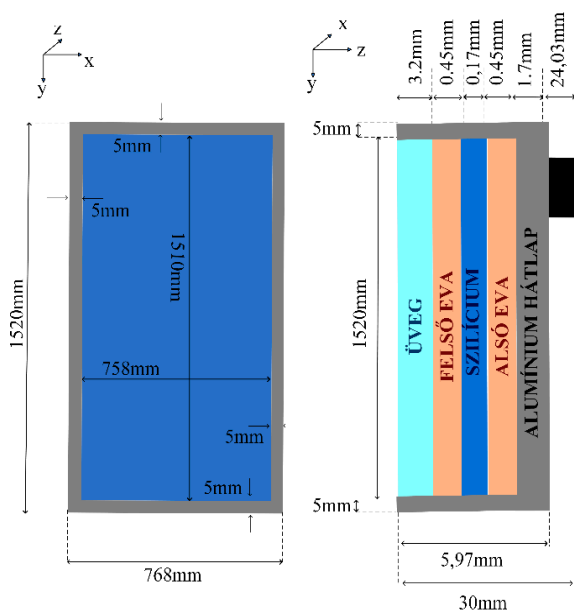
A hosszútávú célunk egy zéró-emissziós okosotthon energetikai szempontú megtervezése és mesterséges intelligencián alapú üzemeltetésének kidolgozása. Ehhez optimalizálni kell a napelemek teljesítményét, típusát és tájolását, valamint a termelés-fogyasztás-tárolás egyensúlyát. A megtermelt energiát részben akkumulátorokkal lehet tárolni, részben pedig fázisváltó anyagok (PCM = „phase changing material”) felmelegítésével. Ez utóbbi olvadási hőmérséklete és olvadáshője az anyagi minőségtől függ. Célszerű lehet több különböző PCM anyagot felhasználni, hogy az egyenletes hőmérsékletet minél olcsóbban biztosítani lehessen, emellett szükséges a geometriát is optimalizálni. Az akkumulátoros energiátárolás drágább és nagyobb az ökológiai lábnyoma, ugyanakkor a PCM-ből történő hő-visszanyerés nehezebben befolyásolható. Új építésű házaknál az épület tájolása, a szigetelés fajtája és vastagsága is optimalizálandó. Az optimális konfiguráció az éghajlattól és a felhasználás jellegétől is függ, a szükséges részletes időjárás-adatok nyilvános adatbázisokból letölthetőek, azonban a fogyasztási igényekre trendeket kell felvenni egy öntanuló algoritmus segítségével. Mivel a külső hőmérséklet, a szélsébség és a napsugárzás intenzitása folyamatosan változik, csakúgy, mint a PCM halmazállapota, a hőmérsékleti viszonyokat lényegükénél fogva nemstacionárius, tranzienst folyamatok alakítják. Ezek számítása rendkívül erőforrás-igényes, a szakirodalomban publikált munkák meglehetősen kezdetlegesek. A kutatócsoportunknak rendelkezésére áll egy saját programkód, ami egyszerűbb esetekre megoldja a hőmérséklet változását leíró nemlineáris parciális differenciálegyenletet. Ennek segítségével biztosíthatók a bemenő adatok a mesterséges intelligencia alapú optimalizáláshoz és az intelligens szabályozó rendszer kialakításához.

2. A SZIMULÁCIÓS MODELL BEMUTATÁSA

A napelemben történő hőterjedést számítógépes szimuláció segítségével vizsgáltuk meg, amelyhez a szükséges kódokat a MATLAB szoftver segítségével írtuk meg. A megvizsgált napelem modell geometriai adatai a következők: az x irányú szélessége 768 mm, a hossza az y irány mentén 1520 mm és a z -irányú vastagsága 30 mm (a csatlakozó dobozt is beleértve). A napelem prototípusunk széleit egy 0,5 cm széles alumínium szegély határolta és annak belső tartományait a z -irány mentén öt darab réteg építette

az alábbi elrendezés szerint: egy 3,2 mm vastag üveg réteg; 0,45 mm vastag EVA (etilén-vinil-acetát); egy 0,17 mm szilícium réteg; majd újból egy 0,45 mm vastagságú EVA réteg és végül egy 1,7 mm vastagságú alumínium hátlap. A megvizsgált napelem modell felépítését a következő oldalon látható 1. ábra mutatja be.

A szimulációs vizsgálatok során feltettük, hogy a napelem a standard teszt körülmények között működik, ami azt jelenti, hogy a 25°C-os környezeti hőmérsékletet;



1. ábra A napelem modell geometriájának sematikus ábrája.

1000 W/m² bejövő fényintenzitást; illetve 1 m/s sebességet vettünk figyelembe.

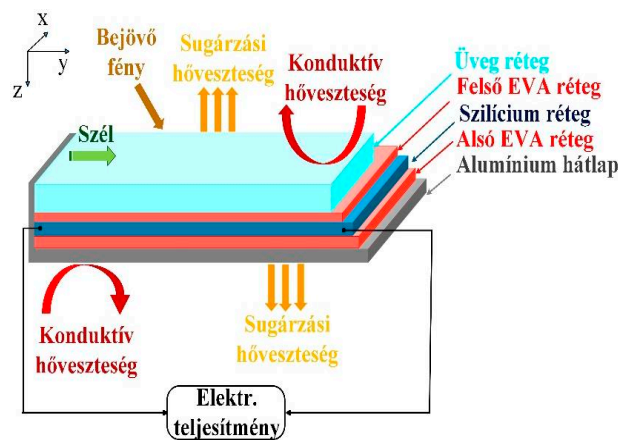
A napelemben történő hőterjedés modellezéséhez a következő hatásokat kell figyelembe venni. A napelem belső részeiben a hőcsere vezetékes hőátvitel segítségével valósul meg. A bejövő fény hatására időben állandó, de a helytől függő mennyiségű energia jut az egyes rétegekbe, amelyet egy $q_L(\vec{r})$ hőforrástaggal vettünk figyelembe. Az egységnyi idő alatt elnyelt fény energia egy része a szilícium rétegen belül a napelemből kinyerhető elektromos teljesítménnyé alakul át, ezt a napelemből kinyert teljesítményt egy hely- és hőmérséklet függő $q_P(\vec{r}, u)$ hőforrástaggal vesszük számításba. A működésben levő napelem hőmérséklete az idő előrehaladtával magasabb értéket vesz fel, mint a környezet hőmérséklete, így a napelem alsó és a felső x - y síkban levő felületein a hőmérsékleti sugárzás következtében hőelvonás lép fel, amelyet egy ugyancsak a pozíciótól és a hőmérséklettől függő $q_R(\vec{r}, u)$ hőforrástaggal vesszünk figyelembe. A napelemben felülete és a környezet közötti hőmérséklet különbség és az 1 m/s

sebességű szél miatt természetes-, illetve kényszerített konvekció általi hőelvonás játszódik le a napelem az alsó- és a felső felületein. Az egyes konvekciós mechanizmusok együttes hőelvonását egy hely- és hőmérséklet függő $q_C(\vec{r}, u)$ hőforrástaggal vettük számításba. A hőterjedés számítása során figyelembe vett tényezőket a 2. ábra foglalja össze. Az egyes hőforrástaggok figyelembevételével a napelemben történő hővezetést az alábbi nemlineáris parciális differenciálegyenlet írja le [12]:

$$\frac{\partial}{\partial t} u(t, \vec{r}) = \frac{1}{c(\vec{r})\rho(\vec{r})} \nabla(k(\vec{r})\nabla u(t, \vec{r})) + q_L(\vec{r}) + q_P(\vec{r}, u) + q_R(\vec{r}, u) + q_C(\vec{r}, u). \quad (1)$$

ahol $u(t, \vec{r})$ az ismeretlen hőmérséklet, amely a $\vec{r} = (x, y, z)$ helynek és a t időnek a függvénye. A $c(\vec{r})$ fajhő, $k(\vec{r})$ hővezetési tényező, $\rho(\vec{r})$ sűrűség helytől függő, ismertnek tekinthető függvények. Az (1) egyenlet numerikus módszerekkel oldható meg, amelynek a tér diszkrétizációja és az egyes hőforrástaggok közelítésének részletes ismertetése az [10] cikkben található meg. A szimulációs vizsgálatok során a következő egyszerűsítő feltevésekkel éltünk:

- A napelem egyes rétegeinek az anyagi tulajdonságait homogénnek, izotrópnak és a hőmérséklet-függetlennek tekintettük.
- A bejövő fénysugárzás a napelem felületét egyenletesen éri.
- Az elnyelt fény által a napelemben jutó energia egy része kinyerhető elektromos energiává alakul, más része pedig a napelem egyes rétegeiben alakul hővé.
- A napelem felületén lerakód por vagy egyéb szennyező anyagok hatását figyelmen kívül hagytuk.



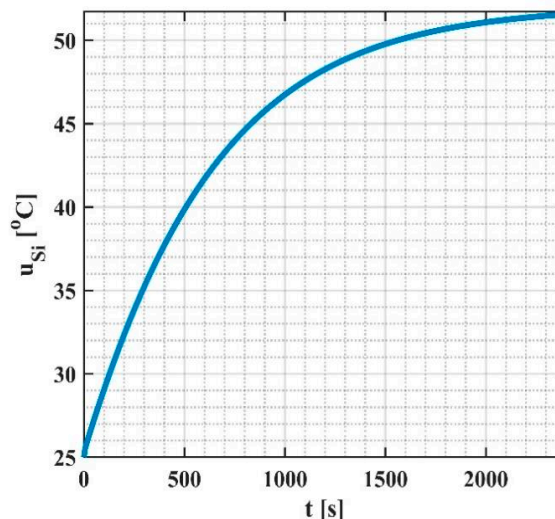
2. ábra A hőterjedést befolyásoló tényezők.

3. A BEKAPCSOLÁSI FOLYAMAT VIZSGÁLATA

A napelem modellünk működésének első 40 perces időtartományát vizsgáltuk meg, azaz a kezdeti időpont 0 másodpercnek és a végső időpont 2400 másodpercnek adódott. Az alkalmazott térháló az alábbi módon adható meg: az x - és y - irány mentén az alumínium szegélyt egységesen egy-egy megfelelő térfogatú CFD-cellával vettük figyelembe. A napelem x - y síkokban elhelyezkedő belső tartományait a 18 és 28 egyforma CFD-cellára osztottuk fel. Továbbá CFD-cella szám a z -irány mentén az üveg, a felső EVA, a szilícium, az alsó EVA és az alumínium hátlap rétegek esetén 3, 2, 2, 2 és 2. Az alkalmazott felosztás következtében a térhálónk összesen 6600 CFD-cellát tartalmazott. Az (1) egyenlet térdiszkretizációjával megkonstruált numerikus matematikai problémát a „Stiffness Ratio” mennyiséggel [10, p. 169] jellemezhetjük, amelynek értéke esetünkben, $2,357 \times 10^8$ -nak adódott, ami azt jelenti, hogy egy meglehetősen merev („stiff”) problémát [11] kell megoldanunk. Ugyancsak meghatároztuk a számítási probléma összetettségét jellemzésére CFL-küszöb limitet (Δt_{MAX}^{FTCS}), amelynek értéke $5,7 \times 10^{-5}$ másodperc, ami azt jelenti, hogy ettől kisebb időlépés esetén lesz stabil az explicit Euler sémát használó FTCS (Forward Time Central Space) módszer.

Kutatócsoportunk az elmúlt években hővezetési problémák megoldására több új olyan explicit, stabil numerikus módszert kifejlesztett, amelyek erősen merev problémák esetén is jól alkalmazhatóak. A napelemben lejátszódó hőterjedés modellezésére szolgáló (1) egyenletet egy ilyen saját fejlesztésű módszerrel, az úgynevezett CpC algoritmussal [12, 13] oldottuk meg, $\Delta t = 10 \times \Delta t_{MAX}^{FTCS} \approx 5,7 \times 10^{-4}$ másodperc lépésközt alkalmazva, ami egy nagyságrenddel nagyobb, mint a fent említett CFL küszöb.

Meghatároztuk a szilícium réteg hőmérsékletének az időbeli változását, amelyet a 3. ábra mutat be. Az ábrán látható, hogy kezdeti nagyobb hőmérséklet növekedést követően a szilícium réteg hőmérséklete egy időben állandónak vehető értéket ér el, ami azt jelzi, hogy a napelem ekkor már időben állandósult állapotban működik.



3. ábra A szilícium réteg hőmérséklete az idő függvényében.

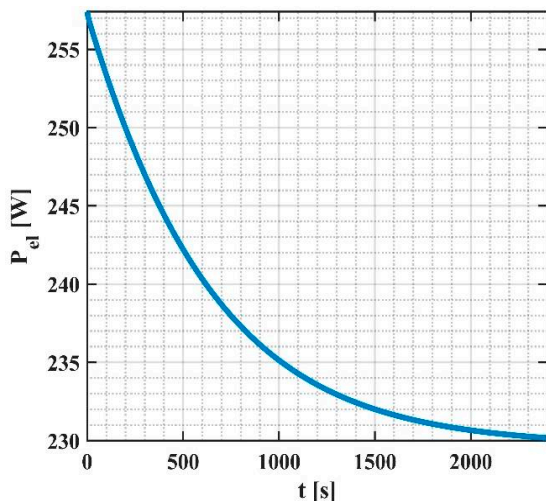
A kiszámított hőmérséklet értékek alapján az egyes CFD-cellák által előállított elektromos teljesítményt számítottuk ki [14]:

$$P_{el}(u_i) = \eta(u_i) \cdot A_i \cdot G, \quad (2)$$

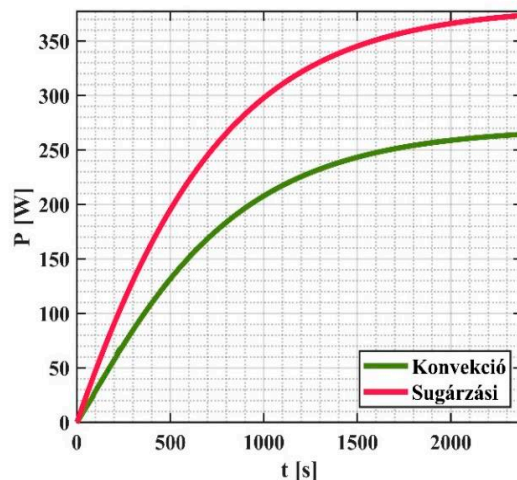
ahol $G = 1000 \text{ W/m}^2$ a bejövő fény intenzitása, A_i és $\eta(u_i)$ CFD-cella felülete és a hatásfoka, amely az alábbi lineáris kifejezéssel közelíthető [14]:

$$\eta(u_i) = \eta_{Ref} [1 - \beta_{Ref}(u_i - u_{Ref})], \quad (3)$$

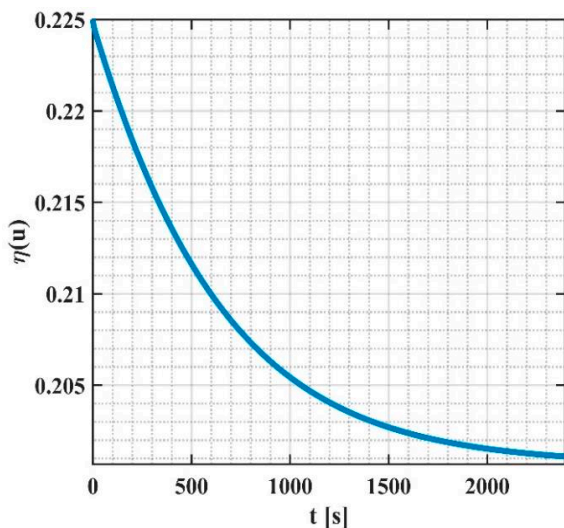
ahol és η_{Ref} egy adott u_{Ref} referencia hőmérsékleten megmért hatásfoka a napelemnek, β_{Ref} a hőmérsékleti koefficiens. Ez utóbbi mennyiség a szilícium anyagi tulajdonságaitól függ és monokristályos napelemre értéke $0,004 \text{ K}^{-1}$ [14]. Az egyes CFD-cellák által megtermelt elektromos teljesítmények összegzésével pedig megkapjuk a napelem P_{el} elektromos teljesítményét. A napelem teljesítményének időfejlődését a 4. ábra mutatja be. A napelem névleges teljesítménye az 1. táblázat szerint 230 W, de ez a futások esetén körülbelül 250 W-ra adódott a $t=0$ időpontban. Az eltérést az magyarázhatja, hogy a napelemek kezdeti teljesítménye rendszerint 3%-kal nagyobb, mint ami az adatlapon szerepel az adott üzemi hőmérsékletre megadva. Sajnos az első évben a napelem el is veszíti teljesítményének 3%-át. A hatásfok időfejlődését a 4. ábra mutatja be.



4. ábra A napelemből kinyerhető elektromos teljesítmény az idő függvényében.



6. ábra A konvekció, illetve a hőmérsékleti sugárzás által elvont teljesítmények az idő függvényében.



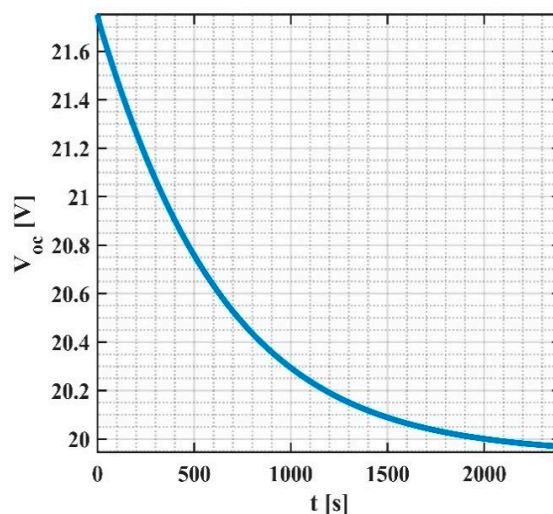
5. ábra A napelem hatásfoka az idő függvényében.

A szilícium \bar{u}_{SI} átlagos hőmérsékletének az ismeretében, valamint az 1. táblázatban közölt adatok segítségével kiszámítható a napelem néhány fontosabb működési jellemzője, mint például a V_{OC} üresjárás feszültség, az alábbi lineáris képlet segítségével [15]:

$$V_{OC}(\bar{u}_{SI}) = V_{OCN} \left[1 + \frac{\mu_{VOC}}{100\%} (\bar{u}_{SI} - u_{Ref}) \right], \quad (4)$$

ahol $V_{OC}(\bar{u}_{SI})$ a hőmérséklet függő üresjárás feszültség, V_{OCN} egy adott u_{Ref} referencia hőmérsékleten megmért üresjárás feszültség, μ_{VOC} a feszültség hőmérsékleti együtthatója. A napelem feszültségére vonatkozó eredményeinket a 7. ábra mutatja be.

A kinyert elektromos teljesítmény mellett meghatároztuk a konvekció, illetve a hősugárzás miatt bekövetkező hőátadási teljesítményt, mint az idő függvényét, amelyet az 6. ábra szemléltet. Az ábrán jól látható, hogy a sugárzás által leadott hőteljesítmény nagyobb, mint a konvekció által leadott, ami elsősorban az alacsony szélesség magyarázható.

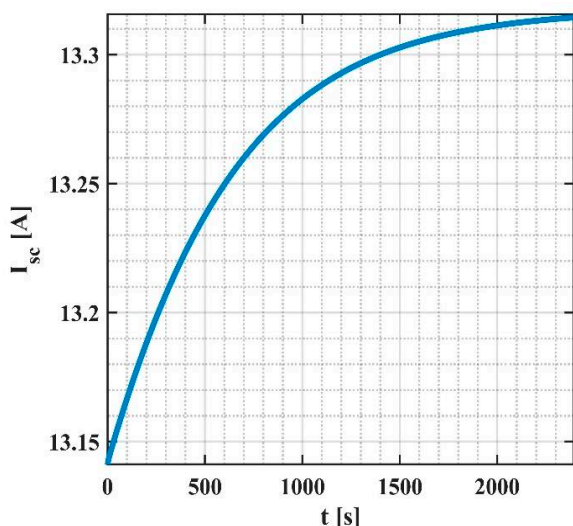


7. ábra A napelem üresjárás feszültségének a csökkenése az idő függvényében.

Hasonló lineáris közelítés segítségével a rövidzárási áram is meghatározható [15]:

$$I_{SC}(\bar{u}_{SI}) = I_{SCN} \left[1 + \frac{\mu_{ISC}}{100\%} (\bar{u}_{SI} - u_{Ref}) \right], \quad (5)$$

ahol $I_{SC}(\bar{u}_{SI})$ a hőmérséklet függő rövidzárási áram, I_{SCN} egy adott u_{Ref} referencia hőmérsékleten megmért üresjárási feszültség, μ_{ISC} az áram hőmérsékleti együtthatója. A napelem áramát a 8. ábra tünteti fel.



8. ábra A napelem rövidzárási áramának a növekedése az idő függvényében.

A napelem működésének hatékonyságát a formátényezővel (FF) jellemezhetjük, amelyet az teljesítmény, üresjárási feszültség és a rövidzárási áram segítségével számíthatunk ki [15]:

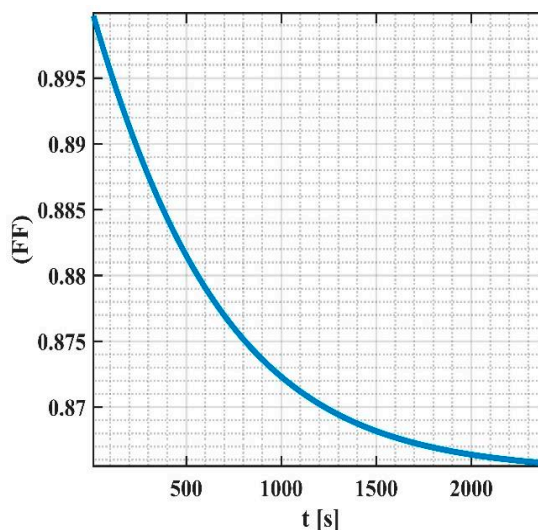
$$(FF) = \frac{P_{el}}{I_{SC}(\bar{u}_{SI})V_{OC}(\bar{u}_{SI})}. \quad (5)$$

Az (FF) formátényezőre vonatkozó eredményeket a 9. ábra mutatja be. Az ábrán látható, hogy kezdetben nagyobb értéket vesz fel a formátényező, de az idő előrehaladtával, ahogy a bekapcsolási tranzienst véget ér az (FF) formátényező értéke eléri az állandósult napelemek esetén elfogadott értékeket.

1. táblázat A napelem elektromos paraméterei

Paraméter	Érték
Elektromos teljesítmény	230 W
Hatásfok (η_{Ref})	0,225
Üresjárási feszültség (V_{OCN})	21,76V
Rövidzárási áram (I_{SCN})	13,14A

Feszültség hőmérsékleti együtthatója (μ_{VOC})	-0,31 %/°C
Áram hőmérsékleti együtthatója (μ_{ISC})	0,005 %/°C



9. ábra A formátényező (FF) csökkenése az időfüggvényében.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A környezetbarát energia előállítás és tárolás feladatának megoldása fontos kérdést és egyben nagy kihívást jelent a tudomány számára. Ebben jelentős szerepe van napelemes energiatermelésnek. A napelemek működési sajátosságait leginkább a hőmérséklet befolyásolja. A napelemekben lejátszódó hőterjedési folyamat modellezése által hatékonyan jelezhetjük előre a napelem elektromos működési jellemzőit, mint például a kinyert elektromos teljesítmény. A kapott görbék azt mutatják, hogy számítási modellünk realizisztikusan jelzi előre ezeket az elektromos működési jellemzőket.

SUMMARY

Solving the problem of producing and storing energy in environmentally friendly way is an important question and at the same time a great challenge for science. Solar energy production has a significant role in this issue. The operating characteristics of solar panels are mostly influenced by temperature. By modelling the heat propagation process which happens inside the solar cells, we can effectively predict the electrical operating characteristics of the solar panel, such as the extracted electrical power. The presented results show that our computational model realistically predicts these electrical operating characteristics.

2. táblázat A napelem elektromos jellemzői a megvizsgált időintervallum végső időpontjában ($t=2400$ s).

Paraméter	Érték
Szilíciumréteg hőmérséklete (\bar{u}_{ST})	51,4057 °C
Elektromos teljesítmény (P_{el})	230,1749 W
Hatásfok (η)	0,2011
Üresjárási feszültség (V_{OC})	19,9687 V
Rövidzárási áram (I_{SC})	13,3145 A
Formatényező (FF)	0,8657

5. IRODALOM

- [1] SINGH P., RAVINDRA, N. M.: *Temperature dependence of solar cell performance—an analysis*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 101, pp. 36–45, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2012.02.019.
- [2] NDIAYE A., KÉBÉ 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*, Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng. LNICST, Vol. 204, pp. 31–42, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-72965-7_3/COVER.
- [3] KHERICI Z., KAHOU L. N., CHEGHIB H., YOUNES M., CHEKAL AFFARI B.: *Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates*, Sol. Energy, Vol. 224, pp. 279–284, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.06.033.
- [4] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D., BOROS R. R.: *Exploration of Solar Panel Damage and Service Life Reduction Using Condition Assessment, Dust Accumulation, and Material Testing*, Sustainability, Vol. 15, No. 12, p. 9615, Jun. 2023, doi: 10.3390/SU15129615.
- [5] WOOD S. et al.: *Transient photocurrent and photovoltage mapping for characterisation of defects in organic photovoltaics*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 161, pp. 89–95, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2016.11.029.
- [6] SIDDIQUI R. et al.: *Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability*, Energy, Vol. 107, pp. 550–561, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.04.054.
- [7] PARIKH H. R. et al.: *Solar Cell Cracks and Finger Failure Detection Using Statistical Parameters of Electroluminescence Images and Machine Learning*, Appl. Sci., Vol. 10, No. 24, p. 8834, Dec. 2020, doi: 10.3390/APP10248834.
- [8] IKEJIOFOR O. E., Y. E. ASUAMAH Y. E., NJOKU H. O., ENIBE S. O.: *Detection of Hotspots and Performance Deteriorations in PV Modules under Partial Shading Conditions Using Infrared Thermography*, Eng. Proc., vol. 2, no. 1, p. 71, Nov. 2020, doi: 10.3390/ECSCA-7-08201.
- [9] GALLARDO-SAAVEDRA S. et al.: *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, p. 117930, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117930.
- [10] LEVEQUE R. J.: *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations (Steady-state and Time Dependent Problems)*, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 978-0-898716-29-0, (2007)
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Stiff_equation
Megtekintés időpontja: 2024. Június 21.
- [12] NAGY, Á, BODNÁR, I, KOVÁCS, E.: *Simulation of the Thermal Behavior of a Photovoltaic Solar Panel Using Recent Explicit Numerical Methods*; Advanced Theory and Simulations, 2024 Paper: 2400089 (2024)
- [13] KOVÁCS E., NAGY Á., SALEH M.: *A Set of New Stable, Explicit, Second Order Schemes for the Non-Stationary Heat Conduction Equation*, Mathematics, Vol. 9, No. 18, (2021)
- [14] KANT K., SHUKLA A., SHARMA A., BIWOLE P. H.: *Thermal response of polycrystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study*, Solar Energy, Vol. 134 (2016), p.147.
- [15] 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)