

# Textil alapú napelemek

Lázár Károly

**Kulcsszavak/Keywords:** Napelem, Fotovoltaikus elem, Fotovoltaikus szálak, Fotovoltaikus kelmék, Intelligens textíliák és ruházat  
Solar cells, Photovoltaic cells, Photovoltaic fibres, Photovoltaic fabrics, Smart textiles and clothings

A napelem egyike az alternatív fenntartható energiaforrásoknak (naperóművek, szélturbinák, vízeróművek, hullám- és árapály-eróművek, geotermia alapú áramtermelés), amelyek iránt egyre nagyobb az igény. A 2016 végéig kiépült naperóművek 306 GW kapacitása a világ villamosenergia-termelésének 2%-át adta, de az előrejelzések szerint 2021-re ez 700–900 GW-ra nőhet, ami a napenergia-termelés részarányát a világ villamosenergia-termeléséből megháromszorozhatja [1]. Egy Németországban készült felmérés adatai szerint a szélenergia vezet ugyan a „zöld” villamosenergia-termelés összetételét, a napelemek igen nagy jelentőségre tettek szert. 2019 júniusában például a teljes nettó kibocsátás 19,2%-át adták – ami 7,17 terawattórának felel meg –, míg a lignit 18,7%-ot, a szélenergia 18%-ot képviselt. Bár az ilyen csúcserőtelkek nem ritkák a nyári hónapokban, a napenergiának akkor sikerült először megelőznie a lignites áramtermelés arányát [10].

A napenergia kihasználhatósága változókéony ugyan, mégis jelentős sikerek mutatkoznak annak közvetlenül elektromos energiává való átalakítása terén a napelemek felhasználásával.

A napelemtáblák üveg- vagy polikarbonát-lemezekre helyezett, összekapcsolt napelemeket tartalmaznak. Hátrányuk, hogy csak síkfelületen helyezhetők el. Súlyosak, ezért a tartószerkezetüknek elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy elbírja a terhelést. Az üvegtáblák törékenyek is, ezért óvatosan kell azokat tárolni és szállítani. Mindezen hátrányok kiküszöbölésére egyre nagyobb figyelmet fordítanak a könnyebb, hajlékonyabb, műanyagfóliákra felépített napelemtáblákra, amelyek ellenállnak az időjárás viszontagságainak, tartósak, kisebb anyagfelhasználást igényelnek és szerkezetük olcsóbban állítható elő. Széles körben jelentek meg a kereskedelemben az olyan napelemek, amelyeket vékony műanyag- vagy fémlemezre lehet felszerelni. Ezek sokkal könnyebb szerkezetek és előállításuk olcsóbban megoldható. Azonban ezek a vékony lemezek a szerelés és az alkalmazás során eltörhetnek, ezért nagy gonddal kell eljárni, ha ezek szolgáltatják a napelemtábla alapját. A hajlékony, ugyanakkor erős textilanyagok megoldást kínálnak erre a problémára [2, 14].

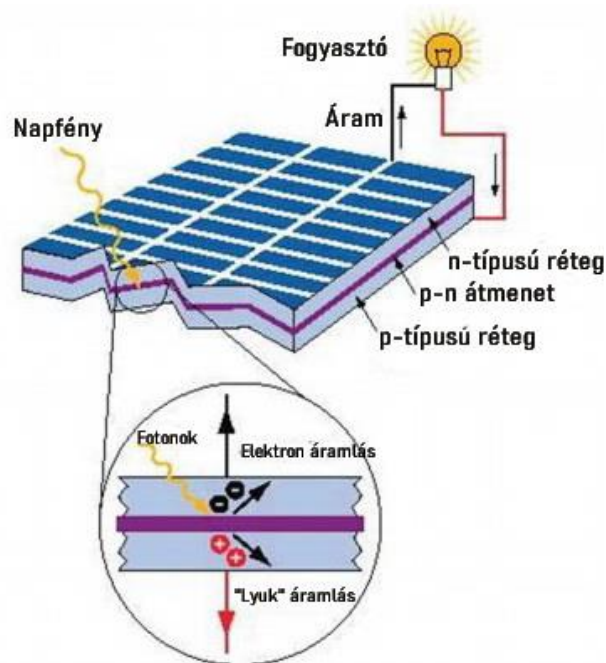


1. ábra. Napelemekkel felszerelt „okos” dzseki [14]

ha napelemekkel lehetne őket táplálni (1. ábra).

## A napelemek elvi működése

A napelemek – más néven: fotovoltaikus (PV) elemek – fény besugárzásának hatására fejlesztenek elektromos áramot. Ez nem csak napsugárzás, hanem más fény



2. ábra. A napelem-cella működési elve [6]

hatására is bekövetkezik. A fotovoltaikus elemekben két vékony, 1–4  $\mu\text{m}$  vastagságú félvezető (pl. szilícium-) réteget helyeznek el egymásra, amelyek közül az egyik, a vékonyabb, pozitív ( $p$  típus) (a napelem-cellában ez van alul), a másik negatív ( $n$  típus) elektromos töltésű. A két réteg érintkezési felülete az ún.  $p$ - $n$  átmenet.

Az  $n$  típusú réteg anyagát elektrontöbblettel rendelkező anyaggal (pl. foszforral) szennyezik, ezért ebben negatív töltéstöbblet keletkezik (innen származik az  $n$  típus elnevezés). A foszfor ugyanis 5 vegyértékelektronnal rendelkezik, amelyek közül 4 részt a kötésben, az ötödik szabad elektronként a vezetési sávba juthat. Ezt a réteget éri majd a napfény.

A Napból érkező elektromágneses hullámegységek, a fotonok a  $p$ - $n$  réteg határán gerjesztik az elektronokat, amely következtében delokalizált elektron és mozgékony lyuk párok keletkeznek. A  $p$ - $n$  rétegben kialakult belső elektromos mező térerősség-vektora az  $n$  rétegtől a  $p$  réteg irányába mutat. A napelemben a belső elektromos tér a lyukakat „lefelé” mozgatja a  $p$  rétegen keresztül, amíg az elektronokat „felfelé” mozgatja az  $n$  rétegen keresztül, a külső áramkör irányába. Ennek köszönhetően jön létre a feszültség a fogyasztó (lámpa) kivezetésein. Az elektron-lyuk párok rekombinációja során felszabadult energia hővé alakul (2. ábra) [3, 4, 5, 6].

A napelemtáblák készítésére a félvezető tulajdonságú szilícium kiválóan bevált. Ezen kívül azonban más, hasonló tulajdonságú anyagokat, vékonyfilm-félvezetőket is kifejlesztettek erre a célra, néhány elem szerves vegyületétől a szerves molekuláig és polimerekig [2]. Ezek legtöbbször szerves anyagok: pl. GaAs (gallium-arzenid), CdTe (kadmium-tellurid), CIGS (réz-indium-gallium-szelén). A szerves polimer alapú fotovoltaikus

anyagok lehetnek nagy szerves molekulák, mint amilyenek a fullerének (az elemi szén mesterséges módosulatai), vagy lehetnek polimerek, vagy ezek kombinációk, bár a fejlesztésekben a polimer típusok dominálnak.

A napfényt abszorbeáló festékekkel érzékenyebbé tett (dye sensitized, DSSC) napelemcellák jobban illeszkednek a fényforrás spektrumához, mint egy egyedüli félvezető alapú cella. Az ilyen napelemcella két vezető elektródából áll, amelyek közül az egyik félvezetővel (pl.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  vagy  $\text{SnO}_2$ ), majd ezt követően fotoaktív festékkel van bevonva. Az ilyen tulajdonságú szintetikus festékanyagok többnyire drágák és/vagy mérgezők, ezért jobbak a természetes anyagú festékanyagok (pl. kármin), amelyek azonban kevésbé hatékonyak. Az elektróda katalizátorral (platinával vagy grafittal) van bevonva. A két elektróda közötti rést elektrolittal töltik meg (jellemzően jód/trijód vagy más redox párok alapján, néha fém sókat is tartalmazva) [12].

Jelentős fejlesztésnek számít a perovszkit anyagok alkalmazása. Ezek olyan kristályszerkezetek, amelyek nagyjából megegyeznek a kalcium-titanát ( $\text{CaTiO}_3$ ) szerkezetével. Ezek a színezékekkel érzékenyített eszközben elhelyezett szerves-szervetlen halogenidok (a fluor, klór, bróm és jód vegyületei) vezetik a jodidot egy folyékony jodid alapú elektrolitban és mintegy 3% hatékonyságot mutatnak, de a teljesen szilárd állapotú változatban 20%-ot is elérnek (kb. 15 %-ot hajlékony változatban). Mivel felvitelükhöz folyadék alapú kenési technikát használnak, alkalmasak olcsó, nagy felületű termékek előállítására, de ömlesztett vegyületekre és javított stabilitásra van szükség ahhoz, hogy kereskedelmi forgalomba kerülhessenek.

A napelemek  $\text{kWm}^{-2}$ -ben mért teljesítményét szabványos körülmények között vizsgálják: AM=1,5 napfény-spektrumnál és 25 °C esetén.

## Elektromos vezetőképességű kelmék

A PV cella tetejét és alját – az anódot és a katódot – vezetőképesen össze kell kötni. Textil alapú PV cellák esetében ehhez arra van szükség, hogy maga a textilanyag vezetőképes legyen. Ezt a textiliát alkotó fonalak vezetőképességével vagy a kelme utólagos vezetőképessé tételével (vezetőképes réteggel való bevonással) lehet elérni [2].

A **vezetőképes fonalak** készülhetnek fém- vagy fém tartalmú szálakból. A fémszálaknak vékonyaknak kell lenniük (átmérőjük 2–40  $\mu\text{m}$ ), hogy a kelme ne váljék túl merevvé. Így is hajlamosak szakadásra a szokásos kelmegyártási eljárások ill. az alkalmazások erős igénybevételével. Kifejlesztettek szálgyártásra alkalmas vezetőképes polimereket (pl. polianilin, polipirrol, politiofen), bár ezek vezetőképessége elmarad a fémszálakétól és nem elég hajlékonyak, nem igazán alkalmasak textilipari feldolgozásra. Egy lehetőség vezetőképes szálak előállítására az, hogy a szálát fémmel vagy vezetőképes polimerrel vonják be. Így jó vezetőképességet lehet elérni, anélkül, hogy a szál feldolgozhatósági tulajdonságai romlának. Lényeges azonban, hogy a fém vagy a polimer jól megtapadjon a szálra. A fém bevonat például jóval merevebb, mint maga a szál, ezért hajlamos arra, hogy a hajlítgatások hatására eltörjön. Ilyenkor a fémréteg folytonossága megszakad és a vezetőképesség elvész. A bevonatnak ellen kell tudnia állnia a további gyártási folyamat igénybevételének is, például magas hőmérsékletet is bírnia kell. Korom- vagy szén nano-szénecsövek beépítése a szál anyagába a szálhúzást megelőzően javíthatja

a szál vezetőképességét, de a szén mennyiségének legalább 10%-ot el kell érnie, de a 10% széntartalom a szálát keményebbé teszi, ami a továbbiakban megnehezíti a feldolgozást. A grafén szintén nagyon vezetőképes anyag, ami kisebb mennyiségben is elegendő lehet. Fémrészecskék hasonló módon való beépítése szintén használatos a vezetőképesség javítására, de ezek idővel kikoptathatják a szálképző lap furatait.

A vezetőképes szálak/fonalak kelmévé való feldolgozásánál figyelembe kell venni, hogy a fonalak a kelmében összekapcsolódnak és az összekapcsolódás helyein meghajlanak és nyomást gyakorolnak egymásra. Ezért azok a kelmekonstrukciók alkalmasak erre a célra, amelyeknél ez a hajlított elhelyezkedés és a nyomás a legkisebb. Szövetek esetében ez a feltétel legjobban sávolykötésnél teljesül. Kötött kelmékben a láncc- vagy vetülbefektetés alkalmazása lehet a megoldás, amikor a vezetőképes fonalból nem készülnek szemek. Nemcsak kelmék esetében a vezetőképes fonalak egyenesen befektethetők a rétegek közé. A hímzés is ígéretes eljárás lehet vezetőképes kelmék előállítására, amellyel a vezetőképes fonalakat egy programnak megfelelően lehet elhelyezni. Azonban a hímzés terjedelmesebbé teszi a képződött textiliát, ami nem előnyös a PV-rétegek készítésénél.

Kelmék vezetőképessé tételének másik módszere **vezetőképes kelmefelület** megoldása. Ez történhet festékfelület rávitelével, olyan festékkel, amely ezüst- vagy réznanorészecskéket tartalmaz. Ink-jet eljárásnál a festéket cseppenként juttatják a kelme felületére, amelyek a szárítás után apró különálló zónákat alkothatnak. Hőkezelés után a fémrészecskék között folytonos vezetőképes kapcsolódás jön létre. Hátrány, hogy a hőkezelés magas hőmérséklete (ami 180 °C-ig is terjedhet) olyan anyagú alapkelmére van szükség, ami ezt kibírja (pl. poliamid- vagy poliészter). Fontos, hogy a fémrészecskék jól tapadjanak a kelmére, hogy hajtogatáskor ne repedezzen meg a fémréteg, ami a vezetőképesség elvesztését jelentené. Filmnyomás alkalmazása esetén általában ezüst tartalmú pépet használnak, amelyek vastagsága elegendő kell legyen elég nagy vezetőképesség előállítására, ezért gyakran több rétegben kell felhordani.

Egy másik megoldás a vékony fém- (pl. arany- vagy alumínium-) réteg közvetlen felvitele a kelmére vákuumpárolgatással vagy ionsugaras ill. katódporlasztással. Ennél az eljárásnál is fennáll a felhordott fémréteg repedezésének veszélye. Ennek elkerülésére először egy vékony, vezetőképes polimer réteget kell felvinni, mielőtt a tetejére fémréteget hordanának fel. Minthogy a polimer sokkal hajlékonyabb és jobban tapad a textília felületére, még akkor is megmarad a vezetőképesség, ha a fémréteg megreped.

## Textil alapú napelemek

A textil alapú napelemek készítésére szánt textiliáknak háromféle típusa lehetséges:

- egyedi cellák vagy fotovoltaiikus film felerősítése a kelmére,
- fotovoltaiikus cellák közvetlen beépítése a kelmébe,
- már eleve fotovoltaiikus tulajdonságú szálakból készült kelme.

Az első típus nem hoz létre valódi fotovoltaiikus kelmét. A másik két eljárás mindegyikénél szükség van elektromos kontaktusok és félvezető rétegek elhelyezésére egy olyan anyagra – textilanyagból készült kelmére –, amelynek eltérő tulajdonságai vannak a szokványos elektronikai technológiákhoz képest [2].

## Fotovoltaikus (PV) cellák ráillesztése kelmére

Egy PV cella vagy PV film egyesítésével létrehozott fotovoltaikus textilja nem igazi napelem, csupán egy kelme és egy PV panel kombinációja. Ezek egyike a kelme egyszerű egyesítése egy nem törékeny PV panellel. Ennél a megoldásnál nincs szükség a PV cellák vagy a kelmék speciális kivitelére, így mindkettő széles választékban alkalmazható. Azonban a kelme fizikai, mechanikai és esztétikai tulajdonságai tekintetében valószínűleg kompromisszumra van szükség. Ehhez járul, hogy a cellák és a közöttük létrehozandó elektromos kapcsolat felerősítése speciális megoldásokat igényel. Számos jelenlegi, napelem-cellákat tartalmazó „okos” (funkcionális) textiltermék ezzel a módszerrel készül. A PV filmek készítésére szolgáló technológiák már rendelkezésre állnak. Ugyancsak megoldott a vékony film hozzáerősítése a kelméhez, pl. varrással, hegesztéssel vagy laminálással. Nagyon fontos, hogy a PV film ne törjön el a felerősítési művelet során.

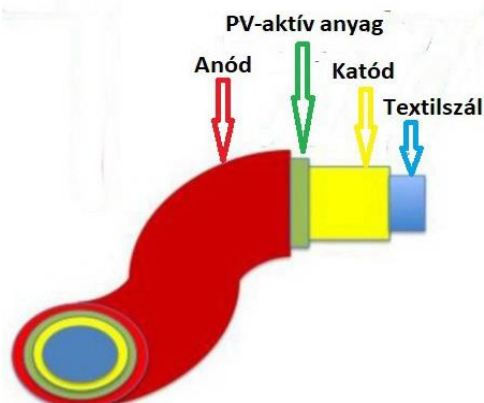
PV cellák textiljára való közvetlen elhelyezésére olyan anyagra van szükség, amely ellenáll a különböző rétegezési műveletek igénybevételének. A vékony félvezető film rögzítése nagy hőmérsékletet igényel, de a legtöbb szerves anyagú cella és a nem szerves anyagú cellák egy része szobahőmérsékleten vagy legalább 200 °C alatt megoldható. Ha ez a feltétel nem elégíthető ki, nagy hőállóságú szálakból kell készíteni a textilát, például fém-, szén-, üveg- vagy polimidszálakból. 200 °C-ig poliészter vagy esetleg poliamid is használható.

## Fotovoltaikus szálak

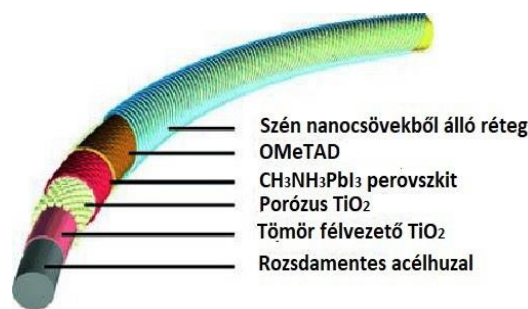
A 3. ábra a fotovoltaikus szál kialakításának elvi megoldását mutatja. A különböző rétegeket bonyolult technológiai eljárásokkal, viszik fel.

A fotovoltaikus bevonatú szálak használatának talán a legnagyobb akadálya, hogy amikor belőlük bármilyen eljárással kelmét készítenek, a feldolgozás során a szálak bevonata nagy koptató igénybevételnek van kitéve.

Egy példát a fotovoltaikus szál megoldására a sanghaji Fudan Egyetem egy fejlesztése mutat [7]. Perovszkit napelemeket fejlesztettek ki hajlékony szálak formájában, amelyeket szövéshez lehet felhasználni (4. ábra). Az anód finom rozsdamentes acélhuzal, amely tömör félvezető titán-dioxidréteggel van bevonva. Ennek tetejére egy porózus nanokristályos titán-dioxid réteg kerül. Ez nagy felületet biztosít a perovszkit réteg felhordásához. A következő réteg speciális szerves anyagból készült (OMeTAD). A külső burkolatot, amely katódként szolgál, egy átlátszó, szén nanocsövekből álló réteg alkotja. A perovszkit réteg elnyeli a fényt, amely az elektronokat gerjeszti és szabadabbá teszi, ami töltéskülönbséget okoz



3. ábra. Fotovoltaikus bevonatú szál elvi megoldása [2]



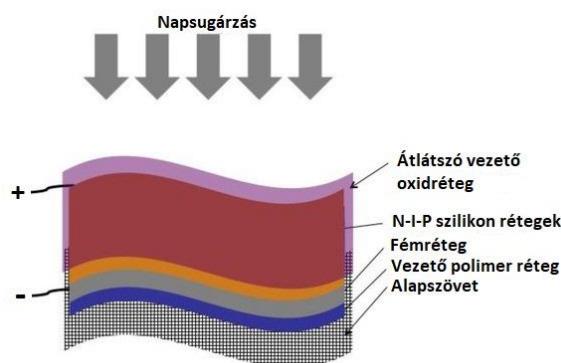
4. ábra. Fotovoltaikus bevonatú szál [7]

az elektronok és a formálisan pozitív töltésű „lyukak” között. Az elektronok belépnek a kompakt titán-dioxid réteg vezető sávjába, és az anódhoz mozognak. A „lyukakat” a szerves réteg rögzíti. A szén nanocső-katód nagy felülete és nagy elektromos vezetőképessége elősegíti a töltések gyors vezetését és nagy fotoelektromos áram keletkezését. Az így készült napelem 3,3% energiaátalakítási hatékonyságot érhet el, ami jelentősnek mondható.

## Fotovoltaikus szövetek

A fotovoltaikus szövetek készítésénél az egyes rétegeket speciális eljárásokkal viszik fel az alapszövetre. Ezek a rétegek rendkívül vékonyak, vastagságuk néhány mikrométer, ami lényegesen kisebb, mint a szövetnek a fonalkereszteződések okozta felületi egyenetlenségei. A tapasztalat szerint a sávoly- vagy atlaszkötésű kelmék felülete a legsimább, ezért ezeket helyezik előtérbe a fotovoltaikus szövetek készítésénél. A felület simaságát ezen kívül azzal is fokozzák, hogy a szövetet simító kezelésnek (kalanderezés) vetik alá. Erre egy elektromosan vezető polimer réteget visznek fel, és erre kerülnek a fotovoltaikus tulajdonságokat adó rétegek: a fotoaktív amorf (*n* ill. *p* típusú) szilíciumrétegek, majd a felső érintkező egy hagyományos átlátszó vezető oxidréteg, amely egyúttal védőbevonatként is működik (5. ábra) [2].

A rugalmas PV-cellák fejlesztése során számos rétegezési technikát kipróbáltak, beleértve a kémiai és fizikai folyamatokat is: a galvanizálást, a folyékony nyomtatást, a merítéses bevonást, a vákuumpárologtatást, az atomréteg-lerakást, a katódporlasztást, a kémiai párologtatást és a polimerizációt. Ezek gyakorlati kivitelezéséhez az elektronikai ipar és a textilipar szoros együttműködésére van szükség. A textiliparban jól ismert eljárás a kelmék folyékony anyaggal való bevonása merítéses vagy kenési eljárással, és nem ismeretlenek a gáz alapú folyamatok, mint például a plazmakézelés alkalmazása sem, így megvan a remény arra, hogy a sikeres üzemi gyártás is megvalósítható.



5. ábra. Fotovoltaikus rétegek szövet alapon [2]

## A textil alapú napelemek alkalmazási lehetőségei

A textil alapú napelemek, ha nagyipari gyártásuk megvalósulhat, széles körben felhasználhatók lesznek. Különlegesen nagy érdeklődés tapasztalható az intelligens ruházatokba beépített érzékelők iránt, például gyógyászati, katonai, sport- és szabadidőtevékenységek területén, amelyek villamos árammal való működtetéséhez egy, a ruházatba beépített napelem nagy szolgálatot tehet. Jól alkalmazhatók lesznek teherautó-ponyvákön is, ahol áramot szolgáltathatnak a vezető által használt kisebb készülékek működtetéséhez, vagy sátrakon, hasonló céllal [2].

Példaképp megemlítjük, hogy a Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, a Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems, a Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. és néhány iparvállalat – köztük műszaki textiliákat gyártó cég is – közösen dolgozik üvegszál szövet alapú napelem kifejlesztésén [11]. Az alapanyag kiválasztásánál szem előtt kellett tartani, hogy a terméknek nagy szakítószilárdságúnak, olcsón előállíthatónak kell lennie, bírnia kell a további feldolgozás (rétegezési folyamatok) során alkalmazott, mintegy 200 °C hőmérsékletet, és meg kell felelnie a tűzvédelmi előírásoknak.

A kutatóknak meg kell oldaniuk azokat a problémákat, amelyek a napelemet alkotó vékony rétegek – az alsó elektróda, a fotovoltaiikus réteg és a felső elektróda – szövetre való felvitelével járnak. Ezek a rétegek 1–10 µm vastagságúak, a szövet felülete ehhez képest a fonalkereszteszódések folytán rendkívül egyenetlen. Ezért először egy ezt kiegyenlítő réteget visznek fel olyan eljárással, mint amit a szövetek gumírozásánál is használnak. Erre kerül a napelemet valójában alkotó többi réteg, amelyeket a textiliparban egyébként is alkalmazott kenési eljárásokkal visznek fel. Legfelülre egy rálaminált védőréteg kerül.

Az így készült kísérleti textil alapú napelem hatékonysága 0,1–0,3% körül van. Ahhoz, hogy a gyakorlatban használható terméket állítsanak elő, ezt 5% fölé kell emelni. A fejlesztések ebben az irányban nagy erővel folynak.

\* \* \*

A kísérletek nagy energiával folynak. Számos egyetem és kutatóintézet foglalkozik ezzel a témával Európától az Egyesült Államokon át Japánig és Kínáig, sokféle eljárást kipróbálnak és nagyon sok szakcikk ismerteti ezek eredményeit. Újabban azzal is kísérleteznek, hogy a villamos energia előállítását ne csak a ruhadarabba szerelt napelem

szolgálja, hanem egy ezzel együttműködő olyan egység is, amely a test mozgását alakítja át villamos energiává.

Mindezek a törekvések előbb-utóbb minden bizonyos iparilag megvalósítható és kereskedelmi forgalomba is kerülő eredményekhez vezetnek.

## Felhasznált szakirodalom

- [1] Triplázódhat a világ napenergia-termelése 2021-re. <http://ecolounge.hu/zoldmotor/triplazodhat-a-vilag-napenergia-termelese-2021-re>
- [2] Mather, R.R., Wilson, J.I.B.: Fabrication of Photovoltaic Textiles. <https://www.mdpi.com/2079-6412/7/5/63>
- [3] *p-n* átmenet. [https://hu.wikipedia.org/wiki/P-n\\_%C3%A1tmenet](https://hu.wikipedia.org/wiki/P-n_%C3%A1tmenet)
- [4] Fényelem. <https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9nyelem>
- [5] 74. Hogyan működik a napelem? – Voyager: A tudomány határain. <https://voyager.blog.hu/>
- [6] Kiran Ranabhat, Leev Patrikeev et al.: An introduction to solar cell technology. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1451-4117/2016/1451-41171604481R.pdf>
- [7] Textile solar cells – Nanowerk (Nanowerk News). <https://www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=36860.php>
- [8] Wilson, J.I.B., Mather, R.R. et al.: Development of Flexible Solar Cells on Fabrics. <https://www.energy-learning.com/index.php/78-what-s-new/119-development-of-flexible-solar-cells-on-fabrics>
- [9] John I B Wilson, Robert R. Mathen: Photovoltaic Solar Textiles. <https://www.mdpi.com/2504-3900/32/1/4>
- [10] Neuer Rekord für Sonnenenergie im Juni 2019 <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/neuer-rekord-fuer-solarenergie-im-juni-2019/>
- [11] Photovoltaic power from textiles. <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2019/august/photovoltaic-power-from-textiles.html>
- [12] Recent coating materials for textile-based solar cells. <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mater-sci.2019.2.234?viewType=HTML>
- [13] Zhen Wen, Min-Shin Yeh et al.: Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors <https://advances.science-mag.org/content/2/10/e1600097>
- [14] Flexible solar cells for clothing. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702106715425>