



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Nagy Éva Viktória

Napelemek szennyeződés miatti hatásfokromlása

TDK dolgozat

KONZULENS

Dr. Raisz Dávid

BUDAPEST, 2016.

Összefoglaló

Környezetünk szempontjából egyre fontosabb a megújuló energiaforrások alkalmazása. Az utóbbi egy évben a Földön 59 GW új fotovoltaikus kapacitást helyeztek üzembe. A napelemes technológiák elterjedésével hátrányaik is előtérbe kerültek. Egyik jelentős probléma a szennyeződések miatti hatásfokromlás, amelyre a kutatók a mai napig nem tudtak egységes, mindenhol alkalmazható megoldást nyújtani. Ám fontos róla beszélni, mivel akár több 10%-os, sőt extrém esetben teljes termeléseszkkenést is okozhatnak a napelem felületén megtapadt szennyeződések. Ezek leginkább nagy napelemparkok esetében okoznak jelentős veszteséget, így ott kiemelten fontos a közbeavatkozás. Tekintettel arra, hogy az egyes földrészekén más és más a szennyeződések forrása, valamint a természetes tisztulást segítő időjárás is eltérő, így egy globális szinten egységes megoldás kivitelezése nem megoldható. Magyarországon elsősorban a madárürülék és a por jelenti a szennyeződések elsődleges okát, míg a sivatagos területeken a homokviharok okoznak kihívást a naperőművek üzemeltetőinek, addig az északi területeken a hó takaró hatása az elsődleges termeléseszkkentő tényező.

Dolgozatomban kitérek a Föld egyes tájegységeinek specifikus problémáira, valamint bemutatom, hogy az adott napelemfajták mennyire érzékenyek a szennyeződésekre.

Bemutatom, mekkora hatása van a termelésre a szennyeződéseknek, példákkal alátámasztva két hazai, illetve több külföldi napelempark esetében. Ismertetem a témában megszületett fontosabb kutatások eredményeit, amelyek nyomán munkámat megkezdtem.

Tanulmányomban két magyarországi napelempark esetét vizsgálom részletesen. Az egyik 2015-ben Berettyóújfalun létesült 495 kW-os, a másik egy 2013-ban Kisteleken 500 kW-os üzembe helyezett naperőmű. A parkok teljesítményanalízise során összegyűjtött napi adatokat felhasználva megalkottam egy termelési modellt, amely a mért adatokat (besugárzás, cellahőmérséklet, külső hőmérséklet), valamint a panelek sajátosságait (degradáció, karakterisztika) figyelembe véve megbecsüli a koszolódás nélküli optimális termelést. Mindkét park esetében próbatisztítást végeztem helyi segítséggel, amelyeket az erőművek beépített monitoring-rendszere dokumentált. Ezek alapján megkísérlek javaslatot tenni egy-egy optimális tisztítási időpontra mindkét fotovoltaikus park esetében.

Végezetül ismertetem a lehetséges tisztítási eljárásokat, azok realitását a két konkrét park esetében, valamint a megfelelő technikákhoz kapcsolódóan megtérülési számításokat végzek.

Abstract

The use of renewable energy sources is becoming more and more important in terms of our environment. 59 gigawatts of new photovoltaic capacity were installed over the past year on the Earth. With the propagation of the solar technologies their problems has been revealed. One significant problem is the efficiency loss due to soiling, which researchers could not yet provide an integrated, everywhere usable solution for.

However, it is important to talk about it, because the pollution on PVs' surface can cause more than 10%, or even in extreme falls total production decrease. Dirt causes the most significant loss on large solar parks, so intervention is a very important step at these locations. Considering, that in every continents the source of pollution is various, and the weather, that helps the natural cleaning, is area dependent too. This lead to the fact, that a globally working solution cannot be determined. For example, in Hungary the primary reason for pollution are bird dropping and dust. Sandstorms cause challenge for the solar parks operators in desert areas. In the northern areas the primary output reduction factor is covering effect of the snow.

In my study I present the specific problems of the Earth's regions, and show, which type of solar panel how reacts for pollution.

I demonstrate how much influence the various types of pollution have on the production, I provide examples of two domestic solar parks and other locations all around the world. I introduce the results of the considerable researches in the topic, which I used as starting point for my study.

In my paper I examine two Hungarian solar parks into the very details. One of them was built in 2015 in Berettyóújfalu, with the capacity of 495 kW, the other power plant was built in 2013 in Kistelek with that of 500kW. I have created a production model using the daily measured data from solar parks, which can predict the optimal production without pollution. This model uses measured data such as the irradiation, cell and external temperature, and the panel characteristics such as degradation. I realized test cleaning for both parks, the effects has been measured by the built-in monitoring system. According to this data I propose an optimal cleaning time for both photovoltaic parks.

Finally I describe the possible cleaning procedures, the reality of them in case of these two specific parks, and I provide payback calculations for the appropriate techniques.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Raisz Dávidnak, hogy az általa végzett mérések eredményeit rendelkezésemre bocsájtotta, valamint, hogy tanácsokat a két napelemparkból kapott adatok feldolgozásához, s a tisztítási modellem megalkotásával kapcsolatban jó ötletekkel segített.

Továbbá köszönettel tartozom a Nord-Point Kft.-nek a berettyóújfalui napelemparkjának mérési eredményeiért, és mert kérésemre próbatisztítást végeztek.

Végezetül megköszönöm a Phlegon Consult Kft.-nek, hogy a kisteleki napelemparkukhoz tartozó monitoring-rendszerhez hozzáférést biztosítottak, és próbatisztítást végezhettem néhány stringen.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	i
Abstract	ii
Köszönetnyilvánítás	iii
Tartalomjegyzék	iv
1 Bevezetés.....	1
1.1. A napelemekről általában	1
1.1.1 A napelemek fajtái.....	2
1.2. A szennyeződések okozta problémáról általában.....	2
2. Alapul vett tanulmányok fontosabb felismerései, mérési körülmények, módok	4
2.1. Hatásfokromlás függése a napelem fajtájától sivatagos környezetben.....	4
2.2. Különböző összetételű por hatása	7
2.3. Hatásfokromlás függése a napelem fajtájától sivatagos és városi környezetben.....	11
2.4. Az optimális tisztítási időpont meghatározása számítógépes modellalkotás segítségével	12
2.5. Nem csak por, hóesés.....	14
3. Por teljesítménycsökkentő hatását befolyásoló tényezők.....	17
4. Magyarországi mérések	20
1.2 Mérések a V1 tetején	20
1.3 Berettyóújfalu.....	22
1.3.1 2016. márciusi mérések	22
1.3.2 2016 nyara.....	27
1.4 Kistelek	28
1.4.1 Tisztítás előtti eredmények	28
1.4.2 Tisztítás utáni eredmények	29
1.4.3 Modellalkotás	31
5. Tisztítási javaslatok.....	37
6. Konklúzió	42

2	Irodalomjegyzék	45
---	-----------------------	----

1 Bevezetés

A megújuló energiaforrások egyre fontosabb szerepet töltenek be életünkben. Minél több ország szeretne a fosszilis energiahordozókról valamint az atomenergiáról zöld energiára váltani. Megújuló energiaforrásoknak tekintjük azokat az energiaforrásokat, melyek a természetben korlátlanul rendelkezésre állnak, vagy természeti folyamatok során folyamatosan megújulnak. Amíg a biomassa és a víz tájegységenként igen eltérően áll rendelkezésre, addig a nap és a szél a világon mindenhol megtalálható. Mivel a napsütés sokkal kiszámíthatóbb, mint a szél, így azokon a helyeken, ahol kellő mennyiségben rendelkezésre áll a nap energiája, előszeretettel létesítenek napelemes rendszereket.

2015-ben világszerte 59 GW összteljesítményű napelemes rendszert telepítettek a GTM Research adatai szerint, mely 34%-os bővülést jelent az előző, 2014-es évhez képest. Jólataik szerint 2016-ban 64 GW új bővülés várható, melyet főként kínai és Egyesült államokbeli rendszerek fognak gyarapítani. A Mercom Capital Group elemzése szerint a 2016-os évben a 64,7 GW összteljesítményt is eléri az újonnan létesült napelemek világszerte. [1], [2]

A világ élvonalába ugyan nem tartozunk bele, Magyarországon is egyre több helyen találkozhatunk napelemekkel. Családi házak, közintézmények tetején, sebességmérő műszerek energiaforrásaként az út mellett, és egyre bővülnek a hazai napelemparkok is. Legnagyobb a 2015 októberében átadott, 16 MW-os Mátrai Erőmű Zrt. fotovoltaikus erőműve, amely Visontától 7 km-re található az Őze-völgyi zagytározó sík felületén. 72480 db 255 W-os napelemtáblát telepítettek 30 hektáron. [3]

1.1. A napelemekről általában

A fotovoltaikus jelenséget először egy francia fizikus, Edmund Becquerel fedezte fel 1839-ben, apja laborjában kísérletezve. Megfigyelte, hogy bizonyos anyagok, mint ezüst-bromid (AgBr) vagy ezüst-klorid (AgCl), fény hatására kis mértékben villamos áramot állítanak elő. [4]

A jelenség fizikai háttere röviden a következő: az anyagban napsugárzás hatására töltött részecskék keletkeznek, melyek mozgásra képesek. Az elektrokémiai potenciálok, valamint a beépített elektromos tér hatására rendezetten kezdenek mozogni. Megindul az energiatermelés. Az elérni kívánt teljesítmény érdekében több panelt sorban összekapcsolnak, úgynevezett stringeket alakítanak ki. Mivel a napelemek egyenáramot állítanak elő, ezért hálózatra csatlakozás előtt inverterekkel váltóárammá alakítják, így ezek a napelemes rendszerek elengedhetetlen részei. [5]

1.1.1 A napelemek fajtái

A napelemeket gyártást tekintve két nagy csoportba sorolhatjuk. Ezek a kristályos illetve vékonyréteges panelek.

Kristályos fotovoltaiok esetén nagytisztaságú szilíciumtömböt állítanak elő, melyet felszeletelnek. Ezeket a szeleteket egymástól hermetikusan elválasztják, és egy alumíniumszállal sorosan összekötik. A panel celláinak hívjuk őket. Visszaverődést csökkentő bevonatot alkalmaznak és ügyelnek rá, hogy a fémes összeköttetések minél kisebb részt árnyékoljanak.

A kristályos technológián belül megkülönböztetünk két fajta panelt, melyeket ránézésre is fel lehet ismerni. A monokristályos napelemeknél egy cella egy szilíciumkristályból készül, hatszög alakú. Hatásfoka ennek a fajtának a legnagyobb, 15-17%. A közvetlen napfényt hasznosítják a legjobban, élettartamuk 30 év. Polikristályos panelek esetében a cellák több szilícium kristályt tartalmaznak, négyzet alakúak. Hatásfokuk kevesebb, mint a monokristályos napelemeknek, csak 10-13%, élettartamuk is csak 25 év. Ennek megfelelően olcsóbbak is monokristályos társaiknál.

A vékonyrétegű napelemeknél a félvezetőt – mely nem csak szilícium lehet – fizikai vagy kémiai eljárással lecsapatják a legtöbbször üveg hordozóra. A vékonyrétegek között is többféle technológia létezik. Az amorf (aSi) és mikromorf (μ Si) panelek hatásfoka 4-6%, illetve 7-8%, így felületigényük nagy, viszont cserébe olcsók és jól hasznosítják a szórt fényt. Élettartamuk 10 év. A kadmium-tellúrid napelemek hatásfoka szintén 7-8%, az amorf és mikromorf technológiával egy árkategóriába sorolhatók. Ezeknél jóval drágábbak és nagyobb hatásfokkal rendelkeznek a legújabb technológiák. A réz-indium-gallium-diszelenid (CIGS) és réz-indium-diszelenid (CIS) napelemek hatásfoka 9-12%, ám magas áruk miatt nem terjedtek el.

Szintén nem elterjedtek az organikus napelemek, melyek a legújabb fejlesztések. A félvezető organikus polimerek gyártása és működése hasonló a vékonyfilmes napelemekéhez. Megjelentek a fényérzékeny festett cellák is (dye-sensitised cells: DSC), amelyek a fotoszintézishez hasonlóan működnek. Előnyük, hogy nem érzékenyek a napsugár beesési szögére és széleskörűen alkalmazhatók, mert a festékréteg felvihető minden felületre (üvegre, fémre, műanyagra stb.). Hátrányuk az alacsony hatásfok, mely csupán 4%, valamint élettartamuk is 4-5 év, ezzel szemben áruk igen magas. [5], [6], [7]

1.2. A szennyeződések okozta problémáról általában

A 8-as tanulmány szerint a szennyeződés a harmadik legfontosabb környezeti hatás, mely a termelést befolyásolja. Csak a besugárzás és a hőmérséklet előzi meg. Míg ezeket könnyű megmérni besugárzásmérő és hőmérsékletmérő segítségével, melyek könnyen és már viszonylag olcsón is

beszerezhetők, addig a szennyeződésmérésre még nincsenek általánosan alkalmazható, megfizethető mérőeszközök. Tanulmányok során a szennyeződések összetételét valamint vastagságát mérték meg a kutatók, ám ipari környezetben mindkét módszer nehezen kivitelezhető, és igen drága. Vastagságmérőknél a porszemek nagyságrendjébe eső méreteket is kezelni tudó mérőberendezések szignifikánsan drágábbak, mint a legtöbb helyen használt, néhány tízezer forintos lézeres távolságmérő.

A besugárzás és a hőmérséklet egyes tájakon évszakonként néhány anomáliától eltekintve viszonylag homogénnek tekinthető, addig a szennyeződések ezeken a tájegységeken belül is változhatnak. Extrém esetben akár csak a napelempark egyik felét érintik, gondoljunk csak bele, ha a park mellett található egy forgalmas földút, mely jelentős porforrást jelent, vagy néhány panel felett nagyfeszültségű távvezeték halad át, mely nem csak árnyékolást eredményez, hanem jelentős madárürülék-lerakódást is. Utóbbi nem csak árnyékolja a paneleket, hanem savas mivoltából adódóan az üvegfelületet is károsítja.

Láthatjuk, hogy a szennyeződések nem tekinthetjük homogénnek, forrásuk igen különböző. Így árnyékoló hatásuk is igen változatos. Közvetlen mérésük is bonyolult, ezért leginkább közvetett hatásaikat érdemes tanulmányozni, mint például a termeléseszköken. Kutatási eredmények sikeresen bebizonyították, hogy valóban érdemes foglalkozni e teljesítménycsökkentő hatással, mivel főleg nagy rendszerek esetében tetemes veszteséget okoznak, ám még a mai napig nem sikerült egységes megoldást találniuk a hatásfokcsökkentő hatás észlelésére, melyet könnyen lehetne alkalmazni több napelempark esetében is.

2. Alapul vett tanulmányok fontosabb felismerései, mérési körülmények, módok

Monto Mani és Rohit Pillai [9] két periódusra osztja a napelemek teljesítménycsökkenését a szennyeződésekkel összefüggésben vizsgáló kutatásokat. Az első fázist 1940 és 1990 között határozták meg, a másodikat 1990-től napjainkig.

Az első fázisban általánosságban elmondható, hogy a kutatások során maga a por elkerülte a tudósok figyelmét, nem végeztek vizsgálatokat a szennyeződések összetételéről sem. Olyan fizikai és környezeti hatások is elkerülték a figyelmüket, mint a napelem tájolása vagy a szélmozgások a megfigyelt területeken, amik nagyban befolyásolják a porlerakódást. Egyes esetekben abból adódtak pontatlan eredmények, hogy a megtisztított és a koszos paneleket más-más napon mérték meg. A tanulmányok többsége referencia paneles mérésre épült. Kiválasztottak egy vagy több napelemet, amit gyakran, akár naponta tisztítottak, a többit hagyták szennyeződni, majd a mérések eredményeit a tiszta panelhez viszonyították.

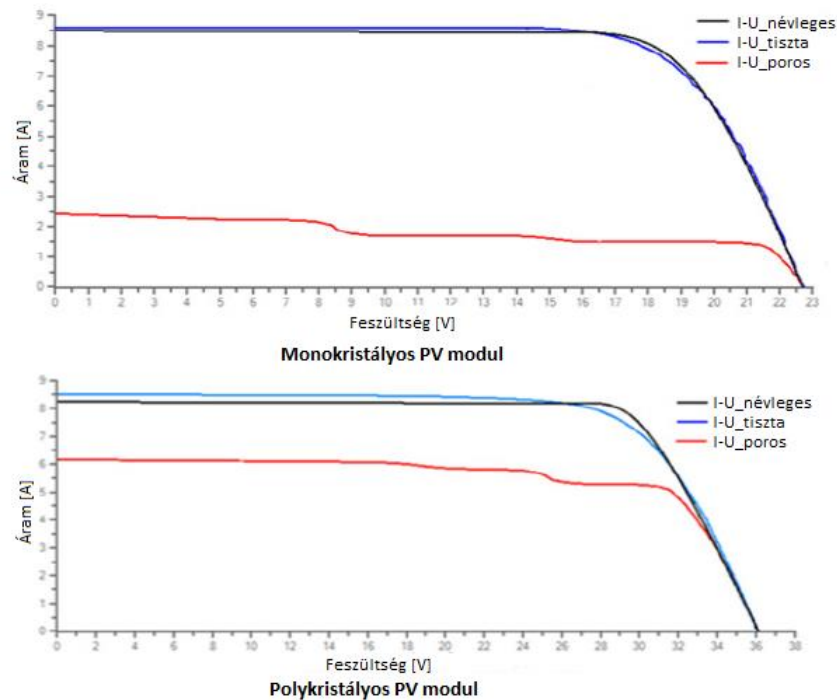
A második fázisban a kutatók már jobban elmélyedtek a por lerakódását befolyásoló paraméterekben. Azonban a természetes por milyenségét (optikai, geometriai, elektrosztatikus tulajdonságok) még érdemes megvizsgálni, mivel a legtöbb kísérletben mesterséges port alkalmaztak. A matematikai modellt alkalmazó tanulmányoknál leginkább gömb alakú részecskéket tételtek fel, ezért a valódi por geometriai tulajdonságait is érdemes megvizsgálni a lerakódással összefüggésben. Az elektrosztatikus vonzás hatása is még kevésbé felderített terület, éppúgy, mint a vízfoltok és a só-lerakódások következményei.

2.1. Hatásfokromlás függése a napelem fajtájától sivatagos környezetben

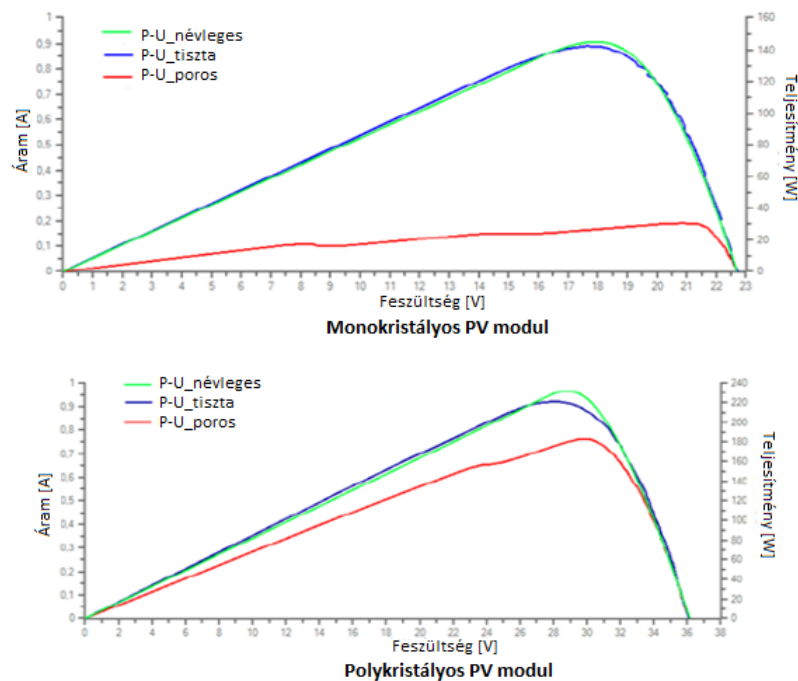
A 10-es tanulmányban 1 éven át figyeltek meg kétféle napelemet, monokristályos és polikristályos szilícium paneleket. A mérést Afrikában, a Száhel övezetben, Szenegálban végezték. Egy évre kiraktak két panelt a sivatagba, a természet hatásaira bízva őket, majd az egy év leteltével az egyiket letisztították. Ez lett a referencia panel. Összehasonlították az áram-feszültség és teljesítmény-feszültség karakterisztikákat, a rövidzárási áramot, az üresjárási feszültséget, a maximális kimeneti teljesítményt, valamint a kitöltési tényezőt.

Az 1. és 2. ábrán a panelek három állapotban megmért értékei láthatók. A névleges értékek egy ugyan olyan fajtájú, az időjárásnak ki nem tett, tiszta panelhez tartoznak. A monokristályos és

polikristályos napelem esetén is a névleges és a tiszta értékek nagyon hasonlóak egymáshoz, kis eltérés látható, főleg a polikristályos panelnél.



1. ábra: A kétfajta PV modul I-U karakterisztikájának összehasonlítása tisztán és porosan egy év használat után [10]



2. ábra: A kétfajta PV modul P-U karakterisztikájának összehasonlítása tisztán és porosan egy év használat után [10]

A rövidzárási áramnál észrevehető eltérés – az I-U karakterisztikán látható –, addig az üresjárási feszültségnél nincs számottevő változás. A P-U karakterisztikánál látható, hogy a maximális

teljesítmény csökkent. Ezen értékek változása a környezeti hatásokkal magyarázható, mint a hőmérséklet, csapadék vagy az UV sugárzás degradáló hatása.

Ha a porosodásnak kitett elemeket nézzük, akkor már számottevő változás figyelhető meg a karakterisztikákon. A rövidzárási áram, a maximális feszültség és maximális teljesítmény mind nagyrányú csökkenést mutat. Ennek oka, hogy a napelem felületén lerakódott por árnyékolást eredményez, így a megtisztított valamint a szennyezett napelem-cellákat nem ugyanannyi besugárzott energia éri.

Modulok	Paraméter	Kezdőérték	Tiszta modul egy év használat után	Poros modul egy év használat után	Abszolút különbség	Relatív különbség [%]
Monokristályos PV-modul	P _{max} [W]	145	144,59	32,17	-112,42	-77,75
	U _{max} [V]	17,9	17,83	20,79	2,96	16,60
	I _{max} [A]	8,1	8,06	1,57	-6,49	-80,52
	U _{üj} [V]	22,7	22,7	22,7	0,00	0,00
	I _{rz} [A]	8,5	8,47	2,09	-6,38	-75,32
	FF [%]	75,14	73,64	60,4	-0,13	-17,98
Polikristályos PV-modul	P _{max} [W]	230	217,37	178,19	-39,18	-18,02
	U _{max} [V]	29,2	28,04	30,09	2,05	7,31
	I _{max} [A]	7,88	7,75	5,93	-1,82	-23,48
	U _{üj} [V]	36,6	36,16	36,16	0,00	0,00
	I _{rz} [A]	8,44	8,33	6,61	-1,72	-20,65
	FF [%]	74,48	72,09	70,64	-0,01	-2,01

1. táblázat: A két PV modul paraméterei egy év használat után tiszta és poros állapotban [10]

Az 1. táblázatban látszanak az üresjárási feszültséghez, rövidzárási és maximális áramhoz, maximális feszültséghez valamint a maximális teljesítményhez és a kitöltési tényezőhöz kapcsolódó mérési eredmények. A maximális kimeneti teljesítmény csökkenése 18%-tól (pc-Si) 78%-ig (mc-Si) változhat típustól függően. A maximális áram a tiszta modulokhoz viszonyítva 23%-tól (pc-Si) 80%-ig (mc-Si) csökkent. A kitöltési tényező pedig 2%-tól (pc-Si) 17%-ig (mc-Si) csökkent. A maximális kimeneti feszültség és üresjárási feszültség pedig nem változott a porlerakódás hatására.

A kitöltési tényező a napelemek fontos jellemzője, a gyártási eljárásoktól és anyagoktól függő belső veszteségeket ez írja le legjobban. Ha például két napelemnek megegyezik az üresjárási feszültsége és a rövidzárási árama, akkor a nagyobb kitöltési tényezőjű panel több energiát termel. Vagyis ha a kitöltési tényező csökken, vele együtt csökken a kimenő energia. Definíciója a 3. ábra

alapján a következő: A maximális teljesítményű ponthoz (MPP) tartozó áram és feszültség szorzatának és az üresjárási feszültség és rövidzárási áram szorzatának a hányadosa. Képlete az alábbi:

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_{rz} \cdot U_{üj}} \quad (1)$$

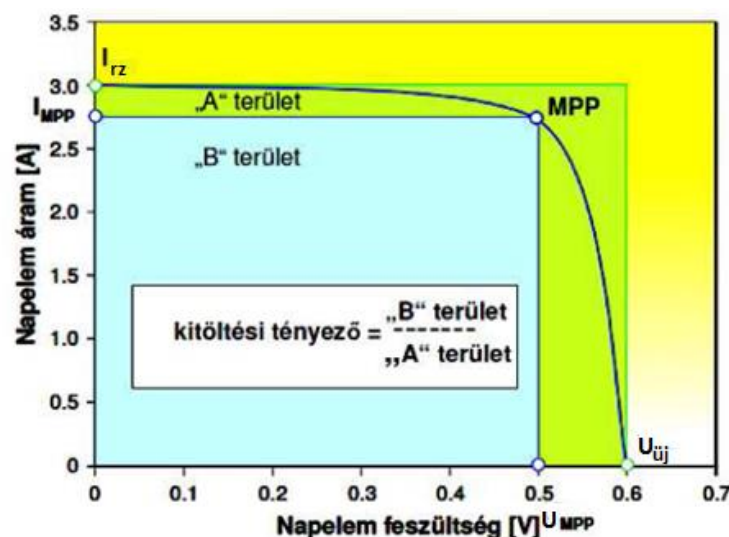
ahol

I_{MPP} a maximális teljesítményű ponthoz tartozó áram,

U_{MPP} a maximális teljesítményű ponthoz tartozó feszültség,

I_{rz} rövidzárási áram,

$U_{üj}$ üresjárási feszültség.



3. ábra: A kitöltési tényező definíciója [11]

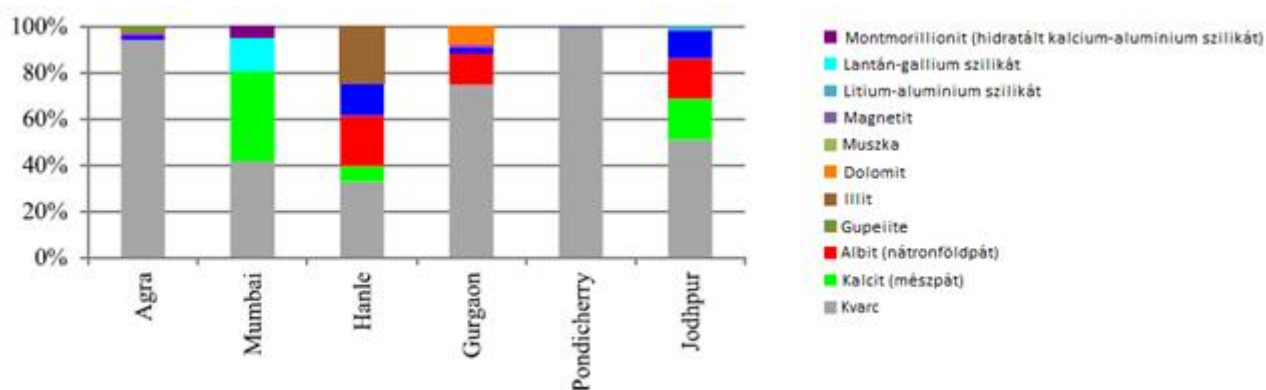
A tanulmány megállapította, hogy a monokristályos napelemek sokkal érzékenyebbek a szennyeződésekre, de mindkét fajta panel esetében a karbantartási munkálatok közé beiktatandó feladat a periodikus tisztítás.

2.2. Különböző összetételű por hatása

A 8-as tanulmány köztes helyzetet képvisel, mivel laboratóriumi körülmények között, azonban természetes porral végezték az alapjául szolgáló méréseket. A természetes környezetben végzett kutatások sok időt igényelnek, akár hosszú hónapokat, sőt éveket is, cserébe az adott helyen uralkodó időjárás és porminőség mutatkozik meg a mérésekben. Ezzel ellentétben a laboratóriumi körülmények között végzett kutatások mesterséges port használnak, ami eltér az adott helyeken fellelhető szennyeződések tulajdonságától, emiatt nem általánosíthatók. Azonban a mérés feltételei állandók, így az könnyen megismételhető, modellalkotásra tökéletes.

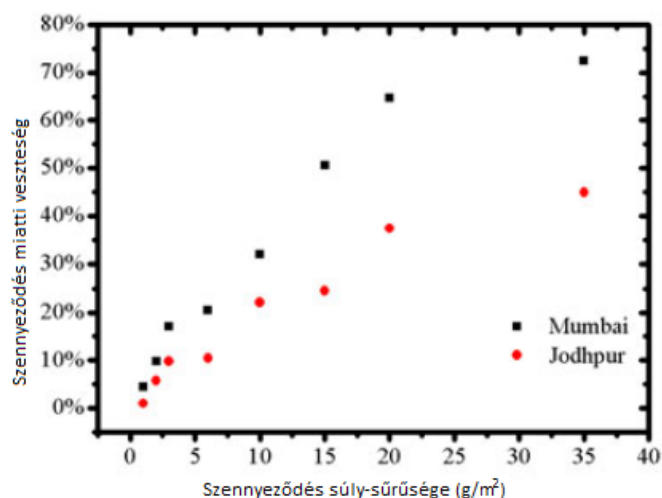
Létező napelemek felületéről vettek szennyeződésmintákat, mert a talajból vagy a levegőből vett minta esetén eltérő lett volna a részecskék méretének eloszlása. India két fő helyéről gyűjtötték be a pormintákat Jodhpurból – ami az ország legintenzívebben besugárzott részén van, sivatagos környezetben – valamint Mumbaiból, ahol városi környezetben, a tetőkön jelennek meg leginkább a napelemek. Valamint korlátozott mennyiségben rendelkezésre állt Gurgaonból, Hanleből, Agrából és Pondicherry-ből is minta.

A begyűjtött mintákat először próbadarabokra ülepítették, különböző sűrűségben, majd megvizsgálták a spektrális összetételüket. A mérés eredménye a 4. ábrán látható.



4. ábra: A por összetétele a különböző mintavételi helyekről [8]

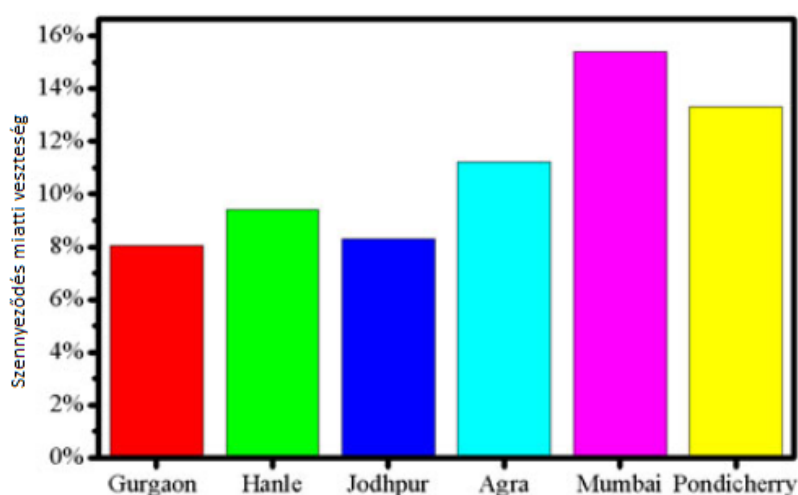
Kalcitot (mészpát) találtak a mumbai-i, jodhpuri és hanlei mintákban, albitot (nátronsó) pedig Hanléban, Jodhpurban és Gurgaonban. A következő fő összetevő a zeolit, ami Agrában, Hanléban, Jodhpurban és Gurgaonban volt fellelhető. Hanléban pedig az illite nevű anyag volt a fő alkotóelem. Mivel ezen anyagok optikai abszorpciós és reflexiós tulajdonságai igen eltérőek, ezzel magyarázhatók az adott mintákkal szennyezett napelemek teljesítménybeli különbségei.



5. ábra: Porosodás miatti veszteség a szennyeződés súlyának függvényében Mumbaiban és Jodhpurban [8]

Az 5. és 6. ábra y tengelyén ábrázolt szennyeződés miatti veszteséget a mesterségesen szennyezett és a tiszta panelek rövidzárási áramának hányadosával mérték meg.

Az 5. ábrán látható, hogy a porosodás miatti veszteség a lerakódott por mennyiségével nagyon gyorsan nő. Nagyobb sűrűségnél már telítődik ez a veszteség. A jodhpuri és a mumbai-i por viselkedése közötti eltérés azzal magyarázható, hogy a mumbai-i porban nagyobb számban találhatók meg kisméretű, finom porrészecskék, amik jobban korlátozzák a teljesítményt, mint ahogy azt már El-Shobokshy és Hussein [9] is említette tanulmányában.



6. ábra: A veszteségek $1,8 \text{ g/m}^2$ -es porsűrűségnél [8]

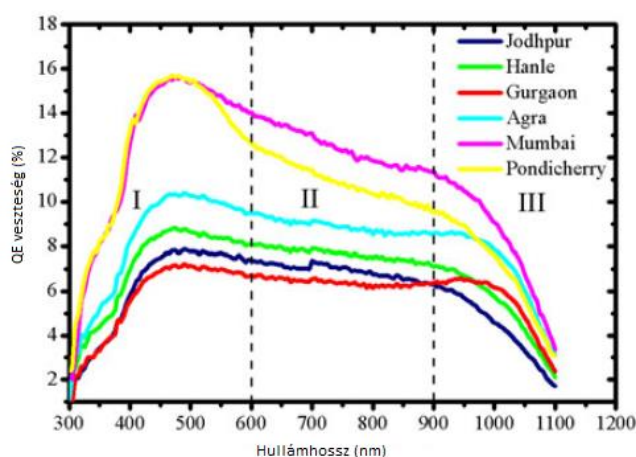
A 6. ábrán az összes minta összehasonlítása látszik $1,8 \text{ g/m}^2$ porsűrűségnél. A mumbai-i és pondicherry-i minták nagy vesztesége a részecskék méretével és spektrális viselkedésével magyarázható. A 2. táblázatban látható a minták összetételének méret szerinti megoszlása. Az agyagüledék Mumbai-ban 22,31%, Pondicherryben pedig 17,59%, a részecskék mérete is nagyon kicsi, kevesebb, mint $4 \mu\text{m}$. A kisebb részecskék könnyebben összetapadnak, kisebb lyukakat hagynak egymás közt, ez magyarázza a nagyobb veszteséget. A minták spektrális viselkedése megtekinthető a 7. ábrán.

A kvantum hatékonyság (QE) a cellákban létrejövő mozgó töltéshordozók és a megadott energiával beesett fotonok aránya. Ha a beeső foton energiája kisebb, mint a tiltott sáv energiája, akkor azoknak a kvantum hatékonysága nulla. Vagyis, ha egy napelem kvantum hatékonysága nagyobb egy adott hullámhosszon, akkor azon a hullámhosszon beeső fotonok közül többet tud hasznosítani. Egy napelemnek lehet 100%-nál nagyobb kvantum hatékonysága is, abban az esetben, ha a beeső foton energiája több mint kétszerese a tiltott sáv energiájának, vagy kettő vagy több elektron-lyuk párt hoz létre. [12] A QE veszteség a 7. ábra y tengelyén azt mutatja, hogy a napelem eredetileg meglévő spektrális tulajdonságai hány százalékkal csökkentek. Mindkét minta

karakterisztikája 475 nm-nél törik le. Az a tény, hogy a mumbai-i minta magasabb hullámhosszoknál nagyobb spektrális csökkenést mutat, mint a pondicherry-i, a szennyeződés kémiai összetételével magyarázható.

Porminta származási helye	Teljes minta %-a		
	Agyag (0-4 μm)	Iszap, üledék (4-63 μm)	Szemcsés (63-100 μm)
Jodhpur	9,26	80,02	10,71
Mumbai	22,31	77,68	0,00
Gurgaon	5,40	73,82	20,70
Hanle	10,93	82,69	6,37
Agra	16,03	71,54	12,48
Pondicherry	17,59	69,99	12,38

2. táblázat: Üledék típusa [8]



7. ábra: QE spektrumbeli különbség tiszta és poros üvegminták között 1,8 g/m²-es porsűrűségeknél mérve [8]

A legkevesebb veszteséget a Jodhpurban és Gurgaonban gyűjtött mintáknál mérték. Mindkét mintában a szemcsés részecskék voltak nagy arányban, amelyeken a fény könnyebben áthatol. Ha megnézzük a pondicherry-i mintában is viszonylag nagy, 12.38%-os arányban vannak nagyobb méretű szemcsék, viszont az agyagos kis lerakódások mértéke is számottevő, így a vesztesége nem hasonló a jodhpuri és gurgaoni mintákéhoz. Amíg a fény a nagy részecskék között utat talál, ebben az esetben a nagyobb szemcsék közötti réseket kitölti a finom agyagos por, így nehezebben hatol át a napsugár.

A tanulmány eredményeiből levonható a következtetés, hogy a kisebb méretű szennyeződések jobban csökkentik a napelemek hatásfokát, így a nagymennyiségű finom port tartalmazó helyeken különösen oda kell figyelni a hatásfokcsökkenésre.

2.3. Hatásfokromlás függése a napelem fajtájától sivatagos és városi környezetben

Szintén a 8-as tanulmányban a mérés egy másik szakaszában megnézték, hogy különböző napelem típusoknál hogyan változik a porosodás miatti teljesítmény-csökkenés. Ehhez c-Si (kristályos szilícium), a-Si (amorf szilícium), CIGS (vörösréz-indium-gallium-szelén) és CdTe (gallium-tellurid) modulokat használtak, amelyeket különböző sűrűségű szennyezések esetén mértek meg. A porlerakódás miatti veszteséget a szennyezett és a tiszta panelek rövidzárási áramának hányadosával vizsgálták. Az eredményeket a 3., 4. és 5. táblázat mutatja.

Azt látjuk, hogy a keskenyebb tiltott sávval rendelkező félvezetők, mint a c-Si modul kisebb veszteséget mutatnak, mint a szélesebb tiltott sávval rendelkezők (CdTe és a-Si). Az a-Si és CdTe jobb a forró klímához, az alacsonyabb termikus együtthatója miatt. A mérések alapján ezek a modulok gyakoribb tisztítást igényelnek.

	PV modulok szennyeződés miatti vesztesége (%)			
Sűrűség	a-Si	CdTe	CIGS	c-Si
1 g/m ²	8,3	7,5	6,9	6,9
2 g/m ²	22,9	21,2	20,0	19,9
7,5 g/m ²	47,4	44,8	42,7	42,5
10 g/m ²	54,0	51,3	49,1	48,8
5 g/m ²	75,9	72,9	70,5	70,0
20 g/m ²	80,3	77,5	75,1	74,7
35 g/m ²	94,4	93,2	92,0	91,6

3. táblázat: Szennyeződések miatti veszteség a mumbai-i mintákon [8]

	PV modulok szennyeződés miatti vesztesége (%)			
Sűrűség	a-Si	CdTe	CIGS	c-Si
1 g/m ²	5,3	4,7	4,3	4,3
2 g/m ²	10,9	9,8	9,1	9,1
7,5 g/m ²	20,9	19,3	18,2	18,1
10 g/m ²	27,7	25,5	23,9	23,8
15 g/m ²	37,1	34,4	32,5	32,4
20 g/m ²	42,8	39,9	37,8	37,7
35 g/m ²	71,4	67,4	64,4	64,0

4. táblázat: Szennyeződések miatti veszteség a jodhpuri mintákon [8]

	PV modulok szennyeződés miatti vesztesége (%)			
Porminta származási helye	a-Si	CdTe	CIGS	c-Si
Mumbai	17,7	15,7	15,4	14,5
Pondicherry	15,5	13,8	12,7	12,4
Jodhpur	9,2	8,5	8,4	7,9
Hanle	10,2	9,5	9,5	8,9
Gurgaon	8,4	7,8	8,3	7,5
Agra	11,9	11,1	11,4	10,6

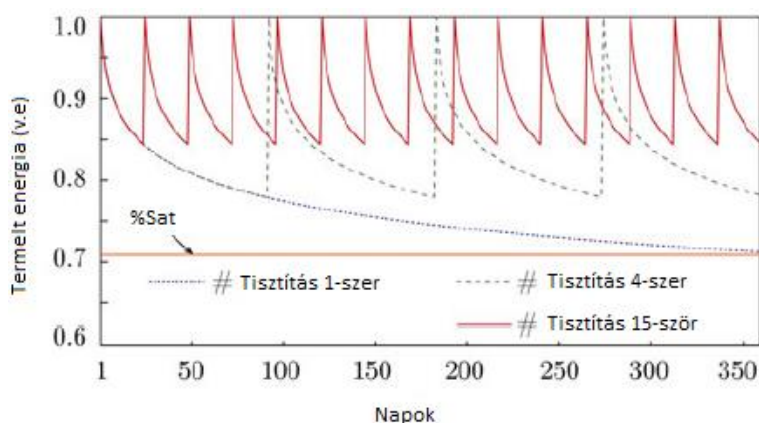
5. táblázat: Szennyeződések miatti veszteség hat helyről ($1,8 \text{ g/m}^2$) [8]

2.4. Az optimális tisztítási időpont meghatározása számítógépes modellalkotás segítségével

A 13-as tanulmány jó példa arra, miként lehet számítógépes programok segítségével meghatározni a veszteséget és így kiszámítani az optimális tisztítási időpontot.

Több módszer létezik arra, hogyan becsüljük meg a PV-k teljesítményének alakulását. Ezek közül a legegyszerűbb, amikor mérési eredmények alapján különféle változókat definiálnak. Ehhez valós idejű mérési eredményeket használnak fel, de lehetőség van rá, hogy műholdképek felhasználásával számításba vegyék a földrajzi tényezőket, időjárást is, így pontosabban jósolható a jövőbeni termelés.

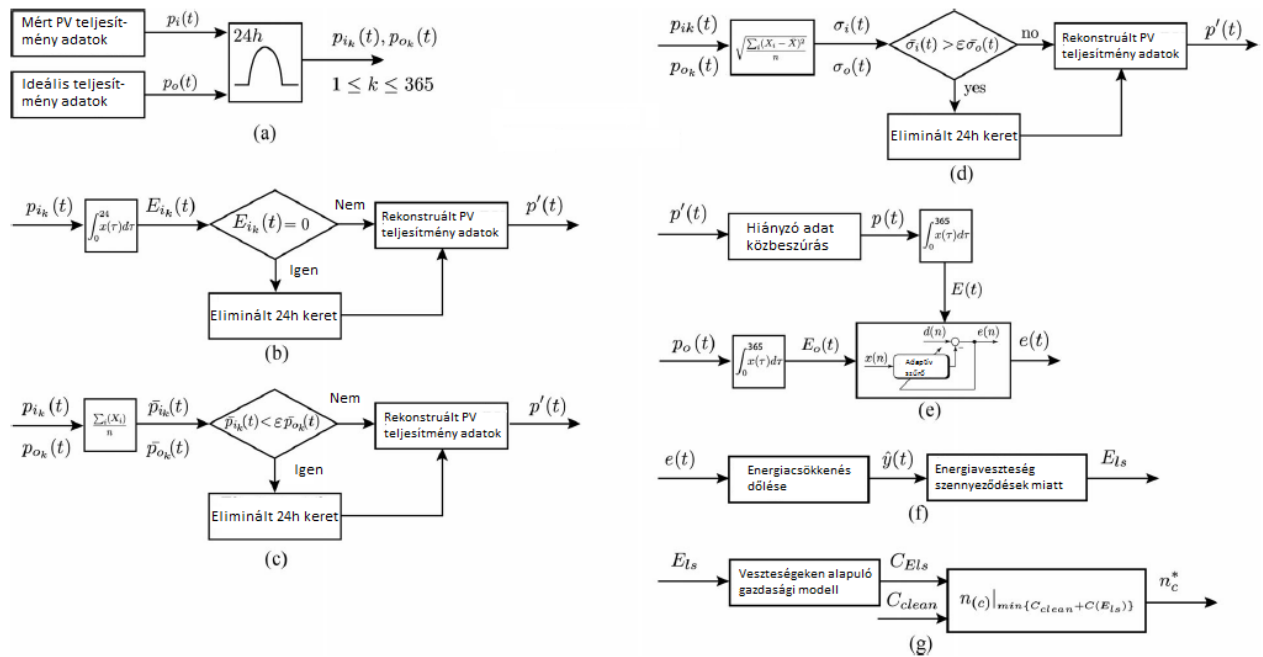
Ezt a mérést Chile északi részén végezték, Copiapótól nem messze. A PV-panelek északi irányításúak voltak, 30° -os dőlésszöggel, követő rendszer nélkül. Három napelemet vizsgáltak meg. Az elsőt a mérés elején egyszer tisztították le, a másodikat negyedévente, a harmadikat 15-ször egy évben, azaz körülbelül 24 naponta. Mindhárom modult egy éven keresztül vizsgálták. A mérési eredmények a 8-as ábrán láthatók.



8. ábra: A tisztítás és a termelt energia viszonya a mérési időszak folyamán [13]

Megfigyelhető, hogy amint a tisztítások gyakorisága nőtt, úgy nőtt a termelt energia is. Észrevehető továbbá az is, hogy a termelt energia egy bizonyos szint alá (%Sat) nem süllyed, ami a por összetételétől függ. Ezt a szintet tapasztalati úton figyelték meg. Soha sem éri el a nullát, ugyanis csak a hó takarja el teljesen a napelem felületét, porlerakódás esetén a besugárzás sosem csökken nullára.

Ezek után, ha ismerjük a tisztítás költségeit, már készíthetünk egy optimalizált tisztítási tervet.



9. ábra: Folyamatábra a lépésekhez. (a) Adatok rendezése 24h-ás keretbe. (b) Hosszútávú hibák kiszűrése. (c) Állandó légköri hibák kiszűrése. (d) Átmeneti légköri hibák és rövidtávú hibák kiszűrése. (e) Évszakok változásának kiszűrése. (f) Megkapott porosodás miatti energiaveszteségek (g) Megkapott optimális tisztítási program. [13]

A módszertan arra épül, hogy a mért valós adatokat és egy ideális modell adatait összehasonlítja. Lépések:

- 1) A napelem modul teljesítmény adatainak feljegyzése.
- 2) Egy ideális modell beszerzése az adott földrajzi elhelyezkedéshez.
- 3) 9 (a): Az ideális és a valós adatok felosztása napokra, majd ezek – egy algoritmus segítségével – egy egész évet jellemző adathalmazzá válnak.
- 4) 9 (b): Üres részek kiszűrése, melyeket a hosszú távú rendszerhibák okoztak. (Ez a lépés azért szükséges, hogy értelmes napi eredményeket kapjunk.)
- 5) 9 (c): Állandó légköri jelenségek befolyásainak kiszűrése, hogy a teljesítmény átlagértékével számolhassunk. (Ez azért szükséges, hogy ne számítsunk, hogy az adott mérési érték napos vagy felhős időszakban készült-e.)

- 6) 9 (d): Rövidtávú rendszerhibák és esetleges légköri jelenségek kiszűrése, hogy kiszámíthassuk a napi teljesítmény szórását, így kiküszöbölve a felhők okozta plusz eltérést.
- 7) Hiányzó adatok kitöltése, napelem teljesítményadatainak rekonstruálása.
- 8) 9 (e): Évszakok és por befolyásának kiszűrése egy adaptív szűrő segítségével.
- 9) 9 (f): Előáll a por miatti energiacsökkenés.
- 10) 9 (g): Porosodás okozta gazdasági veszteség meghatározása és összevetése a tisztítás költségeivel. Így meghatározható az optimális tisztítási időpont.

Különböző pontosságú modelleket lehet kapni, ha más-más jellemzőket veszünk be. Ahhoz, hogy a földrajzi elhelyezkedésnek megfelelő modellt kapjanak, egy globális tengerszint feletti magassági modellt használtak a besugárzás meghatározásánál. Viszont a napelemek teljesítményét nem csak a besugárzás befolyásolja, hanem a hőmérséklet is, így azt hozzávéve még pontosabb modell kapható. Minél több befolyásoló tényezőt veszünk figyelembe a modell megalkotásánál, annál pontosabb lesz, de ugyanakkor bonyolultabb is.

A mérésből látszik, hogy a valós adatok, valamint egy abból megalkotott modell figyelembevételével jól megjósolható az optimális tisztítási időpont.

2.5. Nem csak por, hóesés

A 14-es tanulmány a hó okozta teljesítménycsökkenéssel foglalkozik. A hó viselkedése más, mint a poré, bár teljesítménycsökkentő hatásai igen hasonlóak. A hólerakódás nagyban függ a hőmérséklettől (ami a pornál nem jelentkezik), a szélességtől, a dőlésszögtől és a felszíni viszonyoktól. A hókristályok -3°C alatt visszapattannak a napelem felszínéről. Viszont -3°C fölött ez a tulajdonságuk csökken, és elkezdenek összeragadni a kristályok, ami hómassza kialakulásához vezet.

A vizsgálatot különböző dőlésszögű napelemekkel végezték el (5° , 10° , 15° , 20° , 40° és 60°). Amorf szilícium (a-Si) és kristályos szilícium (c-Si) cellákat vizsgáltak, összesen 70 darabot. Minden dőlésszöghöz két modul tartozott. Meteorológiai előrejelzések segítségével megbecsülték, hogyan fog alakulni a panelek rövidzárási árama. Definiáltak egy kiviteli arány nevű változót (M_{OR}), amit a következőképpen számítottak:

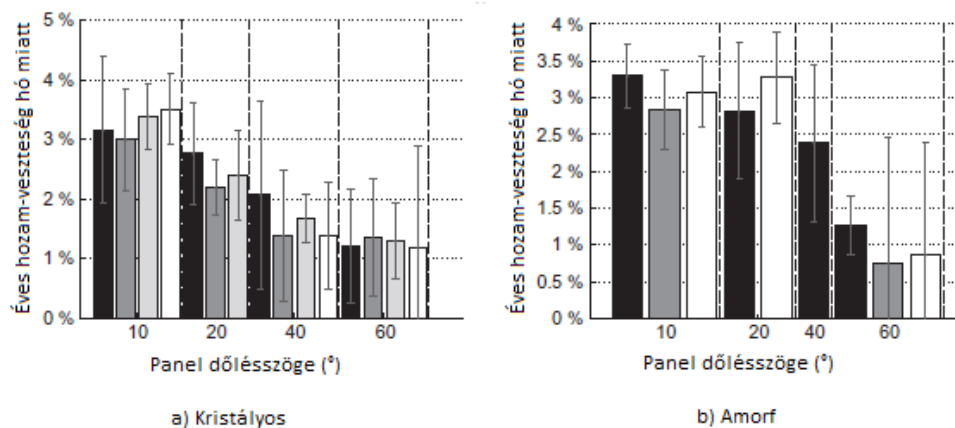
$$M_{OR} = \frac{I_{rz}}{I_{rz}^{\wedge}} \quad (2)$$

ahol

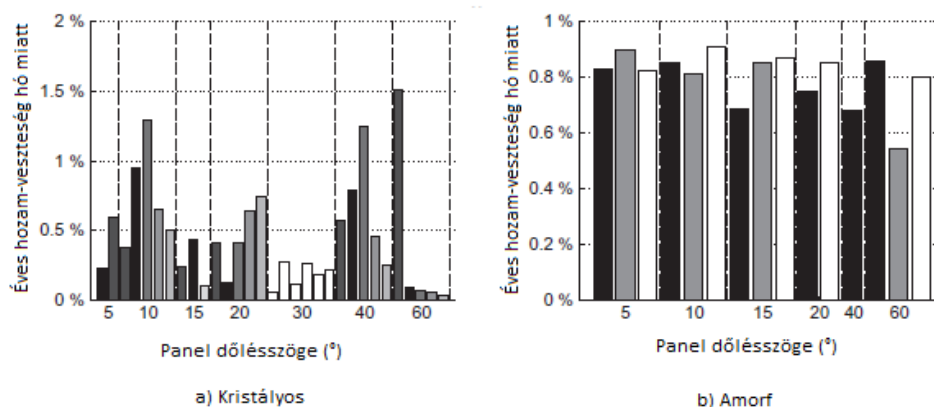
I_{rz} mért rövidzárási áram,
 $I_{rz}^{\wedge}$ megjósolt rövidzárási áram.

Hóesésnél ez az érték 0,7 volt, tiszta időben pedig 0,2.

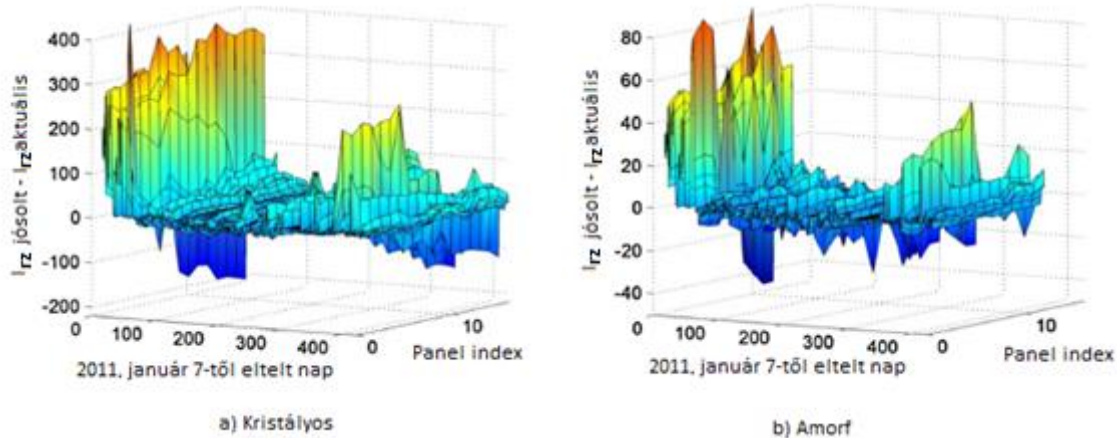
A mérési eredmények a 10. és 11. ábrán láthatók. Nem általánosíthatók, mivel a mérések alatt a történelmi adatokhoz képest kevesebb hó hullott az adott időszakban. De jól mutatja, hogy akár 3,5 %-os veszteséget is okozhat a hó.



10. ábra: Hó miatti veszteségek 2010/2011 telén (a) c-Si és (b) a-Si panelek esetén. Az oszlopok színei a gyártói vagy utólagos felszíni kezelést mutatják. [14]



11. ábra: Hó miatti veszteségek 2011/2012 telén (a) c-Si és (b) a-Si panelek esetén. Az oszlopok színei a gyártói vagy utólagos felszíni kezelést mutatják. A hibaoszlopok nincsenek jelölve, mert nagyobbak, mint a mért eredmények. [14]



12. ábra: Modulok napi veszteségei 2011 január 7-től, 2011 március 9-ig, pozitív esetben a panel termel, (a) c-Si, (b) a-Si [14]

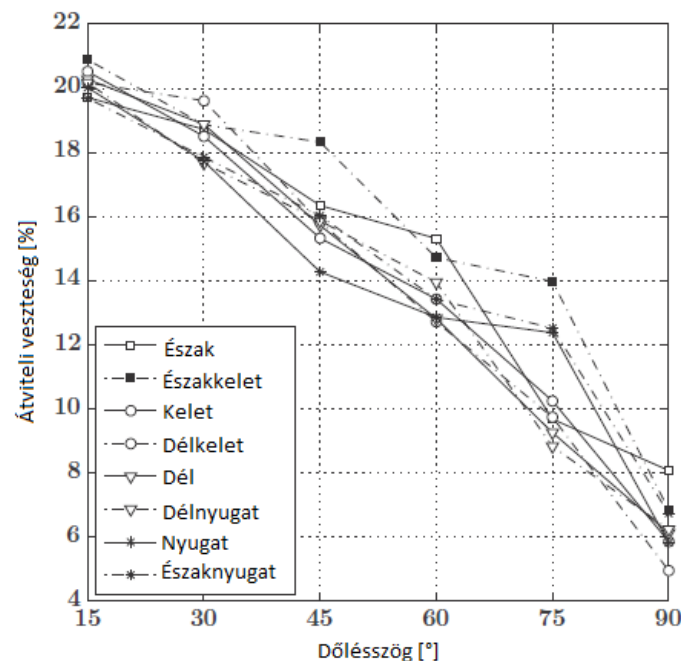
A 12. ábrán látható, hogy a havazás hatása nem mindig negatív. Ez azzal magyarázható, hogy a fény-visszaverődési effekt nő a panel dőlésszögével. Ennek oka a megnövekedett látószög a modul és a hó felszíne között.

Megfigyelhető, hogy a hóesés miatti veszteség a modul dőlésszögének növekedésével csökken, és a lehullás ideje is ugyanezt a trendet mutatja. Nagy dőlésszögnél a gravitáció segít eltávolítani a havat a panel felszínéről. Észrevették, hogy a lehullási idő összefügg a napi átlaghőmérséklettel és a relatív csapadékmennyiséggel is. A nagyobb relatív csapadékmennyiség megnöveli a hó panelen eltöltött idejét. A lehullási időt az alacsonyabb hőmérséklet segíti. A hó lehullását a panel felszínéről nehéz megjósolni, mert nagyon sok légköri tényező befolyásolja, de elmondható, hogy -15°C alatt lép fel leginkább. Előtte a vizes hó jobban ragad a panel felszínére.

3. Por teljesítménycsökkentő hatását befolyásoló tényezők

A szennyeződések lerakódását számos tényező befolyásolja:

- **Dőlésszög:** Több kutatás is megállapította, hogy a por vízszintes napelemtáblákra könnyebben rakódik le. Hegazy tanulmányának köszönhetően például az is kiderült, hogy a vízszintestől 30°-nál kisebb dőléssel rendelkező napelemek porlerakódása túlnyomóan klímafüggő. [9]
- **Tájolás:** A dőlésszög és a tájolás együttes hatását mutatja a 13. ábra. Itt is látható, hogy a kisebb dőlésszögű panelek vesztesége nagyobb. Az északkeleti tájolású napelemek szennyeződtek leginkább, ez magyarázható az uralkodó széliránnyal is, mely ráhordta a homokot a panelekre.



13. ábra: Por miatti átviteli veszteség különböző dőlésszögek és tájolások esetén, Miniában (Egyiptom) [15]

- **Napfény elhajlása:** A porrétegen a napsugarak elhajlanak és szétszóródnak. Ennek mértéke függ a részecskemérettől, a por vastagságától, a spektrális jellemzőktől, por színétől stb. Ez a jelenség főleg a monokristályos napelemeknél okoz gondot, mert azok csak a 90°-ban beeső napfényt tudják hasznosítani, az amorf napelemekkel szemben, amelyek a szórt fényt is jól tűrik. [6], [16]
- **Részecskék mérete, anyagi tulajdonságai:** Több mesterségesen előállított porral kísérleteztek, így jobban megfigyelhető volt, hogy milyen összetételű por, milyen mértékben csökkenti a napelem teljesítményét. El-Shoboksky és Hussein mészkő-, cement- és

szénrészecskékkel szennyezte a napelemét. A kísérletben a fényt halogénizzó szolgáltatotta, így a megvilágítás állandó volt. Ők azt tapasztalták, hogy a legjelentősebb hatása a cementnek van, valamint azt is megállapították, hogy a finomabb részecskék jobban csökkentik a teljesítményt, mint a durvábbak. [9] Kaldellis és Fragos kísérletükben vörös földet, mészkövet és széntartalmú pernyét használtak. Ők úgy találták, a vörösföld kelti a legkedvezőtlenebb hatást a teljesítményre nézve (vörösföld 7,5%, mészkő 4%, pernye 2,3% visszaesést okozott a napelem teljesítményében). Feltehetően a vörösföld színe, részecskéinek átmérője és összetétele befolyásolta az eredményt. [16] Ebből is látszik, hogy a por olyan tulajdonságai, mint forma, szín, méret, részecskék finomsága, mind közrejátszanak a teljesítménycsökkenés mértékében.

- Szél: A szélnek nagy jelentősége van, ezt támasztja alá Grossen szélcsatornás mérése is. Megállapította, hogy az általa vizsgált elrendezésnél (45°-os dőlés, két tükör) szélirányban a szélesebbeség növekedésével a porlerakódás is nőtt. Megfigyelte továbbá, hogy mely szélirányok okoznak nagyobb szennyeződést. Délután és éjszaka az erős nyugati szelek okozták a lerakódást. Délnyugati szél csak éjszaka volt számottevő hatású. Azt is megfigyelte, hogy a porviharoknál napközben a panelekre rakódott a por, éjszaka pedig leginkább a keleti tükrökre. [9]
- Nedvesség: Ha vizes a napelem, a napfény háromféleképpen viselkedhet a vízfelületén: megtörhet, visszaverődhet vagy elhajolhat. Ezek a hatások a közvetlen sugárzás hatását rontják. Kazem tanulmánya bemutatta, hogy a napelem hatékonysága akkor magas, ha kevés a csapadék. [16] A víztől vízfoltok is maradnak a napelem felszínén, valamint a por a víz hatására összeáll, ami tovább rontja a napelem teljesítményét. Viszont a lerakódott port letisztítják az esőzések, így másrésről hasznos a víz jelenléte. Ha csapadékmentes helyen van a napelem, az esőzéseket a tisztítás gyakoriságával lehet összefüggésbe hozni. Hegazy a tanulmányában por- és homokviharok után azonnali tisztítást javasolt, Elimir pedig közepesen poros helyeken heti rendszerességgel. [9]
- Napelem felépítése, fajtája: Megállapították, hogy az a-Si termel legjobban, poros környezetben. [16] A porlerakódás eloszlása nagyban függ a panel felépítésétől, valamint az esetleges tisztítási rendszer elhelyezkedésétől. [8]
- Környezeti hatások: A környezetből bekerülő szennyeződések, mint a közlekedésből, iparból származó por, növényi részecskék, gombák, spórák alakítják ki a por tulajdonságát. [9] Környezeti hatásnak vehetjük még a madárürüléket, amely máshogy viselkedik, mint a por, mind a takarási tulajdonságaiban, mind a tisztítási igényeiben. Nehezebb letisztítani, valamint károsíthatja a napelem felületét a benne lévő savak miatt. [17]

- Évszak: Wakim kutatása megállapította, hogy a por hatása a PV teljesítményére nyáron és tavasszal (ebben a hat hónapban 20%) nagyobb, mint ősszel és télen. [9]

A por nem csak a napelem felületén, mint lerakódás okoz gondot, hanem a légkörben is akadályozza a napsugarak átjutását. Ezt Hassan vizsgálta, megfigyelte, hogy 33,5%-tól akár 65,8%-ig is csökken a napelem hatásfoka a légköri szennyeződések következtében. [9]

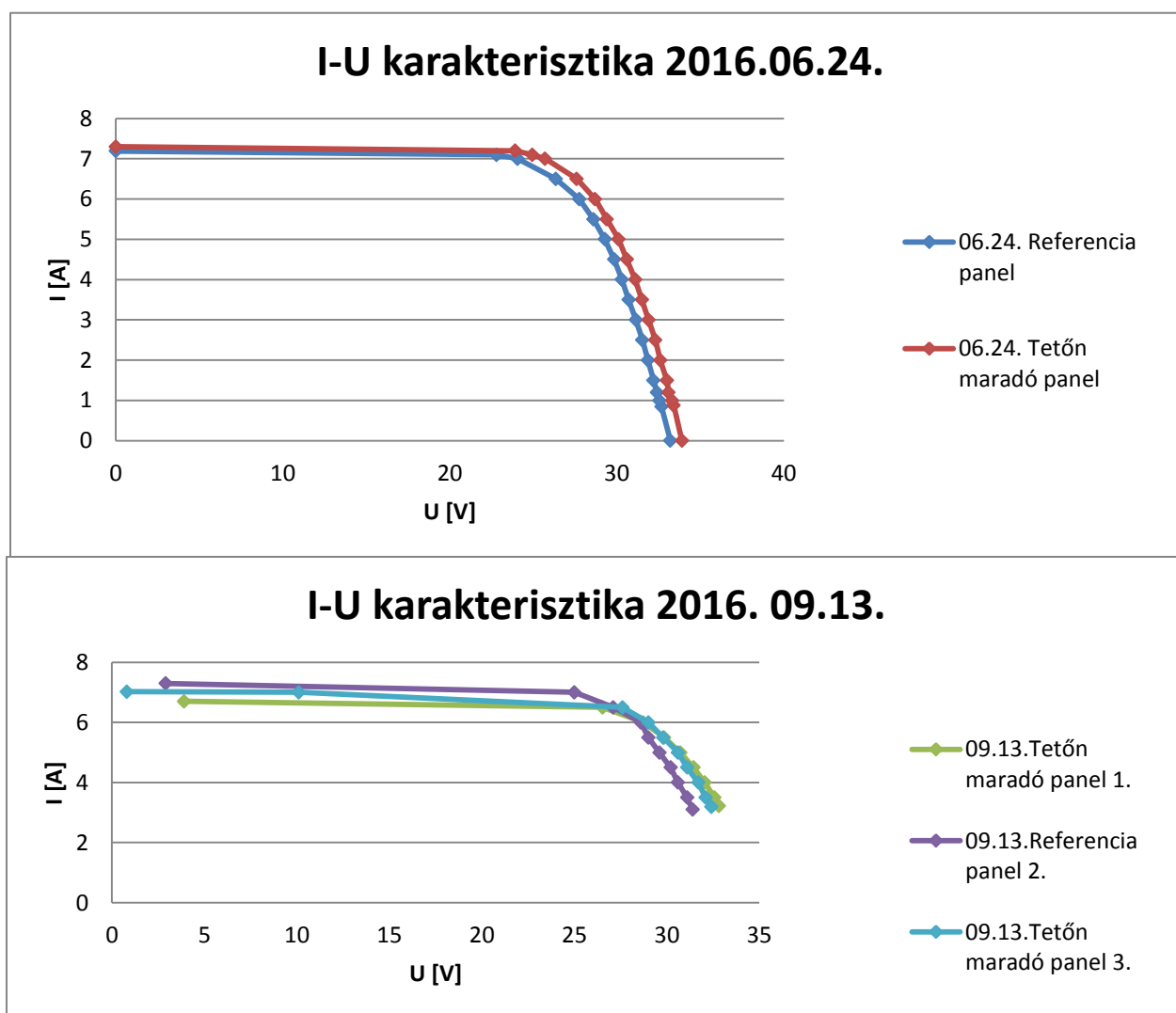
Láthatjuk, hogy a por teljesítménycsökkentő hatását számos dolog befolyásolja, melyek a Föld egyes tájegységein igen különbözőek lehetnek. Még a sivatagos területeken a homokviharok okozzák a legnagyobb problémát, addig a tengerparti részekben a só lerakódása jelentős. A hó árnyékoló hatása főleg az északi területeken probléma, ahol hosszabb a tél.

4. Magyarországi mérések

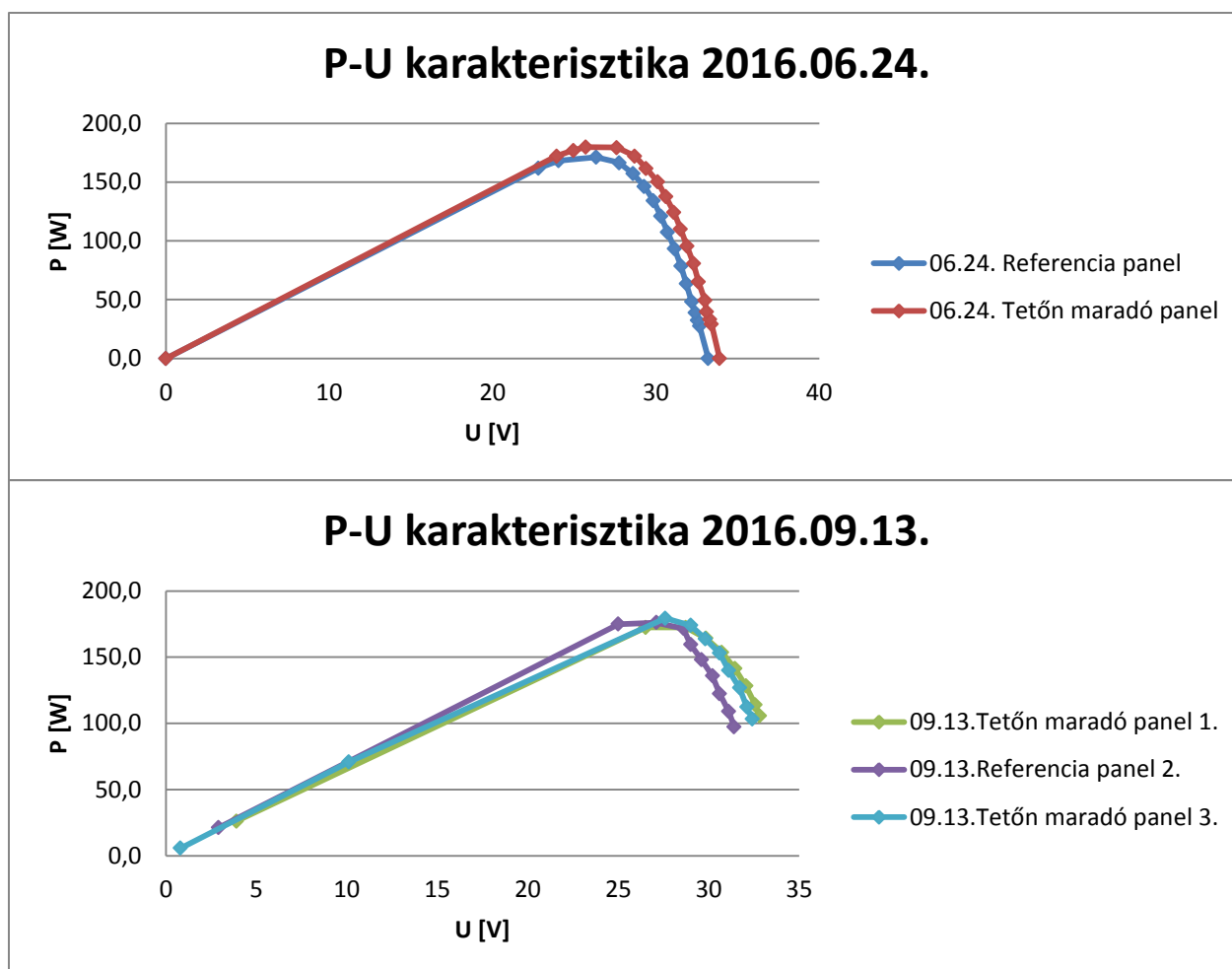
Magyarországon két napelempark adatait vizsgáltam meg, valamint a konzulensem által végzett referencia paneles mérések eredményeit is megkaptam. A következőkben ezek eredményeit ismertetem.

1.2 Mérések a V1 tetején

Dr. Raisz Dávid tanár úr a V1 épület tetején található napelemeket vizsgálta, az adatokat tőle kaptam. A mérés során polikristályos napelemeket használt. Mérésének tematikája a következő volt: Június 24-én lemért egy referencia panelt, melyet akkor, csak a mérés idejére vitt fel a tetőre, majd egy, a tetőn addig is kint lévő panelt. Mérés után a referencia panelt eltette zárt térbe, ahol nem érték a környezeti hatások, amíg a másik panel ki volt téve az időjárás viszontagságainak. Szeptember 13-án megismételte a mérést. A következő mérési adatokat kapta:



14. ábra: Mérések I-U karakterisztikái - Dr. Raisz Dávid mérései alapján



15. ábra: Mérések P-U karakterisztikái - Dr. Raisz Dávid mérései alapján

Mivel az egyazon napon történt méréseknél a referencia panel és a tetőn maradó panel mérése nem párhuzamosan következett be, így a két mérés közben változhatott a besugárzás. Ezt hivatott ellensúlyozni a szeptemberi mérésnél a tetőn maradó panel 1 és 3 jelű mérése. A kettő között mérte meg a referencia panelt.

A júniusi méréseknél a mindkét panel rövidzárási árama közel ugyan akkora, a referencia panelé 7,19 A, a tetőn maradóé 7,3 A, csak 1,5%-kal nagyobb. A maximális teljesítmény a referencia panel esetében 171,1 W, a másiké 5,1%-kal nagyobb, 179,9 W. A szeptemberi mérésnél a referencia panel maximális árama 7,3 A, a tetőn maradó panelé a 3-as számmal jelölt esetben 3,8%-kal kevesebb, az 1-es számú esetben pedig 8,2%-kal. A tetőn maradó panel árama egyértelműen csökkent a referencia paneléhez képest, előtte magasabb volt az áramérték a tetőn maradó esetben. A tetőn maradó 3-as esetben a maximális teljesítmény csak 1,8%-kal nagyobb, mint a referencia panelé, míg nyáron ez az érték 5,1% volt. A tetőn maradó 1-es esetben a maximális teljesítmény 2,1%-kal volt kevesebb a referencia panelhez képest. Mivel a besugárzásról nem állnak rendelkezésre adatok, így tényszerű következtetés nem vonható le. De amennyiben feltételezzük, hogy a besugárzás közel azonos volt a

referencia panel mérése és a tetőn maradó 3-as mérés között, akkor megállapítható egy kismértékű teljesítménycsökkenés.

Mivel az idei nyár igen csapadékos volt, így nem mutatkozik annyira a tetőn maradó panelen a szennyeződések árnyékoló hatása. A szeptemberi méréseket, ha megnézzük az áram-feszültség karakterisztikánál a referencia panel vonala található legfelül az egyenes szakaszban, és az törik le legelsőknek. Mivel nagyobb besugárzásnál nagyobbak az áramértékek, így elmondható, hogy a referencia panelt nagyobb besugárzás érte, mint a tetőn maradó, koszos panelt. Nem valószínű, hogy ez a pillanatnyi időjárástól alakult volna ki, mivel az előtte és az utána elvégzett mérés is azt mutatta, hogy a kint hagyott panelt kevesebb sugárzás érte.



16. ábra: Tetőn maradt panel 2016.09.13-as állapota - Dr. Raisz Dávid fényképe

Ebből a mérésből megállapítható az eső tisztító hatása, valamint az, hogy kis szennyeződés a gyakori esőzés mellett is maradt - ez látható a fényképen. Ezen kevés szennyeződésnek is volt hatásfokcsökkentő hatása.

1.3 Berettyóújfalu

Berettyóújfalu külterületén található, egy 495 kW-os napelempark, melynél 2277 db polikristályos panel található, 25°-os dőlésszöggel. A parkot 2015 januárjában adták át.

1.3.1 2016. márciusi mérések

2016 márciusában Berettyóújfalu végeztek méréseket, amelyek eredményeit Dr. Raisz Dávid közreműködésével kaptam meg. A paneleket ötpercenként monitorozták, az egésznapos mérések termelési eredményei láthatók az alábbi táblázatban. A március 15-ei nap eredményei csak 11:08-ig adóttak, mivel meghibásodott a mérőműszer, amit csak másnap javítottak meg, így arra a napra nincsenek értékelhető mérési eredmények. A 16-ai eredmények is kissé eltérnek, mivel csak 9:03-tól vannak újra eredmények, a nap pedig 6 óra körül kelt, így nagyjából háromórányi adat elveszett. Ez nagyban nem befolyásolja az aznapi értékeket, mivel a megelőző napok méréseiből kiindulva körülbelül az egésznapos termelésnek csak a 14%-a nem került rögzítésre.

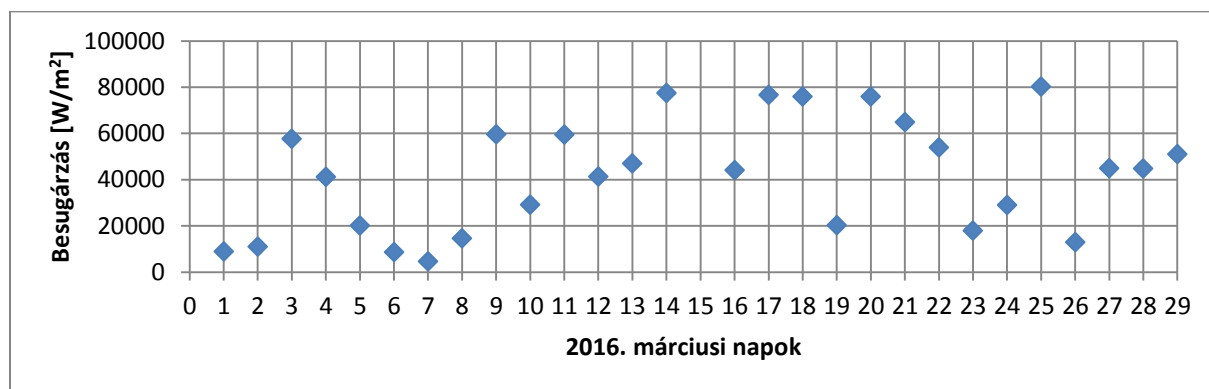
Esemény	Mérés időpontja	Inverter I [kWh]	Inverter II [kWh]	Inverter II [kWh]
	2016.03.01.	17,48	17,46	17,32
	2016.03.02.	20,83	20,82	19,82
	2016.03.03.	110,21	110,15	101,71
	2016.03.04.	78,55	78,6	72,73
	2016.03.05.	38,35	38,23	36,4
	2016.03.06.	17,31	17,27	16,71
	2016.03.07.	9,17	9,15	9,16
	2016.03.08.	27,55	27,5	27,21
	2016.03.09.	111,53	110,92	106
	2016.03.10.	56,08	56,07	55,29
	2016.03.11.	109,27	109,23	105,87
	2016.03.12.	76,73	76,75	76,56
	2016.03.13.	88,38	88,33	87,11
	2016.03.14.	144,68	144,04	139,36
	2016.03.16.	89,04	88,92	87,35
	2016.03.17.	142,2	141,96	137,6
	2016.03.18.	138,44	138,38	135,07
	2016.03.19.	40,45	40,36	40,39
	2016.03.20.	139,76	139,55	133,2
Lemosás	2016.03.21.	117,88	118,19	116,89
	2016.03.22.	94,38	93,36	92,1
	2016.03.23.	35,98	35,79	35,87
	2016.03.24.	52,67	52,44	52,62
	2016.03.25.	146,87	146,06	145,34
Eső	2016.03.26.	25,31	25,14	25,19
	2016.03.27.	83,73	83,36	82,83
	2016.03.28.	82,77	82,14	81,84
	2016.03.29.	96,07	95,67	95,65

6. táblázat: A Berettyóújfalun végzett mérések eredménye

Inverter I-nek nevezett napelem panel március 21-én, egyedülként lett lemosva, majd 26-án az eső is letisztította, de igazán nem volt koszos. Az inverter II-nek nevezett panelt csak az eső tisztította le 26-án, ez kissé koszos volt. Az inverter III panelre felverődött a sár, így jelentős szennyeződés volt rajta,

ezt is csak az eső tisztította le 26-án. A táblázatban szürkével jelölt értékek a tisztítás napját és az utána terjedő időszakot mutatják.

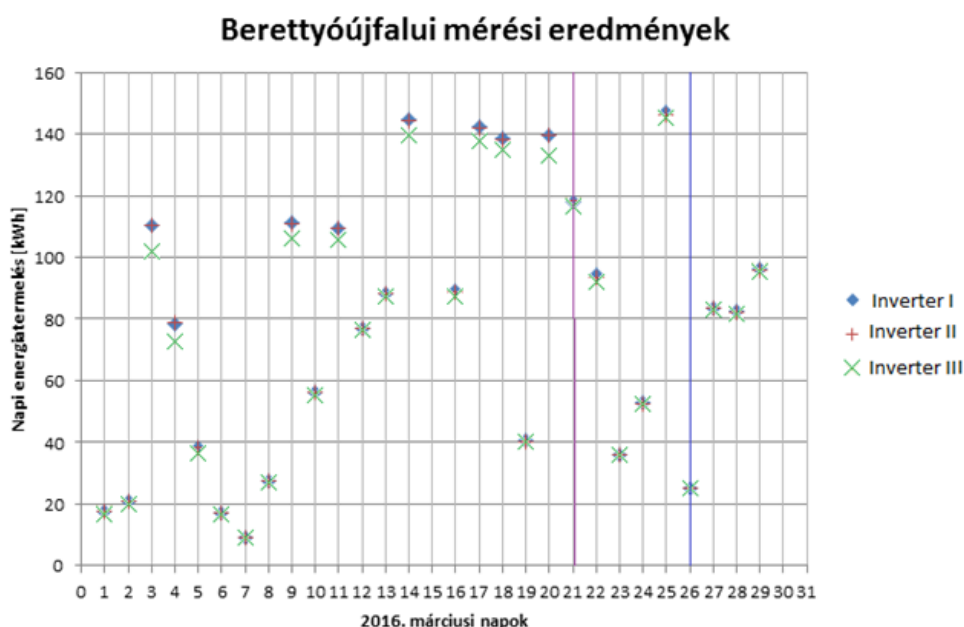
A 17. ábra az egyik panelre jutó összesített besugárzást mutatja. Az összes panelnél ugyanezt veszem alapul, mivel a napelemek egymás mellett, ugyanolyan mértékben voltak kitéve a besugárzásnak.



17. ábra: Egy napelemre jutó besugárzás adatai a mérés egyes napjain

A következő ábrán a termelés grafikonon ábrázolva látható. Jól látszik, hogy az adott nap besugárzásától függően eltérnek a mért értékek.

A 18. ábrán a lila vonal az I-es panel lemosását jelzi, a kék vonal pedig az esőt.

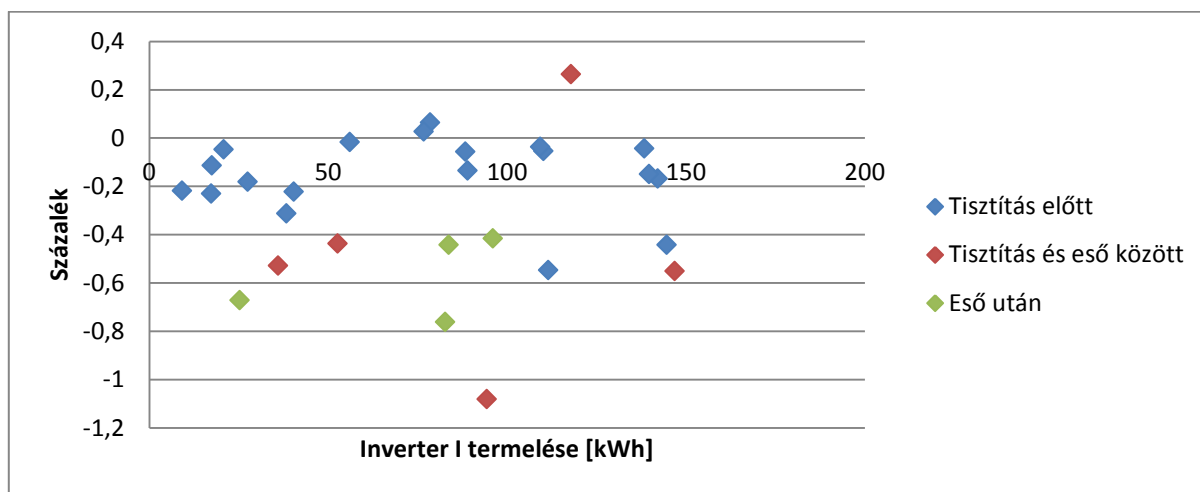


18. ábra: A Berettyóújfalun végzett mérések eredménye

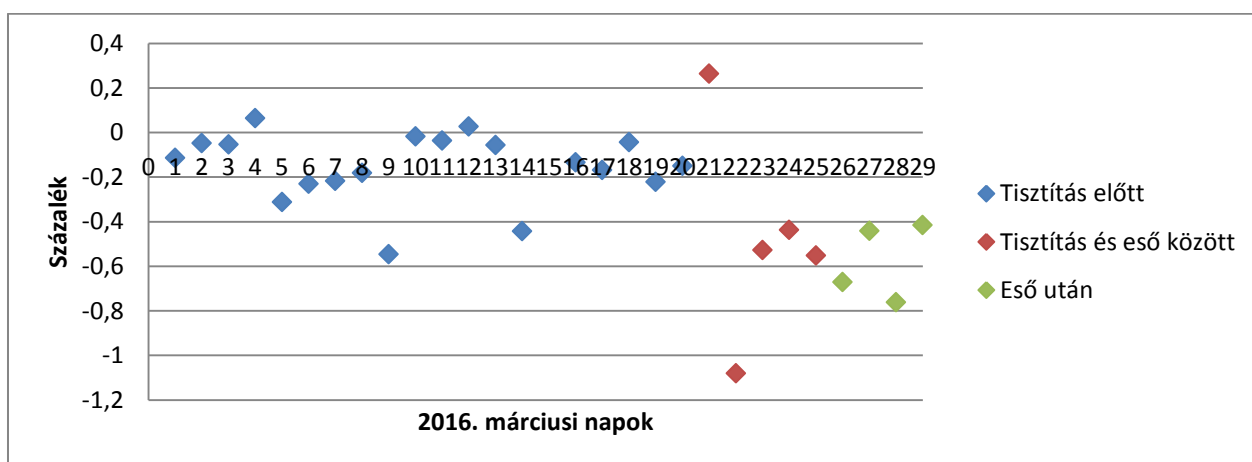
Már ezen az ábrán is megfigyelhető, hogy nagyobb besugárzás esetén a sáros, Inverter III panel kevesebbet termelt, mert jobban árnyékolta a sár. Miután az eső lemosta, a termelése a másik

két paneléhez hasonlóan alakult. Március 21-e és 26-a között kicsit becsapós lehet, hogy a panelek termelése körülbelül megegyezik. Ez azért van, mert azokon a napokon kicsi volt a besugárzás, így nem jelentett olyan nagy különbséget az, hogy a III-as panelt jelentősebb szennyeződés takarja.

Először nézzük a II-es panel termelését az I-eshez viszonyítva. A 19. ábra a II-es panel százalékos eltérését mutatja I-es termeléséhez képest. Kékkel a lemosás előtti napok vannak ábrázolva, pirossal a 21-e és 25-e közötti időszak, kékkel a 26-ától 29-éig terjedő napok. Ugyanez a színkód érvényes a 20. ábrára is. Az értékek nagyjából -0,27 körül szóródnak. Ha megnézzük a 20. ábra diagramját, ami ugyanezen értékeket mutatja az egyes napokra lebontva, akkor megfigyelhetjük, hogy amíg az I-es panel nem volt lemosva, addig a II-es körülbelül ugyanannyit termelt.

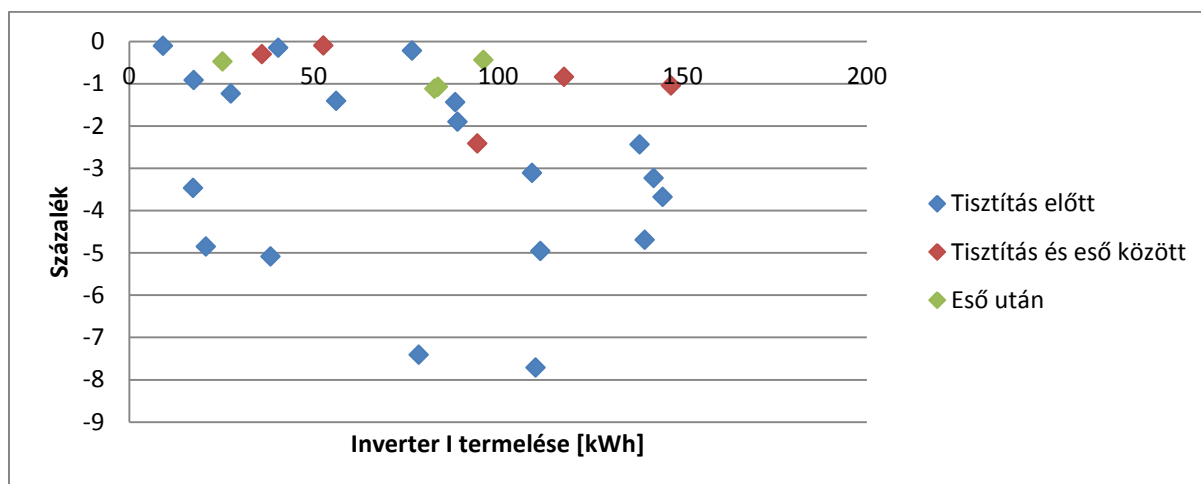


19. ábra: Inverter II termelése Inverter I termeléséhez viszonyítva, százalékos értékben az 1-es panel termelésének függvényében

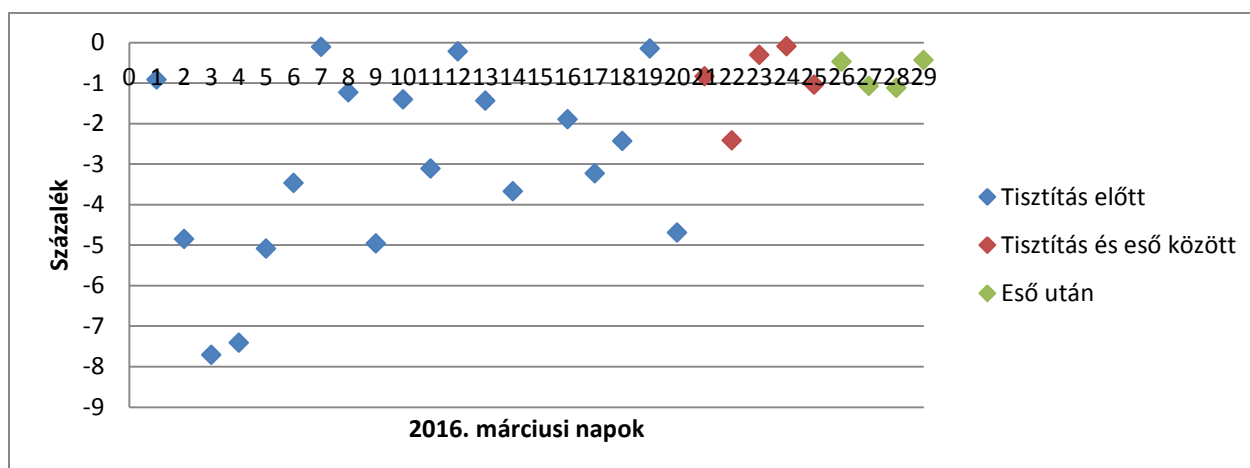


20. ábra: Inverter II termelése Inverter I termeléséhez viszonyítva, százalékos értékben az egyes napokon

Ha megnézzük a III-as panel I-eshez viszonyított termelését, a következő grafikonokat kapjuk. A kék értékek itt is a tisztítás előtti napokhoz tartoznak, a pirosok 21-e és 26-a közöttiek, a zöldek pedig a 26-a utániak.



21. ábra: Inverter III termelése Inverter I termeléséhez viszonyítva, százalékos értékben az 1-es panel termelésének függvényében



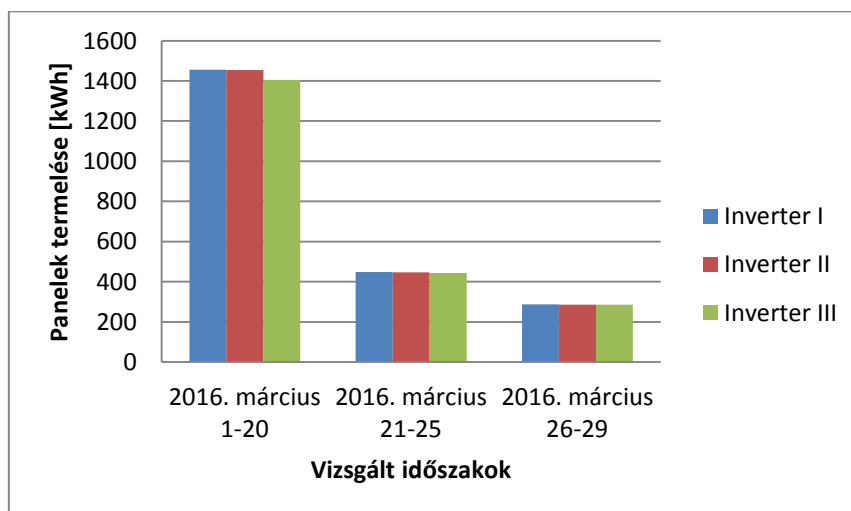
22. ábra: Inverter III termelése Inverter I termeléséhez viszonyítva, százalékos értékben az egyes napokon

A 21. ábrán jobban megfigyelhető, hogy a besugárzás, és az attól függő termelés növekedésével a százalékos eltérés szennyezett felületen számottevően növekszik.

A következő ábrán megfigyelhető, hogy amíg a harmadik panelt nem mosta le az eső, addig a termelésének százalékos eltérése az I-es panel termelésétől jelentősebb, mint az esőzés után (zöld rész). Amennyiben a sár lemosása után több mérési adat állna rendelkezésre, jobban alá lehetne támasztani.

Az I-es panel lemosása után nagyobb arányú eltérésre számítottam, azonban a grafikonon a piros értékek közelebb állnak a nullához, mint a kékek. Ebből arra következtetek, hogy az I-es panelen nem volt számottevő szennyeződés, a letisztításával nem nőtt meg a termelése.

A következő adatokból is jól kiszűrhető a koszolódás hatása:



23. ábra: Az inverterek összes termelése a vizsgált időszakokban

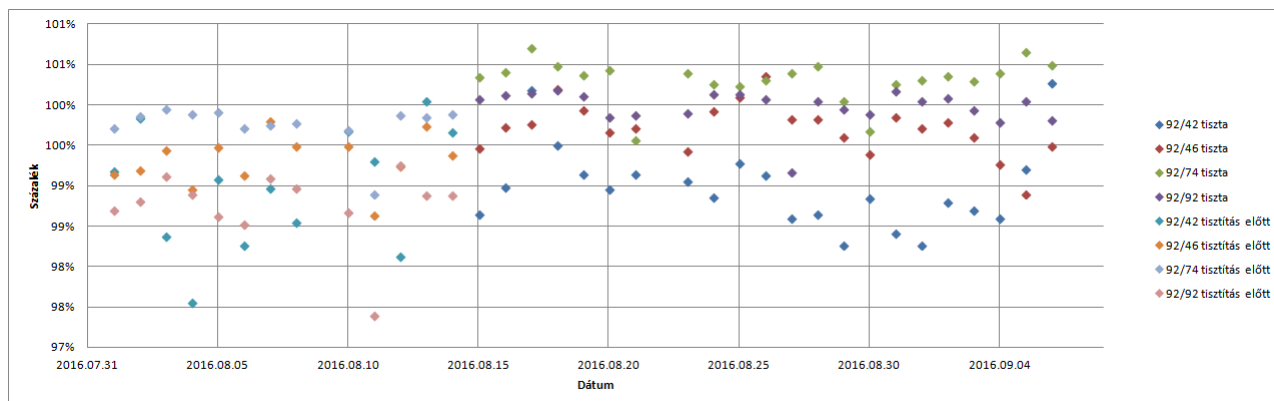
A 23. ábrán jól megfigyelhető, hogy amíg a II-es és III-as panelek koszosak voltak (1-jétől 20-áig, illetve 21-étől 25-éig terjedő időszakok), addig az I-es inverterhez képest kevesebbet termeltek. Miután az eső lemosta mindhármát, a termelésük nagyjából ugyanannyi lett. Százalékokban kifejezve: március 1-jétől 20-áig az I-es panelhez képest a II-es 0,159%-kal termelt kevesebbet, inverter III pedig 3,513%-kal; március 21-e és 25-e között inverter II 0,433%-kal, inverter III 1,107%-kal és a március 26-29. időszakban pedig inverter II 0,545%-kal, inverter III 0,823%-kal termelt kevesebbet.

A mérési eredmények kiértékelése után elmondható, hogy mivel a teljesítménycsökkentő hatás nagyban függ a besugárzás mértékétől, így nyáron – napfényes időben – fontosabb foglalkozni a szennyeződésekkel, mint télen, borult időben.

1.3.2 2016 nyara

2016.08.1-től 2016.09.06-ig végeztek méréseket, az időszak közepén, szeptember 15-én a panelek egy részét letisztították. Összehasonlítottam egy piszkosan hagyott stringet, valamint három részben letisztítottat és egy teljesen tisztát. A 24. ábrán a piszkosan hagyott string által termelt energiaértékeket hasonlítottam össze a többivel. Túl nagy szennyeződés nem volt a paneleken, így alig egy százalékos javulást értek el a tisztítással. Egy string 92 panelt tartalmazott. Ha 42 darabot tisztítottak le, az még nem hozott látható teljesítményjavulást (0,01%), viszont ha a panelek fele

tiszta volt, 0,39%-os az átlagos javulás, 74 tiszta panelnél 0,57%, valamint teljesen tiszta string esetén 1,23%-os.



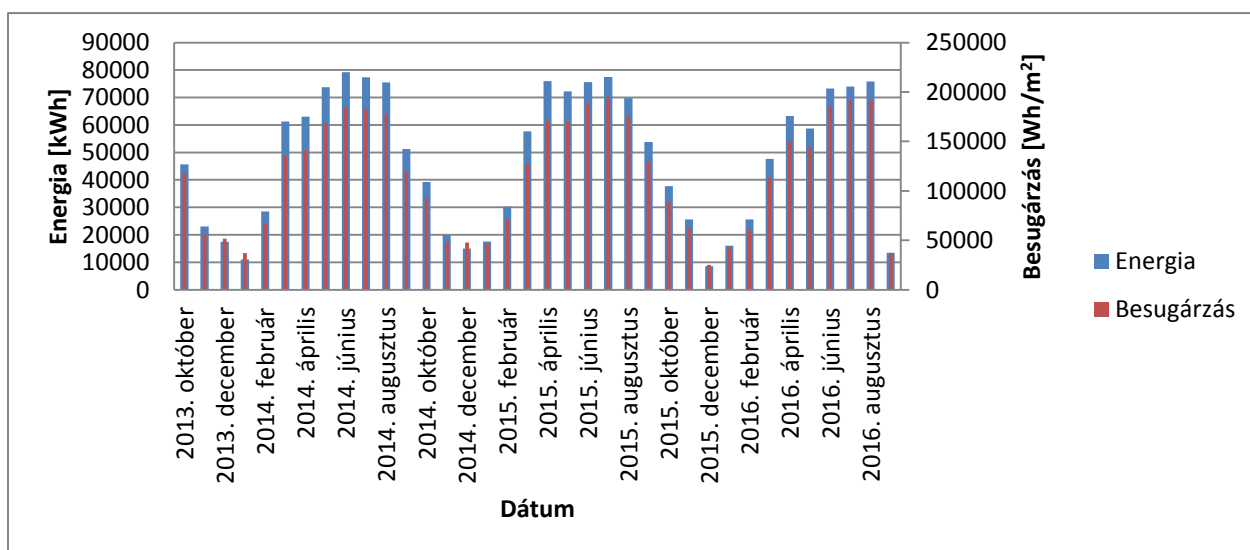
24. ábra: Energiatermelés és besugárzás 2016. szeptember 10-ig

1.4 Kistelek

Kisteleken egy 500 kW-os napelempark található, 2124 db, 25°-os dőlésszögű, 250 W-os polikristályos YINGLI YL250P-29b modellszámú panelekkel, valamint 15 db Kaco Powador inverterrel. 2013 nyarán telepítették, az év szeptemberétől üzemel. Az adatgyűjtést beépített monitoring-rendszer segíti, mely figyeli a besugárzást, a külső- és a cellahőmérsékletet, valamint az inverterek feszültségét és áramát, az energiájukat.

1.4.1 Tisztítás előtti eredmények

A kisteleki napelemparkból 3 év mérési adatai álltak rendelkezésemre. Ha megnézzük az adatokat grafikonon ábrázolva, látható, hogy amíg a megtermelt energia évről-évre csökkent, addig a besugárzás közel ugyan olyan volt, sőt kissé növekedett.

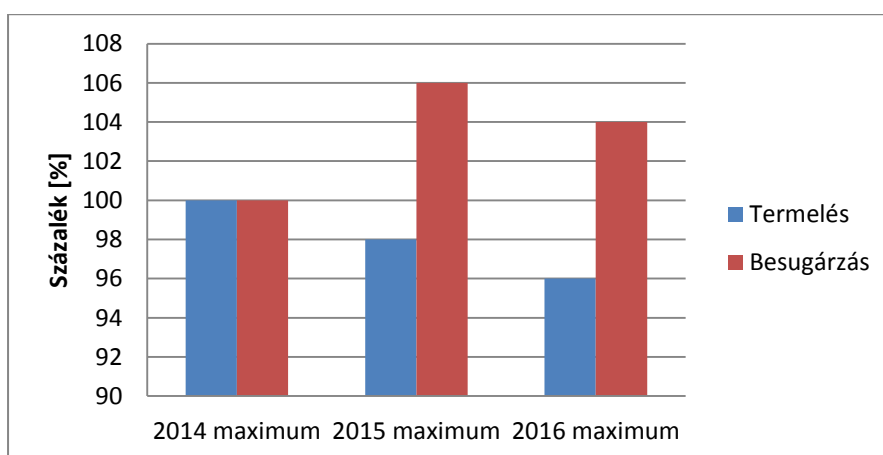


25. ábra: Energiatermelés és besugárzás 2016. szeptember 10-ig

Közelebbről megvizsgálva, 2014-től az egyes évek maximális termelésű hónapjait és az ahhoz tartozó besugárzásokat, melyet a 7. táblázat mutat, megállapítható, hogy a 2014-es évet alapul véve 2015-ben 2%-os, 2016-ban 4%-os termeléseszkökenés következett be, miközben a besugárzás 2015-ben 6%-kal, 2016-ban 4%-kal nőtt. A 26. ábra ezt ábrázolja szemléletesen. A besugárzásértékek nőnek, amíg a termelés csökken, ezt az időjárás változása nem magyarázza. Még a panel degradációjával magyarázható lenne a jelenség, ám az – az adatlap alapján – csak 0,88% évente. Megalapozottan levonható a következtetés, hogy a teljesítménycsökkenést a napelemek felületén lerakódott szennyeződések okozták. Ezt még jobban alátámasztják a tisztítás utáni eredmények.

	Maximális termelés [kWh]	Besugárzás [Wh/m ²]	%-os termelés 2014-eshez viszonyítva	%-os besugárzás 2014-eshez viszonyítva
2014. június	79229,54	184069,4	100%	100%
2015. július	77433,52	195211,5	98%	106%
2016. augusztus	75831,19	191673	96%	104%

7. táblázat: Egyes évek maximális termelésű hónapjai



26. ábra: Egyes évek maximális termelésű hónapjai, azok százalékos eltérései a 2014-es évhez viszonyítva

1.4.2 Tisztítás utáni eredmények

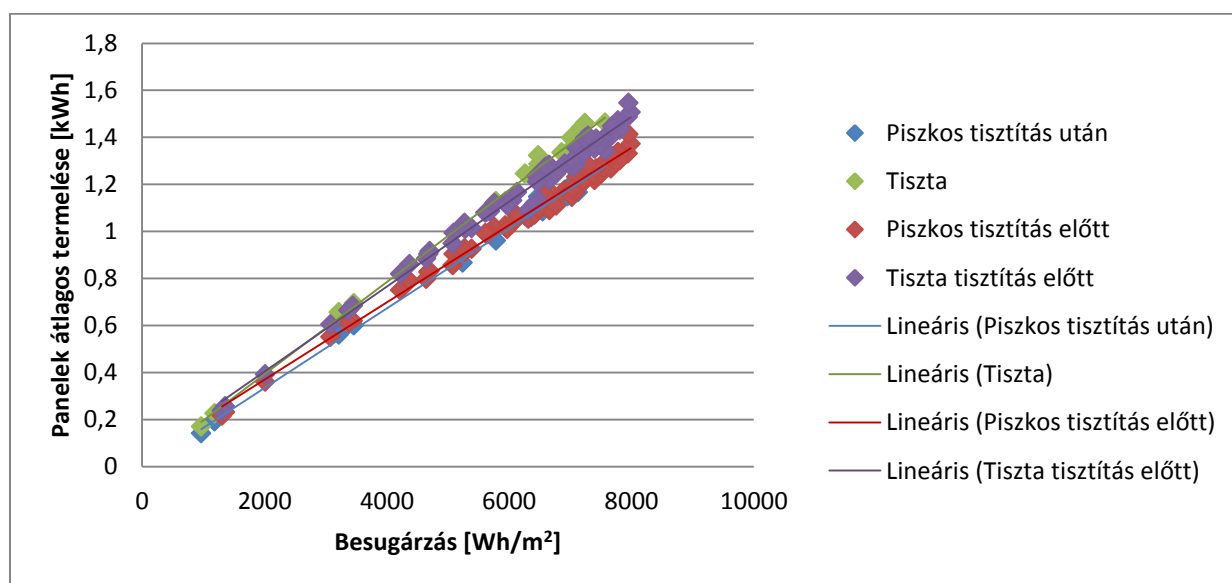
2016. augusztus 16-17-én lemostunk 15 inverterből 4 inverterhez tartozó panelsort. Ezelőtt csak a természet tisztította, emberi közbeavatkozás nélkül szennyeződött és tisztult. Tisztítás előtt, ránézésre a panelek nem tűntek igazán piszkosnak, néhány fél milliméter átmérőjű sárga bogárürülék volt rajtuk, valamint ha végighúztam az üvegfelületen az ujjam, akkor látszott, hogy igen poros. A tisztítást először magasnyomású mosóval és tiszta vízzel próbáltuk meg, ám mivel nem állt rendelkezésünkre vezetékes víz, így víznyomás hiányában nem volt elég erős a vízsugár, hogy a panelre ráégett port és pollent le tudja mosni. A víznyomás erőssége megfelelt egy erősebb zápornak. Ezután kefével és tiszta vízzel próbálkoztunk, majd mosogatószert is adtunk a vízhez. Így

már elfogadható eredményt értünk el. Szabad szemmel teljesen tisztának tűnt a felület, de ha végighúztam az ujjam még mindig sáros volt. Két nap alatt ezzel a módszerrel, kézi erővel csak 562 db panelt sikerült megtisztítanunk. A 27. ábrán látható a kiinduló állapot és a végeredmény.



27. ábra: Panelsor mosás közben

A tisztítás előtt két és fél hónap valamint tisztítás után 22 nap mérési eredményeit vetettem össze. Inverterenként álltak rendelkezésre napi adatok. Mivel az inverterek eltérő panelszámmal rendelkeztek, így panelekre átlagoltam a termelést, mind a később megtisztításra kerülő mind a piszkos panelek esetén. A megtisztított panelsorok közül az egyik inverterhez tartozó string sor árnyékos, a napelempark mellett található nagyfeszültségű távvezeték-oszlop miatt, ezért a tiszta panelek átlagánál ezeket az árnyékos elemekhez tartozó értékeket nem vettem figyelembe. A piszkosan hagyott panelek átlagos termeléséhez viszonyítva a tisztítás előtt a később letisztításra kerülő panelek átlagosan 110%-kal termeltek többet, majd tisztítás után 117%-kal. Ez átlagosan 7%-kos emelkedést jelent.



28. ábra: Panelek átlagos termelése a besugárzás függvényében

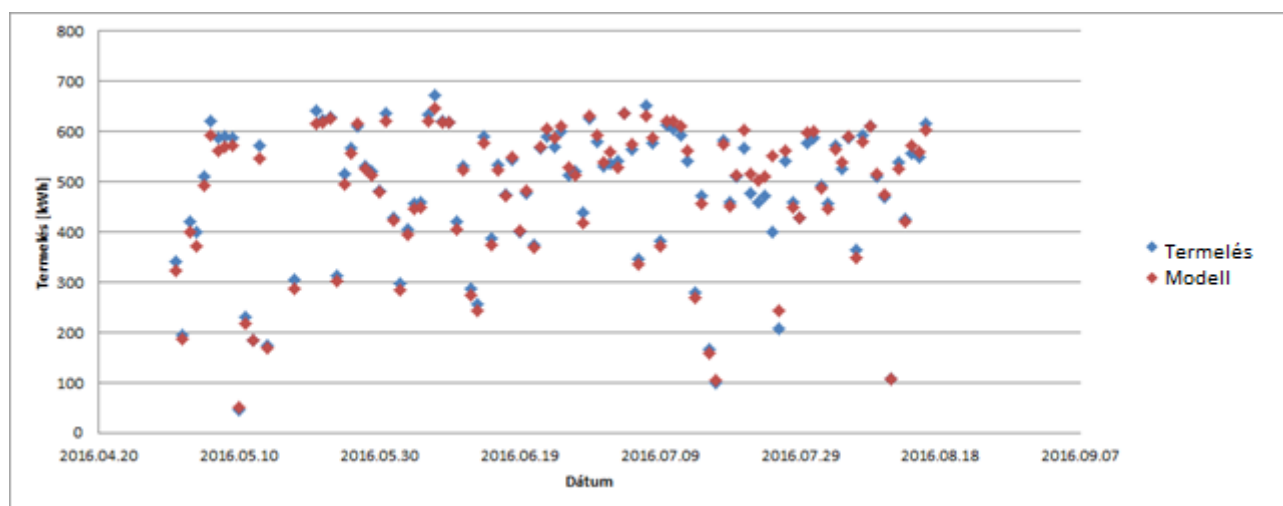
A 28. ábra alapján, amíg a szennyezett panelekre illesztett lineáris trendvonal mind a tisztítás előtti, mind az azt követő időszakban nagyjából megegyezik, addig a tiszta paneleknél a tisztítás előttihez képest nőtt a meredekség, vagyis tisztítás után többet termeltek.

1.4.3 Modellalkotás

A koncepció a következő volt a modellalkotás során: csak a 2016. augusztus 16-17-én megtisztításra került, árnyékmentes panelekhez tartozó inverterek termelési adatait használtam fel a modellalkotásban. A besugárzás, a cellahőmérséklet és a külső hőmérséklet napi adataival szerettem volna közelítőleg megadni a termelést a tisztítás előtti, piszkos napokat figyelembe véve.

A modellhez az Excel Solver funkcióját használtam, mely segített meghatározni a modell és változóinak értékét. A modell és a valós termelés négyzetes eltérését vettem, majd ezeket summáztam 2016.05.01.-től a tisztítás napjáig. A Solver funkcióval a változók kiszámolása közben arra törekedtem, hogy ez a summázott összeg a lehető legkisebb legyen. Azért csak a fenti időszakot vettem figyelembe a modell megalkotásánál, mert nyáron biztosan nem vetült árnyék a vizsgált panelekre, a többi évszakkal ellentétben.

Először csak egy konstans és a besugárzás szorzataként próbáltam meghatározni a termelést. Ez is elég jól megközelítette a valódi termelést a modell és a valódi termelés közti eltérések négyzetes összege $4,64 \cdot 10^4$. Eredménye a következő ábrán látható:



29. ábra: Besugárzásból és konstansból álló modell eredményei 2016.05.01. és a tisztítás időpontja között

Az 18. forrás hatására elkezdtem vizsgálni szinuszos modelleket is. Az évszakok változásával a besugárzás értékek burkolója szinuszos. Azt tapasztaltam, hogy három szinusz függvéynél többet nem érdemes alkalmazni, mert csak elrontja a modellt.

A következő egyenlet adja meg a modell szerinti termelést:

$$E_{modell} = k_1 \cdot E_0 (k_2 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (t - k_3)}{k_4}) + k_5 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (t - k_6)}{k_7}) + k_8 \cdot \sin(\frac{\pi \cdot (t - k_9)}{k_{10}}) + k_{11}) \quad (3)$$

ahol

E_{modell} modell által számolt megtermelt energia,

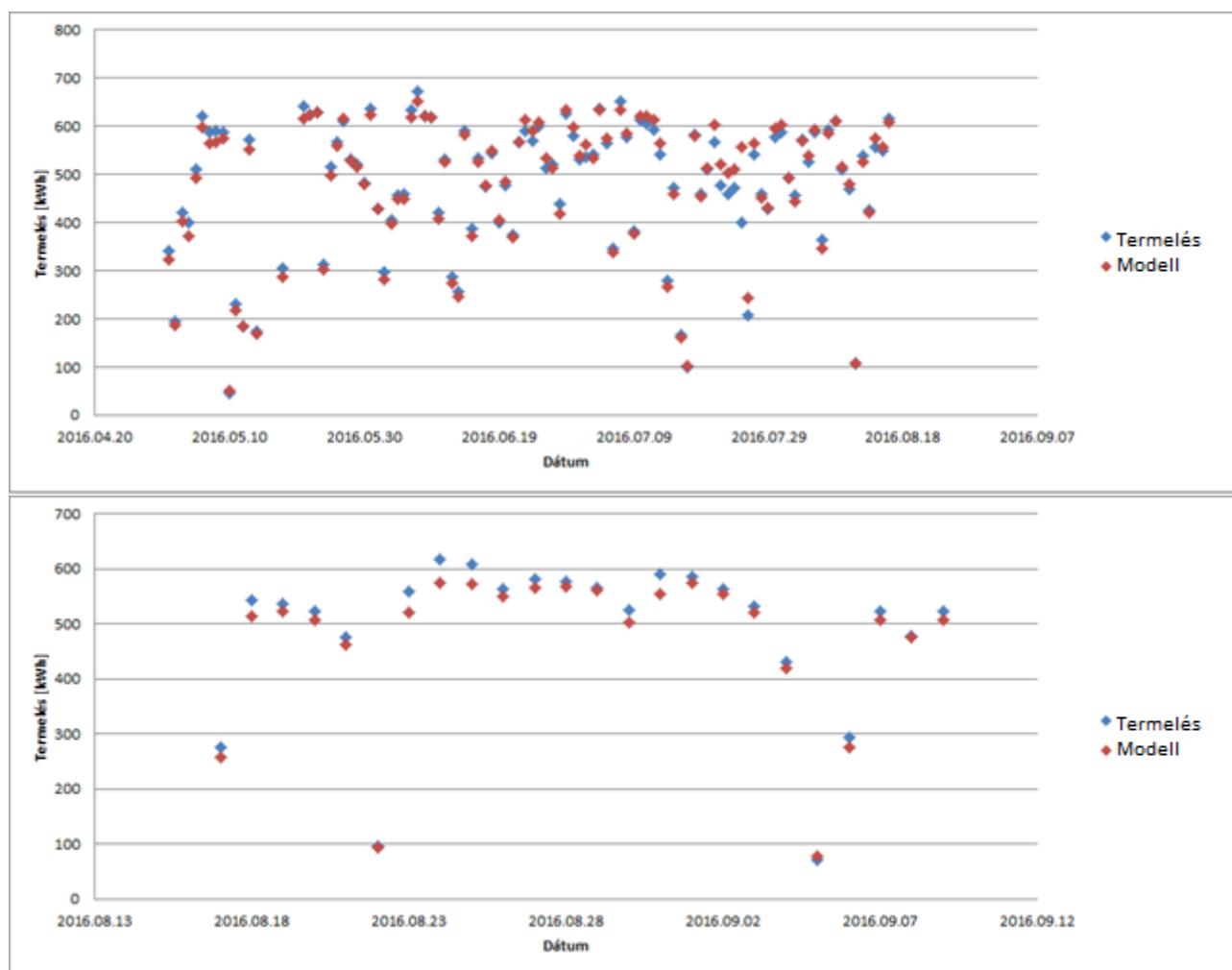
E_0 besugárzott energia,

t telepítés óta eltelt napok száma (2013.04.01.)

A 3-as képlet konstansai a következők:

k1	0,15745	k5	-0,00263	k9	0,506879
k2	0,003103	k6	1,650525	k10	-0,34624
k3	0,792763	k7	-0,38072	k11	0,506879
k4	-0,32109	k8	-0,00265		

8. táblázat: 3-as képlet konstansai



30. ábra: A valós és a 3-as képlet által kiszámolt termelés 2016. nyarán a tisztítás előtt és után

A 3-as képlet és a hozzá tartozó konstansok alkalmazása esetén a modell és a valós termelés közti négyzetes eltérések összege $2,33 \cdot 10^4$. Ez a modell pontosabb, mint a csak besugárzást és konstanst tartalmazó modell. A 2016 nyári időszakra a modell és a valós termelés átlagos eltérése 0%, a tisztítás utáni időszakban -3%. Ezt mutatja a 30. ábra is, ahol látható, hogy a tisztítást követően magasabb besugárzások esetén a valós termelés több, mint a modell által számolt. A tisztítás előtti időszakban nagyjából megegyeznek a számított és valós értékek. Vagyis a tisztítást követően a termelés megnőtt. Az átlagos 7%-os teljesítményjavulást nem mutatja a modell, így belátható, hogy még nem tökéletes.

Másik koncepció a modellalkotás terén az eső tisztító hatásának figyelembevétele volt. A meteorológiai szolgálat honlapján a 19. linken található napi lehullott csapadékösszeg térkép alapján megbecsültem az egyes napokon, Kisteleken hullott csapadék összegét. A két legközelebbi mérőhely (Szentés és Szeged) adatait használtam fel, melyeket Kistelektől vett távolságuk szerint súlyoztam. Az így megkapott csapadéértékekből az esőzések közötti napok számát kiszámítottam, majd ezekre a napokra lineáris majd exponenciális szennyeződés-lerakódást feltételezve megalkottam egy-egy modellt.

Mivel a csapadék hatását hosszabb időszakon jobban meg lehet figyelni így a modellben 2010.10.01-től egészen a tisztításig eltelt napokat használtam fel. Kivéve a havas napokat, amikor a hatásfok 50 % alatti volt.

A lineáris modell képlete:

$$E_{modell} = k_1 \cdot E_0 \left(k_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_3)}{k_4}\right) + k_5 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_6)}{k_7}\right) + k_8 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_9)}{k_{10}}\right) + k_{11} - k_{12} \cdot t_e \right) \quad (4)$$

ahol

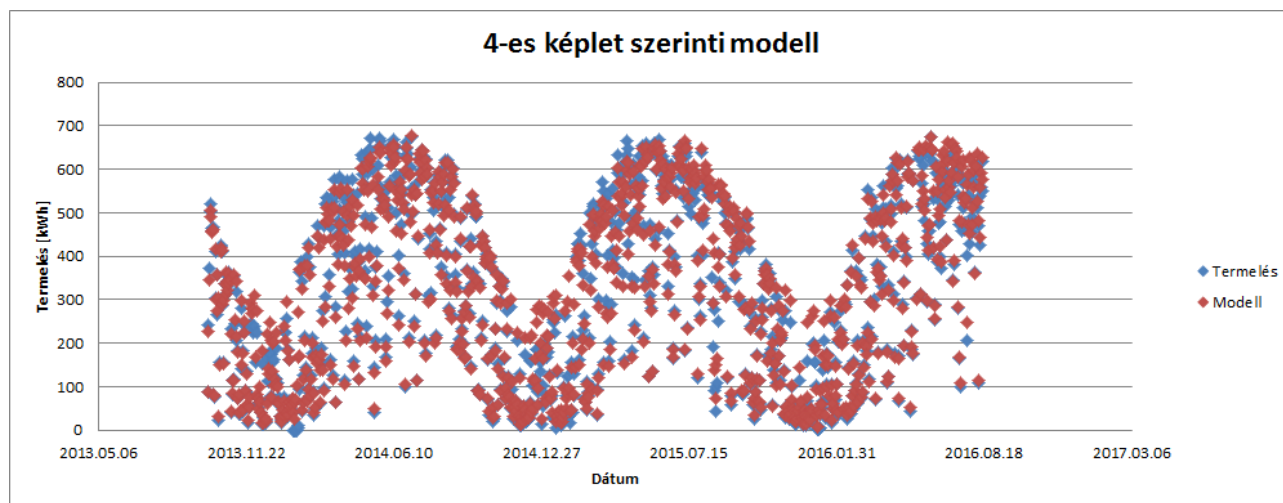
E_{modell} modell által számolt megtermelt energia,
 E_0 besugárzott energia,
 t telepítés óta eltelt napok száma (2013.04.01.),
 t_e legutolsó eső óta eltelt napok száma

A konstansokhoz tartozó értékek:

k1	0,00573	k5	0,092207	k9	14,88815
k2	0,070459	k6	11,47357	k10	-2,44654
k3	17,18743	k7	-2,46601	k11	14,59163
k4	-2,40818	k8	-0,06452	k12	0,044314

9. táblázat: 4-es képlet konstansai

Lineáris szennyeződés-lerakódást és árnyékolást feltételezve a négyzetes eltérések összege $6,45 \cdot 10^5$. A 31. ábrán szemléletesen látszik, hogy megközelítőleg jól lefedi a valós termelést.



31. ábra: A valós és a 4-es képlet által kiszámolt termelés 2016.10.01-től a tisztítás időpontjáig

Az exponenciális modellnél hosszabb csapadékmentes időszak esetén hamar „elszállt” a függvény, csak kellően kis konstans (10^{-20} nagyságrend) kiválasztásakor közelítette meg jól a valós értékeket.

$$E_{modell} = k_1 \cdot E_0 \left(k_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_3)}{k_4}\right) + k_5 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_6)}{k_7}\right) + k_8 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (t - k_9)}{k_{10}}\right) + k_{11} - k_{12} \cdot \exp(t_e \cdot k_{13}) \right) \quad (5)$$

ahol

E_{modell} modell által számolt megtermelt energia,

E_0 besugárzott energia,

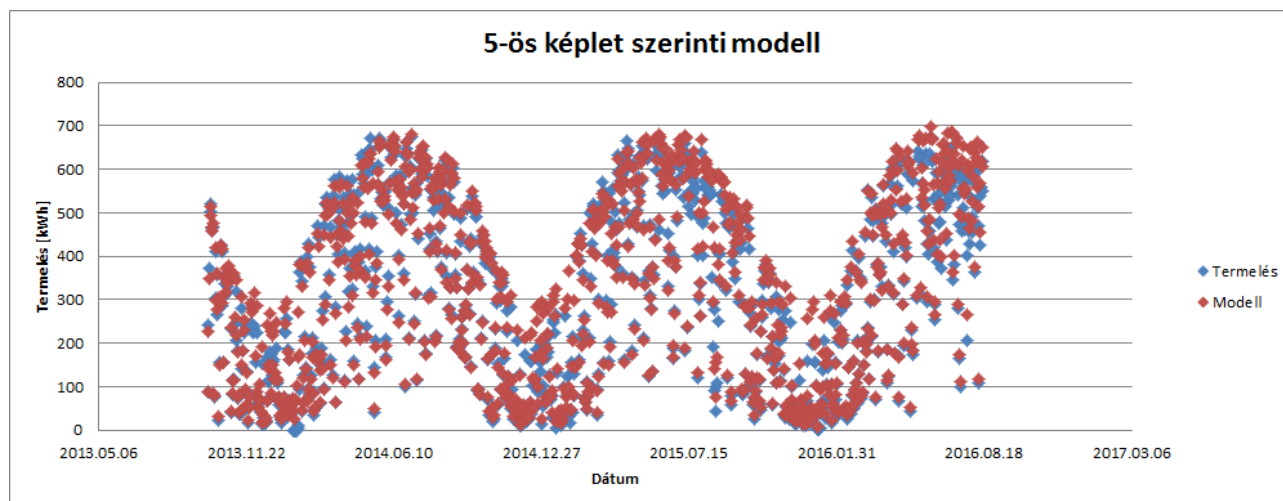
t telepítés óta eltelt napok száma (2013.04.01.),

t_e legutolsó eső óta eltelt napok száma

A k_{13} -as konstans 1-nek választottam, ugyanis, a Solver funkció negatív értéké tette, viszont akkor nem kaptam volna meg az esőzéstől eltelt idővel exponenciálisan csökkenő termelésmodellt. Az 5-ös képlet többi konstansa:

k1	2,20E-07	k5	992,9638	k9	60560,87
k2	-7701,25	k6	61071,9	k10	-2666,32
k3	53322,52	k7	-2483,79	k11	384389,4
k4	-2029,02	k8	-302,802	k12	2,00E-20

10. táblázat: 5-ös képlet konstansai



32. ábra: A valós és az 5-ös képlet által kiszámolt termelés 2013.10.01-től a tisztításig

Mivel a csapadékadatok csak becsültek, így ezeknek a modelleknek a pontossága erősen kérdéses. De már ezekből az adatokból is látható, hogy pontos csapadékadatok mellett érdemes ilyen modellekben is gondolkodni. Jobban árnyalható a kép, ha a különböző mennyiségű csapadékokat eltérően kezeljük, mivel más-más a tisztító hatásuk. Jelen esetben már az 1 mm-es csapadékot is tisztító hatásúnak vélő modell volt a legpontosabb. Ez a valóságban nem túl valószínű, hogy így volna, mivel a kisebb mennyiségű csapadéktól csak sár keletkezik a panel felületén, ahelyett, hogy letisztítaná. Pontos csapadékadatokkal ez az anomália is megvizsgálható.

Végezetül megpróbáltam bevonni a modellembe a cellahőmérsékletet illetve a külső hőmérsékletet is. Ehhez a modellhez megint csak a 2016.05.01-től kezdődő időszakot használtam fel. A napi átlagok helyett csak a besugárzás alatt mérhető hőmérsékletek átlagát használtam fel, így pontosítva a modellt. Az éjszakai alacsonyabb hőmérsékletek nagyon torzították az eredményeket.

A besugárzás után a cellahőmérséklet szabja meg leginkább a napelem energiatermelését. Ha megemelkedik a cellahőmérséklet az ideális értéktől, akkor csökken a maximális teljesítmény. Minden panel leírásában megtalálható a névleges működési cellahőmérséklet, esetünkben ez $46^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Valamint egy hőmérsékleti együttható a maximális teljesítményhez, ami a kisteleki napelemeknél $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$.

A cellahőmérséklet mellé érdemes felhasználni a külső hőmérsékletet is, mivel a besugárzás mellett ez is alakítja a cellahőmérsékletet. 3%-kal javította az olyan modellt, ahol csak a cellahőmérsékletet használtam fel.

$$E_{modell} = k_1 \cdot E_0 (k_2 - k_3 \cdot 0,0045 \cdot (k_4 \cdot T_{cella} - k_5 \cdot 46) - k_6 \cdot T_{külső}) \quad (6)$$

ahol

E_{modell} modell által számolt megtermelt energia,

E_0 besugárzott energia,

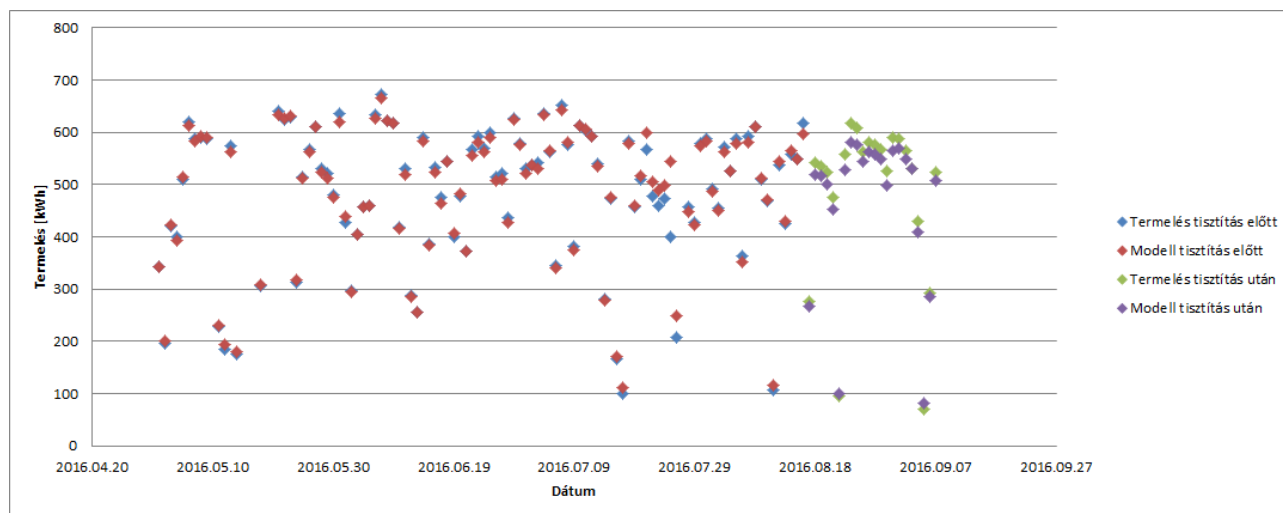
T_{cella} cellahőmérséklet,

$T_{\text{külső}}$ külső hőmérséklet

A 6-os képlet konstansai a következők:

k1	0,000457	k3	7,634526	k5	13,5936
k2	184,7318	k4	11,14581	k6	-0,73183

11. táblázat: 6-os képlet konstansai



33. ábra: A valós és a 6-os képlet által kiszámolt termelés 2016.05.01-től 2016.09.07.-ig

A 33. ábrán látható a valós és a modelltermelés. A tisztítást követően átlagosan 3,1%-kal nőtt a valódi termelés a modellhez képest.

A modellek során nem vettem figyelembe a napelemek felszínét, mivel csak egy konstanssal való szorzást jelentett volna a besugárzás mellé a képletekbe.

5. Tisztítási javaslatok

Mivel a por teljesítménycsökkentő hatása nagyban függ attól, hogy mikor volt a legutóbbi esőzés, így a tisztítási költséget megspórolhatjuk, ha megvárjuk, amíg a természet elvégzi helyettünk. Ehhez a meteorológiai adatok alapján megjósolhatjuk, hogy mikor következik be a következő esőzés, és ez alapján dönthetünk a tisztítási időpontról. [20] Ám nem minden esetben elég a természetre bízni a tisztítást. Ezt jól mutatják a kisteleki eredmények is, ahol a tisztítást követően lényegesen megnövekedett a termelés.

A 21-es tanulmányban azt vizsgálták, hogy egy Szaúd-Arábiában lévő napelem park tisztítását hogyan oldják meg. Egy tisztítási rendszer akkor jó, ha kevés energiát fogyaszt, és kevés karbantartást igényel. A berendezést a napelem keretébe érdemes beépíteni. Kétféle rendszert tartalmaz, mechanikust és elektromost. A mechanikus rendszernek rendelkezni kell vízkészlettel, tisztító és visszatartó résszel. Az elektromos rendszer irányítja és látja el energiával a PV-rendszer mechanikus egységét. A mechanikus rész vízkészletet valamint ablaktörlőt tartalmaz. Először a tengerből felpumpálják a vizet, amit tartályokban, a napfény hőenergiáját használva sómentesítenek. Ha a panelhez erősített fényérzékelő szenzor napfényt érzékel, akkor a mikrokontroller egy elektromos jelet küld, aminek hatására a panel aljához rögzített „ablaktörlők” (törlőlapátok) egy DC motor segítségével letörlik a napelemet. Ennek a rendszernek az az innovációja, hogy a sínekhez nem fémes anyagot használtak, így elkerülték a rozsdásodást. A madárürülékre egy olyan megoldást találtak ki, amelynek lényege, hogy egy szenzort építettek a tisztító berendezésbe, ami a napelemen és annak környezetében érzékeli a mozgást, így a mikrokontroller jelet tud adni az ablaktörlőnek, hogy induljon el visszafele, amitől a madár megijed és elrepül. Ez a megoldás csak nappal működik, az éjszaka során többször zöld és piros fények villannak fel, hogy elijesszék a madarakat.

A 15-ös tanulmányban egy költséghatékony, alacsony vízfelhasználású vagy víz nélküli tisztítási módot mutattak be utcai világítást ellátó PV-khez. A mechanikus rész hivatott elvégezni a száraz és a nedves tisztítást minden harmadik és minden hetedik napon. Tisztítási időpontnak az este 9 órát választották, hogy bármiféle gyors hőmérsékletváltozás miatt keletkező kárt elkerüljenek.

A mechanikus rész a következőkből áll: alumínium szerkezet, tárcsa, kiegészítő görgő, öv, tengely, két egyenáramú motor (24 V névleges feszültséggel és 2 A névleges árammal, maximális fordulatszáma 3400 rpm), fúvókák, csövek, könnyen cserélhető törlőlapát és kis tároló. A tisztítótankot az eszköz hátuljára rögzítették, minden harmadik hónapban adnak hozzá tisztító folyadékot.

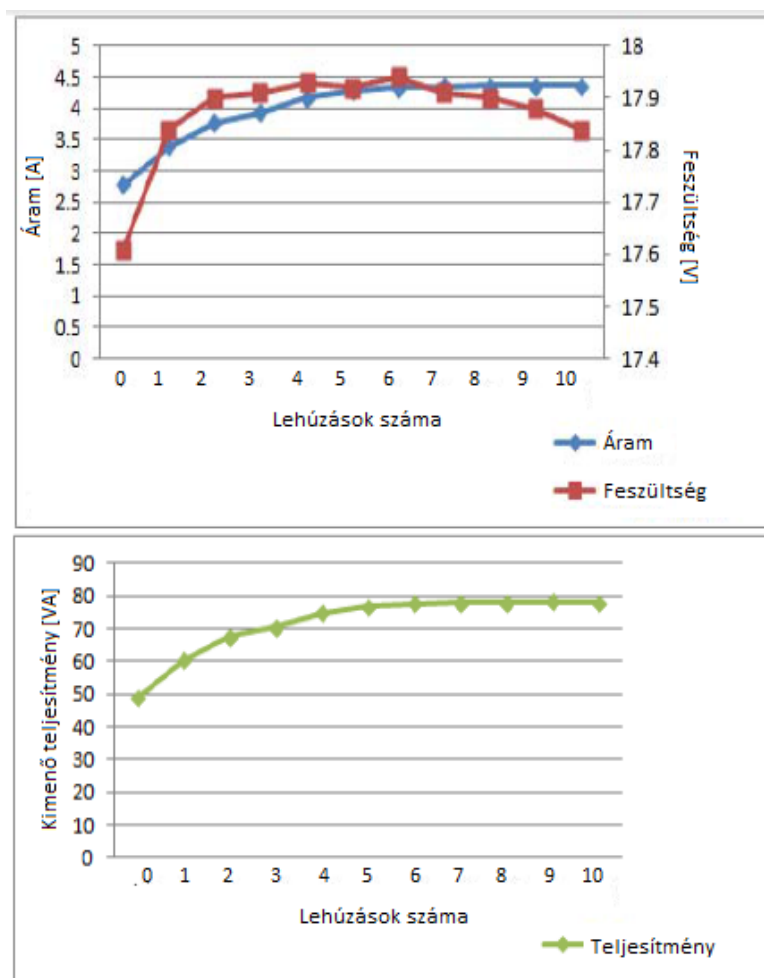
Az elektronikus rész több áramkörből áll, melyek közül van, amelyik a mechanikai rész mozgatásáért felel és van, ami a tisztítási folyamatot ütemezi és irányítja.

A mérést monokristályos napelemmel végezték, melynek névleges csúcsteljesítménye 80 W. A méréseket 11:30 és 12:00 között végezték, amikor legmagasabban állt a nap. A mérések alatt napos idő volt, kevés vagy semennyi felhővel; kevés szél, 46°C hőmérséklet és 670 W/m² értékű besugárzás jellemezte a környezetet. A paneleket a következőképpen sorszámozták: 1-es sorszámút egy napig nem tisztították, a 2-est egy hétig, a 3-ast egy hónapig. A kimenő teljesítményt megmérték tisztítás előtt, majd száraz, vizes és tisztító folyadékos tisztítás után. A mérési eredményeket a 6. táblázat tartalmazza. Megmutatja, hogy a tisztítófolyadékkal végzett tisztítás növeli leginkább a hatékonyságot, 10%-kal, míg az egyszerű vizes csak 4,8%-kal.

	Tisztítás előtt	Száraz tisztítás	Vizes tisztítás	Tisztító folyadékkal végzett tisztítás
1-es panel				
P [VA]	74,21	76,15	77,78	81,92
ΔP [VA]	0	1,94	3,57	7,71
η	0%	2,61%	4,8%	10,4%
2-es panel				
P [VA]	71,07	77,37	78,02	78,31
ΔP [VA]	0	6,3	6,95	7,24
η	0%	8,86%	9,78%	10,19%
3-as panel				
P [VA]	54,7	81,63	84,07	83,08
ΔP [VA]	0	26,92	29,36	28,38
η	0%	49,21%	53,68%	51,87%

12. táblázat: A teljesítménybeli hatékonyság és a nyereség az egyes tisztítási típusok által

A lehúzások optimális számát úgy határozták meg, hogy minden egyes lehúzás után megmérték a rövidzárási áramot, ami az első néhány lehúzás alatt gyorsan növekedett, majd a hatodik körül stagnálni kezdett. A mérési eredményeit a 34. ábra mutatja. A teljesítménynél is látszik, hogy a hatodik lehúzás után már nem jelentős a növekedés, vagyis hat lehúzás optimális.



34. ábra: A kimenő teljesítmény, áram és feszültség minden egyes lehúzás után (0. állapot a tisztítás előtti időpont)

Összességként megállapítható, hogy a száraz tisztítás nem tudja teljesen eltüntetni a szennyeződéseket, a vízzel való tisztítás már megnöveli a hatékonyságot, mert a legtöbb szennyeződést eltünteti. A legoptimálisabb viszont a tisztítófolyadékkal végzett tisztítást. Elmondható még, hogy a legköltséghatékonyabb megoldás, ha együtt alkalmaznak száraz és nedves tisztítási eljárásokat. Azért is költséghatékony a rendszer, mert nem szükséges plusz tápforrás, a panelből nyer energiát, valamint az alumíniumszerkezet miatt könnyű a súlya, illetve egyszerű rögzíteni a napelemhez. A szerkezet összeállítása egyszerű, így könnyen szétszerelhető, változtatható és javítható.

A tanulmányban megvizsgált eszköz kiválóan alkalmas sivatagi környezetben, ahol gyakran kell tisztítani a paneleket. Az általam vizsgált napelemparkoknál nem célszerű a panellel egybeépített berendezéseket használni. Helyette a következőkből választhatunk:

A Kisteleken használt berendezés rávilágított arra, hogy a kézi mosás igen hosszadalmas, a magasnyomású mosók víznyomása nem elég erős a hálózati nyomás hiányában. Így érdekesebb

külön erre a célra kifejlesztett gépeket beszerezni. A következő ábrán három, elvében ugyan olyan berendezés látható.



35. ábra: BP.Metalmeccanica, Messersi és Sunbrush cégek napelemmosó gépei [22], [23], [24]

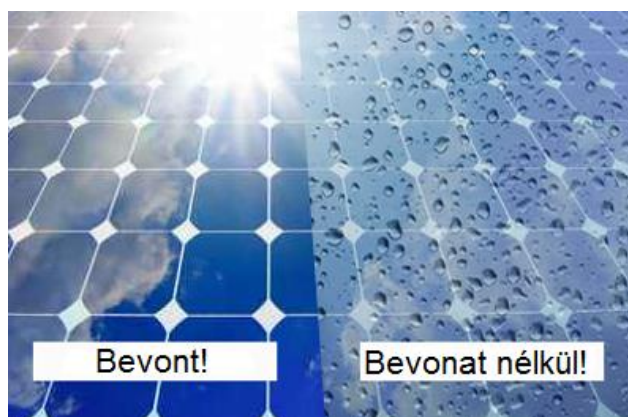
A két baloldali eszközök speciális, a napelem tisztításra megalkotott járművek, míg a jobboldalinál egy traktorra szerelik fel a kefét és a tartályt. Mindhárom gép magasnyomású vízzel dolgozik, a Sunbrush cég külön napelem tisztító folyadékot is kínál hozzá. A berendezések maguk állítják elő a magas nyomást, úgy tervezték meg őket, hogy tartályból dolgozzanak. Így kellő erősségű víznyomást képesek biztosítani, a sima magasnyomású mosókkal ellentétben, mint amelyet Kisteleken is használtunk. A magasnyomású víz és a kefék gyors forgása hivatott a szennyeződések eltávolítani. Ezen megoldások előnye, hogy gyorsan, kevés emberi erővel és kezelőszeméllyel lehet megtisztítani a napelemeket. Hátrányuk a nehézkes szállítás. Több napelempark esetén külön meg kell szervezni a fuvarát a helyszínek között. A Sunbrush Mobil eszköz hátránya még, hogy speciális traktort igényel, ami rendelkezik elülső, hátulsó és oldalsó hidraulikával is. A legtöbb, mezőgazdaságban használt traktor csak hátulsó hidraulikával rendelkezik. [22], [23], [24]

Ha a könnyű szállíthatóság fontos szempont, ellenben a gyorsaság és a kevés emberi munka elhanyagolható, rendelkezésre állnak olyan megoldások is, mint a Lehmann cég napelemtisztítója, mely a 36. ábrán látható.



36. ábra: Lehmann Puraqleen napelemmosó [25]

A cég eredetileg nagy üvegfelületek, homlokzatok tisztítására specializálódott, ahol fontos a foltmentes száradás. Így az ő rendszerük speciális vizet használ, ami a magas nyomású mosás mellett képes megkötni a szennyeződéseket, ezzel segítve a tisztulást. Valamint foltmentesen szárad, így a vízkőfoltok sem csökkentik a termelést. [25]



37. ábra: A NanoPro bevonata [26]

Tisztítás helyett a megelőzésre is fektethetjük a hangsúlyt. A NanoPro egy nanobevonatot kínál a napelemek felszínére, mely megvédi a panel üvegfelületét, valamint eredendően meglévő egyenetlenségeit kisimítja. A bevonat következtében kevésbé tapadnak meg a felületen a szennyeződések, és a víz is nyom nélkül felszárad, így elkerülhetőek a vízfoltok. A bevonat átlátszó, a beérkező sugárzást alig korlátozza. [26]

Mivel Berettyóújfalun és Kisteleken is már meglévő erőművekről van szó, így először mindenképp a tisztítást javasolnám, csak utána fontolnám meg a bevonatot a tulajdonosok helyében. A bemutatott módszerek közül az egybeépített gépek a leggazdaságosabbak, mivel azok gyorsan képesek nagy felületeket megtisztítani rövid időn belül, így nagy kiterjedésű napelemparkok esetében célszerűbb ezeket választani. Mivel egyik napelempark tulajdonosának sem áll rendelkezésére megfelelő traktor a Sunbrush tisztítóberendezéshez, és egy megfelelő traktor beszerzése meghaladja magának az egybeépített járműves gépek bekerülésének költségeit is, így annak beszerzését sem javaslom. Mivel a gépek ára üzleti titok, így pontos megtérülési számításokat nem közölhetek. A kisteleki mérési eredményekből kiindulva – ahol a tisztítással 7%-os javulást értünk el – szolidabb teljesítményjavulást feltételezve (évente 4%-ot), egy tisztító berendezés megtérülése 4-5 év.

6. Konklúzió

A csapadék tisztító hatását még pontos mérésekkel alátámasztva érdemes megvizsgálni, és úgy modellt alkotni rá. Egy alapos, erre a célra kifejlesztett tisztítóberendezés által végzett takarítás után is érdemes lenne megvizsgálni mennyivel nőtt a termelés, mert a kézi erővel véghezvitt tisztításunk nem volt annyira alapos. Ezeknek a mérési eredményeknek a birtokában lehetne pontosítani a modellt.

Amennyiben nem napi, hanem 5 perces, vagy negyed órás mérési eredményeket vennénk alapul, szintén pontosítható lenne a modell. Ekkor jól megfigyelhető a besugárzás- és hőmérsékletváltozás miatt bekövetkező termelésváltozás. Ezeket napi mérési adatokkal nehezebb követni. Ilyen gyakori adatoknál már a panel feszültségét és áramát is fel lehetne használni, majd egy fizikai modellt felhasználni, például a napelemek modellezésére használt diódás áramkört. Ezen adatok pontosítanák a modellt, azonban nagyobb erőforrást igényelne a feldolgozásuk, így meggondolandó széleskörű alkalmazásuk.

A modellek terén a következő megállapítások születtek: Az évszakok változása jól követhető szinusz függvényekkel, mivel a besugárzás burkolója szinuszosan változik az évek során. A legnagyobb befolyása a termelésre a besugárzásnak van, így egyéb adatok, mint a cellahőmérséklet és külső hőmérséklet csak finomítják a modellt.

Az általam vizsgált napelemparkok esetében évi egy tisztítást javaslok, a tavaszi időszakban, hogy a nyári nagy besugárzásokkor a lehető legkevesebb szennyeződés legyen a paneleken. Majd a panelek felén egy második, őszi próbatisztítást végeznék. Így könnyen megvizsgálható, hogy évi egy vagy két tisztítási alkalom szükséges. Az őszi tisztításra azért lehet szükség, mert a parkok mellett mezőgazdasági területek találhatók, ahol az aratás és egyéb nyári munkák hatására megnőhet a porkoncentráció. Mivel Magyarország nem tartozik a kevés csapadékkal rendelkező területek közé, valamint a parkok nem kiemelten poros környezetnek vannak kitéve, így több tisztítást nem tartok szükségesnek.

2 Irodalomjegyzék

- [1] http://www.greentechmedia.com/articles/read/gtm-research-global-solar-pv-installations-grew-34-in-2015?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=PHOTON+Newsletter+-+International+edition+from+January+25%2C+2016+&newsletter=PHOTON+Newsletter+-+International+edition+from+January+25%2C+2016+ (Hozzáférés: 2016.08.02.)
- [2] <http://mercomcapital.com/global-solar-installations-forecast-to-reach-approximately-64.7-gw-in-2016-reports-mercom-capital-group> (Hozzáférés: 2016.08.02.)
- [3] <http://www.mert.hu/hu/fotovoltaikus-eromu> (Hozzáférés: 2016.08.02.)
- [4] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/first-photovoltaic-devices> (Hozzáférés: 2016.08.03.)
- [5] <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf> (Hozzáférés: 2016. március 22.)
- [6] <http://ujenergiak.hu/napenergia-hasznositas-hazilag-a-napenergia-felhasznalasa/napelem-keszites-hazilag-napelem-gyartas/219-a-napenergiarol-ii-resz-a-napelem-ii> (Hozzáférés: 2016. március 22.)
- [7] [energia.bme.hu/~kaszas/Energetika%20\(menedzsereknek\)/besz%C3%A1mol%C3%B3k/A%20napelemek.pptx](http://energia.bme.hu/~kaszas/Energetika%20(menedzsereknek)/besz%C3%A1mol%C3%B3k/A%20napelemek.pptx) (Hozzáférés: 2016. március 22.)
- [8] Jim J. John, Sonali Warade, Govindasamy Tamizhmani, and Anil Kottantharayil: Study of Soiling Loss on Photovoltaic Modules With Artificially Deposited Dust of Different Gravimetric Densities and Compositions Collected From Different Locations in India
- [9] Monto Mani, Rohit Pillai: Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations
- [10] Ababacar Ndiaye, Cheikh M. F. Kébé, Pape A. Ndiaye, Abdérafi Charki, Abdessamad Kobi and Vincent Sambou: Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal
- [11] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Megujulo_energia/ch05s03.html (Hozzáférés: 2016. február 24.)
- [12] <http://pveducation.org/pvcdrom/quantum-efficiency> (Hozzáférés: 2016.09.05.)
- [13] Jaime W. Zapata, *Student Member, IEEE*, Marcelo A. Perez, *Senior Member, IEEE*, Samir Kouro, *Member, IEEE*, Anssi Lensu, and Anna Suuronen: Design of a Cleaning Program for a PV Plant Based on Analysis of Energy Losses
- [14] Rob W. Andrews, Andrew Pollard, Joshua M. Pearce: The effects of snowfall on solar photovoltaic performance
- [15] Falah Mustafa, Adeel Abd Sahb, A. Salam Al-Ammri, Areej Ghazi: Self Cleaning Control System for PV Solar Panel Street Light
- [16] Miqdam Tariq Chaichan: Impact of Some Environmental Variables with Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Review and Research Status

- [17]Arash Sayyah, Mark N. Horenstein, Malay K. Mazumder: Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels
- [18]<http://www.eu-solar.hu/ketkomponensu-non-linearis-modell-alkalmazasa-a-napelemes-rendszerek-kimeno-teljesitmenyenek-elorejelzesere/> (Hozzáférés: 2016.07.28.)
- [19]http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/(Hozzáférés: 2016.07.24.)
- [20] Felipe A. Mejia, Jan Kleissl: Soiling losses for solar photovoltaic systems in California
- [21] E. M. Al-Qubaisi, M. A. Al-Ameri, A. A. Al-Obaidi, M. F. Rabia, L. El-Chaar, L. A. Lamont: Microcontroller Based Dust Cleaning System for a Standalone Photovoltaic System
- [22]<http://www.bpmetalmecchanica.com/macchina-pulizia-pannelli-solari-c4000CAP.html> (Hozzáférés: 2016.08.15.)
- [23]<http://www.messersi.it/portfolio/roboklin-2/?lang=en> (Hozzáférés: 2016.08.15.)
- [24]<http://sunbrushmobil.info/en/> (Hozzáférés: 2016.08.15.)
- [25]<http://www.lehmann-kg.com/de/einsatzgebiete/solarreinigung> (Hozzáférés: 2016.08.15.)
- [26]<http://www.nanopro.hu/?page=20> (Hozzáférés: 2016.08.15.)