

Szakmai záróbeszámoló
az OTKA K 84150 nyilvántartási számú

„A napsugárzás spektrális eloszlásának hatása a szoláris energiatermelésre”

című kutatási pályázatról.

A kutatómunka kezdeteként először – a munkatervnek megfelelően – sor került a kutatási témába eső szakirodalom áttekintésére. Ez alapján pontosítottuk a kutatás során elvégzendő konkrét feladatokat.

A kutatáshoz kapcsolódóan elvégzett általános mérések

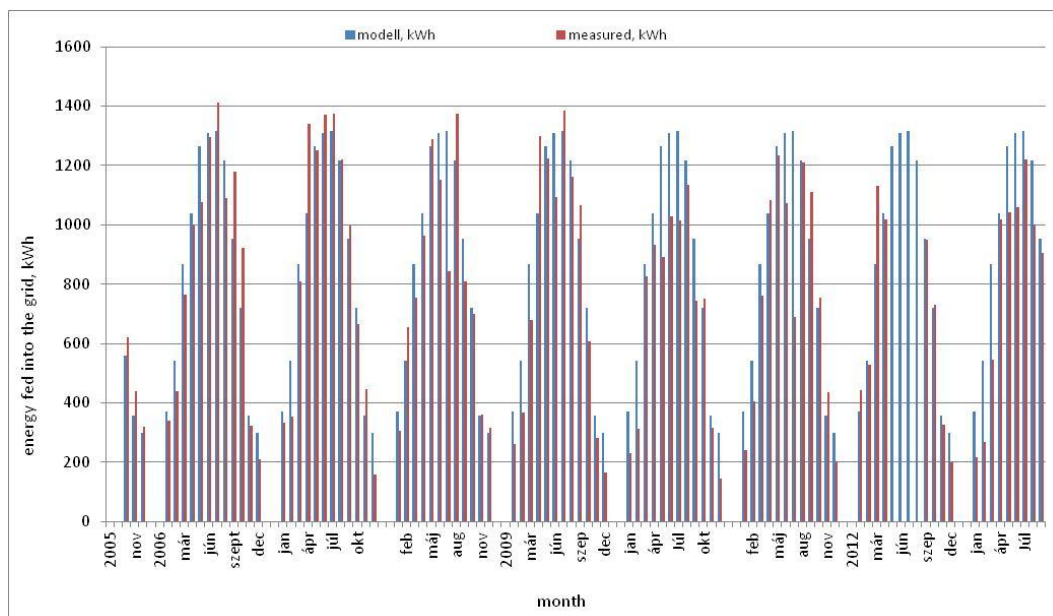
A tervezett kutatómunka fontos része volt a megfelelő mérési adatok begyűjtése, aminek érdekében megkezdődött a meglévő mérőrendszer továbbfejlesztése, illetve egyes elemeinek korszerűbb eszközökre való cseréje. Ezen a téren a legfontosabb előrelépést a térfogatáram és hőáram-mérő rendszer beüzemelése jelentette. Előzetesen a térfogatáram mérés csak egy „vízóra” manuális leolvasása révén volt lehetséges, ami egyrészt feleslegesen időigényessé, másrészt nem kellő pontosságúvá tette a térfogatáram meghatározását. Ennek fő oka, hogy a szolárfolyadék hőmérséklet változása során annak viszkozitása is változik, ami azonos szivattyú teljesítmény mellett eltérő térfogatáramot eredményez. A hőmennyiség mérés a térfogatáram mérésen, illetve a szolárfolyadék hőmérséklet különbségének mérésén alapult, ezen adatokból számolással került meghatározásra, ami a mérőrendszer fejlesztést követően szintén pontosabbá vált.



A mérőkörbe integrált hőárammérő

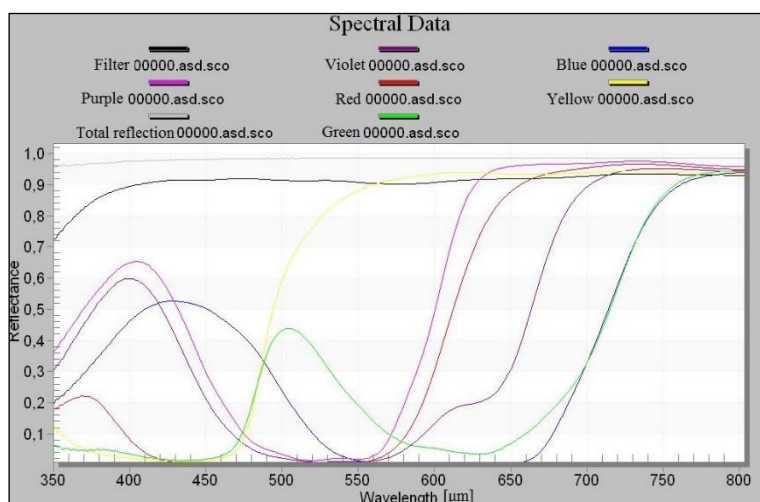
A projekt során átalakítottuk a meglévő napenergiás berendezés adatgyűjtő rendszerét is, a régi, C++ nyelven programozott, a célfeladatok megoldására korábban kifejlesztett egyedi szoftvert egy Labview alapú, megújult számítástechnikai hardvert használó, rugalmasan, az adott feladathoz könnyen illeszthető szoftverre cseréltük. A Labview rutinok felprogramozása a tanszékkal kutatási kapcsolatban levő hallgatók részvételével történt (Tóth, J. and Buzás, J.: Renewal of a data logging, monitoring and control software in LabView in connection with a database server development).

Időközben a tervezett ütemezésben folytak a kétféle napelem technológiát (polikristályos és amorf szilícium) tartalmazó 10 kWp teljesítményű rendszer energetikai mérései, amelynek tapasztalatait folyamatosan publikáltuk (Seres, I. and Farkas, I.: Analysis of the long time energy production of a medium size PV system).



Fotovillamos rendszer energiatermelési adatok a modellezéssel összevetve, havi bontásban

A spektrális vizsgálatokhoz kapcsolódóan többféle mérőszorozatot terveztünk a projekt keretében. A napkollektorok spektrális tulajdonságainak vizsgálatához először az alkalmazott színszűrők áteresztési spektrumára történtek meg az ellenőrző mérések (Kocsány, I. and Seres, I.: Performance of solar collectors by reflected spectral measurements). A mérőszorozat során a VM MGI eszközeinek felhasználásával megmértük egy színszűrő fólia sorozat áteresztési spektrumát a látható (350 - 800 nm) és az infravörössel kiegészített (350 - 2400 nm) tartományban. Ez utóbbira azért volt szükség, mert feltételezésünk szerint a különböző napelem típusok eltérően módon hasznosítják az infravörös sugárzást.



A mérésekhez használt színszűrők spektrális jellemzői

Ezt követően az ily módon kalibrált szűrők felhasználásával megmértük egy napelemre eső teljes spektrum intenzitását, illetve a napelemről visszaverődő intenzitást, majd ugyanezt különböző szűrőknek a napelem elé helyezésével. Ennek a vizsgálatnak a célja annak a kiderítése volt, hogy az egyes spektrális tartományokban mennyivel nagyobb vagy kisebb arányt nyel el egy adott technológiájú napelem. A mérések során feltételeztük, hogy a beeső és a visszavert intenzitáskülönbsége azonos az elnyelt intenzitással.

A projekt eszközbeszerzési keretében egy, a spektrális vizsgálatokhoz elengedhetetlenül szükséges spektrométer, mint alaplátvány beszerzése volt a fő célunk. A projekt első két évében a beszerzésre fordítható éves keretünket csak kis részben használtuk fel, hogy végül a spektrométert (Ocean Optics USB2000+ VIS-NIR-ES típus) be tudjuk szerezni. Ily módon a megvásárlásra 2013-ban került sor 3.126.630 Ft értékben. Az ezt megelőző 2 éves projektidőszak alatt több alkalommal néhány hónapos időszakokra a méréseinkhez – az intézetünkkel 1990-től bilaterális kapcsolatban lévő – Intézetből (BOKU, Institute of Water, Atmosphere and Environment) kaptunk kölcsön az egyik spektrométerüket, illetve a doktorandusz hallgatóink közreműködésével részben ebben az Intézetben, Bécsben is végeztünk méréseket a saját projektünkhöz. A beszerzett spektrométert is a bécsi kollégák szakmai kapcsolati révén sikerült kedvező áron beszerezni egy osztrák cégtől, ami jelentős megtakarítást eredményezett. Természetesen bár a projekt hivatalosan 2015 januárjában befejeződött, így a spektrométer csak rövid időszakra szolgálta "közvetlenül" a projektet, azonban a projektben megfogalmazott feladatok nem zárultak le, a napelemek teljesítőképességének növelése területén végzett kutatások intenzitása még inkább erősödik, így az eszköz jelentősen szolgálja jövőbeni kutató tevékenységünket is, hozzájárulva ahhoz, hogy munkánkkal továbbra is hozzájáruljunk a terület fejlődéséhez.



A projekt keretében beszerzett spektrométer

Az ellenőrző és kalibráló mérések után megkezdtük a napsugárzás spektrumának rögzítését, hogy a spektrumváltozás adatait az energiatermelési adatokkal összevethessük. Az ütemezett – az energetikai mérésekhez igazított 10 perces átlag - mérések a SpectraSuite szoftver segítségével kerülnek feldolgozásra és mentésre. A spektrométer, a fénygyűjtő egysége, és egy jellemző mért függvénye az alábbiakban látható:

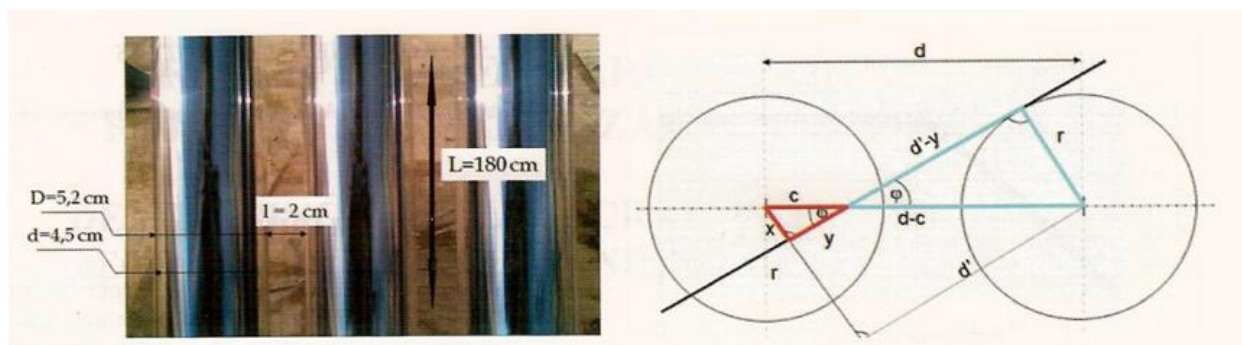


Spektrum mérés eredménye

A választott spektrométer előnye, hogy a mérési (integrálási) időtartama állítható, így a napsugárzás spektruma mellett – hosszabb integrálási idővel a fényszűrők, és fényforrások spektrális tulajdonságainak mérésére is alkalmas.

A kutatáshoz kapcsolódóan elvégzett modellezési feladatok

A munkatervnek megfelelően kifejlesztésre került a sík- és vákuumcsöves napkollektorok hasznos felületét összehasonlító geometriai modell, amiből folyóirat cikk is született (Kocsány I., Seres I.: Sík- és vákuumcsöves kollektorok hasznos felületének geometriai modellje). A kutatás célja az volt, hogy a beeső napsugárzás eltérő beesési szögei esetén (napi és éves ciklus) egy-egy azonos helyzetben rögzített sík- és vákuumcsöves kollektor esetén mekkora az aktív (a sugárzás irányára merőleges) felület. Az eltérő geometriák miatt ezek aránya a nap folyamán folytonosan változik, a vonatkozó közelítő függvények meghatározásra kerültek.



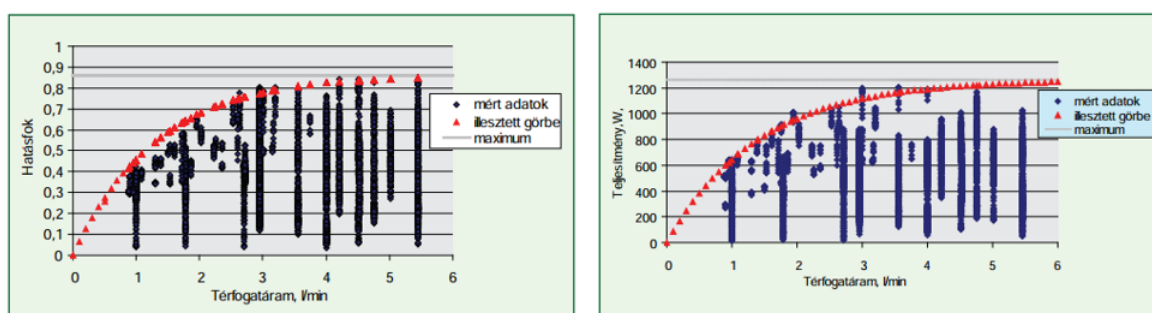
A geometriai modell árnyékolás számolása

A geometriai modell továbbfejlesztése a visszatükröződés mértékét is figyelembe vevő modell. A modell felépítéséhez szükséges mérések, például a napsugárzás visszaverődésének mértéke különböző szoláris eszközök felületéről a beesési szög függvényeként, kivitelezésre kerültek, ami alapján a geometriai modell továbbfejlesztett verziója már a mérésekkel is összevethetővé vált. (Kocsány, I. and Seres I.: Performance of solar collectors by reflected spectral measurements, Mechanical Engineering letters, 2014, Vol. 14, illetve Kocsány, I., Seres, I. and Farkas, I.: Influence of reflected radiation components on solar collectors).

A kutatási célok között szerepelt a mérési adatok alapuló, a vákuumcsöves kollektor termikus viselkedését leíró mesterséges neurális hálózatos (ANN) modell megalkotása.

Elsőként a nevezett jellemzőknek a szolár-folyadék térfogatáramától való függésének vizsgálatára került sor. A modellezést követően ellenőrző mérések történtek. A mérés során különböző térfogatáramok mellett (amelyek a szivattyúra kapcsolt, fázishasításon alapuló teljesítményszabályozóval kerültek beállításra), meghatározásra került a kollektor hatásfoka. Ehhez a térfogatáram mellett a beeső sugárzás intenzitásának, és a szolár-folyadéknak a kollektorban bekövetkező hőmérséklet növekedésének nagyságára volt szükség. A mérési adatok alapján meghatározásra került a maximális hatásfokhoz tartozó térfogatáram:

$$\eta(i) = \frac{c \rho}{A} \frac{\dot{V}(i)(T_{\text{out}}(i) - T_{\text{in}}(i))}{I(i)}.$$



Hatásfok – térfogatáram illetve teljesítmény térfogatáram függvények

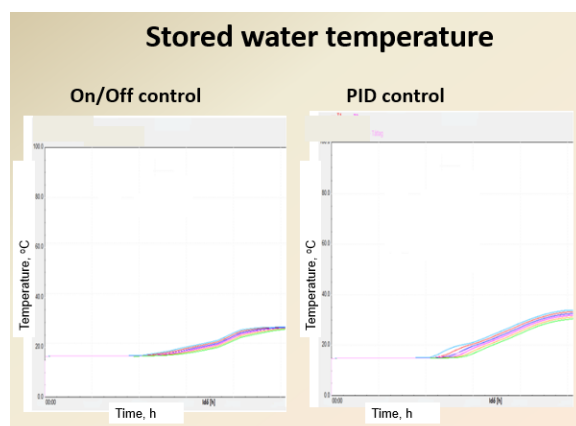
A kutatómunka eredményeként javaslat született egy módosított, az optimális térfogatáramot megvalósító szabályozási eljárás kidolgozására (Víg P., Farkas I.: Vákuumcsöves kollektor hatásfokának függése a térfogatáramtól, Magyar Energetika, XX. évf., 2013/5).

Következő lépésként a szolárkör szabályozási algoritmusának az energiatermelésre gyakorolt hatása került vizsgálatra. A munka során napkollektoros vízmelegítő rendszer olyan szabályozásának hatékonyságát vizsgáltuk, melynek során a szolárköri térfogatáram változtatásával a kollektorból kilépő szolár-folyadék és a tárolt víz hőmérsékletének különbsége állandó értéken tartható. A vizsgálathoz a Tanszéken működő szoláris vízmelegítő berendezés volt az alaprendszer. Elkészítettük a jelenlegi vákuumcsöves illetve sík kollektorral is használható On/Off szabályozással működő sík- és vákuumcsöves kollektoros rendszerek valamint ugyanezen rendszerek PID szabályozóval kialakított intelligens szabályozással működő modelljeit a TRNSYS programmal.

A szimulációk eredményei alapján – különös tekintettel a PID szabályozó alkalmazhatóságára – a következő megállapítások fogalmazhatóak meg:

- Az üzemidő a szabályozástól független.
- A PID szabályozó alkalmazásával a teljes üzemidőben a ki-bekapcsolások aránya jelentősen csökken.

- A behozott energia PID szabályozásnál nagyobb, és az alkalmazott kollektoroknál minden esetben több volt a vákuumcsöves rendszerénél, mint a sík kollektorosnál.
- A rendszer hatásfoka és a tárolt víz termikus rétegződése normál szabályozásról PID szabályozásra váltva számottevően javult.
- A szivattyú teljesítményfelvétele PID szabályozással kevesebb, a két érték azonban minél nagyobb a napsugárzás értéke annál jobban közelít egymáshoz. Tehát a PID szabályozó a gyenge, de a szolárkört még működtető napsugárzások mellett is hatékonyan működik.
- A tárolt víz hőmérséklete PID szabályozó alkalmazásával a nap végén akár 5-7 fokkal is magasabb 15 fokos kezdő hőmérsékletet és fogyasztásmentes esetet feltételezve.



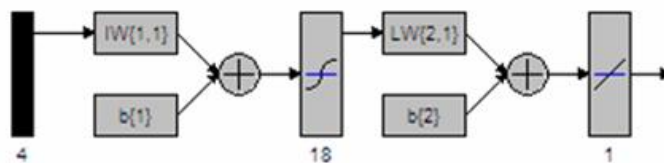
A tárolt víz hőmérséklete különböző szabályozások esetén

- Egész éves üzemet vizsgálva budapesti időjárási adatokkal a PID szabályozással akár 15-20000 Ft megtakarítás is elérhető.

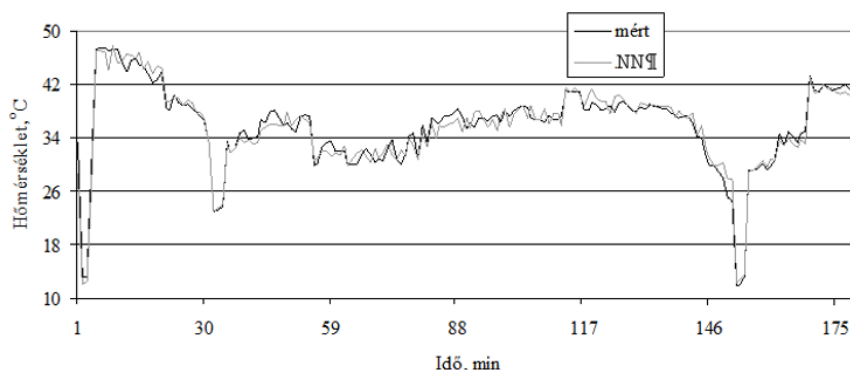
Az eredmények alapján megfogalmazható tehát, hogy van létjogosultsága a PID szabályozásnak (Vladár P., Víg P.: Influence of mass flow control on the performance of solar collectors).

Diplomázó diákok bevonásával végeztük a különböző napkollektorok eltérő viselkedését leíró tranziens jelenségek vizsgálatát. Ennek során először összehasonlító elemzést készítettünk az egyes napkollektorok azonos sugárzási paraméterek esetén mérhető eltérő energiahozamáról, ezután került sor a tranziensek – elsősorban a szivattyú ki-be kapcsolások, illetve a gyors napenergia teljesítmény változások hatásának vizsgálatára.

A vákuumcsöves kollektor termikus viselkedését leíró neurális hálós (NN) modell 2011. évi mérési adatokra alapozva multi layer perceptron (MLP) neurális hálóval valósult meg. ami a szolárfolyadék optimális térfogatáramát biztosító szabályozás alapjául szolgál. A modellezés részleteit egy tanulmány formájában tettük közzé (Farkas I., Seres I. Víg P., SZIE FIZT Tanulmány). A szolárfolyadék optimális térfogatárama a különböző környezeti paraméterek ismerete alapján az eddig kifejlesztett modellek alapján becsülhető. A modellek ellenőrzésére kiépítésre került egy, a szivattyú fordulatszám - és így a térfogatáram - szabályozását lehetővé tevő, fázishasításos elven működő mérőkör, amivel a modellek ellenőrzése zajlott.



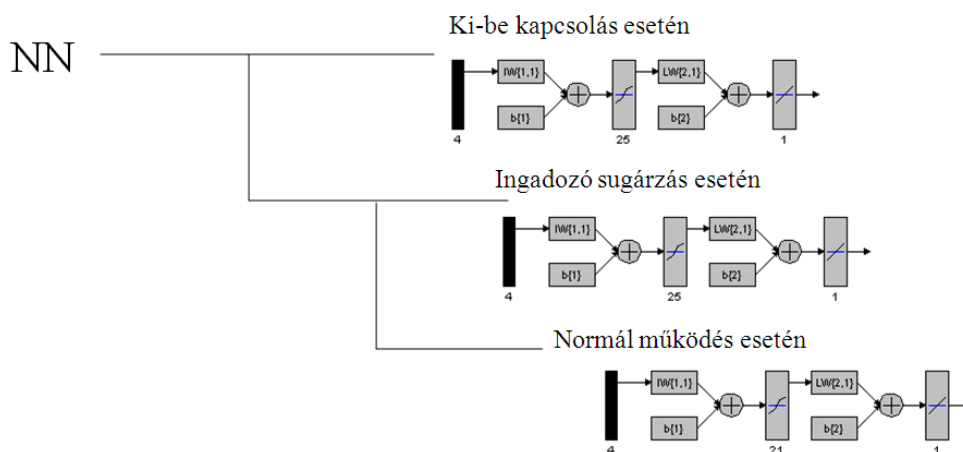
A síkkollektor tranziens viselkedését leíró NN struktúra



A validálás eredménye ingadozó sugárzás esetén

A modellezés eredményként megfogalmazható, hogy sikerült a mérnöki pontosság igényeit jobban megközelítő NN alapú modellt kidolgozni a sík- és vákuumcsöves kollektor termikus viselkedésének leírására is. A vákuumcsöves kollektor termikus viselkedése olyan modellel írható le, amely három párhuzamosan kapcsolt NN-ből áll (normál működés, ingadozó sugárzás, ki-be kapcsolás). A két tranziens szakasznál a ki-be kapcsolásnak van prioritása, hiszen ez eredményez nagyobb ingadozást.

A modell működése tehát: vizsgálja, hogy van-e kibe kapcsolás. Ha igen, akkor az az NN becsüli a kilépő szolárfolyadék hőmérsékletét, ha nincs, akkor vizsgálja, hogy van-e legalább 100 W/m^2 sugárzás ingadozás. Amennyiben igen, akkor az ingadozó sugárzáshoz kapcsolódó modellrész, egyébként pedig a normál működésre megadott modell ad jó becslést. Ezen részmodell működési vázlatát a következő ábra mutatja MATLAB jelölésrendszerrel.

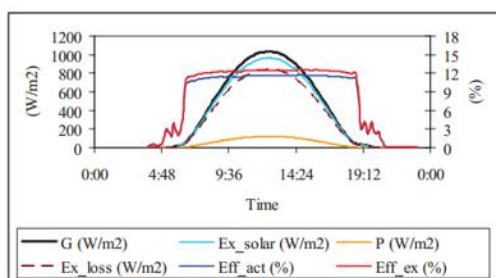


A neurális hálós modell működési vázlata

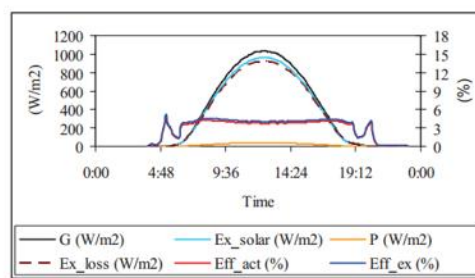
Fontos vizsgálati irány volt még a villamos és termikus hatásfoknak az exergia hatásfokkal való kiegészítése. A kereskedelembe is kapható fotovillamos (PV) technológiákat, nevezetesen a kristályos szilícium és a vékonyrétegű (amorf szilícium) napelemeket elméleti hatásfokuk növelése érdekében exergia analízisnek vetettünk alá. Ezen vizsgálatok során a Szent István Egyetemen (SZIE) található 10 kWp beépített teljesítménnyel rendelkező fotovillamos rendszer ASE-100 - multikristályos és DS-40 - amorf napelemeit használtuk fel. Célkitűzés az, hogy valós adatokat és eredményeket biztosítsunk a napelemek villamos működési hatékonyságának növelése céljából mind cella, mind pedig mező méretek tekintetében.

Az adott rendszerben elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy lehetőség van az exergia hatásfokának a növelésére mindaddig, amíg meg nem közelíti az ideális értéket. Ez a polikristályos technológia esetében 11.8%-ról 15.7%-ra, a vékonyrétegű amorf technológia esetében pedig 4.3%-ról 8.9%-ra való növekedést jelent (Rusirawan D. and Farkas I.: Thermodynamic efficiencies of photovoltaic modules, Environmental Engineering and Management Journal, Vol. 11, 2012).

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{elect} + \dot{Ex}_{thermal} + \dot{Ex}_{dest.}}{\dot{Ex}_{solar}}$$



Polycrystalline (ASE-100)

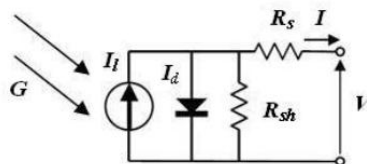


Amorphous silicon (DS-40)

Pillanatnyi villamos és exergia hatásfok napi változása, mérésekre alapozva

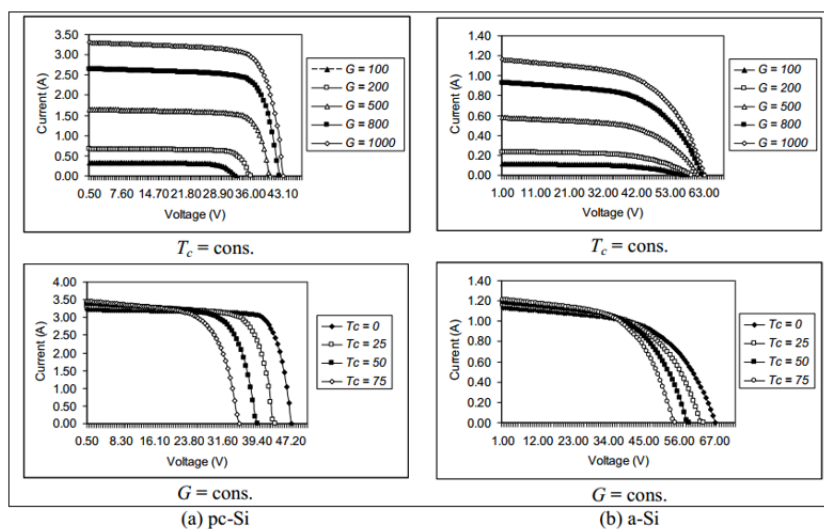
Az elvégzett vizsgálat és a kapott eredmények azért is fontosak, mert jelenleg a napelemes rendszerek energiaátalakítási hatásfoka növelése érdekében a több átmenettel rendelkező cellák kerülnek egyre szélesebb körben alkalmazásra. Így pl. a két-átmenetes vékonyrétegű „micromorph” technológia estén a napelemek amorf szilícium (a-Si) és mikrokristályos szilícium (μc-Si) rétegekből állnak. A cellák különböző szerkezeti kialakításuknak köszönhetően a napsugárzás szélesebb spektrumát lehet hasznosítani, így növelve a cellák hatásfokát.

A fotovillamos cellák karakterisztikájának jellemzésére többféle áramköri modell létezik, közülük a legelterjedtebbek az egy és két diódás modellek. Az egy diódás modellekben a modellparaméterek között vannak külső (pl. fotoáram) és belső (pl. sötét ellenállás) paraméterek.



Az egydiódás napelem modul felépítése

A modellezés pontossága a belső paraméterek pontos meghatározásán alapul. Ehhez kapcsolódóan a belső paraméterek meghatározására számolási módszerek kerültek kifejlesztésre, amelyeket a fotovillamos karakterisztikát modellezni képes szimulációs szoftverek segítségével teszteltünk.

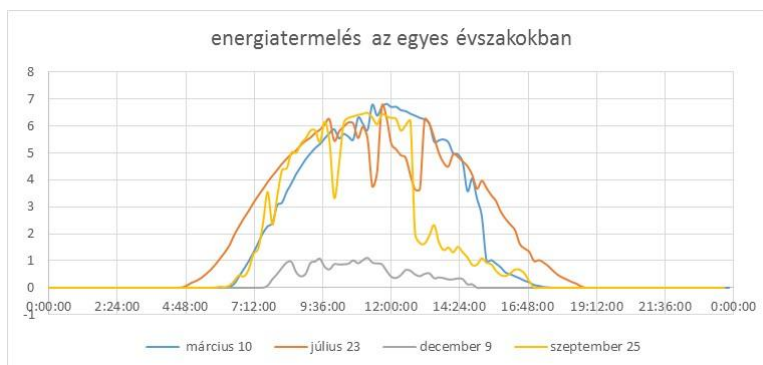


Polikristályos és amorf szilícium napelemek I-V karakterisztikája (PV*SOL 3.0)

Az I-V karakterisztikákból megállapítható, hogy az üresjáratú feszültséget erősen befolyásolja a hőmérséklet, míg a besugárzás a rövidzárási áramra van erős befolyással. Ezen jellemzők meghatározása a két legáltalánosabban alkalmazott modultípusra (polikristályos és amorf szilícium technológia) megtörtént, ami alapján a cellák működését leíró pontosabb modellek adhatók meg.

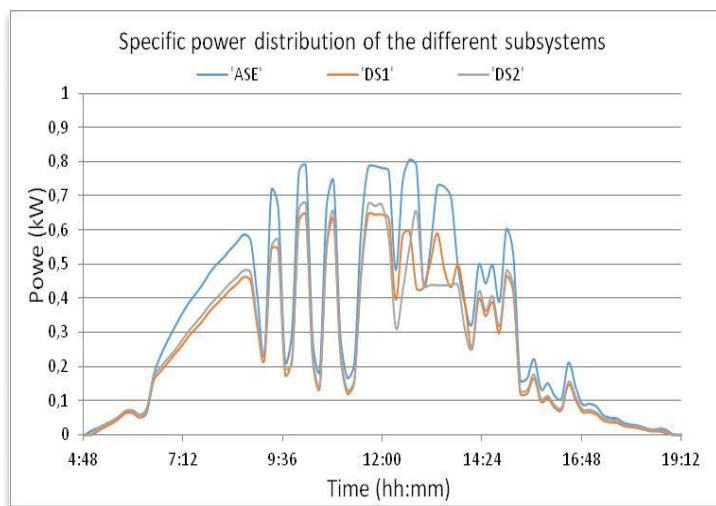
A napelemek energiatermelésének spektrális függése

A hosszú távú mérési adatainkból kiolvasható, hogy az eltérő technológiájú napelemekből álló rendszereinek működésében évszakos periodicitást mutató változás figyelhető meg.

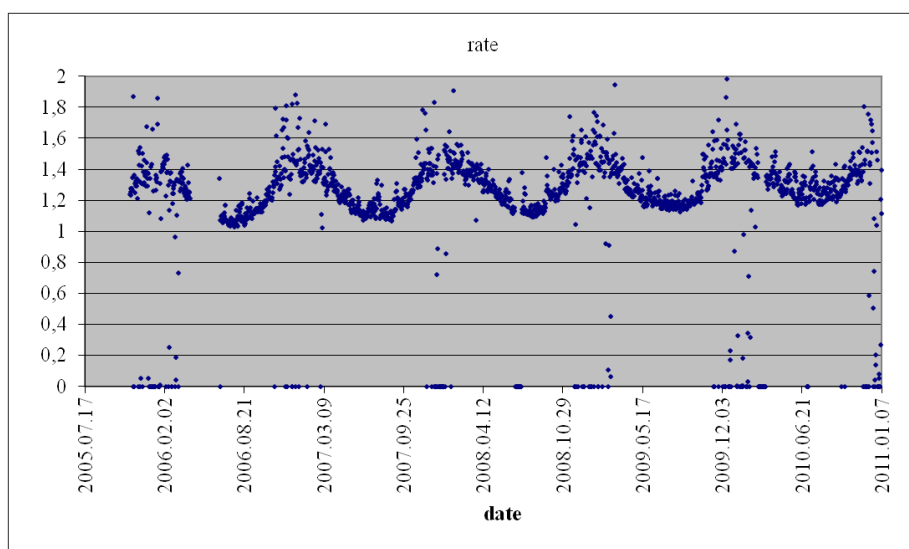


Jellegzetes napi teljesítmény eloszlások a mért 10 kWp-es rendszeren különböző évszakokban

Ennek értelmezésére többféle vizsgálatot végeztünk. A beeső teljesítmény természetes, sugárzásfüggő periodicitása mellett megfigyelhető volt, hogy a vizsgált kétféle napelem technológia fajlagos energiatermelése (1 kWp-nyi napelemre jutó energiatermelése) szintén évszakos ingadozást mutat:

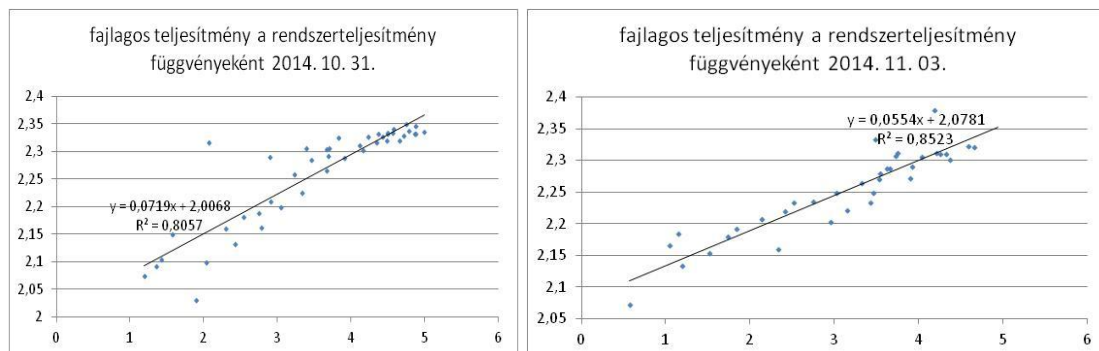


Fajlagos energiatermelési adatok egy adott napon

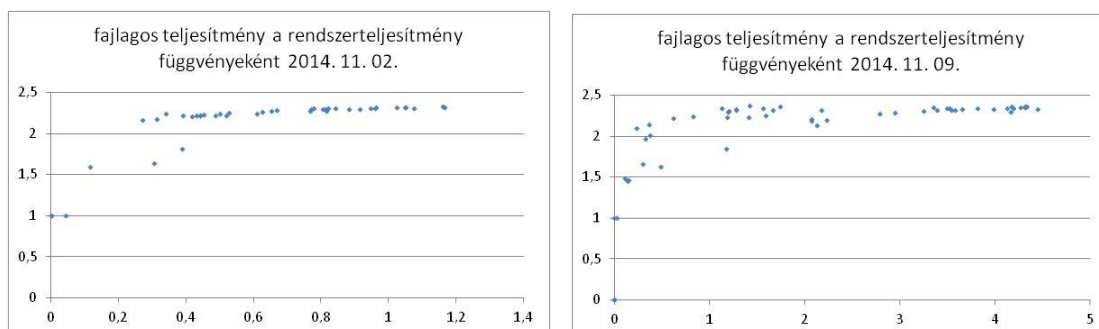


Polikristályos és amorf szilícium napelemek fajlagos energiatermelésének aránya hosszabb időtávlatban

Az energiatermelési adatok alapján meghatározott fajlagos energia arány lineáris kapcsolatban van a rendszer napi energiatermelésével, ami eltérő jellegű a napos és a felhős napokra, ez szintén a hatásfokok spektrális függésére enged következtetni.

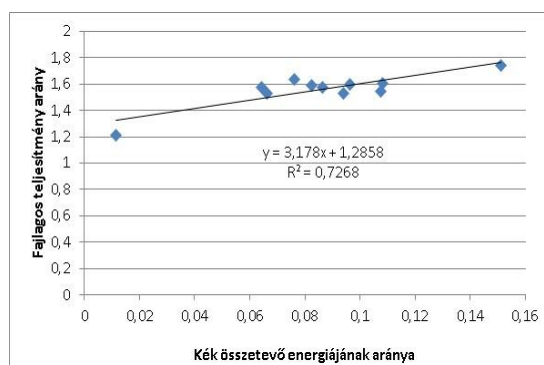


Fajlagos teljesítmény a rendszerjeljesítmény függvényeként napos napokra



Fajlagos teljesítmény a rendszerjeljesítmény függvényeként felhős napokra

A spektrális hatás vizsgálatához elemeztük, hogy a látható fény tartományban a kék hullámhossz tartományú összetevő arányának változása milyen kapcsolatban van a fajlagos energiatermelés aránnyal. Azért a kék spektrumtartományt vizsgáltuk, mert a kék összetevő nagy szóródása miatt ez a spektrum változásnak jó indikátora, ami akár a napi változást is képes kimutatni – délben rövidebb utat tesz meg a fény a légkörben, s emiatt kevésbé szóródik, mint reggel vagy este, ami évszakos viszonylatban még jelentősebb. A spektrométer rövid idejű rendelkezésre állása miatt egyenlőre teljes évre vett adatsorunk nincs, de napi változással kapcsolatos hatás az alábbi ábrán látható:



A fajlagos teljesítmény arány függése a spektrumváltozástól (a kék összetevő arányától)

Természetesen az itt bemutatott spektrális vizsgálatok teljes évre (téli nyári, tavaszi és őszi spektrális viszonyok közötti mérési eredményekre) való kiterjesztése a spektrális függés matematikai modellel történő elemzését is lehetővé teszi.

Összegzés

A projekt során - a pályázati munkatervnek megfelelően – a mérések előkészítéseként megtörtént egy hőáram-mérő rendszer beüzemelése, a tanszéki monitorozó rendszer Labview alapokra helyezése és hardveres megújítása, a spektrális vizsgálatokhoz a színszűrők bemérése, illetve később egy spektrométer beszerzése és beüzemelése.

A modellezés során kifejlesztésre került a sík- és vákuumcsöves napkollektorok hasznos felületét összehasonlító geometriai modell, amely továbbfejlesztve a visszatükröződés mértékét is figyelembe veszi. A szolár kör modellezése során vizsgáltuk a hatásoknak a szolár-folyadék térfogatáramától való függését, és az On/Off helyett a PID szabályozónak a tranziensekre gyakorolt hatását. Ezt egy neurális hálós modell kidolgozása követett, amelynek eredményeként kidolgozásra került az optimális térfogatáramot megvalósító szabályozási eljárás. A hatások elemzések során fontos vizsgálati irány volt a villamos és termikus hatásoknak az exergia hatásokkal való kiegészítése.

A mérési adatokból kimutatható volt, hogy a vizsgált kétféle napelem technológia fajlagos energiatermelésének aránya évszakos ingadozást mutat, ami mögött a hatások spektrális függését feltételeztük. Ezt az energiatermelési adatsoroknak a spektrális adatokkal való összevetésével igazoltuk.

Publikációk

A munkatervbeli vállalásoknak megfelelően az elért eredményeinket széles körben ismertettük rendezvények illetve bemutatók szervezésével, és publikációk készítésével. A kutatás időtartama alatt a projekthez kapcsolódóan 2 tanulmány (egyéb kiadvány), 16 konferencia absztrakt, 15 konferenciacikk, 2 könyvrészlet és 14 folyóirat cikk került publikálásra, amelyek közül az egyik nemzetközi impakt faktoros folyóiratban került közlésre. A megjelent 49 publikáció mellett a témakörhöz egy magyar és egy angol nyelvű PhD dolgozat is kapcsolódik, melyek közül az angol nyelvűnek a megvédése is sikeresen lezajlott. A 49 publikációból 42 angol nyelvű.