



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Tinódi Péter

KÖRNYEZETI KÖRÜLMÉNYEKET SZIMULÁLÓ NAPELEMVIZSGÁLÓ BERENDEÉS FEJLESZTÉSE

KONZULENSEK

Plesz Balázs, tudományos segédmunkatárs

Hantos Gusztáv, doktorandusz

BUDAPEST, 2012.

Tartalomjegyzék

1 Bevezető.....	3
2 Napelem minősítési módszerek	4
2.1 Napelemek minősítése.....	4
3 Napelemek környezeti viszonyoktól való függése.....	5
3.1 Napelemek „irányfüggése”	5
3.2 Környezeti fényviszonyok.....	6
3.3 A Földfelszínre eső fény spektruma.....	7
3.4 A Földfelszínre eső diffúz fény spektruma	8
3.5 A sugárzás-komponensek analitikus meghatározása	9
3.6 Komponensek mérése, intenzitásuk meghatározása	10
4 Megvilágítás újszerűsége	13
4.1 Eddig használt módszerek.....	13
4.2 Komplex megvilágítás lehetősége, újszerűsége	14
4.3 Integráló gömb	14
4.4 Intenzitás, irányfüggés mérése	15
4.5 A diffúz megvilágítás	19
4.6 A direkt megvilágítás	21
4.7 Az eszköz megtervezése.....	23
4.8 Adatgyűjtő mérőállomás	25
5 Összegzés	27
6 Ábrajegyzék	28
7 Irodalomjegyzék.....	29
8 Melléklet.....	30

1 Bevezető

A 21. században egyre fontosabb szerephez jutnak a megújuló energiaforrások, így a napelemek is. A korszerű technológiák segítségével egyre hatékonyabb napelem-struktúrákat fejlesztenek ki (például organikus, szerves napelemek).

Ezeket az eszközöket azonban minősíteni, karakterizálni kell, annak megállapítása érdekében, hogy mennyire felelnek meg az elvárásoknak, követelményeknek. Ezen vizsgálati módszereket is folyamatosan fejlesztik, de általában az alapsémán nem változtatnak, vagyis csak egyféle (direkt) megvilágítást alkalmaznak a legtöbb esetben.

A munkám célja egy olyan berendezés megvalósítása volt, amely segítségével a szabadtéri fényintenzitás-viszonyok és azok eloszlása pontosabban szimulálhatók. Ehhez egy olyan eszközt terveztem meg, amely segítségével mind a direkt, mind a diffúz sugárzás-komponensek együttesen előállíthatók.

A teljes rendszert egy, az Elektronikus Eszközök Tanszékén rendelkezésre álló, integráló gömbhöz készítettem, ami segítségével az egyenletes diffúz sugárzás könnyen biztosítható. A direkt megvilágítást egy parabolatükörrel szerelt halogénizzó biztosította, a diffúzt pedig fehér és színes LED-ek szolgáltatva fény keverésével állítottam elő. Az alkalmas spektrumok és intenzitások elméleti meghatározásán kívül egy egyrétegű, a jobb hőelvezetés biztosítása érdekében MCPCB-n elkészített megvilágító és meghajtó áramkört is terveztem.

Különböző tartó, takaró és tükröző elemek elhelyezése is szükséges volt, hogy elkülönítsem egymástól a kétféle fénysugárzást. A rendszer megépítésén kívül további célom, mérések elvégzése különböző napelemeken és annak megállapítása, hogy mekkora különbség van a csak direkt megvilágítással felszerelt és az általam megépített rendszer mérési eredményei között.

Jövőbeli célom egy automatizált tesztkörnyezet megvalósítása, amelyen egy felhasználóbarát, számítógépes felületen keresztül konfigurálhatóak lesznek a vizsgálati paraméterek, a mérési eredmények pedig azonnal kiértékelődnek.

2 Napelem minősítési módszerek

2.1 Napelemek minősítése

A napelemek minősítése során különböző mérési eljárások sorozatát kell elvégezni. Vannak mérések, melyekkel a már összeállított napelem paneleket védő plexi borítás degradációját vizsgálják (ezeket rendszerint látható és UV fényvel tesztelik), vagy az eső elleni szigetelés minőségét ellenőrzik. [1]

A legfontosabb mérések során az elkészült cellákat karakterizálják. Ha egy új termékről van szó, akkor ellenőrzik, hogy megfelel-e a kívánt értékeknek, ha pedig már egy kiforrott termék, akkor ellenőrzik, hogy a kívánt tűréshatárokon belül helyezkedik el.

A fejlett napszimulátorokra az igények is növekednek, ahogy a napelem ipar is nő. Az elvégzett mérések alapján igyekeznek fejleszteni, optimalizálni az új cellastruktúrákat. A megvilágítás szerves szerepet játszik a karakterisztikák (például: áram-feszültség) felvételében. Vannak mérések, például a kvantumhatásfok mérése, amik nem igényelnek pontosan kalibrált fényforrást, ellenben a spektrumnak meg kell egyeznie az előírttal.

A megvilágítás időbeli eloszlását tekintve lehetnek folytonos, vagy villanófényes megoldások. Mindegyiknek megvan az előnye, a folytonos megvilágítás esetén lehet hosszabb is a mérés, valamint egyszerűbb a felépítése. Villanófényes megoldásokkal azonban nagyobb teljesítmény érhető el, de rövid méréseket igényel.

Vannak bizonyos cellastruktúrák, amelyeket csak folytonos fényű megvilágítással lehet vizsgálni, hiszen a pulzáló fény kapacitív zavarokat okozhat a mérések során. [2]

Függetlenül attól, hogy milyen cellát vizsgálunk, a standard tesztkörülményeknek egyezniük kell, azonos $1000\text{W}/\text{m}^2$ intenzitás szükséges, ami az „1 Nap” értéknek felel meg AM1,5-ös spektrum mellett standard, 25°C -on.

3 Napelemek környezeti viszonyoktól való függése

3.1 Napelemek „irányfüggése”

A napelemekből akkor vehető ki a legnagyobb teljesítmény, ha azokat merőlegesen a Nap fele irányították. Ennek több oka is van.

Egyrészt ilyenkor a legnagyobb a hatásos keresztmetszet, azaz ekkor maximális az a felület, ami a Naptól érkező (közel) párhuzamos sugárzást felfogja. Ha nem merőlegesen a Nap fele irányítjuk, akkor már kevesebb lesz a beérkező sugárzás, hiszen a napelem beesési merőlegese és a napsugárzás által bezárt szög (α) függvényében a hasznos felület:

$$A_{\text{hasznos}} = A_{\text{napelem}} * \cos(\alpha) \quad (1)$$

Másrészt a napelemben a pn átmenet mélysége is fontos szerepet játszik. A szilíciumban különböző hullámhosszúságú fények különböző mélységbe hatolnak be. Míg az UV, illetve a nagyobb energiájú fotonok csak a felület közeli rétegeket érik el, addig egy infravörös tartományban lévő foton már akár át is haladhat a napelemben. A behatolási mélység függvényében nyelődnek el a fotonok és keltenek elektron-lyuk párokat. Ha ez nem a pn átmenet közelében történik, akkor nagyobb az esély a rekombinációra. Ebből hasznos teljesítményt nem tudunk kinyerni, csak a napelem melegedik. A cellákat éppen ezért úgy tervezik, hogy abban a spektrumban, ahol a legtöbb foton érkezik, azok a pn átmenet közelében nyelődjenek el. Ha azonban nem merőlegesen érkezik a fény, hanem valamekkora szögben, akkor azok nem biztos, hogy a lehető legjobb helyen nyelődnek el, ezzel is csökkentve a kinyerhető maximális teljesítményt.

Harmadrészt a napelemek általában rendelkeznek antireflexiós réteggel (ARC – Anti Reflection Coating) és/vagy felületi strukturálással, de van, hogy a két módszert kombinálják. Az ARC bevonatokat úgy tervezik, hogy a merőlegesen beeső fényből minél kevesebbet reflektáljanak. Azonban ha a fény nem merőlegesen esik a felületre, akkor nagyobb mértékben reflektál, kevesebb lesz a napelemben jutó fény mennyisége, ezzel tovább csökkentve a felhasználható teljesítményt. A felületi strukturálás is fontos szerepet játszik. Például a Pearl cella esetén a merőlegesen beeső fény egy része elnyelődik, a többi reflektálódik. A kialakításának köszönhetően ezek jelentős része azonban a napelem egy másik felületi pontjára esik, ahol újra egy része elnyelődik, ezzel jobban kihasználva a beérkező sugárzást. A felületen apró „inverz piramisok” találhatóak. Ha a fény nem

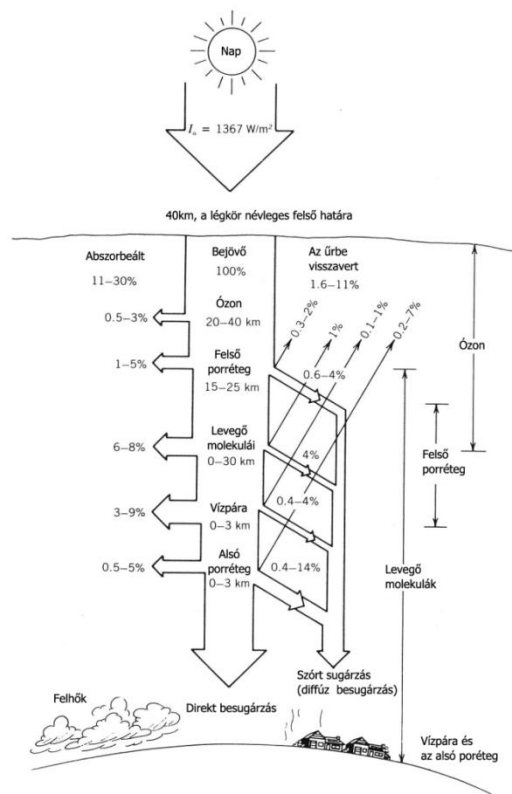
merőlegesen esik a felületre, akkor a strukturálásnak köszönhetően a „piramisok” felületéről visszavert sugárzás nem éri el a következő pontját a felületnek.

3.2 Környezeti fényviszonyok

Miközben a napsugárzás áthalad a Föld légkörén, egy része abszorbeálódik, reflektálódik, szóródik, a többi direkt sugárzásként halad tovább. A földfelszínen a napsugárzás alacsonyabb intenzitású, mint a fentebb lévő rétegekben. Egy nagyon tiszta nap folyamán a beérkező sugárzás 30%-át nyeli el az atmoszféra, de egy felhős, borongós napon ez akár 90-100% is lehet [3], ilyenkor nincsenek árnyékok

Nagyon tiszta időt feltételezve, a földre érkező összes sugárzás 80-90%-át a direkt komponensek adják.

A szórt fény a levegőben lévő nitrogénnek, oxigénmolekuláknak, a vízpárának, vízcseppeknek és egyéb részecskéknek köszönhető. A lenti ábrán jól megfigyelhető, hogy mi történik a sugárzással az egyes rétegekben:



3.2.1 ábra: Napsugárzás reflektálódása, szóródása, elnyelődése [3]

3.3 A Földfelszínre eső fény spektruma

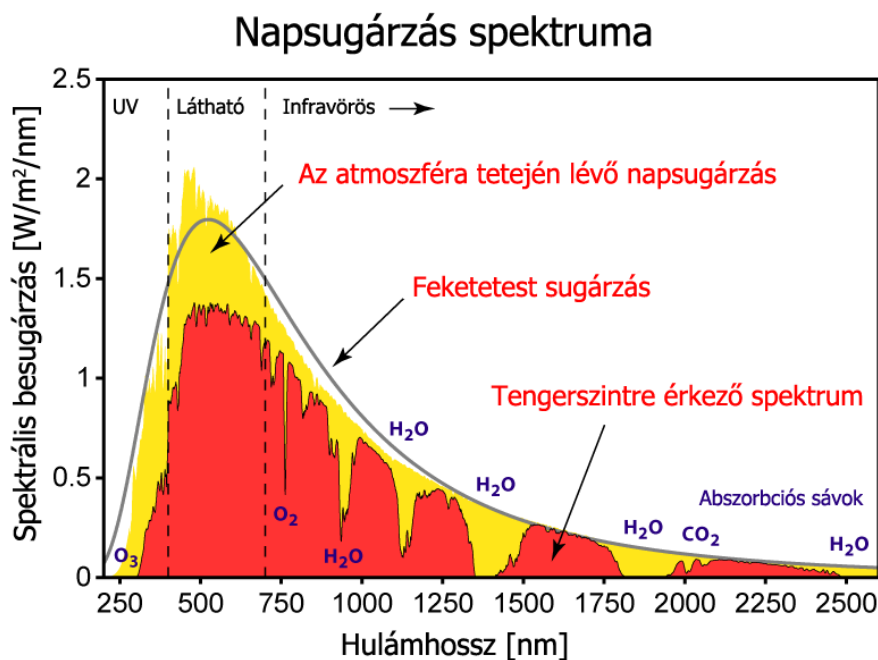
A Nap felszíne 5800 K hőmérsékletű, a kisugárzott energia megegyezik egy ugyanilyen hőmérsékletű ideális fekete test sugárzásával:

$$I(\lambda, T) = 2\pi c_1 * \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (3)$$

ahol $c_1=3,74 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$, $c_2=1,43 \text{ mK}$

A világűrben a Naptól ekkora távolságban (150 millió km) az egy m^2 -re jutó beérkező energia 1353 W/m^2 . Mivel az űrben nincs légkör, így ezt az értéket feleltetjük meg az AM0-nak. Az AM az „Air Mass” rövidítése. Az űrben nincs gyakorlati jelentősége, azonban amint a Föld felszínét tekintjük, van. AM1 alatt azt értjük, amikor az Egyenlítő felett a Naptól érkező sugárzás 1 egységnyi légrétegen halad keresztül, és így az energiájából veszít, a földfelszínre már csak 1040 W/m^2 jut el. Az AM1,5-t a 48,5 fokos szélességi körnél lehet mérni, értéke 970 W/m^2 , AM2 a 60. szélességi körnél található, itt már csak 840 W/m^2 .

Azonban amíg a fény áthalad a levegőn, a spektruma is megváltozik a világűrben lévőhöz képest, ennek oka az, hogy a légkörben található részecskék, molekulák elnyelnek bizonyos hullámhosszúságú fénysugarakat. Az alábbi ábrán megfigyelhető néhány anyag abszorpciós maximuma: oxigén, vízgőz, ózon, szén-dioxid, stb.

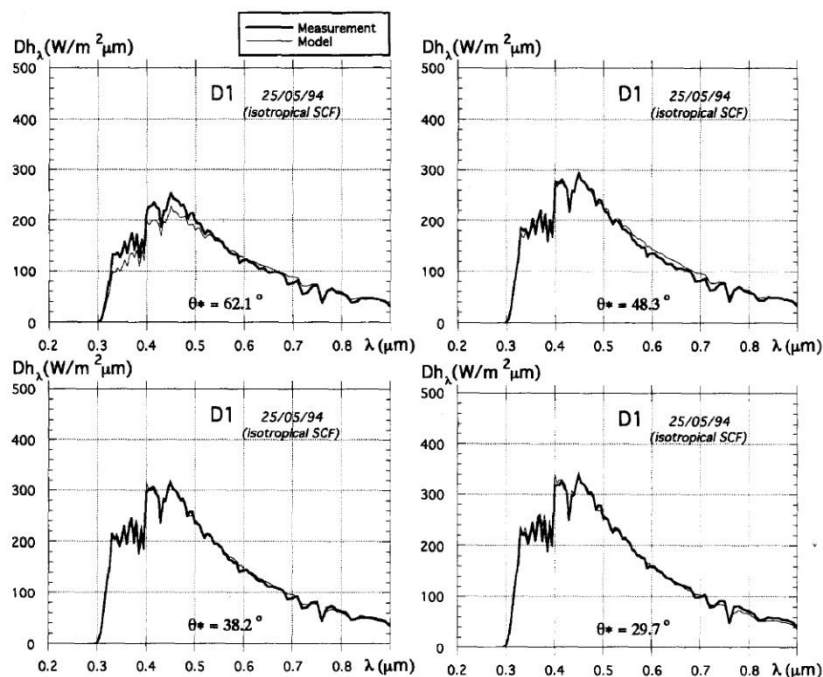


3.3.1 ábra: Napsugárzás spektruma [4]

A felszínre érkező fény egy része szóródik, visszaverődik, így nemcsak direkt fény érkezik be a Földfelszínre, hanem szórt komponensek is. Ezek olykor számottevő részét tehetik ki a beérkező sugárzásnak.

3.4 A Földfelszínre eső diffúz fény spektruma

A Föld felszínére érkező diffúz sugárzás spektruma nem egyezik meg a direkt sugárzás spektrumával, valamint időben is változik attól függően, hogy a Nap hol helyezkedik el az égbolton. A diffúz és direkt fény között számtalan eltérés van, többek között az eredete. A direkt fény valamilyen fényforrásból közvetlen (esetleg optikai elemeken keresztülhaladva) érkezik egy adott felületre. A természetben létrejövő diffúz fény eredete a levegő-, és egyéb molekulák az atmoszférában. Ezekre a mikroszkópikus részecskékre, molekulákra érkezik a direkt fény, majd ezekről különböző irányokba reflektálódik. Spektrumában számtalan abszorpciós sáv helyezkedik el. A diffúz fény spektruma lentebb látható:



3.4.1 ábra: A diffúz sugárzás spektruma különböző időszakokban [5]

A fenti ábrán láthatóak a Nap zenit-magassága függvényében a különböző spektrumok. Ezek jellegre igen hasonlítanak egymásra, így elmondható, hogy a Nap állásától függetlenül (extrém alacsony szögektől eltekintve, például Napkelte, Napnyugta) a diffúz spektrum időben közel állandó, csupán az intenzitás változik kis mértékben. Ezt felhasználva lehet kialakítani a diffúz megvilágításhoz megfelelő spektrumot.

3.5 A sugárzás-komponensek analitikus meghatározása

Analitikusan is meghatározhatók az intenzitások komponensei, erre a „Hottel’s Clear-Day” modell [3] alkalmas, mellyel a szórt és direkt komponensek számszerűen is kiszámíthatók és ábrázolhatók.

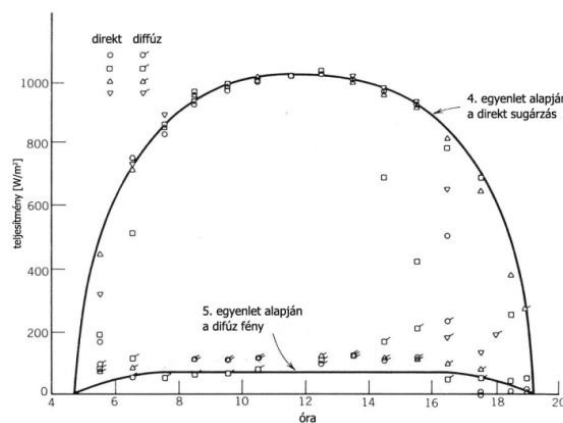
A napelemes rendszereket rendszerint olyan körülmények között szeretnénk vizsgálni, amelyek egy tipikus „napsütéses, felhőmentes nap” előfordulnak. 1976-ban Hottel megalkotott egy „tisztá-nap” modellt, amivel a direkt besugárzást értékei számszerűen meghatározhatók. Ehhez korábbi számításokat használt fel, ami a légkör áteresztőképességére vonatkozott.

$$I_{b,n} = I_0 * \left(a_0 + a_1 e^{-k \frac{1}{\cos \theta_z}} \right) \quad \left[W/m^2 \right] \quad (4)$$

Ahol I_0 az AM0 sugárzás, θ a Zenit szöge, „ a_0 ”, „ a_1 ” és „ k ” a környezettől függő paraméterek (városi, vagy szabadtéri). Azonban ha nemcsak a direkt, hanem a globális besugárzásra is szükség van, akkor nem elég a direkt komponens meghatározása, a diffúz értékeket is meg kell állapítani és a kettő kombinációját használni. Ehhez Liu és Jordan számításai voltak szükségesek:

$$I_{d,h} = I_0 \cos \theta_z [0,2710 - 0,2939(a_0 + a_1 e^{-k \sec \theta_z})] \quad \left[W/m^2 \right] \quad (5)$$

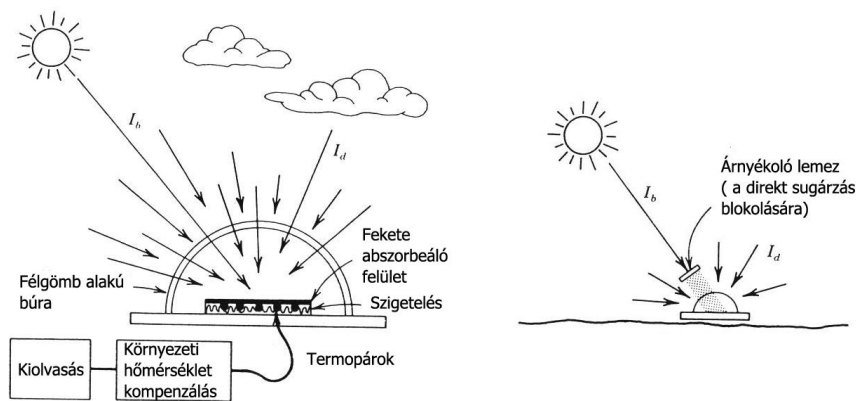
A két egyenletet értékeit ábrázolva:



3.5.1 ábra: Hottel's Clear-Day modell ábrázolása [3]

3.6 Komponensek mérése, intenzitásuk meghatározása

A gyakorlati mérések során azonban el kell tudni választani egymástól a komponenseket. A globális besugárzás mérése egy pyranométer nevű műszer segítségével történik. Ez a műszer egy teljes félgömb irányából, azaz 2π szteradián szögből érkező sugárzást képes érzékelni, ami tartalmazza a direkt és a diffúz komponenst is. Az eszköz felépítését tekintve, leggyakrabban egy fekete abszorbeáló felületet használnak, amit egy termooszlophoz (több termoelem sorba kötve) csatlakoztatnak. Fényre helyezve az eszköz az összes beérkezett sugárzást hővé alakítja, majd ebből arányos elektromos jelet állít elő. A pontos mérésekhez azonban precíz kalibrációra van szükség.



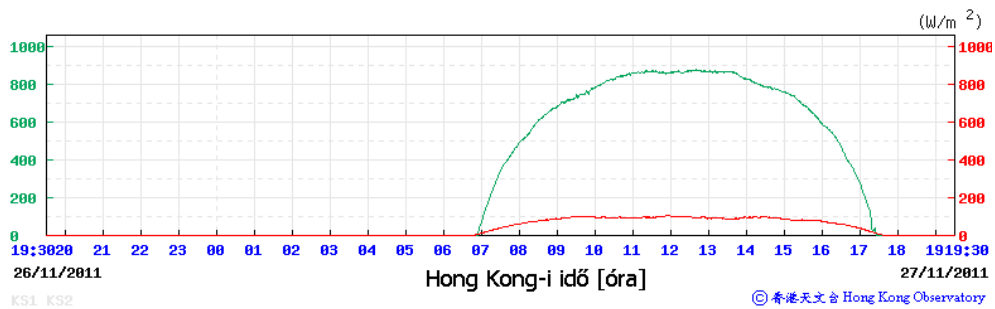
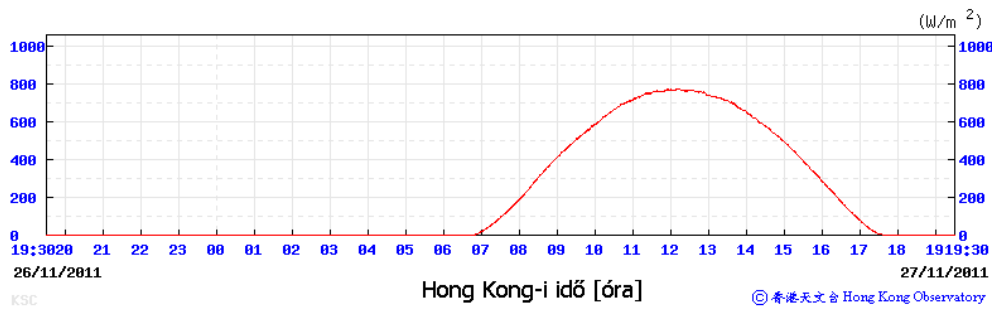
3.6.1 ábra: Pyranométerrel globális és diffúz fény mérése [3]

Ahhoz, hogy a teljes globális sugárzást mérni lehessen egy adott földrajzi helyen, vízszintben kell elhelyezni az eszközt úgy, hogy ne vetődjön rá árnyék, vagy tükröződés.

A csak direkt sugárzás mérésére a pyrheliométer szolgál. Ez felépítését tekintve ugyanaz, mint a pyranométer, ellenben egy hosszú cső található az eszköz előtt, ami a látómezőt lekorlátozza 5° -ra. A Nap látószöge ellenben $0,5^\circ$, így a műszer a környező fényeket is méri, ami jelentős, ámde nagy előnye, hogy nincs szükség rendkívül precíz követésre.

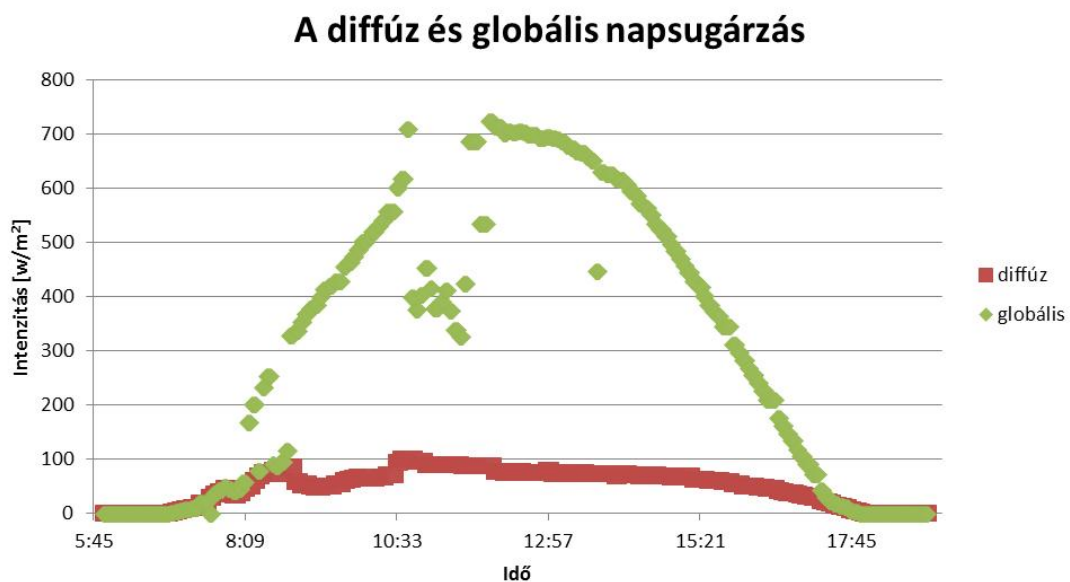
Lehet mérni a csak diffúz komponenst is. Szintén egy pyranométer segítségével, azonban ha Nap pályáját egy takarólemezrel eltakarjuk, akkor jó közelítéssel megkapjuk a teljes diffúz sugárzást.

Egy hongkongi obszervatórium mérései alapján az egyes komponensek [6]:



3.6.2 ábra: A direkt és diffúz komponensek arány egy felhőmentes napon [6]

Egy másik, a BME-n folytatott mérések során a globális és diffúz fény teljesítményét mérték, szintén piranométer segítségével. Egy átlagos tavaszi nap méréseinek eredményei lentebb láthatók:



3.6.3 ábra: A BME-n mért intenzitásértékek [7]

A fenti adatok alapján elmondható, hogy a diffúz komponens értéke jóval kisebb a direkt besugárzásnál, ellenben ez is számottevő, így a pontos napelem-mérések esetén ezzel a tényezővel is számolni kell.

A mért értékek és számított értékek között enyhe eltérés található. Ennek oka több forrásból fakadhat, egyrészt a mérések pontatlansága, pontos kalibráció hiánya, vagy a Nap követésének a hibája. Továbbá a mérések nem ugyanazon a napon és ugyanazon a helyszínen történtek. Ellenben a görbék jellege teljes azonosságot mutat egymással.

Így elmondható, hogy a kapott eredmények reálisak, és fel lehet használni őket a későbbiek folyamán.

Az átlagos besugárzás értékek a Föld felszínén diffúz esetben 100 és 200 W/m^2 között, míg a direkt 700 és 1000 W/m^2 között találhatók, bár ezek jelentősen függhetnek a földrajzi szélességtől is.

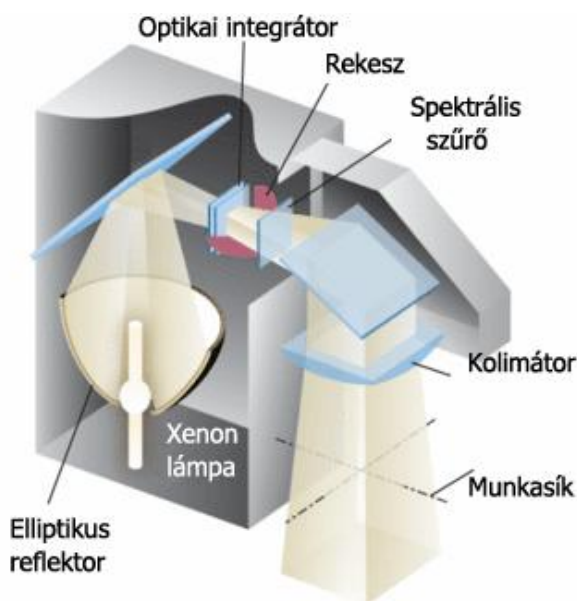
Egy átlagos nyári, felhőmentes napon hazánkban, 150 W/m^2 diffúz és 900 W/m^2 direkt sugárzással találkozhatunk.

4 Megvilágítás újszerűsége

4.1 Eddig használt módszerek

A napelemek minősítésekor az egyik legfontosabb, hogy a minősítés azonos körülmények között történjen, függetlenül attól, hogy milyen gyárban, létesítményben történik mindez. Éppen ezért meghatároztak különböző szabványokat (például: ASTM E927-10, IEC 60904-9, JIS C 8912), melyben pontos előírást adnak az intenzitásra, a spektrumra, a környezeti hőmérsékletre, időbeli stabilitásra vonatkozóan. A napszimulátorokat gyártó cégek igyekeznek minél jobban megközelíteni a termékeikkel a leírt szabványokat.

A vizsgálatok során különböző megoldásokat alkalmaznak. Leggyakoribb az egy fényforrást használó rendszer, de akadnak több egységet tartalmazók is.



4.1.1 ábra: Newport "A" osztályú napszimulátor [1]

Mindhárom szabványban három fő követelmény szerepel (IEC, STM, és JIS), és ha minden tényezőt maximálisan teljesít, akkor nevezhetünk egy szimulátort „3A” vagy „AAA” besorolásúnak.

Annak érdekében, hogy minél pontosabb értékeket kapjanak, a gyártók gyakran helyeznek el optikai elemeket is a termékekben. Az előző ábrán lévő szimulátorban egy parabolid alakú reflektort láthatunk. Ezt azért helyezték el, hogy az oldalirányba szórt fényt is

hasznosítsák, nagyobb teljesítmény legyen kinyerhető. Van olyan gyártó, akinél pont az ellenkező megoldással találkozunk, például az Oriol Sol3A [8] szimulátora. Itt egy feketére festett lemezt helyeztek el annak érdekében, hogy minél kevesebb szórt fény jusson a rendszerbe, minél pontszerűbbnek tekinthető forrás legyen.

A spektrum egyezése a valódi, Föld felszínén lévővel is fontos. Ennek érdekében különböző szűrőket helyeznek el az egységekben.

Ezen szimulátorok közös tulajdonsága, hogy viszonylag kisebb felületet bevilágítására képesek, így a vizsgálandó cella, esetleg panel mérete erősen korlátozott. A fentebb említett Oriol Sol3A családból a legnagyobb eszköz is csupán 305x305mm-es felületet bevilágítására képes.

Vannak más felépítésű szimulátorok is, amikben több fényforrás helyezkedik el [9]. Egyes esetekben egy síkba több lámpát helyeznek el, és irányítanak az alattuk lévő felületre. Kialakításuk rendszerint olyan, hogy a méretüket könnyen lehet növelni, csupán több világítótest felszerelésére van szükség. Ezek akár egy nagyobb felületet, nagyobb paneleket is képesek fényvel ellátni, ellenben a spektrumot, az időbeli stabilitást a megadott értékek között tartani nehezebb, így ezek a struktúrák általában nem érik el az „A” osztályú besorolást.

4.2 Komplex megvilágítás lehetősége, újszerűsége

Az eddig használt szimulátorokban a cellákat csak direkt megvilágítással vizsgálták. A szabadban azonban jelen vannak jelentős diffúz fénykomponensek is. Az eddigi elrendezésekben a szabadságfok csupán az intenzitás, spektrum stb. változtatására terjedt ki, a fényforrás irányára, eloszlására nem.

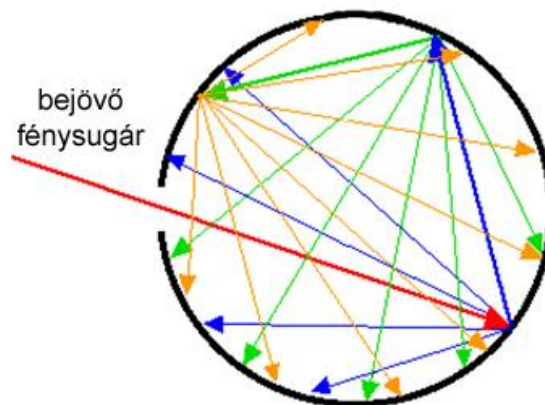
Napjainkban nemcsak az egykristályos napelemek készülnek, hanem például organikus, vékonyréteg és egyéb típusok is. Ezek különbözőképpen reagálhatnak az azonos diffúz és direkt komponensekre. Ennek vizsgálata érdekében szükség van egy olyan egység létrehozására, amiben kétféle megvilágító egység helyezkedik el, és képes a közvetlen és közvetett megvilágítás együttes biztosítására.

4.3 Integráló gömb

Az integráló gömb – más néven Ulbricht gömbként is ismerik – képes a benne lévő fényt egy gömbfelületre integrálni, egyenletesen szétosztani. Lámpák, lézerek mérésére, minősítésére, napelemek reflexiómérésére is használják, de számos egyéb felhasználása is létezik, például nagy felületű egyenletes, diffúz fényforrásnak is használható. Felépítését tekintve egy üreges gömb, ami ideális esetben belső felületére eső fény 100%-át diffúz módon

egyenletesen reflektálja. A gyakorlatban természetesen ilyen anyag nem létezik. Általában valami jó diffúz reflexióval rendelkező anyagot választanak. Jelen esetben egy bárium-szulfát (BaSO_4) bevonat található a belső felületén. Ez a báriumnak kénsavval alkotott sója. Fehér színű és jól reflektáló anyag, a reflexiós tényezője 90% körül van. A gömbre pár apróbb lyukat helyeznek el a kivezetések számára. Ezek – értelemszerűen - a lehető legkisebb felületet foglalják el. Ökölszabályként elmondható, hogy ezek a gömb teljes belső felületének maximum 5%-t takarhatják el. Az egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy egyenletes szórást biztosít a belsejében. A beeső fény a gömbnek bármely pontjára is érkezen, onnan szórt fényként halad tovább, és amint ezek elérik a gömb falának egy másik pontjait, ott szintén szóródnak és így tovább, így biztosítva egyenletes eloszlást a gömb belsejében. Úgy is felfogható, mint egy nagy diffúzor, ami ideális esetben megőrzi a fény teljesítményét.

Esetünkben ezt a tulajdonságát használjuk ki, egy fényforrást alkalmazva egyenletes diffúz fényeloszlás biztosítására a belsejében.



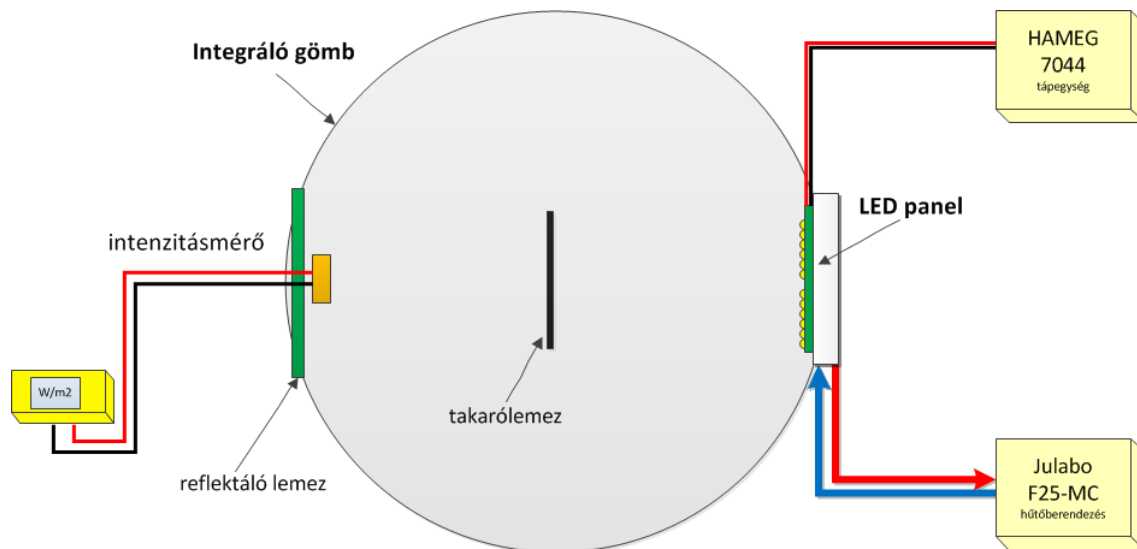
4.3.1 ábra: Integráló gömb [10]

Az tanszéken rendelkezésre álló integráló gömb kialakítása olyan, hogy két, egymással szemben lévő nagyobb- és egy kisebb nyílás helyezkedik el rajta. Ahhoz hogy a diffúz fényt létre lehessen hozni, és ne közvetlenül a vizsgálandó cellára legyen irányítva, egy takarólemez elhelyezése szükséges a fényforrás elé. Ennek rögzítése a panel szélén lévő csavarokkal lehetséges.

4.4 Intenzitás, irányfüggés mérése

Az általam előző félévekben általam megtervezett és elkészített tesztpanel alaposabb vizsgálatára volt szükség. A panelon 51 db nagy fényerejű CREE XM-L típusú LED

helyezkedik el. A korábbi termikus szimuláció és valódi termikus mérés mellett szükséges volt megállapítanom a kinyerhető maximális fényteljesítményt. Ehhez egy, a tanszéken rendelkezésre álló, kalibrált mérőeszközt használtam. A mérési elrendezés lentebb látható:

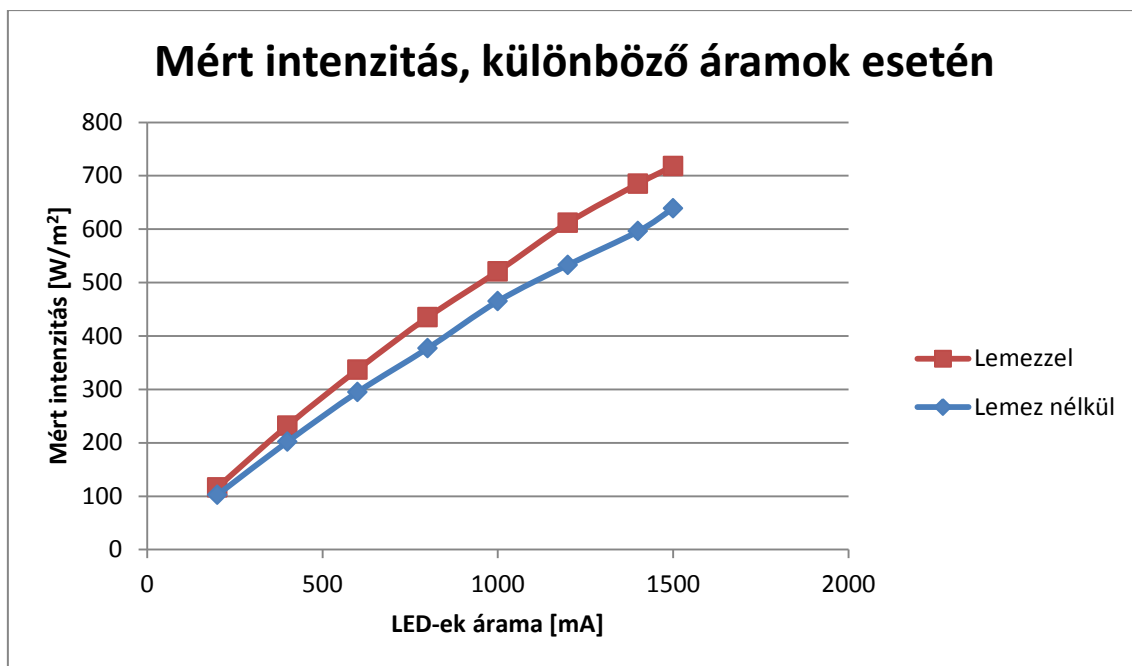


4.4.1 ábra: Mérési elrendezés blokkvázlata

A panel tápellátását egy négycsatornás labortáp biztosította, áramgenerátoros üzemmódban. A hűtésről egy vízhűtéses rendszer gondoskodott, amivel konstans alacsony hőmérsékleten tartottam a megvilágító egységet. A jobb hőátadás érdekében a LED-panel és a hűtőfelület felületére hővezető pasztát vittem fel.

Mivel a diffúz megvilágítás intenzitása volt a kérdés, ellenőriznem kellett, hogy a közepén elhelyezett takarólemez megfelel-e a célra, azaz megfelelően kitakarja a LED forrásokból érkező direkt fénysugarakat. Miután megbizonyosodtam ennek helyességéről, több mérést is elvégeztem különböző teljesítmények mellett.

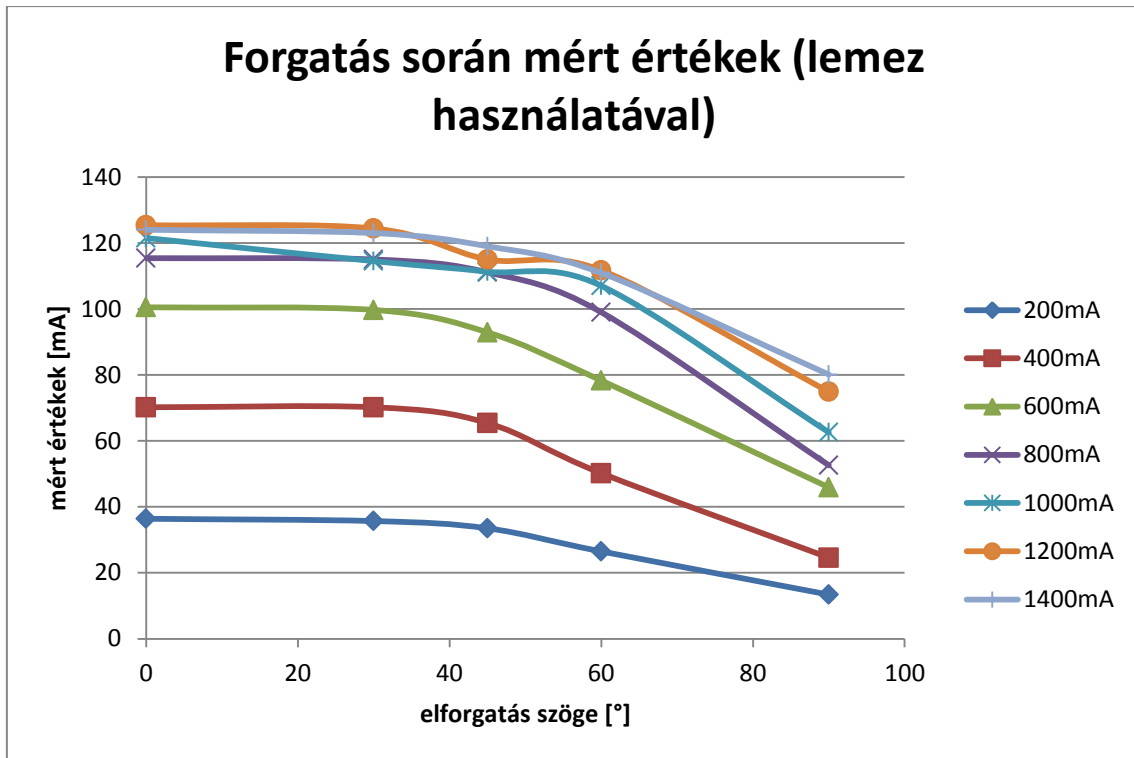
Két méréssorozatot végeztem, egyik esetben egy megfelelő diffúz reflexióval rendelkező reflektáló lemezt helyeztem el a szenzor mögött, ezzel minimalizálva a fényvesztést, míg a másik esetben ezt elhagytam. A két mérés eredményei között körülbelül 10% eltérés mutatkozik. A mérést 200mA-es lépésekben végeztem el 0-tól 1400mA-ig változtattam 200 mA-es lépésekben az egyes LED ágakon átfolyó áramot. A kapott eredmények lentebb láthatók:



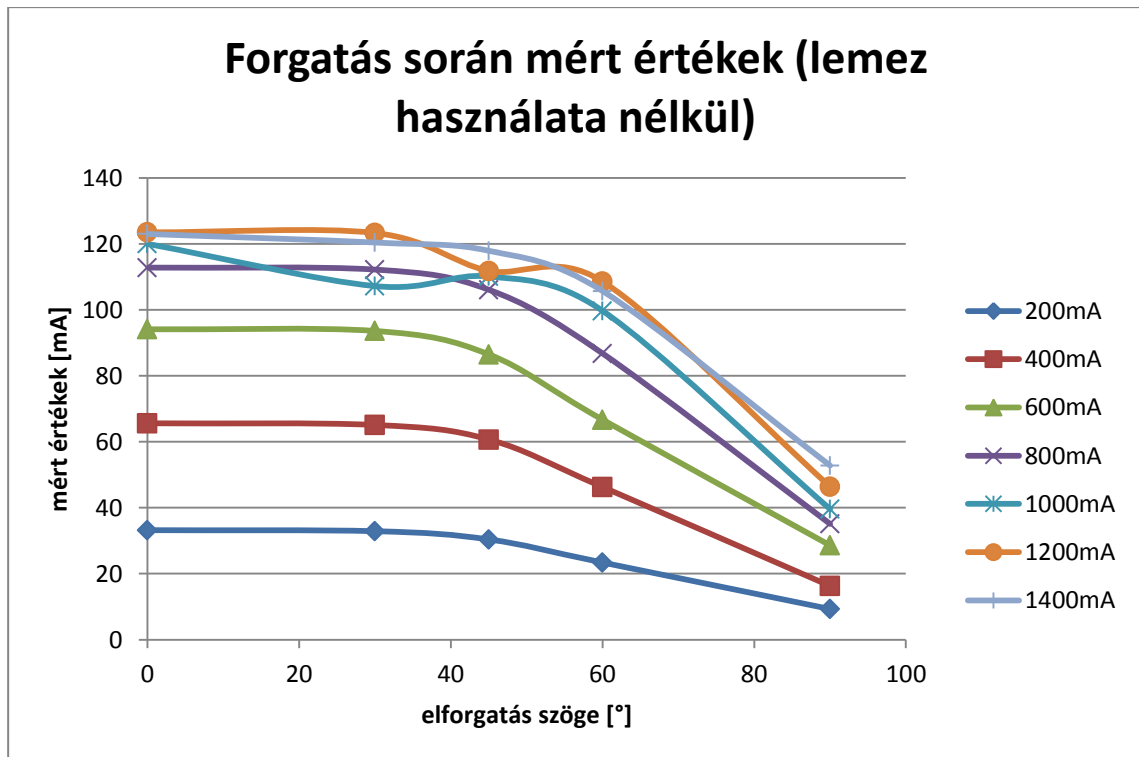
4.4.2 ábra: Kapott intenzitásértékek [W/m^2]

Az ábráról leolvasható, hogy a kapott eredmények meghaladják a várt $400\text{W}/\text{m}^2$ -t, így elmondható, hogy kevesebb, vagy más típusú, olcsóbb LED-ekkel is biztosítható a megfelelő intenzitás.

Szükséges volt megvizsgálnom, hogy az adott felületre érkező fénysugarak eloszlása mennyire homogén, azaz van-e kitüntetett sugárzási irány. Ehhez a feladathoz egy saját befogóállványt készítettem, amihez egy napelemet rögzítettem. Mivel itt nem a pontos adatok mérése, hanem a kapott eredmények aránya számít, így választhattam egy tetszőleges napelemet szenzornak. A befogóállványon skálázás található, aminek segítségével könnyen megállapítható a szenzor és az adott felületre merőleges tengely által bezárt szög. A napelem rövidzárlati áramát mértem. Mivel a mérések rövid ideig tartottak, és a mérések között eltelt idő elegendően nagy volt, így elhanyagolható a napelem melegedéséből adódó változás. Ebben az esetben is két mérést végeztem, az egyik során a korábban említett visszaverő lemez segítségével, a másikat nélküle. Az így kapott eredmények lentebb láthatók:



4.4.3 ábra: Forgatás során mért értékeke (lemez használatával)



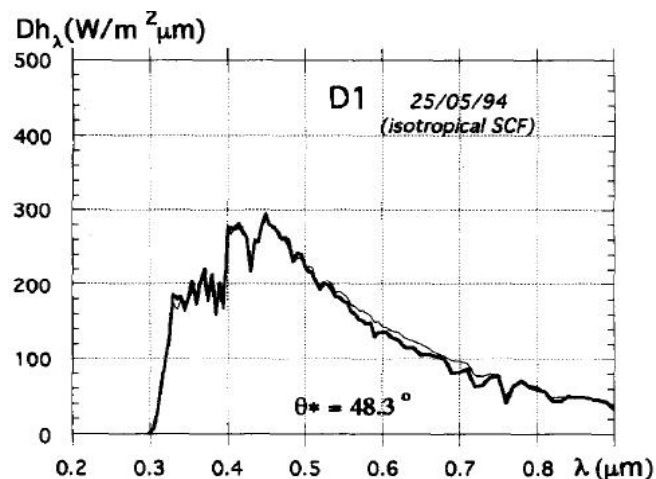
4.4.4 ábra: Forgatás során mér értékek (lemez használata nélkül)

A kapott eredmények esetén a legutolsó érték, amit 90° -nál mértem, már jelentősen alatta marad a korábbi pontoknak. Ez azzal magyarázható, hogy a szenzor ebben az esetben már merőleges volt a tengelyre, emiatt a felületére nem teljes mértékben a gömb belsejéből, hanem a környezetből is érkezett sugárzás. Ellenben az előtte lévő mérési pontok esetén a szenzor teljes egészében a gömb belsejében volt, így az alacsonyabb intenzitású környezeti fények nem zavarták a mérést. Enyhe csökkenés így is megtapasztható. Ez azzal magyarázható, hogy a tengelyre merőlegesen adott szög alatt nagyobb terület helyezkedik el, míg oldalra fordítva ez a terület csökken. A csökkenés értéke nem haladja meg a 10%-ot, így elmondható, hogy egyenletes diffúz fény éri minden irányból a vizsgálandó felületet.

A kapott fényintenzitás-sűrűség azonban így is elegendő, így a végleges panel megtervezéséhez nem szükséges a Cree által gyártott drága XM-L LED-ek használata, helyette alternatívaként a Luxeon Rebel LED-ek is használhatók. Ezek előnye, hogy jóval olcsóbbak, könnyebb a beszerzésük, ám a fénykibocsátásuk nem marad jóval a Cree LED-ek alatt.

4.5 A diffúz megvilágítás

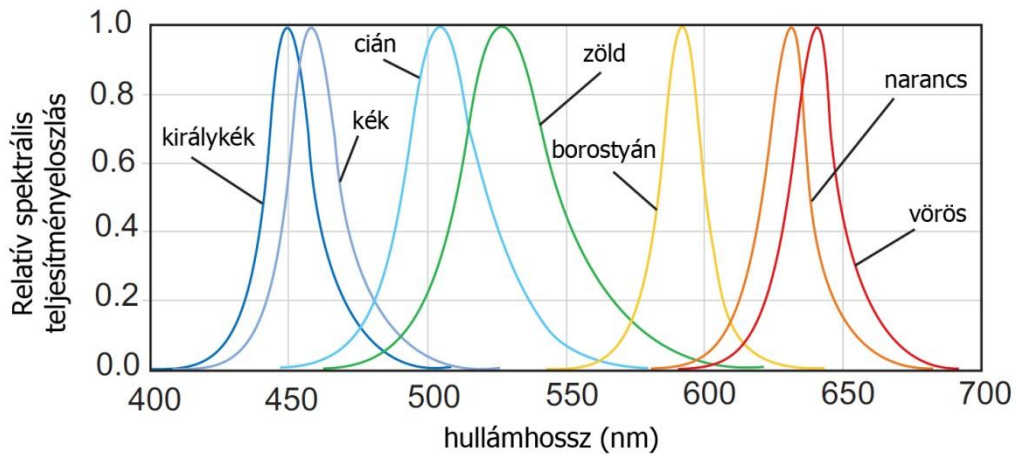
A környezetben jelenlévő diffúz sugárzás átlagosan $100\text{--}200\text{ W/m}^2$ között alakul, de alkalmanként elérheti a 400 W/m^2 -t is. Ahhoz hogy ezt minél pontosabban szimulálni lehessen, szükséges volt megállapítani a diffúz sugárzás spektrumát, jelegét. Ez természetesen függ a Nap pillanatbeli magasságától, valamint az időjárástól. Egy átlagos napon a diffúz spektruma a következőképpen alakul:



4.5.1. ábra: A diffúz sugárzás spektruma

A cél egy olyan egység megtervezése, amellyel a megfelelő intenzitás létrehozása mellett minél jobban megközelíthető az adott spektrum. Egyetlen LED spektruma nem

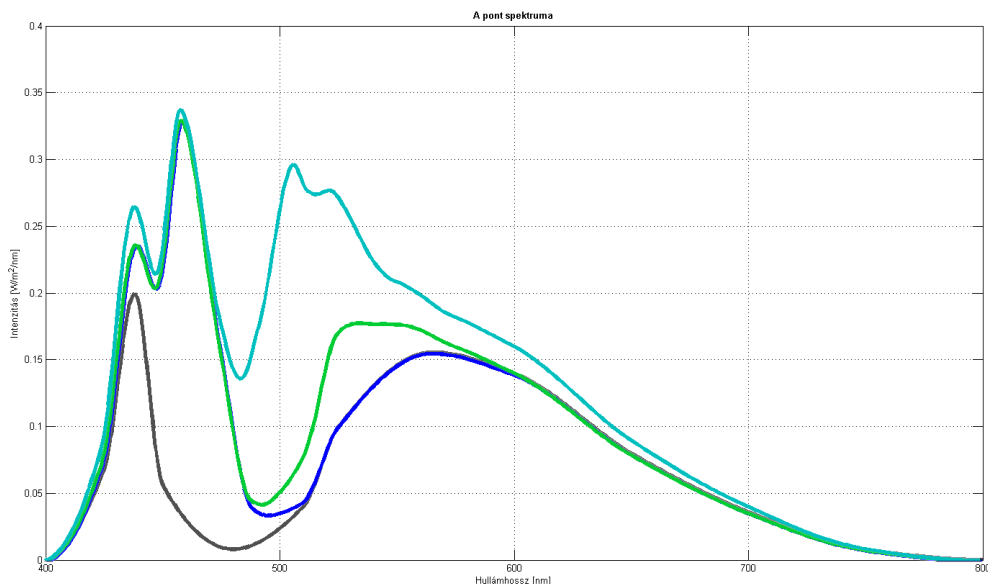
elegendő a feladathoz, hiszen a fehér LED-ek széles spektrumot fognak át, ellenben nem közelítik meg a kívánt jelleget, a színes fényű LED-ek pedig csak igen szűk spektrumúak.



4.5.1 ábra: Luxeon Rebel Color spektrumok [11]

Emiatt több, különböző fényű LED együttes használatával állítottam elő a megfelelő spektrumot. Mivel kellően nagy teljesítményre volt szükségem, így powerLED-eket használtam. Ezek: természetes-fehér, UV, cián, kék és zöld fényű LED-ek. A spektrumokat egy matlab program segítségével illesztettem egymáshoz. A folyamat ábrái lentebb láthatók:

A kapott spektrumokat egy ábrán ábrázolva:



4.5.6. ábra: A LED-ek spektrum-illesztésének lépései egy ábrán

A program sajnos nem képes a 400nm alatti tartomány kezelésére, így az UV LED-et már nem tüntettem fel az ábrákon.

Az ábrán feketével a természetes fehér spektrumát jelöltem. Ehhez hozzáadva először a kék LED (késsel jelölve a kapott eredményt), majd a zöld LED (zöld görbe) legvégül pedig a cián LED spektrumát (cián görbe) kaptam meg a végleges spektrumot.

A spektrum jellege immár megközelíti a kívánt jelleget, így használható szimulálásra a LED-es fényforrás. A LED-ek számaránya a következőképpen alakul:

természetes fehér	5x
kék	1x
zöld	1x
cián	2x
UV	1x

4.6 A direkt megvilágítás

A direkt megvilágítást legideálisabb esetben egy olyan világítótest biztosítaná, amely a Nap Földre érkező spektrumával azonos színhőmérsékletű spektrumot és intenzitást biztosítana. Ellenben kritérium, hogy a berendezés kicsi legyen, hiszen rendkívül korlátozott hely áll rendelkezésre. Így a célra egy melegtükörrel szerelt halogénizzó a legmegfelelőbb.

A vizsgálandó felület is korlátozott. Egy 150 mm átmérőjű nyílásba helyezendő napelem mérete ennél kisebb kell, hogy legyen, hiszen még egy befogó számára is kell helyet biztosítani. Emiatt a vizsgálandó panel átmérője nem lehet nagyobb, mint 110 mm (0,0094985 m²). Ha itt 1000 W/m² teljesítménysűrűséget kívánunk létrehozni, akkor a szükséges fényteliesség:

$$P = 1000 * 0,0094985 = 9,4985 \text{ W}$$

Egy adott fényforrás fényteliességének kiszámolásához a már korábban említett Matlab programot használtam fel. Először szükséges volt megfelelő fényforrások felkutatása, amik alkalmasak lehetnek a feladatra. Fontos kritériumok voltak:

- kicsi, könnyen szerelhető
- alumínium melegtükörrel rendelkezzen, az infra fényt is a napelemre irányítsa
- cserélhető (különböző teljesítmény, azonos irányítottság és foglalat)
- alacsony feszültségről üzemeljen (maximum 24 esetleg 48V)

Ezen szempontokat szem előtt tartva a választásom az „Philips Aluline AR111”-re esett. Ez egy 111 mm átmérőjű világítótest, beépített reflektorral, ami 8° illetve 24°-os

szögben képes a fénysugarakat irányítani. 50, 75 és 100W-os változata is létezik, ami a berendezés szempontjából igen előnyös, hiszen ha kisebb vagy nagyobb intenzitással szeretnénk a környezeti viszonyokat szimulálni, könnyen kicserélhetjük egy más teljesítménnyel rendelkezőre. Meg kellett állapítanom, hogy képes-e létrehozni a megfelelő távolságban az szükséges intenzitást.



4.6.1. ábra: AR111-es izzó

Ehhez először szükségem volt a fénnyel való meghatározására. Mivel minden érték candela-ban volt megadva, egy egyszerű számítás segítségével át kellett számolnom lumenbe, majd a spektrum alapján kiszámoltam, hogy mekkora fénytelteljesítményt képes létrehozni. Az izzó spektruma:

Mindegyik lámpa 24°-os nyílásszögben sugároz. A fény nyílásszög így 12°, ebből:

$$\frac{12}{32,77} = 0,366 \text{ sr.}$$

Az egyes lámpákhoz tartozó lumen értékek:

50W (4000 cd) 1464 lm

75W (5300 cd) 1939,8 lm

100W (8500 cd) 3111 lm

Az adott spektrumot és a fénnyel való értékeit felhasználva a különböző izzókkal az adott felületen elérhető maximális fénytelteljesítmény:

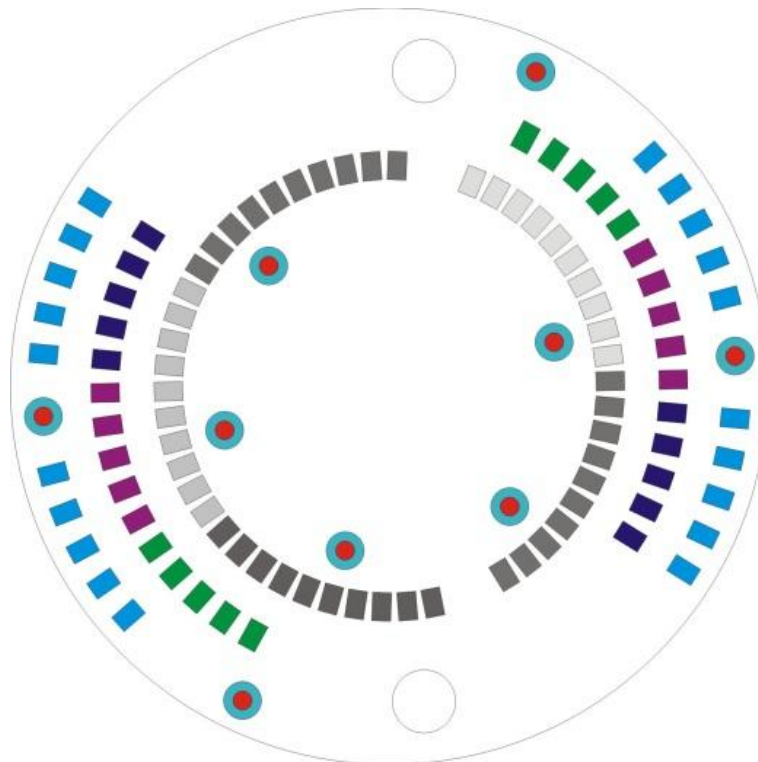
fényforrás	kimenő teljesítmény	teljesítménysűrűség
50 W (1464 lm)	4,88 W	513,7 W/m ²
75 W (1939,8 lm)	6,46 W	680,1 W/m ²
100 W (3111 lm)	10,37 W	1091,7 W/m ²

4.6.1. táblázat: Fénytelteljesítmény-sűrűség az adott felületen

A veszteségekkel a fenti táblázatban nem számoltam, az értékek az összes kiáramló fényt jelentik. Elmondható tehát, hogy a 100W-os izzó képes a szabványban megadott intenzitás létrehozására, a kisebb teljesítményű izzók pedig más környezeti viszonyok (tél, alacsony napállás, kisebb intenzitás) szimulálására alkalmasak.

4.7 Az eszköz megtervezése

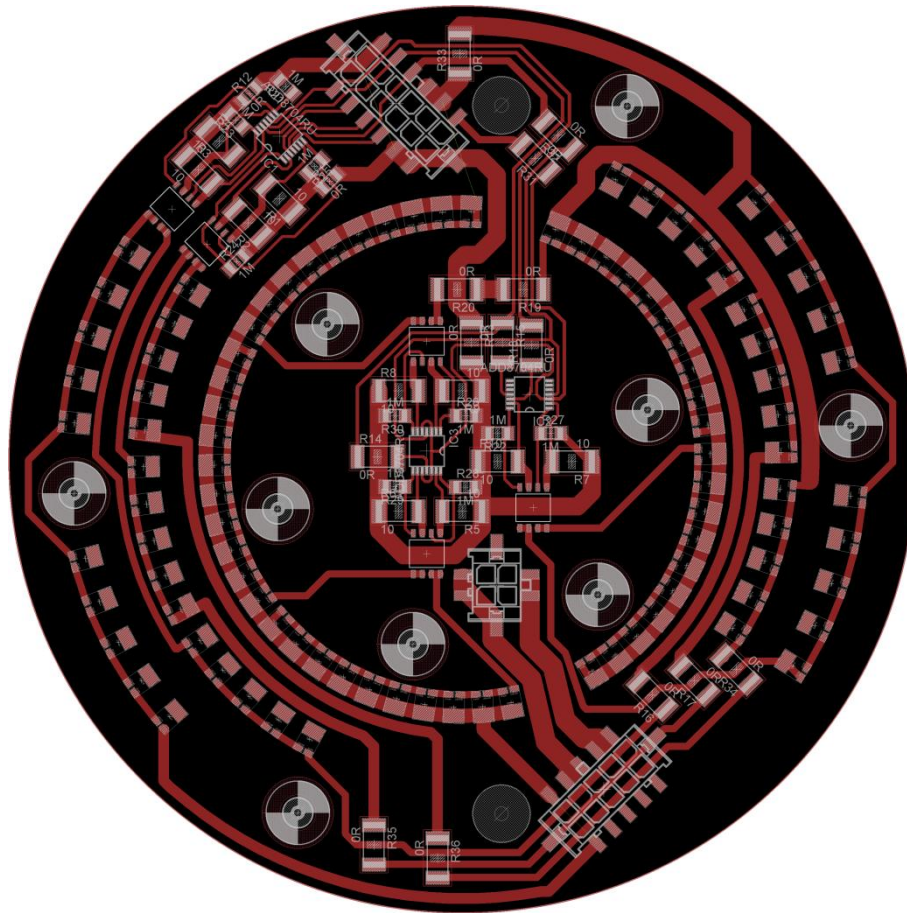
Egy általam korábban elvégzett mérés eredményei alapján meghatároztam a szükséges darabszámokat. Ahhoz, hogy a $400\text{W}/\text{m}^2$ -t biztosítható legyen, 10 csoportra (5fehér, 1 kék, 2 cián, 1 zöld és 1 UV) van szükség, ami összesen 100db LED-et jelent. Ezen adatok ismeretében elkezdtem megtervezni a panelt. Először is még a kapcsolási rajz előtt egy vektorgrafikus rajzolóprogrammal egy kezdeti elrendezést vázoltam fel, a megvalósítandó struktúra átláthatóbbá tételéhez. Az elrendezés alább látható:



4.7.1. ábra: Az elrendezés vázlata

Az ábrán zöld színnel a zöld, lilával az UV, kékkel a kék, ciánnal a cián és szürkével a fehér LED-eket jelöltem. Az 50 fehér LED-et 10-es csoportokba osztottam, ahogy az értelemszerűen a színezés is jelöli. Így kisebb meghajtó-feszültségre van szükség, valamint egy tápfeszültségről működtethető. Az ábrán piros pontokkal a csavarok helyét jelöltem. A két bevezetőnyílás a panel alján és tetején található.

A következő lépés a megvilágító LED panel kapcsolási rajzának és nyáktervének megvalósítása volt. Az Eagle nyáktervező programot használtam a feladathoz. A kapcsolási rajz a függelékben található. Az elkészült nyákterv lentebb látható:



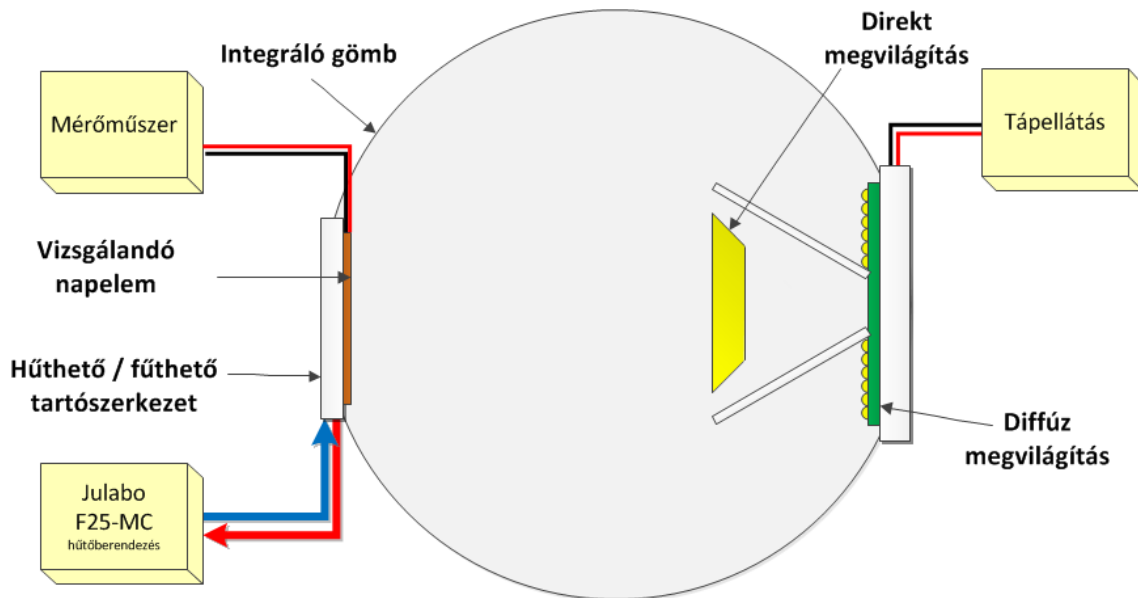
4.7.2. ábra: Az elkészült nyákterv

Az elrendezést egy részét egy saját script file segítségével valósítottam meg. Ugyanis a LED-ek elhelyezése kézzel igen nehéz, kevésbé pontos és nagyon időigényes lett volna. A script a LEDeket egy adott sugarú körben elhelyezi a megadott orientációba.

Ezután következett a meghajtó-elektronika elhelyezése valamint a huzalozás. Itt ügyelnem kellett arra, hogy csak egy réteget használhatok fel, hiszen csak egyrétegű, egyoldalas MCPCB-t tud gyártani a gyártó. A csatlakozók kiválasztásánál szem előtt tartottam, hogy megfelelő áramerősséget elbírjon, valamint felületszerelt legyen. Így a Molex Micro-fit csatlakozócsaládot választottam. Továbbá a nyákon szerepel néhány 0Ω -os ellenállás is. Ezeket az átkötések miatt helyeztem el, amiket igyekeztem minimalizálni. A vezérlést, külső modul által kibocsátott feszültségreferenciák végzik.

A halogén izzót a diffúz megvilágítás elé kell elhelyezni, és köré, mintegy tölcészerűen egy tükröző felületet, így együttesen lehet biztosítani a kétféle megvilágítást.

Ahhoz hogy minél kevesebb fény jusson a halogén fényforrásból a gömb felületére, egy takarólemezt kell helyezni az izzó köré, amit egy nyáklemezből készítettem és megfelelő tükrözőréteggel vontam be. Az izzót egy másik NYÁK-on kialakított foglalatba lehet elhelyezni. Az elrendezés vázlatja az alábbi ábrán látható:



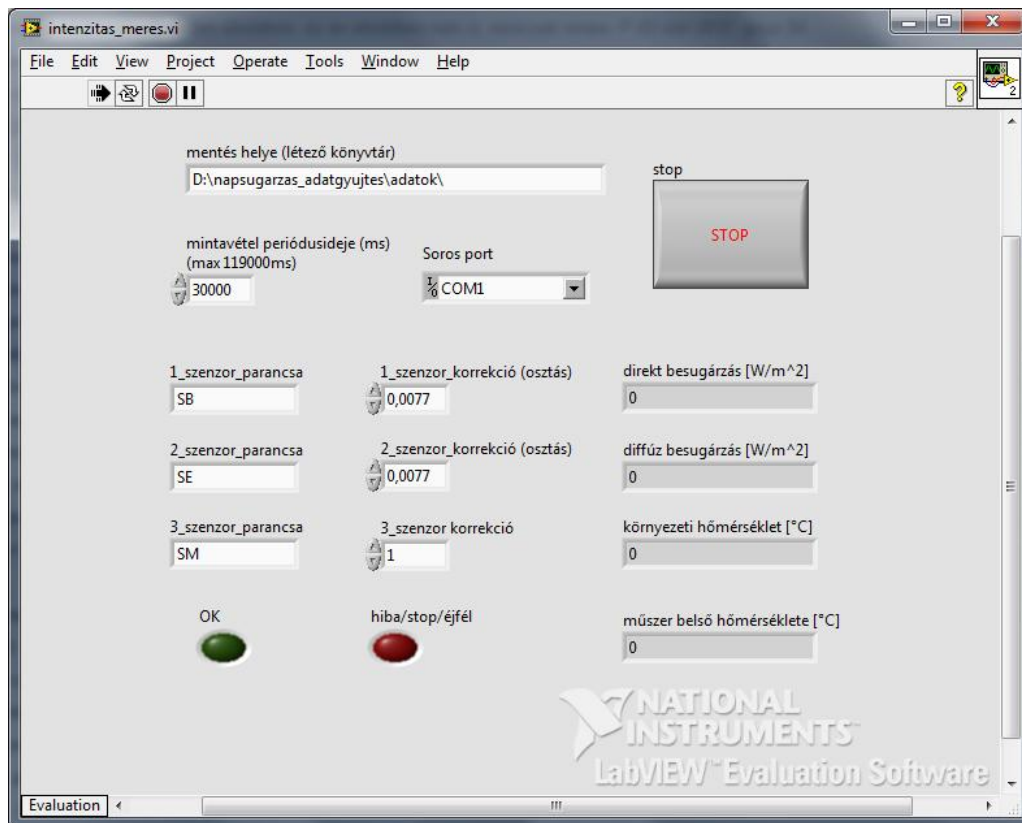
4.7.3 ábra: Az elrendezés tervének blokkvázlata

4.8 Adatgyűjtő mérőállomás

Ahhoz, hogy az időjárási körülményekről (napsugárzás, hőmérséklet) pontos adatokat gyűjtsünk, szükséges egy mérőállomás kiépítése. Ehhez tulajdonképpen egy olyan berendezésre van szükség, amely képes a beérkező sugárzás számszerű mérésére, valamint a környezeti hőmérséklet érzékelésére és logolására.

Az EET tanszéken rendelkezésre áll egy műszer, mely alkalmas a feladatra. 3 bemeneti csatornája van, melyre különböző érzékelőket csatlakoztathatunk, valamint rendelkezik soros porttal is, így az adatok mentése könnyedén megvalósítható. Két csatornáján egy-egy intenzitásmérő lesz kapcsolva, melyek közül az egyik a teljes beérkező sugárzást érzékeli. A másik elé egy adott sávban egy takarólemezt elhelyezve – és így a direkt sugárzást árnyékolva – megkapjuk a diffúz sugárzás értékét. A harmadik csatornára egy hőmérő kerül majd.

Ehhez egy saját programot készítettem LabView-ban. A program frontpanelja lentebb látható:



4.8.1. ábra: A program frontpanelja

A program felhasználói felületén különböző beállításokat adhatunk meg, például, megváltoztathatjuk az egyes parancsokat, másik hőszensor kimenetét olvasva ki, vagy másik soros portot választhatunk a kommunikációnak. Beállíthatjuk a mintavételi gyakoriságot is. Érdeemes 120 másodperc alatti intervallumot beállítani, ha nem külső tápforrásról működik az eszköz, hiszen ellenkező esetben 2 perc utána automatán kikapcsol.

A program az aktuálisan kiolvasott értékeket egy időbélyeggel látja el, és kiírja egy file-ba, a megfelelő tagolókarakterekkel ellátva, így akár Excel program segítségével utólag is kiértékelhetők az adatok.

5 Összegzés

Céлом egy olyan berendezés megtervezése volt, mely segítségével a környezeti fényintenzitás-viszonyokat szimulálni lehet, vagyis mind a direkt, mind a diffúz sugárzás együttesen biztosítható a napelemek vizsgálatához.

Ehhez a környezetben jelenlévő fényintenzitásokat és azok spektrumát vizsgáltam, különböző intézmények mérési adatait összevetve meghatároztam a szükséges értékeket.

Az eddig használatos módszerekkel ellentétben az összetett megvilágítás másként hathat egyes cellákra, ez indokoltá teheti használatát. Ennek igazolásához méréseket kell végezni.

A diffúz sugárzás biztosítását LED-ek segítségével oldottam meg. Egyetlen LED spektruma ellenben nem felelt meg, így több különböző fényű LED spektrumait illesztve állítottam elő a megfelelőt. A szükséges arányok és darabszámok meghatározása után megterveztem a panel layout-ját, valamint a hozzá tartozó meghajtó-elektronikát.

A direkt sugárzás előállításához egy parabolatükörrel szerelt halogénizzót választottam, szem előtt tartva az izzók iránykarakterisztikáját. Minél irányítottabb és egy adott felületen minél homogénebb fényeloszlást létrehozni képes forrásra volt szükségem.

A teljes rendszer megépítése során egy speciális alakú takarólemezt is kellett készítenem, mely a diffúz sugárzás fényét a gömb felületére vetíti, elkülönítve ezzel a direkt fénytől. Ezt nyáklemezből valósítottam meg, a külső felületére fényvisszaverő borítást helyezve.

Egy, az aktuális időjárási adatokat logolni képes programot is készítettem, mely megfelelő formátumban elmenti a kültéri mért intenzitás-, és hőmérsékletértékeket.

Jövőbeli célom, hogy az elkészülő rendszerrel méréseket végezzünk különböző napelemeken, annak megállapítása érdekében, hogy szükséges-e a diffúz megvilágítást is szolgáltató vizsgálati módszerek fejlesztése.

Hosszútávon az elkészülő rendszerrel egy automata tesztkörnyezetet szeretnék megvalósítani, mely azonnal kiértékeli a kapott eredményeket és megállapítható lesz, hogy az adott cella hogyan viselkedik különböző időjárási viszonyok esetén.

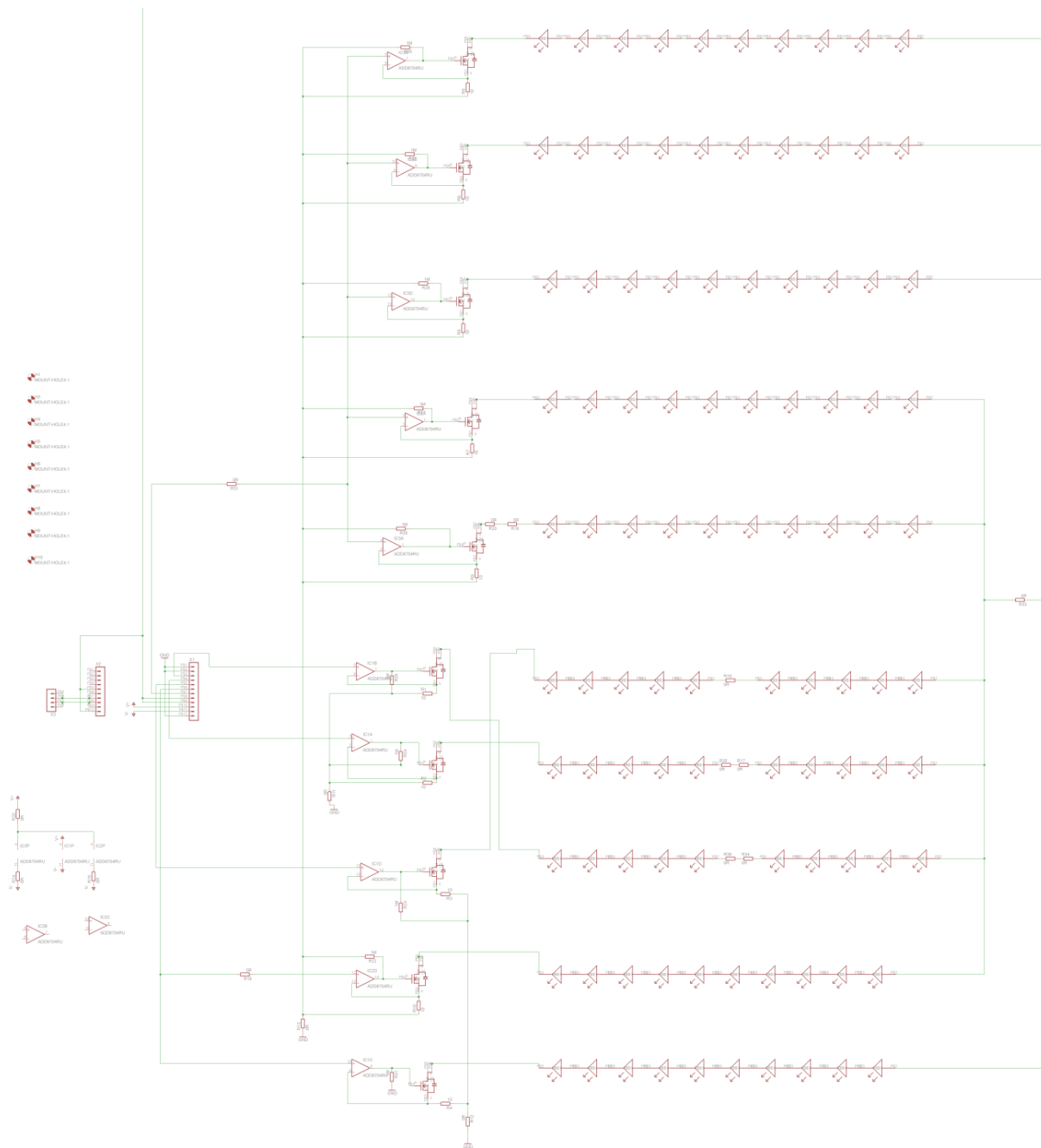
6 Ábrajegyzék

3.2.1 ábra: Napsugárzás reflektálódása, szóródása, elnyelődése [3].....	6
3.3.1 ábra: Napsugárzás spektruma [4]	7
3.4.1 ábra: A diffúz sugárzás spektruma különböző időszakokban [5].....	8
3.5.1 ábra: Hottel's Clear-Day modell ábrázolása [3]	9
3.6.1 ábra: Pyranométerrel gölbális és diffúz fény mérése [3].....	10
3.6.2 ábra: A direkt és diffúz komponensek arány egy felhőmentes napon [6].....	11
3.6.3 ábra: A BME-n mért intenzitásértékek [7]	11
4.1.1 ábra: Newport "A" osztályú napszimulátor [1]	13
4.3.1 ábra: Integráló gömb [10].....	15
4.4.1 ábra: Mérési elrendezés blokkvázlata	16
4.4.2 ábra: Kapott intenzitásértékek [W/m^2].....	17
4.4.3 ábra: Forgatás során mért értékeke (lemez használatával).....	18
4.4.4 ábra: Forgatás során mér értékek (lemez használata nélkül).....	18
4.5.1. ábra: A diffúz sugárzás spektruma	19
4.5.1 ábra: Luxeon Rebel Color spektrumok [11].....	20
4.5.6. ábra: A LED-ek spektrum-illesztésének lépései egy ábrán.....	20
4.6.1. ábra: AR111-es izzó	22
4.7.1. ábra: Az elrendezés vázlata	23
4.7.2. ábra: Az elkészült nyákterv	24
4.7.3 ábra: Az elrendezés tervének blokkvázlata	25
4.8.1. ábra: A program frontpanelja	26

7 Irodalomjegyzék

- [1] PHOTOVOLTAICS: Enhancements enable solar simulators to shed light on new photovoltaic designs, 2011.09.27.
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-43/issue-3/features/photovoltaics-enhancements-enable-solar-simulators-to-shed-light-on-new-photovoltaic-designs.html>
- [2] C. Monokroussos, R. Gottschalg, A.N. Tiwari, G.Friesen, D. Chianese, S. Mau: The effects of solar cell capacitance on calibration accuracy when using a flash simulator
- [3] Power from the Sun, e-könyv. 2011.09.10.
<http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter02/chapter02.html>
- [4] Napsugárzás spektruma, 2011.09.05.
http://org.ntnu.no/solarcells/pics/chap2/Solar_Spectrum.png
- [5] A. De La Casiniere, t. Cabot and S. Benmansour: Measuring spectral diffuse solar irradiance with non-cosine flat-plate diffusers, solar Energy Vol. 54. No. 3, pp, 173-182, 1995
- [6] Hong Kong Obszervatórium mérései 2011.11.27.
http://www.weather.gov.hk/wxinfo/ts/display_element_solar_e.htm
- [7] BME EGR – Megújuló Energia Laborban mérési eredményei 2012.03.19.
<http://remotelab.energia.bme.hu/solar/index.php?page=online&lang=hu>
- [8] Sol3A Class AAA Solar Simulator Newport, 2011.11.02.
<http://search.newport.com/?x1=sku&q1=94123A>
- [9] Qinglong Meng, Yuan Wang, Linhua Zhang: Irradiance characteristics and optimization design of a large-scale solar simulator, Solar Energy, Volume 85, Issue 9, September 2011, Pages 1758-1767
- [10] Integráló gömb 2011.11.05.
<http://omlc.ogi.edu/classroom/ece532/class1/gifs/aperture2a.gif>
- [11] Luxeon Rebel Color spektrum DS65 2012.04.10.
<http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-color#datasheets>
- [12] Vér Ábel - Class A minősítésű napszimulátor fény- és spektrális eloszlásának szimulációja MATLAB környezetben (Önálló laboratórium beszámoló)

8 Melléklet



8.1. melléklet: A diffúz megvilágítóegység kapcsolási rajza