



**SZENT ISTVÁN EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR**



**GÉPÉSZMÉRNÖK MSC
SZAK,
MŰSZAKI FEJLESZTŐ SZAKIRÁNY**

**KÖRNYEZETIPARI RENDSZEREK
INTÉZET
FIZIKA ÉS FOLYAMATIRÁNYÍTÁS
TANSZÉK**

**Közepes méretű napelemes erőművek telepítési feltételei
Országos Tudományos Diákköri Dolgozat**

Készítette:

Galambos Erik

**Belső konzulens: Prof. Dr. Farkas István, KÖRI egyetemi tanár, intézetigazgató
Külső konzulens: Réti István, gépészmérnök, MTA TTK MFA**

**GÖDÖLLŐ
2012**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzések	4
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1. Napenergia hasznosítás	5
2.1.1. Passzív hasznosítás.....	7
2.1.2. Aktív hasznosítás.....	8
2.2. Fotovillamos hasznosítás.....	10
2.2.1. Fotovillamos történelem.....	10
2.2.2. Alapfogalmak, alapösszefüggések	12
2.2.3. Napelemek általános működési elve	15
2.3. Egyes napelem típusok bemutatása.....	17
2.3.1. Első generáció	17
2.3.2. Második generáció	19
2.3.3. Harmadik generáció	21
3. Vékonyrétegű napelemek	24
3.1. A vékonyréteg konstrukció	25
3.2. A vékonyrétegű napelemek gyártási technológiák.....	29
3.2.1. Amorf szilícium napelem előállítása CVD technológia segítségével	29
3.2.2. A CIGS és CIS napelemek előállítása MBE technológia segítségével.....	31
3.2.3. A laboratóriumi, illetve a sorozatgyártási folyamatok ötvözése	33
3.3. Fotovillamos cellák vizsgálati módszerei	34
3.3.1. A Standard Test Conditions technológia.....	34
3.3.2. Az European Solar Test Installation szabványok.....	35
4. Közepes teljesítményű fotovillamos rendszer tervezése	36
4.1. Kiindulási adatok a tervezéshez	37
4.1.1. A létesítmény makro környezete.....	37
4.1.2. A vizsgált létesítmény és mikrokörnyezetének vizsgálata.....	41
4.1.3. Villamosenergia-ellátás főbb szempontjai	44
4.2. Az alkalmazott szimulációs programok	45
4.3. Hálózatra dolgozó fotovillamos rendszer.....	47
4.3.1. A villamosenergia-igény meghatározása	47
4.3.2. A napelemes rendszer fő paramétereinek meghatározása.....	48

4.4.	A CIS-CIGS napelemek alkalmazása	51
4.4.1.	A napelem mező méretének meghatározása	52
4.4.2.	A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása.....	52
4.4.3.	A napelemek által megtermelhető energia számítása	53
4.4.4.	Az inverter kiválasztása	53
4.4.5.	A modulok rögzítése	54
4.4.6.	A CIS rendszer értékelése	55
4.5.	A CdTe - CdS/CdTe napelemek alkalmazása	56
4.5.1.	A napelem mező méretének meghatározása	57
4.5.2.	A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása.....	57
4.5.3.	A napelemek által megtermelhető energia számítása	58
4.5.4.	Az inverter kiválasztása	58
4.5.5.	A CdTe rendszer értékelése.....	59
4.6.	Az amorf Si napelemek alkalmazása	60
4.6.1.	A napelem mező méretének meghatározása	61
4.6.2.	A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása.....	61
4.6.3.	A napelemek által megtermelhető energia számítása	62
4.6.4.	Az inverter kiválasztása	62
4.6.5.	Az amorf szilícium rendszer értékelése	63
4.7.	Kristályos szilícium napelem alkalmazása.....	64
4.7.1.	A napelem mező méretének meghatározása	65
4.7.2.	A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása.....	65
4.7.3.	A napelemek által megtermelhető energia számítása	66
4.7.4.	Az inverter kiválasztása	66
4.7.5.	Az amorf szilícium rendszer értékelése	67
5.	Gazdasági értékelés	68
	Következtetések, javaslatok	70
	Felhasznált irodalom	71
	Elektronikus források	73
	Dolgozat készítéséhez felhasznált programok	74
	Mellékletek.....	75

1. Bevezetés, célkitűzések

Az ipari termelés növekedésével a fosszilis energiák kiaknázása, és felhasználása oly mértékben megnövekedett, hogy mára az energiaellátással, és az energiaiparral kapcsolatos környezeti, társadalmi és gazdasági problémák globális méreteket öltenek.

Tekintettel a jelenlegi energiafelhasználás mértékére, és a fejlődő országok növekvő energiaigényire a Föld megóvása érdekében olyan erőforrások alkalmazását kell előnybe részesíteni, amelyek környezetre gyakorolt káros hatásuk elenyésző, nem létezik.

A nem megújuló energiahordozók káros hatásai mellett meg kell említeni az energiaköltségek drasztikus növekedését is, amely olyan alternatívák kidolgozására adott inspirációt, amelyek a fosszilis energiaforrások felhasználásának mérsékelését, hosszú távon viszont a kiváltását is biztosítani tudják. A feladatra a megújuló energiaforrások alkalmazása kiváló opciót jelent. A megújuló energiaforrásoknak nevezzük azokat az erőforrásokat, amelyek korlátlanul, vagy folyamatosan újratermelődve állnak rendelkezésünkre, és a jelenlegi energiafelhasználásunkat figyelembe véve kimeríthetetlenek. Ezeken általánosságban a következőket értjük: biomassza eredetű energiák, geotermikus energia, vízenergia, szélenergia és a napenergia.

A 21. században az energiatermelés decentralizálása az egyik fő irányvonal, amelyre a napenergia-hasznosítás, azon belül is a fotovillamos technológia ad egyfajta lehetőséget. A technológia még ma is olyan kiaknázatlan potenciával rendelkezik, amely a napelem fejlesztéssel és gyártással foglalkozó szakembereknek, kutatóintézeteknek megannyi feladatot biztosít a következő évtizedekben. Jelenleg a piacon kapható fotovillamos moduloknál elért legmagasabb hatásfok 22% körüli, ezzel szemben laboratóriumi körülmények mellett nanotechnológia alkalmazásával 44%-os cellahatásfokot is elértek, amely még mindig alulmarad az elméletileg elérhető 86% körüli energiaátalakítási hatásfoktól (NREL, 2012).

Dolgozatomban a napenergia hasznosítását, azon belül pedig részletesen a fotovillamos energiahasznosítást vizsgálom a témakörében megjelent szakirodalom segítségével. A szakirodalmi részt követően a vékonyfilm technológiákat, illetve a technológiával készülő napelemek fejlesztési trendjeit vizsgálom, amely során a Szent István Egyetem Műszaki és Természettudományi Oktató Központja számára egy közepes méretű hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszert tervezek. A megvalósításához, a vizsgált vékonyréteg technológiák alkalmazásával több rendszeralternatívát készítek, és összehasonlítom a piacvezető kristályos szilícium technológiával készülő rendszerekkel. Az elkészített alternatívákat számítógépes szimuláció segítségével értékelem, majd a megvalósításhoz végső javaslatot teszek.

2. Szakirodalmi áttekintés

A Nap egy olyan csillag, amely ha most egy csapásra kimúlna, rövid időn belül megszűnne az élet a Földön, és hasonlóan a Világegyetem többi ismert bolygóyához élettelen planétaként végezné bolygómozgását a táguló univerzumban. A Nap hő- és fényenergiája évmilliók óta biztosítja a Földi élethez szükséges feltételeket, alapul szolgálva a többi megújuló energiaforrásoknak, de a fossziliák is egykoron az ő segítségével keletkeztek. A következő fejezetben a napenergiát, mint a kutatási területem fő témáját mutatom be, a dolgozat célkitűzéseinek megfelelően a legnagyobb hangsúlyt a fotovillamos alkalmazásokra, és a különböző napelemek bemutatására fektetve.

2.1. Napenergia hasznosítás

A Nap működését tekintve egy fúziós reaktorhoz hasonlít, amelyben a hidrogén héliummá való átalakulása során hatalmas energia mennyiség szabadul fel, amelynek csak egy töredéke éri el a Föld felszínét, de ennek az energiának a mennyisége is 6000-szer több mint a Föld teljes energiaigénye. Mivel a Nap teljes tömegének a 72%-a hidrogén, és a napfúzió évmilliárdokkal ezelőtt kezdődött, elmondhatjuk, hogy az energiája számunkra kimeríthetetlen (Nemcsics, 2001).

Az emberiség a Napból érkező fényt, és hőenergiát már az ókorban is ismerte, alkalmazta. Számos fennmaradt lelet bizonyítja, hogy a napenergia alkalmazása tudatos volt számukra, gondolhatunk például a görög, és a kínai építészetre, ahol az épületek déli tájolása már kimutatható. Az idő múlásával, a technika fejlődésével a napenergia felhasználása fontosabbá vált, az általa nyújtott energiát egyre fejlettebb technika segítségével hasznosította. Mára a napenergiával foglalkozó iparág olyan mértékben kiszélesedett, hogy külön szakágként tekinthetünk rá. Világszerte számos olyan kutatóintézet létezik, amely a napenergia minél magasabb hatásfokú hasznosításán dolgozik, különféle technológiák alkalmazásával újfajta berendezések, technológiák kifejlesztésére dollár milliárdok ráfordításával.

A földfelszínre érkező teljes napsugárzást globális sugárzásnak nevezzük, amelynek direkt, diffúz, és reflektált összetevőit különböztetjük meg. A földfelszín közvetlenül elérő napsugárzási összetevőt nevezzük direktsugárzásnak, diffúz a Föld légkörében található különböző szennyezőanyagok miatt megtört sugárzást, míg a reflektált sugárzás a földfelszínen található tereptárgyakról, épületekről visszaverődő sugárzást teszi ki, de egyes

esetekben, tiszta, fényes terep esetén többszörös reflexióról beszélhetünk (Duffie-Beckman, 2006).

Az egyes sugárzási összetevők aránya nagyban függ az időjárási, és a geológiai viszonyoktól. Az egyenlítő felé közelítve egész évre viszonyítva a direkt sugárzási összetevő dominál, míg északabbra haladva az év bizonyos szakaszaiban a szórt sugárzás a jellemző. Bizonyos napenergiát hasznosító berendezések, mint például a parabolatükörrel ellátott koncentrátoros naperőműveknél szinte kizárólag a direkt napsugárzást képesek hasznosítani, míg a kereskedelmi forgalomban kapható napkollektorok illetve napelemek a szórt sugárzást is képesek abszorbeálni, ezért a telepítés előtt célszerű a technológiának szükséges időjárási, napsugárzási paramétereket is figyelembe venni a gazdaságos beruházás érdekében (Poulek-Libra, 2006).

Magyarországot figyelembe véve elmondhatjuk, hogy az évi átlagos napsütéses órák száma, illetve a napsugárzás mennyisége az egész ország területén közel azonos, de a legnagyobb értékkel a Nagyalföld területén lehet számolni. A sugárzás összetételét megvizsgálva elmondható, hogy Európa más területeihez hasonlóan nyáron túlnyomóan a direkt napsugárzás a jellemző, de télen a szórt sugárzási összetevő a domináns. Az egyéb meteorológiai hatásokat megfigyelve kijelenthető, hogy az ország nincs kitéve szélsőséges időjárási körülményeknek, ideális mind fototermikus, mind fotovillamos napenergia-hasznosító berendezések gazdaságos telepítésére (Farkas, 2003).

Napenergia-hasznosításon belül kétféle alkalmazási módot célszerű megkülönböztetni, az aktív illetve a passzív hasznosítást. Amennyiben a Napból érkező hőenergiát pusztán építészetben használatos módokon, gépészeti megoldások kizárásával vesszük igénybe, úgy passzív hasznosításról, viszont ha a hasznosításnál gépészeti berendezéseket is működtetnek, akkor aktív napenergia-hasznosításról beszélhetünk.

A napenergia-hasznosításnál meg kell említeni, a ma még csak kialakulóban lévő technológiát, a szolár-kémiát, amely a növények fotoszintézisén alapulnak. A fotoszintézis során a széndioxidból és vízből a növények napsugárzás hatására cukrot, és oxigént állítanak elő kémiai reakciók során. A fotoszintézis hatásfoka igen alacsony, mintegy 0,1%, de tekintettel a földfelszínen megtalálható növényzet mennyiségére, már számottevő mennyiségről beszélhetünk. A fotokémiai hasznosítás lényege, hogy a napsugárzás hatására hasonló kémiai reakciót tudjunk elérni, élő szervezetek használata nélkül, a természetes fotoszintézisnél magasabb hatásfokkal (Li et al, 2011).

A következő alfejezetekben az aktív és a passzív hasznosítási típusokat fogom szemügyre venni, ezen felül bemutatom a jelenleg használatos technológiákat.

2.1.1. Passzív hasznosítás

A 2007-ben kirobbanó, de a napjainkban is tartó gazdasági világválság során az olajárak az egekbe szöktek, amely az egész energiapiacot magával rántotta. Az így kialakuló tendencia Európában a következő években is meghatározó lesz. Ezen energiaárak növekedése az építészetre is kihatással vannak, ezért a szakemberek egyre inkább hangsúlyt fektetnek a régi épületek energiafogyasztásának csökkentése érdekében utólagos hőszigetelésre, nyílászáró cserére, és az újonnan épülő energiatakarékos épületek kialakítására. Az energiaköltségek mérsékelésére alternatívát jelenthet a passzív hasznosítás (Fülöp et al, 2005).

Passzív hasznosítást már az ókorban is ismerték, és alkalmazták, ugyanis az épületek déli tájolása már a korai építészetben is megjelent, amellyel fényt és hőt biztosítottak a bennélők részére. A XXI. században az épületek tervezésénél és kivitelezésénél a passzív napenergia-hasznosítás ugyan olyan fontos szerepet játszik, mint például a korszerű gépészeti berendezések alkalmazása.

A passzív szoláris technológiának a lényege, hogy a téli időszakban amikor a napmagasság az év többi időszakához képest a legalacsonyabb az épület begyűjtse, és tárolja a napból nyert energiát. Nyáron viszont, amikor a Nap delelési magassága éves viszonylatban a legmagasabb a passzív épületek kialakítása lehetővé teszi a nyílászárók természetes leárnýékolását ezzel megóvva a használóit a túlzott napsugárzástól (Raman et al, 2001).

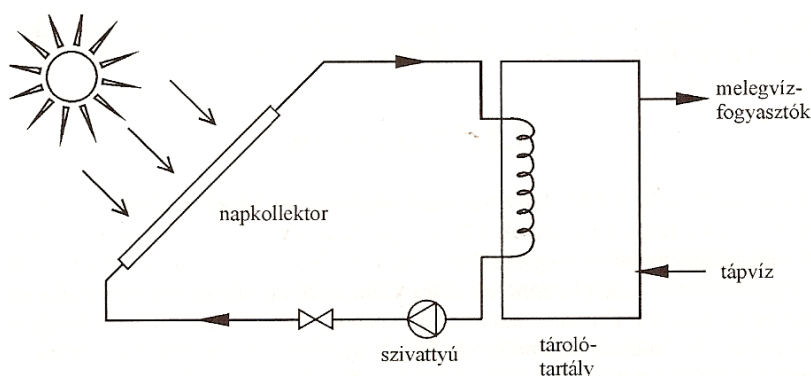
Közüntézményeknél, illetve magánházaknál Nyugat-Európában már az elmúlt évtizedekben komoly állami támogatást lehetett igényelni energiahatékonyság növelésére, ezzel szemben Magyarországon sajnos még a megújuló energia hasznosítása kevésbé preferált. Itthon a korszerűtlen épületek energetikai célú szigetelése, nyílászárócseréi komoly támogatással valósulnak meg. Az úgynevezett panelprogram bő egy évtizede kezdődött, célként az 1960-as évektől épült többszintes betonelemekből épített lakóépületek hő veszteségeinek a csökkentése.

Az energiahatékonyság növelése céljából a passzív és az aktív hasznosítást együttesen szokás alkalmazni, ezzel elérhetőek akár a zéróenergiás házak is, amelyek önmaguk gondoskodnak a hő, illetve villamosenergia-ellátásukról (Marszal et al, 2011). Az ilyen épületek kialakításánál a fotovillamos technológia mellett a napenergia fototermikus alkalmazása, illetve egyéb megújuló energiaforrásokat is hasznosítanak, gyakorlatban leginkább hőszivattyús berendezésekkel, amelyek a geotermikus energiát hőtermelésre fordítja (Komlós et al, 2009).

2.1.2. Aktív hasznosítás

Aktív napenergia-hasznosítást két csoportba soroljuk, nevezetesen a fototermikus, illetve a fotovillamos rendszereket. Jelen fejezetben a fototermikus napenergia-hasznosítást fogom bemutatni, ugyanis a fotovillamos energiatermelésre önálló bekezdést szánok.

Aktív fototermikus alkalmazásoknál a napsugárzás elektromágneses energiáját abszorbeáljuk, és hőtermelésre fordítjuk. Az ilyen berendezéseket a köznyelv napkollektoroknak nevezi. Ezen kollektorokat az általuk működtetett munkaközeg alapján osztályozhatjuk levegős, illetve folyadékkal működő eszközöknek. Az ilyen berendezések használatával a napból érkező kicsi energiasűrűséget az általunk szükséges szintre növelhetjük (Farkas 2003). Az alábbi ábra a fototermikus napenergia-hasznosítás általános sémáját mutatja be.



2.1. ábra. Fototermikus napenergia-hasznosító berendezés sémája (Farkas, 2003)

A berendezések által keringetett fluidum hőmérséklete alapján három csoportot különböztethetünk meg, az alacsonyhőmérsékletű, a középhőmérsékletű, és magas hőmérsékletű folyadékkal működő szoláris berendezéseket. Alacsony hőmérsékleten a levegőközegű kollektorok dolgoznak, amelyeknek a hatásfokuk mintegy 40% körüli, ez jelentősen alulmúlja a folyadékos napkollektorok hatásfokát. Legfőbb alkalmazási területük a klimatizálás, és a terményszárítás (Duffie-Beckmann, 2003).

A lakosság körében legelterjedtebb a közepes hőmérsékleten üzemeltetett berendezések, amelyeknél a hő átadó közeg a legtöbb esetben egyszerű víz, fagyálló folyadék, vagy kimondottan erre a célra gyártott úgynevezett szoláris folyadék. Ezen berendezések Nyugat-Európában szinte minden háztartásban megtalálhatóak, Magyarországon jelenleg még luxusterméknek számít, de az elmúlt időkben egyre szélesebb körökben terjednek el. Az ilyen berendezéseket használati meleg víz, illetve fűtés rásegítésre telepítik, néhány esetben viszont az úszómedence fűtését is napkollektorokkal biztosítják. A kereskedelmi forgalomban lévő

szoláris berendezések közül a vákuumcsöves napkollektorok rendelkeznek kiemelkedő, 80%-ot meghaladó hatásfokkal.

A fototermikus napenergia-hasznosító berendezések fejlesztésénél a berendezések élettartamának növelése, és az energia-átalakító képességük fokozására különböző módszereket fejlesztettek ki. Mivel az abszorber lemezek csak a napsugárzás spektrumának egy bizonyos tartományára érzékenyek, olyan felületi bevonattal látták el őket, amelyek ezt a tartományt képesek növelni. Ezek az úgynevezett szelektív bevonatok. Emellett kollektorok élettartamának növelésére, illetve a belső energia veszteségek csökkenésére különféle burkolati, illetve szigetelő anyagokkal kísérleteznek. Az üvegezést tekintve nagytisztaságú szilíciumüveggel látják el a berendezést, ugyanis az egyszerű húzott síküvegben található szennyezőanyagok a beérkező fény egy részét visszaverik (Duffie-Beckman, 2006).

Magyarországon a napkollektoros rendszerek az elmúlt években az egyre magasabbra ívelő gáz, illetve villamosenergia-árak miatt egyre inkább teret hódítanak közintézményi, illetve lakossági viszonylatban egyaránt. A beruházási támogatások növekedésével a rendszerek megtérülési ideje nagyban lecsökken. A síkkollektoros rendszerek élettartamáról elmondható, hogy szakszerű alkalmazás során, rendszeres karbantartás mellett évtizedekig hibátlanul képesek működni, ezért indokolt a rendszerek alkalmazása (Alternatív energia, 2012).

A magas hőmérsékleten dolgozó napkollektorok majdnem kizárólag erő művi méretekben készülnek, ugyanis az üzemeltetési technológia bonyolultsága megkívánja a folyamatos mérnöki felügyeletet. Ezen erőművek kizárólag a direkt napsugárzást hasznosítják, ezért csak olyan helyeken érdemes telepíteni őket, ahol az év egészében a közvetlen napsugárzás éri. A termelés szempontjából belátható, hogy az éghajlati körülmények a naperőműveknél kiemelkedő fontossággal bírnak. Felhősödés esetén a direktsugárzás mértéke oly mértékben lecsökken, hogy a rendszer kimenetén mért hőmérséklet akár több száz °C-t is képes csökkenteni. Mivel a rendszer a kimeneti értékre igen érzékeny, komoly irányítási feladatot jelent a rendszert tervezők számára (Farkas-Vajk, 2002).

A koncentrátoros technológia lényege, hogy parabolatükrök, vagy parabolavályú segítségével a napból érkező direktsugárzást egy pontba fókuszálják, ahol a hő átadó közeget, amely a legtöbb esetben szintetikus olaj, a beérkező sugárzás mértékétől függően akár 1000-1200°C fölé is melegítheti, majd hőcserélőkön keresztül magasnyomású szárazgőzt hoznak létre, amely gőzturbinák, és villamos generátor segítségével villamos-energiát állítanak elő.

Jelenleg a napenergia-hasznosítás tekintetében a fototermikus technológia a piacvezető, ugyanis az általa nyújtott magas hatásfokértékek, és a beruházás megtérülési ideje ma még kedvezőbb a fotovillamos berendezések által nyújtott értékeknél.

2.2. Fotovillamos hasznosítás

A fotovillamos kutatások a XXI. századra külön tudományterületté nőttek ki magukat. A technológia olyan lehetőségeket nyújt, amely mára egyre szélesebb körökben kihasználásra kerülnek, a privát lakóingatlanok energiaellátásától a járműveken át egészen az űralkalmazásokig. A fotovillamos technológia előnye többek között ezen széleskörű alkalmazásokban rejlik, ugyanis a legegyszerűbb világítótestet de a Nemzetközi Űrállomás energiaellátását is biztosítani tudja. Jelen fejezetben a technológia kialakulását, és fontosabb mérföldköveit követően a napelemek működési elvét, alkalmazásait ismertetem.

2.2.1. Fotovillamos történelem

Bizonyos anyagok a fény hatására feszültséget, vagy villamos áramot képesek előállítani. Ezt a hatást fotovillamos effektusnak nevezzük, amelyet először a XIX. század közepén A. E. Becquerel, francia fizikus vizsgált. A fotoelektromos hatást Einstein 1905-ben ismertette, amelyért 1921-ben a fizikai Nobel díjban részesítették. 1954-ben az AT&T Bell Laboratories szakemberei kidolgozták az első egykristályos szilícium napelemet, amely mindössze 6%-os cellahatásfokkal rendelkezett (Wenham et al, 2007). Ezt követően szilícium alapú napelemek fejlesztése, hatásfoknövelése volt a cél. Az egykristályos szilícium napelemek mellett megjelentek a polikristályos technológiával készülő napelemek, amelyek hatásfoka alacsonyabb volt, de a gyártási költségek, illetve a gyártási eljárás módja kedvezőbbek az egykristályos technológiánál. A piaci igények növekedése miatt újfajta típusok létrehozása következett, megjelent a vékonyréteg technológiával rendelkező második napelem generáció. Jelenleg a harmadik napelem generációnál tartunk, amely még kísérleti stádiumban van, de még kiaknázatlan tartalékokkal bír.

Az energiaköltségek növekedése, az energiatermelés környezeti aspektusai, illetve a villamosenergia-hálózattól elzárt területek energiaigénye mind hozzájárult a fotovillamos energiatermelés elterjedésének. Napjainkban a napelemes erőművek nagysága közelít az egyéb, nem megújuló energiát hasznosító erőművek méreteivel (Poultek-Libra, 2006).

A fotovillamos kapacitás az elmúlt években rohamosan fejlődött, 2011 végére elérte globálisan a 69 GW beépített összteljesítményt, amely a gazdasági válság ellenére is fellendülést jelentett. Ezzel a teljesítménnyel éves szinten mintegy 85 milliárd kWh villamosenergia előállítás érhető el. Köszönhetően a napelemes rendszerek előnyeinek a világ országainak több mint felében alkalmazzák őket, egyes helyeken földre helyezett állványokon, máshol viszont épületbe integráltan lettek telepítve (EPIA, 2012).

Európában a vezető fotovillamos (photovoltaic, PV) hatalom Németország, ugyanis a beépített PV kapacitásuk 2011 végére elérte a 25 000 MWp értéket, amely az Unióra viszonyítva a teljes kapacitás nagyjából fele, ezzel szemben Magyarország 4,1 MWp beépített PV összteljesítménnyel rendelkezik (Euroobserver, 2012).

Világszinten az 5-10 kWp teljesítménnyel rendelkező energiatermelő rendszerek mellett megszorodtak a 100MWp körüli fotovillamos erőművek, jelenleg az Arizonai sivatagban található, First Solar által készített Agua Caliente Solar Project rendelkezik 247 MWp beépített kapacitással, amely a legnagyobb a világon. Az erőmű 2013-ban éri el majd a végleges méretét, 397 MWp kapacitással (First Solar, 2012).

A tervezett erőművek közül a Project Helios nevet viselő görög tervezet a legkiemelkedőbb, ugyanis 3-10 GWp beépített napelem kapacitásra törekednek, amellyel villamos-energiát tudna exportra kínálni Nyugat-Európa számára. A projekt jelenleg befektetőket keres a monumentális erőmű kivitelezéséhez (Project Helios, 2012).

Magyarországon a legnagyobb napelemes rendszer Újszilváson található, amely 400 kWp teljesítménnyel rendelkezik. A majd 618 millió forintból megvalósult projekt kétharmada Közép Magyarországi Operatív Program keretében került finanszírozásra. A projekt három éves folyamat eredményeként jött létre, ugyanis a villamoshálózatra való kapcsolódás közel másfél évet vett igénybe (Újszilvás Napelem Park, 2012).

Magyarország szoláris potenciálja kiemelkedően magas. A Magyar Tudományos Akadémia Megújuló Technológiák Albizottsága felmérést végzett az országban ideálisan, fotovillamos modulokkal telepíthető, egyéb hasznosításra nem alkalmas területekről (építmények déli tájolású teteje, autópályák, illetve vasútvonalak mentén elhelyezett zajvédő falak), amelyek összesen mintegy 4000 km² felülettel bírnak. Amennyiben ezen területeket fotovillamos energiatermelésre hasznosítanánk, akkor a teljes rendszer az ország villamosenergia-felhasználásnak 12-szeresét képes lenne megtermelni (Pálffy, 2010).

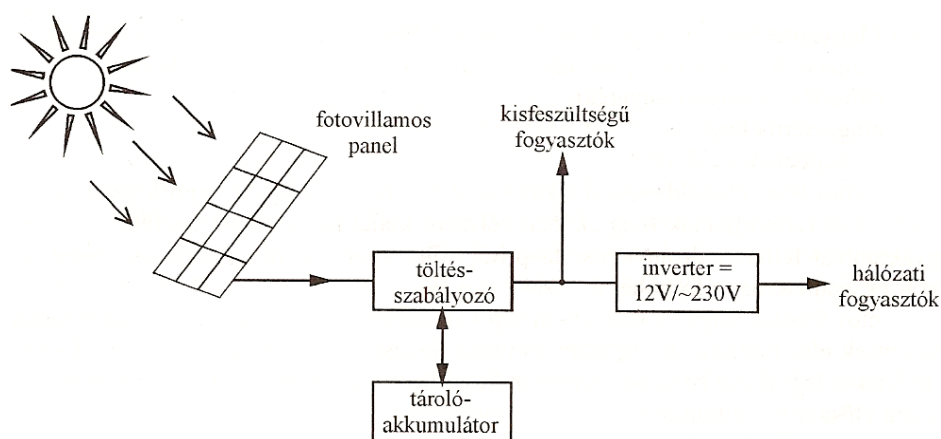
A napelemes kapacitás az elmúlt években folyamatosan növekedett, de Nyugat-Európához, vagy Csehországhoz viszonyítva Magyarország e területen még elmaradott, amely a villamos-energia alacsony átvételi árának, illetve a megújuló energiaforrások állami támogatásának a mértékével, a pályázatokhoz szükséges adminisztrációs nehézségekkel magyarázható (PV Status Report, 2011).

Amennyiben Magyarország kihasználná a napelemes technológiában rejlő lehetőségeit, képes lenne egy olyan villamos-energia ipar létrehozására, amely az importfüggőségét leküzdve akár komoly villamosenergia-export országgá válhatna. A cél eléréséhez viszont komoly beruházások, illetve a megújuló energiát preferáló energia lobbira lenne szükség.

2.2.2. Alapfogalmak, alapösszefüggések

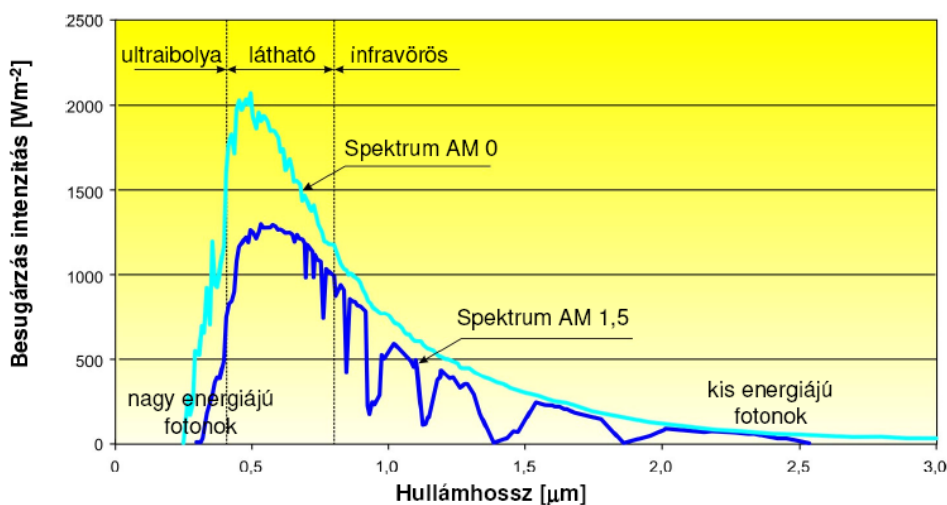
A következő bekezdésben a napelemmel történő villamosenergia-termeléssel kapcsolatos fogalmakat, fogom bemutatni, értelmezni.

A Napból érkező energia fény, illetve sugárzó összetevője éri el a Föld felszínét. Napelemes rendszerek esetében a napelem cellák generátorként üzemelnek, ezáltal történik a sugárzó energia villamos-energiává való átalakítása (Markvart-Castaner, 2003). A rendszer működési sémáját az alábbi, 2.2. ábra szemlélteti.



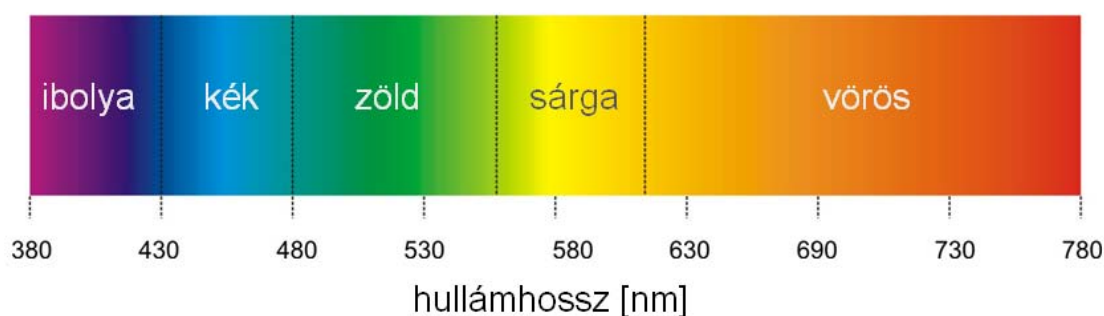
2.2. ábra. Napelemes rendszerek általános működési elve (Farkas, 2003)

A foton olyan elemi részecske, amely a fény, és egyéb elektromágneses sugárzásért felelős, tömege zérus, sebessége megegyezik a vákuumbeli fénysebességgel, energiája arányos a frekvenciájukkal. A fotonok frekvencia-eloszlását spektrumnak definiálják. A napsugárzás spektruma a hullámhossz mentén széles határok között változik. A napsugárzás spektrumát a 2.3. ábrán szemléltetem.



2.3. ábra. A Napsugárzás spektruma (Roth-Kaiser, 2008)

Ameddig az emberi szem az elektromágneses sugárzás spektrumának csak egy szűk részét a 390-750 nanométer közé eső sugárzási tartományt képes érzékelni, addig speciális eljárásokkal egyes napenergia-hasznosító berendezések szélesebb, az ultraviola és az infravörös tartományba eső sugárzást is képesek abszorbeálni. A napkollektorokkal szemben, amelyek a teljes láthatófény spektrumába eső sugárzást képesek elnyelni, a napelemek ezen spektrumon belül is csak mérsékelten, egy-egy színhez tartozó tartományt abszorbeálnak. A láthatófény spektrumát a 2.4. ábra szemlélteti.



2.4. ábra. A láthatófény spektruma (Forrás: Roth-Kaiser, 2008)

A napelemek által termelt villamos-energia mennyisége egyenesen arányos a napsugárzás intenzitásával, amelyet a fotonok sűrűsége határoz meg. A napelem-cellára érkező fotonok mennyiségét energiasűrűséggel mérhetjük, jele: E , mértékegysége W/m^2 , amely megmutatja, hogy adott felületre érkező sugárzás mekkora energia mennyiséggel bír.

A napsugárzás a Földfelszín egészén elérhető, de a sugárzás intenzitása nagyban függ a földrajzi fekvéstől, és a meteorológiai viszonyoktól, és egyéb a napsugárzás mértékét befolyásoló tényezőktől. A Föld atmoszféráját elérő napsugárzás intenzitása jelenti a napállandót. Ennek az értéke $I_0=1353 W/m^2$ (Duffie-Beckmann, 2003).

A globálsugárzást három összetevőre bonthatjuk, direkt, diffúz, és reflektált:

$$I_{glob.}=I_{dir.}+I_{diff.}+I_{refl.} \quad (2.1)$$

A Föld légköre négy fő gázrétegből áll: Termoszféra, Mezoszféra, Sztratoszféra, és a Troposzféra. A fotonok energiasűrűsége a Termoszféra elérésénél a napállandóval jellemezhető ($I_0=1353 W/m^2$). A Föld légköre a napsugárzás csak egy részét képes átengedni, egy része visszatükröződik a világűrbe, egy részét a légköri képződmények reflektálják vissza, bizonyos hányada viszont a légkörben felszívódik. A földfelszínre érő sugárzás mértéke emiatt nagyban függ, hogy a részecskéknek mekkora távot kell a légkörben a Föld eléréséig megtennie. Ezt a távolságot optikai légréteg (Air Mass) néven szokták jellemezni. Amikor az

Air Mass értéke 0, az a légkör által még nem gyengített spektrumot jelenti, merőleges sugárzás esetén, tengerszint magasságban, a földfelszínen az értéke 1, a fotovillamos modulok hatásfokvizsgálatához 1,5-ös Air Mass értéket vesznek, amely a függőleges beesési szögtől 48,2°-ban tér el, a függőlegetől 60°-os beesési szögnél ez az érték 2 (Pálffy, 2003).

Az Air Mass meghatározásához az alábbi összefüggést alkalmazhatjuk:

$$AM = \frac{1}{\cos \alpha}, \quad (2.2)$$

Ahol α a tengerszinten mért, a beeső sugárzás, és a földfelszínre merőleges tengely között bezárt szöget értjük.

A földfelszínt érő közvetlen beeső napsugárzás mennyiségét az Air Mass értéken kívül a levegőben található szennyeződések, és a felhőtakaró mértéke is meghatározza. Értelem szerűen verőfényes napsütés esetén sokkal magasabb a napsugárzásból adódó energia, mint borús, esős időben, vagy például egy széntüzelésű erőmű környezetében (Farkas, 2003).

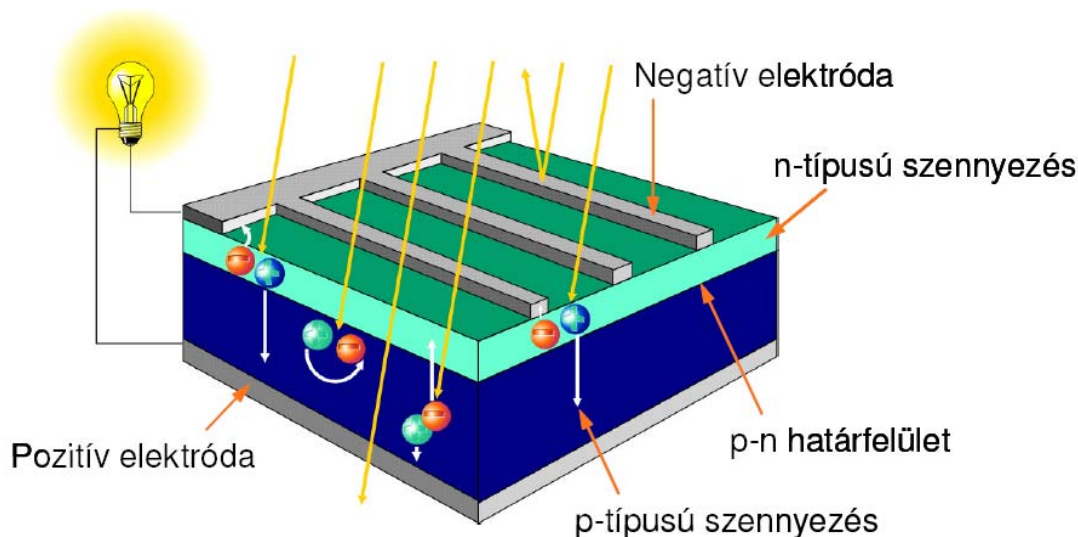
Amennyiben a Föld felszínére érkező napsugárzás viselkedését vizsgáljuk, érdemes még megemlíteni az albedo fogalmát. Albedonak nevezzük a beérkező napsugárzásnak azt a hányadát, amely az egyes tereptárgyakról visszaverődik. Ez az érték az egyes tereptárgyak színétől, illetve a felület érdességétől nagyban függ, ugyanis minél világosabb, fényesebb egy-egy tereptárgy, annál magasabb a reflektálódás mértéke. A napenergiát hasznosító berendezéseknél fény abszorbeálásához tehát célszerű matt fekete anyagot választani (Tiwari-Dubey, 2010).

Az energiaellátás szempontjából nagyon fontos az egyenletes energiatermelés. Napenergia hasznosításánál, hasonlóan egyéb olyan megújuló energiaforráshoz, amely nagyban függ a környezeti, illetve éghajlati hatásoknak, a hasznosításra alkalmas energia sűrűsége nem állandó. Az energiasűrűséget Wh/m^2 , illetve kWh/m^2 -ben határozhatjuk meg (Wenham et al, 2007).

A napenergiát hasznosító berendezések telepítésénél egyik fő szempont a napkollektorok, vagy napelemek tájolása, valamint a dőlési szöge. Az északi féltekén tervezés, illetve telepítés során a legfontosabb, hogy az abszorber felület a déli égtáj felé forduljon, míg dőlésszög szempontjából egyes évszakonként más-más érték az optimális. Télen, amikor alacsony a napmagasság, Magyarországon a 75°-os, nyáron 20°-os, egész évben üzemeltetve 45°-os dőlésszög a megfelelő (Farkas, 2003).

2.2.3. Napelemek általános működési elve

A kereskedelmi forgalomban kapható vákuumcsöves fototermikus berendezések energiaátalakítási hatásfoka mára a 80%-os értéket is eléri, ezzel szemben a fotovillamos rendszereknél elért legmagasabb modulhatásfok 20% körüli értéken mozog. A napelemes technológiában rejlő hatalmas kihasználatlan potenciál érdekében az eszközök gyártása, és fejlesztése az elmúlt évtizedekben kimagasló eredményeket ért el. Számos forradalmi technológiát alkalmazva a legmagasabb 44%-os cella hatásfokot 2012 októberében a kaliforniai Solar Junction érte el koncentrátoros, háromrétegű InGaP/InGaAs/Ge cellával. A PV cellák fejlesztése során elért legjobb eredmények az *1. számú mellékletben* szemléltetem. A napelemek fotovillamos hatáson alapuló félvezető technológiával rendelkező villamos berendezések. A napelem cella működésének elvét a *2.5. ábrán* látható kristályos szilícium technológiával rendelkező cellával szemléltetem.

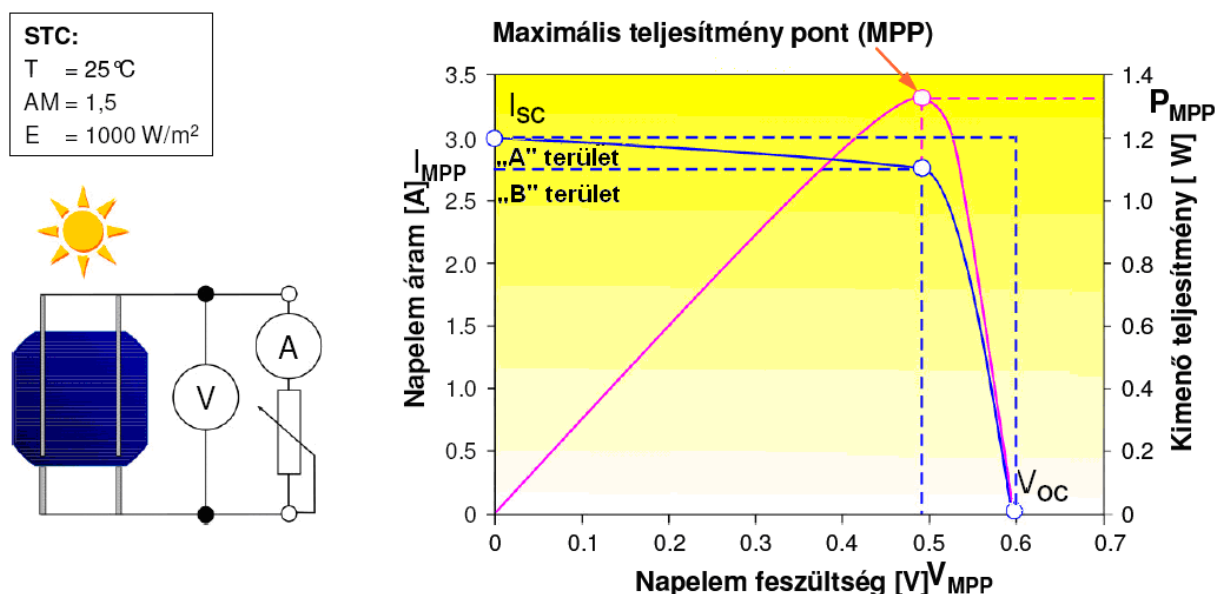


2.5. ábra. Kristályos szilícium cella, és működése (Räuber, 2008)

A naptól érkező elektromágneses sugárzás a napelem felszínét elérve az n-típusú szennyezésben nyelődik el. Az abszorbeált fotonok töltéshordozó-párokat generálnak, amelyeket a p-n határfelület elektrosztatikus tere kettéválasztja. Az elektronok az n-típusú szennyezés felé, a lyukak a p-típusú szennyezés felé áramolnak. A kettéválás hatására a cella két elektródája között feszültségkülönbség alakul ki, amelyet a napelem ki akar egyenlíteni. A kiegyenlítésre való törekvés miatt egy külső áramkörön keresztül az elektronok a pozitív elektróda felé áramolnak, mialatt a külső áramkörre kapcsolt villamos berendezések energiaellátását biztosítja (Wenham et al, 2007). A napelemben rejlő energia a p-n átmenet két ellentétes felületén keletkező többségi töltéshordozó felhalmozódásából adódik (Nemcsics, 2005).

A napelemek gyári paramétereinek meghatározására létrehoztak egy olyan szabványosított eljárást, amellyel minden elkészült napelem cellát és modult ugyanazon követelmények mellett lehet megvizsgálni. A szakirodalom ezen módszert Standard Test Conditions-nak, röviden STC eljárásnak nevezi, amely során a felületre érkező sugárzás értéke 1000 W/m^2 , a cellahőmérséklet 25°C , és 1,5 Air Mass mellett a napelemek kimenetén mért értékek alapján meghatározható a napelem karakterisztikája, paramétere, hatásfoka (Tiwari-Dubey, 2010).

A 2.6. ábrán egy polikristályos napelem cella karakterisztikáját szemléltetem.



2.6. ábra. Fotovillamos cella STC körülmények között kialakuló karakterisztikája (Räuber, 2008)

A napelem karakterisztikájából megállapítható a napelemre jellemző kitöltési tényező (Fill Factor, FF), amellyel leírható elkészült cella/modul jósága. A kitöltési tényező a maximális teljesítmény pont (MPP) értéknél mérhető áramerősség (I_{MPP}) és feszültségérték (V_{MPP}) által kijelölt „B terület” és a rövidre zárási áram (I_{sc}) és az üresjárat feszültség (V_{oc}) értékek által kijelölt „A” terület hányadosa:

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.3)$$

A kereskedelemben kapható napelemek kitöltési tényezője függ a gyártási technológiától, az alábbiakban tárgyalt vékonyrétegű napelemek kitöltési tényezője 0,4-0,7 értékek között mozog, míg a 3. generációs napelemek kitöltési tényezője bőven 80% feletti érték (Igalson et al, 2003).

2.3. Egyes napelem típusok bemutatása

A napelem technológiákat három történelmi fázisra lehet bontani. A 2.1. táblázatban a három PV generációt mutatja (Rusirawan et al, 2012).

2.1. táblázat. PV modul technológiák alakulása

A fotovillamos technológiának történelmi alakulása	Első generáció (kristályos szilícium technológia)
	Második generáció (vékonyfilm technológia)
	Harmadik generáció (nanoszerkezetű technológia): Koncentrátoros napelemek (CPV), Festék érzékeny napelemek (DSSC), Természetes alapanyagokból készített napelemek (OPV)

A következő alfejezetekben bemutatásra kerülnek az egyes napelem generációk, kialakulásuk, a technológia során alkalmazott főbb irányvonalak.

2.3.1. Első generáció

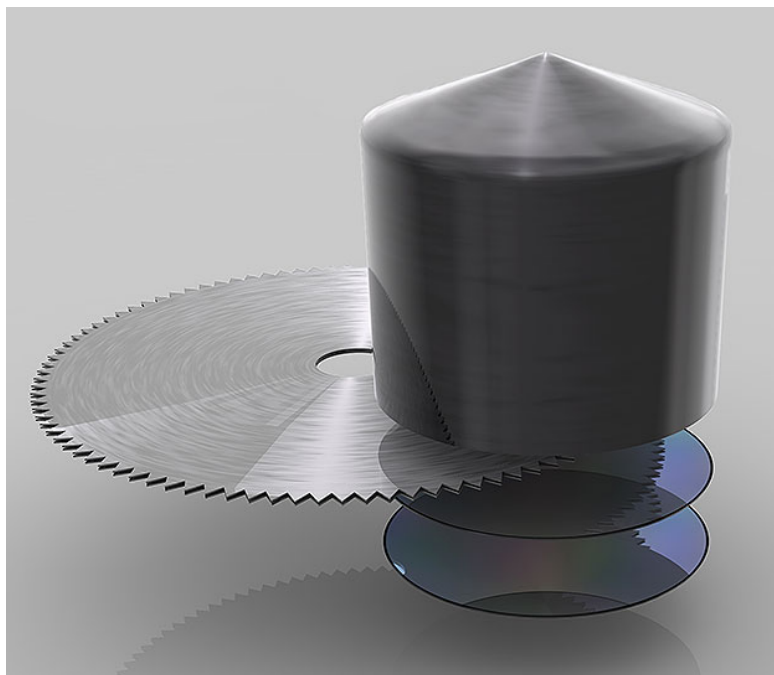
Az első kísérleti napelemet a Bell Laboratories tudósai fejlesztették ki 1954-ben, amely egykristályos szilícium alapú félvezető cella volt, amellyel 6% körüli hatásfokot értek el. A technológiát kezdetekben gyerekjátékok, és egyéb kevésbé műszaki területen alkalmazták először. A technológia akkoriban hihetetlenül magas költségek mellett üzemelt, ugyanis 1 watt teljesítményt biztosító napelem előállítása közel 250 dollárba került, ezzel szemben széntüzelésű erőműveknél ez az érték 2 dollár körüli (Wenham et al, 2007).

Az úgynevezett első generációs napelemeket jellemzően a gyártási költségükkel, és az általuk biztosított minőséggel szokták jellemezni, ugyanis gyártás során nagy mennyiségű nyersanyag szükséges, és a technológia bonyolult, szigorú előírásoknak megfelelően aránylag hosszadalmasan zajlik (Tiwary-Dubey, 2010).

Gyártásukat tekintve ezen napelemek az úgynevezett egy-, illetve többkristályos szilícium technológiával készülnek. Az egykristályos technológiában a fotovillamos cellák olyan szilícium tömbként kerülnek legyártásra, amelynél a megömlesztett alapanyag krisztalit képződése egy pontban alakul, aminek következtében a struktúrája egybefüggő, törésmentes, míg a multikristályos technológiánál a megszilárdulás több kristályosodási pontban indul

meg. A két technológia között leginkább a gyártási költségekben, és a legyártott modulok hatásfokában van különbség.

A kristálytömb elkészítését követően precíziós eszközökkel, finom, 1 mm-nél is vékonyabb lemezekké darabolják a tömböt, elkészítik a p-n átmenetet, majd megfelelő kontaktusok felvitelét követően létrehozzák a napelem cellát. Az egykristály öntecs vágási technológiáját a 2.7. ábra szemlélteti.



2.7. ábra. Az egykristályos szilícium gyártásánál készített kristálytömb szeletelése (Casualzone, 2012)

Az egykristályos napelemek előállítási költségei, illetve az alkalmazott technológia bonyolultsága miatt a kutatók kifejlesztették az olcsóbb, egyszerűbb gyártási módszereket igénylő többkristályos napelem-technológiát, amely az előzőhöz képest alacsonyabb hatásfokkal rendelkezik, de összességében gazdaságilag kedvezőbb technológiát kapunk, mint az egykristályos napelemeknél. Laboratóriumban az egykristályos szilícium technológia elérte a 27%-os hatásfokot, modulgyártásnál ez az érték 20-22% körüli, többkristályos szilícium alapú napelemek hatásfoka laboratóriumi körülmények között 20%, míg modulgyártásnál 15-17% körüli értékkel bír (NREL, 2012).

Jelenleg a szilícium alapanyagú napeleme a teljes piaci részesedés megközelítően 90%-át jelentik, amely a technológia megbízhatóságával és a technológia elterjedtségével magyarázható. A 2008-as gazdasági válságot követően a kínai napelem piac megerősödött, ugyanis a 2008-as 8%-ról 2010 végére 55%-os piaci részesedést ért el, amely következtében Németország csökkentette a PV modulok árát, 3 €/watt-ról 1 €/watt-ra (Baldwin, 2011).

2.3.2. Második generáció

Az első napelem generáció legnagyobb hátránya, hogy a cellák hatásfoka nem igazán növelhető, ugyanis ezen aránylag kiforrott technológia elméleti hatásfoka mindössze 33% körüli (Tiwary-Dubey, 2010). A kristályos szilícium napelemek gyártásánál a modulok előállítási költségének túlnyomó részét a cellák adják. Ezen költségek csökkentése érdekében olyan technológiákat fejlesztettek ki, amelyeknél a félvezető-gyártásnál szükséges alapanyag mennyisége töredéke az első generációs cellákénál. Az energiaátalakítási hatásfok növelése érdekében napelemes rendszereknél eddig még nem alkalmazott félvezetőket fejlesztettek ki. Laboratóriumban a legsikeresebb párosításokat, kadmium-tellúr (CdTe), réz-indium-gallium-szelén (CIGS), illetve amorf és mikrokristályos szilícium (a-Si – μ -Si) anyagokkal érték el (Bernreuter, 2010).

Szilícium alapú, második generációs napelemek közül a legelterjedtebb az amorf szilícium technológia, amelynél a szilícium atomok egymástól rendezetlenül, véletlenszerűen helyezkednek el. A technológia előnye a kristályos Si technológiával szemben, hogy a gyártás során az alapanyagot alacsony hőmérsékleten, különböző technológiákkal hordozó felületekre viszik fel, nincs szükség annak megolvasztására, amely rengeteg energiát emészt fel. Az amorf napelemek hatásfoka alacsony, 12% körüli laboratóriumi, 7% körüli modul hatásfok értékekkel bír, de az alacsony előállítási költségük miatt, ugyanis az amorf technológia során alkalmazott alapanyag szükséglete nagyjából 1%-a a kristályos technológia során felhasznált szilíciumhoz képest. (Markvart-Castaner, 2003)

A CdTe napelemek a vékonyrétegű technológiával készült napelemek közül egyedüliek, amelyek a kristályos szilícium technológiát olcsóság szempontjából túlszárnyalni képesek, nagy méretű rendszerek kialakítása esetén (Zweibel et al, 2008). A kadmium tellúrid alapanyagú napelemek kutatása az 1950-es évekig nyúlik vissza, amikor felfedezték, hogy a CdTe félvezető tulajdonságai kiválóak a fotovillamos technológiára. Mára számos napelem park létezik, amely CdTe modulokkal szerelt, a legnagyobb méretű a Waldpolenz Solar Park Németországban 40 MWp teljesítménnyel (Juwi, 2012).

Hatásfokukat tekintve modulként 7-9% körüli, laboratóriumban viszont 16,5% értéket értek el. Hosszabb távon a CdTe napelemek térhódítása nagy valószínűséggel nem fog bekövetkezni, ugyanis a gyártási technológia során felmerülő környezetterhelés a kadmium esetében számottevő. 2007-ben az Európai Unió veszélyes anyagok korlátozásáról szóló irányelvében (EU-RoHS) a kadmiumot, és öt másik a környezetre leginkább ártalmas fém használatát betiltotta a Unió területén belül (First Solar, 2007).

A réz-indium-gallium-szelén (CIGS) vagy réz–indium–szelén (CIS) napelemek gyártásánál az alapanyagok környezetre gyakorolt hatásai enyhébbek, mint a CdTe napelemeknek. Mivel a CIGS napelemek a napsugárzást erősebben képes elnyelni, mint más félvezető anyagok, ezért gyártást szempontjából kevésbé alapanyag igényes. A CIGS, illetve CIS napelemeket a CdTe cellákhoz hasonlóan üveg hordozófelületre viszik fel. Részletességében a gyártási, és fejlesztési területeket a dolgozatom második felében fogom tárgyalni. A CIGS napelemek hatásfoka laboratóriumi körülmények között mintegy 20,3% körüli értékeken mozog, modulgyártás területén a Würth Solar 2005 óta foglalkozik a technológiával, az általuk elért modulhatásfok 11-12% körüli (NREL, 2012). 2011 második felében a Global Solar Energy Inc. berlini gyárában CIGS alapú flexibilis napelem modulok gyártásba kezdett lakossági felhasználásra. A gyár éves szinten 35 MW napelem előállítására képes (Global Solar, 2012). A vékonyrétegű napelemek közül lakossági felhasználás tekintetében jelenleg a szilícium alapú napelemek használata az uralkodó, de a jövőben a CIGS napelemek elterjedése várható. Az 2.8. ábrán a Szent István Egyetemen működő fix tájolású és dőlésszögű, hálózatra visszatápláló 10 kWp beépített villamos teljesítménnyel rendelkező fotovillamos mező látható. A rendszer három különálló részegységként működik, az első alrendszerben 32 db az RWE Solar GmbH által gyártott ASE-100 típusú polikristályos napelem (1. generáció) helyezkedik el, míg a második illetve 3. alrendszert egyenként 77 db a Dunasolar Kft. által gyártott DS-40 típusú amorf szilícium napelem (2. generáció) alkotja (Farkas et al, 2012).



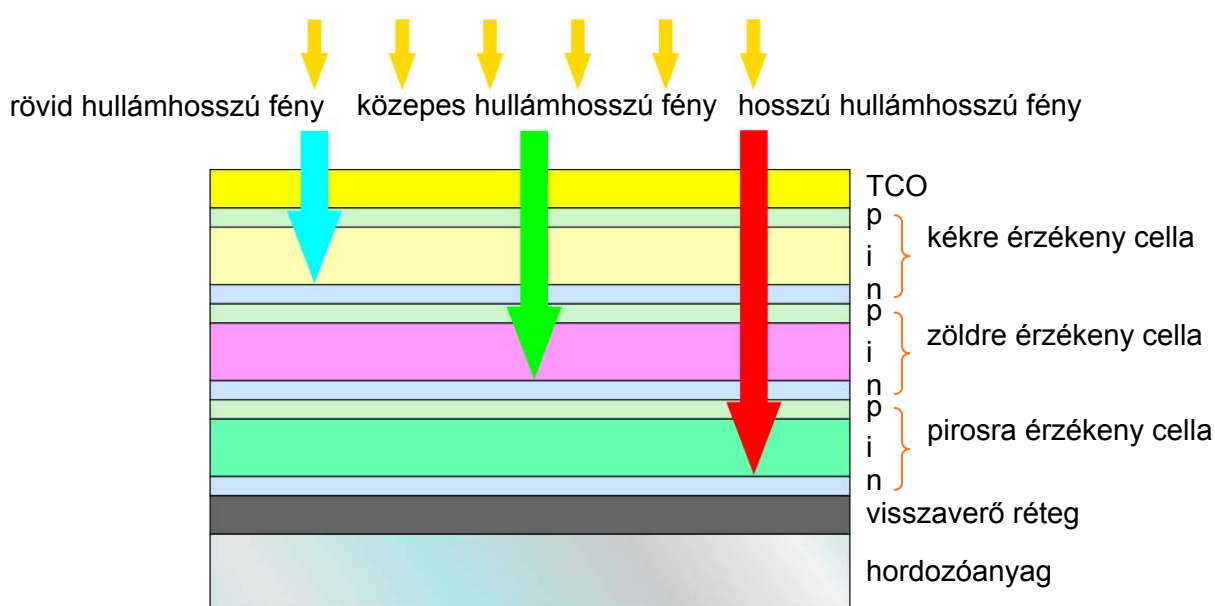
2.8. ábra. A SZIE hálózatra dolgozó PV rendszer moduljai

2.3.3. Harmadik generáció

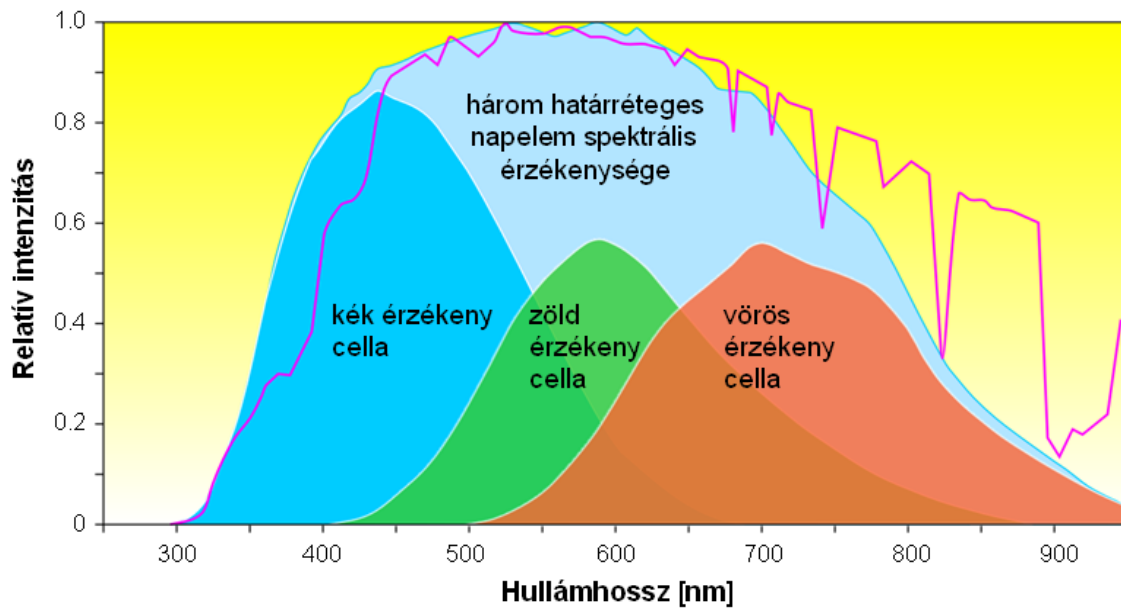
Mára napelemes kutatás területén megjelent a harmadik generáció, amely lényege, hogy a vékonyréteg technológiával gyártott fotovillamos eszközök gyenge villamos teljesítményét olyan módszerekkel fokozzák, hogy közben a gyártási költségek drasztikusan ne emelkedjenek. Ennek érdekében több határréteggel, vagy optikai koncentrátorokkal (CPV) ellátott cellákat készítenek. Az ilyen napelemes berendezések felhasználása jelenleg kizárólag a világűrben való alkalmazásokra korlátozódna, ugyanis a gyengébb hatásfokkal rendelkező napelemeknél keletkező többletsúly feljuttatása nem kifizetődő (Flamand, 2010).

A harmadik generációs napelemek közé sorolható még a festék érzékeny illetve az organikus alapanyagokból készülő napelemek, amelyek előállítási költsége alacsonyabb, mint az előbb említett több határréteggel rendelkező napelemeké.

A XXI. században, ahogy az ipar más területein is, a napelemek területén is kialakultak az új technológiák, az úgynevezett nanoszerkezetű technológiák, amelyek segítségével a több határréteggel rendelkező napelemeket létrehozhatóak. Az első, és második generációs napelemek a napsugárzás látható spektrumának csak egy bizonyos hullámhosszára (kék, zöld, vagy piros színére) érzékenyek, míg a több határréteggel rendelkező, más néven tandem cellák kettő vagy több p-n átmenetből állnak, és a cella egyes rétegei más-más tartományban lévő sugárzást képesek abszorbeálni, így összességében a hatásfokuk magasabb (Meyer, 2010). A több határrétegű napelemek működését az 2.9. ábra, a cella által abszorbeált napsugárzást a 2.10. ábra szemlélteti.



2.9. ábra. A három átmenettel rendelkező cellák működése (Farkas, 2005)



2.10. ábra. A háromrétegű napelem spektrális érzékenysége (Farkas, 2005)

A koncentrátoros napelemek (CPV) technológiájukat tekintve úgyszint több határréteggel rendelkező napelemek, de a magasabb hatásfok érdekében a beeső napfényt nagyobb területről tükröreflexió, vagy koncentrátoros optika segítségével egy pontra koncentrálja, ezzel a beeső napsugárzás mennyiségét növelik. A koncentráció mértéke meghaladhatja a napsugárzás akár több tízszeresét is. A laboratóriumokban elért legmagasabb napelem hatásfokokat CPV napelemekkel érték el, amely a mai állás szerint 44% (NREL, 2012). A koncentráció során a cellákat ért sugárzás nagymértékben elősegíti azoknak felmelegedését, amellyel a hatásfokuk romlik, ezért a hátoldalán hőelvezetéssel látják el (Du et al, 2012).

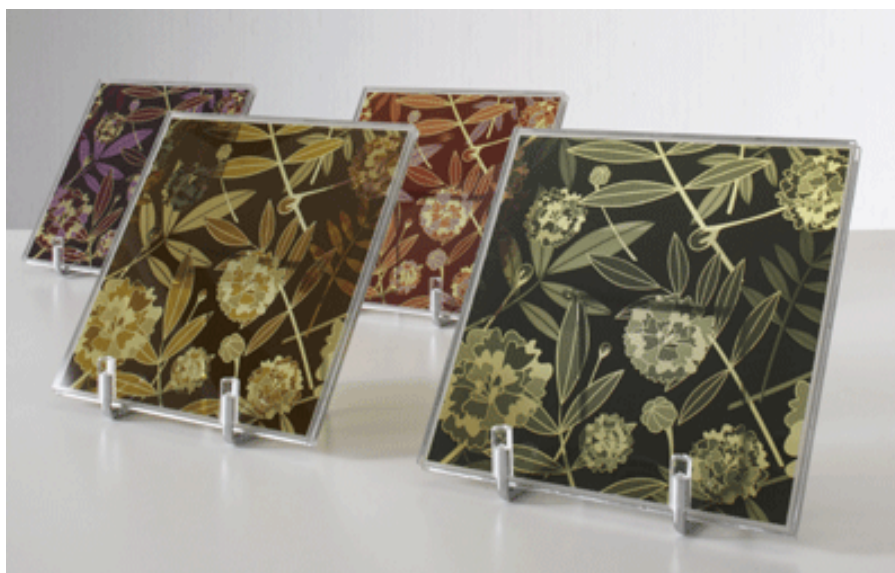
A 2.11. ábrán a koncentrátoros napelemek szerkezeti kialakítását mutatom be.



2.11. ábra. A koncentrátoros napelemek szerkezeti kialakítása (SolFocus, 2012)

A festék érzékeny napelemek (DSSC), ugyancsak vékonyfilm-technológiával készülnek. Ezen napelemeket 1991-től a svájci École Polytechnique Fédérale de Lausanne kutatóintézet tudósai, Michael Grätzel és Brian O'Regan kezdték kutatni, a napelem előállítási költségek minimalizálása céljából. A DSSC napelemek vagy Grätzel cellák hatásfoka jelenleg 11-13% között ingadozik (NREL, 2012). A technológia erőssége az alacsony előállítási költségekben, az aránylag magas hatásfokértékekben, illetve abban rejlik, hogy a modulok magasabb hőmérsékleten jobban teljesítenek, mint a többi napelem. Hátránya, hogy a napelemet alkotó elektrolit folyékony, amely kevésbé bírja az extrém időjárási körülményeket, ezen felül a modul sérülésénél az elszivárgó elektrolit káros hatással van a környezetre. Jövőbeni cél a folyékony elektrolitot szilárd halmazállapotúra cserélni (Grätzel, 2003).

A 2.12. ábra a Sony vállalat által kidolgozott festék érzékeny napelemeket szemléltet.



2.12. ábra. Sony által kifejlesztett festék érzékeny napelemek prototípusa (Sony, 2012)

A természetes alapanyagokból készített napelemek (OPV) kifejlesztésére először a 60-as években került koncepció, ugyanis a növények fotoszintézis segítségével a fény energiáját kémiai úton tárolják, és cukorrá alakítják. Az OPV napelemek fejlesztése az 1990-es évekig pangott, majd az energiaárak növekedése, és egyes napelemek gyártása során alkalmazott káros anyagok használata, mint például a kadmium kiszorítása miatt, ismét előtérbe került. Az organikus technológiában különböző szerves anyagokat próbálnak meg villamos félvezetővé tenni, amely a napsugárzás hatására villamosenergia-termelésre alkalmazhatóak. Ezen napelemek hatásfoka jelenleg még alacsony, laboratóriumban 10,0%, modulok gyártásánál 3-4%-os, de az előállítási költségek nagy mennyiség készítésénél igen kedvezőnek mondhatók (Ryu-Jang, 2010).

3. Vékonyrétegű napelemek

A XXI. században a fenntartható villamosenergia-termelés világszintű feladat elé állította a kutatókat. Napelem cellák, mint energia előállító berendezések fejlesztése területén mára jelentős eredményeket értek el, de a technológia által nyújtott lehetőségek tárháza széles. Amennyiben az NREL által készített, *1. számú mellékletként* szerepeltetett táblázatot vesszük figyelembe, megállapítható, hogy a kutatóintézetek egymással versengve próbálnak magasabb hatásfokot elérni különböző technológiákat és alapanyagokat alkalmazva.

A drága kristályos szilícium technológiával rendelkező első generációs napelemek mellett megjelentek a második, és harmadik generációs napelemek is, amelyek többsége vékonyréteg, vagy vékonyfilm technológiával készülnek. A vékonyréteg technológiában rejlő potenciál lehetővé teszi a fotovillamos napenergia-hasznosítás energiaátalakítási hatásfokának a növekedését.

Gépészmérnöki tanulmányaim során a Szent István Egyetem (SZIE) Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén végeztem mérnökdemonstrátori munkámat, amely során a fotovillamos napenergia-hasznosítást tanulmányoztam. Munkám során a kereskedelmi forgalomban lévő fotovillamos modulokkal, illetve a Szent István Egyetemen található 10 kWp teljesítményű naperőművön végeztem szimulációs feladatokat.

Szakmai gyakorlatomat a Magyar Tudományos Akadémia Természettudományi Kutatóközpontjában, a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében (MTA TTK MFA) végeztem, amely során alkalmam nyílt a vékonyrétegű napelem kutatás és fejlesztés során alkalmazott technológiák megismerésére.

Az egyetemen, és szakmai gyakorlatom során eltöltött idő alatt a fotovillamos rendszerekről átfogó ismereteket szereztem, amelyeket dolgozatomban ötvözve vizsgállok. Munkám során a vékonyrétegű napelemek gyártási eljárásait, és a laboratóriumi körülmények között készülő napelem cellák előállítását, vizsgálati módszereit elemzem, különös figyelmet szentelve a MTA TTK MFA Mikrotechnológiai Osztályán is alkalmazott molekulásugár epitaxiás eljárásra (Molecular Beam Epitaxy, MBE).

Dolgozatomban egy közepes teljesítménnyel rendelkező fotovillamos mező kialakítását vizsgálom különféle napelem technológiák segítségével, az egyes vékonyrétegű napelem technológiákat számítógépes szimuláció segítségével összehasonlítom a kereskedelmi forgalomban piacvezetőnek számító kristályos szilícium technológiákkal.

3.1. A vékonyréteg konstrukció

A vékonyréteg technológia alkalmazása széleskörűnek mondható. A mikroelektronikában vezető, félvezető, vagy szigetelő rétegek kialakítására, diffúziós gátak létrehozására alkalmazzák, e mellett antireflexiós rétegek, korrózió és kopásálló rétegek kialakítására is alkalmas, például a korszerű megmunkálás területén egyes kerámia bevonatok vékonyréteg technológiával készülnek (Quality Thin Films, 2012).

Jelenleg a kereskedelemben kapható vékonyrétegű napelemek elenyésző részét adják a teljes fotovillamos piacnak, ugyanis a kristályos szilícium technológiával rendelkező modulok részaránya megközelíti a 85%-ot. Dolgozatomban azt vizsgálom, hogy mi az oka annak, hogy a kristályos szilícium technológiával előállított napelemek még ma is piacvezetőek, amikor a vékonyréteg technológiával laboratóriumi körülmények között majdnem kétszer magasabb hatásfokot értek el a kutatók, mint a valaha kifejlesztett leghatékonyabb kristályos cella.

A napelemes kutatások során nagyjából fél évszázada keresik a kutatók azokat a félvezető anyagokat, amelyek optimálisak napelemek előállítására. Fotovillamos cellák előállítására nem csak az elemi, hanem a vegyület-félvezetők is alkalmasak, melyek a kristályos szilícium technológiához viszonyítva számos hasznos tulajdonsággal rendelkeznek. A szilícium alapú napelemek mellett a réz származékok, illetve a mikroelektronikában is használatos III-V csoport elemei a leginkább alkalmasak fotovillamos cella készítésére.

A vékony film napelemek (thin film solar cell, TFSC) előállításánál, adott hordozólapra egy vagy több rétegben fotovillamos anyagot hordanak fel vékony rétegvastagsággal. A felvitt rétegek vastagsága széles skálán változhat, néhány nanométertől akár tíz mikrométerig. Ezen napelemek a kristályos szilícium félvezetők vastagságának század részével is képesek a rájuk eső napsugárzás teljes abszorpciójára, így például az amorf szilícium napelem modulok előállítása gazdaságosabb, mint a kristályos moduloké (PV Status Report, 2011).

A különböző félvezető anyagokat számos módszerrel képesek a hordozófelületekre felvinni, amelyek legtöbb esetben olcsó nátronüveglap, műanyaglemez, szilícium ostya vagy egyéb hordozófém. A hordozóanyag kiválasztása függ, hogy laboratóriumi, vagy kereskedelmi forgalomba alkalmazzák a cellákat, függ a gyártani kívánt napelem sorozatnagyságától, illetve az egyes elemek alkalmazási helyétől, illetve módjától. Amennyiben laboratóriumi kísérletre alkalmazzák, akkor szilícium ostya, vagy üveg, ha kereskedelmi mennyiségben készítik a modulokat, úgy üveg, műanyag, speciális fém, vagy gumialapú hordozót használnak. Némely vékonyrétegű napelemet például olyan rugalmas anyagból készítenek, amelyet akár feltekercselve is lehet szállítani, annak a hordozólapja gumi és polimer anyagok ötvöze.

A vékonyrétegű napelemeket alapanyaguk szerint a következőképpen szokták csoportosítani:

- amorf szilícium (a-Si) és egyéb vékonyrétegű szilícium (TF-Si),
- kadmium-tellúr (CdTe),
- réz-indium-gallium-szelén (CIGS), vagy réz-indium-szelén (CIS),
- festék érzékeny (DSC), vagy szerves napelemek (OPV).

A szilícium szelettechnológiája, illetve a vékonyréteg technológia között a p-n átmenet kialakítása is különbözik, ugyanis a szelettechnológiával a p-n átmenetet az alapanyag felületébe adalékanyag diffúziója során hozzák létre, ezzel szemben a vékonyréteg technológiában az egyes rétegek találkozása adja a p-n átmenetet. Amennyiben a p-n átmenet egymástól különböző anyagokkal készítik heteroátmenetről beszélhetünk (Farkas, 2005).

A napelemekre eső sugárzás egy része az előlap oldali kontaktusokról visszatükröződik. Ennek érdekében a kristályos szilícium technológiánál úgynevezett eltemetett kontaktusokat fejlesztettek ki, amelyet lézervágó segítségével úgy készítenek, hogy a szilíciumcellába merőlegesen árkokat vágnak, majd az árkot kitöltik az előlapi kontaktussal, így a cella előlapján a kontaktusról visszaverődő napsugárzás mennyisége minimálisra csökkenthető. Mivel a vékonyrétegű napelemeknél a kontaktusok elsüllyesztése nem járható út, ezért a negatív, előlap-oldali kontaktusokat átlátszóvá tették. Az ilyen cellák készítése közben a szilíciumot, vagy más félvezetőt egy olyan hordozóanyagra (üvegre, műanyagra vagy fémfóliára) hordják fel, amelyet előzőleg átlátszó vezető oxidréteggel (transparent conducting oxide, TCO) láttak el. Egyes esetekben a hordozólapra napsugárzást visszaverő, majd a félvezető rétegeket viszik fel, a TCO réteg csak ez után kerül a napelemre. Ennél a fajta kialakításnál a nap sugarai a hordozórétegen nem süt keresztül, ugyanis azok a napelem hátoldalát teljesítik meg. Ennek a fajta kialakítás lényege, hogy a beeső sugárzás ne verődjön vissza, illetve ne nyelődjön el a hordozórétegben, így növelve a napelem hatékonyságát.

A TFSC technológia legfőbb előnyei az anyagtakarékos kialakítás, illetve, hogy a technológiával a kristályos szilícium napelemekhez képest nagyobb modulméreteket lehet kialakítani. Hátrányuk a leválasztás egyenetlensége, illetve az elkészített modulok hosszú távú stabilitása. Amíg a kristályos szilícium gyártásánál a lapocskákat egy szilícium öntecs gyémántvágó koronggal történő szeletelésével egyenletes vastagságú, addig például a kémiai gőzfázisú leválasztásnál a kialakuló réteg vastagsága minimális eltéréseket mutathat.

Mivel a TFSC technológiával készülő napelemek számos gyártási technológiával készülnek, az összes bemutatására, elemzésére nincs lehetőségem, ugyanis vannak olyan eljárások, amelyek csupán egy-két gyártási paramétertől különböznek egymástól, ezért kizárólag azokat

az eljárásokat fogom vizsgálni, amelyek a gyakorlatban leginkább használatosak, vagy amelyik a többi technológiától nagymértékben különbözik, és a jövőben a napelemek gyártásánál meghatározó technológia lehet.

A félvezető anyagok hordozólapra történő felhordásnak a technológiája nagyban függ a felhordani kívánt alapanyagtól. A leválasztások tekintetében két főcsoportot különböztetünk meg, a kémiai, illetve a fizikai leválasztást. Kémiai leválasztásnál a folyadék halmazállapotú elővegyületben kémiai átalakulás megy végbe a hordozófelületen, amely során vékony szilárd réteg képződik. A technológia során a hordozóanyagot folyadék veszi körül, így a leválasztódás annak teljes felületén megy végbe, a teljes anyagot körbevéve, ezért a kémiai leválasztási folyamatok kevésbé irányíthatóan mennek végbe. Fizikai leválasztásnál a vékonyréteg képzése mechanikai, elektromechanikai, vagy termodinamikai módon történik. A fizikai leválasztási folyamatok tökéletes működéséhez alacsonynyomású gőzkörnyezetet kell biztosítani, amelyet vákuumkamrában végzik, így a leválasztani kívánt anyag a tiszta kamrában szabadon képes áramolni. A fizikai leválasztási folyamatokkal a lerakódást irányítottan lehet végezni. A PV technológiában alkalmazott főbb kémiai leválasztások közé a következő eljárások sorolhatóak:

- **CVD** - chemical vapor deposition - kémiai gőzfázisú leválasztás. Sorozatgyártásban a vékonyrétegű fotovillamos celláknál a vékonyréteg kialakítására elsősorban ezt a fajta rétegleválasztás technológiát, azon belül is a plazmával elősegített kémiai gőzfázisú rétegleválasztást (PE-CVD) alkalmazzák. A művelet hidrogén illetve szilán gáz segítségével megy végbe.
- **CMP** - chemical mechanical planarization - kémiai mechanikai vékonyréteg készítés. Ennél a folyamatnál a vékony réteg kialakítására kémiai és mechanikai erőket együttesen, hibrid rendszerként használnak. A folyamat során kémiai maratás, illetve finom polírozás együttese jelenik meg. Ezzel nagyon finom felületet lehet a félvezetőknél kialakítani. A technológiát amorf szilícium napelemeknél alkalmazzák, de a technológia kevésbé elterjedt.
- **ALD** - atomic layer deposition - atomi rétegleválasztás. Ez a technológia több, egymást követő gáz halmazállapotú kémiai folyamaton alapul. A legtöbb ALD technológiával készülő félvezető kétfajta vegyi anyagot használ, amelyeket prekursoroknak nevezünk. Ezek a prekursorok egymást cserélve reagálnak a hordozólapka felületével, amely során vékony réteg rakódik le a lapka felületére. A CVD technológiával szemben itt egybeolvadnak a rétegek. Az ALD technológiát több p-n átmenettel rendelkező GaAs napelemeknél alkalmazzák.

A PV technológiában alkalmazott főbb fizikai leválasztások közé a következő eljárások sorolhatóak:

- **PVD** – physical vapor deposition – fizikai gőzfázisú leválasztás. Az eljárás során a párologtató villamos ellenálláson alapuló fűtő betéttel olvasztja meg az alapanyagot, majd gőzfázisba hozza. A folyamat nagyvákuumban történik annak érdekében, hogy a gőz a hordozófelületen, és nem egy gáznemű szennyezőanyagon váljon ki, illetve, hogy a szennyezőanyag ne kerüljön a hordozólapka felületére.
 - o **EBPVD** - electron beam physical vapor deposition - elektron sugaras fizikai gőzfázisú párologtatás. A módszer során elektronágyú egy nagy energiájú elektron nyalábot lövell az elpárologtatni kívánt anyagra. Ennél a technológiánál az anyag fűtése nem egyenletes, ezért alacsonyabb gőznyomású anyagokat lehet vele leválasztani.
 - o **MBE** - molecular beam epitaxy - molekulásugár epitaxia. A technológia segítségével lassú növesztést érhetünk el. A hordozóra az anyagot atomi szinten lehet leválasztani, mint például a GaAs estén egy réteg galliumra egy réteg arzént visznek fel, majd ezt ismétlik egymás után. A technológia CIS, CIGS napelemeknél használatos.
- **Porlasztás**. (Sputtering) A technológia során egy szilárd testet nemesgázok ionjaival bombázzák, ennek következtéből atomok lépnek ki belőle, majd azokat választják le a hordozóanyag felületén. A folyamat során alacsony nyomásra, és hőmérsékletre van szükség. Napelemek gyártásánál amorf szilícium, és CIS, CIGS technológiáknál alkalmazzák. A porlasztásos technológiák közül hármat különböztetünk meg: Diódás (DC), Rádiófrekvenciás (RF), Magnetronos.
- **VTD** - vapor transport deposition - gőz transzport lerakódás. Polikristályos CdTe vékonyrétegű napelemeket növesztenek ezzel a technológiával. A folyamat alacsony vákuum mellett megy végbe, magas hőmérsékleten. A technológia segítségével minőségi CdTe réteget lehet a hordozólapkára felvinni. Jelenleg gyártás területén a VTD eljárás CdTe napelemek készítésére van specializálva, de egyéb félvezető anyagokat is képesek vele hordozólapkákra vinni. Mivel a kadmium Európában a környezetet károsító tiltott anyagok között szerepel, a technológiát az Amerikai Egyesült Államokban, és Kínában kutatják.

3.2. A vékonyrétegű napelemek gyártási technológiák

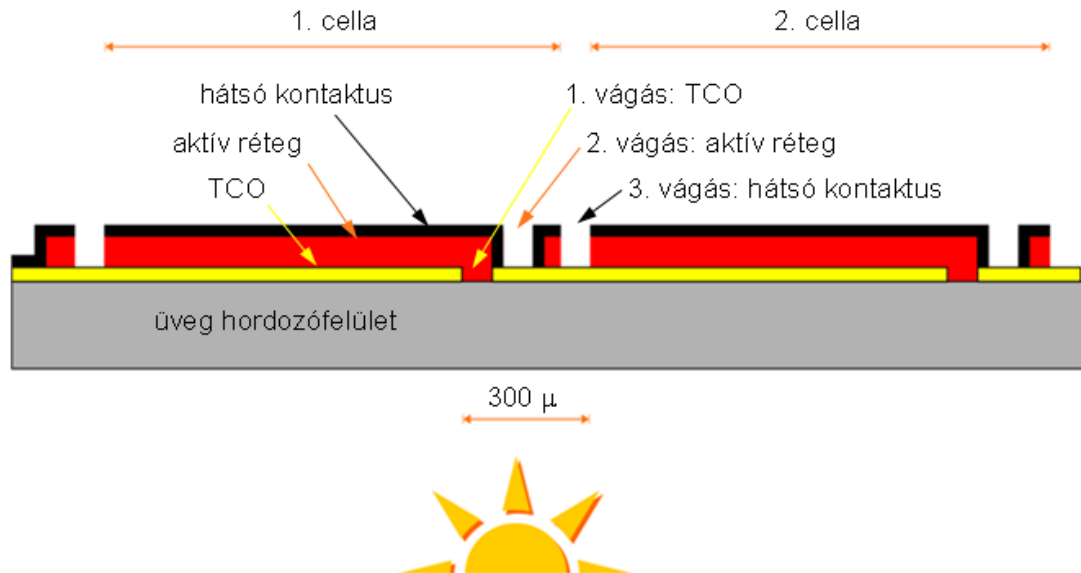
Ebben a fejezetben egy kémiai és egy fizikai leválasztási technológiát mutatok be, kémiai eljárások közül a gyártásban is közkedvelt CVD technológiát amorf szilícium napelem esetén, és a fizikai leválasztások közül az MBE eljárást CIGS és CIS napelemeknél, ugyanis ezzel a technológiával készülnek a legmagasabb hatásfokú napelem cellák a világon.

3.2.1. Amorf szilícium napelem előállítása CVD technológia segítségével

A kémiai vákuum párologtatás technológiája mind laboratóriumi, mind nagyüzemben előállított napelemek esetén alkalmazható. Ezen alfejezetben a sorozatgyártást fogom bemutatni CVD technológia segítségével.

A teljes munkafolyamat során létrejövő struktúrát a 3.1. ábra mutatja be. A kémiai gőzfázisú leválasztás segítségével előállított amorf szilícium napelemek technológiája három részből tevődik össze:

- átlátszó vezető oxidréteggel (TCO) ellátott hordozóüveg elkészítése,
- napelem cella előállítása,
- modul összeszerelése.



3.1. ábra. Amorf napelemek elkészítése háromlépéses szeparációval (Farkas, 2005)

A gyárba kiváló minőségű borszilikát üveget szállítanak, amely az amorf szilícium hordozólapjaként fog szerepelni. A gyártás első lépéseként pontos méretre vágják, és lekerekítik az üveglap széleit, majd mosásnak vetik alá, amely során az üvegben keletkezett feszültségeket szüntetik meg. Ezt követően CVD technológiát alkalmazva vékony rétegben

SnO_2 -t hordanak fel, ez fogja a napelem előlapi kontaktusát biztosítani. A felhordást követően lézervágóval felcsikozzák (1. vágás) a TCO réteget, majd újból mosásnak vetik alá, amely ilyenkor a felesleges SnO_2 -t távolítja el a modulról, illetve a vágás során keletkezett feszültségeket. Ez után 20 darab TCO réteggel ellátott borszilikát üveget helyeznek egy állványra, majd az előmelegítő kamrában 200°C hőmérsékletre hevítik.

A második lépésként a cella kialakítás következik PECVD technológiát alkalmazva. Az előkészített, felhevített hordozólapokra hat réteg amorf szilíciumot párologtatnak, ez lesz az aktív réteg. A párologtatást követően a napelemek átkerülnek egy hűtő berendezésbe, ahol lassú hűtést alkalmazva szobahőmérsékletre csökkentik a hőmérsékletüket, a lassú hűtésnek köszönhetően minimálisak maradnak a feszültségek az üvegben. Kihűlésüket követően lézervágó segítségével elvégzik a második vágást, amely során felcsikozzák az amorf szilícium réteget. Ezt követően PVD technológiával ZnO -t és Ag -t visznek fel a napelem hátoldalára, amely a napelem hátoldali kontaktusaként fog működni. A fizikai gőzfázisú leválasztást követően egy újabb lézervágó segítségével az amorf szilícium, illetve a ZnO réteget csikozzák fel (3. vágás). A kész napelem cella minőségét ezt követően műnap segítségével, és szemrevételezéssel ellenőrzik. A gyártás során véletlenszerűen kiválasztanak egy-egy napelemet, amelyet mikroszkópos felületvizsgálatnak vetnek alá, amely során a felvitt rétegek vastagságát, egyenletességét vizsgálják.

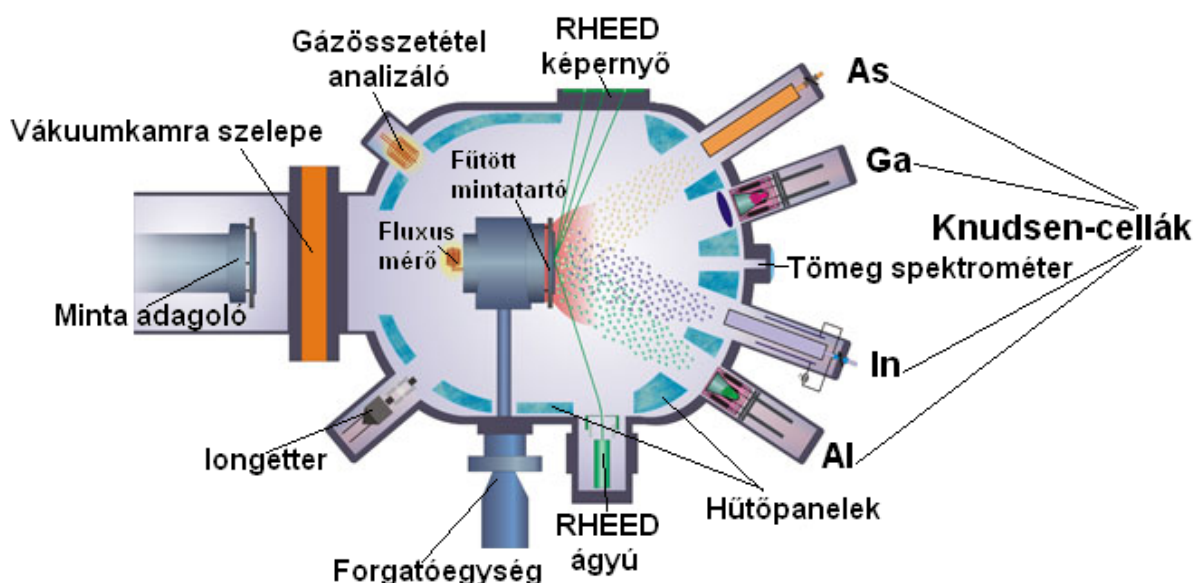
Harmadik lépésként a fotovillamos modul összeszerelése következik. Az összeszerelés során először a modul széleit csiszológép segítségével lekerekítik, ezzel előkészítik a laminálásra. Ezt követően ultrahangos ragasztó géppel egy alumínium szalagot ragasztanak a napelem hátoldalára, ezzel az előlapi és a hátoldali kontaktus kivezetésre kerül. A napelem felületére ezt követően egy EVA (ethylene-vinyl-acetate, elilén-vinil-acetát) réteget helyeznek, amely szigetelő és tokozó szerepet tölt be. Az EVA rétegen lyukasztógéppel lyukat készítenek, majd ezen húzzák keresztül az előzőleg elkészített alumínium szalagot, majd lefedik a napelemet egy üveglappal, amelyet az EVA réteghez hasonlóan furattal láttak el az alumínium szalagok kivezetésére. Az így egymásra helyezett rétegeket egy laminátorgép segítségével laminálják. A folyamatot követően a kész napelemeket újból műnap tesztnek vetik alá, és szemrevételezik látható hibák elkerülése véget. A tesztelést követően elkészítik a modulok hátoldali vízhatlan csatlakozódobozát, amelyben az alumínium szalagokat UV álló vezetékkel látják el, majd folyékony ragasztóanyaggal kitöltik a doboz üregeit.

Utolsó lépésként a már kész napelem modulokat harminc napra kihelyezik a szabadba, természetes napsugárzásnak, környezeti hatásoknak, majd ezt követően harmadszor is műnapnak vetik alá.

3.2.2. A CIGS és CIS napelemek előállítása MBE technológia segítségével

A molekulásugár epitaxia kifejlődése az 1960-as évek elejére tehető. A technológia a fotovillamos félvezetőeszközök területén kimagasló eredményeket ért el. A jelenleg vezető 44%-os hatásfokot is az MBE technológiával készült napelem cellával érték el. A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézete Magyarországon egyedülállóan rendelkezik fotovillamos cellák készítésére alkalmas MBE berendezéssel, amellyel laboratóriumi szinten képesek hordozószeletekre különböző félvezető anyagokat leválasztani.

A technológia során az MBE kamrájában ultranagy vákuum (ultra-high vacuum, UHV) mellett történik a fizikai leválasztódás, ugyanis a kialakuló rétegek minősége megköveteli a szennyezőanyagok minimalizálását. A leválasztáshoz szükséges vákuum értéke legalább 10^{-10} mbar kell hogy legyen, amely közelíti a világűrben lévő nyomásértéket. A leválasztás hőmérséklete III-V anyagok esetén 200-550 °C között változtatható. A vákuumkamrában elhelyezett minta, amelyre a leválás történik, úgy van orientálva, hogy a leválasztani kívánt molekulák forrásai, a Knudsen-cellák közvetlenül ráirányuljanak (Nemcsics és tsai, 2010). Ezen a külön fűtéssel rendelkező Knudsen-cellák arzént, galliumot, indiumot és alumíniumot tartalmaznak, amelyekből az MBE eljárás során molekulák válnak ki, és rakódnak le a minta felületén. A molekulafluxus intenzitását PLC (Programmable Logical Controller, Programozható logikai vezérlő) vezérléssel, az egyes Knudsen-cellák blendéinek mozgatásával oldják meg. Az MBE főkamráját, amelyben a leválasztási folyamat megy végbe a 3.2. ábra szemlélteti.



3.2. ábra. Az MBE főkamrájának a kialakítása (Roman, 2011)

Az MBE eljárással a leválasztási sebesség másodpercenként akár 0,1-1 atomsor lassúsággal is képes működni, amely elősegíti a rétegek epitaxiális növekedését. Az eljárás előnye, hogy az alacsony hőmérséklet miatt a leválasztott rétegben a hibahelyek kialakulása, illetve a leválasztott rétegek közötti diffúzió minimális (Nemcsics és tsai, 2010).

Az MBE Knudsen-celláiban egyes alapanyagok, mint az Al vagy az As szilárd halmazállapotban, ultra-finom por formájában van tárolva, mielőtt lassan szublimálni kezdenének. A gáz halmazállapotú anyagok ezt követően a mintára csapódnak le. A folyamat során a kristályosodás vizsgálatához reflexiós nagy energiájú elektrondiffrakciót (reflection high energy electron diffraction (RHEED) használnak, amellyel az egyes kristály rétegek növekedése könnyedén megvizsgálható (Nemcsics et al, 2009).

A berendezés három kamrából áll egymástól zsilipelve. Az előbb bemutatott főkamrában a leválasztás történik, a második kamrában egy turbómolekuláris- és egy iongetter szivattyú található. A minták be, illetve kivételéhez egy harmadik, úgynevezett elővákuum kamrát alkalmaznak, amely egy főkamrához képest kisebb turbómolekuláris szivattyúval van ellátva annak érdekében, hogy mintacsere esetén a főkamrában lévő vákuum a legkisebb mértékben csökkenhessen. A szeletek beadagolására manuálisan működtetett mágneses továbbító egységet fejlesztettek ki (Nemcsics és tsai, 2010).

A folyamat során a rendszer túlmelegedésének kiküszöbölésére -196 °C-on folyékony, vagy hideg nitrogéngázt alkalmaznak.

Az MTA TTK MFA molekulásugár epitaxiás berendezése a 3.3. ábrán található.



3.3. ábra. Az MTA TTK MFA molekulásugár epitaxiás berendezése

3.2.3. A laboratóriumi, illetve a sorozatgyártási folyamatok ötvözése

A laboratóriumi körülmények között előállított fotovillamos cellák általában 1-4 cm² mérettel rendelkeznek, ezzel szemben amorf szilícium napelemeknél négyzetméteres felületeket képesek egyszerre előállítani. Jelenleg a kereskedelmi forgalomban kapható vékonyrétegű napelemek hatásfoka nagyjából a fele a laboratóriumban előállítható cellákhoz képest. Ennek az oka, hogy a laboratóriumi előállítás időigényes, és költséges eljárást jelent, amelyre sorozatgyártás esetén nincs lehetőség.

A magas költségekkel előállított, több határréteggel rendelkező fotovillamos modulok felhasználása szinte csak az úrkalkulációknál található meg. A jelenlegi gyártási költségek nem engedik meg, hogy ezeket a cellákat sorozatgyártásban készítsék.

A magas hatásfokkal rendelkező fotovillamos cellák sorozatgyártásának megoldására az MBE módszer jelenthet alternatívát. Sorozatgyártásnál 10-15 MBE berendezést, egy időben egy előre kifejlesztett program segítségével, számítógéppel vezérelt adagolás mellett lehetne elképzelni. A folyamat során elkészült cellákat megfelelő hűtőbordázattal ellátva koncentrátoros fotovillamos modulokként lehetne összeszerelni.

Jelenlegi tapasztalatok alapján az MBE technológiával előállított napelem cellák költségei igen magasak, ugyanis a molekulásugár epitaxiás berendezések szinte mindegyike egyedileg készített, az alkalmazási igényeknek egyedileg kialakítva, nem számítanak sorozatban gyártott terméknek, ezért a beruházási költségek is igen magasak, az MTA TTK MFA tulajdonában lévő berendezés újonnan hozzávetőlegesen 200 millió Ft körül mozog. Amennyiben viszont szériagyártásra készülne a berendezések, az MBE bekerülési költségei is nagyban csökkenhetne, ez által a technológia megfizethetőbb lehetne.

Mivel a gazdasági válság visszaesést jelentett a fotovillamos gyártástechnológia fejlődése területén is, ezért nem valószínű, hogy a költséges MBE technológiával a gyártó cégek a következő években sorozatgyártásra állnának rá, de remélhetőleg a következő évtizedben alkalmas lesz a fotovillamos iparág a magas hatásfokkal rendelkező napelemek sorozatgyártására.

Jelenlegi piaci körülményeket nézve a kristályos szilícium technológián kívül csak néhány vékonyrétegű napelemnek sikerült sorozatgyártásban is helyt állnia. Dolgozatomban egy fiktív, közepes teljesítményű hálózatra visszatápláló fotovillamos mezőn vizsgálom, hogy a vékonyréteg technológiával készülő, kereskedelemben kapható PV modulok képesek-e felvenni a kristályos szilíciummal az ütemet.

3.3. Fotovillamos cellák vizsgálati módszerei

Ebben a fejezetrészen a laboratóriumi körülmények között, illetve sorozatgyártásban készülő vékonyfilm technológiával rendelkező fotovillamos cellák/modulok minőségére vonatkozó vizsgálati módszereket mutatom be.

3.3.1. A Standard Test Conditions technológia

A napelemek gyártása során több alkalommal alávetik a modulokat egy szabványos vizsgálatnak, amellyel az elkészülő napelemek minőségét lehet ellenőrizni. A Standard Test Conditions (STC) vagyis standard teszt feltételek világviszonylatban alkalmazott technológiát jelent. A napelemek tesztelésére nap szimulátort, avagy műnapot alkalmaznak. Az MTA TTK MFA Mikrotechnológiai osztálya 2008 óta rendelkezik PV elemek bemérésére és minősítésére alkalmas berendezéssel, amelyet a 3.4. ábrán szemléltetnek.



3.4. ábra. Műnap szimulátor fotovillamos modulok minősítésére (MTA TTK MFA)

A műnap szimulátor az Energy Equipment Testing Service Limited (EETS), PVMT 11250 Modul Tester berendezése, amely 1500 x 750 mm nagyságú napelemeket képes tesztelni az STC körülményeknek megfelelően, $I = 1000 \text{ W/m}^2$ besugárzás, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet, illetve $AM = 1,5$ érték mellett. A berendezést egyedi értékekkel is lehet működtetni. Az általa mért

paraméterek a következők: üresjáratú feszültség (V_{OC}), rövidzárási áram (I_{SC}), maximális teljesítmény (P_{MPP}), feszültség (V_{MPP}) és áram (I_{MPP}), modulhatásfok (η), illetve a kitöltési tényező (FF).

Az STC teszten minden egyes napelemet minősíteni kell, minősítéséről dokumentációt kell készíteni. Sorozatgyártásban a tesztelést gyorsabban kell elvégezni, ezért ott leginkább villanócsöves technológiát alkalmaznak.

3.3.2. Az European Solar Test Installation szabványok

Európai Unióban a napelemekre szigorúbb előírások vonatkoznak, mint a világ többi részén. Az STC körülményeken túl CEC, Joint Research Center, Ispra, Olaszországban, az EU-s kutatóintézetben kifejlesztettek egy komplexebb vizsgálati módszert a napelemek minősítésére. Az European Solar Test Installation (európai szolár teszt telepítés, ESTI) az ISO 17025-ös szabvány szerinti eljárás, amely a fotovillamos eszközök kalibrálására, illetve hitelesítésére vonatkozik.

Az Isprai laboratóriumban egy, illetve többkristályos szilícium modulokon felül vékonyréteg eljárással készülő napelemeket is tesztelnek, többek között amorf szilícium, CdTe, CIS, CIGS, illetve több határretegű napelemet. A laboratórium által tesztelhető cellák mérete a néhány mm^2 -től akár több m^2 -ig terjedhet. Az eljárás során az STC technológia során vizsgált paraméterek mellett a következő eljárásokat tartalmazza:

- Keretszerkezet és a villamos csatlakozások szemrevételezése, minőségi kritériumok alapján. A modul összeszerelésének minőségét vizsgálják.
- Árnyékolásból adódó forró pont (hot-spot) vizsgálat, amely során egy cellát árnyékolva vizsgálják, hogy keletkezik-e lokális túlmelegedés a modulnál.
- A modulok nedvesség és vízállósága különböző hőmérsékleti viszonyok mellett. A napelemeket extrém időjárási körülmények között vizsgálják.
- Statikus terhelési teszt, amely során egy meghatározott tömegű súlyt helyeznek a modul felületére, ezzel ellenőrzik, hogy bírja-e ha például telepítés során rálépnek.
- Fagy, illetve hő teszt.
- Modul csavarási tesztje. A teszt során a modult befogják egy keretbe, majd a napelemet $2\text{-}5^\circ$ -ban csavarni kezdik, amellyel a szél hatását szimulálják a modulon.
- Jégeső szimulátor, amikor 25 mm átmérőjű jéglabdákat nagy sebességgel ütköztetnek a modul felületéhez.

4. Közepes teljesítményű fotovillamos rendszer tervezése

2012. májusában átadásra került a Szent István Egyetem Gödöllői kampuszán a Műszaki és Természettudományi Oktató Központ (MTOK). A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósult meg. A beruházás célja gyakorlatorientált képzési és kutatási terek létrehozása a Gépészmérnöki Kar hallgatói számára. A projekt során 10500 m² alapterületű létesítményt hoztak létre a gödöllői Mezőgazdasági Eszköz- és Gépfejlődéstörténeti Szakmúzeum területén. A fejlesztés során az épületre szintraépítés mellett az épület teljes gépészeti és villamos hálózata korszerűsítésére is sor került. Az elkészült létesítmény könnyűszerkezetes tetővel lett ellátva.

Az épület felújításával a Gépmúzeum villamosenergia-fogyasztásában nagymértékű növekedés figyelhető meg.

A beruházás során fontos szerepet játszott a Gépészmérnöki Kar hallgatóinak gyakorlatorientált képzési terület kialakítása, ezért különböző megújuló energiaforrások befogadására alkalmassá alakították ki az épületet. Jelenleg az épület hűtését, fűtését egy geotermikus hőszivattyú biztosítja, amelyet 10 darab vertikális, 100 m mélységű földszonda szolgál ki. E mellett az épületen jelenleg szélgép, illetve vákuumcsöves napkollektorok is működnek. Mivel az épület tervezése során az energiatudatos, megújuló energiákat preferáló kialakítások komoly szempontként szerepeltek, az elkészült létesítmény adottságai megfelelőek a fotovillamos modulokkal való energiatermelésre.

Feladatom során a Műszaki Természettudományi Oktató Központ villamosenergia-ellátására egy közepes teljesítményű fotovillamos energiaellátó rendszert tervezek különféle alternatívákkal. Célom számítógépes szimuláció segítségével megvizsgálni, hogy a különböző vékonyrétegű technológiával készülő napelemek (CIS-CIGS, CdTe, a-Si) alkalmazása nyújthat-e a beruházó számára megfelelő alternatívát a kristályos szilícium modulokkal szemben.

Feladatom során bemutatom az általam kiválasztott rendszert, megvizsgálom a telepítés helyszínét napenergia hasznosítás szempontjából, majd kidolgozok egy hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszert, és a hozzá tartozó alternatívákat, majd értékelem őket. Feladatom során a numerikus számítások, illetve a rendszer méretezésének ellenőrzésére az Orion Energy Corporation által kifejlesztett Nsol! 4.4.0, illetve az SMA Sunny Design 2.30. verziószámú fotovillamos rendszertervező programjait használtam.

4.1. Kiindulási adatok a tervezéshez

A feladat során a fotovillamos mező kialakítására szolgáló épületegyüttest vizsgálom, hogy megfelelő-e a fotovillamos modulok telepítésére.

4.1.1. A létesítmény makro környezete

A hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszer tervezését a telepítésre kiválasztott régió vizsgálatával kezdtem. Részletesen vizsgálat alá vettem a fotovillamos rendszer energiatermelését befolyásoló éghajlati, és napsugárzási paramétereket (Galambos, 2010).

Magyarország éghajlati viszonyai

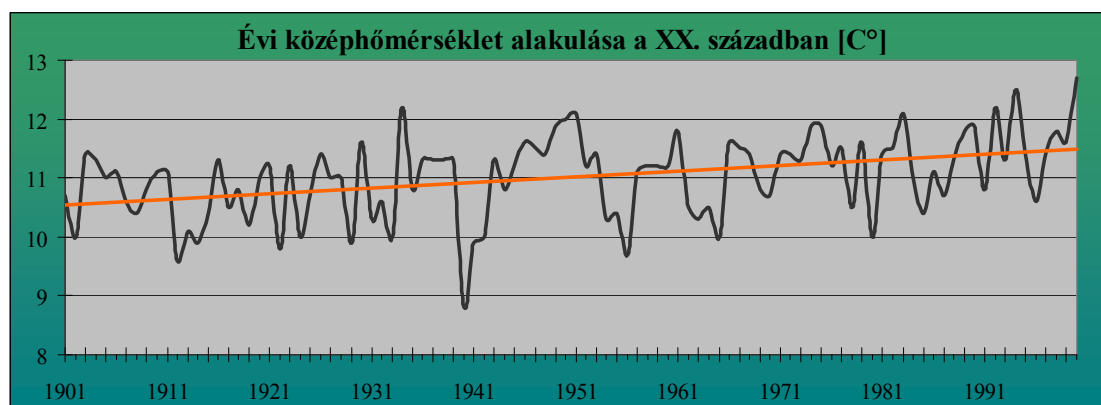
Magyarország Európa közepén, a Kárpát-medence területén helyezkedik el. Éghajlatát három éghajlati terület határozza meg, keletről a nedves kontinentális, nyugatról az óceáni, és délnyugatról a mediterrán éghajlat, amelyek együttese alakítja a mérsékeltövi kontinentális klímát. Tekintettel az ország elhelyezkedésére, és méretére, elmondhatjuk, hogy az említett éghajlattípus határozza meg a teljes területét. A mérsékeltövi kontinentális éghajlatra jellemzően Magyarországon is a négy évszak, illetve a nagy éves hőmérsékletmozgás.

Környezeti levegő hőmérséklete

Magyarország különböző nagyvárosaiban a XX. században elkezdődtek meteorológiai mérések, amelyeket az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) feljegyzett. Az OMSZ honlapján ezek az értékek térítésmentesen elérhetőek.

Száz éves átlagot figyelembe véve kijelenthető, hogy a vizsgált területen az átlaghőmérséklet januárban a legalacsonyabb, ilyenkor sokszor elérheti a -10°C -ot is. Ezzel szemben júliusban mérhető a legmagasabb hőmérséklet, amely gyakorta meghaladhatja a 30°C -ot is.

Az évi középhőmérséklet változását az elmúlt évszázadban, a 4.1. ábra szemlélteti.

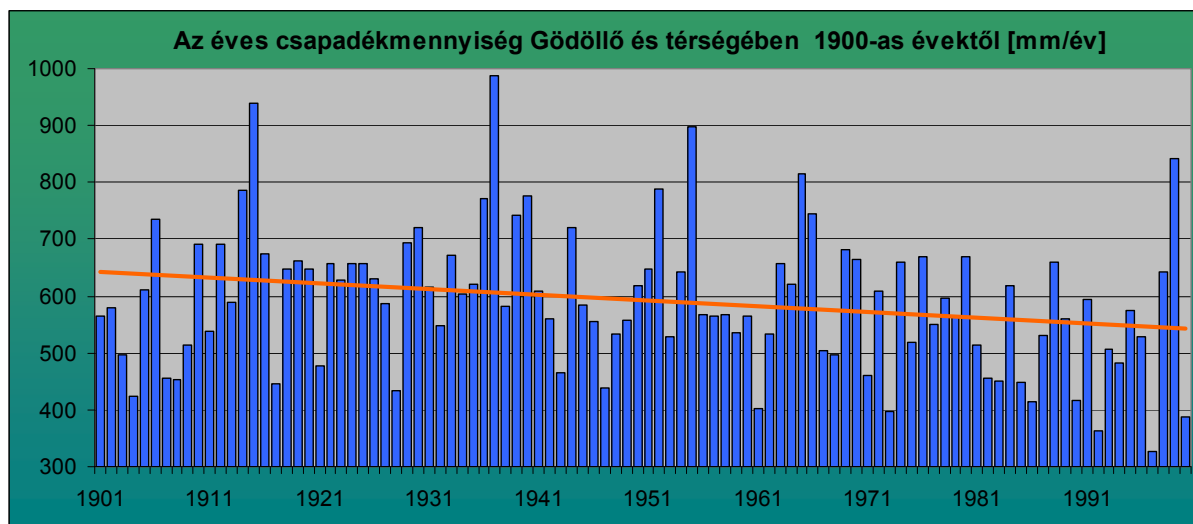


4.1. ábra. Évi középhőmérséklet alakulása a XX. században (saját készítés, OMSZ adataival)

A 4.1. ábrán jól látszódik, hogy az adott területre viszonyított éves középhőmérsékleti értékekre illesztett trendvonal szerint a XX. század során Budapesten és a környéki nagyvárosokban majd 1 °C-t növekedett a középhőmérséklet, amely az urbanizáció következményeként tudható be. Hősziget jelenségnek nevezzük azt a hatást, amikor a város centrumától kifelé haladva csökken a levegő hőmérséklete. Mivel a napelemek teljesítményét csökkenti a környezeti hőmérséklet növekedése, ezért a tervezés során az egyes hónapok átlaghőmérsékleteit szem előtt kell tartani.

Gödöllő és környékének csapadékvizsgálata

A csapadékvizsgálathoz szintén az OMSZ honlapján elérhető adatokat használtam. A 4.2. ábra Gödöllő és környékének a csapadékvizsgálata mutatja be az elmúlt évszázadra viszonyítva.



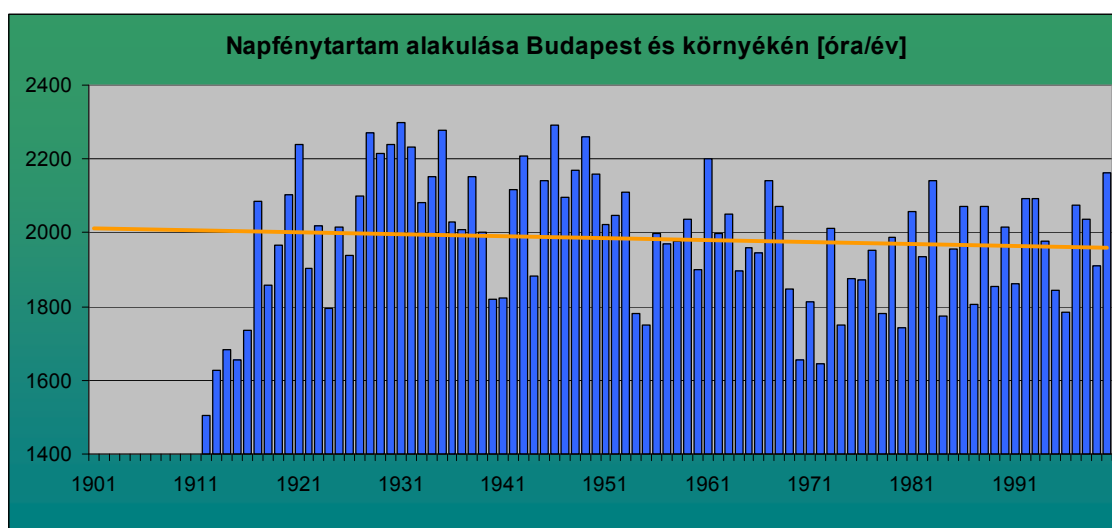
4.2. ábra. Az éves csapadékmennyiség Gödöllőn (saját készítés, OMSZ adataival)

Az éves csapadékmennyiségek alakulására helyezett trendvonalból jól látszódik, hogy az elmúlt évszázadban a területre eső csapadék mennyisége hozzávetőlegesen 10%-al csökkent egy évszázad alatt. Az ábrából jól kivehető, hogy a csapadékmennyiségek éves szinten eltérő értékekkel bírnak, amely a mérsékeltövi kontinentális éghajlatra jellemzően nálunk is megtalálható. Legszárazabb évszaknak a téli időszakot tekinthetjük, ugyanis átlagosan mintegy 100-120 mm, a legcsapadékosabb a nyári időszak. Fotovillamos energia-termelés szempontjából a csapadékmennyiség meghatározó, ugyanis a csapadékhullás felhősödéssel párosul, melynek árnyékoló hatása nagyban lecsökkenti a modulok által előállítható villamosenergia-mennyiségét.

A napfénytartam jellemzői

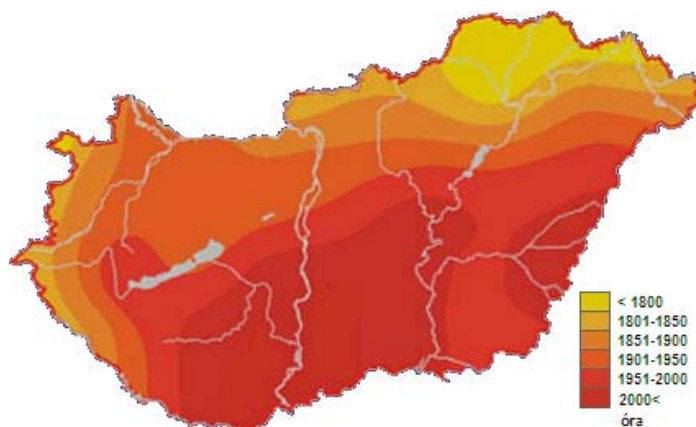
A napsugárzásnak csak egy része éri közvetlen a földfelszínt, ezt nevezik direkt sugárzásnak. Azt az időtartamot, amely idő alatt direktsugárzás éri a földfelszínt, napfénytartamnak nevezzük, amelyet a telepítésre kiválasztott terület domborzata, a légkörben található szennyeződések, és a felhőzet adja meg.

A napfénytartam mérése csak 1912-ben kezdődött Budapesten. A XX. században készült mérések alapján megállapítható, hogy átlagosan éves szinten 1930 óra ez az érték. Havi eloszlási szinten kijelenthető, hogy decembertől júliusig emelkedik, júliustól viszont csökken a napfénytartam értéke. Decemberben ez az érték átlagosan 52 óra, míg Júliusban 250 óra. Budapest és környékének napfénytartam alakulását a 4.3. ábra szemlélteti.



4.3. ábra. Napfénytartam alakulása Budapesten és környékén a XX. században (saját készítés, OMSZ adataival)

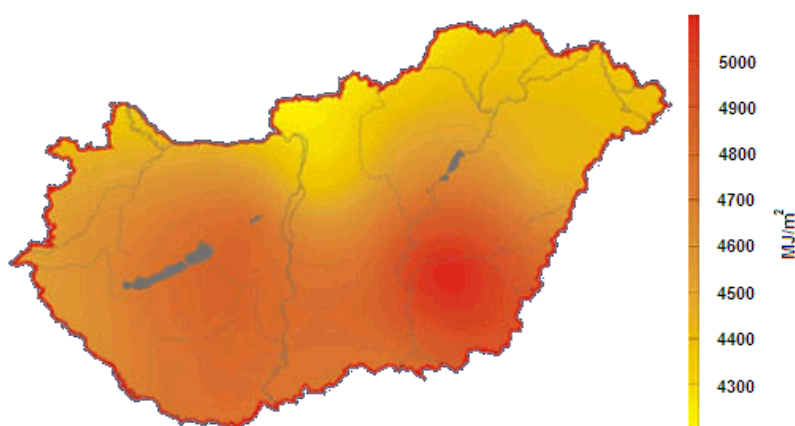
Az alábbi, 4.4. ábrán az országos viszonylatban mért átlagos napfénytartam értékei szerepelnek.



4.4. ábra. Magyarországon a napfénytartam alakulása (OMSZ)

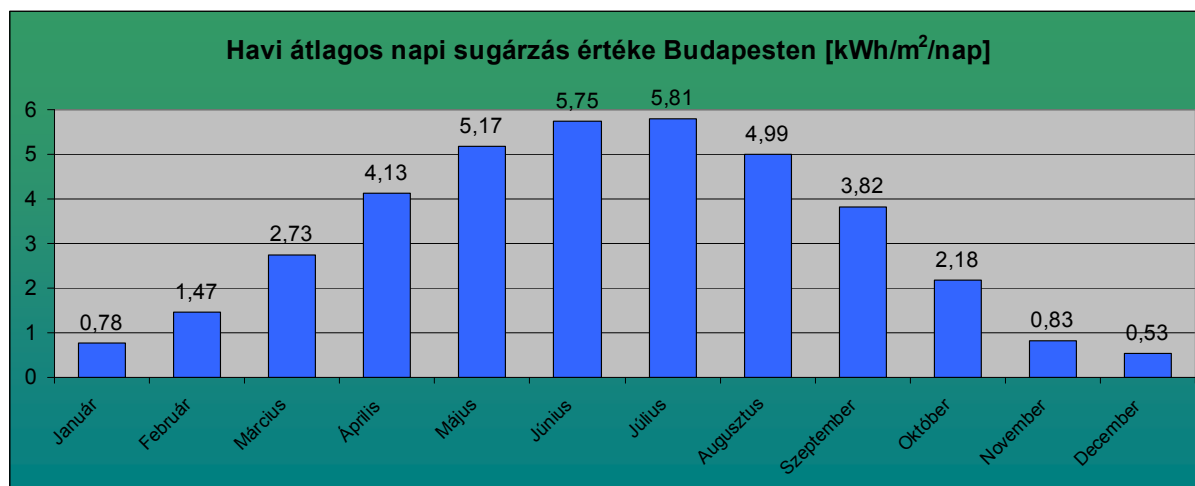
Globálsugárzás

Globálsugárzásnak a már előzőekben említett direkt, diffúz, illetve reflektált sugárzásértékeket együttesen értjük. Napenergia-hasznosítás szempontjából Magyarország adottságaival előkelő helyen szerepel az európai országok között, ugyanis a sugárzási intenzitás értékei magasnak mondhatóak. Nyári időszakban $600\text{--}1000\text{ W/m}^2$, a téliben $250\text{--}600\text{ W/m}^2$ értékek között mozog, ezzel az 1 m^2 felületre eső napsugárzási érték $1170\text{--}1300\text{ kWh/m}^2$ éves értékek körül mozog. A 4.5. ábra az országra eső globálsugárzás értékeket szemlélteti. Az ábrán kivehető, hogy a Gödöllő terület nem tartozik a legkiemelkedőbb értékekkel rendelkező területek közé, mert hozzávetőlegesen az évi globálsugárzás 4400 MJ/m^2 körüli (1220 kWh/m^2) (Farkas, 2003).



4.5. ábra. Globálsugárzás alakulása Magyarországon (OMSZ)

A globálsugárzást döntően a vizsgált helyszín földrajzi szélessége, illetve a felhőzet mennyisége fogja meghatározni. A nagyvárosokban, illetve az ipari területeken a felhőzetén kívül a légszennyezés mértéke is befolyásolja a globálsugárzást, de Budapest és környékére viszonyítva nem rendelkezünk erre vonatkozó adatbázissal, így a számításaimba se tudtam belevenni. A vízszintes felületre eső havi átlagos napsugárzás értékeit a 4.6. ábra szemlélteti.



4.6. ábra. Budapesten, a havi átlagos napi sugárzás értékek (Saját készítés, OMSZ adataival)

4.1.2. A vizsgált létesítmény és mikrokörnyezetének vizsgálata

A létesítmény Gödöllőn, a Szent István Egyetem területén található, 7755 m² alapterületű multifunkcionális oktató és tudástranszfer központként, Műszaki és Természettudományi Oktató Központ (MTOK) néven üzemel. A 2012-ben átadott épület eredetileg a Mezőgazdasági Eszköz- és Gépfelődéstörténeti Szakmúzeum néven működött. A 2011-2012-es felújítások alatt az eredeti 3300 m² alapterület mellett 4455 m²-nyi újonnan kialakított részleg került a Szent István Egyetem tulajdonába. Az 1987-ben alapított, eredetileg kétszintes épület az elmúlt évtizedek során műszakilag leamortizálódott, gépészete elavult, az időjárás kárt tett az épület tetőszerkezetében, amely mind-mind azt eredményezték, hogy az épület felújítását nem lehetett halogatni tovább.

A beruházás a Gyakorlati Képzési Központ épület-együtteséhez illetve az I-es, II-es tanműhelyblokkhoz kapcsolódva valósult meg. A projekt során a kétszintes épületre egy II. emeletet alakítottak ki, amelyekben multifunkcionális információs és kommunikációs technikákkal (IKT) felszerelt előadótermek, és laborok alakultak ki.

A beruházás során a SZIE Gépészmérnöki Karának egyes intézetei, tanszékei új tantermekkel, laboratóriumokkal gazdagodott. A Környezetipari Rendszerek Intézet Fizika és Folyamatirányítási Tanszéke egy napenergiára specializálódó laboratórium kialakítása mellett döntött, amelyben a hallgatók gyakorlatban fototermikus, illetve fotovillamos napenergia-hasznosító berendezésekkel is találkozhatnak. 2012 nyarán vákuumcsöves napkollektorokkal használati meleg víz (HMV) készítésére fototermikus rendszer kialakítása történt.

Az acélvázaz épületet vasbeton alapra készítették, tetejét könnyűszerkezetes, lapostetővel ellátva.

Fotovillamos modulok telepítésére az említett lapostetős szerkezetet szeretnénk felhasználni. A tető hozzávetőlegesen 3200 m². A teljes tetőfelületből levonásra kerülnek a tetőkibúvó, a tetőnyílások, a levegőhűtő berendezés, illetve napkollektorok által elfoglalt, és leárnyékolt területek. Ezek figyelembe vételével a fotovillamos modulok számára hozzávetőlegesen 3000 m²-nyi felület áll a rendelkezésükre.

A tető sík kialakítása miatt a fotovillamos modulokat állványos szerkezetre kell telepíteni annak érdekében, hogy a napsugárzás merőlegesen érje a modulokat. Az állványok dőlésszögének el kell érnie a 30°-os szöget, az öntisztulás szögét, amelynek következtében a modulok üvegfelületei a csapadék segítségével tisztul, nincs egyéb személyi beavatkozásra szükség. Mivel az épület lapostetős kivitelű, a fotovillamos modulokat tájolása déli irányba fog mutatni.

Az épület kialakítása során az elkészült acél szelemenekre teherhordó, egyenletes osztású, magas profilú trapézlemezt helyeztek, amely a járható tető egyik fő alkotóeleme. Az eljárást a 4.7 ábrán szemléltetem.



4.7. ábra. A trapézlemez elhelyezése az acélszelemeneken (MTOK, 2012)

A felületkezelte trapézlemez elhelyezését követően párazáró fóliával, majd Knauf Insulation Nobasil járható közetgyapot hőszigeteléssel látták el, amelyet egy újabb párazáró fólia, majd hegesztett PVC szigetelő lemezzel fedték az épület tetőrendszerét, amelyet a 4.8. ábrán szemléltetnek.



4.8. ábra. A tetőrendszer szigetelése (MTOK, 2012)

Az elkészült tetőt, amelyeken a PV modulok telepítésre kerülnének a 4.9. ábrán szemléltetem.



4.9. ábra. A fotovillamos modulok elhelyezésére szolgáló tetőfelület

A telepítésre alkalmas tetőrész az épületet körbeölelő terepakadályok, valamint a környező épületek által árnyékolt sávon kívül helyezkedik el, egyedül az épület tetején található, már említett akadályok nehezítik a fotovillamos telepítést. Napelemes rendszereknél egyébként, ha a modult csak részleges árnyékolás éri, akkor is kedvezőtlen az energiatermelés szempontjából.

Az állványrendszerre történő modultelepítés lehetővé teszi az optimális tájolási és dőlésszög értékek kialakítását.

A napelemekkel megvalósuló villamosenergia-termeléshez szükséges rendszer nagyságát az alábbi paraméterek határozzák meg:

- szoláris részarány,
- beruházásra rendelkezésre álló keretösszeg,
- és az előírányzott energia megtermeléséhez szükséges PV modulok száma, illetve a rendelkezésre álló területmennyiség.

A szoláris részarány azt jelenti, hogy a teljes villamosenergia-fogyasztásnak hányad részét szeretnénk fotovillamos modulokkal ellátni. A beruházásra rendelkezésre álló keretösszeg a nagyobb fotovillamos erőműi rendszerek kialakításánál szokott meghatározó szerepet játszani, a rendelkezésre álló területmennyiség viszont a kisebb, családi házas rendszereknél szokta a korlátot jelenteni, ahol a rendelkezésre álló tetőfelület nem túl nagy. Az általam kidolgozott fotovillamos rendszer közepes erőműi méreteket ölt, ezért a beruházásra szánt keretösszeg lesz a leginkább meghatározó.

4.1.3. Villamosenergia-ellátás főbb szempontjai

Fotovillamos mező megtervezése és kialakítása során a következő elvárásokat kell szem előtt tartani:

- a villamos-energia szüntelenül rendelkezésre álljon a felhasználók számára,
- az előállított villamos-energia minősége megfeleljen a villamosenergia-szolgáltató által meghatározott kritériumoknak (feszültségérték, frekvenciaérték, hullámalak),
- a szerkezet működtetése egyszerű, illetve karbantartásmentes legyen,
- az energiatermelő rendszer megfeleljen a biztonságtechnikai előírásoknak.

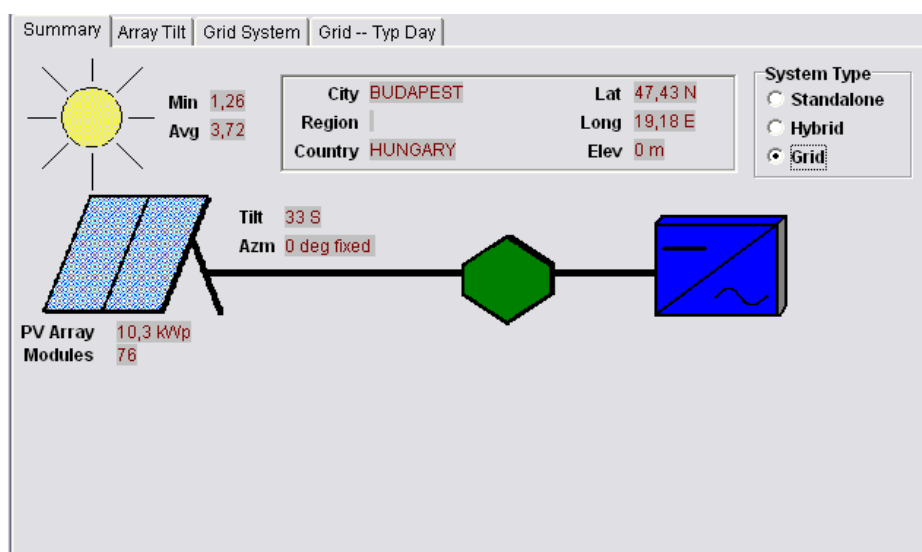
Ezen elvárások betartásával tudjuk biztosítani, hogy az általunk készített napelemes rendszer működtetése közben ne forduljon elő áramkimaradás, ezen felül pedig az elvárások betartásával a rendszer hosszú távon hibamentesen, teljesítménycsökkenés nélküli működését érhetjük el.

A *3.1-4.1. fejezetekben* bemutatott technológiák, illetve a részletezésre került kiinduló adatok fogják az általam megálmodott közepes teljesítményű fotovillamos rendszer megtervezésének alapjait szolgáltatni.

4.2. Az alkalmazott szimulációs programok

A manuális számítások, és az általam megalkotott rendszer leellenőrzéséhez és szimulációjához két számítógépes programot is használtam, az Orion Energy Corporation (OEC) NSol! 4.4.0, és az SMA Solar Technology AG (SMA) Sunny Design 2.30 verziójú napelemes tervezőprogramokat.

Az NSol! Program képes hálózattól független autonóm, hibrid, és hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszerek megalkotására, és az általa készített rendszerek szimulációjára. A program fejlett statisztikai elemző rendszerrel készült, amelyet a Massachusetts Technológiai Intézetben kifejlesztett, szabadalmaztatott LOLP algoritmuson alapszik. A koncepció a „Markov átmeneti mátrixokon” alapul, ez az algoritmus kiszámolja a statisztikai teljesítményét a nap besugárzás forrásának, majd ezt alkalmazza az akkumulátor alapú PV rendszerre. Az eredmény egy „Loss-of-Load Probability” (töltés veszteség valószínűsége), amely egy valós becslést ad a rendszer megbízhatóságáról (Galambos – Almássy, 2011). Az NSol! adatbázisa az Egyesült Államok kormányának Nemzeti Megújuló Energetikai Laboratóriuma (NREL), és a Meteorológiai világszervezet (WMO) által szolgáltatott információkon alapszik, amely világszinten több ezer földrajzi hely meteorológiai, és napsugárzási adataival rendelkezik. Az NSol! Adatbázisa a területre vonatkozó adatokon felül a fotovillamos modulokat, és akkumulátorokat készítő vállalatok árucikkeit, illetve az adott árucikkek STC körülmények között mért paramétereit tartalmazza. Amennyiben a tervezés során olyan helyszínt, modult vagy akkumulátort kívánunk alkalmazni, amely nem szerepel a program adatbázisában, azt a felhasználó könnyedén utólag módosítani, kiegészíteni tudja. A program grafikus kezelőfelülettel rendelkezik, melyet a 4.10. ábra mutat be.



4.10. ábra. Az Nsol! grafikus kezelőfelülete

A 2012-ben megjelent SMA Sunny Design 2.30 a közismert inverter gyártó vállalat által készített, térítésmentesen letölthető, és alkalmazható programja jelenleg kizárólag hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszerek tervezésénél alkalmazható. A gyártó a fotovillamos inverterek területén piacvezető szereppel bír, amely megtartása érdekében fejlesztette ki az említett programot. A Sunny Design először 2008-ban jelent meg, azóta számos fejlesztés ment keresztül, mára komplex, nagyméretű erőművet is lehet a programmal méretezni.

A Sunny Design adatbázisa az NSol!-hoz hasonlóan az NREL, és a WMO adatbázisain alapul, de a fotovillamos modulok tekintetében szélesebb választék érhető el, de fotovillamos inverterek közül csupán az SMA által készített termékeket lehet a tervezés során a rendszerhez rendelni. A program ezen automatikus adatbázis frissítéssel rendelkezik mind modul, mind inverter területén.

A program előnye az NSol! 4.4.0-val szemben, hogy a méretezés során figyelmeztet, amennyiben az egyes rendszerösszetevők nem passzolnak egymáshoz. A program előnye még, hogy a fotovillamos vezetékek kialakítását is el lehet vele készíteni.

A program fő hátránya az NSol! 4.4.0-val szemben, hogy kizárólag hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszerek méretezésére alkalmas, az általa kidolgozott rendszer szimulációjára nem. A program grafikus kezelőfelületét a 4.11. ábra mutatja be.

The screenshot displays the SMA Sunny Design software interface. The top section shows the configuration for 'PV-array 1' and '1 x SB 2000HF-30' inverter. The PV array configuration includes fields for Name, Manufacturer (Kyocera), PV-module (KD135GH-2P), Cell temperature, Setpoint, Number of PV modules (14), and Mounting type (Roof). The inverter configuration shows the Inverter model (SB 2000HF-30), Number of inverters (1), and various power and efficiency specifications.

Below the configuration panels is the 'Overview of inverters' table, which summarizes the system configuration and compatibility.

	PV-array 1 14 / 14	PV Peak power	Nominal power ratio	Energy usability factor
1 x SB 2000HF-30	1 x 14 (A)	1,89 kWp	111,0 %	100,0 %

At the bottom, the 'PV/Inverter compatible' section provides a detailed configuration table:

Configuration		Input A
Inverter:	SB 2000HF-30	PV-array: PV-array 1
Independent inputs:	1	Number of PV modules (input): 14
Max. DC power:	2,10 kW	Peak power (input): 1,89 kWp
Min. DC voltage:	175 V	Typical PV voltage: 220 V
(Grid voltage 230 V)		Min. PV voltage: 197 V
Max. DC voltage (Inverter):	700 V	Max. PV voltage: 349 V
Max. DC current:	12 A	Max. current of PV array: 7,6 A

4.11. ábra. Az SMA Sunny Design grafikus kezelőfelülete

A feladatom során a két programot együttesen alkalmazom, ugyanis az Sunny Design a méretezésre, az NSol! viszont a már kidolgozott rendszer szimulációra alkalmasabb.

4.3. Hálózatra dolgozó fotovillamos rendszer

A Szent István Egyetem Műszaki és Természettudományi Oktató Központjának fotovillamos modulokkal történő villamosenergia-ellátására kizárólag a hálózatra visszatápláló napelemes rendszer jöhet szóba, ugyanis autonóm fotovillamos rendszert a rendszer beruházási költségei, és a villamosenergia-hálózat megléte is érdektelenné teszi. A következő alfejezetekben a hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszer tervezési lépéseit fogom részletesen bemutatni.

4.3.1. A villamosenergia-igény meghatározása

Ahány létesítmény, annyi különféle villamosenergia-igény létezik. A fotovillamos energiaellátás megtervezésének alapja a vizsgált épületek villamosenergia-igényének felmérése. Mivel az épületet 2012 szeptemberben kezdték csak oktatási célokra igénybe venni, ezért jelenleg nincsenek pontos adataink arra vonatkozóan, hogy pontosan mekkora is az épület villamosenergia-igénye.

A villamos energia-igény meghatározásánál figyelembe kell venni az egyes fogyasztókat, amelyek az MTOK esetében komplex feladat. Az épület használatba vétele óta folyamatosan érkeznek a laboratóriumi felszerelések, amelyek többsége komoly villamosenergia-fogyasztó berendezés. Ezen felül a villamosenergia-fogyasztás nagyban függ az épület kihasználtságától. Mivel az épületben nem minden terem áll készen az előadások, gyakorlatok megtartására, ezért az épület még nem üzemel 100%-os kihasználtsággal.

A villamosenergia-fogyasztást nagyban meghatározza az épület klimatizálása is, ugyanis a geotermikus, fan-coil rendszerű fűtés-hűtés villamosenergia-igényes, amely az épület használatba vétele óta eltelt időszakban a közepesnek mondható környezeti hőmérsékletek miatt a fan-coil rendszer eddig még nem működött 100%-on.

A villamosenergia-igény meghatározásához tehát minimum egy-két évnyi üzemeltetés után kapott fogyasztási értékekkel lehetne pontos számításokat végezni.

Az általam vizsgált épület a Szent István Egyetemmel közös villamosenergia-hálózattal van, közös mérőórán, ezért ha a MTOK vezetősége nagyobb fotovillamos rendszer mellett döntene, mint amely az épület éves villamosenergia-fogyasztását fedezi, akkor sem lenne probléma a többlettermeléssel.

Jelen dolgozatban egy 10 kWp teljesítményű fotovillamos rendszeregységet fogok kidolgozni, amelyet az igények növekedésével 10 kWp teljesítményenként lehetne telepíteni, a telepítés méretének így az épület tetőfelülete, és a beruházásra fordítható keret szab majd határt.

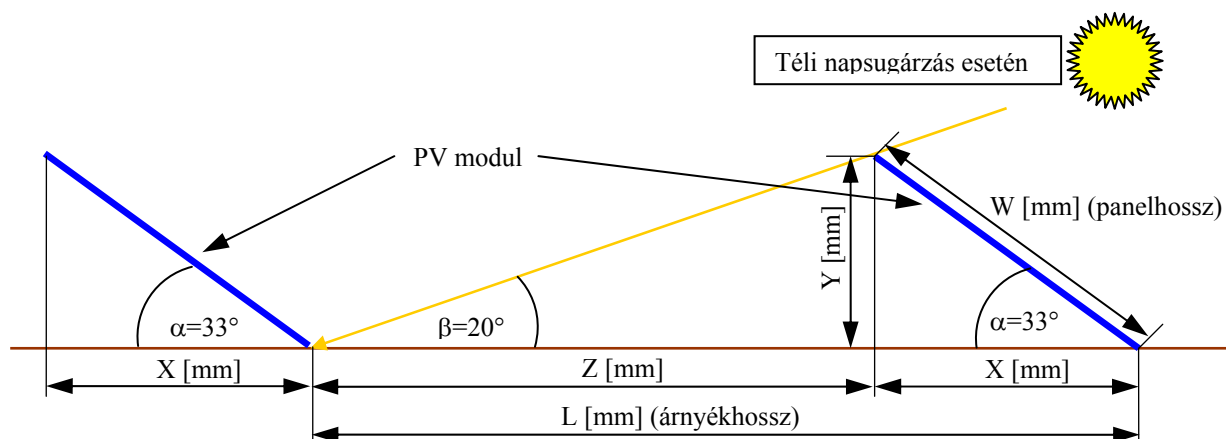
4.3.2. A napelemes rendszer fő paramétereinek meghatározása

Napenergia hasznosítás szempontjából egész évben üzemeltetett fix dőlésszöggel rendelkező fotovillamos rendszer szempontjából a déli égtáj felé tájolás, és a vízszintestől 30°- körüli dőlésszöggel rendelkező fotovillamos modulok az ideálisak. Elméletben az említett helyzetben szerelt, 1kWp teljesítményű fotovillamos rendszer maximum 1159 kWh villamosenergia előállítására képes. Gyakorlatban ez az érték a rendszerben fellelhető veszteségek miatt, illetve az inverter hatásfokértéke miatt kevesebb. Az inverter gyártó cégek ennek érdekében azon versengenek, hogy minél jobb átalakítási hatásfokkal rendelkező berendezéseket fejlesszenek. A sorozatgyártásban készülő vékonyrétegű napelemekről *2.számú mellékletben* általam készített komplex összehasonlító táblázat található, az első oldalon a CIS, másodikon a CIGS, harmadikon a CdTe és a CdS/CdTe, a melléklet negyedik és ötödik oldalán viszont az amorf szilícium napelemek táblázata található.

A melléklet összeállításakor az egyes CIS, CIGS, CdTe, illetve amorf szilícium napelem gyártó vállalatok legjobb hatásfokértékekkel rendelkező napelemeinek jellemzőit hasonlítottam össze. A táblázatban jól látszik, hogy a különböző fotovillamos modulokból összeállított 1 kWp teljesítményű napelem által 1 év alatt termelt villamosenergia-mennyisége, nagyon kis mértékben különbözik csak egymástól, amely az előbb említett okokból adódik.

Számottevő különbség az egyes napelemeknél az 1kWp napelemes rendszerhez szükséges napelem felületen látszik, amely egyenes arányban van a fotovillamos modulok STC körülmények között mért hatásfokértékeivel, ugyanis magasabb energiaátalakítási hatásfok nagyobb energiahozamot jelent ugyan akkora felületegységre viszonyítva. Olyan felhasználásoknál, ahol a rendelkezésre álló felület kevés, a magasabb hatásfokkal rendelkező fotovillamos modulokat szokták preferálni.

Adott felületegységgel rendelkező lapostetős épület esetében célszerű megvizsgálni, mikor tudjuk a legtöbb energiát hasznosítani. Számítógépes szimulációs programokkal meghatározott, ideális 33°-os dőlésszöggel rendelkező rendszerek esetén a modulok által árnyékolt terület nagyban lecsökkenti a hasznos tetőfelület méretét. Mivel az egyes modulméretek nem egyeznek meg, ezért a fotovillamos hasznosításra alkalmas felület meghatározásához a *4.12. ábrán* szemléltetett modulok általi árnyékolását figyelembe kell venni.



4.12. ábra. Téli napsütés esetén az árnyékolt tetőrész 33°-os napelem dőlésszög esetén

Az ábrából jól kivehető, hogy amennyiben csökkentjük a napelemek dőlésszögét, az árnyékhossz lecsökken. Az árnyékhossz meghatározásához a következő összefüggéseket alkalmazzuk:

A döntött modulok függőleges vetületének a meghatározása:

$$Y = \sin \alpha \cdot W \text{ [mm]}, \quad (4.1)$$

ahol: Y – a döntött modulok függőleges vetületének a mérete [mm],

α – a modulok hajlásszöge [°],

W – a modulok szélessége [mm].

A döntött modulok vízszintes vetületének a meghatározása:

$$X = \cos \alpha \cdot W \text{ [mm]}, \quad (4.2)$$

ahol: X – a döntött modulok vízszintes vetületének a mérete [mm].

A modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$Z = \frac{Y}{\tan \beta} \text{ [mm]}, \quad (4.3)$$

ahol: Z – a modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz [mm],

β – a téli napsugárzás hajlásszöge [°],

A teljes által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$L = X + Z \text{ [mm]}, \quad (4.4)$$

ahol: L – a teljes árnyékolt szakasz hossza [mm],

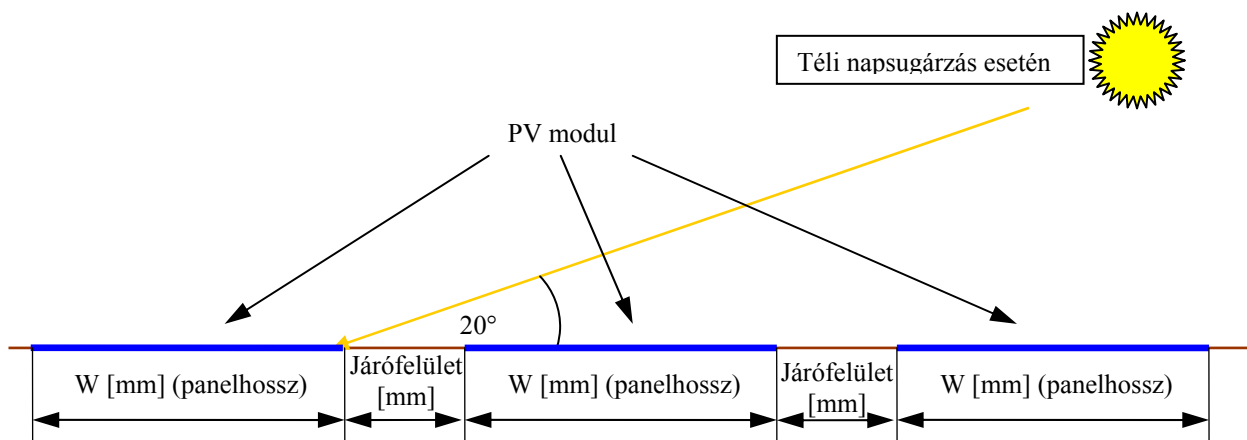
A teljes által árnyékolt felület meghatározása:

$$T = L \cdot S \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (4.5)$$

ahol: S – a modult hosszúsága [mm],

Vízszintes modulelhelyezés esetén a modulok egymást nem árnyékolják le, így a hasznos tetőfelület csaknem egésze lefedhető fotovillamos modulokkal.

Vízszintes modulelhelyezést a 4.13. ábrán szemléltetem.



4.13. ábra. Vízszintes napelem elhelyezés esetén nincs árnyékolt tetőrész

Vízszintes kialakításnál az egyes modulok által előállított villamos-energia mennyisége nagyságrendileg 15-18%-al kevesebb lesz, de összességében a több modulnak köszönhetően az épület teljes villamosenergia-termelése magasabb lesz.

Hátránya még a rendszernek, hogy a napelemek között járófelületet kell hagyni, ugyanis a vízszintes elrendezés nem megfelelő a modulok öntisztulására, így ezt kézzel kell meghatározott időközönként elvégezni.

A rendszer előnye, a tetőfelületen megtermelhető több villamos-energia, illetve az egyszerűbb modulállványzat kialakítása. Amíg a ferde hajlásszöggel rendelkező modulállványzat költségesebb, mintha vízszintesen helyeznénk el a napelemeket, gyakorlatban a ferde modulelrendezést preferálják lapostetős esetekben is.

Az MTOK 3000 m²-es hasznos tetőfelülete elég nagy ahhoz, hogy egy közepes méretű fotovillamos rendszer moduljait az ideális 33°-os dőlésszög kialakítással tervezzem meg.

A következőkben a 2. táblázatban összefoglalt és elemzett fotovillamos modulok közül fogok kiválasztani különböző vékonyréteg technológiával készülő napelemeket, és 10 kWp teljesítményű rendszerenként értékelem őket.

4.4. A CIS-CIGS napelemek alkalmazása

Az európai piacon fellelhető CIS-CIGS technológiával készülő, sorozatban gyártott napelemek nagy többsége Németországban készült. Mivel a magyar fotovillamos piacon szinte teljes mértékben kristályos szilícium technológiával készülő modulokat kapni, a feladat során az európai viszonylatokat vettem figyelembe.

A napelemek kiválasztásánál figyelembe vettem a termékek minőségét, STC körülmények között mért hatásfokait, a termékek garantált élettartamát, geometriai méreteit, tömegét, és a modulok bekerülési költségeit. A 2. táblázatban kiválasztott CIS-CIGS napelemek közül közepes méretű, hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszer esetén következő gyártók termékei jöhetnek igazán számításba:

- Avancis GmbH,
- Solar Frontier,
- Würth Solar,
- Q-Cells,
- Stion.

Számítógépes szimulációt követően a kiválasztott modul: Avancis PowerMax SMART 135 CIS napelem. Származási helye Németország, magyarországi forgalmazó jelenleg nincs. Az Avancis GmbH 10 év teljes körű garanciát, 20 év 90%-os teljesítménygaranciát vállal a termékekre. A termék bekerülési költsége: bruttó 250 € / modultól, nagyobb rendelés esetén egyedi árakkal (Solarshop-Europe, 2012).

Az Avancis PowerMax SMART 135 főbb műszaki jellemzői:

- Névleges teljesítmény: 135 W
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti feszültség (V_{MPP}): 47,40 V
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség (I_{MPP}): 2,84 A
- Üresjárat feszültség (V_{OC}): 61,50 V
- Rövidzárási áram (I_{SC}): 3,14 A
- Modulhatásfok: 12,81%

A napelem geometriai méretei:

- Hossz: 1587 mm
- Szélesség: 664 mm
- Mélység: 46 mm
- Súly: 22,0 kg

4.4.1. A napelem mező méretének meghatározása

Az általam készített fotovillamos mező mérete 10 kWp teljesítményű. Ezek alapján a szükséges napelemek darabszámát a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = \frac{P_{\text{mező}}}{P_{\text{modul}}} = \frac{10000}{135} = 74,07 \approx 75 [\text{db}],$$

ahol: $n_{\text{hálózatrado lg ozó}}$ – a hálózatra dolgozó PV rendszer napelemeinek a darabszáma [db],

$P_{\text{mező}}$ – a fotovillamos mező szükséges teljesítménye [Wp],

P_{modul} – a fotovillamos modul teljesítménye [Wp].

A tényleges fotovillamos mező méretének meghatározása:

$$P_{\text{mező tényleges}} = n_{\text{hálózatrado lg ozó}} \cdot P_{\text{modul}} = 75 \cdot 135 = 10125 [\text{Wp}],$$

ahol: $P_{\text{mező tényleges}}$ – a választott napelemekkel kialakuló teljes fotovillamos mező [Wp],

4.4.2. A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása

Az árnyékolás mértékét a (4.1)-(4.5) képlet segítségével 33°-os dőlésszög mellett számolom. A modulok függőleges, vagy vízszintes elhelyezése nem számít, ugyanis a teljes takarás mértéke mindkét esetben megegyezik.

A döntött modulok függőleges vetületének a meghatározása:

$$Y = \sin \alpha \cdot W = \sin 33^\circ \cdot 664 = 361 [\text{mm}].$$

A döntött modulok vízszintes vetületének a meghatározása:

$$X = \cos \alpha \cdot W = \cos 33^\circ \cdot 664 = 557 [\text{mm}].$$

A modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$Z = \frac{Y}{\text{tg} \beta} = \frac{361}{\text{tg} 20^\circ} = 992 [\text{mm}].$$

A teljes által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$L = X + Z = 557 + 992 = 1549 [\text{mm}].$$

A teljes által árnyékolt felület meghatározása:

$$T = L \cdot S = 1549 \cdot 1587 = 2458263 [\text{mm}^2] = 2,46 [\text{m}^2].$$

A 10,125 kWp teljesítményű rendszer által árnyékolt felület meghatározása:

$$T_{10kWp} = T \cdot n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = 2,46 \cdot 75 = 184,5 [\text{m}^2].$$

A számítások alapján, a teljes hasznos tetőfelület (3000 m²) Avancis PowerMax SMART 135 napelemekkel való beépítésével 165 kWp összteljesítményű napelemes erőművet lehetne létrehozni.

4.4.3. A napelemek által megtermelhető energia számítása

A hálózatra dolgozó inverternél, a magasabb hatásfok elérése miatt az inverterre magas bemenő DC feszültséget kell kapcsolni, ezért lehetőleg az összes modul sorba kapcsolása a cél.

A modulok által éves szinten előállított villamos-energia mennyiségének a meghatározása:

$$E_{\text{összes}} = n_{\text{összes}} \cdot P_{\text{modul}} \cdot Q_{\text{mező}} = 75 \cdot 135 \cdot 1018,06 = 10307858 \text{ [Wh]} \approx 10308 \text{ [kWh]},$$

hol: $E_{\text{összes}}$ – a teljes PV mező által termelt összes villamos-energia [kWh],

$n_{\text{összes}}$ – a felhasznált napelemek mennyisége [db],

P_{modul} – a modulok egyenkénti névleges teljesítménye [Wp],

$Q_{\text{mező}}$ – adott modul, adott tájolási és dőlésszögek mellett 1kWp teljesítményű fotovillamos mező által előállított éves energia mennyisége (a 2. számú melléklet alapján) [Wh/kWp].

4.4.4. Az inverter kiválasztása

A hálózatra dolgozó inverter megválasztásánál az inverter szükséges teljesítményét a beépített fotovillamos rendszer teljesítménye fogja meghatározni. A CIS- rendszer esetében 10,125 kW, vagy annál nagyobb összteljesítményű invertert, invertereket kell választanunk. A CIS technológiával rendelkező PV rendszerhez 3 darab SMA, Sunny Boy 3800-11 típusú hálózatra dolgozó invertert alkalmazok. (SMA Sunny Family 2010/2011 Catalog, 2010), ára: bruttó 1407 € (Solarshop-Europe, 2012).

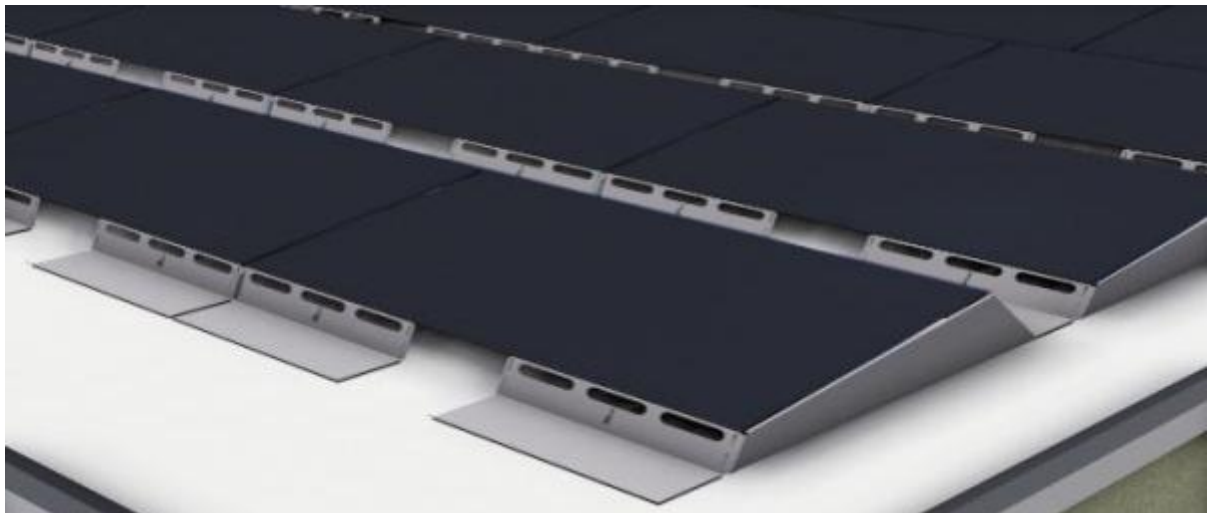
Az inverter főbb műszaki tulajdonságai:

- Névleges AC teljesítménye: 3,80 kW
- Maximális DC feszültség: 200 V
- Hálózati feszültség: 198-260 V
- Hatásfoka: 95,6%
- Max bemeneti áramerősség: 20 A
- Súlya: 38 kg

4.4.5. A modulok rögzítése

A 4.1.2. fejezetben bemutatott tetőegység hátránya, hogy a PVC burkolat sérülése beázásokhoz vezet, amely az épület állagának romlását nagyban felgyorsítaná. A PVC tetőszerkezetre a kivitelező vállalat 10 év garanciát vállal, de a burkolat bármilyen megsértése, módosítása a garancia elvesztését jelentené. A fotovillamos modulok elhelyezésére olyan módszert kell kitalálni, amely nem számít jelentős statikai terhelésnek a tető szerkezet szempontjából, illetve a felhelyezésnél nem szükséges a jelenlegi burkolat módosítása, vagyis a modulok és a szerkezet közösen az önsúlyuknál fogva biztosítanak a PV rendszer rögzítését.

Az ilyen esetekre a Berlini Solteature GmbH kidolgozott Tectum flat roof system, egy napelemekkel egybeépített modultartó szerkezetet, amelyet a 4.14. ábra szemléltet.



4.14. ábra. Lapostetőre, tetőmegbontás nélkül szerelhető modultartók (Solteature, 2012)

Ezzel a fajta szerkezettel mindössze $12,3 \text{ kg/m}^2$ terhelés érne a lapostetőt, amely elenyésző. A rendszer előnye, hogy az összeállításnál nincs szükség semmilyen szerszám használatára, ugyanis a profilok úgy lettek kialakítva, hogy könnyedén egymásba kapcsolódjanak. A tartórendszer aerodinamikailag szélcsatornában tesztelték, amelyen kiváló eredménnyel szerepelt.

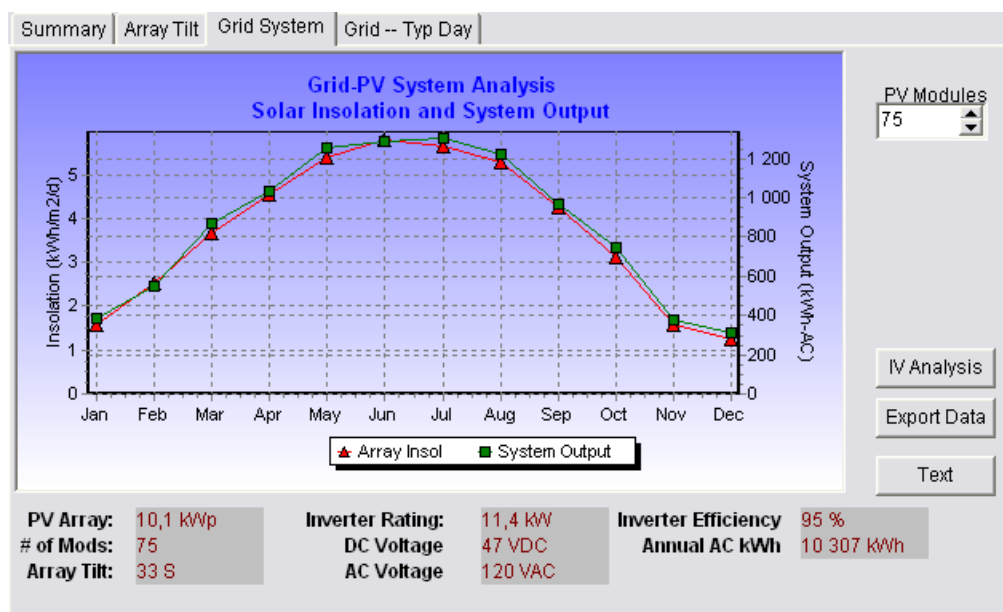
Beruházási költsége jelenleg nem ismert, ugyanis a technológia még tesztelés alatt áll, de 2013-ban megindulhat az elemek sorozatgyártása.

Egyedileg készített napelem rögzítés esetén hasonló technológiát alkalmazva a gyártási költségek feltehetőleg magasabbak lennének, mint a sorozatgyártással készülő elemek szállítási költséggel növelt ára.

A tartószerkezetekre nem készítettem költségvetést.

4.4.6. A CIS rendszer értékelése

Az analitikus számításokat az NSol! programmal szimuláltam, a kapott eredményeket ellenőrzés szempontjából összevettem az analitikus számításokkal. A program alapján az elkészített számítások megfelelőek. A program által elvégzett rendszer analízist a 4.15. ábrán mutatom be.



4.15. ábra. Az Nsol! által szimulált CIS napelemekből álló PV rendszer

Az elkészített szimuláción jól látható a fotovillamos mező által termelt villamosenergia-mennyiség alakulása az év folyamán.

A tervezés során felsorolt rendszeralkotó elemek mellett pluszkölségként megjelennek a tartószerkezetek, az UV álló vezetékek, MC4 típusú csatlakozók, kapcsolók is. Amennyiben a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kara az általam készített CIS napelemekből álló 10,125 kWp teljesítményű hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszer mellett döntene, úgy a beruházási költségek (Euro-ban) a következőképpen alakulnának:

CIS Napelemek:	18 750 €
SMA Inverterek:	4 221 €
Napelemtartó szerkezet:	3 000 €
Egyéb költségek:	1 000 €
Összesen:	26 971 €

4.5. A CdTe - CdS/CdTe napelemek alkalmazása

A kereskedelmi forgalomban kapható CdTe és CdS/CdTe technológiával készülő, sorozatban gyártott napelemek nagy többsége az Egyesült Államokban, illetve Németországban készült. A 2. táblázatban kiválasztott CdTe és CdS/CdTe napelemek közül közepes méretű, hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszer esetén következő gyártók termékei jöhetnek igazán számításba:

- Abound Solar,
- Antec Solar,
- Calyxo,
- First Solar,
- JMS.

Számítógépes szimulációt követően a kiválasztott modul: First Solar FS-65 CdS/CdTe napelem. Származási helye Egyesült Államok, magyarországi forgalmazó jelenleg nincs. Az First Solar 10 év teljes körű garanciát, 25 év 90%-os teljesítménygaranciát vállal a termékekre. A termék bekerülési költsége: bruttó 61 € / modultól (PV-matrix, 2012).

A First Solar FS-65 főbb műszaki jellemzői:

- Névleges teljesítmény: 85 W
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti feszültség (V_{MPP}): 48,50 V
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség (I_{MPP}): 1,76 A
- Üresjárat feszültség (V_{OC}): 61,00 V
- Rövidzárási áram (I_{SC}): 1,98 A
- Modulhatásfok: 11,81%

A napelem geometriai méretei:

- Hossz: 1200 mm
- Szélesség: 600 mm
- Mélység: 20 mm
- Súly: nem ismert

4.5.1. A napelem mező méretének meghatározása

Az általam készített fotovillamos mező mérete 10 kWp teljesítményű. Ezek alapján a szükséges napelemek darabszámát a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = \frac{P_{\text{mező}}}{P_{\text{modul}}} = \frac{10000}{85} = 117,65 \approx 118 \text{ [db]},$$

ahol: $n_{\text{hálózatrado lg ozó}}$ – a hálózatra dolgozó PV rendszer napelemeinek a darabszáma [db],

$P_{\text{mező}}$ – a fotovillamos mező szükséges teljesítménye [Wp],

P_{modul} – a fotovillamos modul teljesítménye [Wp].

A tényleges fotovillamos mező méretének meghatározása:

$$P_{\text{mező tényleges}} = n_{\text{hálózatrado lg ozó}} \cdot P_{\text{modul}} = 118 \cdot 120 = 10030 \text{ [Wp]},$$

ahol: $P_{\text{mező tényleges}}$ – a választott napelemekkel kialakuló teljes fotovillamos mező [Wp],

4.5.2. A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása

Az árnyékolás mértékét a (4.1)-(4.5) képlet segítségével 33°-os dőlésszög mellett számolom. A modulok függőleges, vagy vízszintes elhelyezése nem számít, ugyanis a teljes takarás mértéke mindkét esetben megegyezik.

A döntött modulok függőleges vetületének a meghatározása:

$$Y = \sin \alpha \cdot W = \sin 33^\circ \cdot 600 = 327 \text{ [mm]}.$$

A döntött modulok vízszintes vetületének a meghatározása:

$$X = \cos \alpha \cdot W = \cos 33^\circ \cdot 600 = 503 \text{ [mm]}.$$

A modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$Z = \frac{Y}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{327}{\operatorname{tg} 20^\circ} = 898 \text{ [mm]}.$$

A teljes által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$L = X + Z = 503 + 898 = 1401 \text{ [mm]}.$$

A teljes által árnyékolt felület meghatározása:

$$T = L \cdot S = 1401 \cdot 1200 = 1681200 \text{ [mm}^2\text{]} = 1,68 \text{ [m}^2\text{]}.$$

A 10,03 kWp teljesítményű rendszer által árnyékolt felület meghatározása:

$$T_{10kWp} = T \cdot n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = 1,68 \cdot 118 = 198,24 \text{ [m}^2\text{]}.$$

A számítások alapján, a teljes hasznos tetőfelület (3000 m²) First Solar FS-65 napelemekkel való beépítésével 152 kWp összteljesítményű napelemes erőművet lehetne létrehozni.

4.5.3. A napelemek által megtermelhető energia számítása

A hálózatra dolgozó inverternél, a magasabb hatásfok elérése miatt az inverterre magas bemenő DC feszültséget kell kapcsolni, ezért lehetőleg az összes modul sorba kapcsolása a cél.

A modulok által éves szinten előállított villamos-energia mennyiségének a meghatározása:

$$E_{\text{összes}} = n_{\text{összes}} \cdot P_{\text{modul}} \cdot Q_{\text{mező}} = 118 \cdot 85 \cdot 1024 = 10270720 \text{ [Wh]} \approx 10271 \text{ [kWh]},$$

hol: $E_{\text{összes}}$ – a teljes PV mező által termelt összes villamos-energia [kWh],

$n_{\text{összes}}$ – a felhasznált napelemek mennyisége [db],

P_{modul} – a modulok egyenkénti névleges teljesítménye [Wp],

$Q_{\text{mező}}$ – adott modul, adott tájolási és dőlésszögek mellett 1kWp teljesítményű fotovillamos mező által előállított éves energia mennyisége (a 2. számú melléklet alapján) [Wh/kWp].

4.5.4. Az inverter kiválasztása

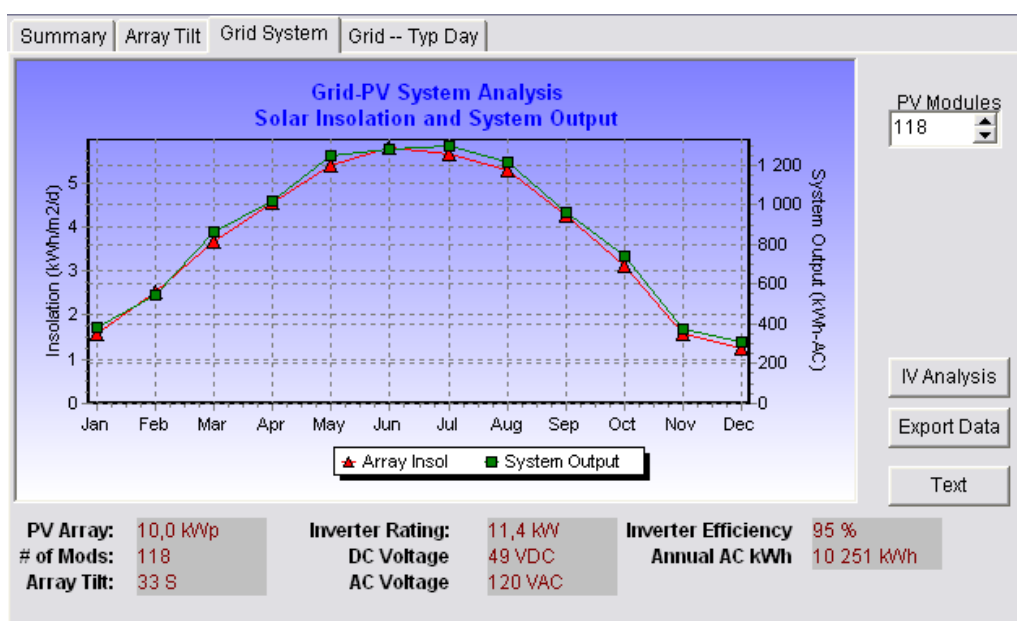
A hálózatra dolgozó inverter megválasztásánál az inverter szükséges teljesítményét a beépített fotovillamos rendszer teljesítménye fogja meghatározni. A CdS/CdTe- rendszer esetében 10,03 kW, vagy annál nagyobb összteljesítményű invertert, invertereket kell választanunk. A CdS/CdTe technológiával rendelkező PV rendszerhez 3 darab SMA, Sunny Boy 3800-11 típusú hálózatra dolgozó invertert alkalmazok. (SMA Sunny Family 2010/2011 Catalog, 2010), ára: bruttó 1407 € (Solarshop-Europe, 2012).

Az inverter főbb műszaki tulajdonságai:

- Névleges AC teljesítménye: 3,80 kW
- Maximális DC feszültség: 200 V
- Hálózati feszültség: 198-260 V
- Hatásfoka: 95,6%
- Max bemeneti áramerősség: 20 A
- Súly: 38 kg

4.5.5. A CdTe rendszer értékelése

Az analitikus számításokat az NSol! programmal szimuláltam, a kapott eredményeket ellenőrzés szempontjából összevettem az analitikus számításokkal. A program alapján az elkészített számítások megfelelőek. A program által elvégzett rendszer analízist a 4.16. ábrán mutatom be.



4.16. ábra. Az Nsol! által szimulált CdTe napelemekből álló PV rendszer

Az elkészített szimuláción jól látható a fotovillamos mező által termelt villamosenergia-mennyiség alakulása az év folyamán.

A tervezés során felsorolt rendszeralkotó elemek mellett pluszkölségként megjelennek a tartószerkezetek, az UV álló vezetékek, MC4 típusú csatlakozók, kapcsolók is. Amennyiben a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kara az általam készített CdS/CdTe napelemekből álló 10,03 kWp teljesítményű hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszer mellett döntene, úgy a beruházási költségek a következőképpen alakulnának:

CIS Napelemek:	7 198 €
SMA Inverterek:	4 221 €
Napelemtartó szerkezet:	3 000 €
Egyéb költségek:	1 000 €
Összesen:	15 419 €

4.6. Az amorf Si napelemek alkalmazása

Amorf szilícium napelem esetén a többi vékonyréteg technológiával szemben sokkal nagyobb a piac, amorf szilícium napelemeket akár Magyarországi forgalmazóktól is lehet vásárolni. Feladatom során a Magyarországon kapható a-Si, és a legjobb minőségű, Európában kapható a-Si napelemeket vizsgáltam. A 2. táblázatban kiválasztott amorf szilícium napelemek közül közepes méretű, hálózatra visszatápláló fotovillamos rendszer esetén következő gyártók termékei jöhetnek igazán számításba:

- Blitzstrom,
- Bosch Solar Energy,
- Dunasolar,
- Sanyo,
- Sharp,
- Schott Solar,
- Viessmann.

Számítógépes szimulációt követően a kiválasztott modul: Sharp NA 128W napelem. Származási helye Németország, magyarországi forgalmazó a Manitu Solar Kft. A Sharp 5 év teljes körű garanciát, 10 év 90%-os, 20 év 80%-os teljesítménygaranciát vállal a termékre. A termék bekerülési költsége: bruttó 126€ /modultól (Napelemvasarlas.hu, 2012).

A Sharp NA 128W főbb műszaki jellemzői:

- Névleges teljesítmény: 128 W
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti feszültség (V_{MPP}): 45,40 V
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség (I_{MPP}): 2,82 A
- Üresjárat feszültség (V_{OC}): 59,80 V
- Rövidzárási áram (I_{SC}): 3,45 A
- Modulhatásfok: 9,00%

A napelem geometriai méretei:

- Hossz: 1409 mm
- Szélesség: 1009 mm
- Mélység: 20 mm
- Súly: 19,0 kg

4.6.1. A napelem mező méretének meghatározása

Az általam készített fotovillamos mező mérete 10 kWp teljesítményű. Ezek alapján a szükséges napelemek darabszámát a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = \frac{P_{\text{mező}}}{P_{\text{modul}}} = \frac{10000}{128} = 78,125 \approx 78 [\text{db}],$$

ahol: $n_{\text{hálózatrado lg ozó}}$ – a hálózatra dolgozó PV rendszer napelemeinek a darabszáma [db],

$P_{\text{mező}}$ – a fotovillamos mező szükséges teljesítménye [Wp],

P_{modul} – a fotovillamos modul teljesítménye [Wp].

A tényleges fotovillamos mező méretének meghatározása:

$$P_{\text{mező tényleges}} = n_{\text{hálózatrado lg ozó}} \cdot P_{\text{modul}} = 78 \cdot 128 = 9984 [\text{Wp}],$$

ahol: $P_{\text{mező tényleges}}$ – a választott napelemekkel kialakuló teljes fotovillamos mező [Wp],

4.6.2. A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása

Az árnyékolás mértékét a (4.1)-(4.5) képlet segítségével 33°-os dőlésszög mellett számolom. A modulok függőleges, vagy vízszintes elhelyezése nem számít, ugyanis a teljes takarás mértéke mindkét esetben megegyezik.

A döntött modulok függőleges vetületének a meghatározása:

$$Y = \sin \alpha \cdot W = \sin 33^\circ \cdot 1009 = 550 [\text{mm}].$$

A döntött modulok vízszintes vetületének a meghatározása:

$$X = \cos \alpha \cdot W = \cos 33^\circ \cdot 1009 = 846 [\text{mm}].$$

A modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$Z = \frac{Y}{\text{tg} \beta} = \frac{550}{\text{tg} 20^\circ} = 1511 [\text{mm}].$$

A teljes által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$L = X + Z = 846 + 1511 = 2357 [\text{mm}].$$

A teljes által árnyékolt felület meghatározása:

$$T = L \cdot S = 2357 \cdot 1409 = 3321013 [\text{mm}^2] = 3,32 [\text{m}^2].$$

A 9,98 kWp teljesítményű rendszer által árnyékolt felület meghatározása:

$$T_{10\text{kWp}} = T \cdot n_{\text{hálózatrado lg ozó}} = 3,32 \cdot 78 = 258,96 [\text{m}^2].$$

A számítások alapján, a teljes hasznos tetőfelület (3000 m²) Sharp NA 128W napelemekkel való beépítésével 116 kWp összteljesítményű napelemes erőművet lehetne létrehozni.

4.6.3. A napelemek által megtermelhető energia számítása

A hálózatra dolgozó inverternél, a magasabb hatásfok elérése miatt az inverterre magas bemenő DC feszültséget kell kapcsolni, ezért lehetőleg az összes modul sorba kapcsolása a cél.

A modulok által éves szinten előállított villamos-energia mennyiségének a meghatározása:

$$E_{\text{összes}} = n_{\text{összes}} \cdot P_{\text{modul}} \cdot Q_{\text{mező}} = 78 \cdot 128 \cdot 1021,85 = 10202150 \text{ [Wh]} \approx 10202 \text{ [kWh]},$$

hol: $E_{\text{összes}}$ – a teljes PV mező által termelt összes villamos-energia [kWh],

$n_{\text{összes}}$ – a felhasznált napelemek mennyisége [db],

P_{modul} – a modulok egyenkénti névleges teljesítménye [Wp],

$Q_{\text{mező}}$ – adott modul, adott tájolási és dőlésszögek mellett 1kWp teljesítményű fotovillamos mező által előállított éves energia mennyisége (a 2. számú melléklet alapján) [Wh/kWp].

4.6.4. Az inverter kiválasztása

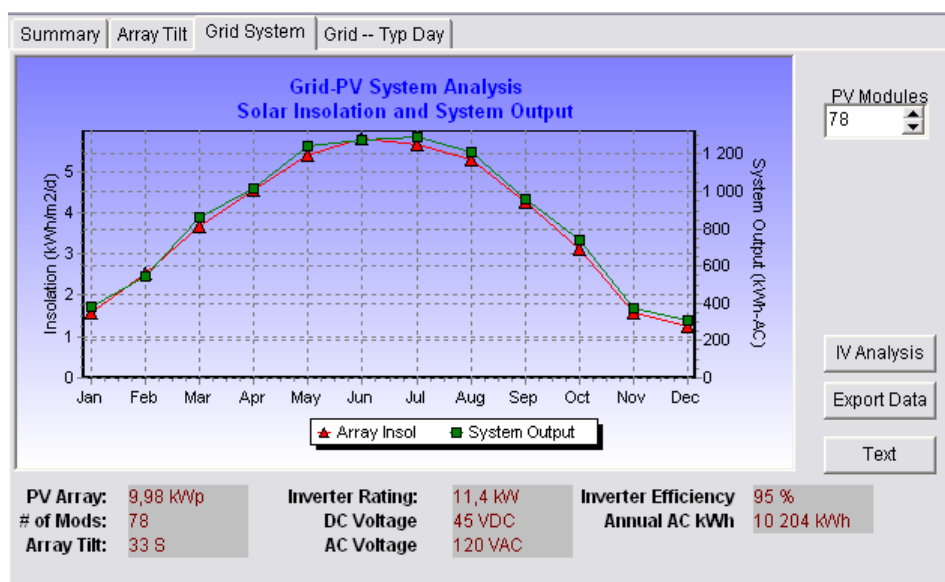
A hálózatra dolgozó inverter megválasztásánál az inverter szükséges teljesítményét a beépített fotovillamos rendszer teljesítménye fogja meghatározni. Az a-Si- rendszer esetében 9,98 kW, vagy annál nagyobb összteljesítményű invertert, invertereket kell választanunk. Az a-Si technológiával rendelkező PV rendszerhez 3 darab SMA, Sunny Boy 3800-11 típusú hálózatra dolgozó invertert alkalmazok. (SMA Sunny Family 2010/2011 Catalog, 2010), ára: bruttó 1407 € (Solarshop-Europe, 2012).

Az inverter főbb műszaki tulajdonságai:

- Névleges AC teljesítménye: 3,80 kW
- Maximális DC feszültség: 200 V
- Hálózati feszültség: 198-260 V
- Hatásfoka: 95,6%
- Max bemeneti áramerősség: 20 A
- Súly: 38 kg

4.6.5. Az amorf szilícium rendszer értékelése

Az analitikus számításokat az NSol! programmal szimuláltam, a kapott eredményeket ellenőrzés szempontjából összevettem az analitikus számításokkal. A program alapján az elkészített számítások megfelelőek. A program által elvégzett rendszer analízist a 4.17. ábrán mutatom be.



4.17. ábra. Az Nsol! által szimulált a-Si napelemekből álló PV rendszer

Az elkészített szimuláción jól látható a fotovillamos mező által termelt villamosenergia-mennyiség alakulása az év folyamán.

A tervezés során felsorolt rendszeralkotó elemek mellett pluszkölségként megjelennek a tartószerkezetek, az UV álló vezetékek, MC4 típusú csatlakozók, kapcsolók is. Amennyiben a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kara az általam készített a-Si napelemekből álló 9,98 kWp teljesítményű hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszer mellett döntene, úgy a beruházási költségek a következőképpen alakulnának:

CIS Napelemek:	9 828 €
SMA Inverterek:	4 221 €
Napelemtartó szerkezet:	3 000 €
Egyéb költségek:	1 000 €
Összesen:	18 049 €

4.7. Kristályos szilícium napelem alkalmazása

A feladat végén referencia szinten egy kristályos szilícium napelemet is vizsgálat alá veszek. Világszinten a kristályos technológiával készülő modulok a fotovillamos piac 90%-át uralják, Magyarországon ez a részesedés a Dunasolar megszűnését követően gyakorlatilag megközelíti a 100%-ot. Magyarországon kapható kristályos szilícium napelemek közül a következő gyártók termékeiből választottam:

- Sharp,
- Korax,
- Kyocera,
- Sanyo,
- Trina Solar,
- Panasonic.

Számítógépes szimulációt követően a kiválasztott PV modul: Trina Solar TSM-PC05 polikristályos napelem. Származási helye Japán, magyarországi forgalmazó a Manitu Solar Kft. A Trina Solar 10 év teljes körű garanciát, 25 év 80%-os teljesítménygaranciát vállal a termékekre. A termék bekerülési költsége: bruttó 250€ /modultól (Napelemvasarlas.hu, 2012).

A Trina Solar TSM-PC05 főbb műszaki jellemzői:

- Névleges teljesítmény: 235 W
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti feszültség (V_{MPP}): 30,10 V
- Névleges teljesítményhez tartozó munkaponti áramerősség (I_{MPP}): 7,81 A
- Üresjárat feszültség (V_{OC}): 37,10 V
- Rövidzárási áram (I_{SC}): 8,31 A
- Modulhatásfok: 14,36%

A napelem geometriai méretei:

- Hossz: 1650 mm
- Szélesség: 992 mm
- Mélység: 40 mm
- Súly: 19,5 kg

4.7.1. A napelem mező méretének meghatározása

Az általam készített fotovillamos mező mérete 10 kWp teljesítményű. Ezek alapján a szükséges napelemek darabszámát a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$n_{\text{hálózatrado lg o z ó}} = \frac{P_{\text{mez ő}}}{P_{\text{mod ul}}} = \frac{10000}{235} = 42,55 \approx 42 \text{ [db]},$$

ahol: $n_{\text{hálózatrado lg o z ó}}$ – a hálózatra dolgozó PV rendszer napelemeinek a darabszáma [db],

$P_{\text{mez ő}}$ – a fotovillamos mező szükséges teljesítménye [Wp],

$P_{\text{mod ul}}$ – a fotovillamos modul teljesítménye [Wp].

A tényleges fotovillamos mező méretének meghatározása:

$$P_{\text{mez ő t é n y l e g e s}} = n_{\text{hálózatrado lg o z ó}} \cdot P_{\text{mod ul}} = 42 \cdot 235 = 9870 \text{ [Wp]},$$

ahol: $P_{\text{mez ő t é n y l e g e s}}$ – a választott napelemekkel kialakuló teljes fotovillamos mező [Wp],

4.7.2. A napelemek által árnyékolt tetőfelület meghatározása

Az árnyékolás mértékét a (4.1)-(4.5) képlet segítségével 33°-os dőlésszög mellett számolom. A modulok függőleges, vagy vízszintes elhelyezése nem számít, ugyanis a teljes takarás mértéke mindkét esetben megegyezik.

A döntött modulok függőleges vetületének a meghatározása:

$$Y = \sin \alpha \cdot W = \sin 33^\circ \cdot 992 = 540 \text{ [mm]}.$$

A döntött modulok vízszintes vetületének a meghatározása:

$$X = \cos \alpha \cdot W = \cos 33^\circ \cdot 992 = 832 \text{ [mm]}.$$

A modult érő téli napsugárzás által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$Z = \frac{Y}{\text{tg} \beta} = \frac{540}{\text{tg} 20^\circ} = 1484 \text{ [mm]}.$$

A teljes által árnyékolt szakasz meghatározása:

$$L = X + Z = 832 + 1484 = 2316 \text{ [mm]}.$$

A teljes által árnyékolt felület meghatározása:

$$T = L \cdot S = 2316 \cdot 1650 = 38421400 \text{ [mm}^2\text{]} = 3,84 \text{ [m}^2\text{]}.$$

A 9,87 kWp teljesítményű rendszer által árnyékolt felület meghatározása:

$$T_{10 \text{ kWp}} = T \cdot n_{\text{hálózatrado lg o z ó}} = 3,84 \cdot 42 = 161,28 \text{ [m}^2\text{]}.$$

A számítások alapján, a teljes hasznos tetőfelület (3000 m²) Trina Solar TSM-PC05 napelemekkel való beépítésével 183,6 kWp összteljesítményű napelemes erőművet lehetne létrehozni.

4.7.3. A napelemek által megtermelhető energia számítása

A hálózatra dolgozó inverternél, a magasabb hatásfok elérése miatt az inverterre magas bemenő DC feszültséget kell kapcsolni, ezért lehetőleg az összes modul sorba kapcsolása a cél.

A modulok által éves szinten előállított villamos-energia mennyiségének a meghatározása:

$$E_{\text{összes}} = n_{\text{összes}} \cdot P_{\text{modul}} \cdot Q_{\text{mező}} = 42 \cdot 235 \cdot 1022 = 10087140 \text{ [Wh]} \approx 10087 \text{ [kWh]},$$

hol: $E_{\text{összes}}$ – a teljes PV mező által termelt összes villamos-energia [kWh],

$n_{\text{összes}}$ – a felhasznált napelemek mennyisége [db],

P_{modul} – a modulok egyenkénti névleges teljesítménye [Wp],

$Q_{\text{mező}}$ – adott modul, adott tájolási és dőlésszögek mellett 1kWp teljesítményű fotovillamos mező által előállított éves energia mennyisége (szimulációs program alapján) [Wh/kWp].

4.7.4. Az inverter kiválasztása

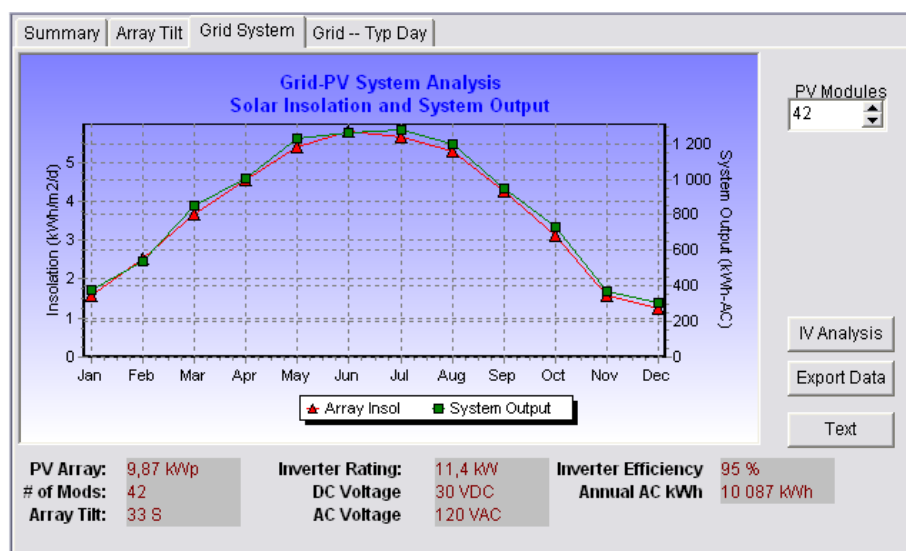
A hálózatra dolgozó inverter megválasztásánál az inverter szükséges teljesítményét a beépített fotovillamos rendszer teljesítménye fogja meghatározni. A polikristályos rendszer esetében 9,87 kW, vagy annál nagyobb összteljesítményű invertert, invertereket kell választanunk. A polikristályos technológiával rendelkező PV rendszerhez 2 darab SMA, Sunny Boy 5000TL-21 típusú hálózatra dolgozó invertert alkalmazok. (SMA Sunny Family 2010/2011 Catalog, 2010), ára: bruttó 1783 € (Solarshop-Europe, 2012).

Az inverter főbb műszaki tulajdonságai:

- Névleges AC teljesítménye: 5,25 kW
- Maximális DC feszültség: 750 V
- Hálózati feszültség: 180-280 V
- Hatásfoka: 97%
- Max bemeneti áramerősség: 15 A
- Súlya: 26 kg

4.7.5. Az amorf szilícium rendszer értékelése

Az analitikus számításokat az NSol! programmal szimuláltam, a kapott eredményeket ellenőrzés szempontjából összevettem az analitikus számításokkal. A program alapján az elkészített számítások megfelelőek. A program által elvégzett rendszer analízist a 4.18. ábrán mutatom be.



4.18. ábra. Az Nsol! által szimulált poli-Si napelemekből álló PV rendszer

Az elkészített szimuláción jól látható a fotovillamos mező által termelt villamosenergia-mennyiség alakulása az év folyamán.

A tervezés során felsorolt rendszeralkotó elemek mellett pluszkölségként megjelennek a tartószerkezetek, az UV álló vezetékek, MC4 típusú csatlakozók, kapcsolók is. Amennyiben a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kara az általam készített polikristályos napelemekből álló 9,87 kWp teljesítményű hálózatra visszatápláló fotovillamos energiaellátó rendszer mellett döntene, úgy a beruházási költségek a következőképpen alakulnának:

CIS Napelemek:	10 500 €
SMA Inverterek:	3 566 €
Napelemtartó szerkezet:	3 000 €
Egyéb költségek:	1 000 €
Összesen:	18 066€

5. Gazdasági értékelés

A 4. fejezetben részletesen vizsgált vékonyréteg, illetve a kristályos szilícium PV-s rendszerek összehasonlítását a 3. melléklet tartalmazza.

Az eredményekből kiderül, hogy a szimulált rendszerek beruházási költségei között lényeges eltérések vannak. Az árak egységre vonatkoztatott összevetését az 5.1. táblázatban szemléltetem.

5.1. táblázat. A különböző típusú PV rendszerek bekerülési költségei

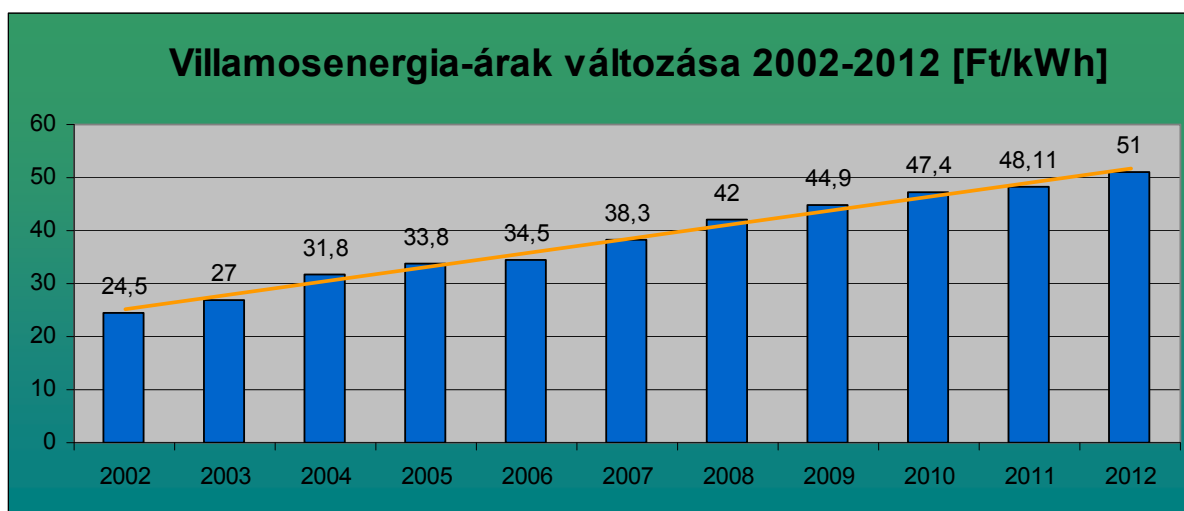
Technológia	Modul egységnyi bekerülési költsége	Beépített teljesítmény	Bekerülési költség	Rendszer egységnyi bekerülési költsége
	[€/Wp]	[kWp]	[€]	[€/Wp]
CIS	1,85	10,125	26 971	2,66
CdTe	0,71	10,030	15 419	1,54
amorf-szilícium	0,75	9,984	18 049	1,81
polikrist-szilícium	0,81	9,870	18 066	1,83

A statikus megtérülési idő számítását (51 Ft/kWh mellett, 1 EUR = 281,84 HUF árfolyamon) az 5.2. táblázat tartalmazza.

5.2. táblázat. A különböző PV technológiák megtérülési ideje

Technológia	Bekerülési költség	Bekerülési költség	Évente előállított villamos-energia	Évenként termelt energia ára	Statikus megtérülési idő
	[€]	[Ft]	[kWh/év]	[Ft/év]	[év]
CIS	26 971	7 601 507	10 308	525 708	14,5
CdTe	15 419	4 345 691	10 271	523 821	8,5
a-Si	18 049	5 086 930	10 212	820 812	10
poli-Si	18 066	5 091 721	10 087	514 437	10

Amennyiben realisabb megtérülést akarunk, akkor dinamikus megtérülési idővel kell számolni. Az elmúlt tíz évben a villamos-energia ára folyamatosan növekedett, ezt a tendenciát az 5.1. ábra mutatja. A Központi Statisztikai Hivatal (KSH) adatai szerint az elmúlt tíz év esetében évi 7,71%-al növekedett a villamosenergia-lakossági ára (KSH, 2012).



5.1. ábra. Villamosenergia-árak változása az elmúlt évtizedben (saját készítés KSH adataival)

Az ábra adatainak figyelembe vételével a dinamikus számításokkal a megtérülési idő a következőképpen fog alakulni:

- CIS napelemekkel összeállított rendszer: 11,5 év,
- CdTe napelemekkel összeállított rendszer: 7,5 év,
- a-Si napelemekkel összeállított rendszer: 8,5 év,
- Poli-Si napelemekkel összeállított rendszer: 8,5 év.

A statikus és a dinamikus megtérülési idő között autonóm rendszereknél nagyobb eltérést lehetne tapasztalni, ugyanis ugyanakkora napelem mező mellett költségesebb beruházást igényel, amelynek több tíz év a megtérülési ideje.

Az egyes technológiák összevetésével megállapítottam, hogy a CdTe napelemes rendszer megtérülési ideje a legrövidebb, és a CIS technológiával készülő rendszeré a leghosszabb. Néhány évvel ezelőtt a szilícium napelemek vitathatatlanul olcsóbbak voltak, mint az említett napelem típusok. Pl. 2005-ben, a Szent István Egyetemen megvalósult 10kWp hálózatra visszatápláló rendszerénél az ASE-100 típusú polikristályos szilícium napelemek bekerülési költsége 500 €/modul volt, amely egységnyi bekerülési költsége 5 €/Wp volt. 2010-ben a polikristályos szilícium napelemek bekerülési költsége 3 €/Wp érték között mozgott. Jelenleg (dolgozatom elkészítése idején), az európai piacon résztvevő kristályos szilícium típusú fotovillamos modulok egységnyi bekerülési költsége az 0,8-1,5 €/Wp között mozog.

A modulkölségek jelentős csökkenésének oka a kínálat növekedésében és a gyártási költségek csökkentésében rejlik.

Egyes országokban a beruházási költségek csökkentése érdekében állami támogatásokra lehet pályázni, amelyek utófinanszírozással a beruházás akár 30%-át is fedezhetik.

Következtetések, javaslatok

A dolgozat célkitűzésének megfelelően a vékonyrétegű fotovillamos technológiák vizsgálatával a Szent István Egyetem Műszaki és Természettudományi Oktató Központjának napelemekkel történő villamosenergia-ellátására több lehetséges alternatívát dolgoztam ki.

Megállapítottam, hogy az általam vizsgált rendszerek közül jelenleg a CdTe napelemekből álló fotovillamos rendszer a legolcsóbb, de a cellák előállításánál alkalmazott kadmium környezetre gyakorolt káros hatása miatt az Európai Unió területén nem engedélyezett a használata. CdTe napelemek gyártását és telepítését jelenleg az USA-ban szorgalmazzák.

Beruházási költség szempontjából második helyen az amorf szilícium napelemes rendszerek állnak, de a modulok hatásfokából adódóan egységnyi teljesítmény előállításához szükséges felület ebben az esetben a legnagyobb.

A kristályos szilícium technológiával készülő rendszerek 90%-os piaci részesedése azzal magyarázható, hogy az egységre vonatkoztatott bekerülési költségek a CdTe, az amorf- és a kristályos szilícium napelemeknél nagyjából megegyezik, de egységnyi felületen előállított villamosenergia-mennyisége a CdTe napelemhez képest 1,2-szerese, az amorfhoz viszonyítva 1,6-szorosa, ez az érték leginkább a modulok energiaátalakítási hatásfokából tevődik össze.

A CIS, és a CIGS technológiával készülő modulok egységnyi bekerülési költsége a legmagasabb, hozzávetőlegesen kétszerese a többi technológiának. Ugyanakkor, ha azt vesszük figyelembe, hogy néhány évvel ezelőtt a kristályos modulok is hasonló költségűek voltak, akkor ezek beruházási költsége sem tekinthető nagyon magasnak. A CIS-CIGS technológiával készülő kereskedelmi forgalomban kapható modulok előállítása jelenleg költséges, és így az előállított modulok hozzáférhetősége korlátozott.

A fotovillamos technológiában igazi áttörést viszont akkor lehetne elérni, ha a laboratóriumi körülmények között készülő cellák hatásfoka a sorozatgyártásban is elérhető lenne. Az általam vizsgált vékonyréteg előállítási technológiák közül véleményem szerint az MBE technológia jelenti az alternatívát, ugyanis egy jól kidolgozott, magas hatásfokkal bíró napelem struktúrát 10-15 erre a célra összeszerelt MBE berendezésben sorozatgyártással lehetne készíteni. Jelenleg az MBE rendszerek nem olcsók, ugyanis egyedi kísérleti előállításra lettek kifejlesztve, de ha gyártórendszerként akarnánk üzemeltetni, úgy az általuk előállított cellák a magas hatásfok mellett alacsony költségekkel is készülhetnének.

Végső konklúzióként elmondhatjuk, hogy a SZIE MTOK fotovillamos fotovillamos modulokkal történő villamosenergia-ellátására kidolgozott rendszerek közül jelenleg polikristályos szilícium modulokkal a leggazdaságosabb.

Felhasznált irodalom

1. Baldwin, S.: Energy Efficiency & Renewable Energy: Challenges and Opportunities, Clean Energy SuperCluster Expo, Colorado State University, 2011, p. 88.
2. Bernreuter, J.: Nano-columns and other tricks, Sun & Wind Energy, 2010, 1. sz., p. 100-105.
3. Burger, B. – Rüther, R.: Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature, Solar Energy, 2006, Vol. 80, pp. 32-45.
4. Du, B. – Hu, E. – Kohle, M.: Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Issue 9, 2012, pp. 6732-6736.
5. Duffie, J. A. – Beckman, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2006, pp. 238-300.
6. EPIA, European Photovoltaic Industry Association: Annual Report 2011, Busseles, Belgium, 2012, p. 34.
7. Euroobserver: Photovoltaic Barometer 2012, Hors-Série, le journal du photovoltaïque No. 7, Paris, France, 2012, pp. 9-24.
8. Farkas, I. – Vajk, I.: Modelling and control of a distributed collector field, Energy and the Environment, 2002, Vol. I. Opatija, Croatia, pp. 91-98.
9. Farkas, I.: Fotovillamos napenergia-hasznosítási szemináriumok, G modul, általános ismeretek, oktatási anyag, 1. kötet, Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszék, Gödöllő, 2005, 275 o.
10. Farkas, I.: Napenergia a mezőgazdaságban, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2003, 37-46, 54-65, 255-267. o.
11. Farkas, I. – Rusirawan, D. – Galambos, E.: Hálózatra kapcsolt napelemmező cella/modul alapú modellezése, Magyar Energetika, 2012. XIX. évf. 2. sz. 6-9. o.
12. First Solar: Annual Report 2007, Tempe, Arizona, United States p. 112.
13. Flamand, G.: Contribution for a sustainable energy future, Sun & Wind Energy, 2010, 4. sz., pp. 152-158.
14. Fülöp, L. – Szűcs, M. – Zöld, A.: A napenergia passzív hasznosításának hazai potenciálja, Energiagazdálkodás, 2005, 46. évf. 1. sz., 8-13. o.
15. Galambos, E.: Családi ház villamosenergia-ellátása fotovillamos rendszerrel, szakdolgozat, Gödöllő, 2010. 63 o.
16. Galambos, E. – Almássy, A.: Bevezetés az NSol! 4.4 Fotovillamos méretező program használatába, Szent István Egyetem, Fizika és Folyamatirányítási Tanszék, No. 44. jelentés, 2011 június, 41 o.
17. Grätzel, M.: Dye-sensitized solar cells, Journal of Photochemistry and Photobiology, Vol. 4, 2003, pp. 145-153.
18. Igalsen, M. – Bogegard, M. – Stolt, L.: Reversible changes of the fill factor in the ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 80, Issue 2, 2003, pp. 195-207.

19. Komlós, F. – Fodor, Z. – Kapros, Z. – Vajda, J. – Vaszil, L.: Hőszivattyús rendszerek, Komlós Ferenc, Dunaharaszti, 2009, 13-65. o.
20. Li, J. – Kim, S. – Edington, S. – Nedy, J. – Cho, S. – Lee, K. – Heeger, A.J. – Gupta, M.C. – Yates, J.T.: A study of stabilizaton of P3HT/PCBM organic solar cells by photovhematical active TiOx layer, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, Issue 4, April 2011, pp. 1123-1130.
21. Markvart, T. – Castaner, L.: Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications, Elsevier, Oxford, UK, 2003, p. 8-61, 536-654.
22. Marszal, A. J. – Heiselberg, P. – Bourrelle, J.S. – Musall, E. – Voss, K. – Sartori, I. – Napolitano, A.: Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, Energy and Buildings, Vol. 43, Issue 4, April 2011, pp. 971-979.
23. Meyer, J. P.: More than solar, Sun & Wind Energy, 2010, 1. sz. p. 40-53.
24. Nemcsics, Á.: A napelem és fejlesztési perspektívái, Akadémia kiadó, Budapest, 2001, 21-52, 65-115. o.
25. Nemcsics, Á.: A napelem működése, fajtái és alkalmazása, Budapesti Műszaki Főiskola, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Főiskolai jegyzet, Budapest, 2005, 21-100. o.
26. Nemcsics, Á – Heyn, Ch. – Stemann, A. – Schramm, A. – Welsch, H. – Hansen, W.: The RHEED tracking of the droplet epitaxial grown quantum dot and ring structures, Material Science and Engineering B, Vol. 165, 2009 pp. 118-121.
27. Nemcsics, Á. – Réti, I. – Tényi, V. G. – Kucsera, P. – Tóth, L. – Harmat, P. – Amadou, M. – Csutorás, M. – Kupás-Deák, B. – Sándor, T. – Bozsik, J.: Molekulasugár-epitaxiás nanostruktúrák előállításának műszaki feltételei, Gép, LXI. Évf. 8. sz., 2010. 29-32. o.
28. Pálffy, M.: Fotovillamos rendszerek (szerk: Farkas I.: Napenergia a mezőgazdaságban könyv 5. fejezet), Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2003, 100-149. o.
29. Pálffy, M.: A fotovillamos napenergia-hasznosítás helyzetet 2010-ben, Magyar Energetika, 2010. XVII. évf. 11-12. sz. 16-30. o.
30. Poulek, V. – Libra, M.: Solar Energy, Photovoltaics – promissing trend for today and close future, Czech University of Agriculture in Prague, 2006. pp. 32-94.
31. PV Status Report, 2011, Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, JRC Scientific and Technical Reports, Ispra, Italy, pp. 33-59.
32. Raman, P. – Mande, S. – Kishore, V.V.N.: A passive solar system for thermal confort conditioning of buildings in composite climates, Solar Energy, Vol. 70, Issue 4, 2001, pp. 319-329.
33. Räuber, A.: Solar cell technologies and their characteristics, PSE Projektgesellschaft Solare Energiesysteme mbH, Freiburg, Germany, 2008, p. 1-24.
34. Roman, E. H.: Complex oxides grow up, an atomic layer at a time, Focus on Materials, Pennsylvania State University, Materials Research Institute Bulletin, spring, 2011, Pennsylvania, USA, 2011, pp. 14-17.
35. Roth, W. – Kaiser, R.: Fundamentals of Solar Energy, Fraunhofer Institut for Solar energia System ISE, Freiburg, Germany, 2008 p. 1-17.

36. Rusirawan, D. – Galambos, E. – Farkas, I.: Napelem modulok teljesítménynövelése érdekében kidolgozott technológiák,
Mezőgazdasági Technika, LIII. évfolyam, 2012. július, 5-7. o.
37. Ryu, M.S. – Jang, J.: Improvement of conversion efficiency of bulk heterojunction organic solar cells using photo-curable crosslinker,
Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 94, Issue 8, 2010, pp. 1384-1388.
38. SMA: Sunny Family 2010/2011 catalog, The Future Solar Technology, SMA Solar Technology AG, Germany, 2010, 220 p.
39. Tiwari, G.N. – Dubey, S.: Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, RSC Publishing, Cambridge, UK, 2010, p. 63-76, 81-110.
40. Wenham, S. R. – Green, M. A. – Watt, M. E. – Corkish, R.: Applied photovoltaics, Earthscan, Padstow, Cornwall, UK, 2007, p. 3-29, 97-117, 125-132.
41. Zweibel, K. – Mason, J. – Fthenakis, V.: A Solar Grand Plan,
Scientific American, 2008/1, pp. 64-73.

Elektronikus források

42. Alternatív Energia – Meddig „él” egy napkollektor? –
<http://www.alternativenergia.hu/meddig-%E2%80%99Eel%E2%80%99D-egy-napkollektor/45239> – Letöltve: 2012-10-09.
43. Casualzone, How chip is made (from sand and silicon) –
<http://casualzone.blogspot.hu/2009/12/how-chip-is-made-from-sand-to-silicon.html> – Letöltve: 2012-10-21.
44. First Solar, 290 MW (AC) Agua Caliente Solar Project –
<http://www.firstsolar.com/Projects/Projects-Under-Development/Agua-Caliente-Solar-Project/Overview> – Letöltve: 2012-09-14.
45. Global Solar Energy – Power the Possibilities –
<http://www.globalsolar.com/company/history> – Letöltve: 2012-09-26.
46. Juwi – Waldpolenz Solar Park –
[http://www.juwi.co.uk/solar_energy/references/details.html?cHash=e527ac389e678c2c31c39f5ac15a05d8&tx_juwireferences_pi1\[_widget_0\]\[currentPage\]=2&tx_juwireferences_pi1\[reference\]=1411&tx_juwireferences_pi1\[action\]=detail&tx_juwireferences_pi1\[controller\]=Reference](http://www.juwi.co.uk/solar_energy/references/details.html?cHash=e527ac389e678c2c31c39f5ac15a05d8&tx_juwireferences_pi1[_widget_0][currentPage]=2&tx_juwireferences_pi1[reference]=1411&tx_juwireferences_pi1[action]=detail&tx_juwireferences_pi1[controller]=Reference) – Letöltve: 2012-09-24.
47. Központi Statisztikai Hivatal – <http://www.ksh.hu/energiagazdalkodas> – Letöltve: 2012-10-28
48. MTOK, Műszaki és Természettudományi Oktató Központ honlapja –
<http://mtok.szie.hu/?q=node/77> – Letöltve: 2012-09-29
49. Napelemvásárlás.hu – Sharp NA japán napelem vékonyrétegű a-Si technológia –
http://napelemvasarlas.hu/product.php?tipus=Sharp_NA – Letöltve: 2012-10-28
50. National Renewable Energy Laboratory (NREL) –
<http://www.nrel.gov/> – Letöltve: 2012-10-04.

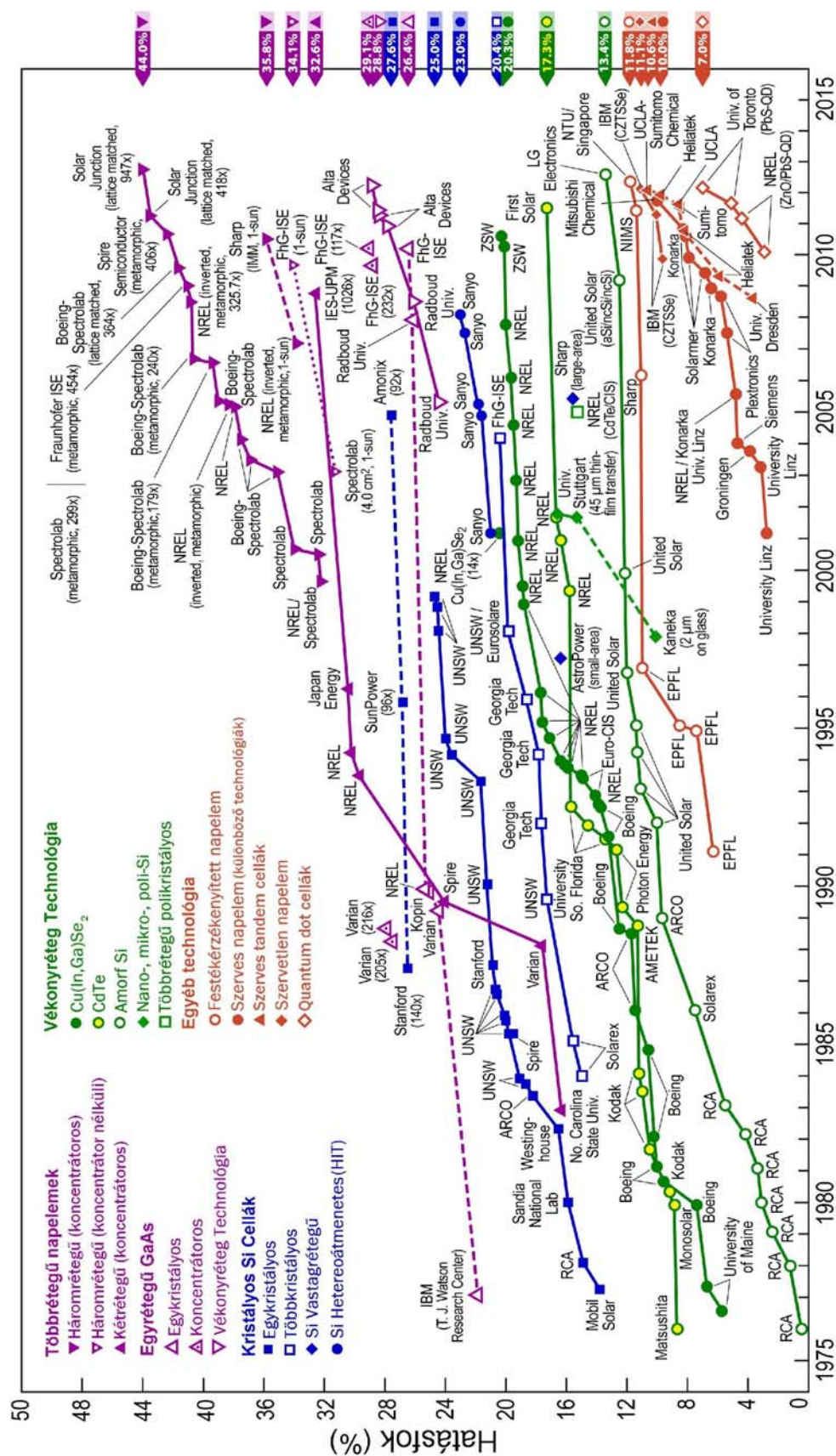
51. Országos Meteorológiai Szolgálat honlapja, Éghajlati adatsorok, Budapest – http://www.met.hu/eghajlat/eghajlati_adatsorok/bp/index.htm – Letöltve: 2012-10-23.
52. Project Helios – <http://www.helios-project.eu/> – Letöltve: 2012-09-11.
53. PV Matrix – Solar Panels 85 watt First Solar FS – 385 – <http://www.pv-matrix.com/en/first-solar-fs-385.html> – Letöltve: 2012-10-28.
54. Quality Thin Films, Inc., Thin Film coating & precision optical components – <http://www.qtf.com/coat.html> – Letöltve: 2012-10-21.
55. Solarshop-Europe – Avancis PowerMax 135 Wp (On-Grid CIS Solar Panel) – http://www.solarshop-europe.net/product_info.php?products_id=2007 – Letöltve: 2012-10-28.
56. SolFocus – CPV, Solar Systems, photovoltaic, solar tracker, solar panel manufacturers – <http://www.solfocus.com/en/index.php> – Letöltve: 2012-10-21.
57. Solteature – Tectum flat roof system – <http://www.solteature.com/products/system-solutions/tectum-flat-roof-system.html> – Letöltve: 2012-10-27
58. Sony Global, CX-News Vol. 56., Dyes convert light into electricity, the next generation solar cells – http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol56/sideview1.html – Letöltve: 2012-10-21.
59. Újszilvás Napelem Park – Újszilvás község hivatalos honlapja – <http://www.ujszilvas.hu/ujszilvas/?q=taxonomy/term/35> – Letöltve: 2012-09-12.

Dolgozat készítéséhez felhasznált programok

- NSol! Version 4.4
- SMA Sunny Design Version 2.30.0.R

Mellékletek

1. sz. melléklet – Napelem celláknál elért legjobb hatásfok értékek (NREL, 2012)



2. sz. melléklet – Vékonyrétegű napelemek komplex összehasonlító táblázata

Kereskedelmi forgalomban kapható CIS napelemek

Gyártó	Típus	Teljesítmény	Hatásfok	Tömeg	Hosszúság	Szélesség	Felület	1kWp napelem hány darab	1 kWp napelem felülete	1kWp teljesítménnyel előállított villamos-energia
		[Wp]	[%]	[kg]	[mm]	[mm]	[m ²]	[db]	[m ²]	[kWh/év]
Avancis	PowerMax SMART	135	12,81	22,0	1587	664	1,05	7,41	7,81	1018,06
Axitec	AC-60CIS/7.5-80	60	7,28	13,7	1256	656	0,82	16,67	13,73	1028,24
Bosch Solar Energy	C100-A1	57	9,34	---	1206	506	0,61	17,48	10,66	1010,49
Johanna Solar Tech.	C100-A1 57	57	9,359,3 ₄	---	1206	506	0,61	17,48	10,66	1010,49
Odersun	ODS 170 95R	95	5,59	---	1700	1000	1,70	10,53	17,89	1014,91
Schüco	SPV 80-TF	80	10,11	12,5	1235	641	0,79	12,50	9,90	1027,71
Shell Solar	Eclipse 80-C	80	9,30	14,0	1311	656	0,86	12,50	10,75	1006,61
Solar Frontier	SF155-L	155	12,62	---	1257	997	1,25	6,45	8,09	1029,76
Sulfurcell	SCG65-HV-F	65	7,85	---	1258	658	0,83	15,38	12,73	1022,50
Würth Solar	WS 31050 / 80 W	80	10,97	12,6	1205	605	0,73	12,50	9,11	1028,04

Kereskedelmi forgalomban kapható CIGS napelemek

Gyártó	Típus	Teljesítmény	Hatásfok	Tömeg	Hosszúság	Szélesség	Felület	1kWp napelem hány darab	1 kWp napelem felülete	1kWp teljesítménnyel előállított villamos-energia
		[Wp]	[%]	[kg]	[mm]	[mm]	[m ²]	[db]	[m ²]	[kWh/év]
Disa Solar	WSLB-3200-190	320	10,69	---	4780	626	2,99	3,13	9,35	1039,92
ERDM Solar	ERDM-SOLAR CIGS 140	140	7,95	24,0	1925	915	1,76	7,14	12,58	1009,82
Euro-Line Solar GmbH	Me182	182	10,91	---	1909	874	1,67	5,50	9,18	1015,41
Global Solar Energy Inc	PowerFlex BIPV 300W	300	10,55	---	5745	495	2,84	3,33	9,48	1012,42
Honda CIGS	HEM125PVA	125	11,50	14,4	767	1417	1,09	8,00	8,69	1016,60
Mia Sole	MR-111	111	10,36	---	1611	665	1,07	9,01	9,65	1010,27
Phoenix Solar	MR-107	120	11,20	---	1611	665	1,07	8,33	8,93	1017,42
Q-Cells	Q.Smart UF L 115	115	12,24	---	1190	790	0,94	8,70	8,17	1023,57
Roto	SFP CIGS 85 W	85	11,34	---	1190	630	0,75	11,76	8,82	1021,37
Shurjo Energy	SE182MP-FG1418W	182	10,91	---	1909	874	1,67	5,55	9,18	1015,41
Solibro	SL1-85	85	11,17	15,9	1196	636	0,76	11,76	8,95	1012,55
Solynda	SL-200-220	220	8,85	---	2280	1090	2,49	4,55	11,33	1020,98
Stion	SN-120	120	10,96	---	1674	654	1,09	8,33	9,12	1017,08
TSMC Solar	TS-150 CIGS	150	13,81	---	1656	656	1,09	6,67	7,24	1019,17

Kereskedelmi forgalomban kapható CdTe és CdS/CdTe napelemek

Gyártó	Típus	Teljesítmény	Hatásfok	Tömeg	Hosszúság	Szélesség	Felület	1kWp napelem hány darab	1 kWp napelem felülete	1kWp teljesítménnyel előállított villamos-energia
		[Wp]	[%]	[kg]	[mm]	[mm]	[m ²]	[db]	[m ²]	[kWh/év]
CdTe										
Abound Solar	AB1-75	72	10,42	---	1200	600	0,72	13,33	9,60	1014,95
Antec Solar	ATF-50	50	6,94	16,0	1200	600	0,72	20,00	14,40	1016,30
Astom AG	ASC A67	68	9,38	---	1200	600	0,72	14,81	10,67	1026,48
Calyxo	CX65	65	9,03	12,0	1200	600	0,72	15,38	11,08	1050,77
First Solar	FS-65	65	9,03	11,4	1200	600	0,72	15,38	11,08	990,48
JMS	FS-275	75	10,42	12,0	1200	600	0,72	13,33	9,60	1024,67
CdS/CdTe										
First Solar	FS-385	85	12,15	---	1200	600	0,72	11,43	8,23	1024,00
Q-Cells	CX60	60	8,33	12,0	1200	600	0,72	16,67	12,00	1050,56

Kereskedelmi forgalomban kapható amorf szilícium napelemek 1.

Gyártó	Típus	Teljesítmény	Hatásfok	Tömeg	Hosszúság	Szélesség	Felület	1kWp napelem hány darab	1 kWp napelem felülete	1kWp teljesítménnyel előállított villamos-energia
		[Wp]	[%]	[kg]	[mm]	[mm]	[m ²]	[db]	[m ²]	[kWh/év]
Alfa Solar	SI S3-170.A1	167	5,84	60,0	1300	2200	2,86	6,00	17,16	1041,60
Astom AG	ASSG100	100	6,49	---	1100	1400	1,54	10,00	15,40	1021,50
Auria	M140000	140	9,79	---	1300	1100	1,43	7,14	10,21	1022,23
Bangkok Solar	BS-50	50	6,32	13,5	1245	635	0,79	20,00	15,81	1027,10
Blitzstrom	EPV-142 3-1	142	5,87	32,0	1920	1260	2,42	7,02	16,98	1053,33
Bosch Solar Energy	µm-Si plus EU1510	130	9,09	---	1300	1100	1,43	7,69	11,00	1027,31
Btw-Solarfilms	TW-SF-W105	105	7,34	---	1100	1300	1,43	9,52	13,62	1017,43
Dunasolar	DS-40	40	5,06	13,2	1245	635	0,79	25,00	19,76	1020,40
DuPont Apollo	DA133	133	8,50	---	1409	1110	1,56	7,55	11,80	1007,36
EPV	EPV-53	53	5,64	14,5	1321	711	0,94	18,87	17,72	1022,74
Gadir Solar	GADIR 1-SiR.100	100	6,99	---	1300	1100	1,43	10,00	14,30	1018,10
Glasswerke Arnold	Voltarlux-4-JL	156	5,68	---	1072	2560	2,74	6,40	17,56	1015,12
HB-Tech	HBS-90-A-016	90	5,79	---	1406	1106	1,56	11,11	17,28	1018,61
IBC	K 60	60	6,31	14,0	960	990	0,95	16,67	15,84	1028,33

Kereskedelmi forgalomban kapható amorf szilícium napelemek 2.

Gyártó	Típus	Teljesítmény	Hatásfok	Tömeg	Hosszúság	Szélesség	Felület	1kWp napelem hány darab	1 kWp napelem felülete	1kWp teljesítménnyel előállított villamos-energia
		[Wp]	[%]	[kg]	[mm]	[mm]	[m ²]	[db]	[m ²]	[kWh/év]
Ibersolar	ES-62	62	6,23	10,9	1257	792	1,00	16,07	16,00	1003,48
Inventux	iMpv-125	125	8,74	25,5	1300	1100	1,43	8,00	11,44	1028,80
Mitsubishi	MT140T3	140	8,89	21,0	1414	1114	1,58	7,14	11,25	1017,50
Moser Baer	Bin 400W	400	6,99	---	2600	2200	5,72	2,5	14,30	1020,94
Parabel	SmartRoof 144	144	6,66	---	5486	394	2,16	6,96	15,04	1017,13
Phoenix Solar	PHX-135	135	9,50	---	1409	1009	1,42	7,41	10,53	1021,85
Sanyo	HIP-167 B2-BO-01	167	14,16	14,0	1319	894	1,18	6,00	7,08	1024,00
Schott Solar GmbH	ASI-F 100	96,6	5,24	23,0	1815	1015	1,84	10,35	19,05	1013,10
Sharp	NA-F128GK	150,6	10,59	---	1409	1009	1,42	6,64	9,43	1021,85
Solartechics	SN44W/p	44	5,57	12,2	1245	635	0,79	22,64	17,90	1018,11
Sunset	KA60	60	6,31	14,0	990	960	0,95	16,67	15,84	1020,00
Tianwei	TW-SF 100	100	6,99	---	1300	1100	1,43	10,00	14,30	1016,20
Viessmann	Vitovolt 100 RB 1	86	5,93	19,0	1308	1108	1,43	11,65	16,88	1016,89
Würz Energy	EPV-42	42	5,31	12,3	1245	635	0,79	23,76	18,79	1027,33

3. sz. melléklet – A 10 kWp PV rendszer vizsgált moduljainak értékelő táblázata

Technológia	Gyártó	Típus	Teljesítmény [Wp]	Modul hatásfok [%]	Felhasznált modulok száma [db]	Bépipített teljesítmény [kWp]	Napelem felület [m ²]	Éves vill. en. termelés [kWh/év]	Teljes rendszer beruházási költsége [€]	Teljes tetőfelületen beépíthető napelem kapacitás [kWp]
CIS	Avancis	PowerMax Smart	135	12,81	75	10,125	184,50	10308	26 971	165
CdTe	First Solar	FS-65	85	9,03	118	10,030	198,24	10271	15 419	152
a-Si	Sharp	NA 128W	128	9,00	78	9,984	258,96	10212	18 049	116
poli-Si	TrinaSolar	TSM-PC05 235W	235	14,36	42	9,870	161,28	10087	18 066	183,6

4. sz. melléklet – Táblázatok jegyzéke

2.1. táblázat.	PV modul technológiák alakulása	17. o.
5.1. táblázat.	A különböző típusú PV rendszerek bekerülési költségei	68. o.
5.2. táblázat.	A különböző PV technológiák megtérülési ideje	69. o.

5. sz. melléklet – Ábrák jegyzéke

2.1. ábra.	Fototermikus napenergia-hasznosító berendezés sémája	8. o.
2.2. ábra.	Napelemes rendszerek általános működési elve	12. o.
2.3. ábra.	A Napsugárzás spektruma	12. o.
2.4. ábra.	A láthatófény spektruma	13. o.
2.5. ábra.	Kristályos szilícium cella, és működése	15. o.
2.6. ábra.	Fotovillamos cella STC körülmények között kialakuló karakterisztikája	16. o.
2.7. ábra.	Az egykristályos szilícium gyártásánál készített kristálytömb szeletelése	18. o.
2.8. ábra.	A SZIE hálózatra dolgozó PV rendszer moduljai	20. o.
2.9. ábra.	A három átmenettel rendelkező cellák működése	21. o.
2.10. ábra.	A háromrétegű napelem spektrális érzékenysége	22. o.
2.11. ábra.	A koncentrátoros napelemek szerkezeti kialakítása	22. o.
2.12. ábra.	Sony által kifejlesztett festék érzékeny napelemek prototípusa	23. o.
3.1. ábra.	Amorf napelemek elkészítése háromlépéses szeparációval	29. o.
3.2. ábra.	Az MBE főkamrájának a kialakítása	31. o.
3.3. ábra.	Az MTA TTK MFA molekulasugár epitaxiás berendezése	32. o.
3.4. ábra.	Műnap szimulátor fotovillamos modulok minősítésére	34. o.
4.1. ábra.	Évi középhőmérséklet alakulása a XX. században	37. o.
4.2. ábra.	Az éves csapadékmennyiség Gödöllőn	38. o.
4.3. ábra.	Napfénytartam alakulása Budapesten és környékén a XX. században	39. o.
4.4. ábra.	Magyarországon a napfénytartam alakulása	39. o.
4.5. ábra.	Globálsugárzás alakulása Magyarországon	40. o.
4.6. ábra.	Budapesten, a havi átlagos napi sugárzás értékek	40. o.
4.7. ábra.	A trapézlemez elhelyezése az acélszelemeneken	42. o.
4.8. ábra.	A tetőrendszer szigetelése	42. o.
4.9. ábra.	A fotovillamos modulok elhelyezésére szolgáló tetőfelület	43. o.
4.10. ábra.	Az Nsol! grafikus kezelőfelülete	45. o.
4.11. ábra.	Az SMA Sunny Design grafikus kezelőfelülete	46. o.

4.12. ábra.	Téli napsütéskor az árnyékolt tetőrész 33°-os napelem dőlésszög esetén	49. o.
4.13. ábra.	Vízszintes napelem elhelyezés esetén nincs árnyékolt tetőrész	50. o.
4.14. ábra.	Lapostetőre, tetőmegbontás nélkül szerelhető modultartók	54. o.
4.15. ábra.	Az Nsol! által szimulált CIS napelemekből álló PV rendszer	55. o.
4.16. ábra.	Az Nsol! által szimulált CdTe napelemekből álló PV rendszer	59. o.
4.17. ábra.	Az Nsol! által szimulált a-Si napelemekből álló PV rendszer	63. o.
4.18. ábra.	Az Nsol! által szimulált poli-Si napelemekből álló PV rendszer	67. o.
5.1. ábra.	Villamosenergia-árak változása az elmúlt évtizedben	69. o.

6. sz. melléklet – Rövidítések jegyzéke

A –	Amper
a-Si –	Amorphous Silicon – amorf szilícium
AC –	Alternating Current – váltóáram
Ag –	Ezüst
ALD –	Atomic Layer Deposition – atomi rétegleválasztás
AM –	Air Mass – Légtömeg
CdTe –	Cadmium telluride – kadmium tellúr
CIGS –	Copper indium gallium selenide – réz indium gallium szelén
CIS –	Copper indium selenide – réz indium szelén
CMP –	Chemical Mechanical Planarization – kémiai mechanikai vékonyréteg készítés
CPV –	Concentrated photovoltaics – optikai koncentrátorokkal ellátott fotovillamos cella
CVD –	Chemical Vapor Deposition – kémiai gőzfázisú leválasztás
DC –	Direct Current – egyenáram
DC Sputtering –	Diódás porlasztás – fizikai leválasztás
DSSC –	Dye-sensitized solar cell – festék érzékeny napelem
EBPVD –	Electron Beam Physical Vapor Deposition – elektronsugaras fizikai gőzfázisú párologtatás
ESTI –	European Solar Test Installation – európai szolár teszt telepítés
EVA –	Ethylene vinyl acetate – etilén-vinil-acetát
FF –	Fill factor – kitöltési tényező
GW –	Gigawatt
GWp –	Gigawatt peak – névleges csúcsteljesítmény
HMV –	Használati meleg víz
I_0 –	Napállandó, értéke 1353 W/m^2
I_{diff} –	Diffúz sugárzás
I_{dir} –	Direkt sugárzás
I_{glob} –	Globálisugárzás
I_{refl} –	Reflektált sugárzás
I_{MPP} –	Napelem maximális teljesítményénél mérhető áramerősség
I_{SC} –	Napelem rövidre zárási árama
IKT –	Információs és kommunikációs technológia

kg/m ² –	Kilogramm/négyzetméter
km ² –	Négyzetkilométer
KSH –	Központi Statisztikai Hivatal
kW –	Kilowatt
kWh –	Kilowatt-óra
kWh/m ² –	Kilowatt-óra/négyzetméter – energiasűrűség
kWp –	Kilowatt-peak – névleges teljesítmény
LOLP –	Loss-of-Load Probability – töltés veszteség valószínűsége
m –	Méter
m ² –	Négyzetméter
mm –	Milliméter
mm ² –	Négyzetmilliméter
nm –	Nanométer
μm –	Mikrométer
μSi –	Microcrystalline silicon – mikrokristályos szilícium
MBE –	Molecular Beam Epitaxy – molekulásugár epitaxia
MJ/m ² –	Megajoule/négyzetméter
MPP –	Napelem maximális teljesítménypontja, munkapontja
MTA TTK MFA –	Magyar Tudományos Akadémia, Természettudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
MTOK –	Műszaki és Természettudományi Oktató Központ
MW –	Megawatt
MWp –	Megawatt peak – névleges csúcsteljesítmény
nm –	Nanométer
NREL –	National Renewable Energy Laboratory – az USA Megújuló Energiákat Kutató Intézete
OMSZ –	Országos Meteorológiai Szolgálat
OPV –	Organic Photovoltaic Solar Cells – természetes alapanyagú napelem
PE CVD –	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition – plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztás
PLC –	Programmable Logical Controller – programozható logikai vezérlő
P _{MPP} –	Napelem maximális teljesítménypontjában mérhető teljesítmény
PV –	Photovoltaic – fotovillamos
PVC –	Poly Vinyl Chloride

PVD –	Physical Vapor Deposition – fizikai gőzfázisú leválasztás
RF sputtering –	Rádiófrekvenciás porlasztás – fizikai leválasztás
RHEED –	Reflection High Energy Electron Diffraction - reflexiós nagy energiájú elektrondiffrakció
SnO ₂ –	Ónoxid
STC –	Standard Test Conditions – Standard teszt feltételek
SZIE –	Szent István Egyetem
TCO –	Transparent conducting oxide – átlátszó vezető oxidréteg
TFSC –	Thin-Film Solar Cell – vékonyrétegű napelem
TF-Si –	Thin-Film Silicon – vékonyrétegű szilícium napelem
UHV –	Ultra-high vacuum – ultranagy vákuum
V –	Volt
V _{MPP} –	Napelem maximális teljesítményénél mérhető feszültségérték
V _{OC} –	Napelem üresjáratú feszültsége
VTD –	Vapor Transport Deposition – gőzfázisú transzport leválasztás
W –	Watt
Wh –	Wattóra
Wh/m ² –	Wattóra/négyzetméter – energiasűrűség
WMO –	Meteorológiai világszervezet
Wm ⁻² , W/m ² –	Watt/négyzetméter – egységnyi felületre vonatkozó energia mennyiség
Wp –	Watt-peak – névleges teljesítmény
ZnO –	Cinkoxid