



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Olaszi Bálint Dávid

# **A BME-1 „pocketcube” műhold ciklusonkénti napelemes energiatermelésének meghatározása**

TDK Dolgozat

KONZULENSEK

Józsa Viktor

Dr. Ladányi József

BUDAPEST, 2014

## Összefoglaló

---

A BME-1 „pocketcube” műhold napelemes energia termelésének szimulációjának a lényege, hogy megbecsülhető legyen az-az energia mennyiség, amellyel a műhold akkumulátorát fűteni lehet. Munkám során próbáltam a lehető legtöbb paramétert figyelembe venni, de a rendelkezésemre álló adatok mennyisége sajnos elég szerény volt. A specifikációk hiányát szakirodalomból felvett adatokkal pótoltam és remélhetőleg mindig a biztonság irányába tévedtem, így valószínűleg sikerült túl becsülni a veszteségeket és enyhén alul becsülni a napelemes rendszer által ciklusonkénti termelt energia mennyiségét. A szimulációt folyamatosan követte a műhold fejlesztését és vele együtt fejlődött, míg elérte a szükséges készültségi szintet, amikor a becsült eredményt már a jövőbeli új paraméterek, illetve a modell komplexitásának növelése lényegesen már nem befolyásolja. Az árnyékolás lemodellezését Matlab Simulinkban modelleztem le az általam készített 3 Dimenziós „SketchUp” modell alapján. A napelem modul mátrixot a PVSYST nevezetű program segítségével alítottam elő. Természetesen a fejlesztés folyamata még nem ért véget, hiszen a BME-1 végső terveinek megjelenésig folyamatosan változni fog a modell, így a szimuláció is, hogy kövesse az aktuális konstrukció tulajdonságait. Remélhetőleg már lényeges változások nem érik a modellt, így eredeti felépítését továbbra is megőrzi és folytatódhat a szimuláció finomra hangolása.

## Abstract

---

The main goal of the PV Energy Simulation of the BME-1 pocketcube in the software called Matlab was to achieve a credible result for the cycle PV Energy to predict to precious amount of energy which could be used to heat the battery of the satellite. To be honest it was not such an easy task. The first problem which I encountered, it was that I had to give some kind of results to the team in the early stages of the planning; however, the structure of the satellite was not even close to the finish and it resulted a lot of simulation models, which were, so to say, not so accurate, but as the planning continued the simulation model followed it. Indeed, it was an evolution of the Simulation which still did not stop, just reached an acceptable level. Unfortunately, there was a few missing parameters about the structure of the satellite and about the PV cells, which I managed to get from the literature. As the matter fact, I even used a 3D design software called SkecthUp to simulate the shading of the PV cells and a software called PVSYST to create the PV module parameters of the satellite. In summary, I managed to fill the gaps of the simulation in Matlab and hopefully get a little conservative, but credible results.

# Tartalomjegyzék

---

Összefoglaló .....	i
Abstract .....	ii
Tartalomjegyzék.....	iii
1 Bevezetés .....	4
2 Szimuláció felépítése .....	5
3 PV cellahatásfok mátrix meghatározása .....	10
4 Albedo modellezése .....	17
5 Árnyékolás modellezése .....	19
6 DC/DC konverter és MPPT vezérlő egység hatásfoka .....	22
7 Matlab Simulink.....	23
8 Konklúzió.....	29
9 BME-1 Konstruktív észrevételek .....	30
10 Irodalomjegyzék.....	31
11 Melléklet.....	32

## 1 Bevezetés

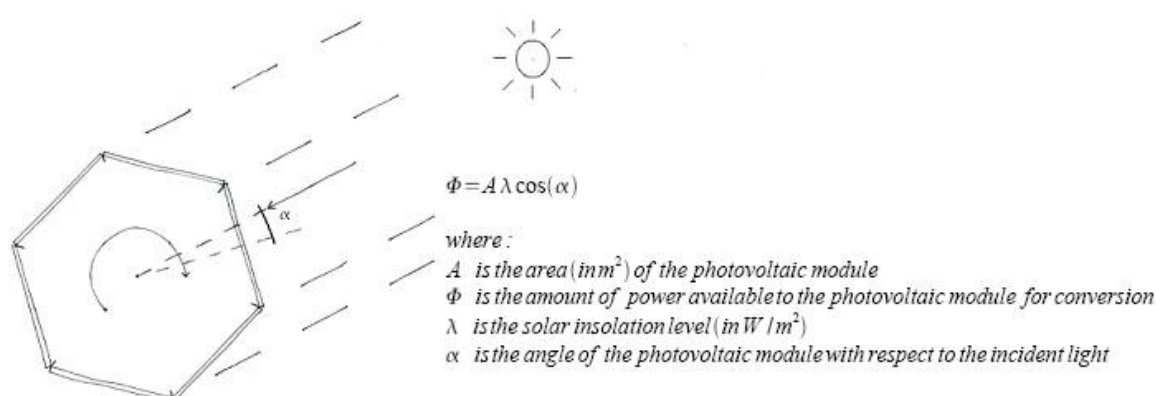
---

Az energiagazdálkodás kulcsfontosságú kérdés, minden hálózattól független rendszer esetén és természetesen az űrben sincs ez másképp, csak a körülmények eltérőek. Az első Magyar műhold, a MASAT-1 esetében a napelemes energiatermelő rendszer jóval túl volt méretezve a műhold kommunikációs és fűtési energiafogyasztásánál, így pontos ciklusonkénti napelemes energiatermelési szimulációra nem volt szükség. A BME-1 viszont egy nyolcad akkora kocka műhold különböző oldalméretekkkel, így nem csak az  $\frac{1}{4}$  akkora felület, hanem még az árnyékolás is csökkent a rendszer energiatermelő képességét. Az energiafogyasztása viszont nem csökken ilyen mértékben, ebből kifolyólag a napelemes energiatermelő rendszer pontos méretezése szükségessé vált. A BME-1 kocka műhold 5 oldallemezének a pontos mérete; 50,8 mm x 50,8 mm x 1,6mm szélességű és hosszúság, míg a 6. oldala valamivel nagyobb 64 mm x 56 mm x 1,6 mm A MASAT-1 minden oldala 100 mm volt. Látható, hogy az összes napelemmel borítható felület az  $\frac{1}{4}$ -ére csökkent, ezen felül még az árnyékolással is kell számolni.

Célkitűzés szövege: a feladat az, hogy kézben tudjuk tartani az energiamedzszmentet és megítéljük, hogy ismert napelem mellett a rendelkezésre álló felület beborítása napelemmel – figyelembe véve a konstrukciós elemeket: pl. antenna jöjjön ki belülről, lesz kapcsoló is, ami leállítja az akkumulátort egészen a kibocsátásig, mind helyet foglalnak el a felületen. A kérdés, hogy mekkora tartalékkal rendelkezünk így, milyen fogyasztású elektronikát lehet építeni a rendszerbe és ez és egyéb igények alapján milyen akkumulátort érdemes beépíteni.

## 2 Szimuláció felépítése

Alapvetően a szimulációs modell felépítése könnyen követhető, mivel lineáris. Első lépésben a cellánkénti besugárzási értéket számoltam ki árnyékolásmentes esetre, ez könnyen kivitelezhető volt mivel az űrben  $1360 \text{ W/m}^2$  a besugárzott hőáramsűrűség értéke a Föld átlagos naptávolságára vonatkoztatva és a pontos besugárzási érték meghatározáshoz a konstans besugárzási értéket folyamatosan korrigáltam az albedo függvényében. A besugárzás értéke a napelem cellákon nem állandó, mivel a műhold ismeretlen térbeli általános mozgást végez, így a 6 oldalból maximálisan csak 3-at ér folyamatosan a sugárzás. A szimulációban ezt úgy modelleztem, hogy előállítottam egy  $1360 \text{ W/m}^2$  amplitúdójú szinusz hullámot, amelyet a peridus idő 1/6-ával késleltettem 5-ször, így időben eltolódtak a szinusz hullámok. Az eltoló szinusz hullámok pozitív tartományát vettem csak figyelembe, így elégítettem ki azt a feltételt, hogy a besugárzás egyszerre csak 3 oldalát éri a műholdnak, így teljesítve a besugárzási félgömb modell feltételeit.



### 1. ábra Napelem-cellákra eső besugárzás 6 oldalas modell esetén [1]

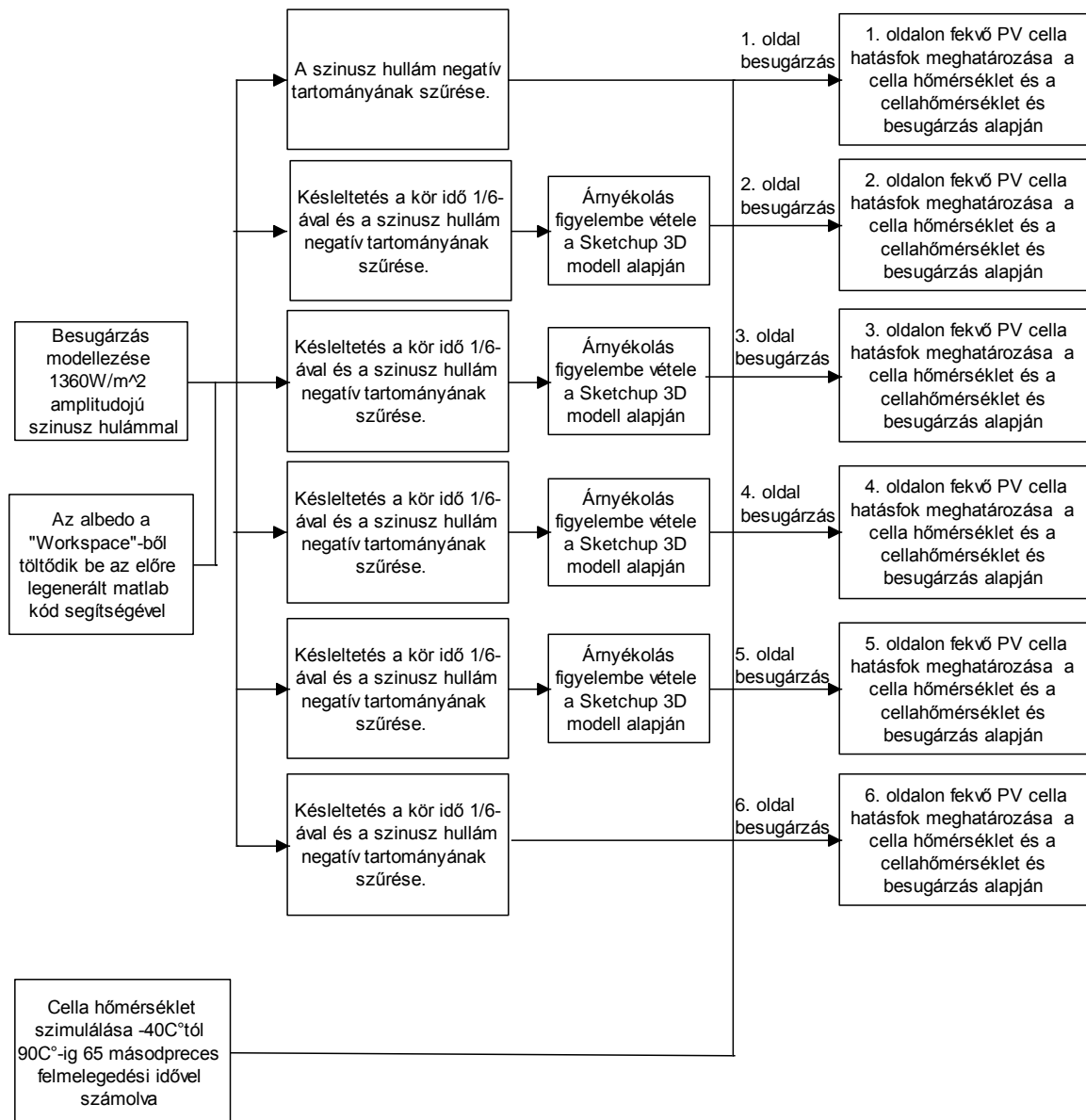
Egy előre elkészített Matlab kód segítségével generálom le az albedo másodperces átlagát. A szimulációban így az albedo egy másodpercenként változó arányszám, amely megnöveli a besugárzást modellező szinusz hullám amplitúdóját. ( Pl:0.2 albedo 20%-kal növeli a besugárzás amplitúdóját.)

Az árnyékolást egy 3D modell segítségével határoztam meg, majd egy Matlab kód segítségével megváltoztattam az árnyékolt oldalra eső besugárzás értékét (bővebben az „Árnyékolás modellezése” című fejezetben).

Az egyik legfontosabb eleme a szimulációnak a PV cella hatásfok modell, ami meghatározza az oldalankénti cellahatásfokot a besugárzás és a cellahőmérséklet függvényében. A PV cellahatásfok mátrixot a Matlab Simulink kiegészítőjében modelleztem egy úgynevezett 2Dlookup table-ben, a táblázat adatait a PVSYST napelemes rendszereket és eszközöket modellező program segítségével készítettem el.

A PV cella hőmérsékletbecslése a MASAT mérési adatai alapján készült. A pontosabb modell felépítéshez a teljes hőtechnikai szimulációja modell megléte szükséges, ami a folyamat iteratív jellegéből adódóan párhuzamosan készül. A beállított értékek csak empirikus becslések és a MASAT-1 hőmérsékletszenzorjainak az adatai alapján került beállításra. A cella hőmérsékletének a beállításához a következő értékeket vettem alapul; -40 C°-ról 90 C°-ra 65 másodperc alatt melegszik fel és a „napon” folyamatosan tartja a 90 C°-os cellahőmérséklet értéket. A 90 C°-os cellahőmérséklet egy igen pesszimista becslés, azaz itt felülbecsültem, remélhetőleg a pontos hőtechnikai modell ismeretében pontosabb leíró függvény állítható be. A cellahőmérséklet nagymértékben kihat a PV cella hatásfokára, így az alacsonyabb cellahőmérséklet magasabb cellahatásfokot eredményez. A modellezés során nem vettem figyelembe a PV cella hőmérséklet oszcillálását a műhold forgása következtében, hanem egy magasabb állandó maximális cella hőmérsékletet tételeztem fel, így a biztonság irányába tértem el.

A következő blokkdiagram a szimuláció felépítésének körülbelül a felét szemlélteti egészen a PV cella hatásfok meghatározásáig, a későbbiekben az itt látható oldalankénti besugárzási értékeket és PV cella hatásfok értékeket használom fel a szimuláció későbbi lépéseire.



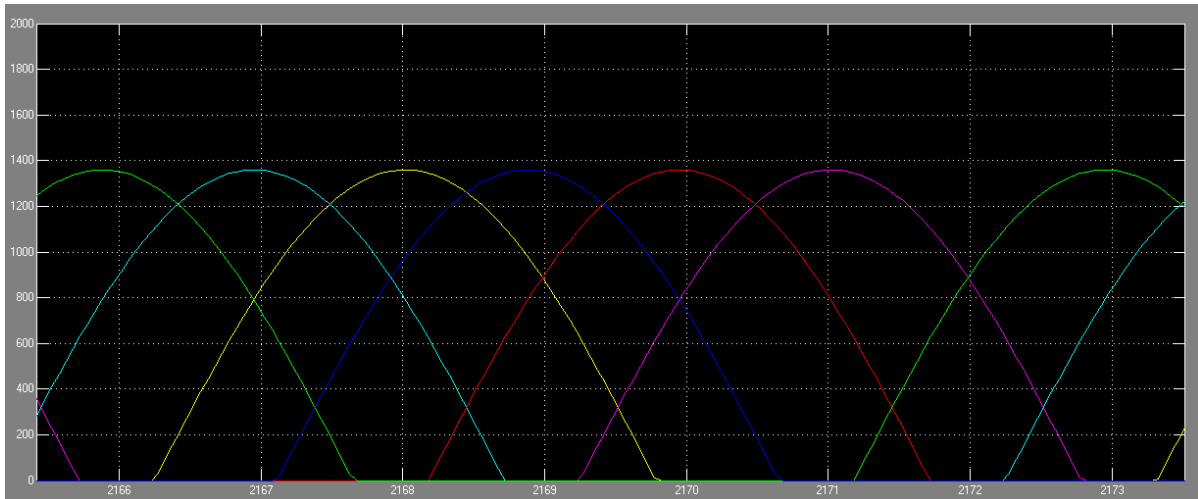
**2. Ábra Szimulációs blokk diagram a PV cella hatásfok előállításig**

A cellahatásfok tudtában már csak DC/DC átalakítás és a munkapont követés hatásfokát kell figyelembe vennem, amit a töltőáram és a PV cellafeszültség ismeretében határozható meg. Ha a PV cellafeszültség 2.5 V alatt van, akkor a DC/DC átalakítás hatásfoka lényegesen jobb a teljes töltőáram tartományban, mint 2.5 V feletti feszültség esetén. Oldalanként 40mA töltőáramot figyelembe véve az MPPT és DC/DC átalakítás hatásfoka 82%-nak adódott. Ezek után már csak az oldalankénti PV cella felületet kell megadni és már csak össze kell szorozni az árnyékolással korrigált oldalankénti besugárzással, a PV cella hatásfokkal és DC/DC (MPPT) átalakítás hatásfokával, hogy megkapjuk az oldalankénti PV teljesítményt. Az



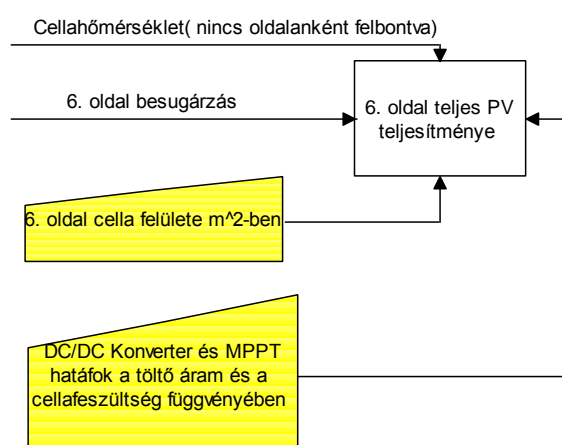
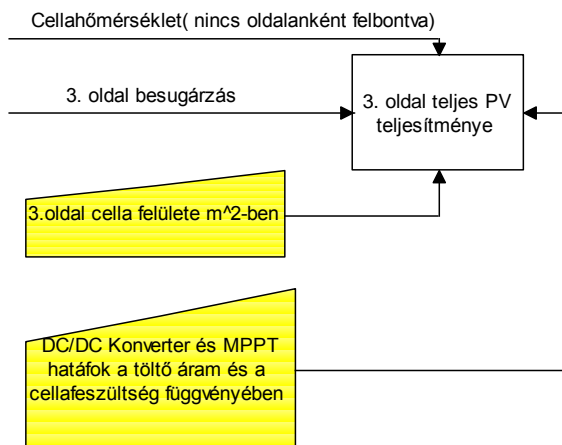
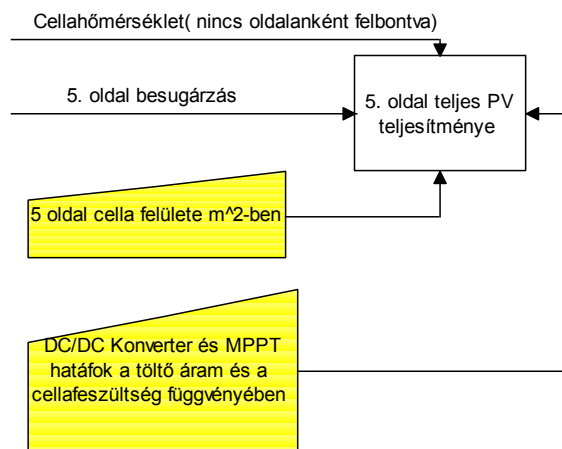
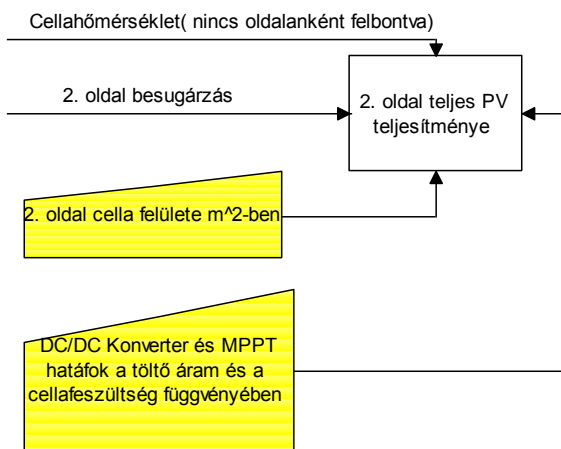
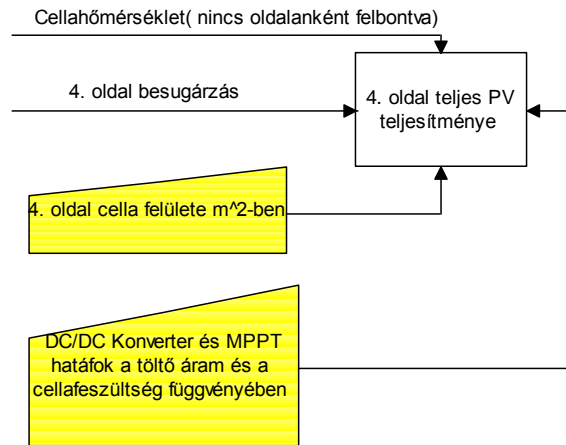
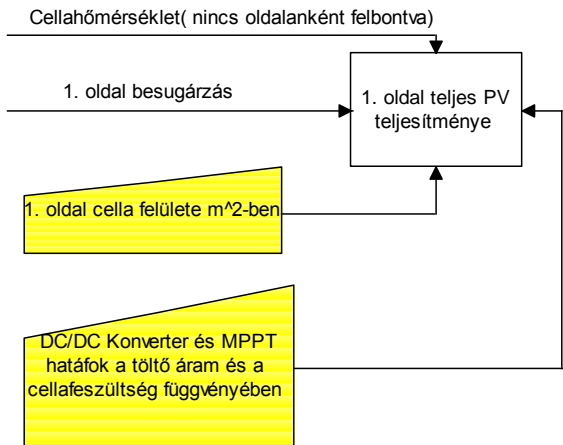
oldalankénti teljesítmények integrálásával megkaphatjuk a ciklusonkénti termelt energia mennyiségét.

A műholdra eső besugárzás modellezést Matlab Simulink-ban végeztem. A különböző színek a különböző napelem oldalakra eső besugárzást mutatják.



3. Ábra Albedoval és árnyékolással korrigált oldalankénti besugárzás (y-tengely besugárzás „ $W/m^2$ ”, x-tengely idő „s”)

A 4. Ábra személetei a szimuláció felépítésének második, egyben végső szakaszát.



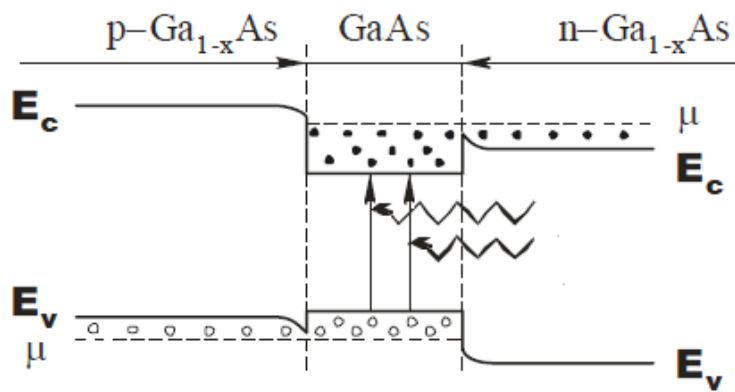
**4. ÁbraSzimulációs blokkdiagram az oldalankénti PV teljesítmény kiszámításai**

### 3 PV cellahatásfok mátrix meghatározása

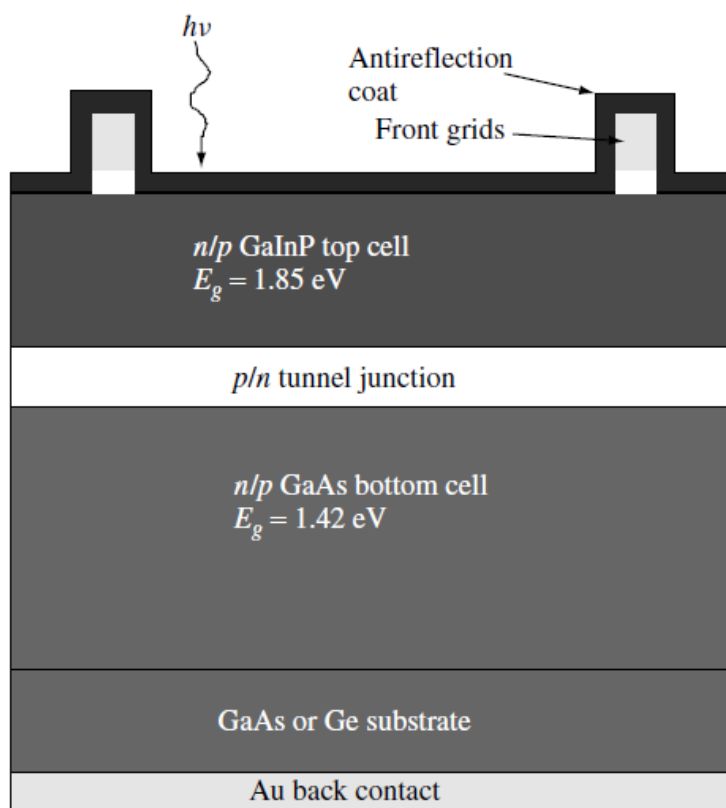
---

A PVSYST programban összeállítottam a napelemes cellához legjobban illeszkedő PV modul felépítést. Az első próbálkozások során monokristályos napelem cellát, 27%-os „SOC” hatásfokot és  $0,45\%/C^\circ$  értékű teljesítménykorrekciós tényezőt vettem figyelembe a szükséges hatásfok-karakterisztikák elkészítése során, de irodalomkutatás után rá kellett döbbenem, hogy a több rétegű napelem cellák, különösképpen a GaInP2/GaAs/Ge 3 rétegű PV cellák hőmérséklet/hatásfok korrekciós tényezője alacsonyabb, mint a monokristályos napelem celláké. Ezen felül e cellák lényegesen jobb sugárzástűrő képességgel és degradációs paraméterekkel rendelkeznek, mint a szilíciumból készült napelem cellák. Ebből kifolyólag definiálnom kellett egy teljesen új PV modult, ami elméletileg megegyezik a BME-1-en találhatóval. Az első probléma ott kezdődött, hogy a napelem cella leírásban nem adták meg a hőmérséklet/rövidzárási áram korrekciós tényezőt, hanem csak a kapocs feszültség/hőmérséklet korrekciós tényezőt, ami a napelem típusra volt jellemző. A további paramétereket a szakirodalom segítségével állítottam be [2]. A BME-1 PV moduljának definiálásának első lépéseként felvittem a PVSYST programba a GaInP2/GaAs/Ge alapú napelem cella paramétereit [2], többek között az MPP feszültség, áram, rövidzárási áram és a kapocsfeszültség értékét „SOC” körülmények között. Ezek után beállítottam a cella méretét, cella felületet és a modul felépítését, amelyet 30db párhuzamosan bekötött PV cellával definiáltam. Az általam megadott rövidzárási áram/ hőmérséklet ( $I_{SC}/T$ ) korrekciós tényező megérettéséhez egy mélyebb betekintést kell nyújtanom a több rétegű PV cellák világába.

A többrétegű napelem cellák több vezető ( $E_C$ ) és szigetelő ( $E_V$ ) réteggel rendelkeznek, így e rétegek között különböző mélységű potenciálgödrök alakulnak ki. A különböző mélységű potenciálgödrök különböző energiájú fotonokat „fognak be”, így a többrétegű napelem cella esetén lehetőség nyílik különböző besugárzási frekvencia tartományokra „hangolni” a napelem cellát.



5. Ábra Egy rétegű GaAs PV cella működése [2]



6. Ábra Háromrétegű GaInP2/GaAs/Ge PV cella felépítése [2]

Látható, hogy fentről lefelé csökken a rétegek potenciálgödreinek a mélysége, a felső réteg a magasabb, míg az alsóbb rétegek az alacsonyabb frekvencia tartományokra vannak „hangolva”. Sejtésünk lehet, hogy a különböző rétegek hőmérséklet korrekciós tényezője eltérő, így külön-külön kell figyelembe venni őket, hogy megértsük a PV cella eredő viselkedését.

A pontos rétegenkénti rövidzárási áramsűrűség meghatározására az 1. és a 2. összefüggések lehetnek segítségünkre [2]:

$$J_{sc} = e \int_0^{\infty} QE(\lambda) \Phi_{inc}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$QE = QE_{emitter} + QE_{depl} + \exp[-\alpha(xe + W)]QE_{base} \quad (2)$$

QE="Kvázi egyensúly"

QE="Kibocsájtó réteg kvázi egyensúlya"

QE="Elnyelő réteg kvázi egyensúlya"

QE="Alap réteg kvázi egyensúlya"

Egyszerűbben kifejezve csak a félvezető réteges vastagságtól függ [2];

$$QE(\lambda) = 1 - \exp[-\alpha(\lambda)x], x = xe + W + xb \quad (3)$$

Az elhanyagolás elvi alapja az, hogy a felső PV rétegett teljes besugárzási spektrum éri ( $\Phi_s$ ), míg az alsó cellát csak a felső réteg által szűrt sugárzás. Ebben az esetben a frekvenciatartományon kívül eső fotonok elnyelődési tényezőjük nulla ( $\alpha(\lambda)=0$ ) így az alsó cellára eső sugárzást a 4. képletben látható módon lehet kifejezni [2];

$$\Phi = \Phi_s \times \exp[-\alpha(\lambda)xt] \quad (4)$$

Ahol  $xt$  a felső cella vastagsága és  $\alpha(\lambda)$  pedig az elnyelődési tényező, amely az elektromágneses sugárzás hullámhosszának a függvényében változik. Ha azt tételezzük fel, hogy a felső cella elég vastag és elnyeli az általa elnyelhető fotonok nagy részét, akkor az alsó ( $J_{scb}$ ) és a felső ( $J_{sct}$ ) cella rövidzárási áramsűrűsége az 5. összefüggéssel írható le [2];

$$J_{sct} = e \int_0^{\lambda t} (1 - \exp[-\alpha(\lambda)xt]) \Phi_s(\lambda) d\lambda \quad J_{scb} = e \int_0^{\lambda b} \exp[-\alpha(\lambda)xt] \Phi_s(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$\lambda t = \frac{hc}{E_{gt}} \quad \lambda b = \frac{hc}{E_{gb}}$$

Végtelenül vastag felső cella esetén a következő módon egyszerűsíthető le az összefüggés [2];

$$J_{sct} = e \int_0^{\lambda t} \Phi_s(\lambda) d\lambda \quad J_{scb} = e \int_{\lambda t}^{\lambda b} \Phi_s(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Több rétegű PV cellák esetén a már megadott függvények összességét kell venni, hogy megkapjuk az eredő cellára vonatkozó függvényeket [2];

$$U(J) = \sum_{i=1}^m U_i(J) \quad (7)$$

Visszatérve az alapkérdésre, hogy hogyan következtessem ki a kapocsfeszültség/hőmérséklet korrekciós tényezőtől a teljesítmény korrekciós tényezőt a szakirodalomhoz kell fordulnom, mivel az általunk választott napelem cella gyártója csak a napelem típusát definiálta kapocsfeszültség/hőmérséklet korrekciós tényezővel.

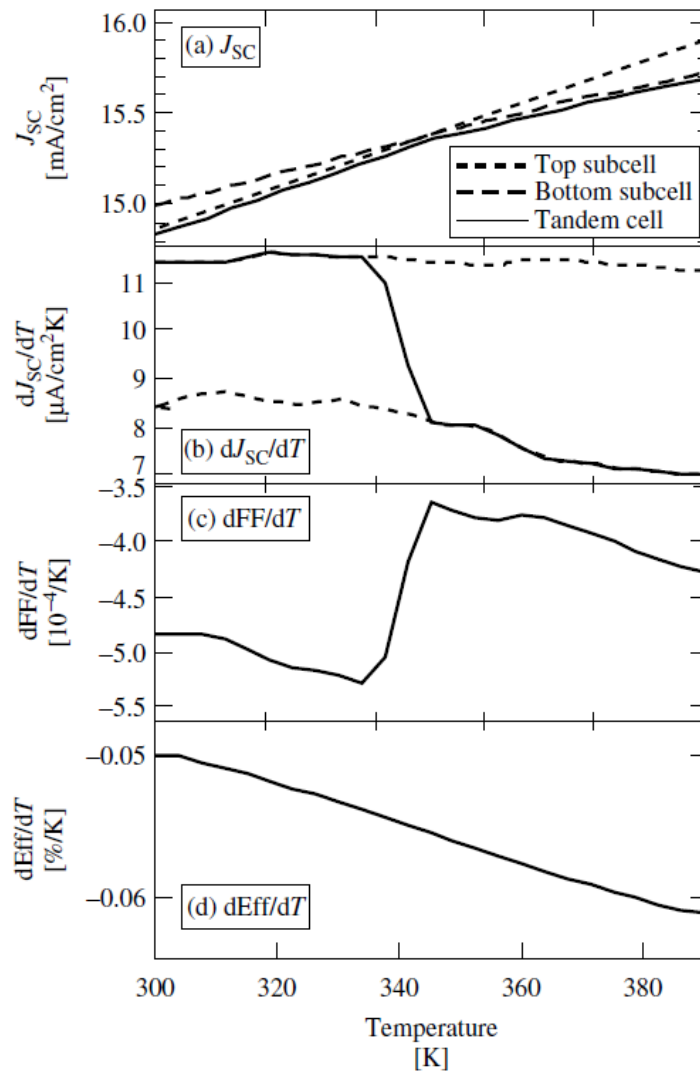
Első lépésben be kellett azonosítanom az általunk kiválasztott napelem cellához leginkább illőt a szakirodalomból.

Cell	$V_{OC}$ [mV]	$dV_{OC}/dT$ [mV/K]	$1/V_{OC} dV_{OC}/dT$ [%/K]
Ge	200	-1.8	-0.90
GaAs	1050	-2.0	-0.19
GaInP	1350	-2.2	-0.16
GaInP/GaAs	2400	-4.2	-0.17
GaInP/GaAs/Ge	2600	-6.0	-0.23
GaInP/GaAs/Ge (500 suns)	3080	-6.0	-0.19
PERL Si	711	-1.7	-0.24

1. Táblázat Különböző típusú napelem cellák kapocsfeszültség/hőmérséklet korrekciós tényezője [2]

Láthatjuk, hogy a GaInP2/GaAs/Ge típusú cellák kapocsfeszültsége 2.6V és a kapocsfeszültség/hőmérséklet korrekciós tényezője pedig -6 mV/K, az általunk választott GaInP2/GaAs/Ge PV cella kapocs feszültsége 2.52V és hőmérséklet korrekciós tényezője -6.2 mV/K volt, így az általam választott szakirodalomból vett értékek jól közelíthetők a valóságos PV cella paramétereit.

A következő ábra a GaInP/GaAs felépítésű PV cella hőmérséklet korrekciós összefüggéseit írja le [2];



7. Ábra Többrétegű GaInP2/GaAs/Ge PV cellák áramsűrűség és hatásfok változása a hőmérsékletváltozás függvényében [2]

Látható a 7. ábra felülről 2. képén, hogy az eredő rövidzárási áram hőmérsékletkorrekciós tényező először a felső cella által van limitálva  $11.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{K}$  értékre 300-tól 350K-ig, majd 350-400K-ig-pedig az alsó cella rövidzárási áram/hőmérséklet korrekciós tényezője limitálja az eredő rövidzárási áram/hőmérséklet korrekciós tényezőt.

A számításaim során  $11.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2\text{K}$  eredő rövidzárási áram/hőmérséklet korrekciós tényezővel számoltam, mivel az űrben a várható PV cella hőmérséklet 353-363K közé tehető a PV cella abszorpciós mutatójának függvényében.

A sönt és a soros ellenállás értékét a megadott paraméterek alapján a PVSYST szofver automatikusan kiszámította [3]. A 30 db cella párhuzamos bekötésének köszönhetően a cellánkénti áramok összeadódnak, így a feltételezett rövidzárási áram hőmérséklet korrekciós tényező is a 30-szorosára nő.

Basic data | Additional Data | Model parameters | Sizes and Technology | Commercial | Graphs

Model:  Manufacturer:  ? Please define the module sizes!

File name:  Data source:

Nom. Power:  Wp Tol. +/-:   % Technology:

**Manufacturer specifications or other Measurements**

Reference conditions: GRef:  W/m<sup>2</sup> TRef:  °C ?

Short-circuit current: Isc:  A Open circuit Voc:  V

Max Power Point: Impp:  A Vmpp:  V

Temperature coefficient: mulsc:  mA/°C Nb cells: **1 x 30**

or mulsc:  %/°C

**Model summary**

**Main parameter** ?

R shunt: **240 ohm**

Rsh(G=0): **1000 ohm**

**R serie model** **0.13 ohm**

R serie max.: **0.13 ohm**

R serie apparent: **0.23 ohm**

**Model parameters**

Gamma: **3.551**

IoRef: **0.00 nA**

muVoc: **-6 mV/°C**

**Internal model result tool**

Operating conditions: GOper:  W/m<sup>2</sup> TOper:  °C ?

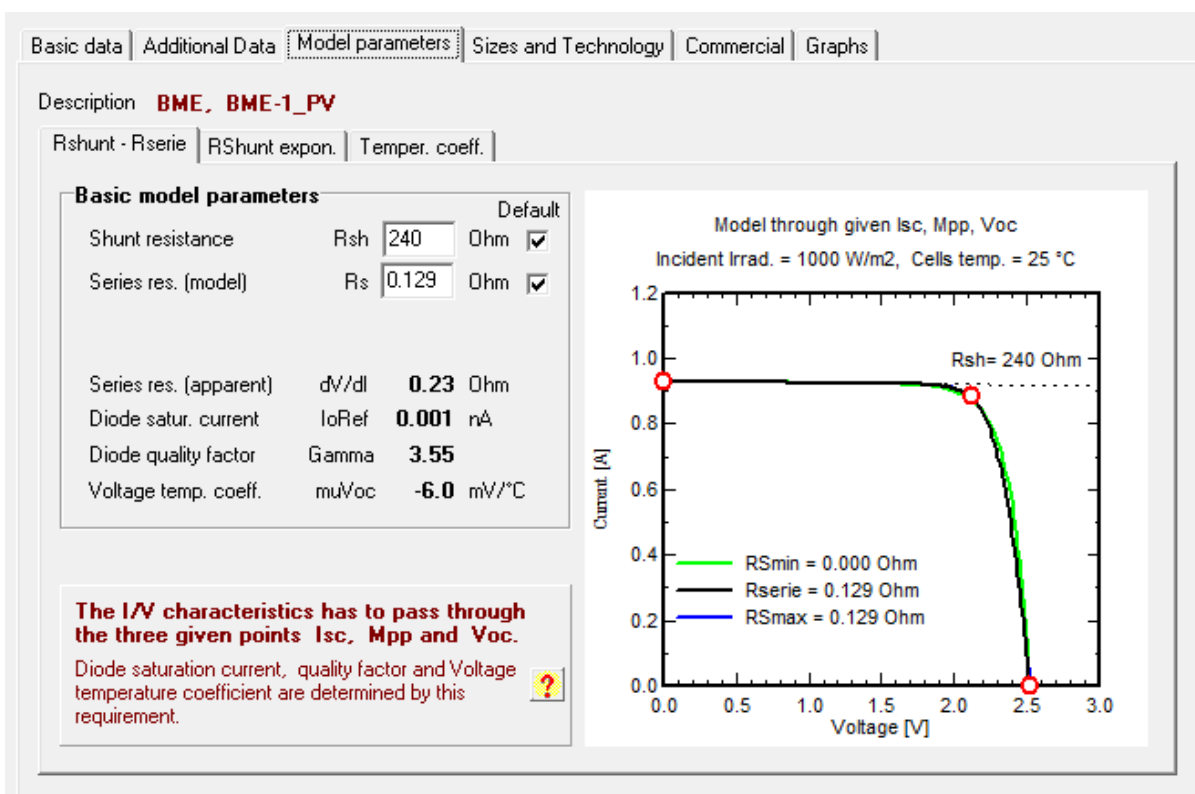
Max Power Point: Pmpp: **1.9** W Temper. coeff.: **-0.25** %/°C

Current Impp: **0.88** A Voltage Vmpp: **2.1** V

Short-circuit current Isc: **0.93** A Open circuit Voc: **2.5** V

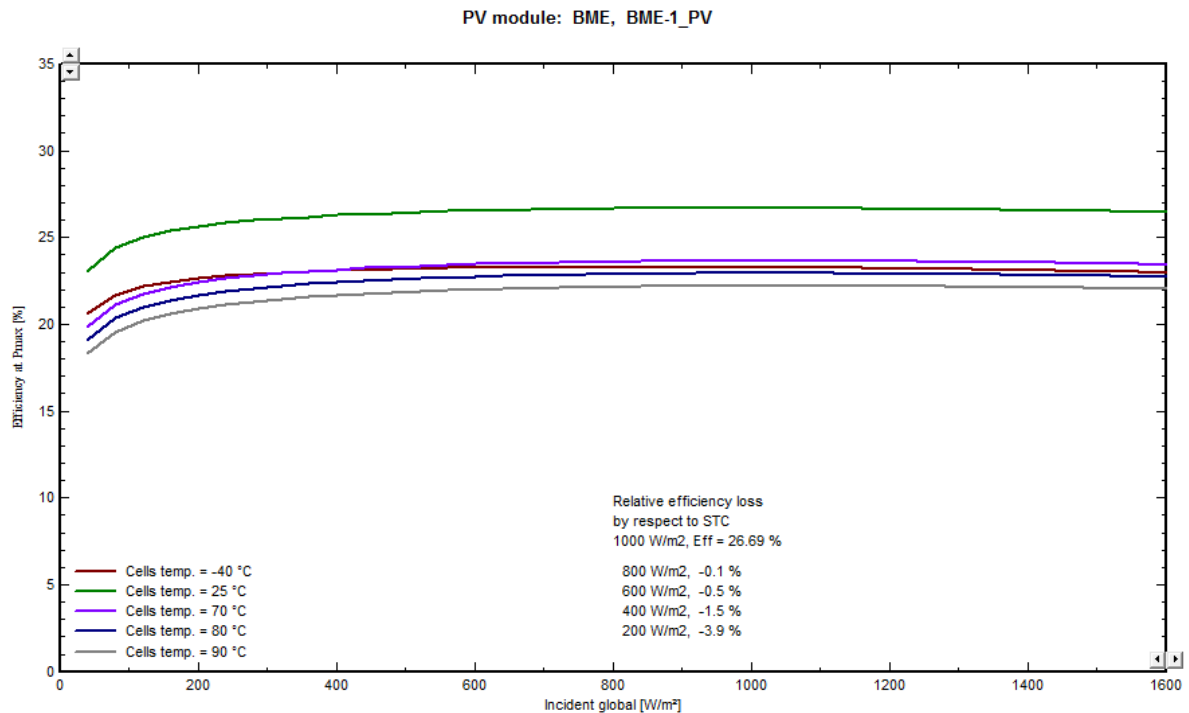
Efficiency: / Cells area: **27.08** % / Module area: **26.69** %

8. Ábra BME-1 PV modul felparaméterezése



9. Ábra BME-1 PV moduljának automatikusan paraméterezett U-I diagramja [3]





**10. Ábra PVSYST PV panel hatásfok mátrix generálása [3]**

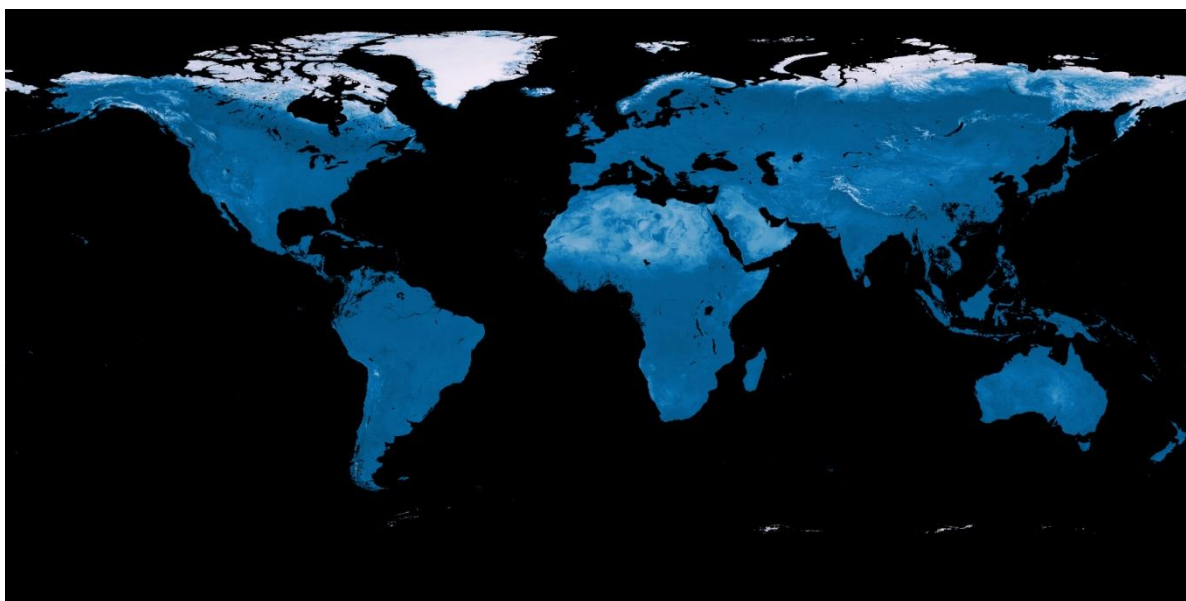
Figyelemre méltó, hogy PV cella hatásfok maximuma nem  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, hanem  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on van, ebből kifolyólag a PV Cella a teljesítménye nem monoton csökkenő a hőmérsékletnövekedés függvényében. Ez a jelenség PV cella többrétegűségéből fakad, mégpedig úgy, hogy a hőmérsékletváltozás hatására megváltoznak a potenciálgödrök méretei és így nagyobb mértékben fedik egymás foton elnyelődési spektrumait.

A PVSYST által generált PV panel hatásfokmátrix adatait kimentettem, majd manuálisan készítettem belőle egy „2D lookup table” –t a Matlab Simulinkben, amely egy kulcsfontosságú eleme a szimulációnak.

## 4 Albedo modellezése

Az albedo (Visszaverődési tényező) értéket a NASA honlapjáról töltöttem le, majd átlagot számolva egy 180x360 mátrixszá alakítottam a szélességi és a hosszúsági koordináták alapján, ezután szintén a NASA honlapjáról letöltöttem az ISS (Nemzetközi Űrállomás) körpályájának a koordinátáit [4]. Feltehetőleg a BME-1 kocka műholdat az ISS körpályájára fogják juttatni, de tervezett körpálya a jövőben változhat.

Első lépésben a „matlab.mat” file-ban már átlagolásra kerültek a Föld albedo értékei szélességi és hosszúsági koordináták szerint (egész fokonként), hogy beleférjen a már említett 180x360-as mátrixba. Az átlagos albedoval a szimuláció a biztonság irányába téved, mivel a Földgömb kis részén tér el az albedo a nullától, pontosabban csak a sarkkörök és a sivatagok esetén beszélhetünk a nullától eltérő albedoról. Ebből fakadóan az átlagolás miatt kapott albedo értékek kisebbek, mint az eredeti szögpercenként megadott albedo értékek.



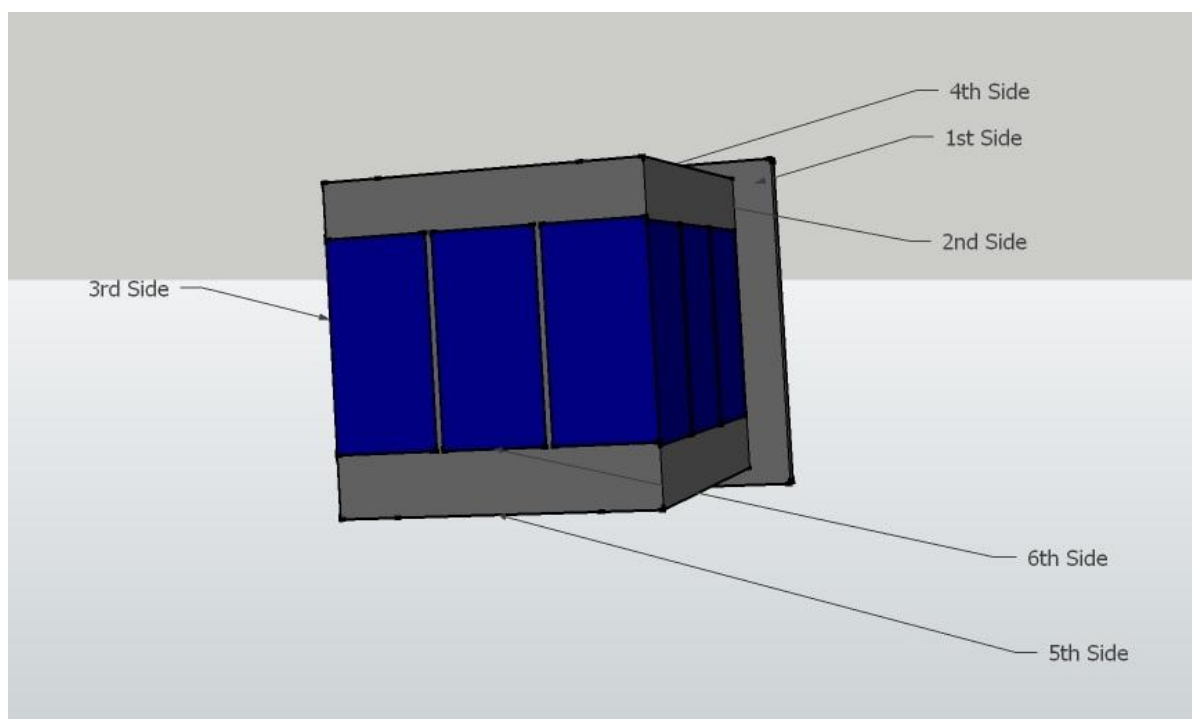
11. Ábra Albedo értékek a Földön [4]

Az ábrán a kék és fekete részek esetén albedo értéke nulla és csak a fehér/fehéres zónáknál emelkedik fel az értéke 0.1-0.3 közé. Ha elhanyagoljuk az albedo-t, akkor a Matlab szimulációk szerint a ciklusonkénti termelt energia 4.3%-al csökken. A szimulációs eredményeket figyelembe véve kijelenthetjük, hogy az albedo nem elhanyagolható a szimuláció során, de a szimulációs eredmény valósághűsége megkérdőjelezhető, hiszen nem lehet tudni, hogy a NASA által megadott albedo értékek mérése milyen módszerrel történt. Nem tudható, hogy az albedo értékeket részleges féltest, vagy fél test modellre adták meg. A

számításom során a besugárzás félttest (fél gömb) modell alapján számoltam, így az albedo esetén se tettem különbséget. Szeretném kiemelni, hogy az albedo az adott felületre eső besugárzás értékét növeli meg, és nem terjed ki a frekvencia spektrum szerinti felbontásra.

## 5 Árnyékolás modellezése

Az árnyékolást az általam készített 3D SkecthUp modell segítségével határoztam meg oldalanként 6 PV cellára, úgy hogy a modellben először felépítettem a szerkezet modellt, majd elhelyeztem rajta a napelem cellákat. Ezek után már könnyedén meg tudtam határozni, hogy az 1. oldal (12. ábrán látható) túlnyúlását, majd egyszerű trigonometrikus szögfüggvények segítségével kiszámoltam, hogy hány fokos beesési szög esetén árnyékolja le bármely más napelem cella középpontját.



12. Ábra BME-1 SkecthUp 3D modellje

A következő táblázatban összefoglalt számítások eredményei mutatják meg, hogy hány fokos beesési szöge esetén, illetve a besugárzási érték hány százaléka alatt áll fenn az árnyékolás. Az árnyékolást a PV cellák 2. mm-étől vettem figyelembe, ami gyakorlatilag azt jeleneti, hogy a szimuláció során az árnyékolás hatására rögtön lenullázódik a cella által termelt energia. Általában az árnyékolást a cella középponttól veszik figyelembe, de szerettem volna a biztonság irányába tévedni, hogy legyen tartalék a szimulációban.

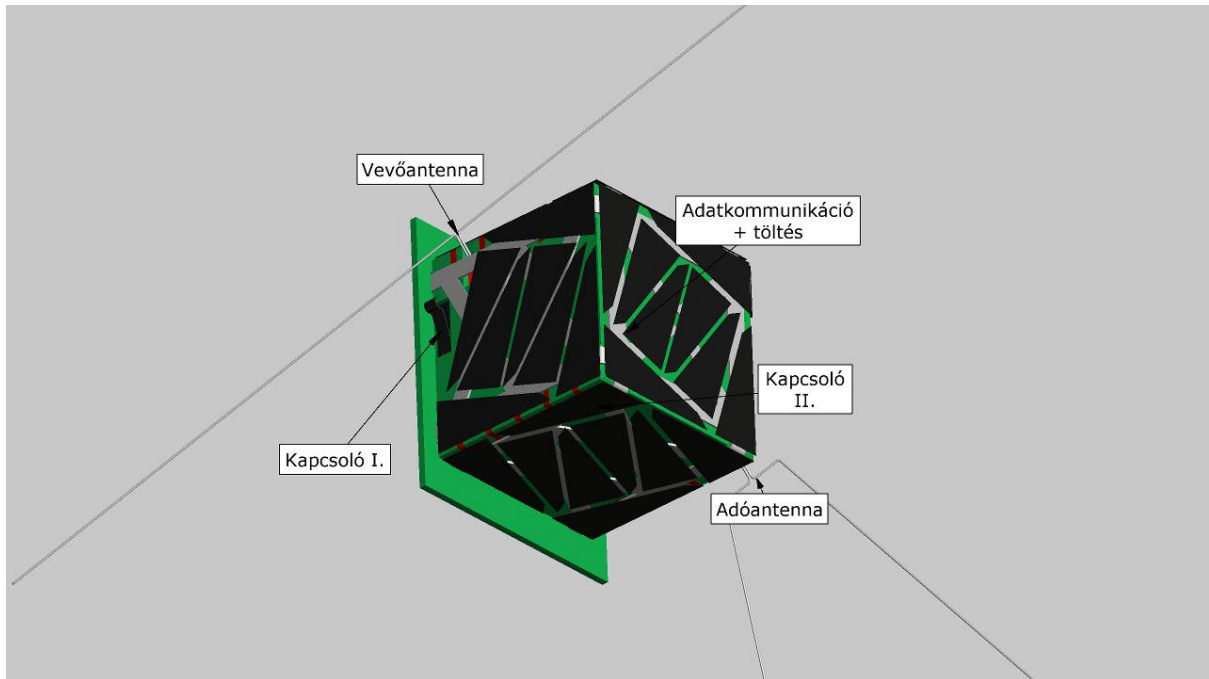
Árnyékolás	a	b
<b>2.-3. oldal 1.-2. PV cella</b>		
Pozíció (mm)	4	7
Alfa	60,25	
P(%)	0,8681	
<b>2.-3. oldal 3.-4. PV cella</b>		
Pozíció (mm)	22	7
Alfa	17,65012	
P(%)	0,303204	
<b>4.-5. oldal 1.-2. PV cella</b>		
Pozíció (mm)	22	3
Alfa	7,76516	
P(%)	0,135113	
<b>4.-5. oldal 3.-4. PV cella</b>		
Pozíció (mm)	4	3
Alfa	36,87	
P(%)	0,6	

## 2. Táblázat Árnyékolási táblázat

Az árnyékolás számítása során a besugárzási értékeket korlátoztam. Alapvetően négy este kellett kiszámolnom az árnyékolást. Az első esetben az árnyékolás nagyon sokáig fenn áll számszerűen a  $60,25^\circ$ -os beesési szögig a 2., ill. 3. oldalon, valamint  $17,65^\circ$ -os beesési szögig a 4. és 5. oldalon. A Matlab Simulink-on belül egy általam definiált függvény alapján a program az árnyékolt esetben 4 cella árnyékolásával számol. Ezt a konstrukciót visszaram diódák alkalmazásával tudjuk megvalósítani az erősen árnyékolt cellák esetén, így meggátolható az árnyékolt cellák túlmelegedése az ellentétes töltés áramlás miatt árnyékolt állapotban. A második esetben az 1. oldal esetén szélesebb túlnyúlást vettem figyelembe, ekko  $17,6^\circ$  alatti beesési szög esetén, a kisebb túlnyúlás esetén pedig  $7,7^\circ$  alatt áll fent árnyékolás a napelem a középső pár cellákon. Árnyékolás alatt a sorba illetve párhuzamosan kötött napelem cellák kimentei teljesítménye az árnyékolt cella értékre csökken. Ezen felül visszaram indul meg a napsütötte oldalon fekvő párhuzamosan bekötött árnyékolástól mentes cellákból az árnyékolt cellákba, így az árnyékolt cellák túlmelegednek, illetve tönkre is mehetnek.

A SketchUp-os modellben összesen 4 cella esetén veszem figyelembe az árnyékolást, de a legújabb elképzelés során lehetséges, hogy a tervezett 6 helyett immáron 8 cellát tudunk elhelyezni a 6., 4. és az 5. oldalon, illetve 6 cellát a 2. és 7 cellát a 3. oldalon, ezen felül az első oldalon 10 PV cella elhelyezése is lehetségessé válik elméleti szinten. Összeszereléskor, a jelenlegi elképzelés változhat, mert nagyon sok komplikáció felmerülhet a huzalozás és a

rögzítés során, így majd az idő eldönti, hogy melyik konstrukció kerül megvalósításra. Az árnyékolás itt se változik lényegesen, mivel a műhold árnyékolatlan oldal felülete lesz jobban kihasználva, viszont a PV cella szám lényegesen megnő, szám szerint 9 PV cellával több cella helyezhető el, a módosított szerkezeti elemek és jobb térkihasználás miatt. A legújabb 2014. Októberi 47PV cellás 3D modellt a 13. ábrán láthatjuk.



**13. Ábra 47 PV cellás 3D modell [5]**

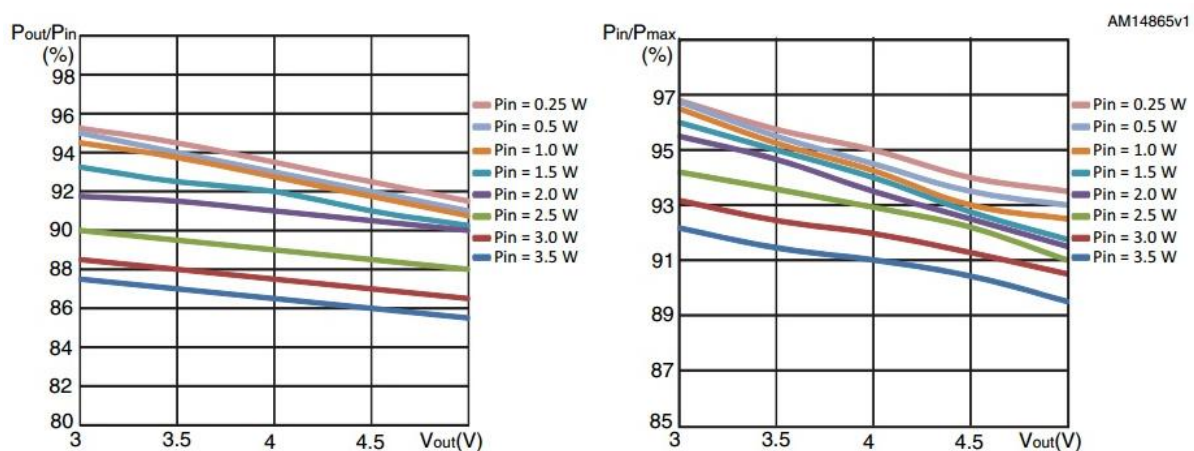
Látható, hogy ennél több három szög PV cellát, már nem lehet elhelyezni a műholdon, így tekinthetjük, ezt a modellt egy elméleti maximumnak.

Ezen felül figyelembe vettem az albedo változását az árnyékolás számítás során, mégpedig úgy, hogy százalékos módon adtam meg az árnyékolás teljesítményhatárát, így az árnyékolási szög változatlan marad.

## 6 DC/DC konverter és MPPT vezérlő egység hatásfoka

Az általunk választott DC/DC és MPPT panel típusa „SPV1040” az egység paramétereit a termék gyártója a ST MICRO ELECTRONICS termék katalógusából határoztam meg és e paramétereiből szintén egy „2D lookup table”-t készítettem MATLAB Simulink-ben [6]. A konstrukció szempontjából nagyon is fontos paraméterekkel bír az átalakító, de ezen észrevételekt a „Konstrukciós észrevételek” című fejezetben bővebben kifejtésre kerül.

A következő ábrák a DC/DC konverter és MPPT vezérlő egység feszültség és töltő áram karakterisztikáját ábrázolják;



14. Ábra Az LTC 3105 típusú DC/DC típusú konverter bemenő feszültség/terhelő áram hatásfok diagramjai [6]

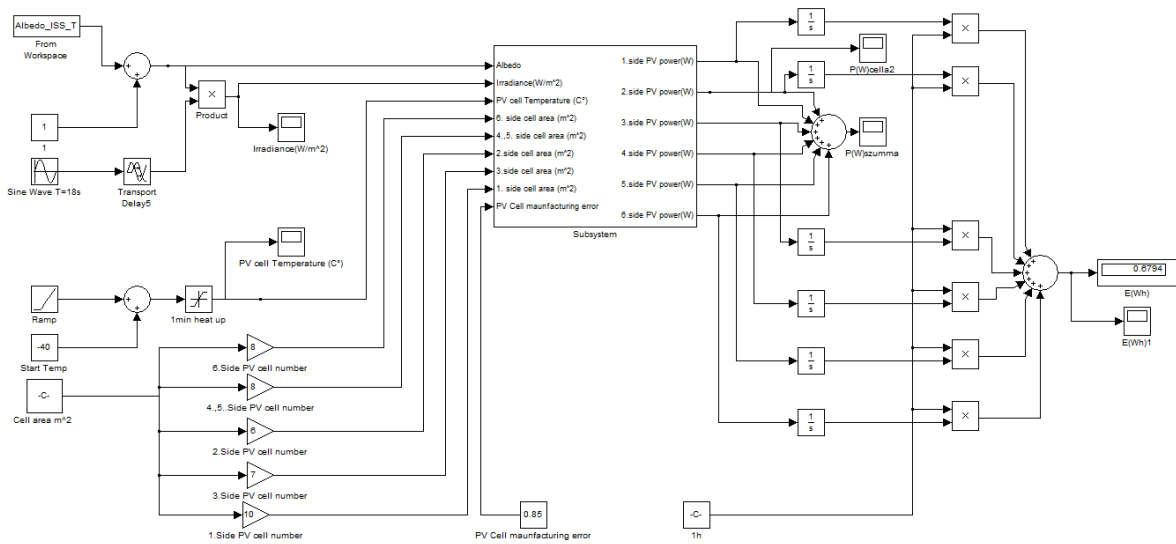
## 7 Matlab Simulink

---

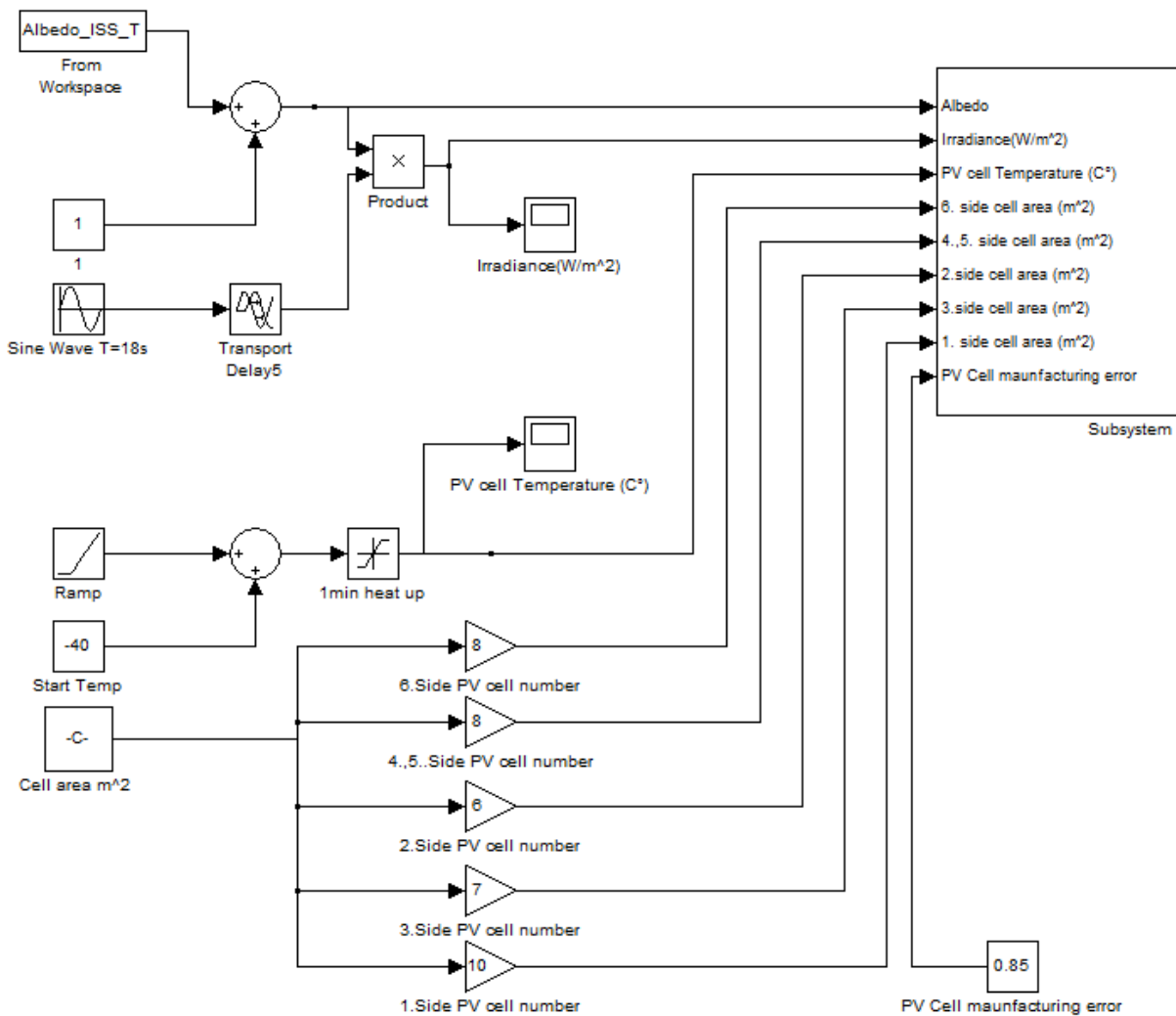
A szimulációt a Matlab Simulink segítségével futattam le, az elvi felépítése a blokkdiagramok alapján lett megvalósítva. A szimulációban az Albedo file 4800 elemet tartalmaz, így másodpercenként egy albedo érték áll rendelkezésre, ha köztes albedo értékeket interpolációval határozza meg a modell. A szimulációt diszkrét módon 10 ms lépésközzel és Euler-féle interpolációs módszerrel futattam le. Más változó lépésközt használó szimulációs módszerek esetén az eredmény 0.1%-on belül tért el, így arra a konklúzióra jutottam, hogy a szimulációs eredményét sokkal inkább a lépésköz nagysága befolyásolja, mintsem a közelítés matematikai modellje. Az alapvető szimulációs paramétereket a következő pontokban foglaltam össze;

- 3x8db, 1x7db, 1x6db és 1\*10db cellával futtattam le a szimulációt
- az árnyékolt oldalak alatti PV cellák visszaram diódával vannak felszerelve, ezt külön Matlab function függvény írja le a szimulációban
- 36% sötétség 64%nap, 4800s ISS, körpálya
- -40C°-ról 90C°-ra 65s alatt felmelegedő PV cella hőmérsékletet alítottam be
- Az MPPT vezérlés hatásfoka a leírás szerint leginkább a bemeneti feszültség nagyságától függ, így közel állandó volt a szimuláció során (90-94%)
- Az Albedo másodpercenkénti bementét elkészítettem az ISS koordinátái szerint
- Négy oldalon veszem figyelembe az árnyékolást Matlab kóddal, amely az árnyékolás ideje alatt 0%-ra csökkenti az adott oldalon található cellák teljesítményét
- Az árnyékolást a cella középpontjától számoltam
- Jelenlegi ciklusonkénti termelt energia **0.6794Wh**
- 0,85-os korrekciós tényezőt veszek figyelembe a napelem cellák gyártásbeli eltérései miatt
- A szimuláció lefuttatásához először a **MASAT\_matlab file-t kell lefuttatni!**

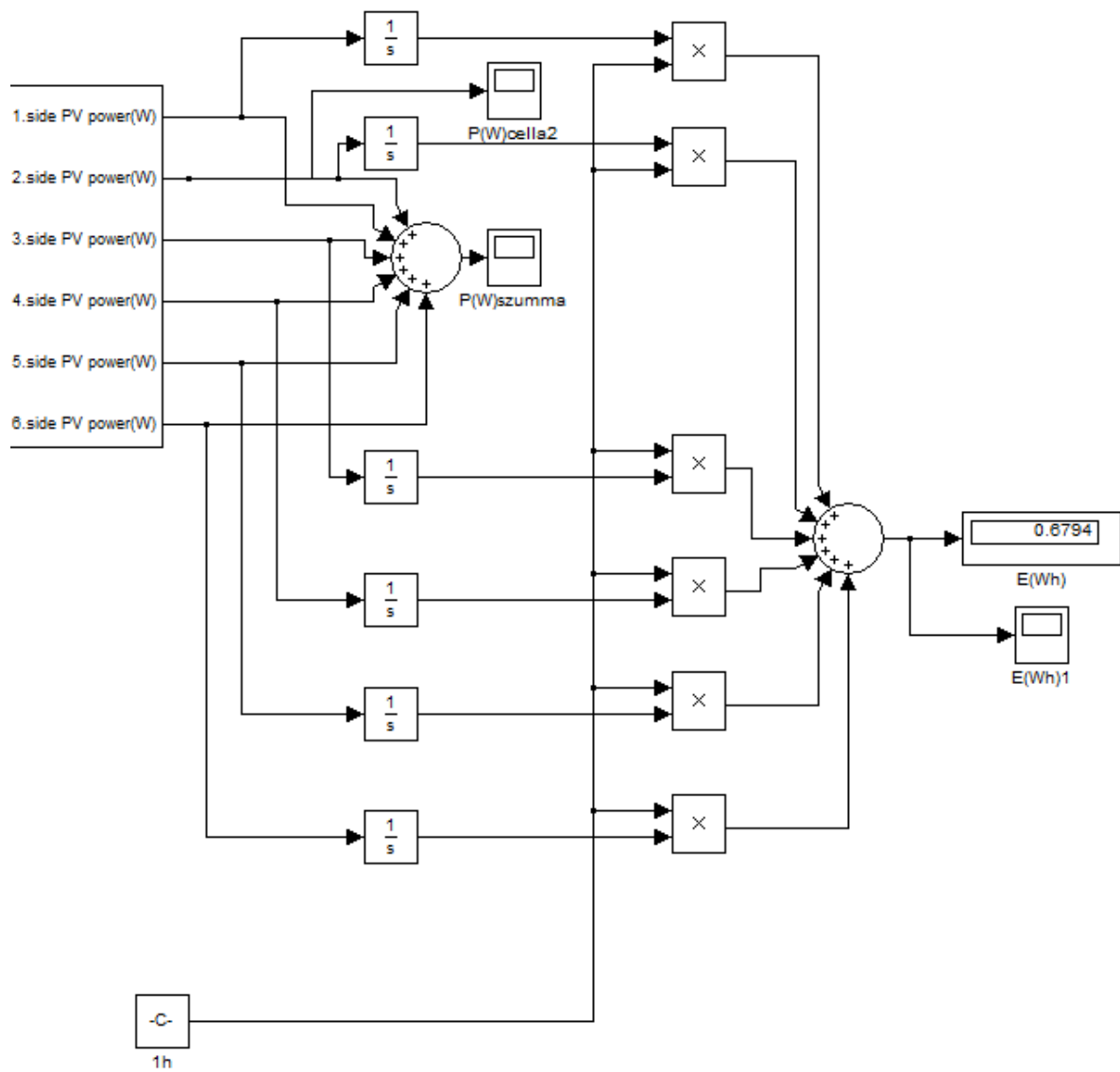




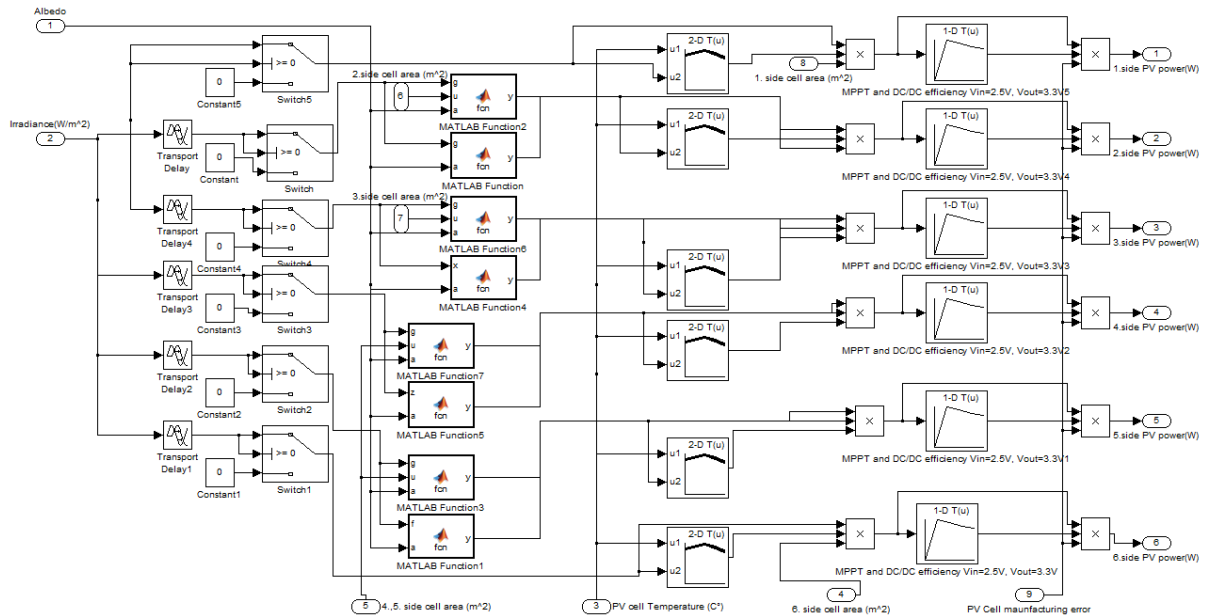
15. Ábra Simulink Modell felépítése összetett



16. Ábra Simulink Modell felépítése bemeneti paraméterek

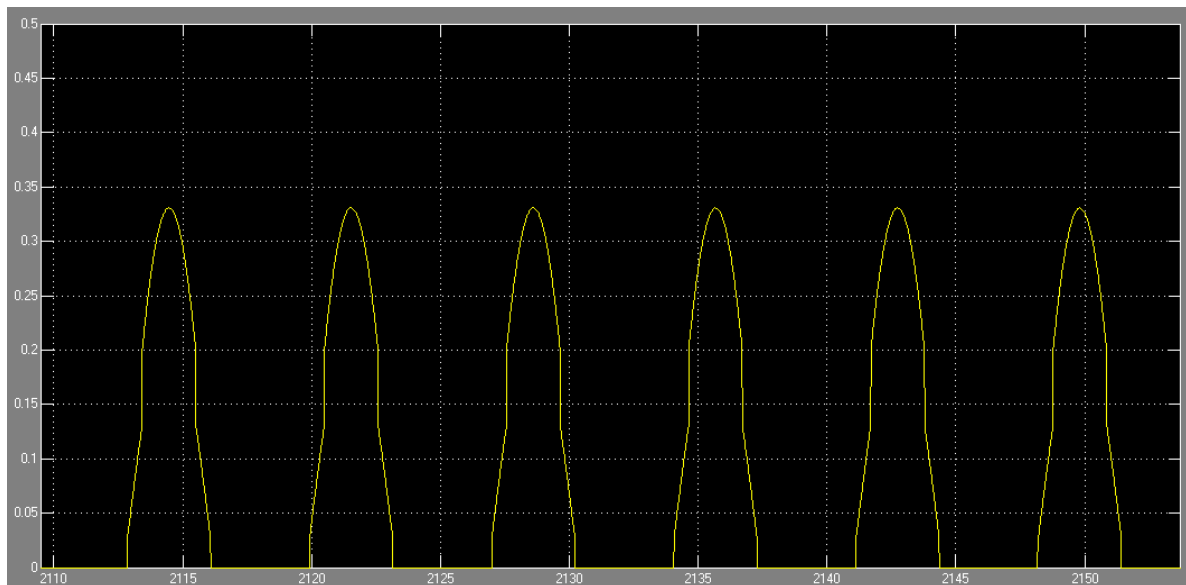


17. Ábra Simulink Modell felépítése kimeneti paraméterek



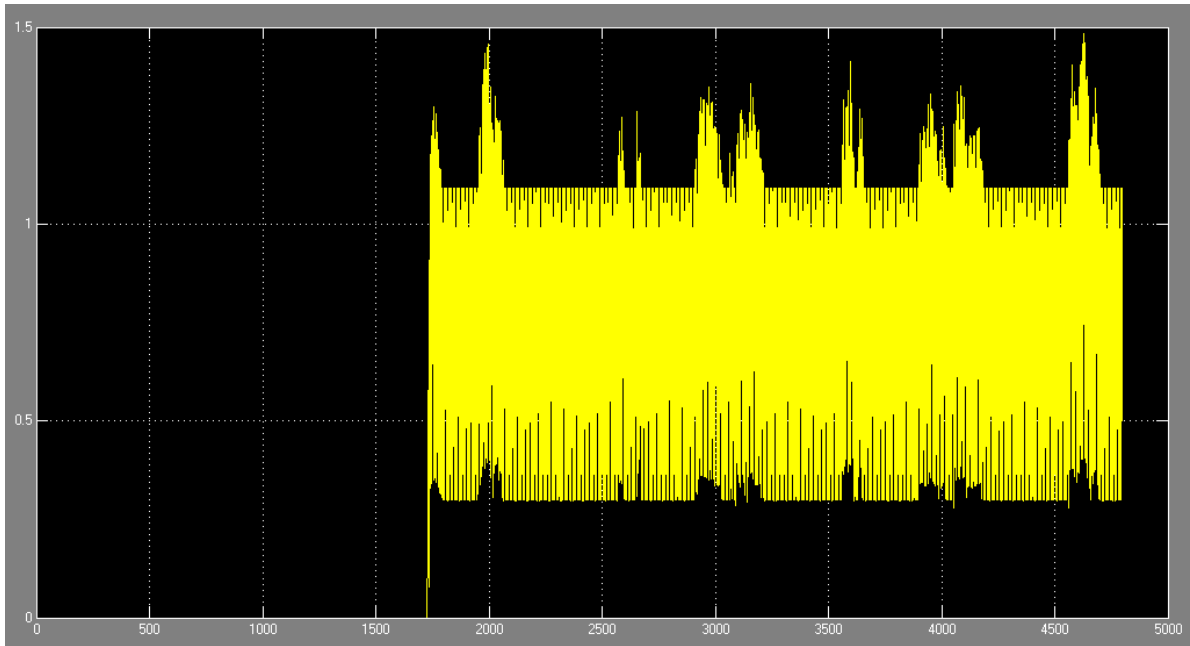
18. Ábra Simulink Modell alrendszerének felépítése

Jól látható, hogy a 18. Ábrán a alrendszerben, helyezkednek el az árnyékolás leíró egyéni Matlab függvények és PV cella hatásfok mátrixok is.



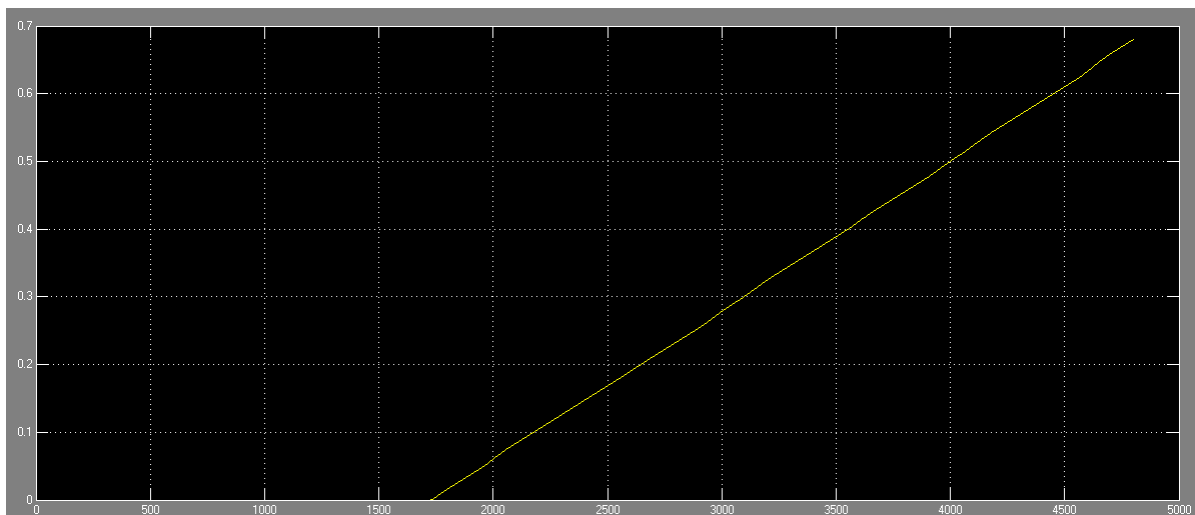
19. Ábra 2. oldal PV teljesítmény idő szimulációja (y-tengely teljesítmény „W”, x- Tengely Idő „s”)

A 19. Ábrán jól látható az árnyékolás által deformált 2. oldal PV teljesítmény alakulása, a kúpos forma oka a nagymértékű árnyékolás.



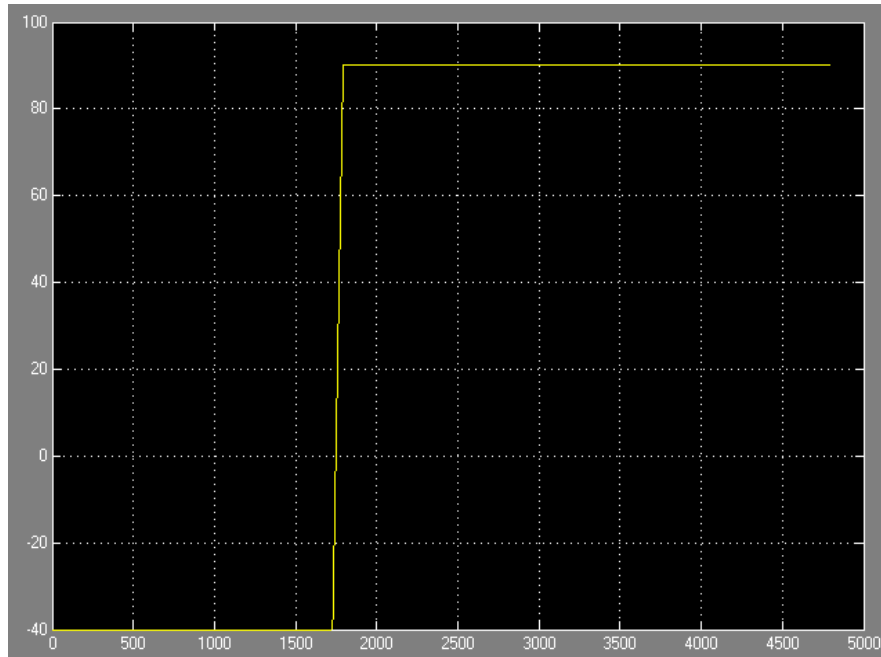
20. Ábra Teljes PV energiatermelő rendszer teljesítmény idő szimulációja (y-tengely Teljesítmény „W”, x-tengely Idő „s”)

A napelemes rendszer által termelt teljesítmény maximuma ingadózó jellegű köszönhető a változó PV cellahőmérsékletnek és az albedo változásának. A maximális PV rendszer teljesítménye 1.5W körüli értékre tehető.



21. Ábra Teljes PV rendszer energia-idő szimulációja (y-tengely Energia „Wh”, x tengely Idő „s”)

A szimuláció során a termelt energia mennyisége szinte lineárisan növekedett (21. ábra), mivel az albedo változása csak pár százalék plusz energia mennyiséget tudott hozzáadni a napelemes rendszer energia termeléséhez, ámbár látványos pillanatnyi teljesítmény csúcsokat okozott. Az albedo elhagyása 4.3%-al csökkentette volna a ciklusonkénti termelt energia mennyiségét.



**22. Ábra Ciklusonkénti PV cella idő-hőmérséklet szimulációja (y-tengely Hőmérséklet (C°), x-tengely Idő (s))**

Látható a 22. ábrán, hogy szinte rögtön eléri a PV cella hőmérséklet a maximumát, ami 90 C°. A Stefan-Boltzmann egyenletből 21% hatásfokot és 0.9 abszorpciós tényezőt feltételezve 89C° adódik, ez az eset azonban nem veszi figyelembe a műhold hővezető és hőtároló képességét és a műhold forgása miatt oszcilláló PV cella hőmérsékletváltozást sem. Ezen tényezők figyelembe vételével a PV cellák várható hőmérséklete 80-85 C° közé tehető, de pontos eredmények meghatározására mérési adatokra és a teljes hőtechnikai modellre lenne szükség. Mindenesetre az állandó 90 C°-os hőmérséklet feltételezésével a biztonság irányába tévedek, hiszen magasabb hőmérsékleten alacsonyabb a PV cellák hatásfoka.

## 8 Konklúzió

---

A szimuláció lényege a műholdon elhelyezett napelemes rendszer energiatermelő képességének becslése, hogy meghatározható legyen a műholdra szerelt adó teljesítménye, illetve a kommunikációs protokoll (Mennyi ideig és milyen sávzélességgel kommunikáljon a műhold). Ezen felül az egyik legfontosabb kérdés a műhold tervezése során az volt, hogy ciklusonként marad-e energia a BME-1 akkumulátorainak fűtésére a körpálya sötét részén, és ha igen, akkor mennyi. Jelenlegi konstrukció szerint mindenképpen marad energia az akkumulátorok fűtésére, de az még kérdéses, hogy ez mire lesz elég. Ezen felül a szimulációs eredményeim sikeresen hozzájárultak a konstrukció kialakításához, hiszen az általam készített szimuláció egy mindig frissíthető becslést nyújt a műhold napelemes rendszer energiatermeléséről. A jövőben a beépített árnyékolás modellt mindenképpen frissítenem kell, illetve érdemes elkészítenem az albedo számítás lenne különböző körpályákra. Ezen felül a műhold fogyasztási profiljának felvételével érdemes lesz elkészíteni az akkumulátor ciklusonkénti töltöttségi görbét, ezáltal elkészülne a BME-1 teljes energiamedzsment szimulációja. Hangsúlyozom, hogy a konstrukció véglegesítéséig a modell folyamatosan frissül, hogy napra kész segítséget nyújtson a BME-1 tervező csapatának.

## 9 BME-1 Konstrukciós észrevételek

---

A legfontosabb észrevétel az volt, hogy az árnyékolás miatt a 1., 2., 3., 4., 5., 6. oldalra 10, 6, rendre 7, 8, 8, 8 PV cellát telepíteni csak visszaram diódák alkalmazásával lehet. Ezen felül a napelem cellákat párhuzamosan kell bekötni a DC/DC (MPPT) átalakítóba, mivel DC/DC átalakítás során a kimeneti feszültség 3.3V (Akkumulátor), és felkonvertálás során a konverter hatásfoka sokkal jobb, mint lekonvertálás esetén. A PV cellák feszültsége 2.5V. Ezen felül a PV cella karakterisztikájánál fogva szinte rögtön eléri a névleges kimeneti feszültségét és a besugárzása csak a kimeneti áramát befolyásolja.

Az észrevételeket a következő pontokban foglaltam össze:

- Az árnyékolt PV cellák visszaram diódákkal kell felszerelni
- A párhuzamosan kötött PV cellák gyártási egyenlőtlensége miatt jelentős feszültség esés is elképzelhető egy MPPT munkaponton (2,5V helyett 2V), így ezt egy 0,85-ös korrekciós tényezővel vettem figyelembe
- Az MPPT vezérlés hatásfoka a leírás szerint leginkább a bemeneti feszültség nagyságától függ, így közel állandó volt a szimuláció során (93-94%)
- A három szög cellákat mindenképpen párhuzamosan kell kötni (6 db párhuzamosan → bele az MPPT vezérlőébe), mivel DC/DC letranszformálás hatásfoka sokkal rosszabb, mint a feltranszformálásé! ( $V_{out}=3.7V$   $V_{in}=2.19V$ )

## 10 Irodalomjegyzék

---

- [1] Sean Michael Cooper (2008), Control of a Satellite Based Photovoltaic Array For Optimum Power Draw
- [2] J. M. Olson, D. J. Friedman and Sarah Kurtz (2003), High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells
- [3] <http://www.PVsystem.com> (2014.09.10)
- [4] <http://www.nasa.gov> (2014.07.10)
- [5] Viktor Józsa „Pille” 3D modell a BME-1 műholdról (2014.10.02)
- [6] Linear Technology Corporation LTC 3105 típusú Termékleírás (2010)



## 11 Melléklet

---

Albedo számításához használt Matlab program sor a következő:

```
close all
clc

adat_albedo=zeros(180,360);
for i=1:37

    switch i
        case {1,2,3,4,5,6,7,8,9}
            j=i+48;
            name=strcat(j, '.csv');
        case {10,11,12,13,14,15,16,17,18,19}
            j=i+38;
            name=strcat('1',j, '.csv');
        case {20,21,22,23,24,25,26,27,28,29}
            j=i+28;
            name=strcat('2',j, '.csv');
        case {30,31,32,33,34,35,36,37}
            j=i+18;
            name=strcat('3',j, '.csv');
    end

    adat=csvread(name);

    for k=1:360
        for l=1:180
            if adat(l,k)>1
                adat(l,k)=1;
            end
        end
    end

    adat_albedo=adat_albedo+adat;

end

atlag_albedo=adat_albedo/37;

load('matlab.mat');
index=sub2ind(size(atlag_albedo),ISS1,ISS2);
Albedo=atlag_albedo(index);
Albedo(Albedo==1)=0;
len=zeros(480,1);
len=len+10;
i=cumsum(len);
j=zeros(1,i(end));
j(i(1:end-1)+1)=1;
j(1)=1;
Albedo_ISS=Albedo(cumsum(j));
Albedo_ISS_T=timeseries(Albedo_ISS);
t=zeros(4800,1);
%t=(0:1:4799).';
% siz=[4800 2];
%     Albedo_ISS_t(prod(siz))=Albedo_ISS;
%     Albedo_ISS_t=reshape(Albedo_ISS,siz);
```

```

%      Albedo_ISS_t(:)=Albedo_ISS_t(end);
Albedo_ISS_t=[t Albedo_ISS];

```

Árnyékolás meghatározáshoz használ programcsort a Matlab Simulink-en belül.

A következő kód segítségével vettem figyelembe az árnyékolást a 2. és a 3. oldal esetén.

```

function y = fcn(g,u,a)
%#codegen
if g > (1360*a*0.6)
    y=u;
else
    y=(u-0.0004554);
end

```

```

function y = fcn(g,a)
%#codegen
if g < (a*1360*0.135113)

    y=0;
else
    y=g;
end

```

A 4. és az 5. oldal esetén a következő kódot használtam;

```

function y = fcn(g,u,a)
%#codegen
if g > (1360*a*0.8681)
    y=u;
else
    y=(u-0.0004554);
end
function y = fcn(f,a)
%#codegen
if f < (a*1360*0.3032)

    y=0;
else
    y=f;
end

```