



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

KATONA KRISZTINA, ÖTVÖS VIVIEN
SIPOS ANNA ILONA, TOMASICS SÁRA
TDK DOLGOZAT

PocketQube műhold vázszerkezetének fejlesztése és hőtechnikai
elemzése

Konzulens:

Józsa Viktor
doktorandusz

Budapest, 2014

KIVONAT

A dolgozatunk témája a BME jelenleg is fejlesztés alatt álló második műholdjának vázszerkezetének fejlesztése, illetve hőtechnikai analízise. A BME-1 névre hallgató műhold a PocketQube-ok családjába tartozik, melynek alapvető követelményei:

- 5x5x5 cm befoglaló méret
- stabil szerkezet, mely egyben marad az indítás, a kilövés és működés közben, ezáltal nem keletkezhet úrszemét strukturális hibából kifolyólag
- indítás után a világűr viszonyai mellett (közel 0 K és 0 Pa) is működőképes legyen
- indítás előtt szabványos teszteken való megfelelés
- minden egyes alkatrész anyagának meg kell felelnie a kis gázkibocsátású anyagok szabványának, hogy a küldetést ne sodorhassa veszélybe

Ezeket kiegészítettük a saját követelményeinkkel, mint a spektrum analízátoros mérőrendszer hordozása, illetve az adó- és vevőantenna kicsomagolódása és üzembe lépése. Célunk a kritériumoknak megfelelő szerkezetek tervezése és fejlesztése.

Az alkalmazhatóság körülményeinek vizsgálatához szükséges a szerkezet hőtechnikai elemzése. Ehhez hőáram-hálózatot modellt alkalmaztunk, mely a robosztussága és a könnyű programozhatósága miatt került kiválasztásra. Az egyszerű, tömör kocka modelljétől a valós geometriáig több konstrukciót vizsgáltunk meg. A hőátviteli folyamatok előzetes kvantitatív elemzése után az egységként értelmezett szerkezetet diszkrét részekre osztottuk, majd azokat koncentrált vezetési ellenállásokkal modelleztük. A szerkezet feldarabolásánál anyagi, szerkezeti és hőforrás szerinti elkülönülést vettünk figyelembe. A termikus funkciók modellezése hőáramhálózati alapelemekkel történik. (hővezetési ellenállás, hőkapacitás, hőáramforrás). A modell segítségével szimulálni tudtuk a szerkezet űrbeli körülményeken történő viselkedését. Az elért eredményeket numerikus hőtani szimulációval hasonlítjuk össze és ellenőrizzük.

A kész modellt egy egyesített programkódba fogjuk implementálni a műhold teljes viselkedésének a szimulálhatósága érdekében. Ez a folyamat fontos szerepet kap a tervezés során, mivel több elektronikai alkatrész számára bizonyos minimális hőmérsékletet kell biztosítani a működőképességük megőrzése érdekében.

TARTALOMJEGYZÉK

Kivonat	ii
Tartalomjegyzék	iii
Jelölések jegyzéke	iv
1.Bevezetés.....	1
2. Alapkövetelmények.....	1
3.Kis műholdak	2
4.A tervezés menete:	9
5. Hőtechnikai elemzés	17
5.1 Bevezetés	17
5.2 Hőátviteli folyamatok	18
5.2.1 Hőszállítás (konvekció)	18
5.2.2. Hővezetés (kondukción).....	18
5.2.3. Hősugárzás	19
5.2.3.1.Planck-törvény.....	19
5.2.3.2. Wien-féle eltolódási törvény	20
5.2.3.3. Stefan-Boltzmann törvény.....	20
5.3.Termikus környezet	21
5.3.1. Külső (externális) hőáramok:	21
5.4. Antenna hőtani vizsgálata.....	22
5.5 Hőáram hálózatos modellezés	24
5.5.1.Hőáram hálózat elve	24
5.6 Hőáram hálózat alkalmazása a PocketQube műholdra.....	26
6.Összefoglalás.....	31
Irodalomjegyzék.....	33

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A	hővezető keresztmetszet [m^2]
A_k	folyadékkal érintkező felület [m^2]
A_p	a sugárzásnak kitett felület [m^2]
α_k	hőátadási tényező [$\frac{W}{m^2K}$]
α	abszorpciós tényező [I]
α_{IR}	az abszorbeáló felület abszorpciós tényezője az IR-re nézve [I]
a	hőfokvezetési (termikus diffúziós) tényező [$\frac{m^2}{s}$]
δ	síkfal vastagsága [m]
ε	emissziós tényező [I]
C	kondenzátor kapacitás [F]
C_h	hőkapacitás [W]
$i(t)$	áramerősség időbeli függvénye [A]
k	csillapítási tényező [$\frac{Ns}{m}$]
l	hossz [m]
L	tekercs induktivitás [H]
G_{IR}	Föld infrasugárzási energiasűrűsége [$\frac{W}{m^2}$]
G_s	direkt napsugárzás energiasűrűsége [$\frac{W}{m^2}$]
m	tömeg [kg]
R	ellenállás [Ω]
\dot{Q}	szilárd test felszínén fellépő hőáram [W]
\vec{q}	hőáramsűrűség-vektor [$\frac{W}{m^2}$]
s	rugómerevség [$\frac{N}{m}$]
t_w	test felszínének tömésértéke [K]
t_f	folyadék hőmérséklete [K]
T_{test}	test hőmérséklete [K]
$T_{körny}$	környezet hőmérséklete [K]

$\nabla \vec{T}$	hőmérsékleti gradiens: a hőmérsékleteloszlás hely szerinti differenciálhányadosa $\left[\frac{K}{m}\right]$
$u(t)$	feszültség időben változó függvénye [V]
λ	anyagjellemző: hővezetési tényező $\left[\frac{W}{mK}\right]$
λ_{max}	hullámhossz [μm]
σ	Stefan-Boltzmann állandó $5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$
γ	Nap és az abszorbeáló felület közötti szög [rad]
v	albedó faktor [I]
φ	viewfactor [I]
$\frac{dt}{dx}$	hőmérséklet-eloszlás hely szerinti differenciálhányadosa $\left[\frac{K}{m}\right]$

1. BEVEZETÉS

A BME-1 MASAT műhold sikerén felbuzdulva újabb műhold tervezésének ötlete fogalmazódott meg, amely a TV adók által űrbe kibocsátott elektroszmogot térképezné fel a bolygó körül. Ezt a mérést jelenleg még senki nem végezte el, tehát a világ számára is lenne újdonságtartalma a küldetésnek.

2. ALAPKÖVETELMÉNYEK

Mivel a PocketQube-ok tervezése, illetve fejlesztése gyerekcipőben jár, így még nincs felállítva csak azokra vonatkozó követelményrendszer, ezért a tervezés során a CubeSat-ok követelményrendszerét vettük figyelembe, kiegészítve azokkal a kritériumokkal, amelyek a PocketQube méretű műholdakat meghatározzák. [1]

Az egyik legfontosabb kikötés a szatellit méreteire és tömegére vonatkozik, ez alapján a befoglaló méretek 50x50x50 mm és 2''x2''x2'' (50,8x50,8x50,8 mm) között választhatók meg, valamint a tömege nem haladhatja meg a 180 grammot. [2][3]

Általános követelmények voltak még, hogy a műholdnak a felbocsátás, kivetés és működés közben egyben kell maradnia, így nem keletkezhetsen űrszemét felépítési hibából adódóan. A műholdnak indítás után működőképesnek kell lennie a világűr viszonyai mellett, azaz közel 0 K és 0 Pa esetén.

Nem használható pirotechnika.

A műhold veszélyes anyagainak meg kell felelni az AFSPCMAN 91-710, Volume 3 szabványnak. További anyagválasztást befolyásoló tényező, hogy csak és kizárólag kis gázkibocsátású anyag használható, annak érdekében, hogy megakadályozzuk más műholdak rongálódását a beillesztés, tesztelés és az indítás során. Ehhez szükséges, hogy a műhold TML-je (Total MassLoss – gáz kibocsátás mennyisége adott hőmérsékleten és nyomáson) kisebb legyen, mint 1,0%, valamint a CVCM érték (CollectedVolatileCondensableMaterial – kondenzálódó illó tartalom) kisebb, mint 0,1%.

További szempont még, hogy némely kilövő szerkezethez hozzátartozik a mágneses mező erősségére vonatkozó követelmény, mivel az erős mágnesek gátolhatják a műholdak elkülönülését a kilövő szerkezetben. Így korlátozni kell a műhold körüli mágneses mezőt.

A kész konstrukciónak többféle teszten kell átmennie, többek között többféle rezgéstani (véletlenszerű gerjesztés, adott spektrummal való rázás), hőmérséklet-vákuum, és vizuális teszten. Végül minőségi, proto-repülés és elfogadási tesztnek vetik alá a műholdat, majd ha ezeken is megfelelt, indításra bocsátják.

Az előbbi követelményeket kiegészítettük a sajátjainkkal, amik a műhold céljának teljesítéséhez szükségesek. Egy olyan vázszerkezetet kellett kialakítanunk, amely megfelel egy spektrum analízátoros mérőrendszernek, az energiaellátást biztosító rendszereknek (Li-ion akkumulátor, napelemek, MPPT vezérlőáramkörök), illetve a fedélzeti számítógépnek. Ezeknek elegendő és megfelelő helyet és rögzítést biztosít. Továbbá figyelembe kellett vennünk, hogy magának a keretszerkezetnek fémből kell elkészülnie, a műhold szögsebességének csökkentése érdekében a hiszterézis veszteségen keresztül.

Ezenkívül célunk volt, hogy az adó- és vevő antennák ne a szokványos mérőszalagos megoldásúak legyenek, mint a Masat-1, vagy az 50SSat nevű PQ esetében, hanem alakemlékező fémből készüljenek, így azokat egyszerűen körbetekkerhessük a műholdon, amik megfelelő hőmérsékletre felmelegítve a start után maguktól kicsomagolódnak az űrben. Ezek előnye, hogy nem kell külön egy térrészt elkülöníteni az antennának, azaz helytakarékosabb, valamint a lassú kinyílás miatt nem éri hirtelen mechanikus hatás a szerkezetet.

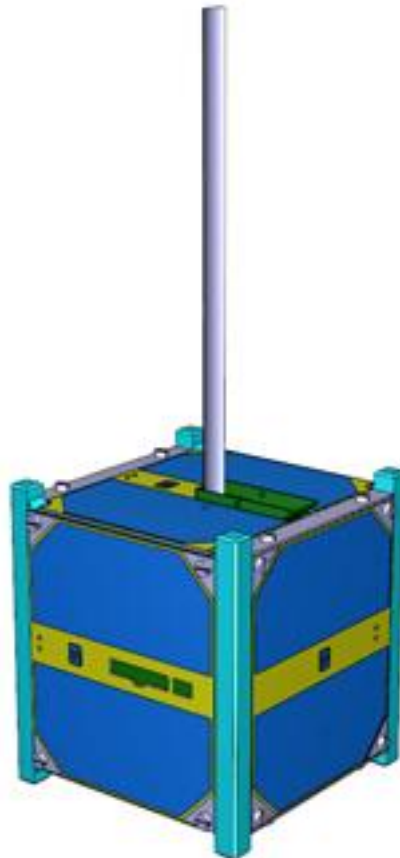
Mivel maga a tervezés és a megvalósítás is egy többlépcsős folyamat, így fontos szempont volt, hogy a konstrukció ne csak stabil, de gyorsan és könnyedén szétszedhető, illetve összeszerelhető legyen, az esetleges későbbi változtatások, alkatrész cserék érdekében. Hiszen tesztelések során mind a vázszerkezet, mint az elektronika meghibásodhat, tönkremehet, így ezekhez egyszerűen hozzá kell férnünk. Valamint az antenna pontos beállításához is vélhetően több szerelésre lesz szükségünk.

3.KIS MŰHOLDOK

A CubeSat-ok olyan miniaturizált műholdak, amelyeket űrkutatáshoz fejlesztettek ki. Ezek általában egy 10 centiméteres kockák, s nem nehezebbek, mint 1,33 kg. Természetesen, többféle méret előfordul: az alap az 1U (one unit – egy egység), ez a legkisebb CubeSat: 10x10x10 cm-es befoglaló mérettel rendelkezik. A legnagyobbak közé tartozik a 6U (10x20x30 cm vagy 12x24x36 cm) illetve a 12U (20x20x30 cm vagy 24x24x36 cm). Mivel

az alapjuk egységes, így a kilövő szerkezetük is egységes, úgy nevezett P-POD (Poly-PicoSatelliteOrbitalDeployer). [4]

Számunkra igen fontos, hogy az egyetemünknek már van egy pályára állított műholdja, a Masat-1. Ez egy 1U-s, 1 kg tömegű szatellit, amelyen az egyetem két tanszéke dolgozott: az Elektronikus Eszközök Tanszéke és a Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, illetve a BME Űrkutató Csoport.



3.1. ábra: Masat-1 vázszerkezete

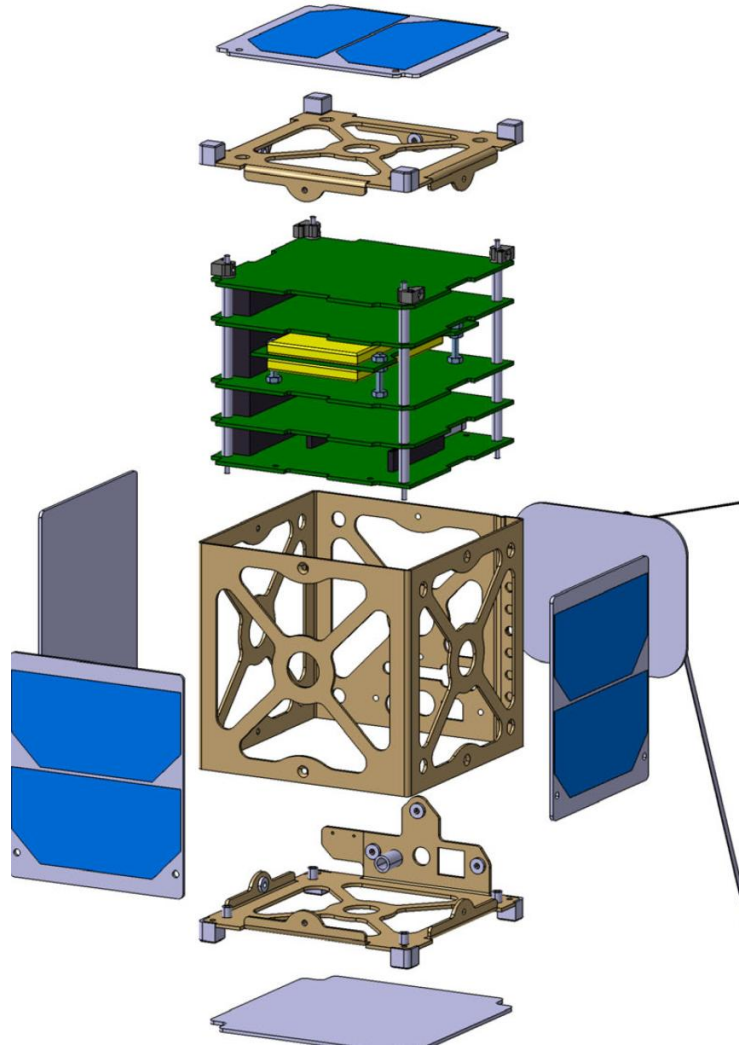
Általános követelmények szinte ugyanazok, mint egy PocketCube esetén, viszont más, egyéb követelmények eltérnek a méretek miatt:

Mechanikai követelmények:

- Külső befoglaló méretek: 100x100x113.5mm
- maximum 6.5mm-es kilógás megengedett az oldallemezekhez képest
- műhold technológiai csatlakozó helye meghatározott
- A csúszóélek kemény anodizáltak legyenek (ezért fekete színű a váz egy része)
- A megfelelő helyeken legyenek a szeparációs rugók, kapcsolók

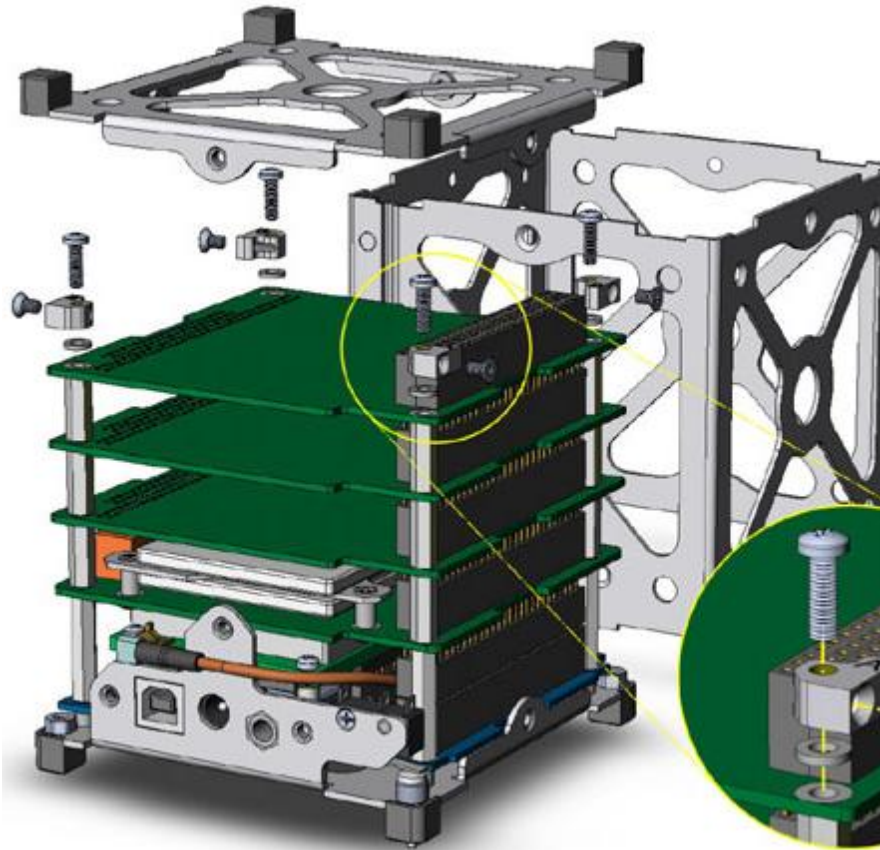
Tömegre vonatkozó követelmények:

- A műhold (1U CubeSat) tömege kevesebb legyen, mint 1.0kg (az új szabvány szerint 1.33kg).
- a műhold tömegközéppontja a geometriai középponthoz képest egy 2cm sugarú gömbben legyen [5]



3.2. ábra: Masat-1 szerkezetéhez hasonló megoldás [6]

A 3.2. ábrán jól látható, hogy milyen a Masat-1 belsejének megoldása. Ez egy speciális alumínium-ötvetű vázszerkezet, helyenként megkönnyítve.



3.3. ábra: Masat-1 belsejének megoldása [6]

A külseje és belseje csavarkötéssel van rögzítve egymáshoz, ezt láthatjuk a 3.3. ábrán. Az is jól látható, hogy a panelek közötti adatkommunikációra szolgálnak a szerkezet jobb oldalán található fekete adatsínek, ehhez hasonló lesz a BME-1 belső paneljei között is. Fontos, hogy a váznak annyira stabilnak kell lennie, hogy a rázkódás során ez az adatkapcsolat ne szűnjön meg. Erre szolgálnak a csavarok. Az egész szerkezet alapjául az UWE-2 szolgált, melyet Schilling professzor mutatott be 2006 decemberében. [8]

A Masat-1-et egy olyan P-POD-ban kapott helyet, ahol még kettő CubeSat foglalt helyet, ezek a Robusta és a PW-Sat. Azonban velük együtt még egy P-POD bekerült a Vega-1 nevezetű rakétába, amely szintén három CubeSat-ot hordozott. Ezek sikeresen 2012.02.13-án földköri pályára kerültek. Ez a pálya úgynevezett LowEarthOrbit (LEO), vagyis alacsony földköri pálya. A BME-1-et is ilyen pályára szeretnénk állítani. Ennek több oka van, az egyik hogy elkerüljük az űrszemetet, amely a 3.4. ábrán is jól látható.

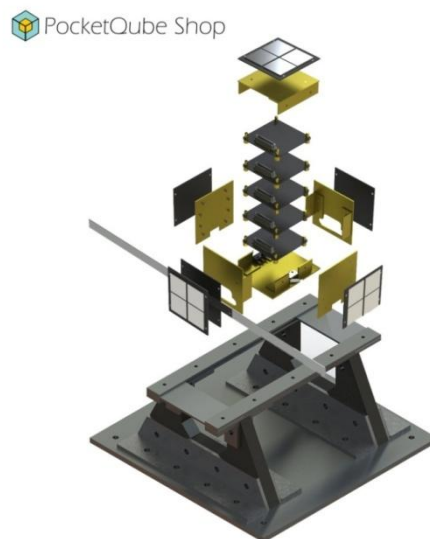


3.4. ábra: Űrszemét

Ez az űrszemét szinte kizárólag mesterséges, ember által hagyott űrszemét: java része valamilyen letört alkatrész, vagy valamilyen inaktív műhold, rakéta alkatrészek. A LEO pálya 160-2000 km magasságot jelent definíció szerint. [7]

A másik oka az, hogy a keringési ideje gyorsabb, így egy nap alatt többször elhaladna felettünk, többször be lehetne mérni és több információt gyűjthetnénk össze.

A CubeSatok után megismerkedtünk a PocketQube műholdakkal. Találkoztunk egy olyan oldallal, ahol például online lehet rendelni kész vázszerkezetet.[9]



3.5. ábra: Robbantott ábra a rendelhető műholdról

Ez egy egyszerű, átlagos megoldás, amelyet akár egyetemi körülmények között is le lehetne gyártani, ezért kiindulásnak tökéletesen megfelelt.

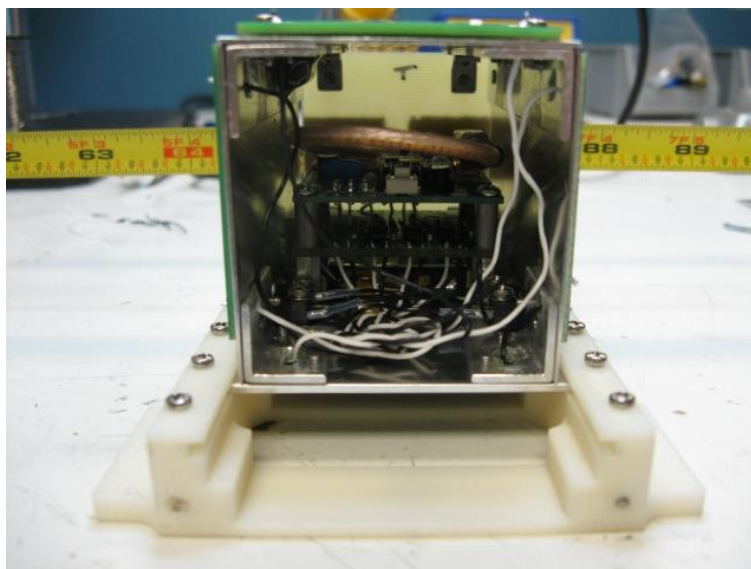
Az egyik ilyen műhold a 3.6. ábrán látható T-LogoQube, amely 5x5x15 cm-es befoglaló mérettel rendelkezik. Olyan célból építették és tervezték, hogy a Föld mágneses terét vizsgálják vele.



3.6. ábra: T-LogoQube

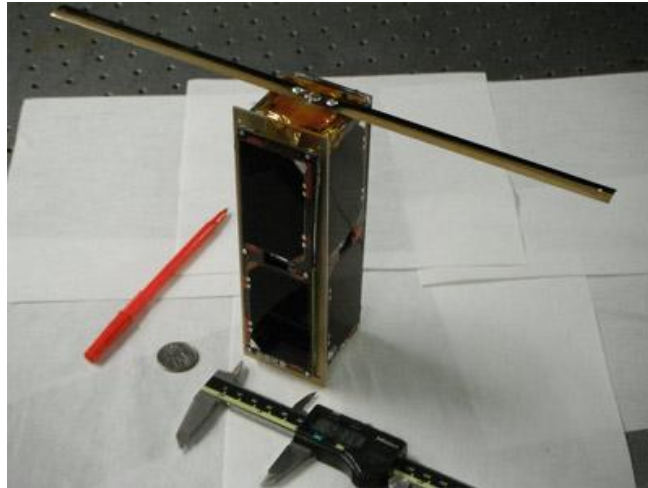
Fém vázra van felrögzítve a nyáklap a napelemekkel együtt, amelyek L-szelvényekre vannak felcsavarozva. Az a megoldás, hogy L-szelvényt használnak rögzítéshez, adott nekünk egy lehetőséget, melyet később felhasználhatunk a tervezésnél. Mivel ez egy 2.5P-s műhold, a BME-1 pedig 1P-s, így kevesebb, mint feleakkora felülettel kell dolgoznunk. Emiatt például a csavaros megoldás nem a legmegfelelőbb, mivel a napelemektől foglal el ezzel helyet, hiszen ahogy az a 2.6. ábrán is látszódik, hogy minden oldalon 4-4 csavar található. A csavar fejmagassága illetve szélessége elveszi a napelemektől a szükséges felületet.

Az \$50Sat egy 1.5P-s szatellit, felépítése szinte ugyanolyan, mint a T-LogoQube. Ugyanúgy a külső váza egy L-szelvényhez van rögzítve csavarkötéssel. A belseje látható a 3.7. ábrán, ez egy eléggé egyszerű megoldás.



3.7 ábra: \$50Sat belső szerkezete

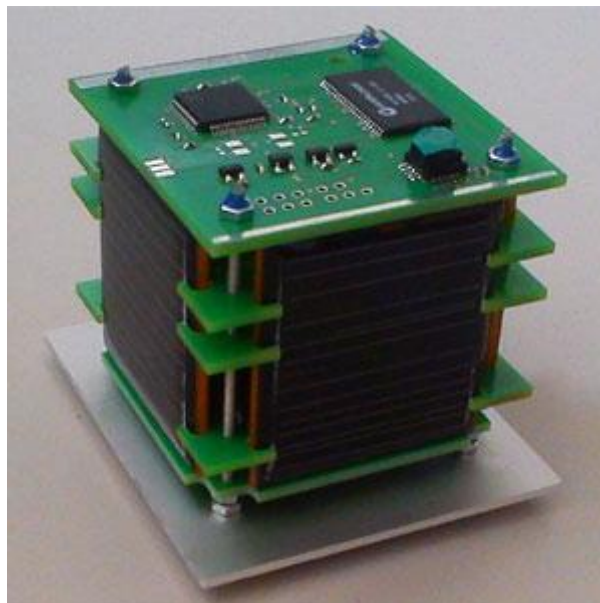
Az elektronikai berendezéseket egyszerűen felcsavarozták az oldallemezekre. Ez ekkora méretnél könnyen megoldható, és kevesebb elektronikát is tartalmaz, mivel ennek a műholdnak a célja az volt, hogy bebizonyítsák, hogy azok is tudnak hódolni a műholdak felé mutatott hobbijuknak, akik kisebb pénztárcával rendelkeznek. [10]



3.8. ábra: QubeScout S1

Következő PQ, amit szintén az előzőekkel együtt állítottak pályára, a QubeScout S1 látható a 3.8. ábrán. Sajnos erről nincs elég információ, hogy a belső részt hogyan oldották meg. A konstrukció részleteit a fejlesztők nem hozták nyilvánosságra, így nem tudtuk kielemezni, esetleg ötleteket meríteni belőle. [11]

Az utolsó műhold, amit a Dnepr-1 rakétával állítottak pályára, a WREN, amely egy 1P-szatelit, mint a BME-1 is.



3.9. ábra: Wren

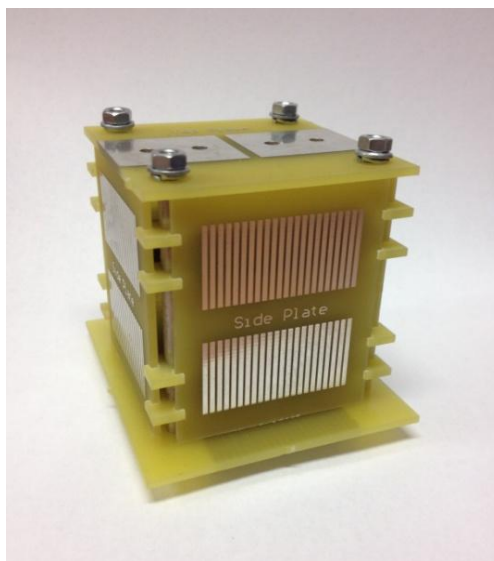
4.A TERVEZÉS MENETE:

Több konstrukció született a tervezés folyamán, egyeseket továbbfejlesztettünk, másokat teljesen elvetettünk, vagy épp ötvöztük az ötleteket.

A kiindulás a már pályára állított WREN nevű szatellithez hasonló szerkezet volt (4.1. ábra). Ennek menetes szárai adták a vázát, erre voltak felfűzve a belső nyomtatott áramköri lapok, amiket a szárazon alumíniumból készült hengeres alkatrészek pozícionáltak, illetve a belső panelekbe illesztve helyezkedtek el az oldal nyákok.

A nyomtatott áramköri lapok anyaga az úgy nevezett FR4 hőre keményedő kompozit anyag, amely üvegszállal erősített epoxi gyanta. Egyik legfontosabb tulajdonsága a tűzállóság. Ennek növelése érdekében további égésgátló adalékokat is tartalmazhat, mint például a bróm. Számunkra a tűzállósága egy igazán lényeges tulajdonsága, hiszen egy esetleges túlmelegedett alkatrész okozta elektromos tűz esetén fontos, hogy ne boruljon lángba az egész szerkezet. Az FR4 jó teherbírású, jó mechanikai és szigetelő tulajdonságokkal rendelkezik, vízfelvétele közel zérus, valamint könnyen megmunkálható. [12]

Ez a megoldás megfelelt az alapkövetelményeknek, emellett könnyen és gyorsan szerelhető szükség esetén. A csavaranyák és alátétek eltávolításával a felső, záró lemez levehetővé válik, így hozzáférünk az oldalelemekhez. Ezeket a tartó sarkokból kihúzva elérjük a belső paneleket, amelyeket már csak a menetes szárai és a pozícionáló hengerek tartanak. A hengereket levéve teljesen darabjaira szedhető a szerkezet. A szétszerelés menete gyors és egyszerű, nem igényel különösebb szaktudást, illetve speciális eszközöket.

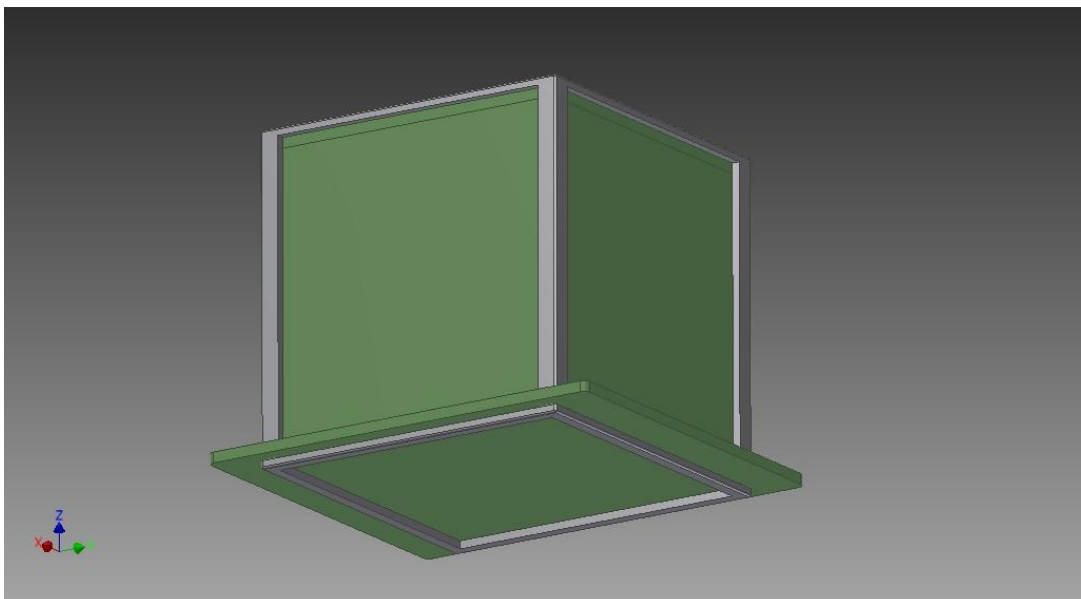


4.1. ábra: Kezdeti szerkezet

Azonban ez a konstrukció nem bizonyult tökéletesnek, mivel a belső paneleken kialakított, külső lapok megfogására szolgáló sarkok, valamint a menetes szárak végei, illetve a rögzítésükhöz szükséges alátétek és csavaranyák jelentős méretű felületet vettek el a napelemektől.

A menetes szárak nem csak a napelemekre szánt felületek szempontjából voltak kedvezőtlenek, hanem a műhold tömegét is megnövelték. Ezen okok miatt szükséges volt más irányba elindulnunk, hogy visszaszerezzük az elvesztett millimétereket és könnyítsük a szerkezetet. A menetes szárakat első közelítésben elvetettük.

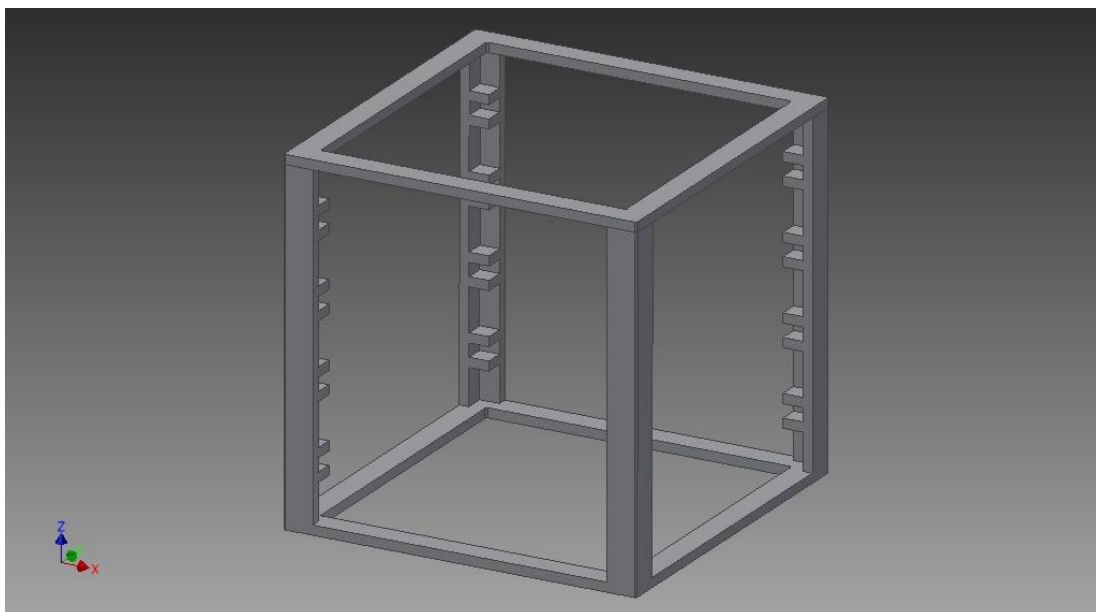
A következő gondolat egy olyan alumíniumlemezből kivágott, majd megfelelő alakra hajlított váz volt, ami az alsó, nagyobb méretű nyáklapon átfűzve megfogja az oldalelemeket. A „polipnak” elkeresztelt struktúra a felső lemezre ráhajlítva, illetve ott összehegesztve további merevítő elemekkel rögzítette volna az FR4-es lapokat (4.2. ábra). A keret kialakítására két elképzelés született: az egyik esetében közvetlenül a sarkoknál helyezkedtek volna el a karok, a másikonál a sarkoktól néhány milliméterrel beljebb. Ez megoldotta a külső rögzítést, azonban a belső panelekét nem. Így a következő feladat azok elhelyezése volt.



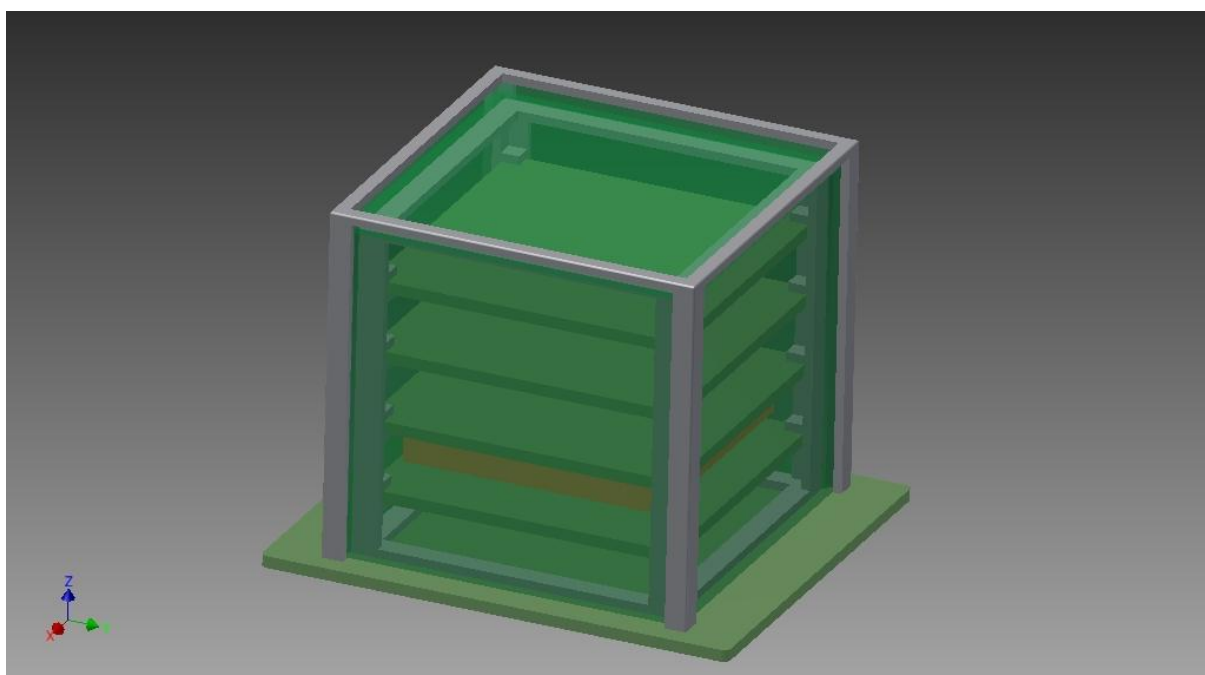
4.2. ábra: „Polip” struktúra

Az első ötlet erre, hogy fém L-síneket helyezünk a sarkokra, amikbe hegesztéssel kis polcokat alakítunk ki, ezekbe kerülnek a nyomtatott áramköri lapok. Az L-síneket alul és felül is négyzet alakú lemezhez hegesztjük, ezáltal belül is kialakul egy váz, így tehát dupla szerkezetünk lesz (4.3. és 4.4. ábra).

Ez az elgondolás is tartalmazott még hibákat, hiszen egyrészt nehezzé tette volna a műholdat, másrészt a könnyű és gyors szerelhetőségnek nem tett eleget.



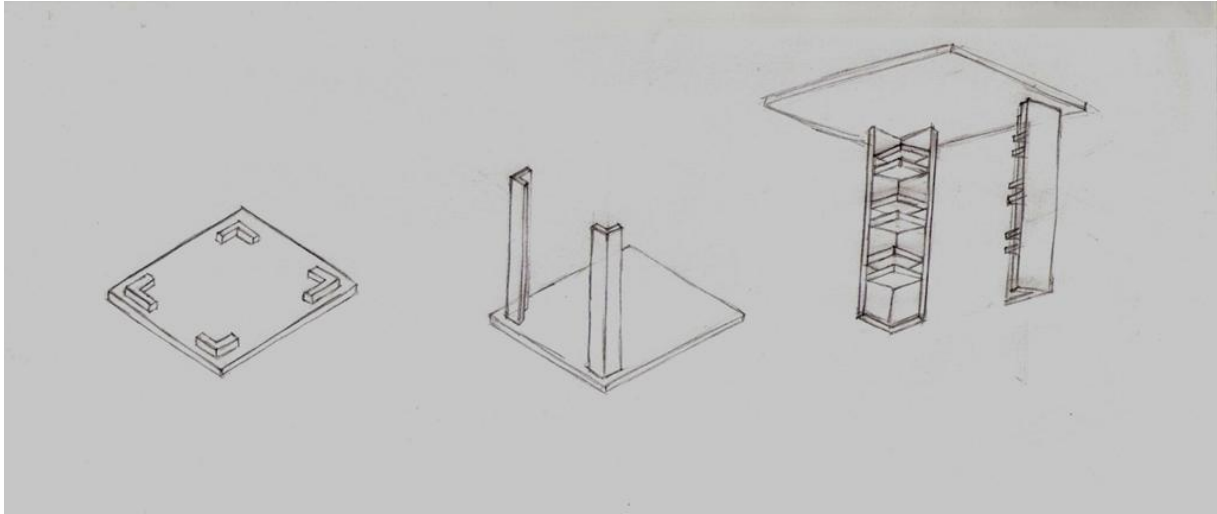
4.3.ábra: Belső váz kialakítása – L-sínek és polcok



4.4.ábra: Kettős váz szemléltetése

Ez után felmerült, hogy 3D nyomtatással alakítunk ki az FR4-es lapokon füleket, amelyek pozícionálják az oldallemezeket. Ez az ötlet vezetett ahhoz, hogy magukat az L-síneket is előállíthatnánk 3D nyomtatással, így lényegesen könnyítenénk a szerkezetet, hiszen kisebb tömegű polimer vázunk lenne. Valamint a polcok kialakítása nem jelentene plusz munkát, mivel a technológiából adódóan ezek az L-sínnel egy időben elkészülnének.

Ezen elgondolás szerint két-két sín helyezkedne el az alsó, illetve a felső nyáklapra rányomtatva, így ez a megoldás már megfelelné a könnyű szerelhetőség feltételének (4.5. ábra).



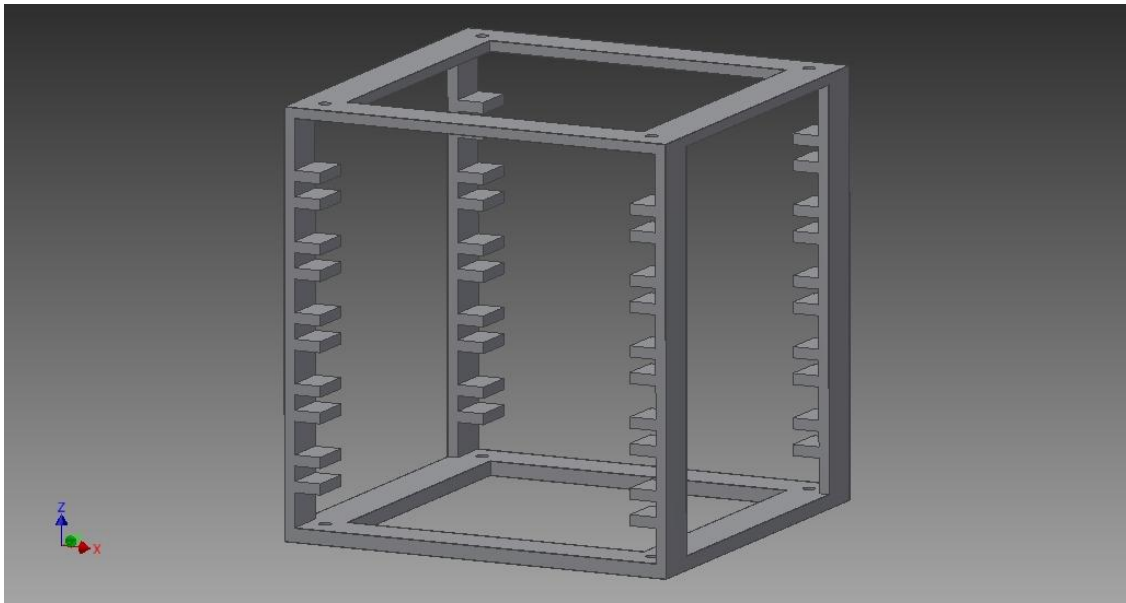
4.5 ábra: Konstruktív ötletek a 3D nyomtatáshoz

A megvalósítás céljából felvettük a kapcsolatot a többek között 3D nyomtatással is foglalkozó Varinex Informatikai Zrt.-vel. A náluk tett látogatás során bemutatták az általuk használt technológiákat és polimer anyagokat. A legjobb megoldásnak a poliamidból SLS (Selectivelasersintering) technológiával előállított fülek tűntek, azonban ezt az elgondolást is el kellett vetnünk több okból. Egyrészt magukra a nyáklapokra nem próbáltak még 3D nyomtatni, így a megfelelő minőséget nem tudják garantálni. Javasolták, hogy utólag illesszük a vázhoz a kívánt formájú darabokat. Ehhez valamilyen ragasztóanyagra lenne szükségünk. Másrészt szigorú szabályok vonatkoznak az űrbe vihető anyagokra, ahogy azt már a követelményekben is írtuk az ASTM E595-07 szabványnak megfelelően.

Az illó tartalomra vonatkozó kritérium teljesíthető PA esetében, viszont a tömegcsökkenésre vonatkozó kevésbé, mivel a poliamid higroszkópos polimer, így akár 5 tömeg% vizet is felhalmozhat a levegő nedvességtartalmából, ezért a tömegcsökkenésre vonatkozó követelményt nem tudjuk tartani. Ezzel a kizárólag poliamidból készült szerkezeti elemek 3D nyomtatását is kizártuk.

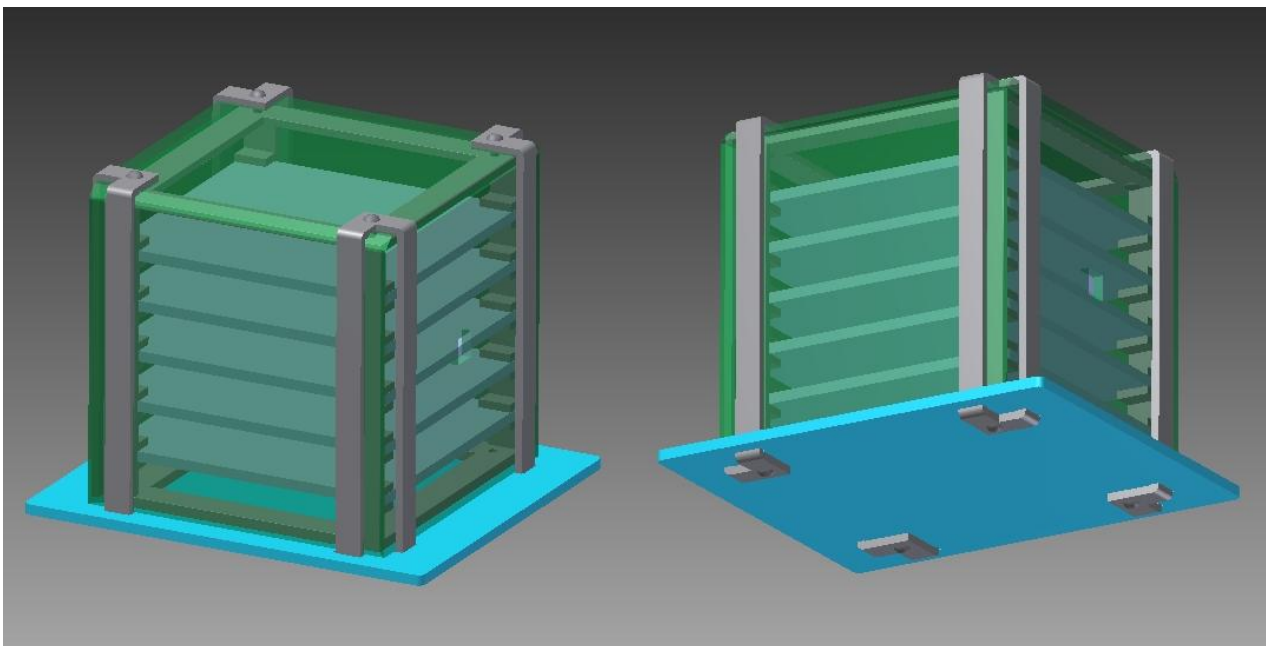
Visszatértünk a korábbi fémes belső szerkezethez. Az L-síneket lecseréltük egy egyszerűbb vázra, a külsőhöz hasonlóan lemezből kivágva és hajlítva, azonban ennél csak 4 kart hagytunk meg, ezekre kerülnek rá hegesztéssel a sín párok, amikbe becsúszthatóak a belső panelek (4.6. ábra). Így szerelhetővé tettük a szerkezetet.

Ezzel tehát megkaptuk a belső szerkezetet, ezután a külsőt kellett tökéletesíteni.



4.6. ábra: Sínes megoldás a belső keretre

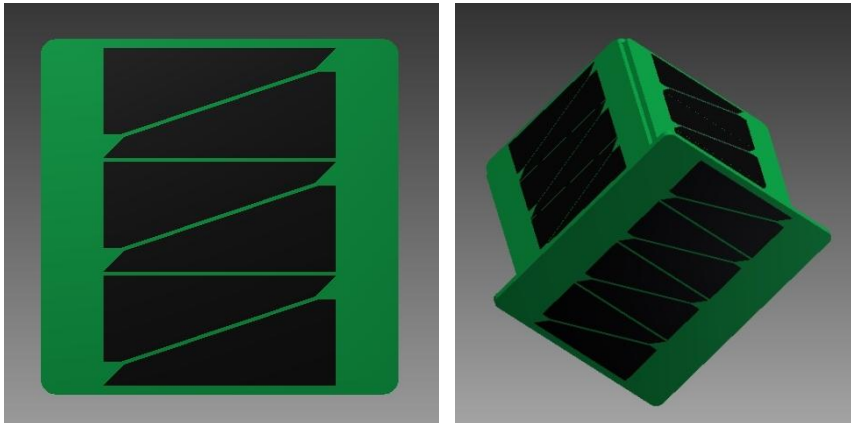
Mivel az egyik legfontosabb követelményünk, hogy gyorsan és könnyen szerelhető szerkezetet alkossunk, így a hegesztést, mint rögzítést is elhagytuk. Az új ötlet, hogy szegecskötést alkalmazunk a külső váz lefogásához. Ehhez felhasználtuk a belső keretet, aminek alsó és felső részén furatokat alakítottunk ki, ezeken vezettük keresztül a külső vázat megfogó popszegecsek. Ezen kialakítás előnye, hogy könnyebben oldható, mint a hegesztett kötés, ennek oldásával nem sérül a keretszerkezet.



4.7 ábra: Szegecses konstrukció

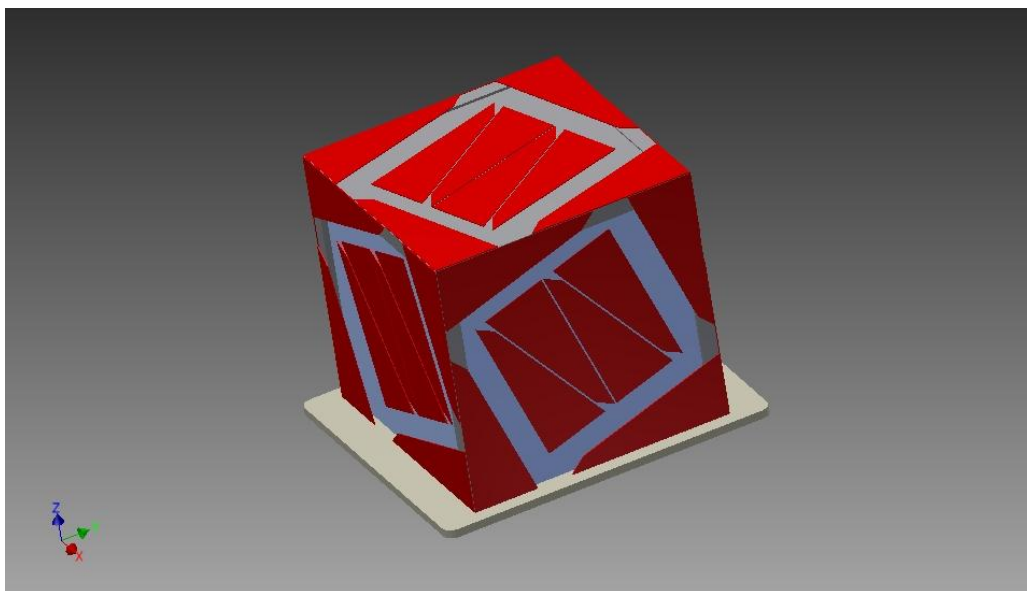
A vázszerkezet megtervezése közben szem előtt kellett tartani, hogy a váz a lehető legtöbb felületet hagyja szabadon a napelemeknek.

Legelőször abból indultunk ki, hogy minden oldalra 6 napelemet tudunk elhelyezni. Ennek megfelelően változtattuk a szerkezetet. A 6 napelemes ötletet módosítottuk, az alsó, nagyobb nyáklapra 8 db napelemet helyeztünk el.



4.8 ábra: Napelemek elhelyezése

Majd tovább akartuk növelni a napelemek számát, mivel a műhold működéséhez szükséges energia nagyrészt ezekből származik. Így megpróbáltunk olyan megoldást találni, ahol minden oldalon elfér 8 napelem. Ezt az alábbi elrendezéssel oldottuk meg:



4.9. ábra: Maximális számú napelem elhelyezése

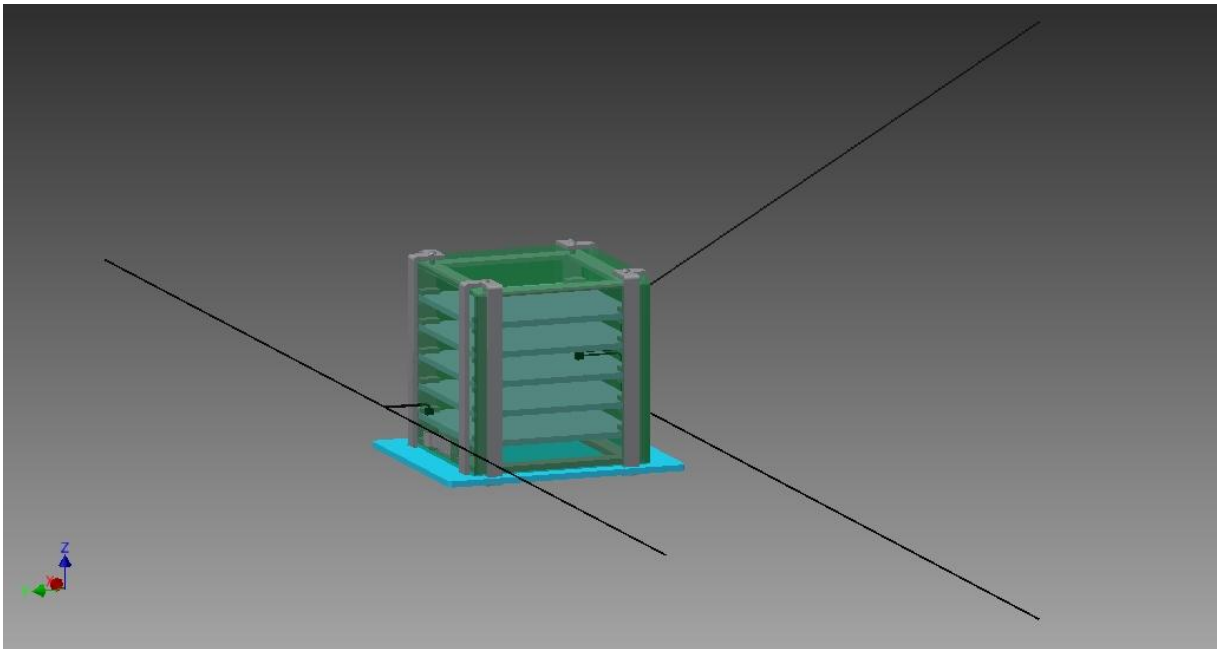
Célunk volt megtartani az összes elemet, azonban erre nem volt lehetőség az adó- és vevőantennák, valamint a kapcsolók kivezetései miatt.

Ezzel eljutottunk egy következő feladathoz, az antennák és a kapcsolók elhelyezése.

A kapcsoló helye nagyjából adott volt: az alsó laphoz közel kell rögzítenünk, hogy a kilövő szerkezet sínjében helyezve az benyomódjon, majd a kilövés után áram alá helyezze a műholdat. Biztonsági okokból két kapcsolót szerelünk fel a műholdra. [13]

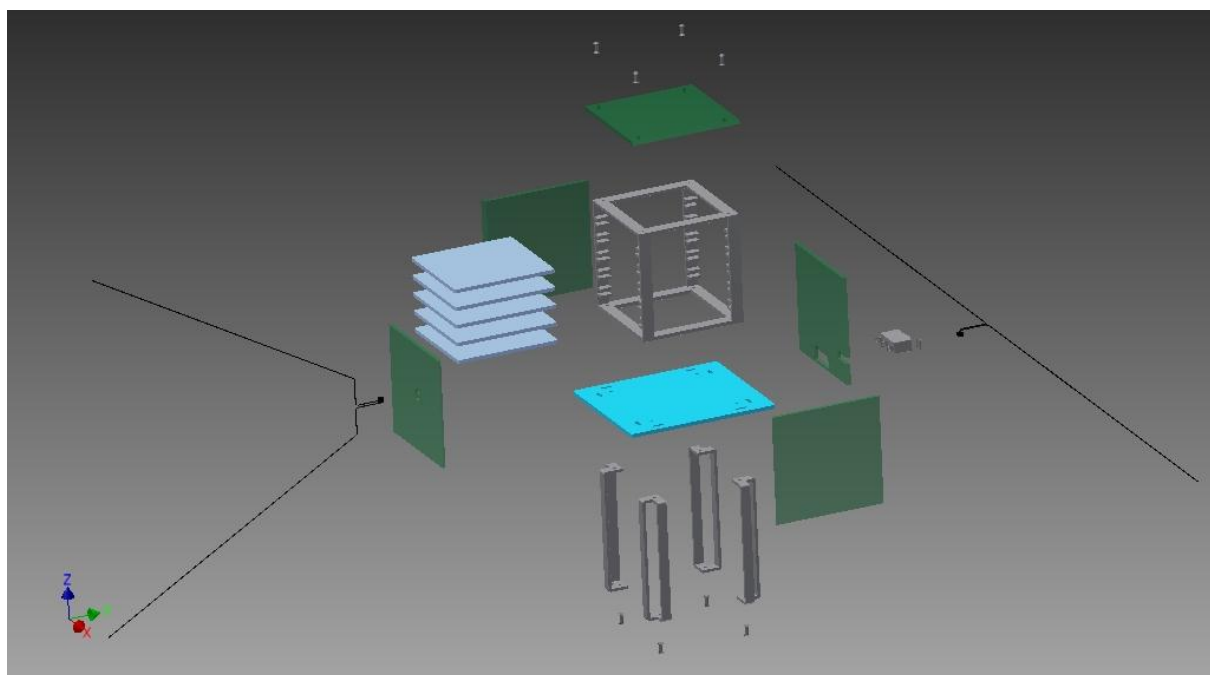
Az antennák megfelelő működése érdekében nem helyezhetjük egy síkba azokat, egymásra merőlegesen kell rögzítenünk őket, természetesen úgy, hogy a kivezetéseikkel a lehető legkevesebb felületet vegyük el a napelemektől.

Mindezek alapján jelenlegi konstrukciós javaslatunk:



4.10. ábra: Jelenlegi konstrukció

Ez a megoldás közelíti elvárásainkat: a szerkezetet sikerült könnyíteni a lemezalkatrészek révén úgy, hogy az stabil és működőképes maradjon. Az antennákat és kapcsolókat úgy helyeztük el, hogy azok ne vegyenek el nagy felületeket a napelemektől, valamint megfelelően tudjanak működni. A konstrukció szerelése gyors és egyszerű: a keret sínjeibe csúsztatjuk a belső nyáklapokat, majd a keretet az alsó lemezre helyezzük ügyelve, hogy a szegecseknek kialakított furatok középvonalai egy vonalba essenek. Ezután átvezetjük az antennákat és kapcsolókat az oldalelemeken, rögzítjük azokat a belső paneleken, majd megfelelő kiosztásban elhelyezzük az oldallapokat a belső váz körül. Ezt követően a karokat tesszük a furataikba (az alsó lapon átfűzve), majd elhelyezzük a felső nyáklapot, amire ráhajlítjuk a külső karokat, végül popszegecsekkel rögzítjük a szerkezetet.



4.11. ábra: Jelenlegi konstrukció robbantott ábrája

5. HŐTECHNIKAI ELEMZÉS^[14] ^[15] ^[16]

5.1 Bevezetés

A műhold alkalmazhatóság körülményeinek vizsgálatához elengedhetetlen a szerkezet hőtechnikai elemzése. A vizsgálat során hőáram-hálózatos modellt alkalmaztunk, mely a robosztussága és a könnyű programozhatósága miatt került kiválasztásra. Manapság már egyre ritkábban használják ezt a módszert az estelegesen előforduló bonyolult egyenletrendszerek miatt, azonban a megfelelő alkalmazása gyorsan eredményre vezet, valamint a teljes számítás sokkal könnyebben kézben tartható, mint a végelelemes eljárások. Továbbá a mi szempontunkból legkritikusabb hőszigetelést így garantáltan helyesen tudjuk meghatározni. Ez okozza a legnagyobb problémát a végelelemes számításokban és részben ezért választottuk ezt a módszert.

Mint ahogy minden modellalkotási folyamat indul, mi is a legegyszerűbb konstrukció vizsgálatával kezdtük az elemzést. A megfelelő egyszerűsítések után az egyre összetettebb modell kiépítése, vizsgálata felé haladtunk, az egyszerű, tömör kocka modelljétől a valós geometriáig. Megvizsgáltuk, milyen hőhatásoknak van kitéve az űrben a műhold, és ezek mekkora terhelést jelentenek. Az űrben szélsőséges körülmények uralkodnak. Egy kisméretű szerkezet kis hőkapacitással rendelkezik, megfelelő anyagválasztás és kialakítás szükséges, valamint figyelembe kell venni az elektronikai alkatrészek működési korlátait is. Ahóátviteli folyamatok előzetes kvantitatív elemzése után az egységként értelmezett szerkezetet diszkrét részekre osztottuk, majd azokat koncentrált vezetési ellenállásokkal modelleztük. A szerkezet feldarabolásánál figyelembe kellett venni mind anyagi, szerkezeti, mind hőforrás szerinti elkülönülést. A termikus funkciók modellezése- ahogy a későbbiekben részletezzük- hőáram-hálózati alapelemekkel történik. (ezek: hővezetési hőellenállás, hőkapacitás, hőáramforrás). A modell segítségével szimulálni tudtuk a szerkezet űrbeli körülményeken történő viselkedését, a valós folyamatok bonyolultsága miatt egyszerűsítésekkel élve. Az elért eredményeket numerikus hőtani szimulációval hasonlítjuk össze és ellenőrizzük.

A vizsgálat célja, hogy a kész modellt egy egyesített programkódba implementálhassuk a műhold teljes viselkedésének a szimulálhatósága érdekében. Ez a folyamat fontos szerepet kap a tervezés során, mivel több elektronikai alkatrész számára bizonyos minimális hőmérsékletet kell biztosítani a működőképességük megőrzése érdekében.

5.2 Hőátviteli folyamatok

Ebben a részben a várható környezeti feltételek kvantitatív elemzéséről lesz szó.

A hő terjedésének mennyiségi leírásához három elemi folyamatot szokás megkülönböztetni: hőszállítás (konvekció), hővezetés, hősugárzás.

5.2.1 HŐSZÁLLÍTÁS (KONVEKCIÓ)

A közeget alkotó részecskék elmozdulásának következtében megvalósuló energiaterjedés. A szilárd testek és folyadékok (gázok) érintkező felületein keresztüli hőterjedést hőátadásnak nevezzük. A leíró egyenlet

$$\dot{Q} = \alpha_k \cdot A_k \cdot (t_w - t_f) \quad (1)$$

Mivel az űrben vákuum van, nincs áramló közeg, a hőátadást el lehet hanyagolni a számításoknál.

5.2.2. HŐVEZETÉS (KONDUKCIÓ)

Az energia térbeli terjedésének azon formája, amikor a hő egy közeg magasabb hőmérsékletű részéből annak másik része felé történő „áramlása” során a közeg alkotórészecskéinek mozgása nem számottevő, illetve rendezetlen.

Az általános Fourier-féle hővezetési egyenlet:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2)$$

A negatív előjel arra utal, hogy a hőáramsűrűség-vektor a hőmérsékleti gradienssel ellentétes értelmű.

Az egyszerűség kedvéért az 1 dimenziós vezetés egyenletet használjuk a dolgozatban modellezésére, mivel a vezetés vékony lapokon keresztül történik, így az 1 dimenziós érvényes közelítés.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (3)$$

Síkfalnál a következőképp számítható a hőáram

Vegyük a hővezetés Fourier-féle alapegyenletét homogén egyrétegű síkfal esetére, ahol a hőmérsékletmező csak x iránytól függ (egydimenziós hővezetés):

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

A (4) –es egyenletet átrendezve úgy, hogy csak a hőmérsékletkülönbség szerepeljen az egyik oldalon:

$$\dot{Q} \cdot \left(\frac{\lambda}{\delta} \cdot A\right) = (T_1 - T_2) \quad (5)$$

Az Ohm-törvény analógiájára nyilvánvalóan $R_h = \left(\frac{\lambda}{\delta} \cdot A\right)$ az ún. termikus-, vagy hőellenállás.

A Fourier és az Ohm törvény analógiáját használjuk ki a továbbiakban. (Az áramnak a hőáram, a potenciálkülönbségnek a hőmérsékletkülönbség felel meg.)

A vizsgálatunk során a valósághoz legközelebb álló modell az időben változó hővezetés hőforrással, melynek alapegyenlete:

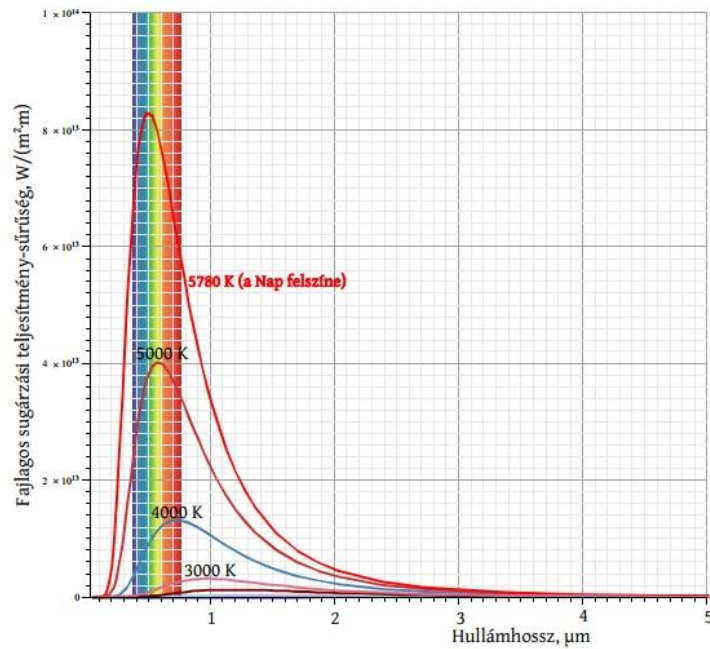
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\dot{q}}{\rho c} + a \nabla^2 t \quad (6)$$

5.2.3. HŐSUGÁRZÁS

Minden test bocsát ki energiát elektromágneses hullámok formájában. Ennek intenzitása a test hőmérsékletétől és felszínének jellegétől függ. A test által leadott energiaáramot nevezzük hőszugárzásnak. Az abszolút fekete test a legjobb elnyelő és sugárzó. A hőszugárzásnál három alaptörvényről szoktak szót ejteni:

5.2.3.1. Planck-törvény

A fekete test adott irányba kibocsátott sugárzási intenzitását adja meg. Az abszolút fekete test fajlagos sugárzási teljesítmény-sűrűsége a hullámhossz és a felszíni hőmérséklet függvényében (lineáris koordinátarendszerben) az 5.2.1. ábra mutatja.



5.2.1. ábra

5.2.3.2. Wien-féle eltolódási törvény

A Planck-görbék maximum helyei a magasabb hőmérsékletek felé haladva a rövidebb hullámhosszok felé tolnak el.

$$\lambda_{max}T = 2898,7 \mu mK \quad (7)$$

5.2.3.3. Stefan-Boltzmann törvény

Az abszolút fekete test teljes spektrumra vonatkozó felületi energiasűrűségét adja meg.

$$\dot{Q}_{rad,max} = \sigma \cdot A_p \cdot T_{test}^4 \quad (8)$$

A valóságban főként szürke testekkel foglalkozunk, amelyek a rájuk eső sugárzás egy bizonyos hányadát hullámhossztól függetlenül nyelik el illetve bocsátják ki.

elnyelt (abszorbeált)

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_{test}^4 - T_{körny}^4) \quad (9)$$

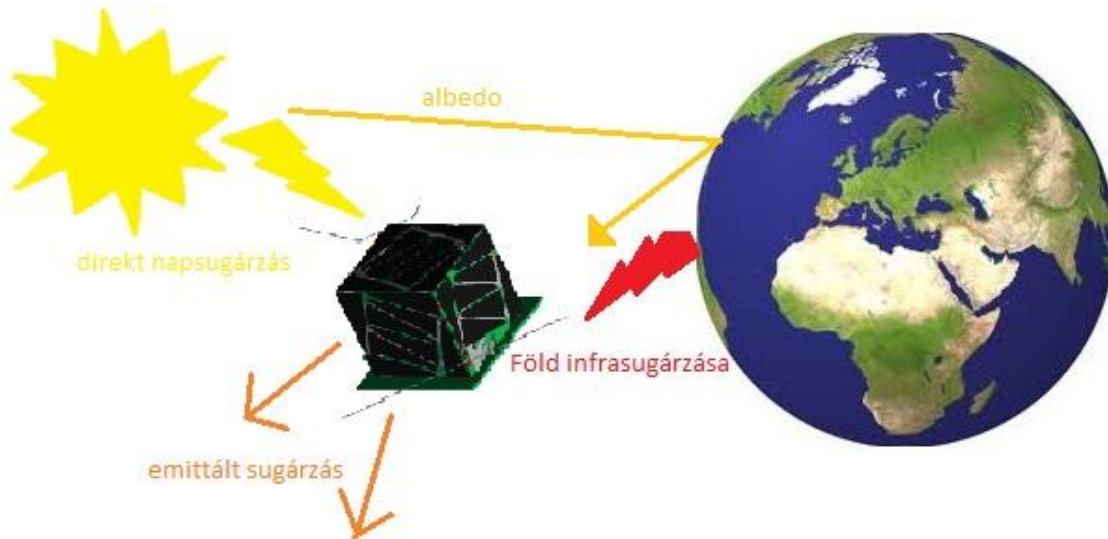
kibocsátott (emittált)

$$\dot{Q}_{em} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_{test}^4 - T_{körny}^4) \quad (10)$$

A műholdat érő sugárzást két részre lehet választani az érkezési hely szerint: külső sugárzás (pl. Naptól érkező) valamint a belső sugárzás, amit a szerkezeti anyagok sugárzásából származik.

5.3. Termikus környezet

A műholdat érő hőforrásokat a mutatja az 5.3.1. ábra.



5.3.1. ábra

- Direkt napsugárzás
- Albedo
- Föld infrasugárzása
- Műhold által kibocsátott sugárzás

A Naptevékenység úridőjárást eredményez, különböző időpillanatokban más és más hőmennyiség éri a szerkezetet. A műhold forog a pályán, így mindig más-más szögben éri a sugárzás. Ez energiaegyensúly a vizsgálat kiindulási alapja. [14]

$$\dot{Q}_{be} = \dot{Q}_{ki} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{külső} + \dot{Q}_{belső} = \dot{Q}_{rad} \quad (12)$$

5.3.1. KÜLSŐ(EXTERNÁLIS) HŐÁRAMOK:

Direkt napsugárzásból eredő hőáram

$$\dot{Q}_{sol} = \alpha \cdot A_p \cdot G_s \cdot \cos(\gamma) \quad (13)$$

A másik jelentős hőáram az albedó miatt lép fel.

$$\dot{Q}_{alb} = A_p \cdot v \cdot \alpha_s \cdot G_s \cdot \varphi \quad (14)$$

A Föld által kibocsátott infrasugárzás miatt fellépő hőáram:

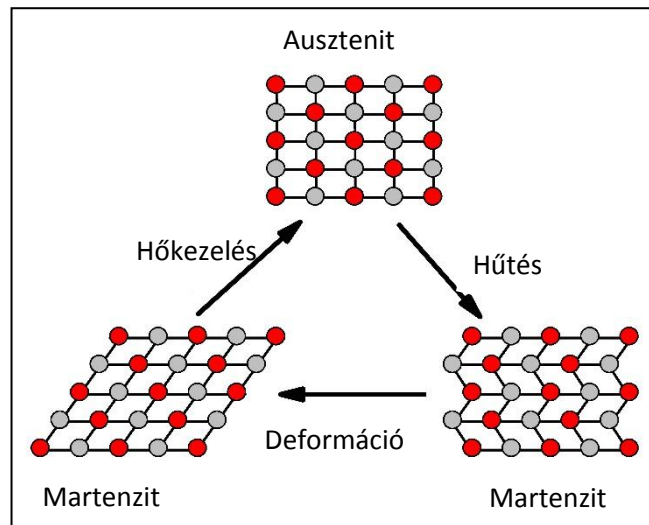
$$\dot{Q}_{planet} = A_p \cdot \alpha_{IR} \cdot G_{IR} \cdot \varphi \quad (15)$$

A belső sugárzást hőáramhálózatos modell segítségével meg lehet becsülni.

5.4. Antenna hőtani vizsgálata

Alaklélező megoldást választottunk az antenna kinyitásához, működésbe lépéséhez.

Az előzőleg kívánt alakúra hajlított, majd programozott (500°C fölé hevített) NiTinol ötvözet az űrben 60°C fölé melegedve alaklélező anyagként viselkedik és a korábban betáplált formát visszanyeri. Fontos ebből a szempontból is az antenna mérete, mind a hossza és az átmérője, hogy az űrben mekkora teljesítménnyel szükséges melegíteni, hogy kinyíljon.



5.4.1. ábra A NiTinol kristályszerkezeti működése [17]

A hőtani jelenséget az alábbi egyenlet írja le:

$$Q = \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_0^4) = \sigma \cdot \frac{d_{antenna}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l \cdot (373,15^4 - T_0^4) \quad (16)$$

$T_0 = 273 K$ -nel számolva. Azért feltételezhetünk 273 K-t kezdő hőmérsékletnek, mert a napelemek melegítik a szerkezetet már az űrben. Amennyiben az akkumulátor hőmérsékletét a szükséges 0°C felett tudjuk tartani, az antenna hőmérsékletét is feltételezhetjük vele legalább megegyezőnek. A kocka forgása miatt nyilvánvalóan különböző oldalak

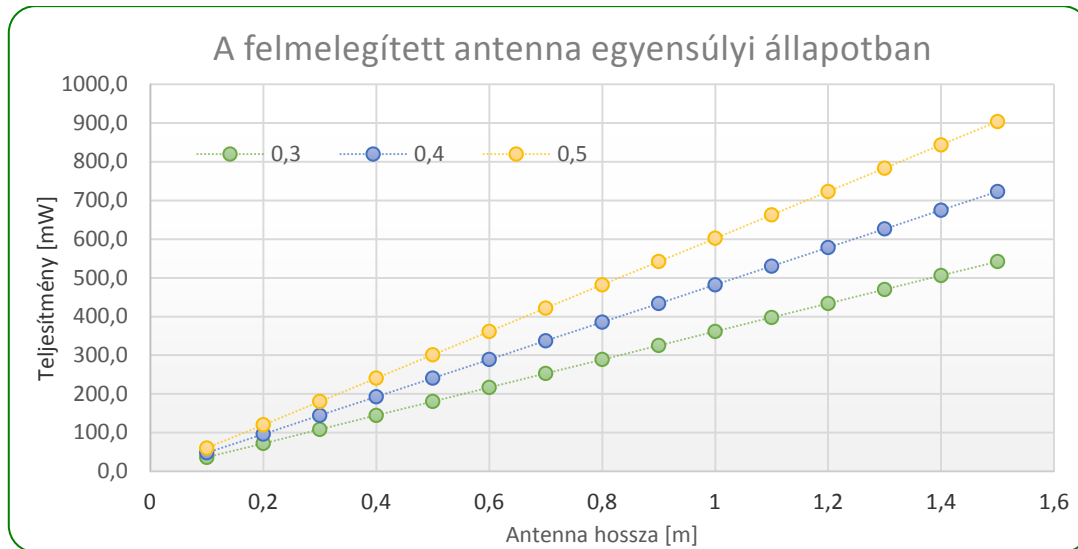
melegszenek. Többféle átmérőt és antennahosszt vizsgáltunk, az eredményeket az 5.4.1. táblázat tartalmazza: A hosszt elsősorban a vizsgálni kívánt jelspektrum szabja meg, míg az átmérő a jelminőséget, aminél enyhén rosszabb a kisebb átmérő.

	teljesítmény [mW]		
átmérő [mm]	0,3	0,4	0,5
hossz [m]			
0,1	36,1	48,2	60,2
0,2	72,3	96,4	120,5
0,3	108,4	144,6	180,7
0,4	144,6	192,8	241,0
0,5	180,7	241,0	301,2
0,6	216,9	289,2	361,5
0,7	253,0	337,4	421,7
0,8	289,2	385,6	482,0
0,9	325,3	433,8	542,2
1	361,5	482,0	602,5
1,1	397,6	530,2	662,7
1,2	433,8	578,4	723,0
1,3	469,9	626,6	783,2
1,4	506,1	674,8	843,5
1,5	542,2	723,0	903,7

5.4.1. táblázat

Különböző átmérőjű és hosszúságú NiTiinol huzalok teljesítményigénye az alaklékezéshez

Az eredményeket tekintve a melegítéshez az űrbéli lehetőségeinkhez képest sok teljesítmény szükséges. Ez egy komoly megoldandó feladat, hogy jusson elegendő teljesítmény rá, az a működésbe lépés egyik kritikus feltétele. Az 5.4.2. ábraeredményeiből láthatóan fontos, hogy minél kisebb antennát kelljen beépíteni. Szerkezetoptimalizálást nézve annyival nem befolyásolja az antenna átmérője a jelminőséget, hogy ezt komolyan mérvadónak kelljen tekinteni, ráadásul nagyban növelné a teljesítményigényt.



5.4.2. ábra Antenna teljesítménye a hossz függvényében

5.5 Hőáram hálózatos modellezés

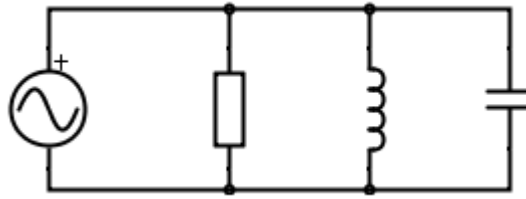
5.5.1. HŐÁRAM HÁLÓZAT ELVE

A numerikus számítások nagy időigényessége és a modellezés bonyolultsága miatt szükség volt egy ellenőrző egyszerűbb, gyorsan követhető és számolható közelítést találni a készülék hőtechnikai viselkedésére. A hőáram hálózat módszerrel mindezt meg lehet valósítani, a szükséges bonyolultságig lehet bővíteni a modellt.

A módszer azon az elven alapul, hogy a mechanikában, az elektrotechnikában és a hőtanban az egyenletek jellegre megegyeznek.

Elektrotechnikában RLC-körnek nevezzük a rendszert, amit ellenállásból, induktivitásból és kondenzátorból állítunk össze. Az ellenálláson átfolyó áram erőssége egyenesen arányos a feszültséggel, az induktivitáson önindukciós feszültség lép fel, mely egyensúlyt tart a tápfeszültséggel, míg a kondenzátorban a tárolt töltések mennyisége arányos a fegyverzetek közötti feszültséggel. Párhuzamos RLC-kör esetén a feszültség mindhárom elemen azonos, az egyes áramerősségeket pedig a csomópontok törvénye alapján számoljuk:

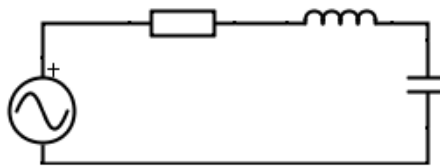
$$i(t) = \frac{u(t)}{R} + \frac{1}{L} \int u(t) dt + C \frac{du(t)}{dt} \quad (17)$$



5.5.1. ábra

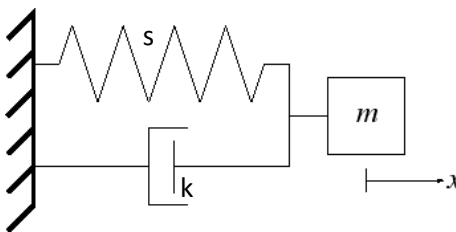
Soros RLC-kör esetén pedig az áramköri elemekre jutó feszültség minden pillanatban egyensúlyt tart a tápfeszültséggel:

$$u(t) = i(t) \cdot R + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (18)$$



5.5.2. ábra

Mechanikában tömeg-rugó-csillapítással írjuk le az egy szabadsági fokú lengőrendszert:



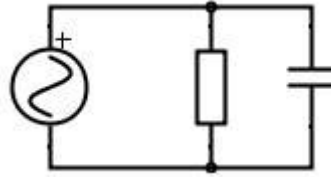
5.5.3. ábra

A leíró differenciálegyenletet Newton II. törvénye alapján lehet felírni, mely kimondja, hogy a tömeg és az elmozdulás második deriváltja egyenlő a fellépő erők összegével, amennyiben a tömeg állandó. Ha $f(t)$ gerjesztés is fellép, az egyenlet:

$$mx(t)'' + k \cdot x(t)' + s \cdot x(t) = f(t) \quad (19)$$

A rugóerő a rugómerevséggel egyenes arányban hat, ez megfeleltethető a kapacitás reciprokának, a tömeg az induktitásnak, a viszkózus csillapítás az ohmikus ellenállásnak.

Hőtanban a klasszikus modellezés szerint a tömeg, mint a hőmérséklet második deriváltjának együtthatója nem szerepel, így az elektromos szempontból induktitásnak megfelelő áramköri elem kimarad a rendszerből. A termikus jelenségeket is tudjuk koncentrált paraméterekkel modellezni, ezek a hőáram hálózatok. Kellően kis anyagrészt, vagy egységet választva az anyagjellemzőket: hővezetést és a hőkapacitást tekinthetjük állandónak. A feszültségnek a hőmérséklet-különbség felel meg, ez generálja a fellépő hőáramot.



5.5.4. ábra

A rendszert leíró differenciálegyenlet pedig:

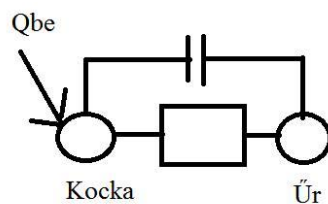
$$\dot{Q}_{be} = C_h \frac{dT}{dt} + \dot{Q}_{ki} \quad (20)$$

5.6 Hőáram hálózat alkalmazása a PocketQube műholdra

Számításaink során a hőtani jelenségeket bonyolultságuk miatt a lehető legjobban kell egyszerűsíteni, de úgy, hogy ez még mindig jó becslés legyen, és ellenőrizni lehessen vele a numerikus modellt. Diszkrét részekre osztáskor a szerkezeti-, és anyagjellemzőket, valamint a hőforrásokat vesszük figyelembe. A kockát végtelenül jó hővezetőnek tekintettük, a következő pont az űr így olyan, mintha egy végtelen nagyságú tömegpont lenne. Így a távozó hőt a hőellenállás modellezi, ezzel párhuzamosan van egy kondenzátor, ami a hőkapacitást modellezi.

Az első modellben egy tömör kockát vizsgáltunk meg, hogyan alakul a belső hőmérséklete. Közelítésként átlagoltunk, a kocka minden oldalára azonos átlagos beérkező hőáramot tekintettünk, és néztük, mely hőmérsékletnél és mennyi idő alatt áll be az egyensúly. Az egyenlet, mely leírja ezt a rendszert:

$$\dot{Q}_{be} - \dot{Q}_{ki} = C_h \frac{dT}{dt} \quad (21)$$



5.6.1. ábra

Rendezve, és átalakítva, majd a $\dot{Q}_{kl} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$ összefüggést behelyettesítve az alábbi inhomogén közönséges nemlineáris elsőrendű differenciálegyenlet adódik:

$$\dot{Q}_{be} = C_h \frac{dT}{dt} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (22)$$

a könnyebb számolás érdekében a konstans szorzókat összevonva, és rendezve az egyenletet egy könnyebben kezelhető formát kaptunk:

$$a = b \cdot T' + c \cdot T^4 \quad (23)$$

az egyenletben szereplő konstansok értékei:

$$a = \text{beérkező sugárzás} \cdot \text{besugárzott felület} = 1367 \frac{W}{m^2} \cdot 1,5 \cdot (0,05m)^2$$

miszerint feltételeztük, hogy egyszerre a kocka két oldalát süti a nap átlagosan, de az 1,5-ös együtthatóval vettük figyelembe, hogy a kockának kicsit több mint két teljes oldalát éri a sugárzás, így kicsit több, mint $\sqrt{2}$ -szeresét vettük az oldalaknak.

$$b = \text{hőkapacitás} \cdot \text{tömeg} = 1500 \frac{kJ}{kgK} \cdot 0,2kg = 300 \frac{kJ}{kg}$$

mert a tömeg felső határa 0,2 kg, míg a test hőkapacitása átlagosan $1500 \frac{kJ}{kgK}$ értékűnek feltételezhető, figyelembe véve az alkalmazott anyagokat (FR4-es nyomtatott áramkört lap, acél és alumínium alkatrészek).

$$c = \text{külső felület} \cdot \text{emissziós tényező} \cdot \text{Stefan – Boltzmann állandó}$$

A (21) differenciálegyenlet analitikusan nem megoldható, a numerikus közelítés keresése során is számos probléma merült fel a negyedik hatványon szereplő hőmérséklet miatt. A beépített MATLAB és Mathematica differenciálegyenlet-megoldó függvények nem működtek, sem a másodrendű (pl. ode23), sem a negyedrendű sémát alkalmazók (pl. ode45). Saját sémát kellett így írni. Egy elsőrendű Euler, és egy másodrendű is, Adams-Bashforth módszerét. Adott kezdeti feltétel mellett lehet numerikus megoldást találni a differenciálegyenletre, ezt az értéket a fentebbi indoklás miatt itt is 273K-nek vettük fel. Másik lényeges beállítás a numerikus megoldásnál az időlépés megválasztása. Azt tapasztaltuk, hogy a $\Delta t = 100s$ megfelelő, mivel kellően kicsi az eredmények konvergálásához, de nem igényel feleslegesen sok számítást. Az explicit Euler módszerrel a megoldás képlete:

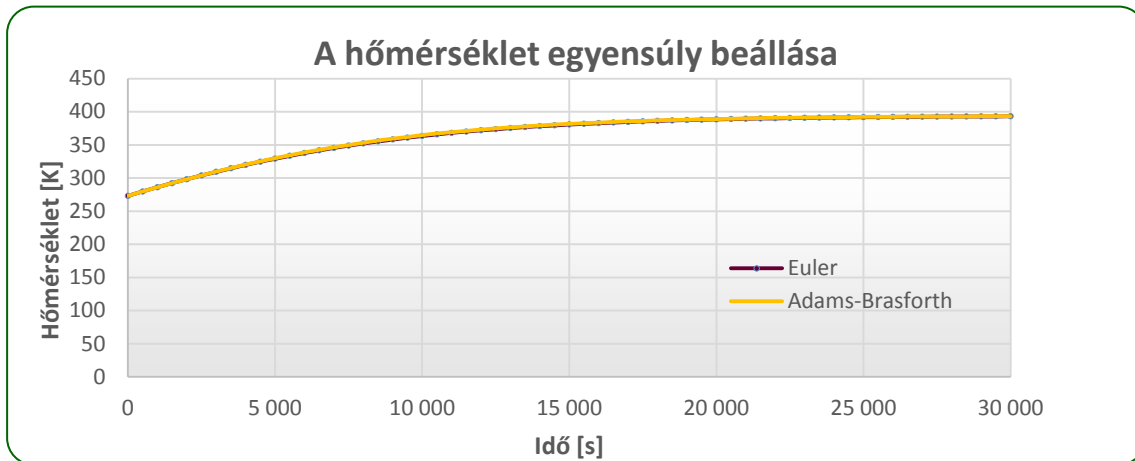
$$T_i = T_{i-1} + \sqrt[4]{\frac{a-c \cdot T_{i-1}^4}{b}} \cdot \Delta t \quad (24)$$

Mivel az Adams-Basforth másodrendű, így annál az első három időlépésben a hőmérséklet ismerete szükséges. Ezen időlépések eredményének az Euler-módszer eredményét tekintjük.

A képlet az alábbi módon alakul:

$$T_i = T_{i-1} + \frac{\Delta t}{2} \cdot (2a + c \cdot T_{i-3}^4 - 3 \cdot T_{i-2}^4) \quad (25)$$

A kapott eredményeket az 5.6.2. ábra mutatja be:



5.6.2. ábra: A hőmérséklet egyensúly beállása

Az 5.6.2. ábra alapján látható, hogy az explicit Euler és az Adams-Brasforth séma közel azonos eredményt ad. Ha nem vesszük figyelembe a naps és a sötét periódust az akkumulátor körülbelül 390K hőmérsékletre melegszik fel, ott áll be az egyensúlyi hőmérséklet. Ez az érték rendkívül magas és káros is lenne, semmiképp nem megengedhető. Viszont, legalább így kiderült, hogy nem kell az akkumulátor megfagyásától tartanunk, inkább a túlzott hő ellen kell védekezni a legegyszerűbb modellünk alapján. Azonban figyelembe kell venni még azt is, hogy nem mindig van napon a műhold, és hogy a napelemek a beérkező sugárzást 27%-os hatásfokkal [18] hasznosítják, vagyis az energia ezen része nem az akkumulátort melegíti.

Az ISS pályáján a keringési idő közelítőleg 5400 s, ebből 3800 s-ot tölt napon, így 1600 s-ig tartózkodik napárnyékban a műhold. [19] Ezek váltakozásai a hőforrás módosításával lettek figyelembe véve. $k \cdot 3800$ s-tól 1600 s-on keresztül ($k \in \mathbb{N}$, periódusok száma) a differenciálegyenlet inhomogén forrástagja eltűnik. A kezdeti állapothoz képest itt is megjelenik egy beállási idő, amíg az egymást követő periódusok nagyrészt azonosak.

A keringés periodikusságát figyelembe véve a maximális hőmérséklet csökkent, de nem jelentős és nem a szükséges mértékben. A maximális hőmérséklet így is akár 355 K –t is eléri.

Ha a napelem hatásfoka miatt levonjuk a beérkező hő 27%-át, akkor is túlmelegszik.

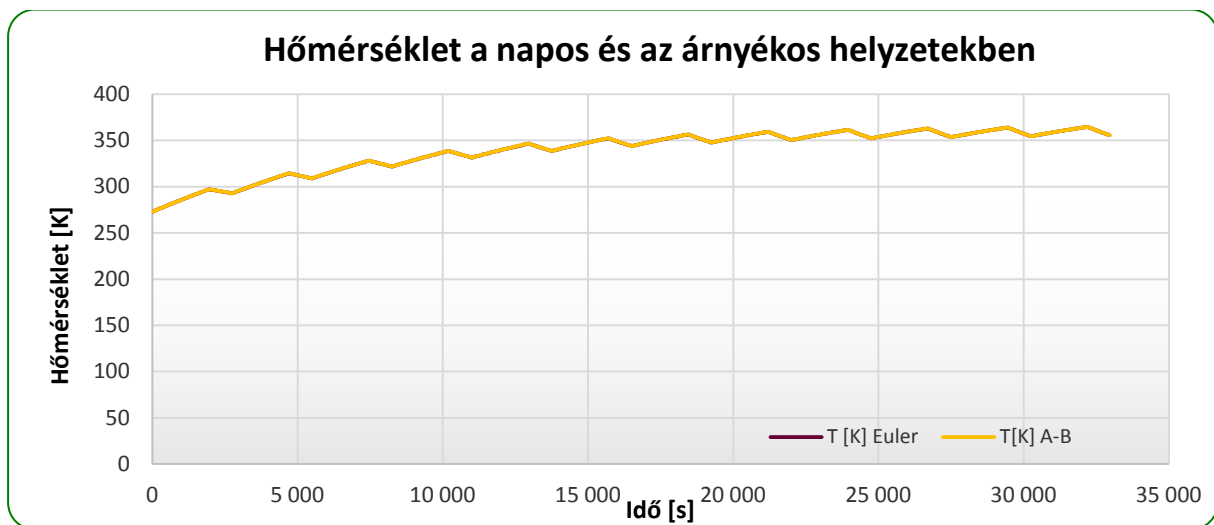
Felmerült, hogy az időlépéssel is lehet probléma, azonban ezeket a paramétereket állítva nem történt számottevő változás egyik séma esetén sem. Egy további kérdés, hogy a kocka felületei milyen arányban tükrözik és nyelik el a beérkező sugarakat. Amennyiben ismerjük a pontos karakterisztikáját az egyes felületeknek, a modell pontosítható. Jelenlegi becsléseink a felső határt jelentik.

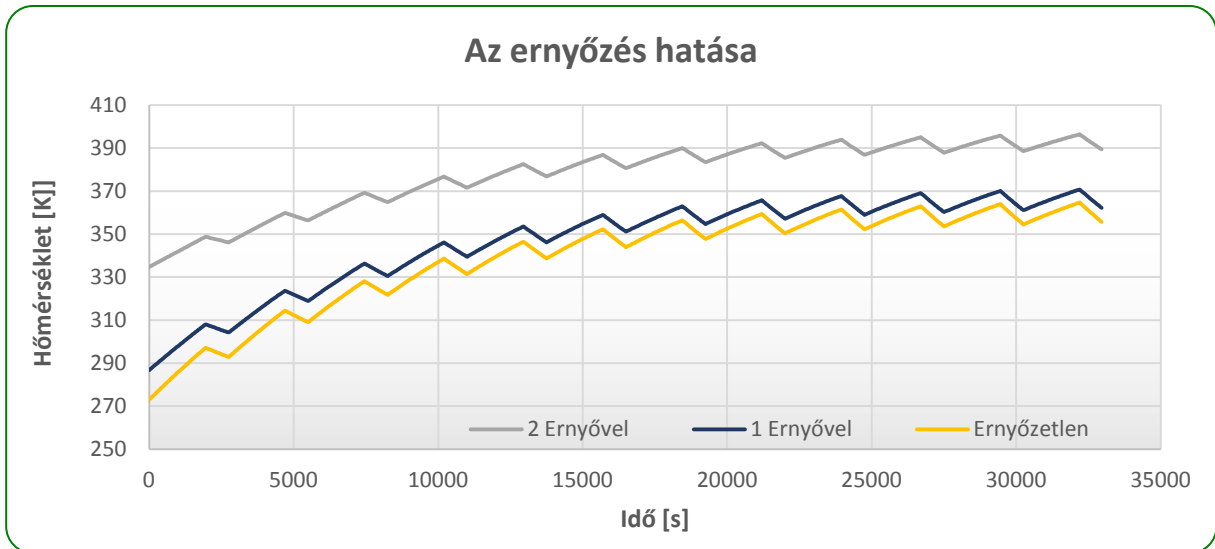
Megoldási javaslatként szóba jött az ernyőzés. Az ernyőket a besugárzási tényezővel jellemezzük, több (n db) ernyő esetén kölcsönös besugárzási tényezőt számolunk. Ha a besugárzási tényezők azonosak az alábbi képlet alapján számítandó a kölcsönös besugárzási tényező:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon}{(2-\varepsilon) \cdot (n+1)} \quad (26)$$

Az ernyőknél $\varepsilon = 0,04$ értéket vettünk fel. [20]

5.6.3. ábra Hőmérséklet a napos és az árnyékos helyzetekben

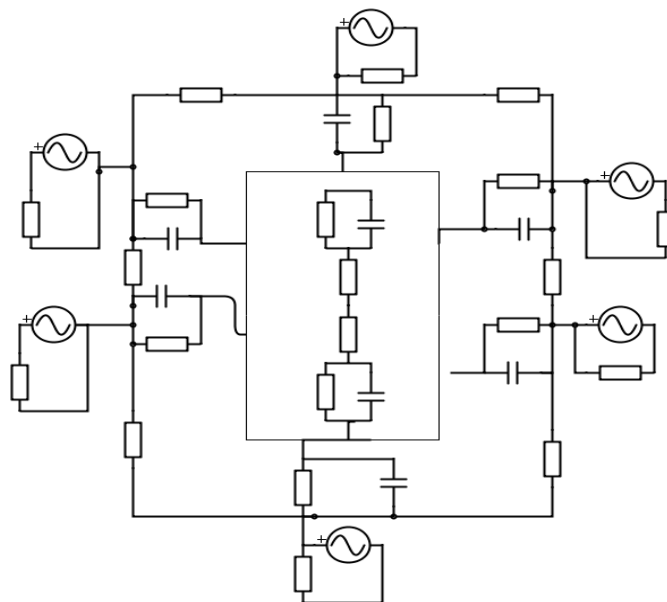




5.6.4. ábra Az ernyőzés hatása

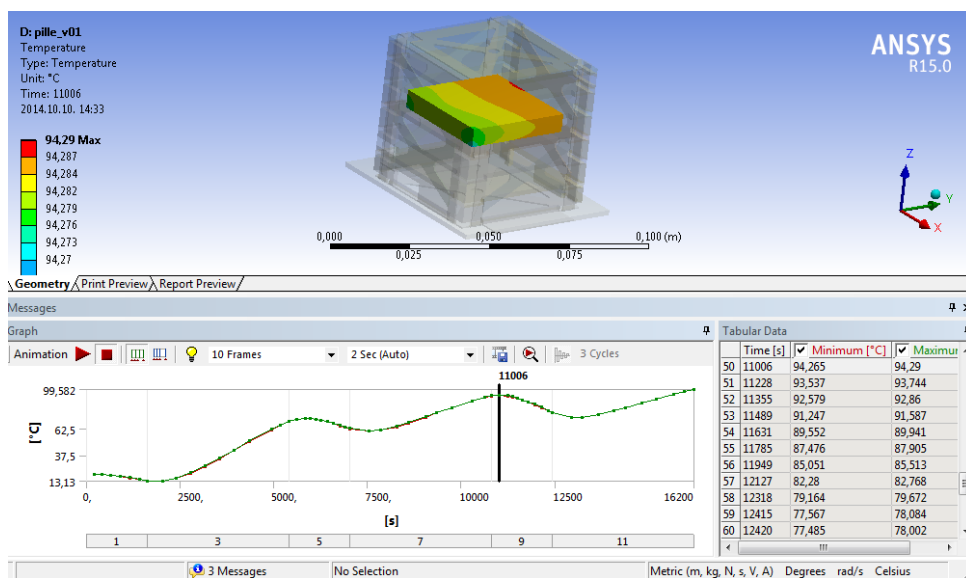
A számítás alapján az ernyőzés így nem megoldás, hiszen még növekszik is hatására a hőmérséklet.

A hőáram hálózatot folyamatosan fejlesztjük, dolgozunk egy bonyolultabb modellen, ahol a műholdat végtelen jó hővezetésű síklapok által határolt először üreges kockaként modellezzük, majd a síklapok egyenleteit felírva bővítjük a NYÁK-lapok modelljeivel, melyek más paraméterekkel rendelkező síklapok lesznek. Ennek az hőáram hálózatos áramköri rajzát az 5.6.5. ábra mutatja



5.6.5. ábra

A hőáram hálózatos módszert, mint arról a bevezetőben szoltunk a numerikus számítások ellenőrzésére, és gyors becslésre használjuk. Egy csapat (Török Péter és Jáger Dávid) folyamatosan numerikus szimulációkat futtat, ott is optimalizálják a paramétereket. Ők végelelemes modellezés segítségével oldják meg ugyanezt a problémát, sokkal részletesebb modellekre. A cél a műhold hőtanilag lényeges viselkedésének meghatározása és egy lehetőség szerint maximálisan kiegyeszerített hőáram hálózatos modell létrehozása, amit integrálunk a már meglévő pályaszámító és napelemes energiatermelést tartalmazó MATLAB Simulink szoftverkörnyezetben írt programhoz.



5.6.6.ábra

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Feladatunk egy 1P-s méretű PocketQube műhold vázszerkezetének megtervezése volt. A tervezés már meglévő konstrukciók vázszerkezetének elemzésével indult. Ennek során PocketQube-ok és CubeSat-ok felépítését, anyaghasználatát és kialakításukhoz használt technológiákat tanulmányoztuk át. Ezután következett egy új szerkezet kialakítása, mely során figyelembe vettük a kis műholdakra vonatkozó kritériumokat, illetve a műhold feladatának (elektroszmozg mérés) ellátásra vonatkozó saját követelményeinket. Maga a tervezés a kézi vázlatokból, ötletelésből kiindulva az Autodesk Inventor segítségével valósult meg. Ebben az alkatrészekről, illetve a műhold összeállításáról készítettünk 3D-s modelleket.

Emellett a kezdetlegestől a jelenlegi konstrukcióig minden megoldást hőtanilag is megvizsgáltunk, ehhez hőáram hálózatos módszert alkalmaztunk, a hőegyensúly vizsgálatára egyszerűsített modell esetén. Hőtani viselkedés szempontjából a kritikus probléma az akkumulátor megfelelő hőmérsékleten tartása. A számítások során egyszerűsítésekkel vettük figyelembe a hőterhelést. Hőáramhálózatot alkalmazva anyagi pontként modelleztük a műholdat. A kiinduló feltételezés szerint a túlzott lehűléstől kellett volna megvédeni a szerkezetet, azonban úgy találtuk, hogy a fő probléma a túlmelegedés lesz.

A műhold konstrukcióját részletesebben modellezve, ANSYS szimuláció is kimutatta hasonló beállítások mellett, hogy az akkumulátort nem a megfagyástól, hanem a túlzott hőterheléstől kell megvédeni. A számításokból következik, hogy a konstrukció szempontjából egy újabb megoldandó feladat vár ránk. Nem mindegy, hol tudjuk elhelyezni az akkumulátort és nagy gondot kell fordítani a hővédelemre. Hővédő fólia is alkalmazható lehet, ha megfelelően el tudjuk helyezni.

Jelenleg a tervezés első fázisának végéhez közeledünk, amit vázszerkezetünk prototípusgyártása követ, majd annak minél szélesebb körben való tesztelése. Természetesen modellünk nem végleges, módosítani kell, továbbfejleszteni azt úgy, hogy a felmerülő igényeknek eleget tegyen, megfelelő védelmet biztosítson az akkumulátor számára. Továbbá ezt egy részletesebb hőáram hálózatos modell vizsgálatára, valamint a paraméterek pontosabb beállítása követi majd.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] CubeSat Design Specification Rev. 13, California Polytechnic State University
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/PocketQube> (2014. október 25.)
- [3] <http://pocketqub.org/standard/> (2014. október. 25.)
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat> (2014. október 25.)
- [5] <http://cubesat.bme.hu/projektek/masat-1/> (2014. október 25.)
- [6] Thermal Design of the Oufti-1 nanosatellite, Lionel Jacques, 2008-2009, Liège, 12. illetve 68. oldal
- [7] PocketQube 1.0, NASA Ames Research Center, Mountain View, CA, 2014. április 17.
- [8] Horváth Gyula előadása: Masat-1, az első magyar műhold. 2012. április 27, Pannonhalmi Bencés Gimnázium
- [9] <http://www.pocketqubeshop.com/pages/how-much-does-a-pocketqube-cost> (2014. október 25.)
- [10] <http://www.50dollarsat.info/> (2014. október 25.)
- [11] http://space.skyrocket.de/doc_sdat/qubescout-s1.htm (2014. október 25.)
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/FR-4> (2014. október 25.)
- [13] <http://www.pocketqubeshop.com/products/1p-solid-wall-pocketqube-structure> (2014. október 25.)
- [14] Maria M. Garzon: DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE THERMAL DESIGN FOR THE OSIRIS-3U CUBESAT 2012.
<https://etda.libraries.psu.edu/paper/15404/12463>
- [15] Imre László: Hőátvitel összetett szerkezetekben, Akadémiai kiadó, Budapest 1983
- [16] Gróf Gyula: Hőközlés Ideiglenes jegyzet
ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/muszaki_hotan/Hokozles_jegyzet.pdf
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_titanium#mediaviewer/File:NiTi_structure_transformation.jpg
- [18] http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/PV_NM_TASC_ITJ.pdf
- [19] <http://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=25544> honlapon megadott adatok alapján a <http://www.agi.com/> szoftver segítségével
- [20] http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html (2014. október 25.)