

## SMOG-P, a világ legkisebb műholdjának sikertörténete

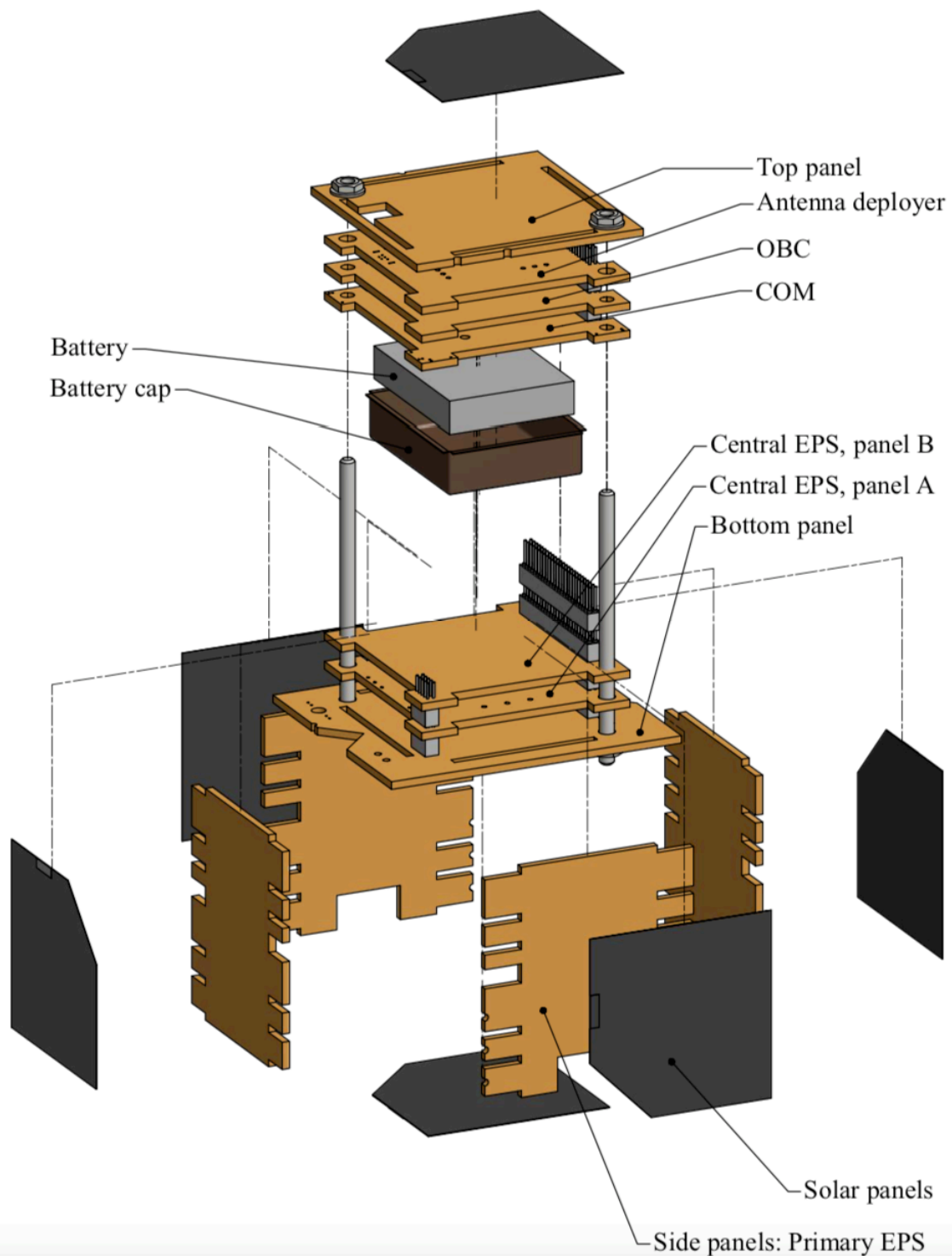
2014-ben egy, a BME fiatal mérnökeiből és tapasztalt oktatóiból álló maroknyi csapat elhatározta, hogy megépíti a világ legkisebb tudományos kutató műholdját 5x5x5 centiméteres befogadó méret és 250 gramm teljes tömeg mellett. SMOG neve küldetését szimbolizálja, melynek célja a világon elsőként kimutatni az emberi tevékenységből eredő, az űrbe kijutó elektromágneses szennyezettséget. A parányi spektrum analizátor, mint elsődleges mérőműszer mellett a műholdon helyet kapott egy kísérleti sugázmérő berendezés, mint második küldetés (melyet a következő cikkben ismertetünk) és egyéb technológiai kísérletek.

Az elsődleges mérőműszereken kívül a műhold tartalmaz 20 hőmérő szenzort a struktúra termikus vizsgálatához, valamint 2 magnetométert, 2 giroszkópot, és 6 fényérzékelő szenzort. Számos feszültség és áramerősség érték szintén monitorozható, amelyből következtetéseket lehet levonni a műhold működésével kapcsolatosan.

Fiatal mérnökként a hardver megtervezése tűnt a legnagyobb kihívásnak. Ebben a kis méretben a felhasználható napelemek mindössze 0.3 W elektromos teljesítményt képesek előállítani. A Naptól nyert energia eltárolható a fedélzeti akkumulátorban, és felhasználható a kommunikációhoz, az adatok feldolgozásához, és a mérőműszerek működtetéséhez.

A lehető legnagyobb hatásfok elérése volt a cél az elektronikus rendszerek tervezése során, hogy a műhold energia mérlege pozitív lehessen, azaz a napelemek által megtermelt energia elegendő legyen a műhold működtetéséhez. Az akkumulátort a pálya napfényvel megvilágított szakaszán tudja tölteni a műhold, míg a Föld árnyékában az eltárolt energia felhasználásra kerül. Csapatunk a tervezés során úgy döntött, hogy a nagy megbízhatóságú rendszereknél (űreszközök, repülőgépek, erőművek, ipari alkalmazások) gyakran alkalmazott redundanciával építjük meg a műholdat, hogy a küldetés sikerének esélye minél nagyobb legyen. Ez azt jelentette, hogy minden alrendszerből legalább 2 példányt kellett elhelyezni ebben a kis méretben, egy fő és egy vele teljesen egyenértékű tartalék egységet. A fő egység meghibásodása esetén a tartalék egység automatikusan át tudja venni annak feladatait, így a küldetés tovább folytatható, nem zárul kudarccal.

A tömeg és méretkorlát miatt csupán a nyomtatott áramköri lapok alkotják a műhold vázát, amelyekre megterveztük az elektronikus alrendszereket is. 2256 elektronikus, és néhány mechanikai alkatrészből épül fel a műhold hardvere.



1. Ábra: A SMOG műhold struktúra felépítése

A napelem cellák generálják az elektromos energiát, amelyek működtetik SMOG rendszereit. Az elsődleges energiaellátó rendszer részeként maximális munkapont követő (MPPT) áramkörök lettek elhelyezve a műhold külső paneljeinek belső oldalaira, amelyek átalakítják a napelemek által előállított teljesítményt és továbbítják a központi energiaellátó rendszerbe további felhasználásra.

A központi energiaellátó rendszer összegyűjti a napelemek által megtermelt energiát és eltárolja azt a fedélzeti lítium-ion akkumulátorban vagy nagy hatásfokú tápegység és védelmi

áramkörökön keresztül továbbítja a további rendszerek és mérőműszerek működtetéséhez. (Ennek a rendszernek megtervezése volt a szerző Mester Diplomamunkájának témája).

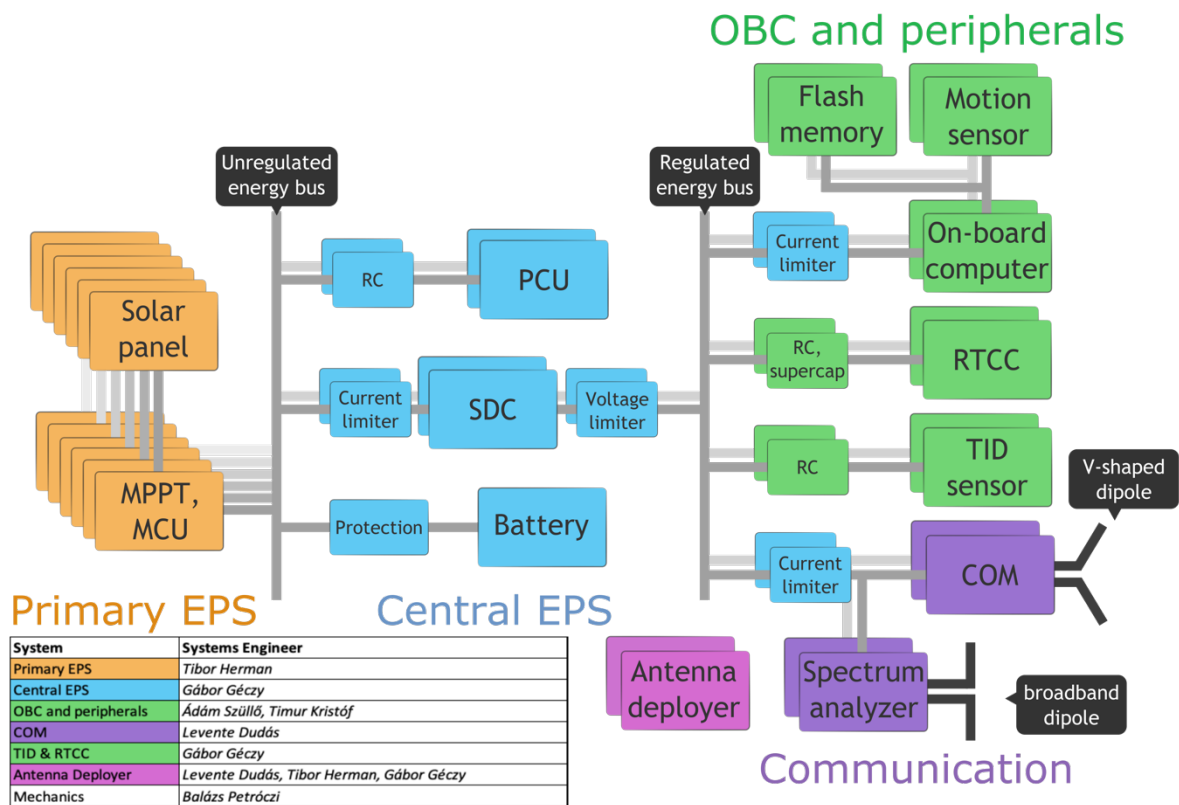
A Power Control Unit (PCU) vezérli az energiaellátást, gyűjti a fogyasztással és töltöttséggel kapcsolatos adatokat, és továbbítja azokat a fedélzeti számítógép, avagy On-Board Computer (OBC) számára.

Az OBC feladata az adatok összegyűjtése és az összes többi rendszer vezérlése.

A kommunikációs rendszer (COM) felelős a megbízható rádiókapcsolat biztosításáért a földi állomásokkal, hogy képesek legyünk letölteni a keletkező adatokat és vezérelni a műholdat. A COM tartalmazza az elsődleges mérőműszert, az elektromágneses szennyezettség mérésére használt spektrum analízist is.

A Total Ionizing Dosimeter (TID) egy új kísérleti mérőműszer, amelynek feladata a küldetés során az elektronikus alkatrészek által elnyelt ionizációs sugárdózis mérése.

Egy további alrendszert terveztünk az antenna nyitó elektronika számára, valamint a különböző panelek összekapcsolására.

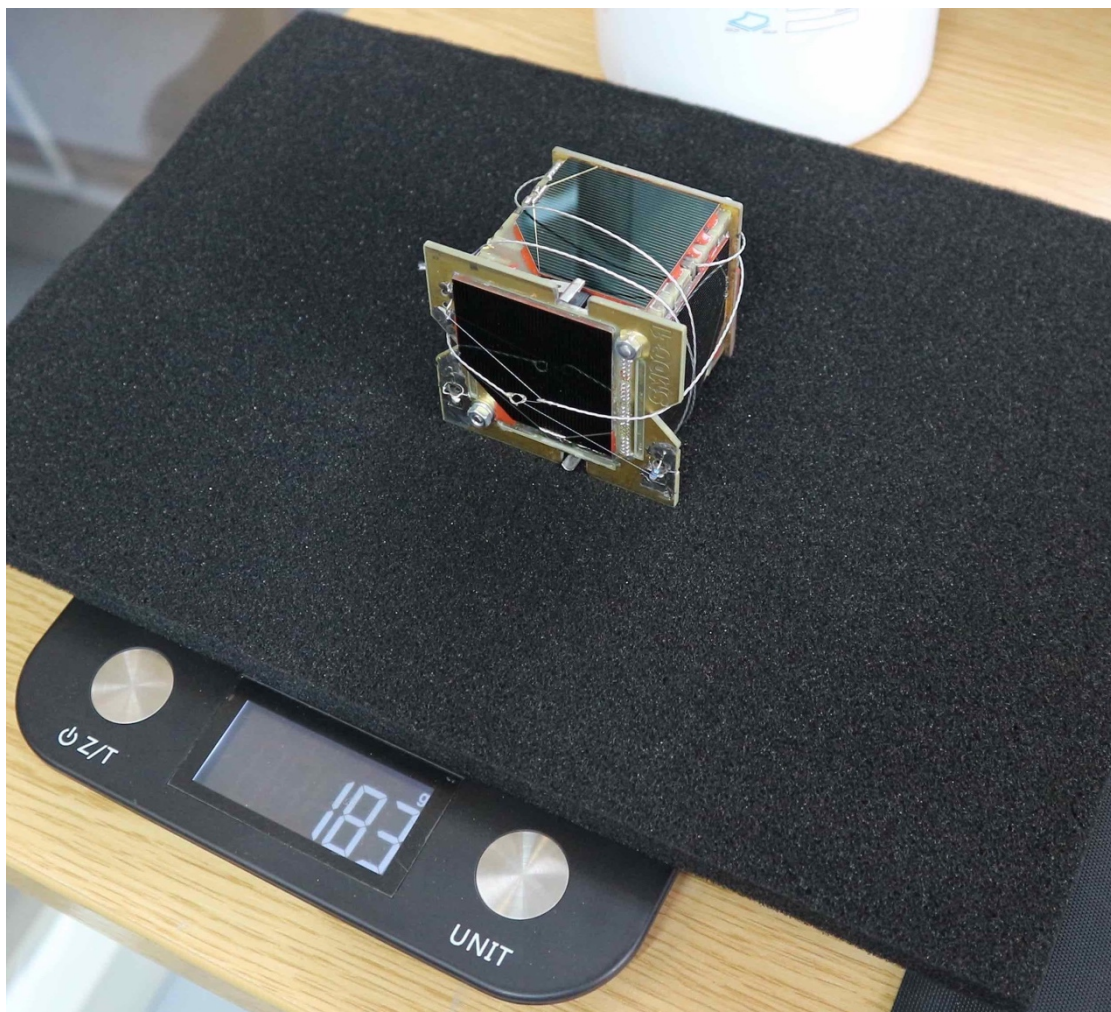


2. Ábra: A SMOG műhold rendszerterve

Csapatunk évekig dolgozott SMOG megépítésén, és felkészítettük, hogy bírja az űrben várható zord körülményeket. Extrém hőmérsékletekre készültünk, de mindössze szimulációkat lehetett készíteni a várható viszonyokról, mivel korábban nem volt hasonló méretű műhold, ezáltal nem voltak elérhető mérési adatok.

Hőkamrás mérésekkel teszteltük a konstrukciót -45 és +85 °C között. Termovákuum kamrás tesztekkel igazoltuk a műhold életképességét vákuumban szélsőséges hőmérsékleti viszonyok mellett, valamint vibrációs tesztekkel bizonyosodtunk meg arról, hogy ez az apró szerkezet

bírni fogja a rakéta felbocsátása során keletkező hatalmas mechanikai terheléseket. A fő mérőrendszerek működését speciális tesztekkel igazoltuk. A spektrum analízátort magaslégköri ballonos kísérletek, míg a dozimétert besugárzás tesztek eredményei igazolták. SMOG közel teljesen elkészült 2017-ben, azonban nehéz volt egy ilyen új típusú műholdat pályára állítani. A SMOG méretéhez igazodó PocketQube osztályú műholdakhoz nem volt elérhető hordozórakéta, sem pályára állító szerkezet, amelyek a MASAT-1 méretű CubeSat műholdakhoz már évek óta rendelkezésre állnak. Végül sikerült egy megfelelő lehetőséget találni. 2019 szeptemberében kiszállítottuk a struktúra első repülő példányát SMOG-P-t Skóciába, ahol rögzítettük az Alba Orbital nevű cég pályára állító szerkezetébe. Ez volt az utolsó alkalom, hogy láthattuk több évnyi munkánk eredményét, amely mindössze 183 grammot nyomott az integrációs eljárás során.



3. Ábra: SMOG-P tömeg mérése az integrációs eljárás során

Az integráció után a szerkezetet benne a műhoddal Új-Zélandra szállították a RocketLab indító bázisára, és rögzítették egy Elektron típusú rakéta orrkúpjában. SMOG-P-nek el kellett jutnia Magyarországról bolygónk egyik legmesszebbi pontjára, hogy végül 2019 december 6-án elindulhasson az űrbe a RocketLab tizedik "Running Out of Fingers" elnevezésű küldetése során. Az alábbi képen az indítás eseményét örökítette meg Új-Zélandon Brendan Gully Photography.

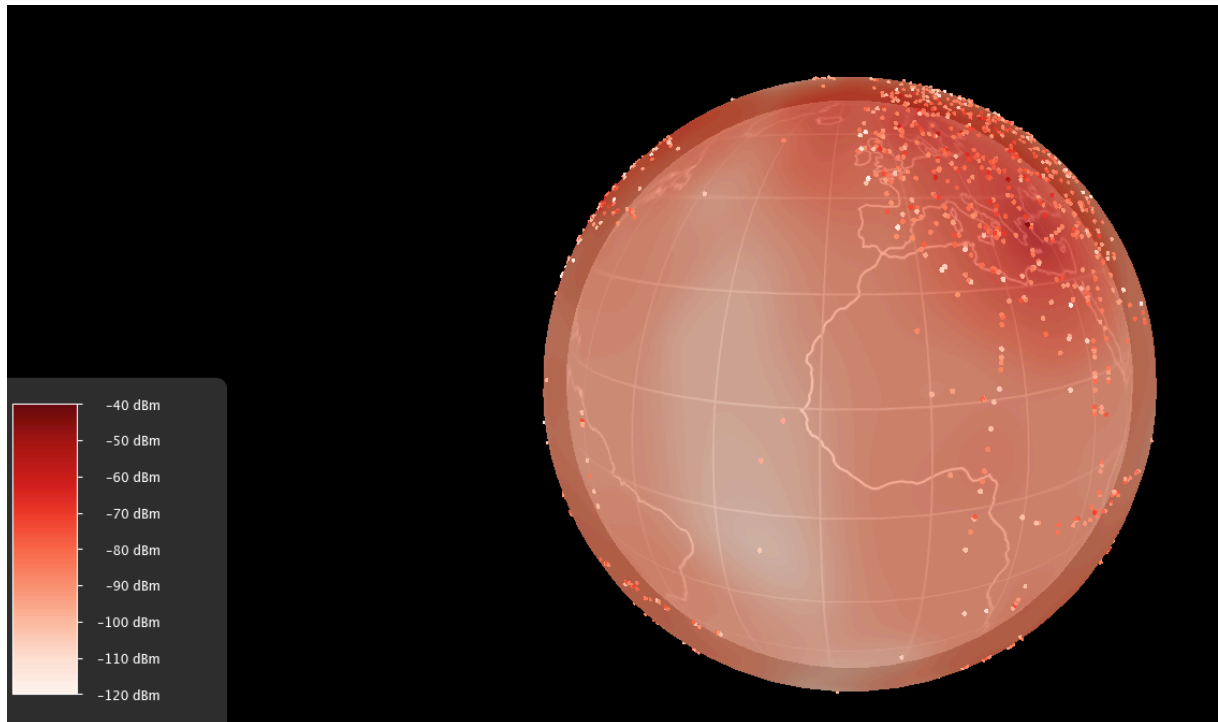


4. Ábra: The 10th Launch of RocketLab's Electron rocket, Mahia Peninsula, New Zealand - 6 December, 2019

Az indítás és pályára állítás a küldetés egyik legkritikusabb része. A több hónapnyi tárolás során az akkumulátornak nem szabad lemerülnie, viszont a műholdnak fel kell élednie és el kell indulnia a pályára állítást követően, majd sikeresen ki kell nyitnia az antennáit a kommunikáció biztosításához. Rengeteg műholdnak ez a kritikus szakasz nem sikerül, és ezért válik sikertelenné sok küldetés az űrben.

Néhány órával a felbocsátás után az első pálya becsléseket közzétették, és rádióamatőrök szerte a világban megerősítették, hogy SMOG-P feléledt, elkezdte küldetését, és rádiójelekkel kommunikál az űrből. Ezzel SMOG-P felállított egy új világrekordot, mivel eddig nem volt ilyen kis méretű működő műhold az emberiség történetében.

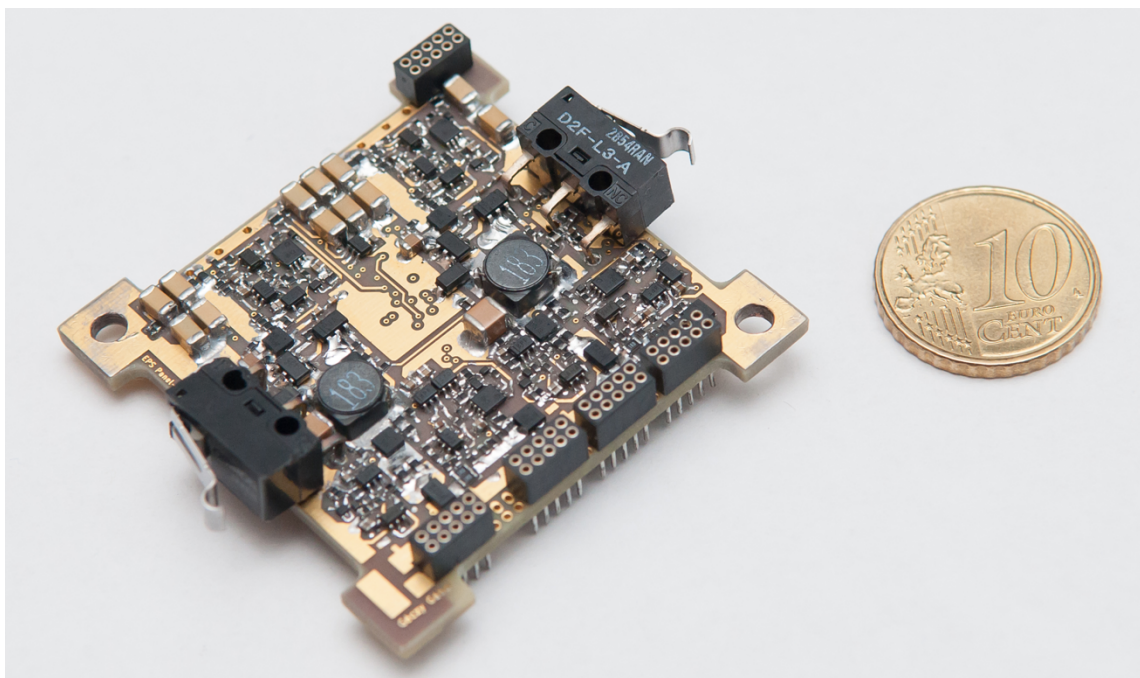
A csapat előkészített egy egyedi szoftvert, amellyel bárki képes a műhold által kibocsátott jelek dekódolására, és a vett csomagok továbbíthatók a szerverünkre további feldolgozás céljából. A küldetés kezdete óta több, mint 206 ezer (jelenleg 2020.08.06.-án) csomagot vettek világszerte, amelyek fontos információkat tartalmaznak a SMOG-P fedélzetéről. Ezen adatok felhasználásával készült el az első térkép az emberi tevékenységből adódó elektromágneses szennyezettségről.



5. Ábra: A SMOG-P adataiból készített térkép az elektromágneses szennyezetségről

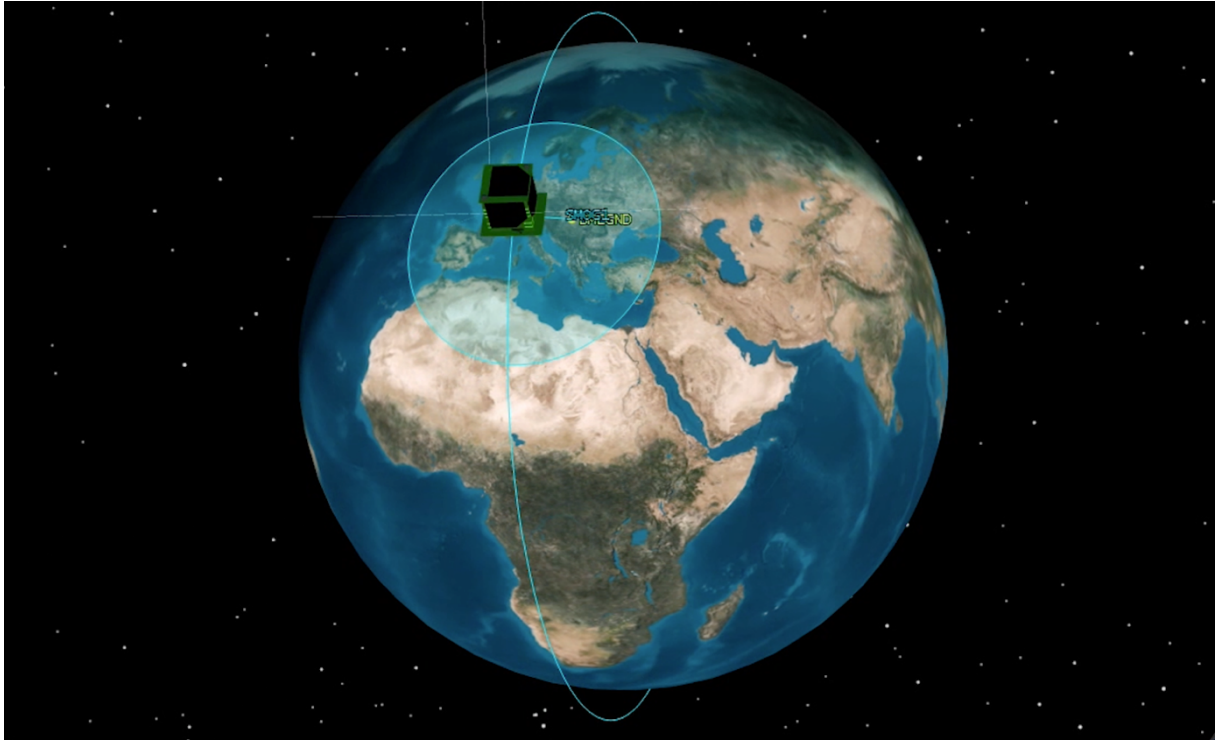
A leérkező adatok érdekes anomáliákat mutatnak. A küldetés kezdetétől fogva gyakran tapasztalható, hogy az energiaellátó rendszer védelmi elektronikáinak le kell kapcsolnia a védett rendszer túlárama miatt, és át kell kapcsolnia a tartalék egységre.

A legvalószínűbb magyarázat ezekre a véletlenszerű jelenségekre az, hogy ilyenkor nagy energiájú részecske becsapódás éri a védett áramkört (latch-up jelenség), amely ezáltal maradandóan károsodna az egyedi védelem hiányában. Szerencsére a műhold védelme tökéletesen levizsgázott az űrben, már számos alkalommal mentette meg a küldetést.



6. Ábra: A központi energiaellátó rendszer védelmi elektronikáit és tápegységeit tartalmazó panelje

A küldetés kezdetén minden az elvárások szerint alakult. Az indítás után az akkumulátor közel teljesen fel volt töltve, nem merült le a több hónapos tárolás és szállítás során a gondos tervezésnek köszönhetően. A napsütötte pályaszakaszokon az akkumulátor teljesen fel tudott tölteni, és a sötét szakaszok során is mindössze a teljes töltés 15%-át használta fel a műhold. SMOG-P pályájának közel 60%-át éri napfény, míg a pálya 40%-a a Föld árnyékában húzódik. A műhold közel 91 perc alatt tesz meg egy teljes kört a bolygó körül, a napfényes és sötét szakaszok periodikusan váltják egymást.

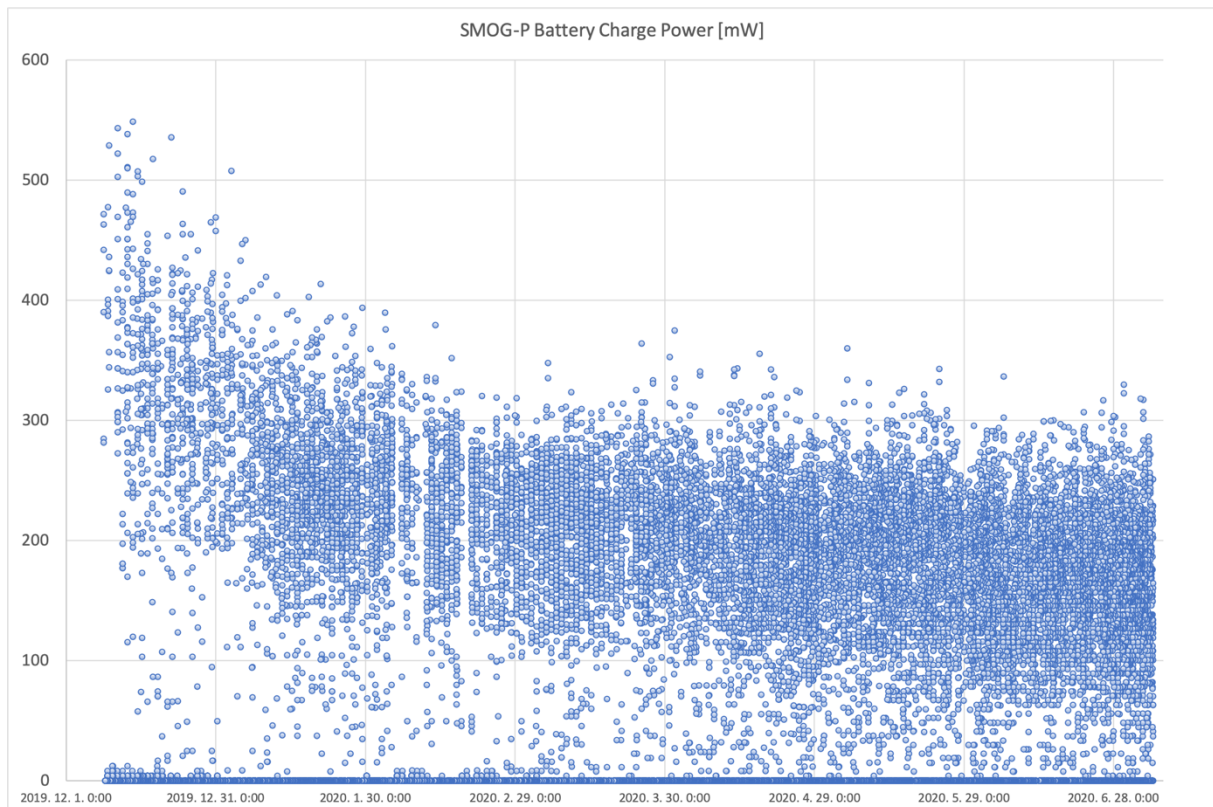


7. Ábra: SMOG-P pályájának szimulációja

Váratlan módon az energia mérleg megváltozását tapasztaltuk a küldetés során. Észlelhető volt az akkumulátor merülése, és közel 10 nap enyhén negatív energiamérleg mellett a műhold új energia egyensúlyba került. A SMOG folyamatosan méri az akkumulátor töltöttségét, és automatikusan energiatakarékos üzemmódba vált, ha a töltöttség lecsökken. Az energiával úgy tud spórolni, hogy a kommunikációs rendszer adásainak időtartamát és gyakoriságát kezdi el korlátozni, mivel a vevőállomásokkal szükséges kommunikáció fenntartásához használja fel az energia nagy részét. Esetenként több, mint 2200 kilométeres távolságot kell a rádiós linknek megbízhatóan áthidalnia.

Az anomália megjelenésekor nem tudtuk megállapítani mi okozhatja az energia mérleg ilyen mértékű drasztikus megváltozását. Mára azonban a több ezer vett adatcsomagnak köszönhetően a vizsgálatom képes volt kimutatni a probléma forrását.

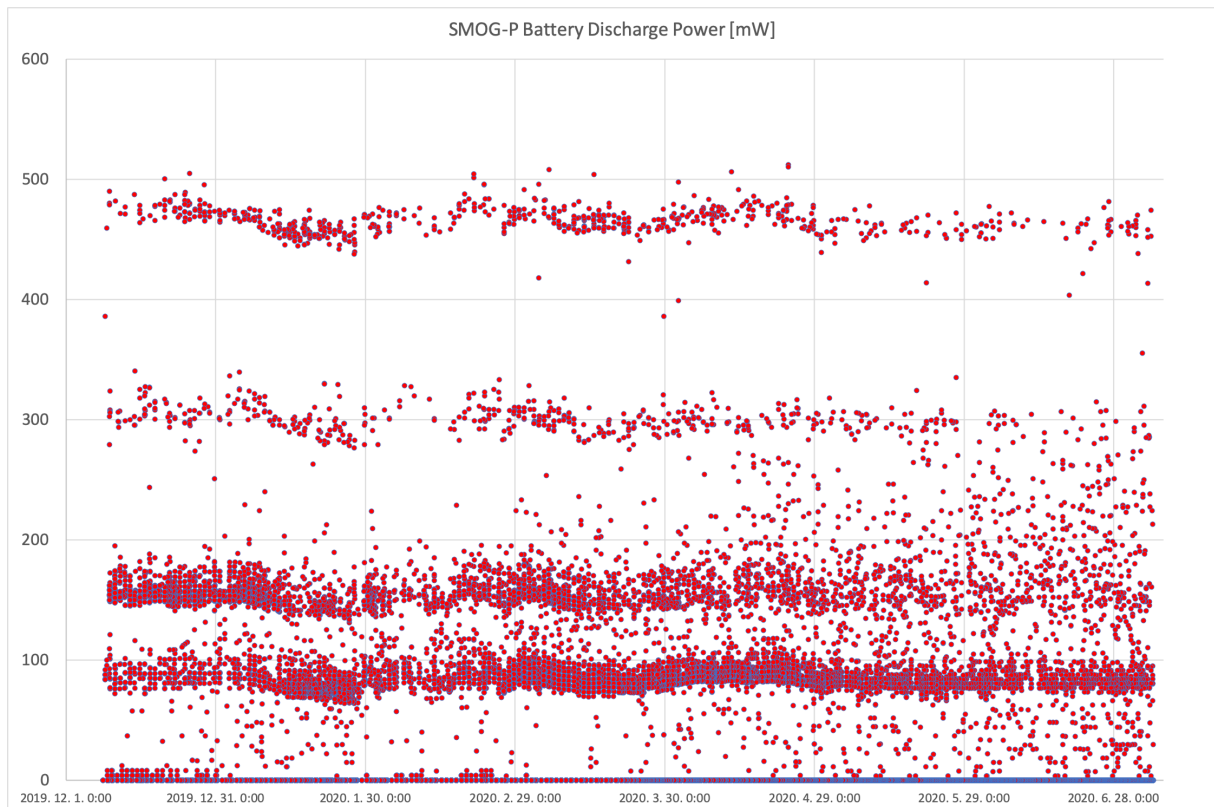
Az akkumulátor töltő teljesítményének mért értékeiből kimutatható, hogy a napelemektől beérkező töltő teljesítmény drámai módon lecsökkent a küldetés kezdete óta.



8. Ábra: SMOG-P fedélzetén mért akkumulátor töltő teljesítmény a küldetés során

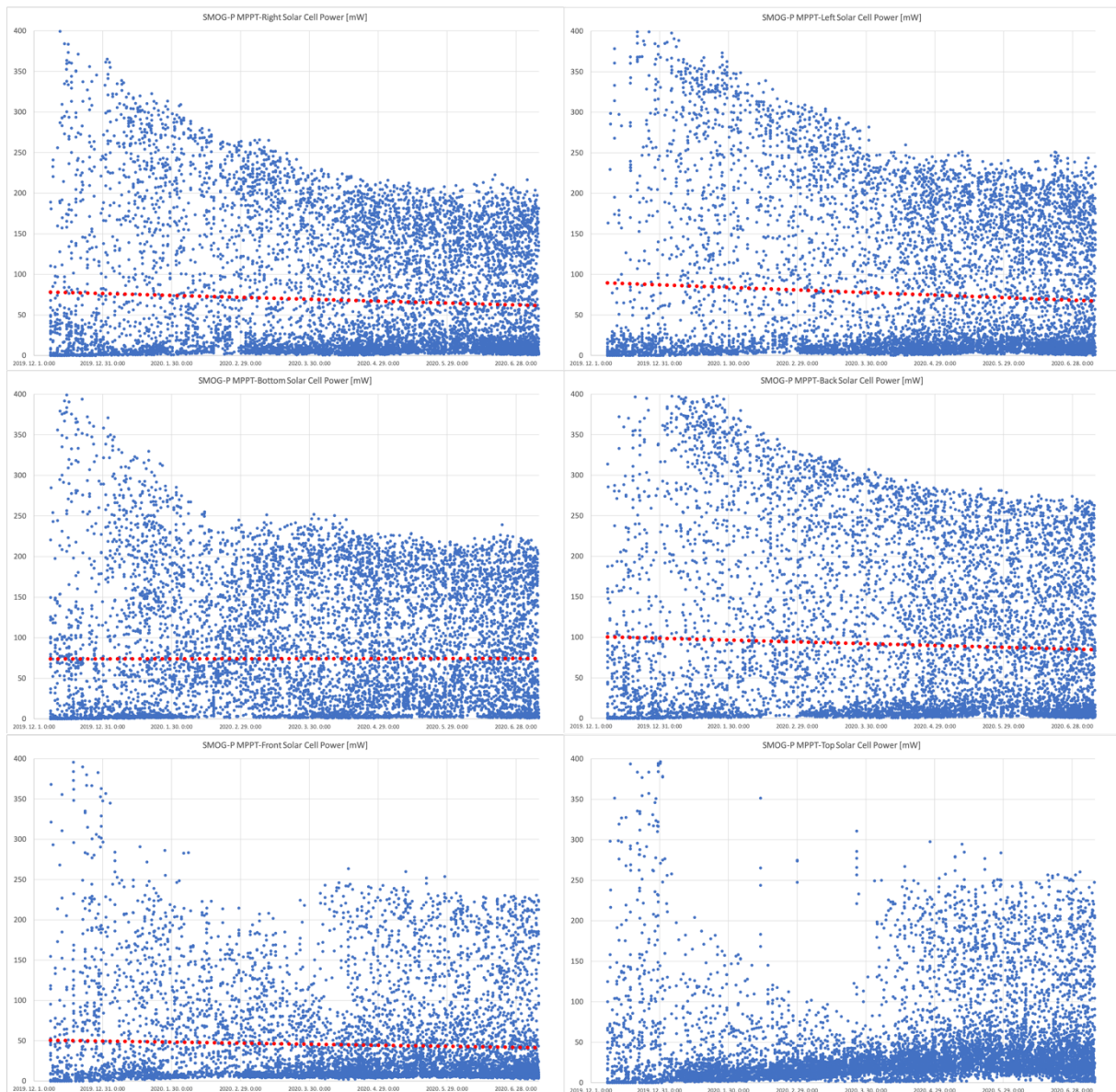
Ezekkel a teljesítményekkel jól jellemezhető az energia mérleg pozitív oldala, míg az akkumulátort merítő teljesítmények jól jellemzik a műhold által felvett energiát a mérleg másik oldalaként. A feldolgozott adatokból egyértelműen kimutatható, hogy a műhold próbál alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez azáltal, hogy az alacsonyabb, energia takarékos üzemmódokban egyre több időt tölt.





9. Ábra: SMOG-P fedélzetén mért akkumulátor merítő teljesítmény a küldetés során

SMOG-P méri a napelemek feszültségét és töltő áramerősségét, amelyekből számítható a töltő teljesítmény, és ezáltal a napelemek állapota. Ezekből az adatokból jól megmutatkozik, hogy a napelemek közül mind a 6 erősen degradálódott a küldetés során, és a beérkező teljesítmény lecsökkent.



10. Ábra: SMOG-P fedélzetén mért napelem teljesítmények a küldetés során

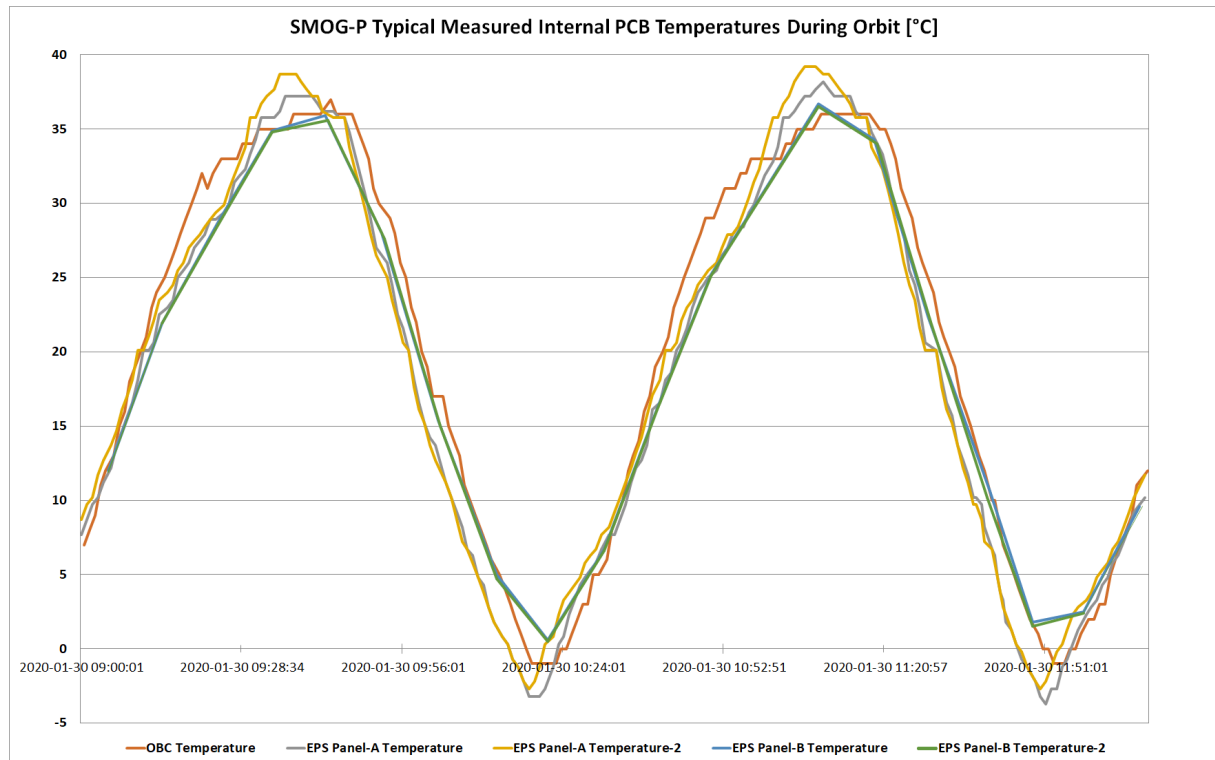
Ennek legvalószínűbb oka az, hogy bár űrminősített, de védőréteg nélküli cellák lettek felhasználva a műhold építése során. A védőréteg elhagyására azért volt szükség, hogy a napelemeket el lehessen helyezni a kis méretű oldalfelületeken. Ez a réteg lenne felelős azért, hogy a celláknak némi védelmet szolgáltatson a sugárzással és atomi oxigénnel szemben.

Az atomi oxigén (AO) a természetben nem fordul elő a Föld felszínén, mivel nagyon reaktív. Az űrben azonban a nagy mértékű UV sugárzás hatására az  $O_2$  molekulák könnyen atomi oxigénné bomlanak. Az alacsony Föld körüli műholdas pályák atmoszférájának 96%-át atomi oxigén teszi ki. A NASA kezdeti űrrepülései során ez az atomi oxigén volt az egyik legnagyobb problémaforrás. [1]

Az AO nincs jelen az eredetileg tervezett 600 km magas pályán, azonban az alacsonyabb 360 km magasságú pályán már jelentős, amelyen SMOG-P végül elkezdte küldetését. A műhold nagy (kb. 8 km/másodperces) sebességgel beleütközik ezekben a részecskébe, amiknek a legjava a napelemekbe csapódik, mivel a külső felület nagy része napelemekkel borított.

Ezek a becsapódások okozhatják a napelemek teljesítményének csökkenését, mivel az AO korrodálhatja a napelemek fémezéséhez használt ezüst réteget.

Néhány egyéb tényező is okozhatja a tapasztalt degradációt, habár ezek valószínűsége kisebb. A műhold hőmérséklete folyamatosan változásban van. Növekszik a napfényel borított pályaszakaszokon és csökken a Föld árnyékában, amíg a műhold újra el nem éri a napfényt.



11. Ábra: SMOG-P belső paneljein mért tipikus hőmérséklet értékek, és azok megváltozása a pályaszakasztól függően

Mivel SMOG hőkapacitása tömegéből adódóan meglehetősen kicsi, ez a váltakozás sokkal jelentősebb, mint a nagyobb műholdak esetében. A külső oldalak belső felén elhelyezett hőmérséklet szenzorok adatai alapján a hőmérséklet ezeken a pontokon  $-20$  és  $+70$  °C között váltakozik. A külső felületen elhelyezett napelemek hőmérséklet ingadozása ennél még nagyobb lehet, aminek hatására a cellákban mechanikai feszültség és ezáltal sérülés keletkezhet. A műhold eddig közel 4000 alkalommal kerülte meg a Földet, ami ugyanennyi termikus ciklust jelent. Az űrbe szánt napelemeket felkészítik ezekre a hatásokra, az ebből adódó degradációnak kisebb a valószínűsége.

Harmadik lehetséges hatásként a sugárzás szintén károsíthatja a cellákat, azonban jelenlegi tudásunk és a fedélzeti sugárzásmérő műszer adatai alapján SMOG-P pályáját még hatékonyan védi a Föld mágneses tere.

A műhold folyamatosan igyekszik kompenzálni a csökkenő beérkező teljesítményt. Ezt úgy éri el, hogy kevesebb energiát használ fel a rádió kommunikációra, ezért a belső panelek hőmérséklete lassan, de folyamatosan csökken a rádiózásból keletkező hő hiánya miatt.

SMOG-P folyamatosan pörög az indítás óta. Nem volt lehetőség helyzet stabilizálás megépítésére ebben a kis méretben, és a küldetéshez nem is volt rá szükségünk. A pörgés miatt a töltő teljesítmény véletlenszerűen alakul az éppen napfényel megvilágított cellák és azok megmaradó teljesítményének megfelelően. Néhány ritka esetben előfordul, hogy az

akkumulátor nem tud eléggé feltöltődni a napfényes pályaszakaszon. Ekkor az ezt követő sötét szakaszban az akkumulátorhoz tervezett védelmi áramkör lekapcsol, hogy megvédje a túlmerítéstől. Ez az energiaellátó rendszer újraindulását eredményezi, amikor a műhold ismét napfényre ér.

Annak ellenére, hogy nem várt módon a napelemekről beérkező teljesítmény közel felére csökkent az indítás óta, a SMOG-P képes volt sikeresen elvégezni a küldetését. A műhold tervezett élettartama 3 hónap volt, és még 8 hónappal az indítás után is teljes funkcionalitással üzemel e sorok írásakor. A rendszerek és tartalék rendszerek teljesen működőképeselek, áramköri meghibásodást nem tapasztaltunk. A műhold rendelkezésre állása (availability) több, mint 99.98%, figyelembe véve a rövid időtartamokat, amikor az akkumulátor lemerül a sötét pályaszakaszok végén és a védelemnek le kell kapcsolnia. Általában a Föld felszínén a vevőállomások rendelkezésre állása ennél alacsonyabb, a heves viharok és széllekedések miatt.

A napelemek degradációja az ATL-1 műhold esetén is kimutatható, amely a csapatunk bevonásával készült és a SMOG-P-vel együtt indult küldetésére. Ez a műhold jóval nagyobb napelem felülettel rendelkezik, ezért itt még nem tapasztalható az energiaellátó rendszerben hasonló anomália, csak a korábban említett, valószínűleg részecske becsapódásokból eredő kapcsolások a fő és tartalék rendszerek között. ATL-1 rendelkezésre állása közel 100%.

Lehetőségünk van néhány módon beavatkozni és segíteni SMOG-P-nek, ha a napelemekről beérkező teljesítmény tovább csökken. Kiadhatunk a műholdnak olyan parancsot, ami végrehajtásával lekapcsolja időzítetten az óceánok fölött a kommunikációs rendszert, ahol nincsenek állomások a műhold vételére, és nincs értelme tovább mérni az elektromágneses szennyezettséget. Ebben az állapotban SMOG-P mindössze 56 mW teljesítményt használ fel a működéshez, a többlet energia pedig eltárolható az akkumulátorban és később felhasználható a kommunikációhoz, amikor a műhold Magyarország fölé ér. Alacsony pályamagassága miatt a műhold valószínűleg októberben zuhan be a légkörbe. Addig a műszerek folyamatosan végezni fogják a méréseket, ha van elegendő beérkező teljesítmény a működéshez, és remélhetőleg most először lehetőségünk nyílik megfigyelni egy ilyen kis műhold visszatérését.

A következő műholdunk, a SMOG-1 várhatóan 2020 év végén áll majd pályára. Struktúráját megerősítettük és a SMOG-P tapasztalatai alapján felkészítettük, amennyire csak lehetett. A SMOG-P bebizonyította, hogy a konstrukció megállja a helyét az űrben. A technológia és a tudás a rendelkezésünkre áll, hogy ilyen kis méretű mégis rendkívül intelligens űreszközöket alkossunk meg. Egy apró hullócsillagként fejezi majd be végleg küldetését. Nem marad utána űrszemét, csak a rengeteg tudományos mérési eredmény és tapasztalat, ami létrejött küldetése és megépítése során.

Géczy Gábor / HA7GG

Rendszermérnök, SMOG Központi Energiaellátó Rendszer és Fedélzeti Doziméter

2020.08.06. v1.2

[geczygabor@gnd.bme.hu](mailto:geczygabor@gnd.bme.hu)

## Referenciák:

- Képek [https://gnd.bme.hu/public/GeczyGabor\\_articles/](https://gnd.bme.hu/public/GeczyGabor_articles/)
- SMOG projekt <http://gnd.bme.hu/smog>
- SMOG-P státusz [http://gnd.bme.hu/grafana/d/jyKiTk\\_Wz/smog-p-status?orgId=1&kiosk](http://gnd.bme.hu/grafana/d/jyKiTk_Wz/smog-p-status?orgId=1&kiosk)
- 3D szennyezettségi térkép <https://gnd.bme.hu/mb/site/>
- SMOG vételi szoftver <https://gnd.bme.hu:8080>
- Running Out of Fingers – RocketLab Launch video [https://youtu.be/QK9mQdar5\\_w?t=915](https://youtu.be/QK9mQdar5_w?t=915)
- Running Out of Fingers - RocketLab Mission Overview  
<https://www.rocketlabusa.com/news/updates/next-generation-electron-booster-on-the-pad-for-rocket-labs-10th-mission/>
- Brendan Gully Photography <https://brendangully.co.nz>

[1] [https://www.nasa.gov/topics/technology/features/atomic\\_oxygen.html](https://www.nasa.gov/topics/technology/features/atomic_oxygen.html)