

Mit tudunk az űrszemétről?

Összefoglaló helyzetjelentés 1957-től napjainkig

**Mihályi Dávid Krisztián¹, Mészáros János²,
Farkas Alexandra^{1,3}**

¹ ELTE Biológiai Fizika Tanszék,

Környezetoptika Laboratórium, Budapest

² ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék, Budapest

³ MTA Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet, Budapest

Bevezetés

Az űr meghódítása óta mindennapjainkba oly mélyen beivódott az űrtechnika, hogy nehezen tudnánk nélküle elképzelni hétköznapi életünk. A földrészek közötti kommunikációhoz, a televíziós adások vételéhez, az internet és a GPS használatához, vagy az időjárás-előrejelzéshez mind-mind műholdak segítségére van szükségünk. Ezen szerkezetek élettartama azonban nagyon változó. Működésük befejeztével irányíthatatlanul keringenek tovább a Föld körül, nem kis fejfájást okozva azoknak, akik a még működő űreszközök irányításával foglalkoznak. A balesetek elkerülése végett gyakran kell ugyanis kikerülő manővereket végrehajtaniuk. Az elromlott objektumok száma folyamatosan növekszik, hiszen minden évben sok új műholdat állítunk pályára, az elromlottak eltávolításáról vagy megsemmisítéséről pedig nem gondoskodunk.

Definíció szerint űrszemétnek nevezünk minden olyan mesterséges eredetű tárgyat, amely funkcióját elvesztette már, ám továbbra is a Föld körül kering vagy belép a légkörbe [1]. Így űrszemétként beszélhetünk például a levált gyorsítórakéta-elemekről vagy burkolólemezekről, az elromlott vagy kiöregedett műholdakról, a Nemzetközi Űrállomás (ISS) legénysége számára feleslegessé vált és általa az űrbe taszított, vagy véletlenül elhagyott tárgyakról. 2007-ben például egy ~600 kg-os ammóniatartály vált feleslegessé, valamint egy ~100 kg-os kameraállvány sodródott el véletlenül, amik egy évnyi keringés után (szerencsére) megsemmisültek a légkörben illetve a Csendes-óceánba csapódtak [2].

A fenti definíció megfelel azonban a nem Föld körüli pályára tervezett mesterséges objektumokról, amik mára már működésképtelenné, feleslegessé váltak. Ugyan e tárgyak nem okoznak közvetlen problémát az emberiség számára, ám ezeket is űrszemétként kezelhetjük. Ide tartoznak például a funkciójukat vesztetten sodródó űrszondák, a leszállóegységek és roverek a Mars, a Vénusz és a Titan felszínén, továbbá a holdraszállások során égi kísérőnk felszínén hagyott eszközök.

Az utóbbi években történt, a média által is felkapott néhány esemény rávilágított arra, hogy a Föld légkörének peremét ugyanúgy meg kell szabadítanunk a szemetünktől, mint annak felszínét. Amennyiben ezt nem tesszük meg, úgy megsérülhetnek többek között a létfontosságú meteorológiai, kommunikációs és GPS műholdak, aminek súlyos gazdasági következményei is lehetnek. Nem beszélve arról, hogy bár a Föld felszínének csak igen kis része lakott az összfelületéhez viszonyítva, mégis megeshet, hogy egy irányíthatatlanul lezuhanó, nagyobb méretű, és így a légkörben teljesen el nem égő szerkezet lakott területre esik és emberéleteket is követel. Mindezek tetejében (ahogyan az kérdőíves felmérésünkéből [3] is kiderült) a lakosság döntő többsége vagy nem vesz tudomást a jelenségről, vagy nem is ismeri, annak ellenére, hogy ugyanolyan környezeti problémával állunk szemben, mint a vizek vagy a levegő elszennyezése. Pedig talán csak az a probléma, hogy nem látható szabad szemmel.

Érintett műholdpályák

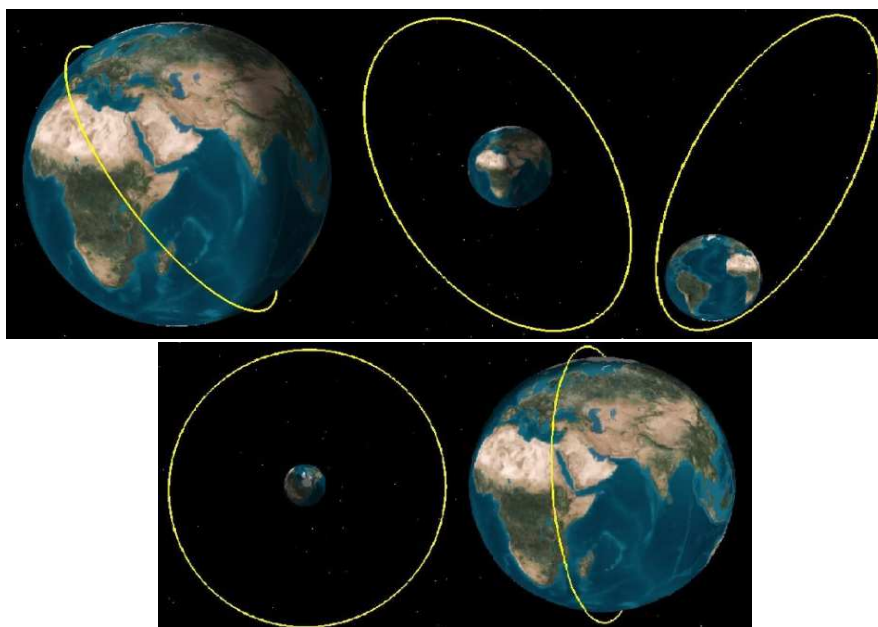
A különböző funkciójú műholdak pályáit a keringési magasság és az inklináció (a műholdpálya síkjának dőlésszöge az Egyenlítőhöz képest) alapján is lehet osztályozni, amiket az 1. táblázat és az 1-2. ábrák foglalnak össze. Az egyenlítői, normál, poláris és retrográd pályákon túl speciális műholdpályákat is megkülönböztetünk. Pontosán 35 786 km magasan az Egyenlítő felett húzódik a kiemelt fontosságú geostacionárius pálya (GEO), ahol egy műhold keringési ideje megegyezik a Föld forgási idejével, azaz az itt keringő műhold mindig ugyanazon földrajzi hely felett található. A legtöbb meteorológiai és kommunikációs műhold itt helyezkedik el. Egy másik ilyen speciális pálya a napszinkron pálya (SSO): 1000 km alatti magasságban, ha a pályamagasság és az inklináció megfelelő, akkor a műhold egy adott pont felett mindig ugyanabban a helyi időben keresztezi az Egyenlítő síkját (1. ábra). Szintén a különleges pályák közé tartoznak az úgynevezett pseudo pályák, amik két égitest közötti mozgáshoz szükségesek. Jó példa rá a holdi átmenet pálya (LTO, Lunar Transfer Orbit), amin a legkisebb energia-befektetéssel lehet a Holdat megközelíteni [4, 5].

A műholdak irányítása

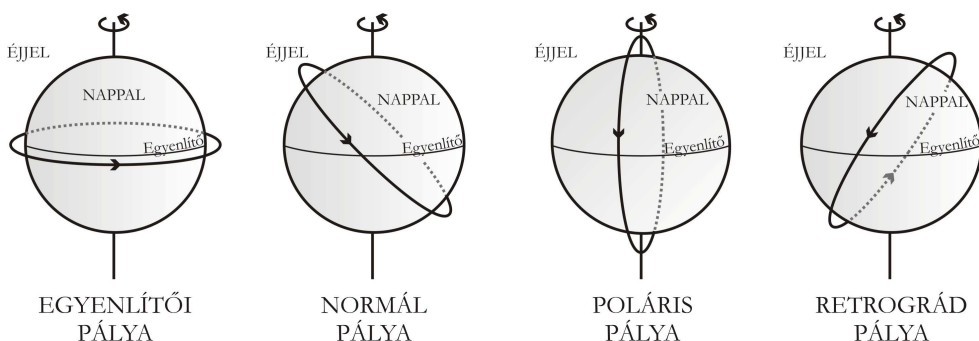
2014. augusztus 1-jén a Union of Concerned Scientists honlapja alapján 1235 db működő műhold keringett a Föld körül, ugyanez 2014. január 31-én 1167 db, 2013. augusztus 31-én pedig 1084 db műholdat számlált [6]. Az ilyen mértékben növekvő számú (3. ábra) műhold irányítását már nem lehet akárhogyan végezni: pontos szabályok, megfelelő követő radarok és irányító központok szükségesek

A műholdak keringési magasság függvényében meghatározott pályái		
1	LEO pálya (Low Earth Orbit)	200 - 1 200 km között
2	MEO pálya (Medium Earth Orbit)	1 200- 35 786 km között
3	HEO pálya (Highly Elliptical Orbit)	földtávolpontja 35 786 km felett, földközelpontja kb. 1 000 km magasan
4	GEO pálya (Geostationary Earth Orbit)	35 786 km magasan az Egyenlítő felett
A műholdak pályainclináció függvényében meghatározott pályái		
1	egyenlítői pálya	az Egyenlítő és a műhold keringési síkja által bezárt szög 0°
2	normál pálya	a bezárt szög $0^\circ - 90^\circ$
3	poláris pálya	a bezárt szög 90° (e műholdak a sarkpontok felett haladnak el)
4	retrográd pálya	a bezárt szög $90^\circ - 180^\circ$ (a műhold keringési iránya a Föld forgásával ellentétes)

1. táblázat: Műholdpályák

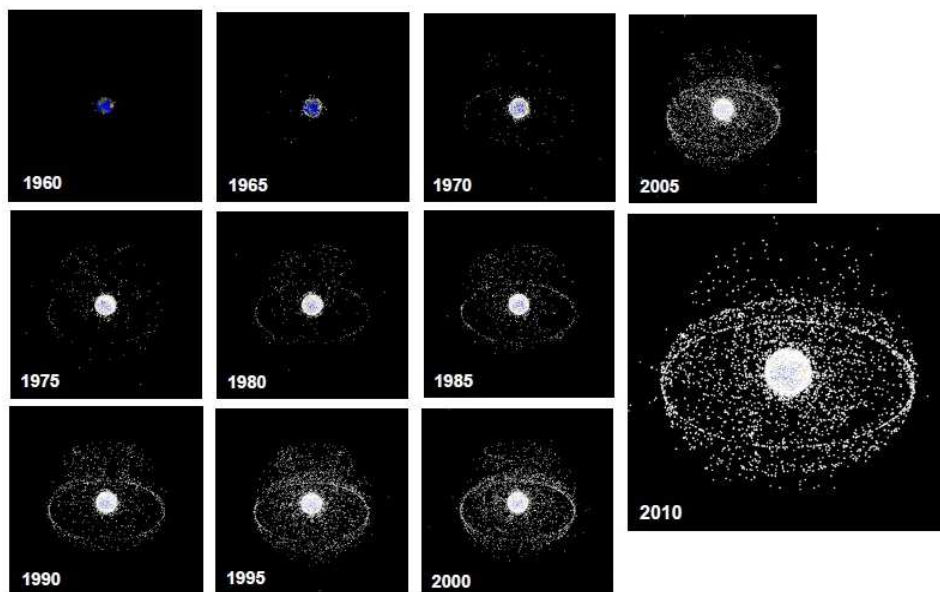


1. ábra: A LEO, MEO, HEO (első sor), GEO és SSO pályák (második sor) szemléltetése [5]



2. ábra: Az egyenlítői, normál, poláris és retrográd pályák síkjai

hozzá, amiket 1957 óta a U.S. Space Surveillance Network (SSN) irányít. Ahhoz, hogy ez hatékonyan működhessen, az egész bolygón átívelő rendszerre van szükség, aminek részeként a 4. ábrán jelölt helyszíneken radarok és optikai megfigyelő állomások foglalnak helyet [7]. A Colorado Springsben található központi irányító állomásról (4. ábra) a műholdak irányíthatók is. Itt a folyamatos monitorozás során mindig előre kiszámolják az összes detektált objektum pályáját, amiből meg tudják tenni a kellő intézkedéseket az esetleges űrbéli karambolok elkerülésére. A rendszer kiegészítésére 2010-ben felbocsátották a Space Based Space Surveillance (SBSS) műholdat is, aminek feladata a törmelékdarabok feltárása a légkör zavaró hatásától mentesen [8].



3. ábra: A Föld körül keringő műholdak száma 1960-tól 2010-ig [7]



4. ábra: A műholdak követését végző U.S. Space Surveillance Network (SSN) részeként működő radarok és optikai teleszkópok [7 alapján, szerkesztve]

Az űrszemét mennyisége és kategorizálása

Ahogy az a fentiekből látható, fejünk felett alapesetben egy megfelelően megszervezett és koordinált rendszer található, ami a tudományos fejlődésünk mellett életünk kényelmesebbé tételét is hivatott szolgálni. E rendszer működését zavarja az űrszemét. Ha a koordinálhatatlanul, szabálytalan pályán, több km/s sebességgel keringő objektumok működő berendezésekkel ütköznek, azokat károsíthatják, tönkretelhetik. Ha pedig az ütközés következtében a működő objektum letér pályájáról, teljesen meg is semmisülhet.

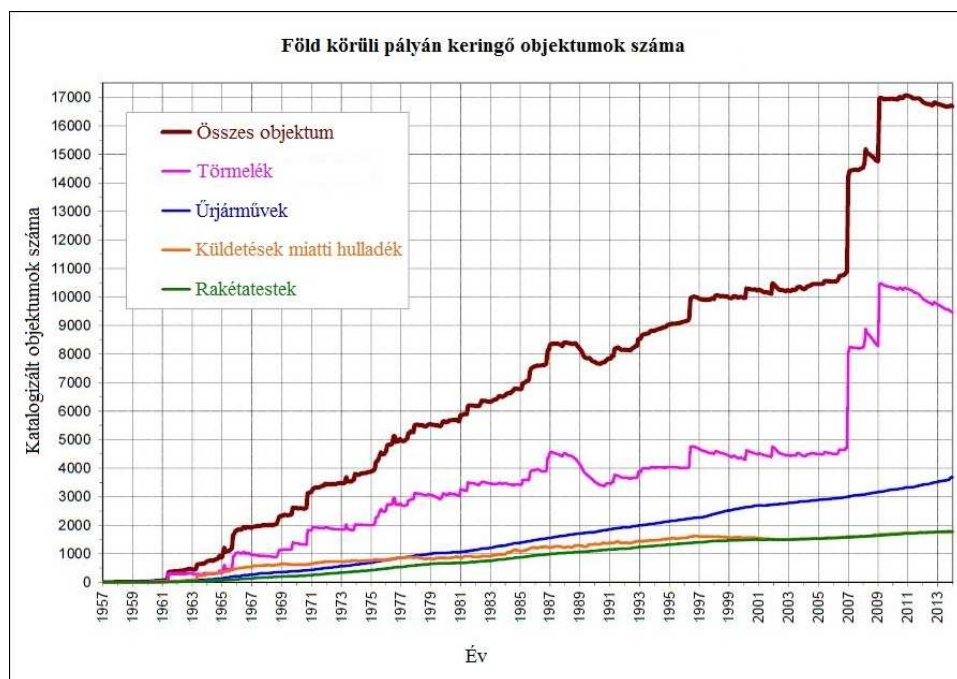
Ma már olyan nagyszámú űrszemét kering bolygónk körül, hogy azok különböző szempontok alapján kategorizálhatók. Fontos figyelembe vennünk az objektumok számát, pályáját, méretét, formáját és anyagi összetételét [7]. Az objektumok vagy törmelékek viselkedésének elemzésénél az a legfontosabb kérdés, hogy az mekkora veszélyt jelent a környezetében található többi szerkezetre. Ennek vizsgálata során különböző enyhítő körülmények is figyelembe vehetők: például a törmelék forrása, keletkezésének oka, valamint az ütközés okozásának valószínűsége.

Átlagos méret	1 mm - 1 cm	1 cm - 10 cm	> 10 cm
Mennyiség	~ 170 ezer db	~ 670 ezer db	~ 29 ezer db

2. táblázat: Az űrszemét kategorizálása méret szerint [11]

Az objektumok átlagosan 8 km/s-os sebességgel keringenek a LEO pályán (1. táblázat). Ez annyi energiát rejt magában, hogy ütközés esetén egy űreszközt könnyedén használhatatlanná tenne [9]. Egy ilyen ütközés hatása nagyban függ az űrszemét méretétől is, aminek csoportosításakor a 2. táblázatban látható három fő kategóriát különítették el [10, 11]. 1 mm alatti méretű testeket is szokás csoportosítani: 1µm alatt már űrporról beszélhetünk.

Mivel az űrszemét feltérképezése folyamatosan zajlik, a feltérképezett törmelék száma is nő. A jelenleg ismert adatokat 2013 júliusában tették közzé [11]. Az űrszemét mennyiségének jelentős növekedését főként egy nagyméretű űreszköz valamilyen okból történő megsemmisülése tudja előidézni, amikor az egy darabban lévő objektum darabok ezreire szakadhat szét. Az utóbbi években két nagyobb ilyen eset is történt. Először 2007. január 11-én Kína rakétával semmisített meg egy poláris pályán keringő kínai műholdat, majd két évvel később, 2009. február 11-én az amerikai Iridium cég egy még működésben lévő távközlési műholdja ütközött össze a használaton kívüli orosz Kozmosz-2251 mesterséges holddal [12]. Mindkét esemény nagymértékben megnövelte a Föld körüli pályán keringő objektumok számát (5. ábra).



5. ábra: Föld körüli pályán keringő, katalogizált objektumok száma [13]

Az űrszemét egy különleges formáját a hidegháborúhoz köthetjük. Az amerikaiak a felszíni rádióhullámokon és a tenger alatti kábeleken keresztül zajló kommunikációt túl sebezhetőnek tartották, ezért olyan rendszert szerettek volna kialakítani, ami bármikor működőképes. Ezért 1958-ban Walter Morrow és Harold Meyer tudósok azt javasolták, hogy vékony, szőrszál vastagságú rézszálakat (6. ábra) szórjanak szét 2-3 ezer km magasságban. Ha e tűk hossza 1,8 cm (ami a fele a 8 GHz-es rádióhullámok hullámhosszának), akkor tökéletesen használható felületet hoznak létre, amit bármilyen ellenséges szovjet tevékenység ellenére lehet rádiózásra használni. Hiába tiltakoztak a rádiócsillagászok, attól tartván, hogy az általuk kutattott, az űrből érkező jeleket nem tudják majd észlelni, a projekt 1961-ben megvalósult, de végül csak a második próbálkozás volt sikeres 1963-ban.



6. ábra: Az 1960-as években a West Ford projekt keretében 350 millió ilyen apró rézdrótot szórtak szét az Egyenlítő vonalára merőlegesen, amiket egy biztonságos kommunikációs rendszer részeként képzeltek el [14]

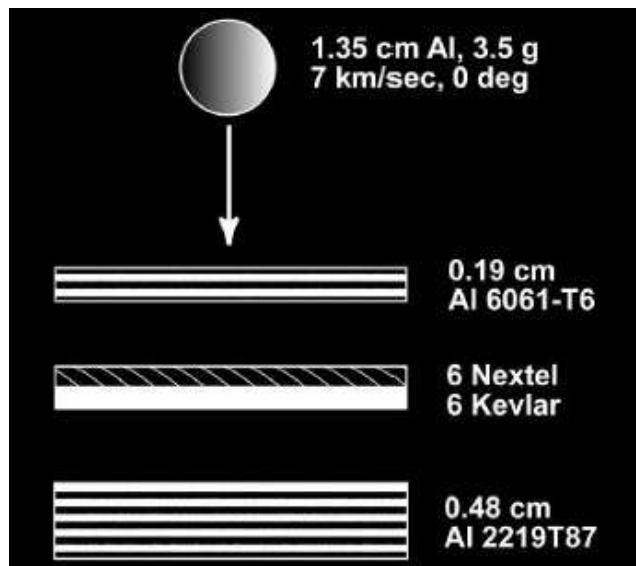
Ennek során 350 millió apró rézdrótot szórtak szét az Egyenlítő vonalára merőlegesen. A kísérlet eleinte sikeresnek tűnt, hiszen a rendszer segítségével sikeres rádió-összeköttetéseket tudtak kialakítani, ám idővel az apró réztűk eltávolodtak egymástól, ami rontotta a rádiójelek minőségét, továbbá pár év után rengeteg szál hullott vissza a légkörbe és égett el (a tervezettnél megfelelően). Szerencsére ezután megjelentek a távközlési műholdak, amik a további kísérletezést e téren feleslegessé tették, így a projektet 1966-ban leállították. Bár a tűk nagy része visszahullott, akadnak nagyobb csomók, amik az egymással való érintkezés során összetapadtak, mert felbozsátáskor naftalingélbe ágyazták őket. Az Észak-Amerikai Légi- és Űrvédelmi Parancsnokság (NORAD) számos ilyen

tűcsomót tart nyilván, melyek akár több évtizeden keresztül is keringhetnek a bolygó körül [14].

A különböző méretskálájú űrszemét-objektumok veszélyei

Az 1 cm alatti méretskálába eső törmelék nem jelent különösebb problémát az űreszközökre nézve, mert azok ún. Whipple-pajzsokkal vannak ellátva, amelyek hatékonyan elnyelik egy ilyen törmelékkel történő ütközésből származó energiát. Ám az űreszközök egyes részei így is lehetnek veszélyben, hiszen pl. az energiaellátásban fontos szerepet játszó napelemtáblákat nem lehet ilyen védelemmel el-

látni. Már az 1960-as évektől használtak egyszerűbb pajzsokat a kisebb méretű meteorok ellen, ám a mai eszközöket már jóval hatékonyabban kell óvni a lehetséges sérülésektől. Emiatt például az ISS speciális, töltött Whipple-pajzsokkal van felszerelve. A külső, vékony lökhárító, valamint az űrállomás vastag fala között különböző alumínium ötvözetek közé erősített nextel (egyfajta erős és könnyű kerámia szövet) és kevlár rétegek találhatók (7. ábra), amik az ilyen nagy energiájú ütközések energiáit is sikeresen képesek elnyelni [15, 16].



7. ábra: A Nemzetközi Űrállomás védelmére használt töltött Whipple-pajzsok szerkezete [16]

Nagyobb problémát a 10 cm feletti törmelék sem okoz, ezek ugyanis jól megfigyeltek, pályájukat rendszeresen követik, és amennyiben ütközésveszély áll fenn egy ilyen törmelékkel, úgy még van lehetőség a használatban lévő űreszközzel elkerülő manőverek végrehajtására. Ilyen műveletre egyre többször van szükség, a 3. táblázatban a 2009-ben történt pályamódosítások láthatók.

A legnagyobb problémát a néhány cm-es űrszemét-objektumok jelentik (2. táblázat), amik nyomon követése egyelőre nem megoldott, ütközés esetén viszont súlyos károk okozására képesek. Phipps és munkatársai [9] számításai alapján egy nagyobb méretű test ilyen méretskálájú objektummal történő ütközése háromévente egyszer következik be (az akkor aktuális adatok alapján, ami minden új műhold felbocsátásával változik). A 100 cm-nél nagyobb méretű és 1 t-nál nagyobb tömegű, már regisztrált és megfigyelt objektumok egymással vagy egy működő műhoddal való ütközésének va-

lőszínűsége már jóval kisebb: egyszer következik be 134 éveként, ami jól mutatja, hogy nem a nagyméretű űrszemét okozza elsősorban a problémát. A néhány cm-es méretskálájú törmelékeket is sürgető volna tehát feltérképezni és nyomon követni, de még jobb volna az eltávolításukat megoldani.

Űreszköz	Manőver dátuma	Veszélyt okozó objektum
TDRS-3	január 27.	Proton rakétatest
ISS	március 22.	CZ-4 rakéta törmelége
Cloudsat	április 23.	Kozmosz-2251 törmelége
EO-1	május 11.	Zenyit rakétatest törmelége
ISS	július 17.	Proton rakétatest törmelége
Space Shuttle	szeptember 10.	ISS hulladék
Aqua	november 25.	Fengyun-1C törmelége
Landsat-7	december 11.	Formosat-3D

3. táblázat: Űrszeméttel való ütközés veszélye miatt szükségessé vált pályamódosítások 2009-ben [16]

Ha egy átlagosan 8 km/s sebességgel haladó test ütközik egy másikkal, akkor a tér minden irányába több kisebb darabra szakadhat szét. Azt a törmeléket, ami egy törmelékkel való ütközés során szakadt ki egy nagyobb űreszközből, kidobódott részecskéknak (ejecta) hívjuk [1]. A kidobódott részecskék ismét ütközhetnek egy másik objektummal és hasonló hatást válthatnak ki. Ez a végtelennek tűnő lánc a Kessler-szindróma. Van egy pont, amit átlépve az előzetes feltételezések szerint a folyamat olyan nagymértékű lesz, hogy az űrhajózás minden formáját le kell majd állítani, mert az űr „öntisztulása” (egyes törmelékek légkörbe belépése és elégeése) egyszerűen nem lesz olyan gyors, hogy az újonnan keletkező törmelékek számát bizonyos határokon belül tudja tartani [17].

Mi a megoldás?

Rengeteg módszert kitaláltak már az űrszemét problémájának megoldására, ám hangsúlyozandó, hogy egyelőre ezek mindegyike kizárólag elméletben létezik. Amennyiben azonnal kellene cselekednünk, úgy jelenlegi technikai fejlettségünket figyelembe véve takarító műholdak vagy kamikaze robotok bevetésével próbálhatnánk meg megsemmisíteni a veszélyes törmeléket, vagy földi bázisú lézerállomásokkal tudnánk használni erre a célra [18]. Utóbbi esetében a nagy energiájú, jól fókuszált lézersugárral a homlokfelületén meglőtt űrszemét párologni kezd, ezáltal anyag távozik belőle. Ez a folyamat úgy hat a céltárgyra, hogy annak lassan csökkenni kezd a keringési magassága, végül pedig a légkörbe érve elég. Ausztráliában a CRC

kutatócsoport (Cooperative Research Centre) azon dolgozik, hogy tíz éven belül elkezdhessek a lézerrel történő takarítást. Új módszerek kifejlesztésén Svájcban is dolgoznak, ahol öngyilkos robotokat (kamikaze műholdakat) szeretnének kifejleszteni, amik a célpontot megragadva, azzal együtt semmisülnének meg a légkörbe való belépéskor.

A kérdés az, hogy mennyi időnk van még? Egy 2012-es tanulmány szerint bebizonyosodott az is, hogy az antropogén hatás miatt megnövekedett légköri CO₂ koncentráció is hatással lehet az űrszemét helyzetére [19]. Ismeretes, hogy az alsóbb légkörben a CO₂ felmelegedést okoz, ezzel egyidejűleg ugyanakkor a termoszféra (~90–700 km) hőmérséklete csökken és fokozatosan összehúzódik. Ez azt eredményezi, hogy a LEO pályákon keringő törmelékekre kisebb fékezőerő hat majd, több időt fognak Föld körüli pályán tölteni, azaz mennyiségük is adott időpillanatban jóval nagyobb lehet.

Bármelyik módszer mellett döntünk is majd, addig is a legfontosabb a további űrszemét keletkezésének minimalizálása, még inkább megelőzése volna a legcélravezetőbb óvintézkedés. Két oka van annak, hogy a takarító folyamat egyelőre lassan halad. Az első, hogy jelenleg még nagy technológiai kihívást jelent az űrben történő bármilyen tevékenységet elvégezni. Másfelől, ha az emberek vizuálisan nem érzékelik a problémát, az nem is tudatosul bennük. Ennek következtében kimondottan nem törődnek a problémával, nem fejtenek akkora társadalmi nyomást a döntéshozókra és az érintettekre, mint például egy vízszennyezés esetében. Éppen ezért szükséges lenne a problémát megismertetni az emberekkel, közelebb hozni hozzájuk az oktatás és a média segítségével. Egy olyan világban, ahol életünket ilyen mértékben áthatják a műholdas technológiák, cselekednünk kell mihamarabb, mert ha a bemutatott Kessler-szindróma beindul, annak súlyos gazdasági, társadalmi, esetleg politikai következményei lehetnek.

Hivatkozások:

- [1] Faure P. et al. (2012): Use of elemental materials for the creation an in-situ space dust impacts detector. 6th EEIGM International Conference on Advanced Materials Research, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 31, 012022
- [2] Space station crew dumps trash overboard.
<http://www.newscientist.com/article/dn12332-space-station-crew-dumps-trash-overboard.html>
- [3] Mihályi D.K. (2014): Az űrszemét mint környezeti probléma. Szakdolgozat, ELTE, 57 p.
- [4] Mucsi L. (2004): Műholdas távérzékelés. Libellus Kiadó, Szeged, 238 p.

- [5] Rieger I., Kocsis G. (2012): BME Űrtechnológia kurzus tananyaga
- [6] UCS Satellite Database.
http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html
- [7] Stansbery G. (2010): Characterizing the Space Debris Environment with a Variety of SSA Sensors.
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100009416.pdf>
- [8] Boeing Space Surveillance System Reduces Risk of Satellite Loss by 66 Percent.
<http://boeing.mediaroom.com/Boeing-Space-Surveillance-System-Reduces-Risk-of-Satellite-Loss-by-66-Percent>
- [9] Phipps C.R. et al. (2012): Removing orbital debris with lasers. *Advances in Space Research*, 49, 1283
- [10] Klinkrad H. (ed.) (2006): *Space Debris. Models and risk analysis*. Springer Praxis Book, 430 p.
- [11] How many space debris objects are currently in orbit?
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Clean_Space
[How_many_space_debris_objects_are_currently_in_orbit](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Clean_Space/How_many_space_debris_objects_are_currently_in_orbit)
- [12] Pupillo G. et al. (2012): The INAF contribution to the ASI Space Debris program: observation activities. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 20, 43
- [13] NASA Orbital Debris Quarterly News. Vol. 18, Issue 1, 10 p.
<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNV18i1.pdf>
- [14] Grometstein A.A. (ed.) (2011): MIT Lincoln Laboratory. *Technology in Support of National Security*. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington, Massachusetts, 570 p.
- [15] Christiansen E.L. et al. (1995): Enhanced meteoroid and orbital debris shielding. *International Journal of Impact Engineering*, 17, 217
- [16] Johnson N. L. (2010): Orbital debris: The Growing threat to space operations. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100004498.pdf>
- [17] Kirchner G. et al. (2013): Laser measurements to space debris from Graz SLR station. *Advances in Space Research*, 51, 21
- [18] Richard M. et al. (2013): Uncooperative Rendezvous and Docking for MicroSats. The case for CleanSpace One. *International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 12-14 June 2013, Istanbul, Turkey
- [19] Emmert J.T. et al. (2012): Observations of increasing carbon dioxide concentration in Earth's thermosphere. *Nature Geoscience*, 5, 868