

# AZ ŰRSZEMÉT ÉGI MECHANIKÁJA – 1. RÉSZ

## Az űrszemét keletkezése és jellemzői

Slíz-Balogh Judit – ELTE Csillagászati Tanszék  
Horváth Gábor – ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Az 1 cm-nél nagyobb méretű űrszemét képes megroggni a különféle űreszközöket és lejuthat a Föld felszínére. E szempontból különösen veszélyeztetett helyzetben van az 1200–2000 km közötti magasságban lévő, alacsony Föld körüli pálya és a 35 786 km magasságbeli geostacionárius pálya, mert a műholdak túlnyomó része e magasságokon kering. Jelenlegi technikai ismereteinkkel a 10 cm-nél kisebb űrszemét pályája nem követhető nyomon. Az ennél kisebb űrszemét elég a légkörben, de a nagyobb darabok a Földre es-

hetnek. Gyakorlati szempontból fontos lenne ismerni a Föld légkörébe visszatérő és a Földre zuhanó űrszemét tömegét, összetételét, alakját, sebességét, mozgásirányát és becsapódási idejét. Mivel rendkívül összetett feladat e fizikai paraméterek mérése, ezért lényegében alig van róluk információ. Kétrészes cikkünk első részében az űrszemét keletkezését, jellemzőit, sorsát és mennyiségének időbeli fejlődését foglaljuk össze. A második részben pedig a gömb alakú, a légkörben el nem égő űrszemétdarabok Földre hullásának dinamikáját vizsgáljuk számítógépes modellezéssel [1].



*Slíz-Balogh Judit* a BME-n végzett matematikus-mérnökként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. Azután az ELTE-n szerzett csillagász diplomát, ahol 2020 őszén fog doktoriát a Fizika Doktori Iskola Részecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képkalkotó polarimetriája.

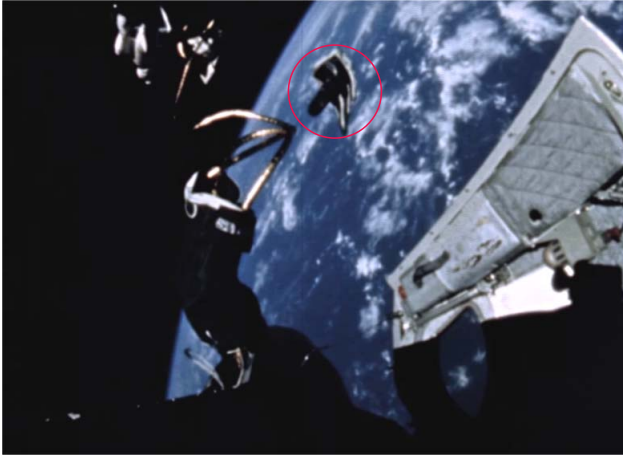


*Horváth Gábor* fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.

### Mi az űrszemét?

Űrszemétnek számít minden használhatatlanná vált és a világűrben száguldó tárgy. Ilyenek például a hordozórakéták levált felső fokozatai, működésképtelenné vált űrállomások, leszerelt műholdak és az űrmissziók során elhagyott tárgyak. A legnagyobb űrszemétforrások a Föld körül keringő műholdak véletlen/szándékos felrobban(t)ásai. A többlépcsős űrrakéták alsó fokozatai nem érik el a keringési (orbitális) pályamagasságot, és visszahullanak a Földre. A felső rakétafokozatok a hasznos teherrel közel azonos orbitális pályára állnak, és ha ez alacsonyabb magasságokon történik, akkor addig keringenek, amíg be nem jutnak a légkörbe és el nem égnek, vagy össze nem ütköznek egy mesterséges holddal, netán egy másik űrszeméttel.

Űrhajósok által elhagyott tárgyak is keringenek az űrben. *Ed White*, amikor 1965-ben első amerikaiként tett űrsétát, elveszítette – az ülésén rögzítetlenül ha-



1. ábra. Ed White űrhajós Gemini-4-ből kiszabaduló kesztyűje önálló Föld körüli pályára tér, a [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=7&v=AM7qh7fk2JU&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=AM7qh7fk2JU&feature=emb_logo) videó 1:29 percénél látható e kép.

gyott, a nyitott Gemini-4 űrhajóból kiszabadult – kesztyűjét (1. ábra). 1966-ban *Michael Collins* a Gemini-10 űrhajó mellett hagyott el egy kamerát. A szovjet MIR űrállomásról egy szemeteszsák, csavarkulcs és fogkefe szökött a világűrbe. A legrégebbi ember alkotta tárgy az űrben a Vanguars-1 műhold, amit az USA lőtt fel 1958-ban és 2200 napig működött. Az eredeti számítások szerint 2000 évig kellene keringenie, de a naptevékenység, a napszél és a légkör fékező hatása miatt már csak 240 éve van hátra a Földre hullásig.

Az 1957. október 4-én fellőtt első műhold, a Szputnyik-1 a Föld felszíne fölött 2000 km-en, alacsony Föld körüli pályán (angolul *Low Earth Orbit*, LEO) történt 3 hetes keringés után 1958 januárjában süllyedt a légkörbe, majd lezuhant és megsemmisült. A LEO tartományban kering a Nemzetközi Űrállomás, valamint számos megfigyelő és kéműhold is. Itt száguldozik a legtöbb űrszemét 90 perc körüli keringési idővel.

A LEO-t követő magassági övezet a közepes Föld körüli pálya (MEO: *Medium Earth Orbit*) 2000 és 35 786 km között. Ezt követi a geostacionáris pálya (GEO) 35 786 km magasságban, ami a távközlési, műsorszóró és meteorológiai műholdak pályája. Az űrszemét Föld körüli eloszlása sávos szerkezetű: leg-

több szemétdarab a LEO pályán van, azon belül is 800 és 1000 km között, valamint 1400 km-en. A másik sűrűsödési sáv a GEO pálya, de a LEO-hoz képest itt 2-3 nagyságrenddel kevesebb űrszemét kering (2. ábra).

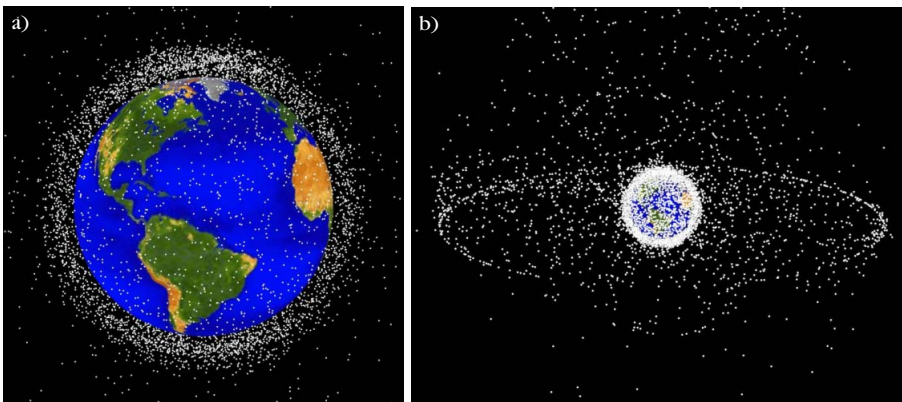
Az űrszemét mennyisége 1960 óta folyamatosan nő (3. ábra). 1957 óta 5450 rakétakilövés volt, ezek 2019-re 23 000 darab, 8400 tonnánál nagyobb össztömegű, 10 cm-nél nagyobb azonosított (nyomon követhető) űrszemetet eredményeztek, valamint közel 900 000 darab 1 és 10 cm közötti, továbbá 128 millió darab 1 és 10 mm közötti, csak statisztikai módszerekkel megbecsülhető, nyomon követhetetlen űrszeméttöredéket.

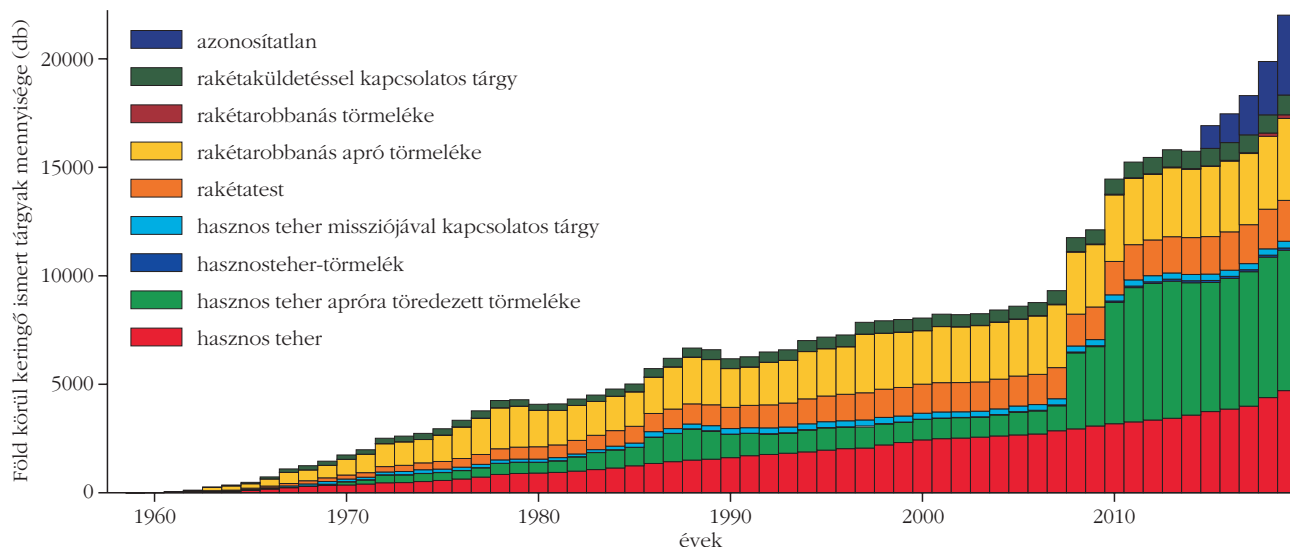
A 3. ábra a Föld körüli pályán keringő különféle eredetű tárgyak számának időbeli növekedését mutatja. 1962-től közel lineáris a növekedés, aminek meredeksége 11 évenként változik, a 11 éves napciklusnak köszönhetően. A napciklus hatással van a levegő sűrűségére, ami erősen befolyásolja a keringő űrszemét Földre hullását is. Az 1990–1991 körül megfigyelhető visszaesés a Szovjetunió megszűnésével hozható összefüggésbe. A rakétakilövések száma 1990–1991 körül közel 50%-kal esett vissza. Az űrrakéta-fellövések csökkenése, a napfolttevékenység növekedése és a fellövések utáni óvintézkedéseknek köszönhető csökkenő robbanások a Föld körüli pályán keringő tárgyak 9000 körüli, csaknem állandó számát eredményezték 1994 és 2008 között. 2008–2010 körül ugrásszerű növekedés volt, ami talán az ekkor beindult magán- és kereskedelmi célú űrhajózással is magyarázható.

## Az űrszemét forrásai

A legnagyobb űrszemét-utánpótlást a robbanások és ütközések szolgáltatják. Robbanásokat üzemanyagmaradványok vagy elektromos hibák okozhatnak, az ütközések pedig az űrszemét mennyiségének növekedésével egyre nehezebben kerülhetők el. Az első ismert űrszemétütközés 1996-ban történt LEO pályán. Az 1995-ben fellőtt *Cérise* (*Caractérisation de l'Environnement Radioélectrique par un Instrument Spatial Embarqué*) miniműhold a Föld elektromos környezetét akarta földéríteni az 1000 m – 0,3 m (300 kHz – 1 GHz) rádióhullám-tartományban a katonai műholdak számára. 1996. július 24-én a földi irányítóközpontban a *Cérise* hirtelen magasságvesztését észlelték. Először nem tudták, hogy mitől változott meg a műhold tehetetlenségi nyomatóka. Föltételezték, hogy a stabilizálórúddal történt valami, ami normális esetben a

2. ábra. Az űrszemét becsült eloszlása az alacsony magasságú LEO (a) és a geostacionárius GEO (b) Föld körüli pályákon (forrás: <https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery.html>).





3. ábra. A Föld körül keringő tárgyak számának időbeli növekedése. Az adatok az adott időszakban rendelkezésre álló érzékenységgű űrmegefigyelő műszerek által észlelt, katalogizált tárgyakra korlátozódnak. Ezért, ha a megnövekedett érzékenységgű új műszerek új tárgyakat jeleznek, akkor azok nem mindig vezethetők vissza a forrásukra. Ezek az ismeretlen eredetű, azonosítatlan tárgyak (forrás: *ESA's Annual Space Environment Report 2019*).

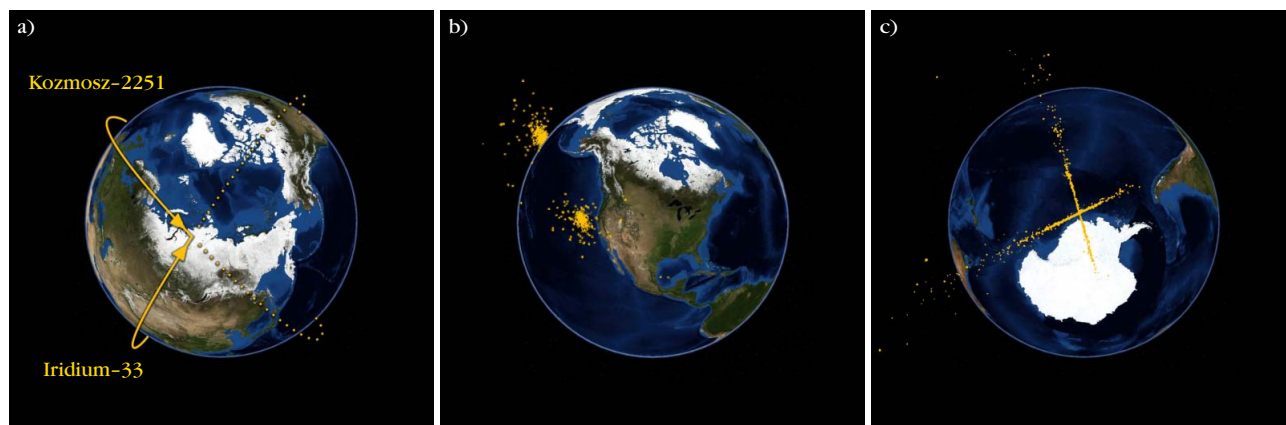
Föld felé mutat. A lehetséges okok között szerepelt, hogy egy űrszeméttel ütközhetett. Amikor utánanéztek a katalogizált, szóba jöhető tárgyaknak, kiderült, hogy a Cérise a francia Ariane-1 hordozórakéta 3. fokozatával ütközött, ami 1986-ban állította pályára a Spot-a műholdat, és azóta Föld körüli pályán kering. A szóban forgó űrszemét a műhold stabilizálórúdjának ütközött, súlyos kárt okozva ezzel.

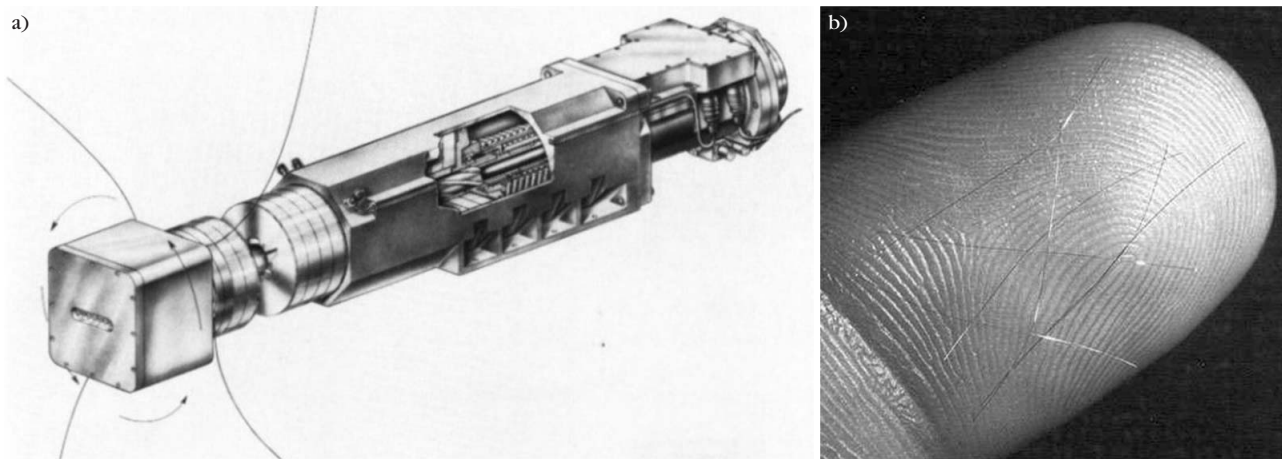
Rendkívül kicsi annak valószínűsége, hogy egy űrszemét eltalál egy ilyen vékony rudat. Ha azonban figyelembe vesszük az űrszemét mennyiségének 1996 óta bekövetkezett növekedését, bizony ilyen ütközésekkel is számolni kell. Az első műhold-műhold ütközésre 2009-ben került sor, amikor Szibéria fölött 789 km magasságban ütközött össze a még működő Iridium-33 és a már 1995 óta nem működő, de még a pályáján keringő Koszmosz-2251 távközlési műhold. Mindkét műhold megsemmisült és az ütközéskor 2300 űrszemétdarab keletkezett, amelyek 11,7 km/s sebességgel repültek szét (4. ábra). Ezen ütközéstől mindössze 430 km-re volt a Nemzetközi Űrállomás.

Űrszemét nem csak robbanásból vagy ütközésből eredhet. A nemrobbanásos forrásokból származó űrszemét általában kisebb veszélyt jelent az űrhajózás számára. Ilyen űrszemétforrás például a szilárd hajtóanyagú rakéták égéstermék-kibocsátása, ahonnan a  $\mu\text{m}$ -cm méretű  $\text{Al}_2\text{O}_3$  szemcsék erednek. Az orosz RORSAT (*Radar Ocean Reconnaissance Satellites*) műhold hűtőközegéből 5-6 cm-t is elérő NaK ötvözetgolyócskák az 1980-as években történt meghibásodáskor kerültek az űrbe. A Haystack radar 600–1000 km magasságú,  $65^\circ$  inklinációs szögű keringési körpályán észlelte őket.

Egy másik példa az egyszeri, nem túl veszélyes űrszemét-kibocsátásra a West Ford tűk (*West Ford Needles*) esete. Az USA 1960 és 1966 között, a hidegháború időszakában a szovjet ballisztikus rakéták által sugárzott rádióhullámok megzavarására és visszaverésére fejlesztette ki a MIDAS (*Missile Defense Alarm System*) katonai műholdcsaládot. A tervek szerint az 1961. október 21-én fellőtt MIDAS-4 és az 1963. május 12-én fellőtt MIDAS-6 a Föld felszíne fölött 3600 km

4. ábra. Egy Iridium-33 és egy Koszmosz-2251 távközlési műhold Szibéria fölött 789 km magasságban 2009-ben történt ütközésének helye (a), valamint a törmelék szétterülése 20 perccel (b) és 50 perccel később (c) (forrás: [https://en.wikipedia.org/wiki/2009\\_satellite\\_collision](https://en.wikipedia.org/wiki/2009_satellite_collision)).





5. ábra. A West Ford réztűadagoló (a) és néhány réztű egy ujjbegyen (b) (forrás: <https://weathermodificationhistory.com/project-west-ford-space-needles/>).

magasságban,  $90^\circ$  inklinációval keringve rádióhullámokat visszaverő réz-dipólusok millióit szórta ki a Föld körül. Azt várták, hogy e tűk egyenletesen szétszóródva egy gyűrűs védőpajzsot képeznek majd az egész Föld körül. A dipólusokat kibocsátó, 32 cm hosszú és 12,8 cm átmérőjű henger több millió,  $25,4 \mu\text{m}$  (Midas-4), illetve  $17,8 \mu\text{m}$  (Midas-6) átmérőjű réztűt tartalmazott (5. ábra). A tűk hossza pont a fele volt a kommunikációs célokat szolgáló, 8 GHz frekvenciának megfelelő rádióhullámhossznak. A tűk naftalinba voltak ágyazva, ami elpárolgott, majd a forgó tartályból szétröpültek a dipólusok. A MIDAS-4-es szétszórás után a 19,5 kg tömegű 480 millió tű közel 40 000 csomót képezve egyben maradt, amelyek közül csak 150-et sikerült katalogizálni. A MIDAS-6 már sikeresebb volt, de a kívánt védelmi célt azzal sem érték el.

Vannak reprodukálódó, nem nagyon veszélyes, „csak” rongálást okozó űrszemétforrások is. Ilyenek például a rakéták felső fokozatai, űrhajók és műholdak festék- és hőszigetelő rétegének leválásai. A  $\mu\text{m}$ -mm méretű becsapódó részecskék e rétegekről további szemcséket választanak le, amelyek további ütközések során kisebb károkat okozhatnak. Például 2001-ig az űrsiklók (*Space Shuttle*) 80 üveglablakát kellett kicserélni a nekik ütköző mikrorészecskék okozta sérülések miatt. Az Európai Űrügynökség (ESA) tenerifei 1 m-es teleszkópjával nagy felület/tömeg arányú részecskéket észlelnek, amelyek eredetét még nem tudják pontosan [2]. Valószínűleg a GEO pályán keringő műholdokról levált hőszigetelésből származnak.

A nagy sebességgel történő ütközések hatását földi laboratóriumokban is vizsgálják. A meteorok sebessége elérheti a  $70 \text{ km/s}$ , az űrszemété pedig a  $15 \text{ km/s}$  értéket is. Az ilyen sebességgel ütköző, 1 cm-nél nagyobb, de 10 cm-nél kisebb részecskék horpadást vagy kis karcot okoznak, esetleg lyukat ütnek az űrhajók falán. A 10 cm-nél nagyobbak pedig akár el is téríthetnek egy űrhajót a pályájáról. Egy  $d$  átmérőjű űrszemét közel  $2d$  mély és  $5d$  átmérőjű krátert üt egy alumíniumlemezen.

## A Kessler-szindróma

Donald J. Kessler NASA-kutató írta le, hogy ha a LEO pályán az űrszemét sűrűsége meghalad egy kritikus értéket, akkor ütközési láncreakció indulhat be, ami annyi ütközést és újabb törmeléket kelthet, hogy évtizedekre lehetetlenné teheti az űrhajózást és távközlést [3]. Sajnos mára már elértük e kritikus értéket! Ha máától kezdve nem lőnének föl egyetlen űreszközt sem, már akkor is annyi űrszemét kering, ami bármikor beindíthatja a Kessler-szindrómát. A *Gravitáció* című filmben (2013, angol-amerikai tudományos-fantasztikus filmdráma, rendező: Alfonso Cuarón) két látványos szimuláció is szerepel e láncreakcióról és katasztrofális roncsoló hatásáról.

E hét Oscar-díjjal is kitüntetett film rövid cselekménye a következő:<sup>1</sup> Dr. Ryan Stone a Hubble űrteleszkópot javítja, mialatt Matt Kowalsky a szkafanderben történő navigálást lehetővé tevő új hátizsákot próbálja ki. Eközben az oroszok az egyik kiöregedett műholdjukat semmisítik meg, aminek darabjai további műholdakat találnak el, miáltal beindul a Kessler-szindróma. Az így keletkező száguldó űrszemétlavina eltalálja a csapat űrsiklóját, amit használhatatlanná tesz és megöl három űrhajóst. A kezdő Dr. Stone (*Sandra Bullock*) és a tapasztalt Kowalsky (*George Clooney*) elszakadnak az űrsiklótól, hogy a kísérleti hátizsákkal menedéket találjanak a világűrben. A levegőjük és a hátizsák hajtóanyaga vesztesen fogy, miközben egymáshoz kapcsolva keresik a menekülési lehetőséget. A földi irányítással megszakad a kapcsolatuk, mert a Kessler-szindróma miatt a távközlési műholdak sem működnek. Kowalsky a már kimerült hátizsákjával együtt elszakad a Nemzetközi Űrállomásba kapaszkodó Dr. Stone-tól. Az ismét felbukkanó, keringve száguldó törmelékklavina ezt az állomást is megsemmisíti. Végül kalandos körülmények között Dr. Stone az egyetlen túlélő, aki épségben visszatér a Földre.

<sup>1</sup> Forrás: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Gravit%C3%A1ci%C3%B3\\_\(film,\\_2013\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Gravit%C3%A1ci%C3%B3_(film,_2013))

## Az űrszemét műszeres észlelése

Jelenleg a LEO pályán kering az űrszemét 75,7%-a. Itt a legalább 10 cm átmérőjű részecskék követhetők nyomon radarral. A GEO pályán kering az űrszemét 12,5%-a, ahol már csak az 1 m-nél nagyobb átmérőjű darabok észlelhetők. A többi űrszemét közel 20 000 km-rel kering a Föld felszíne fölött. Négy olyan földi észlelőállomás van, amely radarral a LEO pályán keringő, 1 m-nél nagyobb átmérőjű, újonnan észlelt űrszemétdarabok eredetét is meg tudja állapítani: az észak-amerikai USSPACECOM (*United States Space Command*) és SSN (*Space Surveillance Network*), az orosz SSS (*Space Surveillance System*) és a francia GRAVES (*Grande Réseau Adapté à la Veille Spatial*). Több más megfigyelőállomás is képes e három nagy állomás adatainak felhasználásával nyomon követni a nagyobb űrszemétrészecskéket, mint például a bonni (ESA) TIRA (*Tracking and Imaging Radar*), a tengeri (ESA) TOGS (*Tenerife Optical Ground Station*), a norvég EISCAT (*European Incoherent Scatter Scientific Association*), valamint a francia Armor és az angol Fylingdales radarok.

## Az űrszemét Földre hullása

Egy űrszemétdarab akkor a legveszélyesebb, ha nagy a tömege, nagy az ütközés valószínűsége, és nagy magasságban kering, miáltal hosszú a keringési élettartama [4]. A helyzet a LEO pályán, 800–1000 km magasságban a legkritikusabb. Az űrszemét megsemmisítésének egyetlen módja, ha sikerül bejuttatni a Föld légkörébe. Ekkor ugyanis a légellenállásnak köszönhető fékeződése miatt fölhevül, kigyullad és elég/elpárolog a meteorokhoz hasonló fényjelenség kíséretében. A NASA adatai [5] szerint az utóbbi 50

évben napi átlagban 1 űrszemét hullott a Földre. A légkört elérő űrszemét előbb-utóbb lejut a Földre. A kisebbek elégnek, a nagyobbak nem teljesen, de mivel a Föld nagyobb része víz, illetve lakatlan terület, ezért nagy valószínűséggel nem okoznak kárt. Nagyon kis valószínűséggel előfordul, hogy az űrszemét károkat okoz az embereknek. Itt csak néhány ilyen példát említünk [4]:

- 1969-ben egy Szibéria partjai mellett hajózó japán vitorlás öt tengerészét sebesítette meg egy szovjet űrhajóról leesett roncs.

- A küldetését 1974-ben befejező első amerikai űrállomás, a Skylab 1979. július 11-én bekerült a Föld légkörébe, ahol sok ezer darabra hullva űrszemétesőt idézett elő az Indiai-óceán és Nyugat-Ausztrália fölött. 1979-ben az erős naptevékenység miatt messzebbre terjedt ki a földi légkör felső határa, a légsűrűlódás miatt a Skylab a tervezettnél hamarabb került közelebb a Földhöz. 1973 és 1974 között 24 hetet működött.

- 1986 januárjában 73 másodperccel a felszállás után felrobbant a Challenger űrsikló hét űrhajóssal a fedélzetén.

- 1997-ben egy oklahomai nőt sebesített meg egy 10 cm × 13 cm méretű, űrből lehullott fémlap.

- 2001. január 12-én Szaúd-Arábia sivatagjába hullott le egy 1993-ban fellőtt műhold PAM-D rakétájának felső fokozata (6. ábra).

- 2003. február 1-jén robbant föl a Columbia űrsikló. Külső burkolata már fölszálláskor megsérült, ezért a 15 napos repülés után visszatérőben a Földre, a légkörbe érve az űrhajó belső részei is felforrósodtak, így leszállás közben hét űrhajóssal a fedélzetén darabjaira hullott. 83 000 maradványt találtak szétszóródva a kilövés helyének 10 mérföldes körzetében (7. ábra). De találtak darabokat Texas, Nevada, Utah, Új-Mexikó, Arkansas és Louisiana államokban is. 15 évvel a katasztrófa után az emberek még mindig találnak földre hullott maradványokat. Egyik például átszakította egy fogorvosi rendelő tetejét.

- 2007. március 7-én egy orosz kéműhold darabjait látta egy utasszállító gép pilótája, közel 10 km-re a repülőgéptől.

## Az első űrtakarítási küldetés

A Föld körül egyre nagyobb számban keringő űrszemét mennyisége a kereskedelmi űrutazás beindulásával még jobban meg fog növekedni. Mielőtt föllépne a katasztrófális Kessler-szindróma, cselekedni kell. Az Európai Űrügynökség a világon elsőként egy űrmissziót fog indítani a világűrben hátrahagyott hulladékok begyűjtésére. A tervek szerint 2025-ben induló, 120 milliós eurós keretből gazdálkodó *ClearSpace 1*

6. ábra. A 2001. január 12-én Szaúd-Arábia sivatagjába hullott roncs, ami egy űrrakéta felső fokozata volt (forrás: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv6i2.pdf>).



űrszemét-takarítási küldetés eDeorbit űrhajójának első feladata az Envisat műhold Föld légkörébe történő beléptetése lesz, ahol azután elég. Az előkészületek 2020 márciusában kezdődtek.

#### Irodalom

1. Slíz-Balogh J., Horváth D., Szabó R., Horváth G.: Dynamics of spherical space debris falling to Earth: Time, velocity and angle of impact versus launch height, direction, speed and size of re-entry particles. *Astronomical Notes* 341/3 (2020) 245–247.
2. ESA honlapja: [http://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Debris](http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris)
3. Kessler D.: Collisional cascading: the limits of population growth in low Earth orbit. *Advances in Space Research* 11 (1991) 63–66.
4. Klinkrad H.: *Space Debris, Models and Risk Analysis*. Springer: Heidelberg (2006)
5. NASA honlapja: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/news/orbital\\_debris.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html)



7. ábra. A szerencsétlenül járt Columbia űrsikló megtalált darabjai (forrás: <https://www.space.com/19436-columbia-disaster.html>).