

Hosszú távú dózistérképezés a Nemzetközi Űrállomáson – egy teljes napciklus eredményei

Szabó Julianna,
Strádi Andrea,
Hirn Attila

ELKH
Energiatudományi
Kutatóközpont,
Űrkutatási
Laboratórium,
Budapest

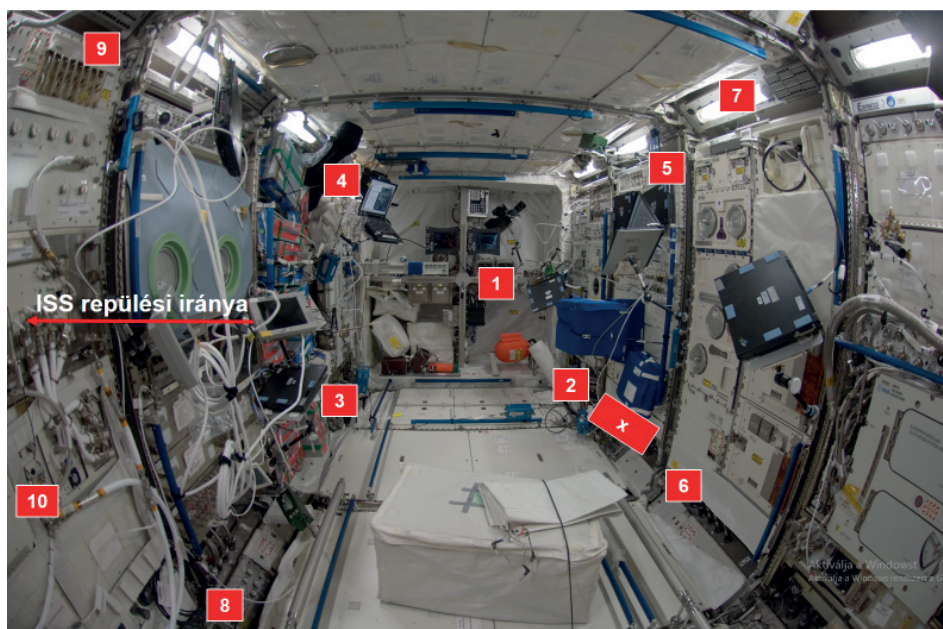
Az űrben kialakuló sugárzási környezet nagymértékben különbözik attól, amit a földfelszínen észlelünk. Főként nagyenergiás ionok alkotják a hidrogéntől (protontól) a vasig. Térben és időben is változó, az űrhajósokra és az űrben keringő eszközökre gyakorolt hatása miatt folyamatos monitorozást igényel.

A DOSIS (2009–2011) és DOSIS-3D (2012–) kísérletek célja a Nemzetközi Űrállomás (ISS) Columbus moduljában kialakuló sugárzási tér feltérképezése. A mérésorozat most jutott el abba a fázisba, hogy láthatjuk a dózisviszonyok változását egy teljes napciklus folyamán.

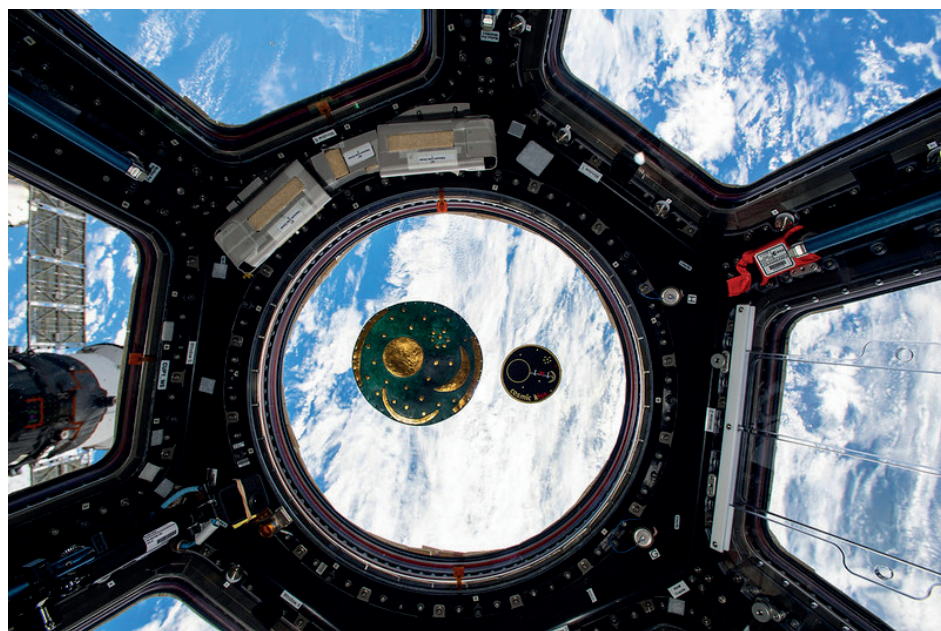
DOSIS KÍSÉRLETEK

A programban a Német Légügyi és Űrkutatási Központ (DLR) vezetésével számos egyetem és kutatóintézet mellett az Energiatudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriuma (EK ŰKL) is részt vesz [1]. A méréseket passzív, energiaellátást nem igénylő sugárzásmérő detektorokkal végzik, amelyeket a Columbus modul 11 különböző pontján helyeznek el az űrhajósok (1. ábra). Ezáltal képet kaphatunk arról, hogy az eltérő árnyékolású pozíciókban milyen sugárzási tér alakul ki. A detektorcsomagokat körülbelül féléves periódusokban cserélik, igazodva az űrállomás személyzetének cseréjéhez. A mérőeszközök a repülés teljes időtartama alatt gyűjtik az ionizáló sugárzások által leadott dózist, kiértékelésükre pedig utólagosan, a földi laboratóriumokba való visszaérkezés után kerül sor.

Alacsony Föld körüli pályán a dózisviszonyokat nagymértékben befolyásolja a naptevékenység és a pálya magassága is. A változásokat jól követik a hosszú távú mérési adatok, amelyeket immár 2 DOSIS és 20 DOSIS-3D küldetés során szereztünk. A 19. küldetés eltért a többitől, ekkor ugyanis két szett dózismérőt vittek magukkal az űrhajósok (19-es és 20-as sorszámmal). Ezekből csak az egyik került az európai Columbus modul megszokott mérőpozícióiba, a másik Matthias Maurer német űrhajós Cosmic-Kiss névű küldetése keretében az amerikai (6 pozíció) és az orosz szegmensben (4 pozíció) regisztrálta egyidejűleg a sugárzás mennyiségét és minőségét (2. ábra).



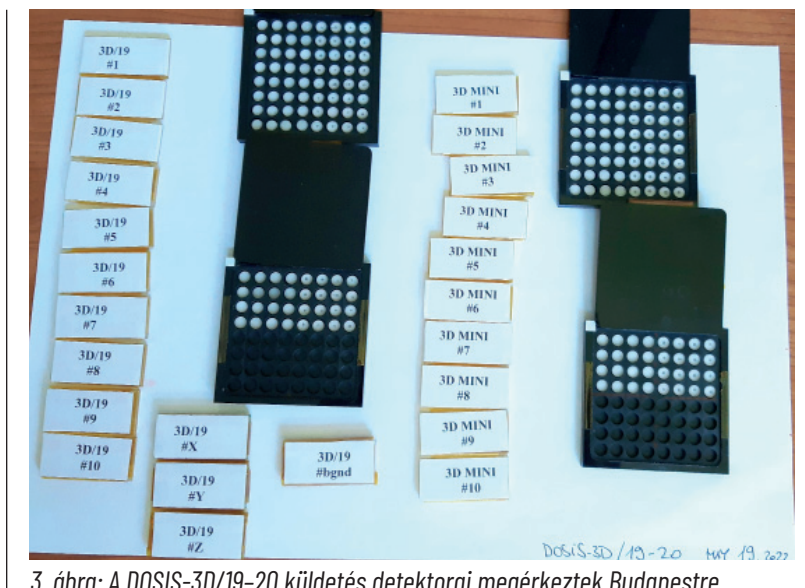
1. ábra: Detektorcsomagok elhelyezkedése a Columbus modulban. A 3, 4, 8, 9 és 10-es pozíciók a menetirány szerinti elülső, míg az 1, 2, 5, 6 és 7-es pozíciók a hátsó falon vannak. A 11-es (X) az aktív mérőeszközöket tartalmazó doboz mellett található. (Fotó: NASA / ESA)



2. ábra: A DOSIS-3D/20 fázis egyik narancssárga detektorcsomagja a Cupola falához rögzítve. (Fotó: Matthias Maurer)

ALKALMAZOTT MÉRŐESZKÖZÖK, DÓZISSZÁMÍTÁS

Az EK ŰKL termolumineszcens detektorokból (TLD) és szilárdtest nyomdetektorokból felépített csomagokkal vesz részt a kísérletben. A 3. ábrán a 19. küldetésből visszaérkezett dózismérőket láthatjuk. A felírt csomagocskákban vannak a nyomdetektorok, a fehér kerek tabletták a TLD-k.

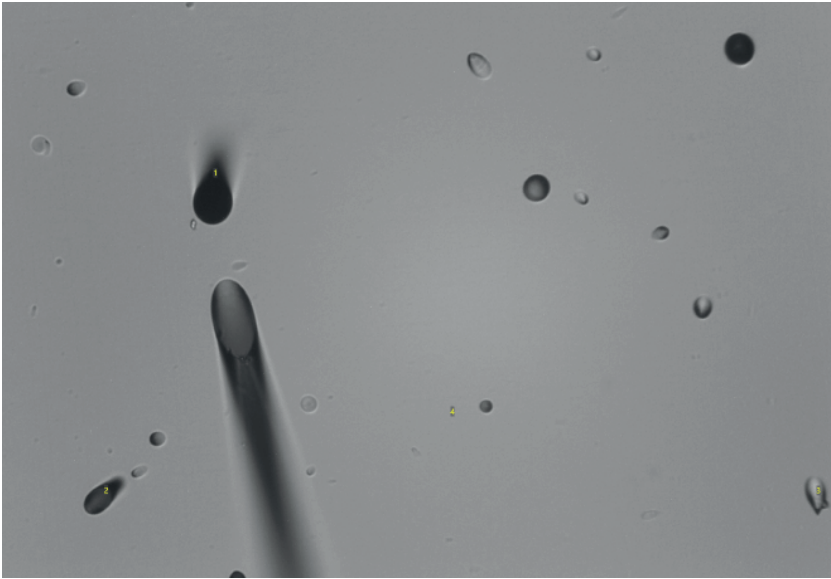


3. ábra: A DOSIS-3D/19-20 küldetés detektorai megérkeztek Budapestre

A TLD-ként használt lítium-fluorid olyan kristályos anyag, melyben a sugárzás hatására reverzibilis változások történnek a kristályszerkezetben. Kiolvasáskor magas hőmérsékletre fűtjük fel, ekkor a kristályrács visszarendeződik és közben az elnyelt dózissal, azaz az anyag egységnyi tömegében elnyelt energiával arányos mennyiségű fényt bocsát ki, amely jól mérhető. Ezután minden detektort egyénileg kalibrálni kell, ekkor ¹³⁷Cs forrás alkalmazásával, ismert dózissal sugarazzuk be őket, majd ismételt kiolvasjuk. A két kiolvasás során mért beütésszámok arányából, a kalibráló dózis ismeretében számolható az űrben exponált detektorok által elnyelt (abszorbeált) dózis.

A szilárdtest nyomdetektorok vékony, átlátszó műanyag lapkák. A detektorok felületén apró lyukakat hoznak létre a becsapódó ionizáló részecskék, amelyeket kémiai kezeléssel (nátrium-hidroxid oldatban való maratással) fénymikroszkóp számára is látható méretűre lehet felnagyítani. A 4. ábrán egy ilyen detektorról készült felvétel látható.

Az így kialakult részecskenyomok geometriai paramétereinek (átmérő, hossz, mélység) mérésével, megfelelő kalibráció után következtethetünk a részecskék által leadott energiára, ezáltal a detektort ért dózissra. A nyomdetektorok nem csak az elnyelt dózis mérésére alkalmasak, hanem az ún. dózissegyenérték meghatározására is, mivel képesek a részecskék szétválogatására azok egységnyi úthosszon leadott energiája (LET, lineáris energiaátadási tényező) szerint. Az eltérő LET értékű ré-



4. ábra: Ionizáló részecskék nyomai a nyomdetektor felszínén, 176 napos űrutazás után.
A képmező mérete a valóságban $310\ \mu\text{m} \times 214\ \mu\text{m}$

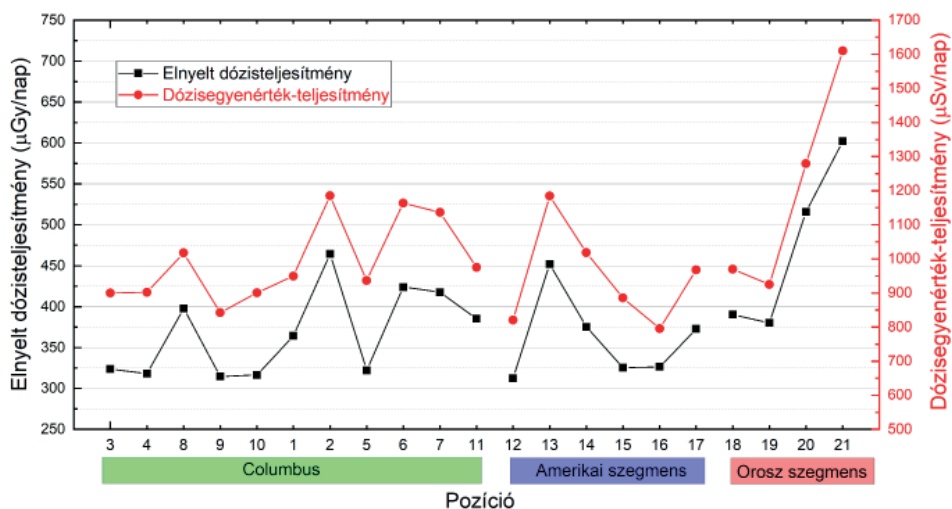
szecskék ugyanis más-más (biológiai) károsító hatással bírnak, ennek megfelelően más és más a hozzájuk rendelhető minőségi tényező. Az elnyelt dózist megszorozva a minőségi tényezővel számolható a dózisegyenérték, ami már figyelembe veszi a sugárzás biológiai hatásait is.

A TLD-k főleg a $10\ \text{keV}/\mu\text{m}$ -nél kisebb, míg a nyomdetektorok az ennél nagyobb LET értékű sugárzásra érzékenyek. A kétféle detektor tehát kiegészíti egymást, az általuk mért értékek konvolúciójával kaphatjuk meg a teljes elnyelt dózist és dózisegyenértéket [2].

EREDMÉNYEK

A dózisértékek pozíciófüggésének szemléltetésére a 19. küldetést választottuk, hiszen ennek során a Columbus mellett az ISS egyéb moduljaiban is történtek mérések. Az eredményeket az 5. ábra mutatja be. (A teljes dózisértékeket a küldetés időtartamával elosztva kapjuk meg a megfelelő teljesítményeket, amelyek 1 napra vonatkoztatott adatok, ezek szerepelnek az ábrán).

Az első 11 pozíció a Columbusban, a 12–17-es az amerikai szegmensben, míg a 18–21-es az orosz szegmensben volt. Az eltérések abból fakadnak, hogy a lokális árnyékolás változó, minden modul falvastagsága más és más, de az adott pozíció közelébe helyezett tárgyak is befolyásolják a kialakuló sugárzási teret. Egyrészt elnyelik a sugárzás egy részét, másrészt az elsődleges sugárzás hatására másodlagos sugárzást bocsáthatnak ki. Az elnyelt dózisteljesítmény (D) többnyire $\sim 310\text{--}460\ \mu\text{Gy}/\text{nap}$ között változott, az orosz szegmens 20-as (MLM) pozíciójában meghaladta az $500\ \mu\text{Gy}/\text{napot}$, a 21-esben (MRM2) pedig elérte a $600\ \mu\text{Gy}/\text{napot}$. A megfelelő dózisegyenérték-teljesítmény (H) értékek $\sim 800\text{--}1200\ \mu\text{Sv}/$



5. ábra: A DOSIS-3D/19-20 fázisban mért dózismennyiségek, az elnyelt dózisteljesítmény (alsó görbe) és a dózisegyenérték-teljesítmény (felső görbe)

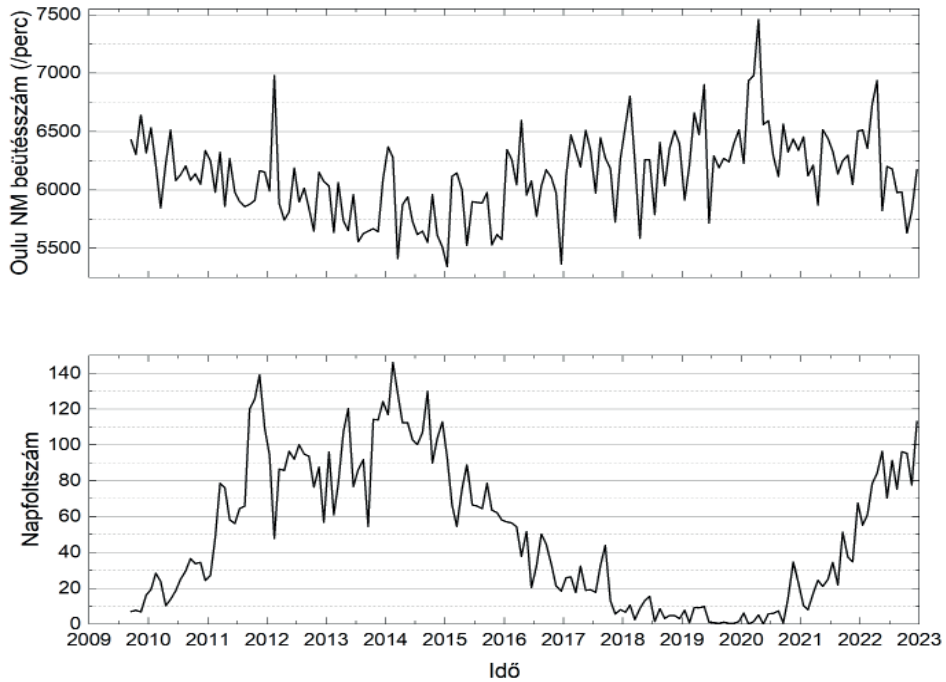
nap közti ingadozást mutatnak, az utóbbi két pozícióban elérve az 1300, illetve 1600 $\mu\text{Sv}/\text{napot}$. Összehasonlításképpen a Föld népessége természetes forrásokból átlagosan 2400 μSv sugárterhelést kap évente, az ISS-en ennek akár a 250-szerese is előfordulhat.

A Columbusban megfigyelhető mintázat a DOSIS-3D többi fázisában is hasonlóan alakult. Az ISS menetiránya szerinti előlő oldal (3, 4, 8, 9, 10) általában kisebb dóziseket mérünk, mint a hátsó oldalon (1, 2, 5, 6, 7, 11). Az effektív árnyékolást valószínűleg nagyobb mértékben befolyásolja a Columbus modul és az űrállomás teljes tömege, mint a lokális árnyékolás [1]. Ez utóbbinak is lehet azonban hatása, ezért kaptunk a kísérletsorozat szinte minden fázisában ugyanilyen mintázatot.

A következőkben a hosszú távú mérési eredményeket mutatjuk be. Két fontos tényező van, amelyet ezzel kapcsolatban figyelembe kell vennünk:

- az ISS pályamagassága, amelyet 2011-ben több mint 70 km-rel megemeltek, azóta csak kisebb mértékben változott;
- a naptevékenység, amely a 2009-es minimum után 2014–2015-ben elérte a maximumot, hogy aztán 2020-ban újabb minimum következzen. Ezt szemlélteti a 6. ábra. Az ábra alsó részén szerepelnek a Nap aktivitására jellemző napfoltszámok. Erősödő naptevékenység hatására a galaktikus háttérsugárzás intenzitása csökken. Ezt mutatják az ábra felső részén az Oulu neutronmonitor (NM) által mért beütésszámok.

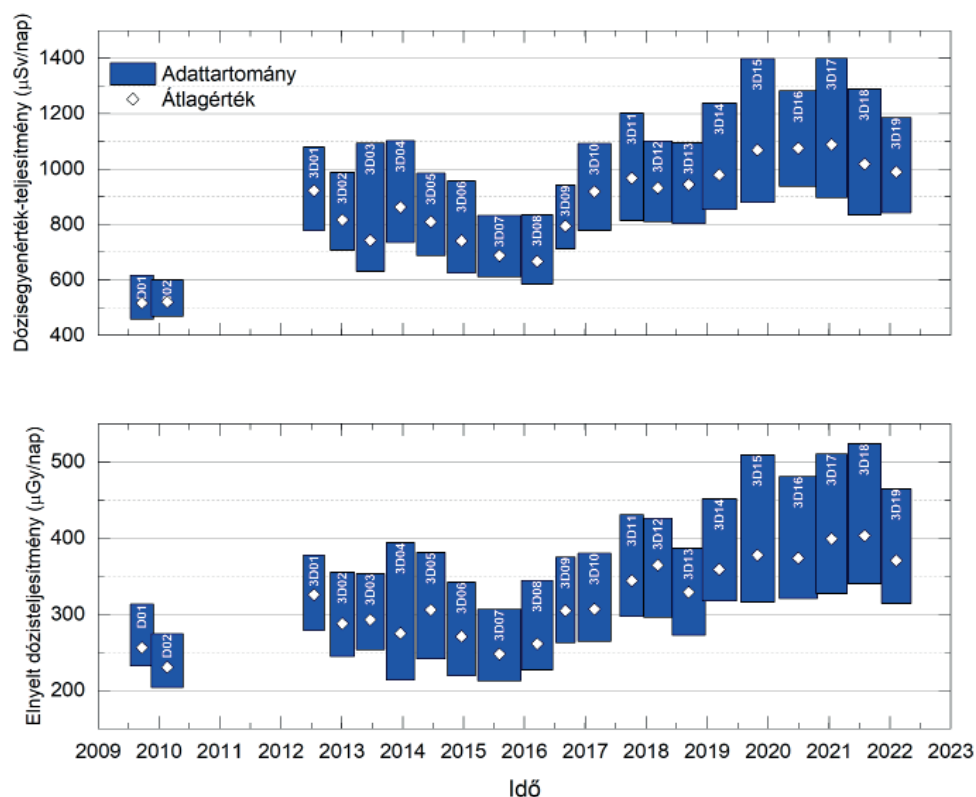
Az eddigi két DOSIS és tizenkilenc DOSIS-3D mérési fázis eredményeit tüntettük fel a 7. ábrán, alul az elnyelt dózisteljesítmény (D), felül a dózisegyenérték-teljesítmény (H) látható. A kis rombuszok az átlagos értékeket, az oszlopok az adott fázisban kapott minimum- és maximumértékek közti tartományt jelölik. Megfigyelhető, hogy a sugárzási környezetben bekövetkező változásokat jól követi a dozimetriai mennyiségek alakulása.



6. ábra: A napfoltszám és az Oulu neutronmonitor által mért beütésszámok változása a DOSIS és a DOSIS-3D kísérletek idején. Mindkét esetben a havi átlagértékek szerepelnek az ábrán. (Az adatok forrása: [3,4])

A DOSIS/1 és 2 fázisok esetén a D és H értékek durván 200–300 $\mu\text{Gy}/\text{nap}$, illetve 450–600 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ között alakultak, kis csökkenéssel a 2. fázisra a naptevékenység enyhe emelkedése miatt. A DOSIS-3D/1 fázishoz érkezve éles növekedés észlelhető, hiszen a megemelt pályamagasság miatt az ISS több időt töltött a dél-atlanti anomália térsége fölött, így jóval nagyobb protonfluens érte. (A fluens az egységnyi felületen áthaladó részecskék számát jelenti.) A továbbiakban az ISS a megemelt magasságon maradt, viszont a naptevékenység növekedett a 2014–2015-ös maximumig, így a DOSIS-3D/7-es fázishoz érve D értéke lecsökkent a DOSIS/1–2 szintjére. Innen emelkedő tendenciát tapasztaltunk, a DOSIS-3D/17–18-nál érték el a dózismennyiségek a maximumot. A legnagyobb értékek 340–520 $\mu\text{Gy}/\text{nap}$, illetve 900–1400 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ között változtak. A 2021 végén induló 19–20-as fázisban már kisebb értékeket mértünk. Jelenleg a 21-es fázis detektorainak kiértékelésén dolgozunk, amelyek 2022-ben repültek. Ezek az adatok még nem kerültek fel az ábrára, de már látjuk, hogy a csökkenés folytatódik.

Az eddigi eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy az ionizáló sugárzások által keltett dózisok mérésére hosszú távon és folyamatosan szükség van, hiszen a lokális árnyékolás, a pályamagasság és a naptevékenység változásai nagymértékben befolyásolják ezek alakulását. A DOSIS-3D méréssorozat 2024 végéig biztosan folytatódik, de tervben van a meghosszabbítása az ISS teljes élettartamának idejére.



7. ábra. Az elnyelt dózisteljesítmény és a dózsigyenérték-teljesítmény változása az ISS Columbus moduljában a DOSIS/1-2, valamint a DOSIS-3D/1-19 küldetések során

Köszönettel tartozunk a DLR munkatársainak, hogy lehetővé teszik számunkra a DOSIS programban való közreműködést. Résztvételünket a 4000124183 sz. ESA/PRODEX szerződés keretében finanszíroztuk.

Irodalomjegyzék

- [1] Berger T. et al. (2016): DOSIS & DOSIS-3D: long-term dose monitoring onboard the Columbus Laboratory of the International Space Station (ISS). *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6, A39
- [2] Hajek M. et al. (2008): Convolution of TLD and SSNTD measurements during the BRADOS-1 experiment onboard ISS (2001). *Radiation Measurements*, 43, 1231
- [3] World Data Center for the production, preservation and dissemination of the international sunspot number, Royal Observatory of Belgium, Brussels, <https://www.sidc.be/silso/>
- [4] Cosmic Ray Station of the University of Oulu, Sodankyla Geophysical Observatory, <https://cosmicrays.oulu.fi/>