

PILLE MÉRÉSEK A NEMZETKÖZI ŰRÁLLOMÁSON 2003 ÉS 2021 KÖZÖTT

Deme Sándor*, Apáthy István, Hirn Attila, Pázmándi Tamás és Pinczés Patrik
Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest, Konkoly Thege M. út 29–33.

*deme@aeki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2023.04.03.

Közlésre elfogadva: 2023.05.01.

The International Space Station is considered as a special radiation workplace where astronauts work in an intense radiation field. It is a special workplace because the dose limits on Earth cannot be applied and, therefore, specific regulations are required. We describe the radiation field at the orbit of the space station and inside the space station, we discuss the career dose limits for astronauts, and we present the Pille dosimetry system used on board the space station. In the second part of the article, we review nearly 20 years of measurements, give the average dose rates calculated from the 1.5-hour cycle automatic measurements, broken down in half-years, and compare them with the expected effects of solar cycles. Extra doses from extravehicular activities and dose rates at the South Atlantic Anomaly are also discussed.

Keywords – International Space Station, radiation field, Pille dosimeter system

A Nemzetközi Űrállomás egy különleges sugárveszélyes munkahelynek tekinthető, ahol az űrhajósok intenzív sugárzási térben dolgoznak. Azért különleges a munkahely, mert a földi dóziskorlátok nem alkalmazhatóak, egyedi szabályozásra van szükség. Közleményünkben ismertetjük az űrállomás pályájánál és az űrállomás belsejében kialakult sugárzási teret, foglalkozunk az űrhajósok életpálya-dózis korlátaival, bemutatjuk az űrállomás fedélzetén alkalmazott Pille dózismérő rendszert. A cikk második felében áttekintjük a közel 20 év mérési eredményeit, félévenkénti bontásban megadjuk a 1,5 órás ciklusú automata mérési eredményekből számított átlagos dózisteljesítményeket, összehasonlítjuk a napsiklusok várható hatásával. Tárgyaljuk az űrsétáknál mért extra dózisokat és a Dél-atlanti Anomáliánál mért dózisteljesítményeket.

Kulcsszavak: Nemzetközi Űrállomás, sugárzási tér, Pille dózismérő rendszer

BEVEZETÉS

Közel két évtizede folyik dózismérés a Pille műszerrel a Nemzetközi Űrállomás (a továbbiakban az angol ISS rövidítést használjuk) fedélzetén. Cikkünkben ezeket a méréseket tekintjük át. A méréseket lényegében csak monitorozásnak tekinthetjük, személyi dózisokat ezek alapján csak nagyon korlátozottan adhatunk meg. Charles Simonyi mérései szerint a személyi dózismérőként használt dózismérő által mért dózisteljesítmény jelzését egységnyinek vesszük, akkor ehhez képest a munkatérben a dózisteljesítmény 25%-kal volt kisebb, míg a hálókörben 50%-kal nagyobb.

Egy további mérés szerint a Pille készülék belsejében mérhető dózisteljesítmény 90%-a a környezetében lévő dózisteljesítménynek. Ebből durva közelítéssel az mondható, hogy a Pille készülékkel mért dózisteljesítmény a személyi doziméter várható jelzésének mintegy 70%-a.

A következő kérdés, hogy milyen a Pille személyi dózismérő jelzése és a feltételezhető személyi dózis közötti összefüggés. A Pille dózismérők kalibrálása a hengeres dózismérő hossz tengelyére merőlegesen beeső ^{137}Cs nyalábbal történik. Ugyanennek a dózismérőnek a jelzése izotróp sugárzási térben – a dózismérő szögfüggése miatt – csak az érték mintegy 90%-a lenne, ez 10%-os felülmérést jelent az általában fellépő közel izotróp térhez

viszonyítva. Az ISS sugárzási terének egy része $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (víz) értéknél nagyobb LET értékű, amit a Pille $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ termolumineszcens anyaga rosszabb hatásfokkal mér, mint a ^{137}Cs sugárzásét, ezen felül a nagy LET értékű sugárzás minőségi tényezője sokkal nagyobb, mint a kalibráló sugárforrásé. 2001-ben – a nemzetközi DOSMAP kísérletben – az ISS NASA-moduljában hosszú idejű méréseket végeztek többek között CR-39 nyomdetektorokkal kiegészített Pille dózismérőkkel. A nyomdetektoros mérések eredményeivel korrigálni lehetett a Pille méréseit a $>10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (víz) tartományban. A mérések azt mutatták, hogy a $>10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ tartományban mért dózisarulék a Pillével a $<10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ tartományban mért dózissal kb. 10%-a.

A Pille nem méri az űrállomáson lévő neutronok dózisát, így a személyi dózisegyenérték sokkal nagyobb, mint a Pille jelzése. További nehézséget okoz, hogy a sugárvédelmi szabályozás effektív dózissal és nem dózisegyenértékre vonatkozik, így egyértelműen kimondható, hogy a Pille által mért eredmények alapján elsősorban a különböző mérési pontokon és időpontokban érvényes dózisok arányára következtethetünk. Ugyanakkor a Pille készülék monitorozásra és egyéb összehasonlító mérések végzésére nagyon jól használható. Ennek a ténynek megfelelően kell kezelni a cikk további részében megadott dózisokat.

A továbbiakban tekintsük át az ISS pályája mentén és az ISS belső terében várható sugárzás jellemzőit.

A SUGÁRZÁSI TÉR AZ ŰRÁLLOMÁS PÁLYÁJÁNÁL

A Föld körüli pályán keringő Nemzetközi Űrállomás esetében a sugárzási tér igen összetett, időben és térben nagyon inhomogén: befolyásolja a pályamagasság, a pillanatnyi földrajzi helyzet és az aktuális naptevékenység, szögeloszlása erős anizotrópiát mutat. Az irodalomban a sugárzás csoportosítására több, esetenként egymásnak ellentmondó szempontot találunk, amelyekben gyakran keverednek a sugárzás eredetére és a kialakult térre vonatkozó jellemzők. A tényleges helyzetet egyértelműbben jellemzi, ha különválasztjuk a részecskék eredetére, illetve az alacsony Föld körüli pályán keringő objektumok szempontjából kialakult sugárzási térre vonatkozó jellemzőket. Eredet szerint megkülönböztethetjük az időben közel állandó galaktikus és az időben nagymértékben változó intenzitású és spektrumú szoláris sugárzást. A sugárzás fajtája szerint elektronokról, töltött nehéz részecskékről és fotonokról, míg az eloszlást tekintve befogott és nem befogott részecskékről beszélhetünk.

A galaktikus kozmikus sugárzás elsősorban nagyenergiájú – a Naprendszeren kívülről érkező – töltött részecskékből áll, a csillagközi térben általában állandó intenzitású és közel izotróp. 1-2%-a elektron és pozitron, 86%-a proton, 12%-a alfa részecske, de emellett kis gyakorisággal a periódusos rendszer legtöbb elemének ionját tartalmazza.

A szoláris sugárzást – melynek intenzitása a naptevékenység függvényében széles határok között változik – a Nap folyamatosan kifelé áramló koronája alkotja, melynek átlagos sebessége 400 km/s . Fő összetevői protonok és elektronok, de a protonoknál 10–40-szer kisebb arányban előforduló alfa-részecskéket és a vasig bezárólag nehéz magokat is tartalmaz, a galaktikus sugárzásnál lényegesen lágyabb spektrummal. Mennyiségük a Naptól való távolsággal csökken, Föld távolságnyira $6\text{--}10 \text{ proton}/\text{cm}^3$. A részecskék energiája néhány MeV-től több ezer MeV-ig terjedhet. A sugárzás intenzitása általában kicsi, csak az idő 1%-ában emelkedik a galaktikus sugárzás fölé. Azonban nagy napkitörések esetén a galaktikus sugárzás intenzitását három-négy nagyságrenddel is felülmúlhatja, így az emberes űrrepüléseknél fellépő legnagyobb kockázati tényezők közé sorolható.

Napkitörések esetén töltött részecskék – döntően protonok, kismértékben alfa és nehezebb töltött részecskék – lökődnek ki a Nap felszínéről, energiájuk több GeV is lehet. Maximális napaktivitás során évente átlagosan tíz kitörés figyelhető meg, míg a

naptevékenység minimumánál csupán évente egy. A legnagyobb kitörésekkor – melyek általában a naptevékenység maximumát követően jönnek létre – akár 10^{10} részecske juthat el Föld távolságnyra négyzetcentiméterenként.

Alacsony Föld körüli pályán az évi néhány napkitöréstől eltekintve a dózis jelentős része a kozmikus háttérsugárzásból származik. A galaktikus és a szoláris kozmikus sugárzás kölcsönhatásban áll egymással. Napkitörések idején a sugárzási szint sok nagyságrenddel megnőhet, ilyenkor a Naprendszeren belül a szoláris kozmikus sugárzás intenzitásának növekedésével párhuzamosan a galaktikus kozmikus sugárzás szintje csökken. Nagyobb naptevékenység esetén kisebb a dózisteljesítmény, mert a kiáramló napszél töltése miatt a galaktikus részecskéknek a naptevékenység minimuma alatt 470 MeV, maximuma alatt 1200 MeV energiának megfelelő potenciálgátat kell leküzdeniük.

A galaktikus és a szoláris sugárzás főbb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

A földfelszínen kettős „védőpajzs” alatt élünk. A Föld mágneses tere a kozmikus sugárzás töltött részecskéit eltéríti, befogja, ezáltal jelentős védelmet nyújt a kozmikus sugárzás lágy összetevői ellen, és védi a légkört a napszél eróziós hatásával szemben. A másik védőpajzs a légkör, amelynek az űrállomások magasságában csak közvetett, töltött részecske befogó hatása van.

1. táblázat. A galaktikus és a szoláris sugárzás főbb jellemzői

Galaktikus sugárzás	Szoláris sugárzás
- 50 MeV–10^{14} MeV - 86% proton, 13% alfa, 1% C, N, O stb. - a Földön több száz méter mély bányákban is észlelhető - fluxus: $1 \cdot 10^6$ részecske/(hét$\cdot$cm²), ami körülbelül 2,5 mGy/hét, azaz 130 mGy/év dózist felel meg az űrállomáson - mivel nagy az energiája $\rightarrow$ nagy az áthatolóképesége $\rightarrow$ ahhoz, hogy felére csökkentsük a dózist, 20 g/cm² anyag szükséges, ez körülbelül 8–10 cm vastag alumínium űrállomás falat jelent	- 1 MeV– néhány 1000 MeV - döntően proton, alfa, kevés C, N, O - a Földet nem éri el - nagy kitörésekkor a szekunder neutronok lejuthatnak Földre - csak az idő 1%-ában emelkedik ki a galaktikus háttérből Föld távolságnyra, de elérheti annak 1000–10000-szeresét is. - évi 1–2 nagy kitörés, de nagy a gyakoriság ingadozás; mire eljut földtávolságra: néhány perc - néhány óra (sebességtől függ), időtartama: 3 óra - 3 nap

A napszél a Föld mágneses terét zárt térrészbe szorítja be, amit magnetoszférának nevezünk. Az erővonalak a Nap felől benyomódnak (orr-rész), a Nappal ellentétes oldalon elnyúlnak (uszály vagy csóva). A mágneses erővonalak együtt forognak a Földdel. A külső erővonalakkal a bolygóközi mágneses erővonalak összekapcsolódhatnak, és így nyitottá válnak a bolygóközi tér felé. A napszél töltött részecskéi a nyitott erővonalakon keresztül tudnak bejutni a magnetoszféra belsejébe.

A zárt erővonalak mentén stabil pályákra befogott – a világűrben, illetve a Napból érkező primer, vagy a légkörben keletkező szekunder – töltött részecskék sugárzási övezeteket hoznak létre, melyet felfedezőjükről van Allen övezeteknek hívnak. Ezek belsejében a sugárzási szint igen nagy.

A Föld körül két stabil övezet létezik: a külsőt az egyenlítő felett 3,5–4,5 földmagáig távolság között nagy energiájú elektronok, a belsőt 1,5–2,0 földmagáig távolság között nagy energiájú protonok és kisebb mértékben elektronok alkotják. Az elektronok energiája 0,5 és 7 MeV között, a protonoké 10 és 600 MeV között változik. Ezen kívül a Föld körül létezik

egy anomális övezet is, melyet a Nap mágneses terébe, a helioszférába semleges elemként bejutó és ott ionizálódó nehéz töltött részecskék (HZE) alkotnak.

A mágneses erővonalak irányának és sűrűségének megfelelően a befogás védőhatása a mágneses egyenlítő fölött maximális, és a pólusokhoz közeledve erősen csökken. Kitüntetett hely a brazil partok és Dél-Afrika közötti tér, ahol – a Föld mágneses tengelyének a geometriai tengelyhez képesti eltolódása miatt – a sugárzási övezet a felszín feletti 200 km magasságig nyúlik le (Dél-Atlanti anomália). Töltésüknek megfelelően az elektronok kelet felé, a protonok és egyéb nehéz ionok nyugat felé haladnak. Bonyolult spirál alakú mozgást végeznek a sarkok között, pólustól pólusig a részecske néhány másodperc alatt teszi meg az utat.

A Földet övező védőpajzs másik eleme maga a légkör, melynek főként alsó, sűrű rétegei a mágneses árnyékoláson átjutó, maradék kozmikus sugárzás nagy részét elnyelik. Alacsony Föld körüli pályán keringő űrállomások, űrhajók esetében a védőpajzs egyik eleme – a légkör – már szinte teljesen hiányzik, így a kozmikus eredetű dózisterhelés a tengerszinti magasságon lévőknek több mint százszorosa is lehet. Az alacsony pályán keringő űrállomások esetében a dózis döntő részét a protonok okozzák, ám kisebb árnyékolás – például az űrállomáson kívüli munkavégzés – esetén az elektronokból származó felületi dózis lehet a nagyobb.

Az atmoszférát elérő részecskék energiájuk nagy részét a környező atomok, illetve molekulák ionizációja során leadják. Emellett nagyenergiás magreakciók során számos szekunder részecske is keletkezik. A leggyakoribb kölcsönhatás a protonok és a levegő molekuláinak kölcsönhatása során keletkező szekunder neutronok, protonok és a pion triplet. A töltött pionok müonokra és neutrínókra bomlanak. A müonok elérhetik a földfelszínt, de esetleg elektronokra és neutrínókra bomlanak. A semleges pionok foton sugárzással elbomlanak.

A SUGÁRZÁSI TÉR AZ ŰRÁLLOMÁS BELSEJÉBEN

A kozmikus sugárzásnak a felső légkörrel, illetve az űrhajó szerkezeti elemeivel való kölcsönhatása egyrészt gyengíti, illetve elnyeli a primer sugárzást, de emellett a kölcsönhatások során jelentős másodlagos (szekunder) sugárzás is létrejön, mely a sugárzási teret még összetettebbé teszi. A létrejött szekunder sugárzás töltött részecskéket, neutron, gamma és röntgensugárzást egyaránt tartalmaz.

A dózisteljesítmény az űrállomás belsejében a szabad térben, azaz az űrállomáson kívül mérhető dózisteljesítmény 0,8% és 10%-a között változik. Űrséta esetén az űrhajóst érő dózis az űrruha árnyékolása miatt harmada annak, mint ami szabad térben lenne.

A primer kozmikus sugárzás neutronokat nem tartalmaz, mivel a neutron szabad állapotban mintegy 10 perces felezési idővel elbomlik protonra, elektronra és antineutrínóra. Azonban az elsődleges sugárzás egy része a Föld felső légkörében illetve az űrállomás szerkezeti elemeiben másodlagos sugárzássá alakul. A neutronokból származó egyenérték dózis akár a töltött részecskék dózisének 30-40%-át is elérheti.

Neutronok két módon keletkezhetnek. Kisenergiájú neutronok – közelítőleg 10 MeV energiáig – gerjesztett magokból léphetnek ki, izotróp szögeloszlással. Emellett ütközések során nagyenergiájú protonokból töltéscserével keletkezhetnek nagyenergiájú neutronok. Ez utóbbiak irányeloszlása nem izotróp, mivel a keletkezés módja miatt valószínű kilökődési irányuk előre, a földfelszín felé mutat. Az atmoszféra felső részében a lefelé irányuló részecskeáram nagyobb, a sebesség szögeloszlásának maximuma függőlegesen lefelé van.

A napciklus is befolyásolja mind az űrállomásnál kialakuló sugárzási teret, mind a neutronok fluxusát. Naptevékenység maximuma esetén a Naprendszerben a Napból eredő

protonok pozitív töltésű plazmát hoznak létre, amely a galaktikus eredetű részecskéket fékezi, azaz energiájukat csökkenti, kevesebb éri el a felső légkört, mint napminimum esetén így napminimumnál több szekunder neutron keletkezik. Nagy napkitörés esetén szintén megnő a szekunder neutronok száma. A keletkező neutronok száma és energiaspektruma is függ a földrajzi szélességtől és a tengerszint feletti magasságtól. A pólusok közelében a maximális neutronsám 18 km magasan van, míg az egyenlítőnél 15 km-nél.

Amellett, hogy napkitörések idején a sugárzási szint jelentősen megnőhet, az eltérő árnyékolás miatt az űrhajó különböző pontjain is jelentős lehet a különbség a dózisteljesítményben. Emiatt a helyfüggés meghatározására (dózistérképezés) is szükség van, mely szintén indokolja a helyszíni méréseket. Emellett nem szabad elfelejtkezni a védelem hatásosságának folyamatos változásáról sem. Mivel a befogott (főként szoláris eredetű) sugárzás erős irányfüggést mutat, az űrhajó orientációjának változása is befolyással lehet a belsejében kialakuló térre, illetve az űrhajósok dózisára.

Mivel az eredő sugárzás igen sok paramétertől függ, mérések nélkül, csupán számításokkal és modellezéssel igen nagy lehet az eredmény pontatlansága.

AZ ŰRHAJÓSOK DÓZISKORLÁTAI

Hazánkban a természetes eredetű ionizáló sugárzások okozta átlagos éves effektív dózis 2,4 mSv. A Nemzetközi Űrállomás fedélzetén küldetést teljesítő űrhajósok ennél több mint két nagyságrenddel nagyobb dózist (~300 mSv/év) kapnak. A küldetések hossza jellemzően fél év, vagyis az erre az időszakra vonatkozó átlagos effektív dózis (~150 mSv) a földi sugárveszélyes munkahelyekre évente 20 mSv dóziskorlát 7,5-szerese. Az űrhajósokra ezért nem éves vagy ötéves, hanem életpálya-dóziskorlátokat határoznak meg. A földi sugárveszélyes munkahelyekhez képest jelentős különbség még, hogy amíg a nukleáris iparban, egészségügyben dolgozó emberek sugárterhelése jellemzően, az idő jelentős részében nem haladja meg a lakosságot a természetes eredetű háttérsugárzásból érő sugárterhelést, az űrhajósokat nem csak munkájuk során, hanem pihenő- és szabadidejükben is folyamatosan éri a földfelszíni háttérsugárzás dózisénaál több mint két nagyságrenddel nagyobb dózisu kozmikus sugárzás.

Az űrhajósokra az egyes űrügynökségek eltérő életpálya-dóziskorlátokat határoznak meg, és ezek a korlátok az elmúlt évtizedekben jelentős mértékben változtak, többnyire csökkentek. A NASA hatályos szabványa szerint a küldetés során az űrhajóst érő sugárterhelés a rákos megbetegedés következtében bekövetkező elhalálozás kockázatának legfeljebb 3%-os növekedését eredményezheti. Mivel a kockázatok mértéke nemtől és életkortól függ, ezért nemtől és életkortól függő dóziskorlátokat határoztak meg. Ez azt is jelenti, hogy az idősebb férfi űrhajósok előnyt élveztek. Példaként egy 50 éves amerikai férfi űrhajós 1 Sv, míg egy 30-éves női űrhajós legfeljebb 600 mSv effektív dózist kaphat a pályája során.

Az Amerikai Nemzeti Tudományos, Mérnöki és Orvostudományi Akadémiák (U.S. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) 2021 nyarán készült tanulmánya arra biztatta a NASA-t, hogy nemtől és életkortól független életpálya-dóziskorlátot határozzon meg, és annak értékét 600 mSv-ben korlátozza, ami a 30 éves női űrhajósok életpálya-dóziskorlátjának felel meg. A javaslat ugyan jelentős szakmai vitát váltott ki, annak adaptálása folyamatban van. A vita alapja az, hogy az egyenlőség elve az új javaslat szerint az egységes életpálya-dóziskorlát vagy a korábbi gyakorlat szerint a mindenkire egységes megengedhető többlet kockázat szintjén valósuljon meg.¹

¹ Ez egyben azt is jelenti, hogy a fiatal női űrhajósoknak nagyobb kockázatot engednek meg, mint idősebb és férfi társaiknak.

Az életpálya-dóziskorlát meghatározásánál az Európai Űrügynökség (ESA) az ICRP 60 szerinti 50 mSv/év foglalkoztatási dóziskorlátot vette alapul. 20 éves életpályát feltételezve ez 1 Sv életpálya-dóziskorlátot eredményezett nemtől és életkortól függetlenül. A foglalkoztatási dóziskorlátot az ICRP 103-ban azóta ugyan 20 mSv/év-re csökkentették, az ESA az életpálya-dóziskorlátot változatlanul 1 Sv-ben határozza meg.

A többi űrügynökség gyakorlatától eltérően az Orosz Űrügynökség nem csak a daganatos megbetegedések, hanem a kozmikus sugárzás okozta egyéb sztochasztikus hatásokat is figyelembe veszi, valamint az űrbéli környezet hatásával is számol (pl. súlytalanság körülményei között az ionizáló sugárzás okozta hatások eltérőek). Számos vizsgálat azt mutatta, hogy a kozmikus sugárzást alkotó töltött részecske sugárzás (főként protonok és He-atommagok, valamint kisebb részben nehezebb ionok) a rosszindulatú daganatok mellett súlyos szív- és érrendszeri betegségeket, valamint a központi idegrendszer működésének zavarait okozhatják, utóbbiak az űrhajósok kognitív képességeinek jelentős romlását eredményezhetik. Figyelembe véve a nem-daganatos megbetegedések kockázatát, az így meghatározott 1 Sv életpálya-dóziskorlát összességében nem 3%, hanem 7%-os többletkockázatot jelent a halálos kimenetelű megbetegedések tekintetében.

A kanadai űrhajósok életpálya-dóziskorlátja az ESA gyakorlatával összhangban nemtől és életkortól függetlenül 1000 mSv, míg a Japán Űrügynökség (JAXA) a korábbi NASA gyakorlathoz hasonlóan nemtől és életkortól függő életpálya-dóziskorlátokat alkalmaz, melyet a 3%-os kockázatnövekedésből vezet le. A Kínai Űrügynökség (CSA) dóziskorlátozásáról jelenleg nincs elérhető publikus információ.

A későbbiekben foglalkozni kell a tartós holdutazások és a marsutazások dóziskorlátaival is (Boscolo, 2022).

PILLÉK AZ ISS-EN

2003-ban, a moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézetével együttműködésben egy Pille rendszer (Pille-MKSZ) jutott fel az ISS-re a Progressz-12 teherűrhajó fedélzetén. Az új rendszer, egy kiolvasó és 10 dózismérő – mint fedélzeti és személyi dozimetria szolgálati berendezés – került az ISS Zvezda moduljára. 2009-ben a dózismérők száma további 4-gyel bővült, majd 2018-ban – a 2003-as Pille szavatosságának lejártja miatt – egy új kiolvasót és további 5 dózismérőt juttattak Szojuz űrhajóval az űrállomásra. Egy hónapon keresztül a két kiolvasó egy időben, párhuzamosan üzemelt, majd az eredetit tartalékba helyezték.

Az ISS-en használt Pille kiolvasókat és a Farkas Bertalan által használt kiolvasó típust az 1. ábra mutatja be.

A Pillével végzett mérések célja

- űrhajósok személyi dózisának mérése a Föld felé irányuló extrém nagy napkitörések (koronakidobódások) alatt;
- az űrállomás egyes pontjain és az űrállomáshoz kapcsolódó űrhajókban, illetve teherűrhajókban elhelyezett dózismérőkkel – általában havonkénti kiolvasással – a helyi dózisviszonyok feltérképezése;
- fedélzeti kísérletek (pl. antropomorf fantom) során tudományos célú dózismérés;
- űrhajósok járulékos dózisterhelésének mérése űrséták alatt;
- automata, nagy felbontású dózismérés a kiolvasó készülékben jellemzően 90 percenként (keringésenként).

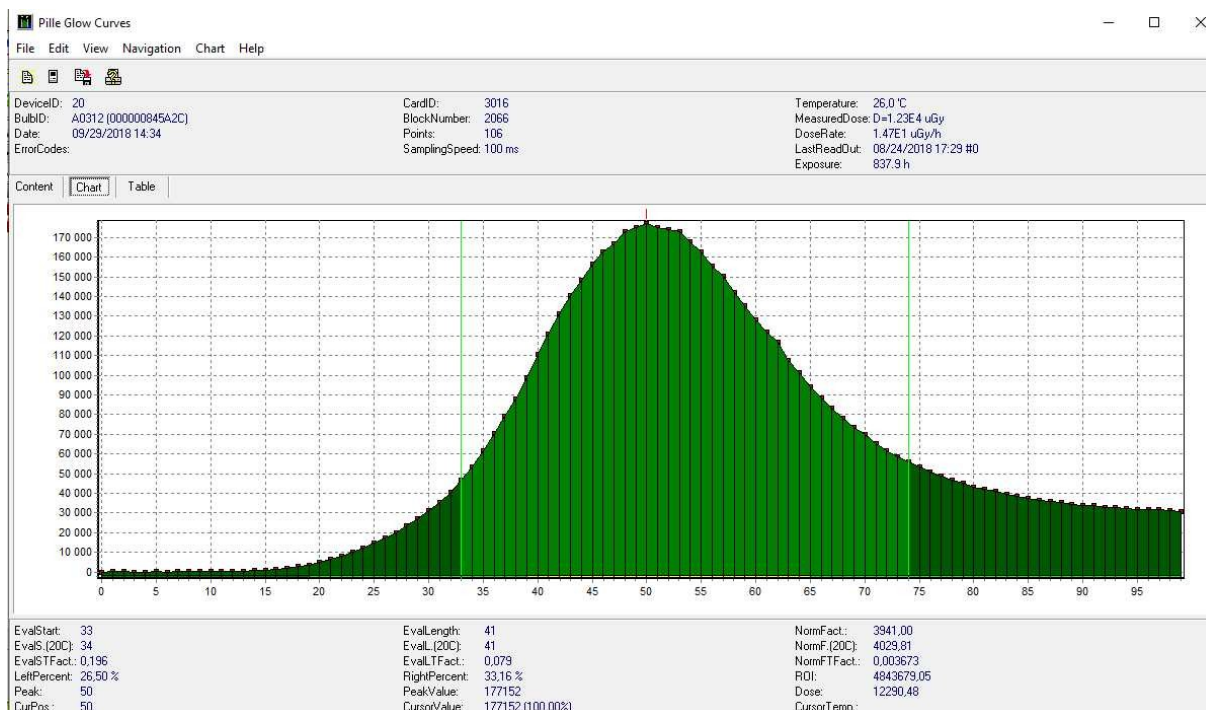


1. ábra. Pille készülékek. A felső készülék az ISS-en, a középső a Mir űrállomáson használt készülék, az alsó a Farkas Bertalan által használt változat

Az ISS-en használt Pille készülékek egy memóriakártyán (2. ábra) tárolják a mért dózisokat és a dózismérők kifutási görbéit (3. ábra) is.



2. ábra. A Pille készülék memóriakártyája, amelyen a mért adatokat hozzák feldolgozásra



3. ábra. Kifűtési görbe (12,3 mGy dózis). A világosabb árnyalattal jelölt tartomány alapján történik a dózis meghatározása

A Pille készülékek érzékenysége azonosra van beállítva, ez lehetővé teszi, hogy az adott dózismérőt bármelyik készülékkel használjuk. A 4. ábra egy Pille készüléket és a vele használt dózismérőket mutatja be.

A Pille készülék dózismérője a kiolvasást kivéve alumínium védőtokban helyezkedik el (5. ábra). A védőtokon található két bogáncszár segítségével azok az űrállomás posztószerű falára erősíthetők.



4. ábra. Pille készülék és dózismérői. A kiolvasásra váró dózismérők átmeneti rögzítéséhez rendelkezésre áll egy bogáncszárral borított lap.



5. ábra. A Pille készülék dózismérője és a dózismérő védőtokja

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az automatikusan mért adatok feldolgozása

A Pille készülék automata üzemmódban mért adatai alapján meg lehet adni a napi dózisokat és ebből a hosszabb időre – akár egy évre – összegzett dózist, valamint az átlagos dózisteljesítményt is. A Pille automata mérési periódusát a Nemzetközi Űrállomás keringési idejéhez (90–93 perc) közelinek, 90 percnél választottuk, így egy naptári napnak 16 darab 1,5 órás mérési ciklus felel meg.

A Pille készülék a mért dózisokat a készülék memóriakártyáján tárolja, ezt a memóriakártyát általában félévente, a legénység cseréjével egy időben cserélik újra, és az adatokat tartalmazó kártyát visszahozzák a Földre kiértékelésre.

A kiértékelés első fázisa az, hogy a saját fejlesztésű program révén nagy tömörséggel letárolt adatokat .dat formátumú adatokká konvertáljuk, majd végül Excel formátumra alakítjuk át, a második fázis az esetleges hibás dátumadatok korrigálása. Hibás dátumadatok akkor keletkezhetnek, ha az űrhajós a Pillén a dátumot rosszul állítja be. A harmadik fázis a dózisadatok korrekciója a fedélzeti keresztkalibrációknál mért egyedi érzékenységetéréseknek megfelelően. Ezt követően a napi dózisok meghatározása az adott napon mért dózisok összegzését jelenti.

Példaként bemutatjuk három 1,5 órás mérési ciklus adatait (2. táblázat). Az adott dózismérőnél a korrekciós tényező 1,2 volt.

Ha a teljes mérés idején (2003 vége és 2022 között) folyamatosan működött volna a 1,5 órás automata mérés, akkor mintegy 110 ezer mérési adatunk lett volna, de az automata üzemmód nem mindig volt bekapcsolva. Így is 75 ezernél több adatot kellett feldolgozni, hogy a napi és a féléves dózisteljesítmény adatokat megkapjuk. 2022-ben memóriakártya hiba miatt egyik félév adatai sem voltak teljesek, így a 2022-es napi adatok hiányoznak, ugyanakkor az űrséták dózisadatait, melyeket más adattovábbítási módszerrel továbbítottak, 2022-ben is megkaptuk.

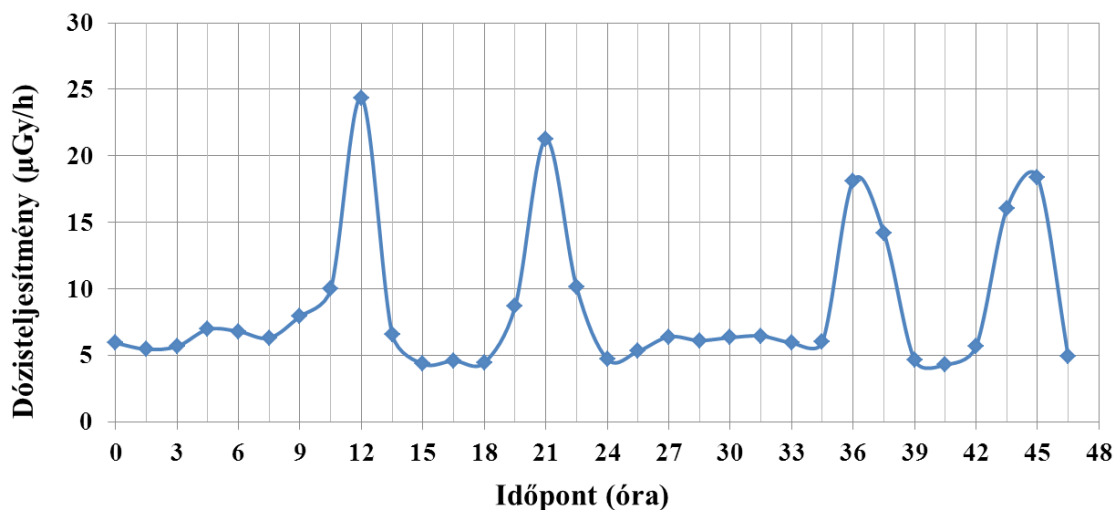
2. táblázat. Három mérési ciklus adatai

Blokk sorszám	Mérési időpont	Dózis (μGy)	Korrigált dózis* (μGy)	Dózisteljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	Korrigált dózisteljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	Besugárzási idő (óra)
2	2019. 06. 21 12:50	1,11E+01	1,33E+01	7,43E+00	8,92E+00	1,5
3	2019. 06. 21 14:20	1,07E+01	1,28E+01	7,17E+00	8,60E+00	1,5
4	2019. 06. 21 15:50	1,03E+01	1,24E+01	6,85E+00	8,22E+00	1,5

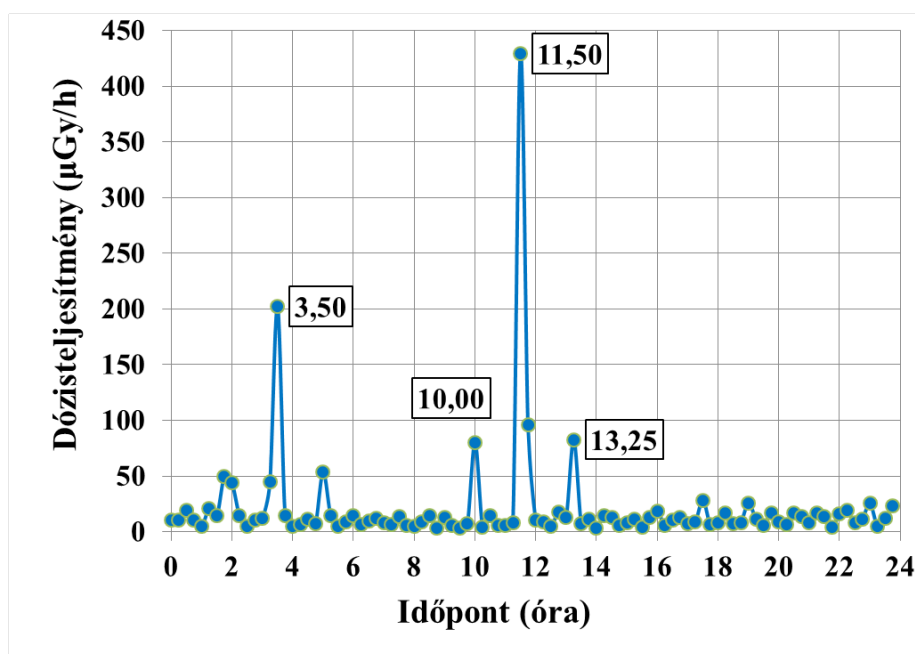
*Utólagos földi korrekció

A napi dózismenetet 1,5 órás kiolvasási periódussal mutatja a 6. ábra. Az ábrán láthatók a Dél-atlanti anomália (DAA) okozta dóziscsúcsok. Az anomália területén az ISS naponta többször is átrepül, az ábrán látható csúcsok az észak-déli, és a dél-északi irányban történő áthaladásokhoz tartoznak.

Egy alkalommal néhány napig a kiolvasási periódus 0,25 óra volt, ilyen gyakoriságnál már jól látható, amikor az Űrállomás a DAA kisebb intenzitású részén halad át (7. ábra).



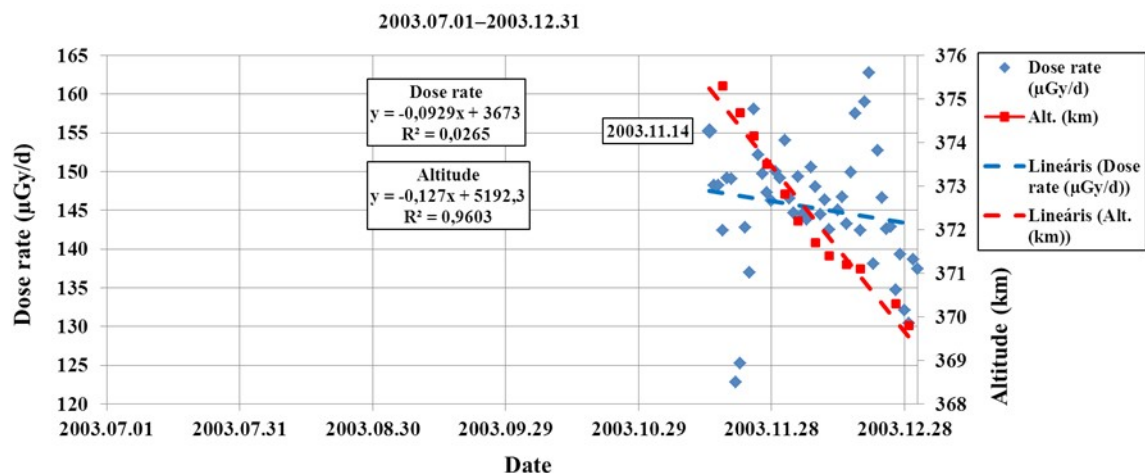
6. ábra. Kétnapi dózismenet 1,5 órás kiolvasási periódussal



7. ábra. Egynapi dózismenet 0,25 órás kiolvasási periódussal. A keretezett számok a csúcsok időpontjai

A napi dózis 16 darab 1,5 órás adat összege. A napi dózisokhoz az adott nap repülési magasságát hozzárendelve a napi dózisok időeloszlását féléves időtartamokra ábrázolhatjuk. A 2003. év végén mért eredményeket mutatja a 8. ábra. Ezen látható, hogy a repülési magasság a légellenállás miatt egyenletesen csökken, a dózisok 120 és 165 µGy/nap

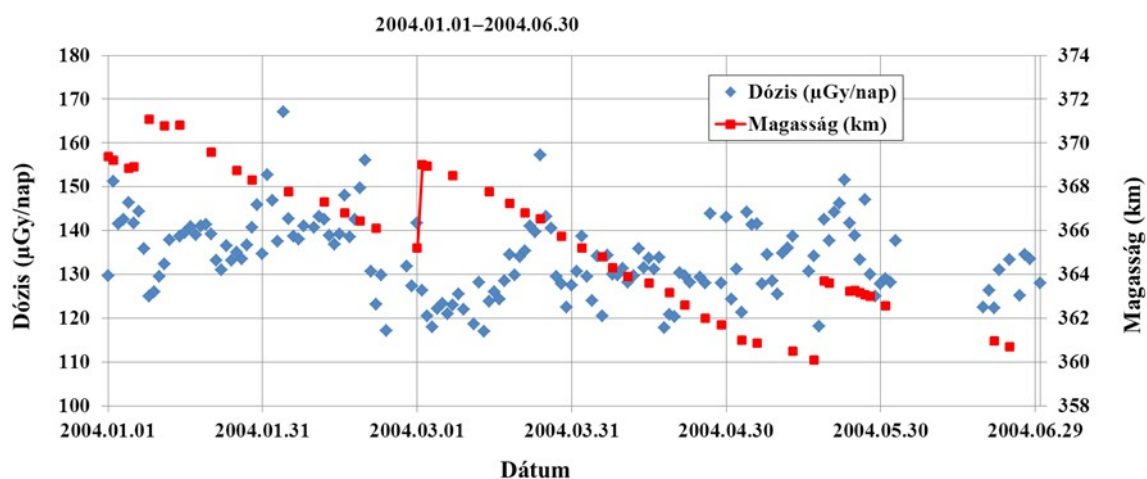
tartományban szórnak. A szórás elsősorban annak következménye, hogy a DAA-n átrepülés dózisa attól függ, hogy annak mely részén ment át az űrállomás pályája.



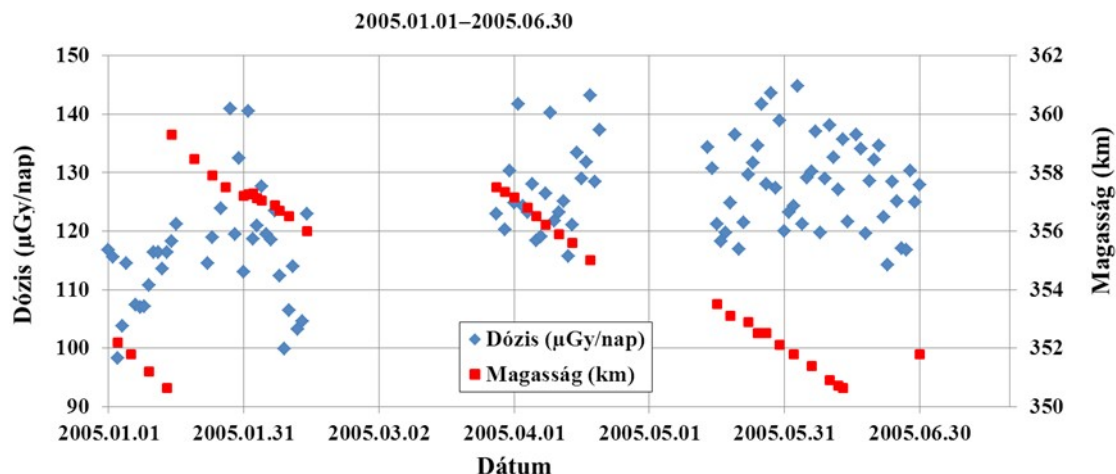
8. ábra. A napi dózisok és a repülési magasság a mérések megkezdésekor. Az első mérési nap 2003.11.14.

A mérések megkezdése utáni teljes félévben mért napi dózisokat és a repülési magasságokat a 9. ábra adja meg.

Az automata méréseket havonta az űrállomás különböző pontjaira kihelyezett dózismérők kiolvasása szakította meg. A kihelyezett dózismérők kiolvasása után a Pillét automata üzemmódba kell visszakapcsolni. Az összes mérés kb. egyharmadánál az űrhajós ezt a műveletet nem hajtotta végre. Ilyen – hiányos – méréssorozatot mutat be az 10. ábra.



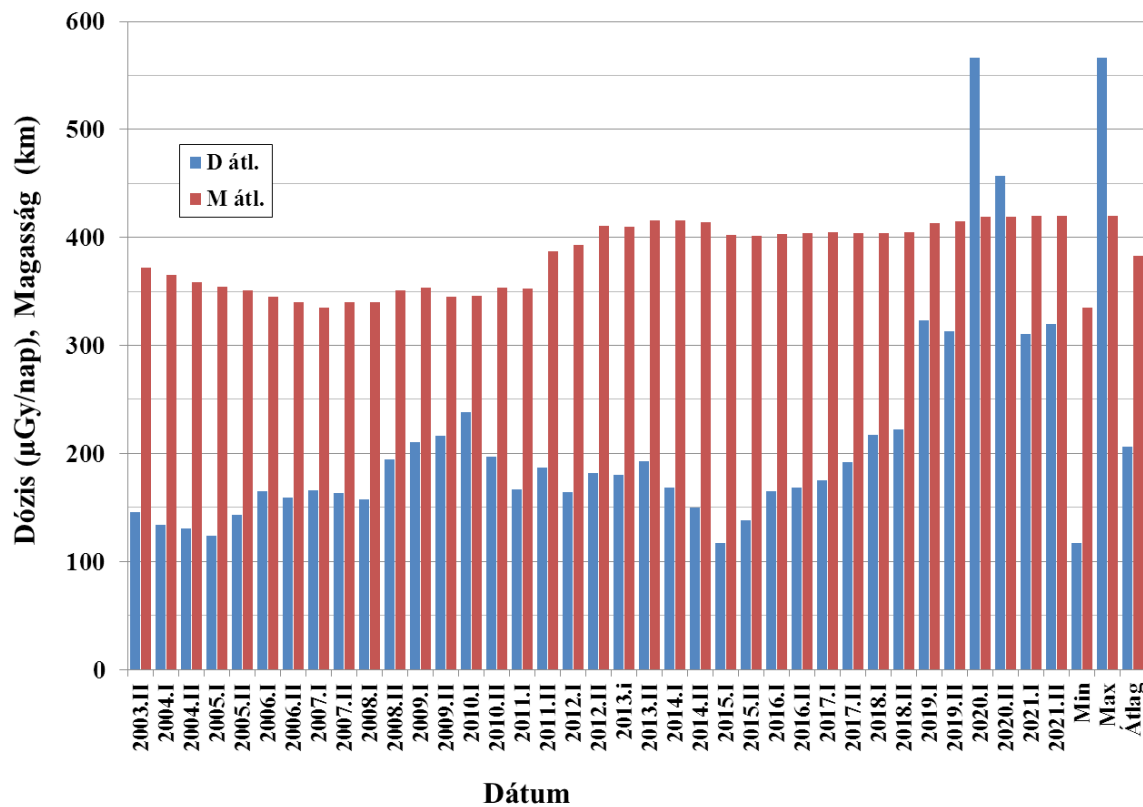
9. ábra. A napi dózisok és a repülési magasság a 2004. év első felében



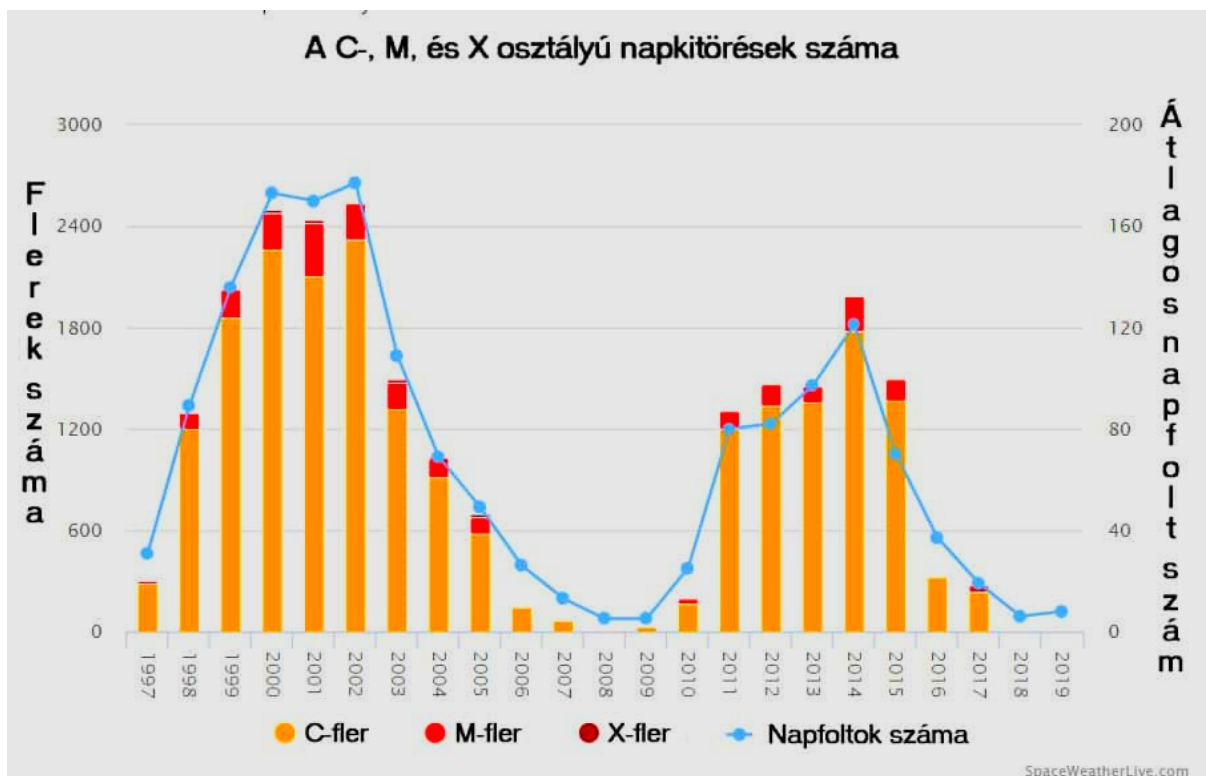
10. ábra. Példa egy adathiányos félévre. 2005.02.14. és 2005.03.28., valamint 2005.04.20. és 2005.05.14. között nem történt automata mérés

A napi dózisokból képzett féléves átlagos dózisokat és az átlagos repülési magasságokat összegzi a 11. ábra. A dózisok menete követi a napsiklus változásait (12. ábra), azaz intenzív napfolttevékenység esetén a dózisteljesítmény csökken.

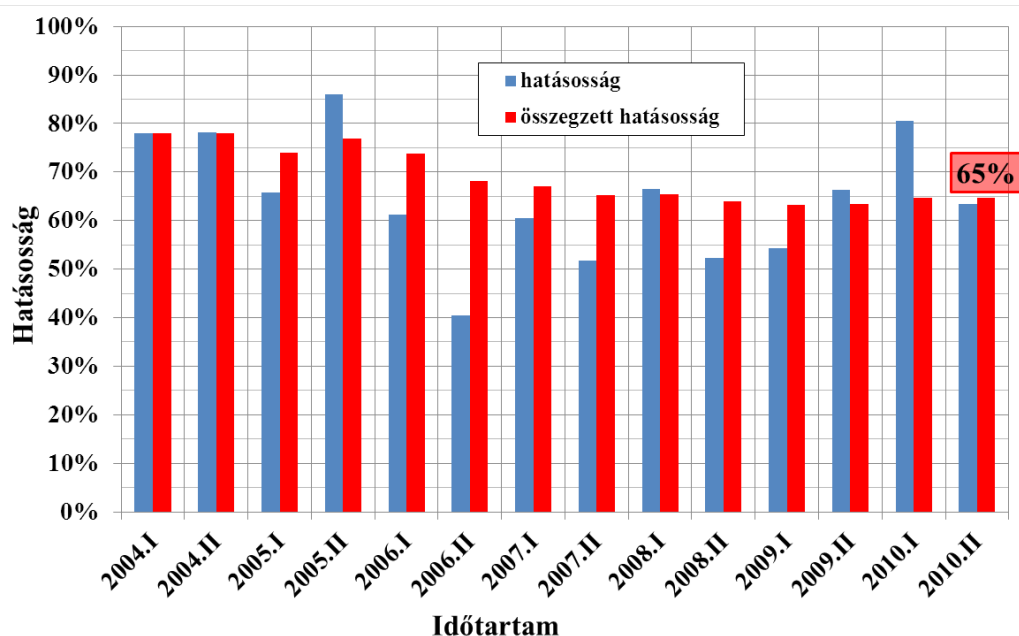
Megvizsgáltuk, hogy mennyire volt hatásos az automata adatgyűjtés féléves bontásban. A hatásosság alatt azt értjük, hogy a lehetséges ciklusok számának hány százaléka volt a tényleges ciklusok száma az adott félévben és a mérések kezdete óta összegezve 2004 és 2010 között (13. ábra) és a teljes mérési időre 2004 és 2021 között (14. ábra). Megállapítható, hogy a lehetséges adatok mindössze kétharmadának mérése történt meg a vizsgált időszakban a nem kellő gondossággal elvégzett Pille beállítások miatt.



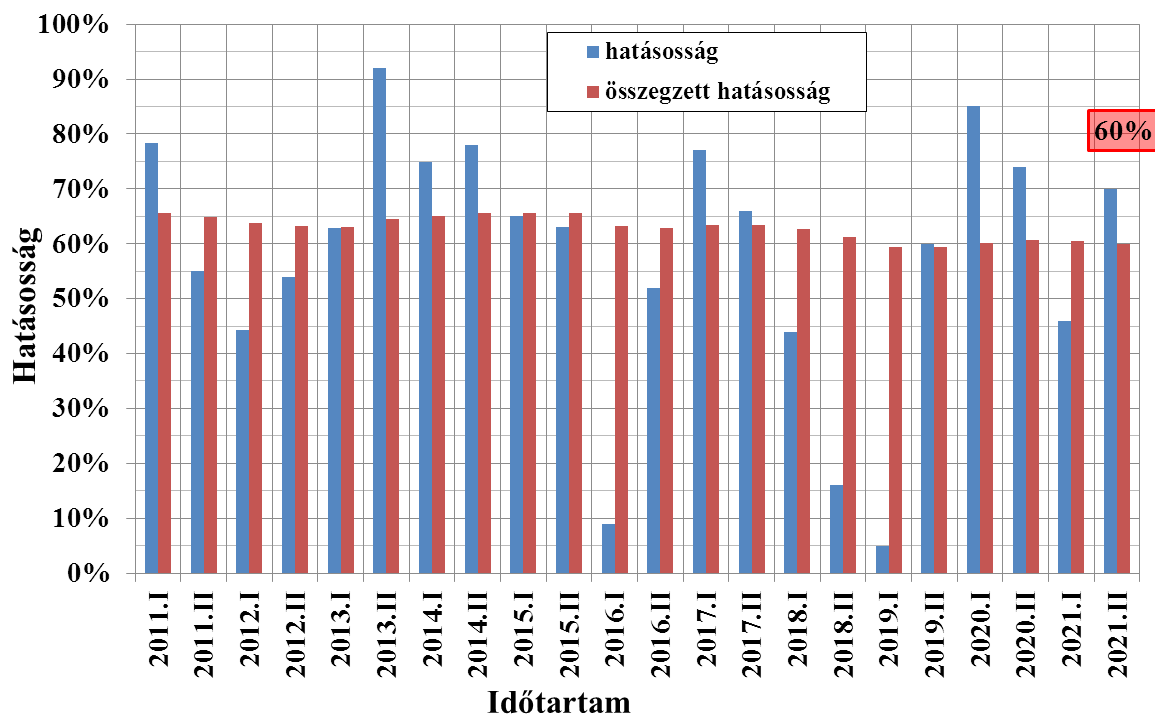
11. ábra. A 2003–2021 közötti időszak félévenkénti átlagos napi dózisa és átlagos repülési magassága



12. ábra. A naptevékenység menete 1997–2019. között (forrás Internet)



13. ábra. Az adatgyűjtés hatásossága az adott félévben és az adott időpontig összegezve 2004 és 2010 között



14. ábra. Az adatgyűjtés hatásossága az adott félévben és az adott időpontig összegezve 2011 és 2021 között

Dózistérképezés

A dózistérképezés aktuális adatokat szolgáltat arról, hogy az űrállomás egyes részein vagy egy ahhoz kapcsolt űrhajóban annak struktúrája és az ott lévő berendezések mennyire védik az űrhajósokat a kozmikus sugárzástól. A mért értékek – a mérési helyek, az űrállomás aktuális pályamagassága és orientációja függvényében – az 5–25 $\mu\text{Gy/h}$ tartományban vannak. Érdekes példa a Charles Simonyi űrhajós által végzett mérés, melynek során Pille dózismérővel összehasonlította a munkatér belsejére és a hálólhelyére jellemző dózisviszonyokat. Bebizonyosodott, hogy a közvetlenül az űrállomás falánál elhelyezett, a sugárzástól kevésbé védett hálólhelyeken a dózisteljesítmény közel kétszer akkora, mint egy árnyékolt munkatérben. A mérést követően került sor a "vízfüggöny" kísérletre; a fedélzeten tárolt, de tisztálkodásra még fel nem használt nedves higiéniai kendőket és törülközőket tartalmazó csomagok sugárzásárnyékoló hatását mérték meg az űrállomásnak egy, a hálólhelyhez hasonlóan kevésbé árnyékolt részén, Pille dózismérővel is.

Űrséták dózissai

Űrséták alatt valamennyi űrügynökség (orosz, amerikai, európai, japán, kanadai) űrhajósa a Pillét használja az ISS-en a személyi dózisának mérésére. Az orosz szkafandereken azok külső lábszári részén erre szolgáló zsebbe helyezik a dózismérőket; az amerikai űrruhákon régebben a vállrész mögött alakítottak ki hasonló zsebeket, az utóbbi években az űrruha szerszámtárolójában tartják azokat. Egyidejűleg egy, az űrállomáson belüli referencia dózismérővel mérik a benti dózist; a mért értékek különbsége az űrsétán kapott járulékos dózis, ami akár 120 $\mu\text{Gy/óra}$ is lehet. Érdekesség, hogy ritka esetben – amerikai űrruhákban végzett űrsétáknál – a járulékos dózis negatívnak adódott. Ennek több oka is lehet: ezeknél az űrsétáknál a referencia dózismérő kevésbé árnyékolt helyen, a hálólhelyen volt, ugyanakkor az űrhajós dózismérője az űrruha szerszámtartó zsebében, erősen árnyékolt helyen; az űrsétát végzők sokszor az űrállomás Föld felőli oldalán dolgoznak, amikor az űrállomás részben árnyékolja a nyílt űr felől érkező sugárzást.

A Pille dózismérő búrát burkoló/védő, aránylag vastag falú fém dózismérő falnak és tartótokjának sugárzást árnyékoló hatása nagyobb, mint az űrruha anyagáé, így pl. az ún. bőrdózis mérésére nincs mód. Ezért – kifejezetten az űrsétákhoz – dózismérő helyett készült egy igen vékonyfalú dózismérő patron, ennek 5 példányát vitte 2022 októberében egy Progressz teherűrhajó az űrállomásra. A dózismérő kipróbálására hamarosan sor kerül.



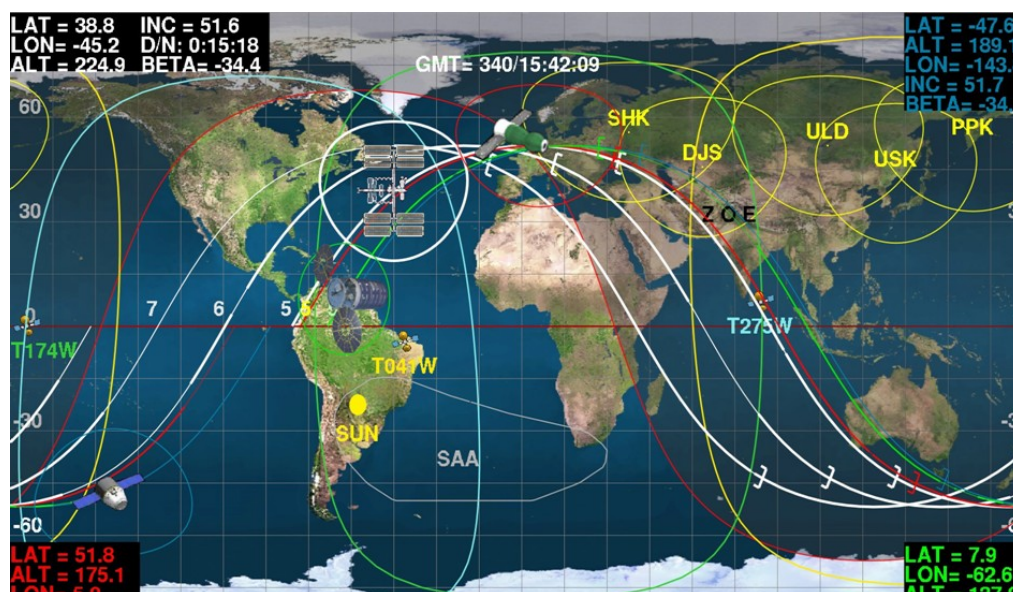
15. ábra. Az űrséta dózismérők kiolvasására szolgáló dózismérő tartó és az abba helyezhető dózismérő patron

Dél-Atlanti anomália

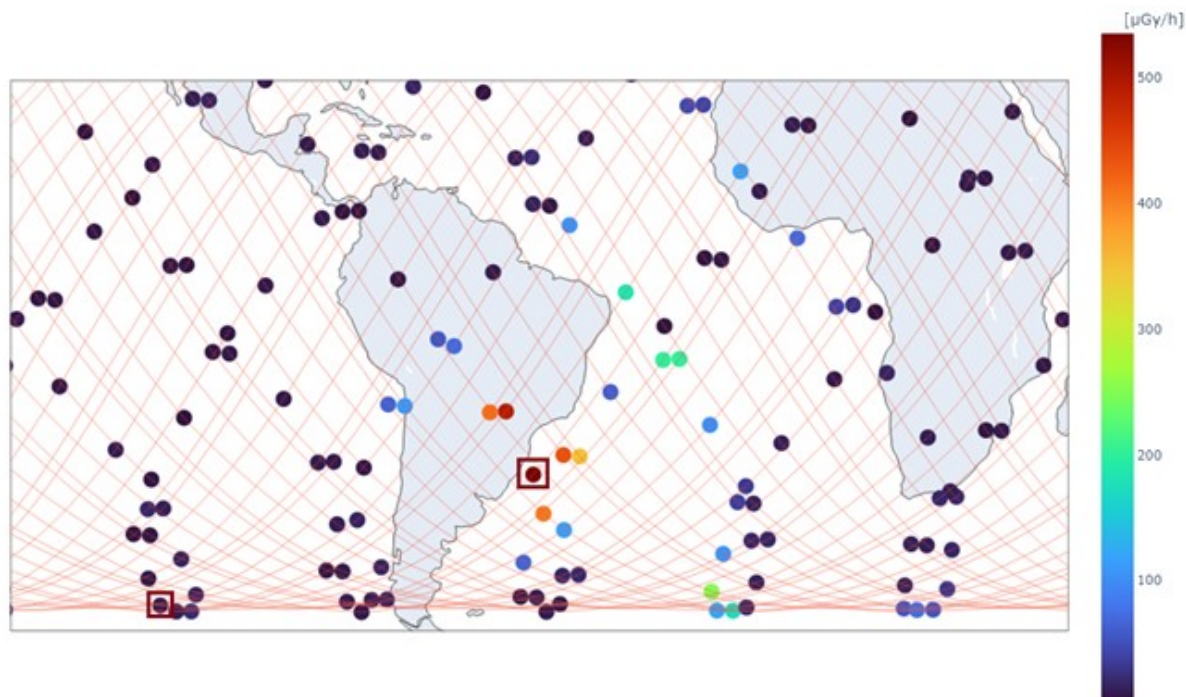
Az ISS pályamenti pozíciójáról az orosz kollégáknak köszönhetően perces felbontású idősor áll rendelkezésünkre, így minden dózisméréshez rendelhetünk közepes földrajzi szélesség, hosszúság és magasság értéket.

A Pille 15 perces méréseiből (7. ábra) kivehető, hogy a DAA-n való áthaladáskor az átlagos dózisteljesítmény megemelkedik. A legmagasabb érték 2018. augusztus 27-én volt, az értéke $540 \mu\text{Gy/h}$, ekkor az ISS a $31,2^\circ$ déli szélesség és a $47,9^\circ$ nyugati hosszúság fölött haladt el, az előző kiolvasás földrajzi koordinátái pedig $50,6^\circ$ déli szélesség és $120,7^\circ$ nyugati hosszúság. A 17. ábra alsó részén ezt a két pontot keret jelzi.

A mérések alapján a DAA határait a 77° nyugati hosszúság, 32° keleti hosszúság és a 52° déli szélesség, 23° északi szélesség között határoztuk meg. A DAA területén az átlagos dózisteljesítmény $74 \mu\text{Gy/h}$, míg a DAA kívül eső területeken $14 \mu\text{Gy/h}$ volt a mérések idején.



16. ábra. A Dél-Atlanti anomália elhelyezkedése (a jelölés SAA – South-Atlantic Anomaly)



17. ábra. A Nemzetközi Űrállomás pályája (piros vonalak) és a 15 percenként végzett kiolvasások alapján meghatározott átlagos dózisteljesítmény értékek (színes pontok). Azon pályaszakasz végpontjait, melynél a legnagyobb dózisteljesítményt mértük, az ábrán bekereteztük.

KÖVETKEZTETÉSEK

A Nemzetközi Űrállomáson a Pille termolumineszcens dózismérő rendszerrel közel húsz éven át végzett mérések bizonyítják, hogy passzív dózismérő rendszerrel is jó időfelbontással mérhető a dózisteljesítmények időfüggése. Ki kell emelni, hogy a mérések során készülékhiba nem lépett fel, de a Pillét működtető űrhajósok az esetek egyharmadában a kézi mérések után elmulasztották bekapcsolni az automata üzemmódot, ennek következtében jelentős adatvesztés történt.

A rendszer esetleges továbbfejlesztése során szükséges, hogy a ma már elavultnak számító memóriakártyák helyett más adatlehozatali módszert alkalmazzanak.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- I. Apáthy és mtársai, Proceedings of the 58th International Astronautical Congress, IAC-07-A1.9.-A2.7.04, 2007
- T. Berger és mtársai., J. Space Weather Space Clim., 7, A8, 2017
- D. Boscolo, M. Durante, Dose Limits and Countermeasures for Mitigating Radiation Risk in Moon and Mars Exploration. Physics 2022, 4, 172-184
- S. Deme, G. Reitz, I. Apáthy, I. Héjja, E. Láng, I. Fehér, Radiation Protection Dosimetry Vol. 85, Nos. 1–4, pp. 301–304 (1999), 1999
- A. Hirn, Acta Astronautica 66, 1368–1372, 2010
- P. Szántó és mtársai, Radiation Measurements 82, 59-63, 2015
- Stassinopoulos, E. G.: The Earth's trapped and transient space radiation environment, Life Sciences, NATO Series A, 154:5-35, 1988

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton fejezzük ki köszönetünket azoknak a magyar kollégáknak, akik részt vettek a Pille készülékek elkészítésében, valamint az orosz űrhajósoknak, akik a Pillével méréseket végeztek, valamint az orosz kollégáknak, akik a mérési eredmények nyers feldolgozását végezték. Köszönetünket fejezzük ki Charles Simonyinak, aki mindkét repülése során értékes méréseket végzett a Pillével.

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával