

UJHEGYI BENCE* – MOLNÁR KRISZTIÁN**

EGY MARS-MISSZIÓ TECHNIKAI ÉS EMBERI KIHÍVÁSAI

Összefoglalás: A cikk egy, a Marsot célzó küldetés lehetőségeit és kihívásait vizsgálja, kiemelt figyelmet szentelve az űrsugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatásának. A vörös bolygó fizikai adottságainak bemutatása mellett a szerzők elemzik a múltbeli és a tervezett küldetéseket is, különös hangsúlyt fektetve a technikai nehézségekre és a sugárvédelemre.

Kulcsszavak: Mars, űrkutatás, kozmikus sugárzás, Mars-expedíció, marsjárók, űrtechnológia

Abstract: This paper discusses the prospects and challenges of human Mars exploration, with special attention to the effects of cosmic radiation on the human body. It details the planet's physical characteristics, and analyses past and future Mars missions, focusing on technical difficulties and radiation protection strategies.

Keywords: Mars, space exploration, cosmic radiation, Mars missions, rovers, space technology

BEVEZETÉS

Egy emberi személyzet részvételével végrehajtott (a továbbiakban: emberes) Mars-küldetés kivitelezése napjaink egyik legösszetettebb mérnöki vállalkozása lenne. A technológiai fejlődés mára lehetővé tette, hogy a Holdnál távolabbi égitestekre is valós célpontként tekintsünk, azonban a Mars elérése, az ottani tartózkodás, valamint a biztonságos visszatérés továbbra is számos megoldatlan problémát vet fel. A hosszú utazási idő, a földi irányítástól való függetlenség, a zárt élettér fenntartása, az energiaellátás és az extrém környezeti feltételek együttesen olyan rendszereket követelnek meg, amelyek jóval túlmutatnak a jelenleg alkalmazott űrtechnológiákon. A legnagyobb akadályok közé tartozik a Mars környezeti viszonyainak kezelése, különösen a sugárzás elleni védelem, amely alap-

vetően befolyásolja a küldetés egészségügyi kockázatait. Jelen tanulmány célja ezen műszaki és élettani kihívások áttekintése, különös tekintettel a sugárvédelmi megfontolásokra, amelyek meghatározó szerepet játszanak a hosszú távú emberes Mars-expedíciók tervezésében. [1][2]

A MARS BOLYGÓ ÉS A MISSZIÓK TÖRTÉNETE

A Mars tudományos célú megfigyelése már az ókorban megkezdődött, és a bolygó mára – a Földön és a Holdon kívül – az ember alkotta eszközökkel legtöbbször vizsgált égitestnek számít. Az első kvantitatív adatok Tycho Brahe 16. századi munkásságához köthetők, amelyek Kepler bolygómozgási törvényeinek alapjául szolgáltak. A távcsöves űr megfigyelés korszaka Galilei 1610-es észleléseivel kezdődött, Cassini pedig már a 17. század végén pontosan meghatározta a marsi nap hosszát. A 19. században Beer és Mädler készítették az első térképeket, míg Konkoly Thege Miklós megalapozta a hazai kutatásokat. Ugyanebben az időszakban terjedt el a marsi „csatornák” tévhite is, amely hosszú időre összekapcsolódott a feltételezett intelligens léttel, jelentős irodalmi és médiatörténeti hatást gyakorolva (gondoljunk csak H. G. Wells *Világok harca* című regényére). [3]

A jelenlegi modellek szerint a Mars gyorsan, 100 millió éven belül formálódott, és mivel a mai pályájától jóval messzebb jött létre, a magja több könnyű elemet tartalmaz. Kérge 20–39 km vastagságú, alatta 400–600 km vastag köpeny található. A bolygó mára tektonikus aktivitását elveszítette, és így jelenleg egyetlen litoszféralemezzel rendelkezik. [5]

A Mars belső szerkezete, éghajlata és felszínformái kulcsfontosságúak az emberes missziók és esetleges kolonizációs tervek megvalósításához. Ritka, főként szén-dioxidból álló légköre csupán a földi nyomás 0,6%-át éri el. A vas-oxid-tartalmú, magas porkoncentráció vöröses árnyalatot ad az égboltnak. A felszín látványos

1. ÁBRA. Az InSight leszállóegység a Mars felszínén (művészi koncepció). A küldetés elsődleges célja a bolygó belső szerkezetének feltárása a tektonikus aktivitás, a meteoritbecsapódások, valamint a belső hőáramlás monitorozása révén (Forrás: NASA/JPL-Caltech / Wikimedia)

* BSc, Product Assurance Manager / Configuration Manager, 4iG Space and Defence Technologies. ORCID: 0000-0002-4856-9250

** BSc, HM Zrínyi Nonprofit Kft., Junior IT Security mérnök. ORCID: 0000-0001-9978-5597





2. ÁBRA. Az Olympus Mons homokviharban [6]

3. ÁBRA. A több mint 10 km mély Valles Marineris völgyrendszer a Viking-1 és Viking-2 felvételeiből összeállított mozaikképen (Forrás: NASA / JPL-Caltech / USGS)

képződményei közé tartozik a Naprendszer legnagyobb vulkánja, az Olympus Mons, (2. ábra) valamint a Valles Marineris árok, amely jóval meghaladja a Grand Canyon méreteit. A felszínt borító kráterek magas száma a hosszú geológiai inaktivitás és a vékony, ritka légkör okozta erózióhiány következménye. [4]

Bár ma nincs a felszínen folyékony víz, jelen van vízgőz a légkörben, illetve jég a felszín alatt. A geológiai bizonyítékok arra utalnak, hogy a távoli múltban még jelentős mennyiségű víz lehetett jelen a felszínen folyók és óceánok formájában. [4]

Két kis holdja, a Phobos és a Deimos valószínűleg befogott kisbolygók. A Phobos pályasugara (fél nagytekercse) fokozatosan csökken, így idővel becsapódhat, míg a Deimos távolodik, és akár el is hagyhatja a bolygót.

MARSJÁRÓK ÉS SZONDÁK

A bolygóra irányuló küldetések jelentős technológiai kihívást jelentenek: a hosszú repülési idő, az 5-20 perces kommunikációs késleltetés, valamint az autonóm landolás bonyolultsága miatt az eddigi missziók közel fele sikertelenül zárult. Mivel valós idejű irányítás nem lehetséges, az automata vezérlés elengedhetetlen. [8] A Mars légköri és gravitációs sajátosságai is megemlíthetők: a ritka atmoszféra nem nyújt elegendő légellenállást fékezéshez, az alacsony gravitáció (0,38 g) pedig befolyásolja a hajtóművi manőverezést, és a poros, egyenetlen felszín mechanikai terhelést jelent a járművekre. A nagy teljesítményű hajtóművek által felvert regolit¹ sérülést okozhat a be-

rendezésekben, miközben a háttérsugárzás az elektronika stabilitását is ronthatja.

A Mars-kutatásban három fő eszköztípust alkalmaznak:

- az orbiterek a bolygó körül keringenek, képeket készítenek és tudományos adatokat gyűjtenek;
- a leszállóegységek (landerek) helyhez kötötten, a bolygó felszínén vizsgálják a környezeti viszonyokat;
- a marsjárók (roverek) pedig mobilitásuk révén a felszínen mozogva nagyobb területeket tudnak feltérképezni, miközben képeket, valamint videó- és hanganyagokat továbbítanak. [8]

A Szovjetunió Marsz-programja (1960–1973) főként orbitereket indított, de ezek közül csak a Marsz-2 keringőegysége működött eredményesen. Az első landolási kísérlet során a Marsz-3 mindössze 15 másodpercig volt aktív egy homokvihar következtében. Az első igazán sikeres küldetés a NASA Viking-1 és -2 missziója volt 1976-ban: ezek a landerek RTG-vel (radioisotope thermoelectric generator – radioizotópos termoelektromos generátor) működtek, és elsőként közvetítettek képeket a felszínről, valamint biológiai kísérleteket is végeztek, amelyek nem mutattak ki életre utaló jeleket a marsi talajban. [3]

A marsjárók története a Sojournerral kezdődött 1997-ben, amely a Pathfinder leszállóegység segítségével dolgozott. Az égitestre 2004-ben érkezett Spirit és Opportunity járművek viszont új korszakot nyitottak a Mars-kutatásban: utóbbi 15 évig működött, és több mint 45 km-t tett meg a bolygó felszínén, míg a Spirit hat év után műszaki hiba miatt leállt. [8]

A Curiosity rover 2012 óta aktív, és radioizotópos termoelektromos generátor segítségével végzi munkáját. Fő célja a bolygó geológiai múltjának vizsgálata. A 2021-ben landolt Perseverance rover (4. ábra) a Jezero-kráterben gyűjt kőzetmintákat egy későbbi emberes küldetés érdekében, emellett magával vitte az Ingenuity helikoptert, amely több sikeres tesztrepülést hajtott végre, demonstrálva a légi közlekedés lehetőségét marsi környezetben. [10]

A kínai Csuzsung (Zhurong – a tűz istene) rover 2021-ben érkezett a Marsra, és kezdetben a bolygó felszínét, talaját és légkörét vizsgálta. Az eszköz napelemes energiaellátással működött, azonban 2022 májusában hibernált állapotba került a zord és fényszegény marsi tél miatt, és azóta sem sikerült újra kapcsolatba lépni vele. [9]

AZ ENERGIAELLÁTÁS ÉS HAJTÓANYAG-BIZTOSÍTÁS PROBLÉMÁI

A hosszú távú Mars-küldetések egyik fő technikai akadálya az energiaellátás, illetve a visszaúthoz a hajtóanyag előállítása. A napelemes rendszerek a porviharok és a gyenge fényviszonyok miatt megbízhatatlanná válhatnak, ahogyan azt a Zhurong és az InSight küldetések is jelezték. Alternatívát jelenthetnek az RTG-k, amelyek kis teljesítményt nyújtanak, ám drága és nemzetközileg szabályozott, korlátozott mértékben elérhető izotópokat igényelnek (pl. plutónium-238), ezenkívül teljesítményük is korlátozott. A hagyományos RTG-kben található félvezető eszközöknél jobb hatásfokra és nagyobb teljesítményre képesek

¹ Regolit: égitestek felszínén található, külső hatások (pl. meteorok, sugárzás) által aprózódott por-, kőzet- és törmelékanyag.

a Stirling-motoros egységek, de ezek mozgó alkatrészeket is tartalmaznak, így hajlamosabbak meghibásodásra. [28] A visszatéréshez szükséges hajtóanyag Földről történő szállítása nem kivitelezhető, ezért cél a különböző, a helyi erőforrásokat hasznosító (ISRU: in-situ resource utilization) technológiák kialakítása. [29] A szén-dioxidból egy lítiummal katalizált elektrolízishez hasonló eljárással lehet oxigént kinyerni, míg a metánt a Sabatier-reakcióval lehet hidrogénből szintetizálni. Sokáig a legkézenfekvőbbnek a hagyományos villamos elektrolízisen alapuló hidrogén-peroxid (H_2O_2) előállítását tartották, amely az első rakéták (pl. a V-2) egyik fő hajtóanyaga volt, de magas koncentrációjához desztillátorra is szükség van. Ugyanakkor a NASA MOXIE kísérlete már igazolta az oxigéntermelés lehetőségét a Perseverance fedélzetén. Azonban valamennyi módszerhez megbízható és nagy teljesítményű energiaellátás, fejlett technológia és elegendő víz is szükséges, ami tovább nehezíti a kivitelezést. [23]

A Mars felszínét elérő napsugárzás a távolabbi keringési pálya okán a földi érték kevesebb mint fele (kb. 590 W/m^2), amit tovább csökkentenek a gyakori porviharok. Ezek hatására finomszemcsés por rakódhat a napelemek felületére, jelentősen visszavetve az energiatermelést. Az energiaellátás csökkenése – mint az Opportunity esetében 2018-ban – a rendszerek teljes leállásához is vezethet. Az extrém hőmérséklet-ingadozások (-153°C és $+20^\circ\text{C}$ között) önmagukban is komoly terhelést jelentenek a műszaki berendezésekre, és megfelelő fűtés hiányában az elektronikai komponensek fagyása vagy meghibásodása is bekövetkezhet. [9] Bár a kozmikus sugárzás elsősorban az emberi szervezetre lenne veszélyes, okozhatja az érzékeny elektronikus eszközök hibás működését vagy akár végleges leállását is.

A SZEMÉLYZET FIZIKAI VÉDELME

Az automata Mars-missziók változó sikeressége és a bolygóra irányuló utazás technológiai kihívásai alapján világos, hogy az emberes expedíciók megvalósítása talán további évtizedek munkáját igényelheti. A jelenlegi műszaki háttér, beleértve a rendelkezésre álló hordozórakéták teljesítményét, a visszatéréshez szükséges rendszerek hiányát és az út során odaszállítandó anyagtömeg nagyságát, komoly korlátokat szab az ilyen vállalkozásoknak. A megfelelő indítási ablakok kihasználása, az energiatakarékos pályák – mint például a Hohmann-transzfer (lásd később) [21] – és az ehhez kapcsolódó időzítési, navigációs és üzemanyag-ellátási kérdések mind jelentős asztrodinamikai feladatokat jelentenek. A költségek szintén nagyságrendekkel meghaladják a korábbi küldetések ráfordításait (még a Hold-program vagy a Nemzetközi Űrállomás [ISS] működtetése sem szolgálhat közvetlenül referenciaként). Mindezek ellenére, amennyiben a technológiai feltételek adottá válnak, a következő lépés az emberi szervezetre nehezedő fizikai és pszichológiai terhelések vizsgálata. Az alábbiakban ezen humán tényezőkkel foglalkozunk, amelyek – bár nem az egyetlenek – kulcsszerepet játszanak egy hosszú távú Mars-küldetés sikerében.

Ami a fizikai kihívásokat illeti, az emberi szervezet a Föld stabil légköri, gravitációs és mágneses viszonyaihoz alkalmazkodott már evolúciós értelemben, ám mindezt egy

Mars-küldetés során mesterségesen kell pótolni. A túléléshez elengedhetetlen a megfelelő táplálkozás, hidratálás, fizikai aktivitás és pihenés. [30] Egy felnőtt napi energia-szükséglete $2000\text{--}2500 \text{ kcal}$ ($8400\text{--}10\,500 \text{ kJ}$), amelyet kiegyensúlyozott tápanyagbevitellel kell biztosítani. Kiemelten fontosak a vitaminok (különösen A, D, E, K, C, B), valamint az ásványi anyagok, fehérjék, zsírok és szénhidrátok. A vitaminhiány – például a skorbut esetében – súlyos következményekkel járhat. [30]

A vízellátás még kritikusabb: személyenként napi kb. 3 liter szükséges, ami egy hároméves küldetés során fejenként 3200 litert jelentene – ekkora mennyiség szállítása azonban jelenleg kivitelezhetetlen. Ezért elengedhetetlenek a víz-visszanyerő rendszerek: az ISS-en alkalmazott technológiák akár 98%-os újrahasznosítást is lehetővé tesznek. [30]

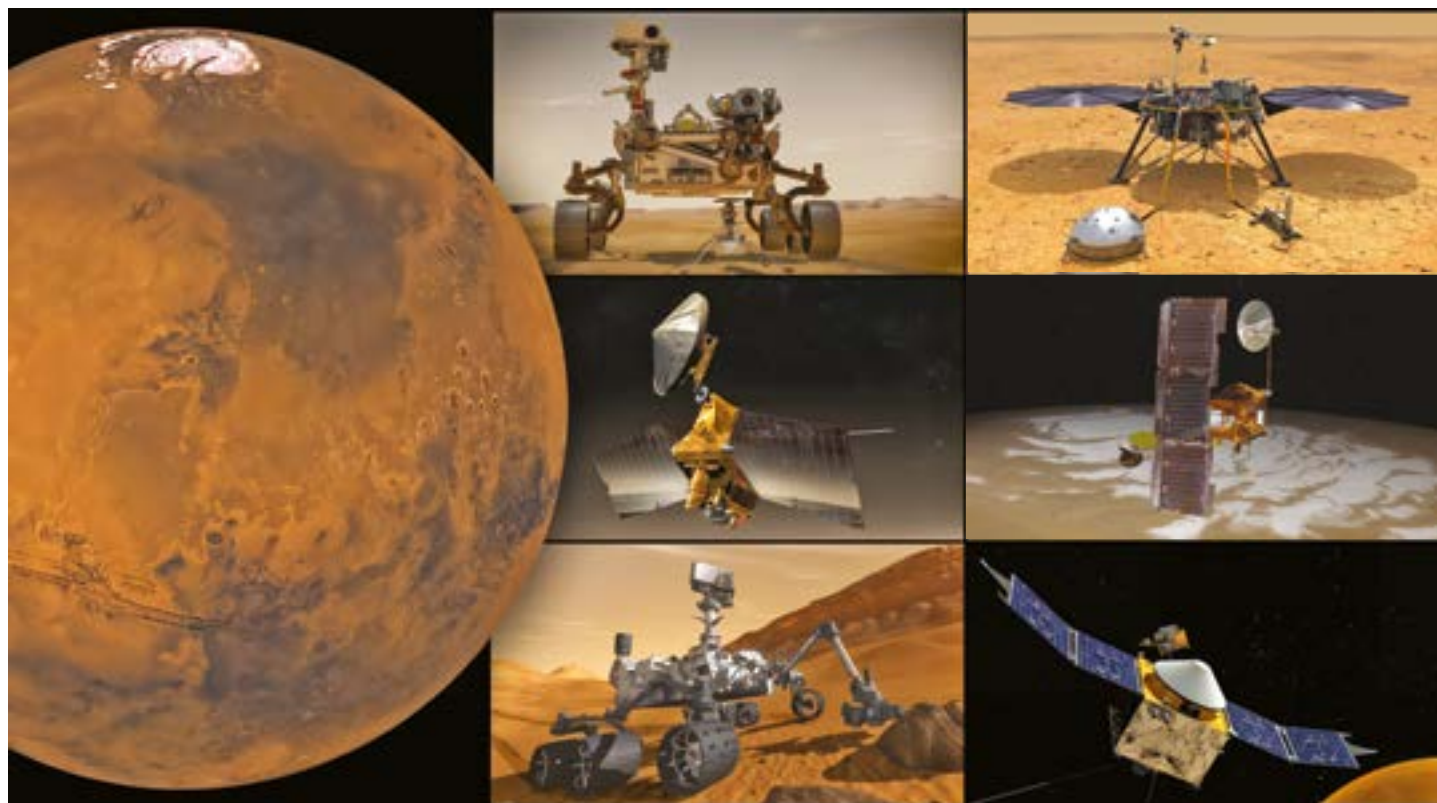
Az űrhajós élettérben a nyomást, a hőmérsékletet és a levegőösszetételt folyamatosan szabályozni kell. A súlytalanság gyors izom- és csonttömegvesztést okoz, amelyet napi testmozgással lehet mérsékelni. A Mars $0,38 \text{ g}$ -s gravitációja ilyen szempontból kedvezőbb a teljes súlytalanságnál, de a visszatérés továbbra is jelentős élettani megterhelést jelent. [30]

PSZICHOLÓGIAI KIHÍVÁSOK

A hosszú távú űrutazások jelentős pszichológiai megterheléssel járnak. Az izoláció, a korlátozott tér és az emberi kapcsolatok hiánya idővel súlyosan befolyásolhatja a személyzet mentális állapotát. [12] A Mars-missziók esetében ezt tovább fokozza az utazás hossza, az ismeretlen környezet és a visszatérés körüli bizonytalanság. A Mars felszíne nem nyújt közvetlenül élhető körülményeket, így az űrhajósok folyamatosan zárt, mesterséges élettérben kénytelenek tartózkodni, ahol a környezethez való alkalmazkodás nem lehetséges, és tartósan szükség van minden létfenntartó rendszer hibátlan működésére. Ezt tetézi a „pszichológiai távolság”: a Föld a küldetés során akár 400 millió kilométerre is lehet – jóval túl a Hold-program határain. [12] A kommunikációs késleltetés az égitestek

4. ÁBRA. A Perseverance marsjáró tesztelése a Sugárhajtás Laboratóriuma (Jet Propulsion Laboratory) kaliforniai épületében [7]





5. ÁBRA. A NASA Mars-küldetési, balról fentről az óramutató járásával megegyezően: Perseverance marsjáró és az Ingenuity Mars helikopter, InSight leszállóegység, Odyssey keringőegység, MAVEN keringőegység, Curiosity marsjáró és Mars Reconnaissance Orbiter (Forrás: NASA/JPL-Caltech)

egymáshoz viszonyított helyzetéből adódóan 4 és 24 perc között változhat, ami kizárja a valós idejű kapcsolatot, és fokozott autonómiát, döntéshozatali képességet követel meg az űrhajósoktól. A belső terek kialakításának is pszichológiai szerepe van: a monotonitás csökkentése, a privát szféra biztosítása és az otthonosság érzésének fenntartása hozzájárulhatnak a mentális stabilitáshoz, megvalósításuknak azonban határt szabnak az űrjármű korlátozott méretei. [12]

További kihívást jelent az utazás időzítése. A Mars és a Föld távolsága ciklikusan változik, így csak körülbelül 26 havonta nyílik lehetőség az optimális, minimális energiaigényű Hohmann-pályán történő indításra. [21] Ez a pályatípus az elérhető legalacsonyabb energiafelhasználással biztosítja az utat két bolygó között, de egyben a leghosszabb utazási idővel is jár. A visszaút megtervezése hasonló módon kötött: a légénységnek meg kell várnia a kedvező „visszatérési ablakot”, amely újabb hónapokat, akár egy teljes bolygóközi keringési ciklus kivárását is jelentheti a Mars felszínén.

A SUGÁRZÁS JELENTETTE VESZÉLY

A KOZMIKUS SUGÁRZÁS TÍPUSAI

Az elsődleges sugárzás közvetlenül asztrofizikai eseményekből származik.

- **Galaktikus kozmikus sugárzás (GCR):** a galaxisunkon belülről érkező, nagy energiájú töltött részecskékből (főként protonokból, alfa-részecskékből és nehezebb ionokból) álló sugárzás, amely a Naprendszeren kívülről származik, és állandó jelenlétével folyamatos háttérugárzást képez.
- **Extragalaktikus sugárzás:** távolabbi galaxisokból eredő, szintén nagy energiájú részecskék. Bár jelenlétük jóval kisebb mértékű, mint a galaktikus eredetű kom-

ponenseké, különleges események – például aktív galaxismagok, szupernóvák vagy gamma-kitörések – esetén lokálisan extrém sugárdózist is eredményezhetnek. Ennek vizsgálata jelenleg is kutatás tárgyát képezi. [13]

- **Szoláris részecskesugárzás (SEP):** a Naptól érkező nagyenergiájú protonok és elektronok főként napkitörések és koronakidobódások (CME – Coronal Mass Ejection) során keletkeznek. Ezek a részecskék akár 20–30 percen belül elérhetik a Föld és a Mars pályáját, és rövid idő alatt drasztikusan megnövelhetik a sugárterhelést. Jellemzően, a Nap aktivitása 11 éves ciklus szerint változik, amely kisebb-nagyobb eltéréssel egy kb. 4 éves emelkedő és egy 7 éves csökkenő fázisból áll. Ez az aszimmetrikus szerkezet jelentősen befolyásolja a részecskekibocsátás intenzitását és gyakoriságát, így a küldetések időzítése szempontjából kulcsfontosságú tényező. A ciklus dinamikája miatt a sugárzási viszonyok előrejelzése nehéz, ami növeli a kockázatot a hosszú távú Mars-utazások során. [14][16]

A másodlagos sugárzás akkor keletkezik, amikor az elsődleges sugárzások részecskéi a légkör atomjaival ütközve részecskezápórokat hoznak létre. A Föld vastag atmoszférája és mágneses mezeje jelentős védelmet nyújt ezek ellen. A Marson azonban – a rendkívül ritka légkör és a globális mágneses mező hiánya miatt – ez a védelem gyakorlatilag elhanyagolható, így az élő szervezetek közvetlenül ki vannak téve e sugárzások hatásának. [17]

SUGÁRVÉDELEM AZ ŰRBEN

A kozmikus sugárzás hosszú távon növeli a rák kockázatát, károsítja a sejteket, és hatással lehet az idegrendszerre is. [13] A GCR különösen veszélyes, mivel a nagy tömegű

és töltéssel rendelkező részecskék erős ionizációs hatással bírnak (a GCR 90%-a protonokból áll), és az űreszközök ellenük nehezen árnyékolhatók. [16] A hagyományos űrhajó burkolata sem nyújt elegendő védelmet ezek ellen.

A védekezés kulcsa a passzív árnyékolás (pl. vastag falak, víréteg, polietilén anyagok) [19], valamint a küldetés megfelelő időzítése. További kutatások folynak aktív mágneses pajzsok kifejlesztésére is, de ezek még kísérleti fázisban vannak. [19]

A Mars alacsony gravitációja közvetett módon befolyásolja a sugárvédelmet, mivel gátolja a sűrűbb légkör kialakulását és hosszú távú megtartását. Ez korlátozza a bolygó természetes árnyékoló képességét, különösen a nagy energiájú részecskékkel szemben. A gyenge gravitáció emellett megnehezíti a nehéz, nagy árnyékolóképességű anyagok – például víz vagy polietilén – tárolását és mozgatását a felszínen, ami technológiai kompromisszumokra kényszeríti a missziótervezőket. [24]

A SUGÁRZÁS ÉLETTANI HATÁSAI

Az emberi szervezet az evolúció során alkalmazkodott a Föld természetes háttérugárzásához, amely átlagosan évi körülbelül 2,8 mSv (millisievert). [13] A világűrben azonban az ionizáló sugárzás szintje nagyságrendekkel meghaladja ezt az értéket, különösen a bolygóközi térben vagy a Mars felszínén, ahol hiányzik a Földre jellemző mágneses és atmoszferikus védelem. [19] Egy, a NASA által modellezett, 2,5 éves, oda-vissza történő Mars-utazás során egy űrhajóst összesen mintegy 1,01 Sv sugárdózis érne – ez körülbelül 360-szorosa a Földi háttérugárzás éves értékének. [26]

A kozmikus sugárzás legnagyobb biológiai veszélye a DNS-károsodás, különösen az osztódásra hajlamos sejtek – a csontvelő, az ivarsejtek és a fehérvérsejtek – esetében. [14] [15] A hosszútávú sugárterhelés megnöveli a dagadt betegségek, a szürkehályog, a terméketlenség, valamint a veleszületett rendellenességek és idegrendszeri elváltozások kockázatát. [15][19] Az Apollo-küldetések során több űrhajós számolt be rövid fényvillanások érzékeléséről, különösen az Apollo-11 idején. [31] A jelenséget később nagy energiájú részecskék retinára gyakorolt hatásával magyarázták: ezek az idegrendszert stimulálva fényérzetet kelthetnek az agyban. [14] Bár az ilyen típusú expozíció

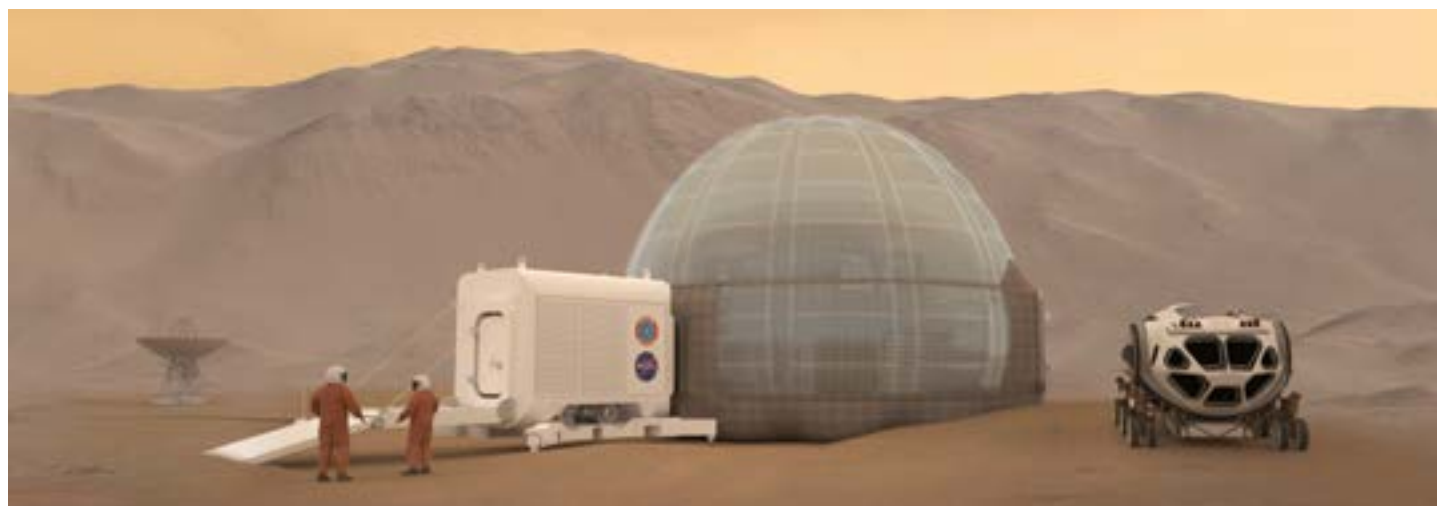
rövid távú egészségkárosító hatásait nem sikerült egyértelműen kimutatni, egyes későbbi vizsgálatok felvetették, hogy az űrhajósokat ért kozmikus sugárzás hozzájárulhat bizonyos szemészeti elváltozások – például a már említett szürkehályog – gyakoribb előfordulásához. [14][16]

SUGÁRZÁSI KÖRNYEZET

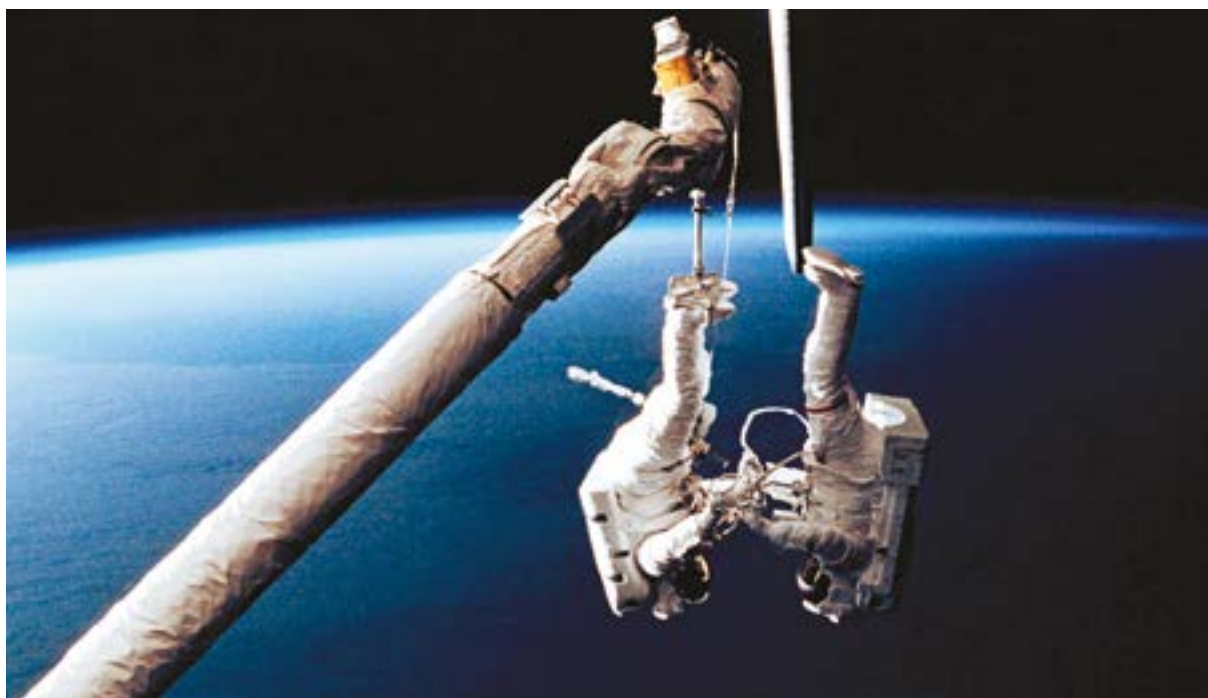
A Földet körülvevő Van Allen-sugárzási övek – egy belső, protonokban gazdag régió (kb. 1000–12 000 km magasságban) és egy külső, főként elektronokat tartalmazó övezet (megközelítőleg 13 000 és 60 000 km között) – részleges védelmet nyújtanak a felszíni élet számára a nagy energiájú galaktikus és szoláris sugárzással szemben. [18] Ezek a természetes védőmechanizmusok azonban kizárólag a Föld közvetlen környezetében érvényesülnek; egy Mars-misszió során, a bolygóközi térbe lépve ez a védelem megszűnik. Az űrbéli környezet extrém sugárzási viszonyait jól szemlélteti, hogy például a Hubble-űrtávcső környezetében az elnyelt dózis évi több száz gray is lehet. Ez ugyan nem az emberre ható biológiai dózist jelenti (amit sievertben fejezünk ki), de a gray-ben mért érték is komoly technológiai kihívást jelent az űreszközök sugárzás elleni védelme szempontjából. [19] Az Apollo-missziók során olyan repülési pályát alkalmaztak, amely a sugárzási öveket a lehető legrövidebb úton – szinte merőlegesen – szelte át, ezzel minimalizálva az asztronauták sugárterhelését. [16] A mai űreszközök, különösen a mikroelektronikai rendszerek, kifejezetten érzékenyek a nagy energiájú részecskékre. Emiatt napkitörések idején gyakran előzetesen lekapcsolják az érzékeny rendszereket, hogy megelőzzék az adatvesztést vagy a komolyabb károsodásokat. A Föld körül létezik egy viszonylag stabil, alacsony sugárzási szintű régió is – az úgynevezett „sugárzási minimumzóna” –, amely nagyjából 12 000 és 25 000 km közötti magasságban helyezkedik el, és viszonylag kedvező környezetet biztosít az érzékeny berendezések számára.

Egy Mars-utazás során azonban ez a védelmi lehetőség nem kihasználható, mivel a repülés tartósan a bolygóközi térben történik. A Napból származó nagy energiájú protonok – például egy koronakidobódás során – akár néhány órán belül elérhetik az űrhajót. Ha ezek ellen nem áll rendelkezésre megfelelő árnyékolás, a részecskeáramok olyan

6. ÁBRA. 2016-os koncepció ábra egy marsi lakómodulról (Forrás: NASA/Clouds AO/SEArch / Wikimedia)



7. ÁBRA. Mark C. Lee (jobbra) és Carl J. Meade (balra) űrhajósok az STS-64 küldetés során, 1994. szeptember 16-án. A felvételen látható a továbbfejlesztett, moduláris felépítésű űrruha, amelyre kiegészítő modulként rögzítették az ekkor elsőként tesztelt SAFER rendszert (Forrás: Shutterstock)



sugárdózist okozhatnak, amely már az életveszélyes tartományba esik az űrhajósok számára. Az Apollo-program szerencsés módon alacsony naptevékenységű időszakban zajlott, de a jövőbeni Mars-missziók indítását gondosan kell időzíteni, lehetőség szerint a napciklus minimumához igazítva, amikor a Nap aktivitása, és így a kockázat is csökken. [13]

A GAMMA-SUGÁRZÁS ÉS GALAKTIKUS EREDETŰ KOMPONENSEK

A Naprendszeren kívülről érkező gamma-sugárzás szintén jelentős kockázatot jelent az űrhajósokra nézve. Ezek a nagy energiájú fotonok rendkívül nagy áthatolóképeséggel rendelkeznek, és bár ionizáló hatásuk csekélyebb, mint a nehéz töltött részecskéké, mélyen behatolhatnak az űrhajó szerkezetébe, valamint az emberi testbe is. Mivel a gamma-sugarakat a hagyományos könnyű anyagok – például az alumínium vagy a műanyag kompozitok – csak korlátozottan képesek elnyelni, hatékony árnyékolásukhoz nagy sűrűségű vagy vastag rétegű anyagokra van szükség. Ez komoly kihívást jelent a Marsra irányuló küldetések tervezésénél, ahol a tömegoptimalizálás kulcsfontosságú. A gamma-sugárzás különösen problémás lehet a hosszú távú felszíni tartózkodás során, ahol az állandó háttérsugárzás folyamatos terhelést ró a szervezetre. Emiatt nemcsak az űrhajók, hanem a felszíni bázisok kialakításakor is kiemelt figyelmet kell fordítani az ilyen típusú sugárzás elleni védelemre. [19]

SUGÁRVÉDELEM A MARS KÖZELÉBEN

A Mars nem rendelkezik globális mágneses térrel, korábbi sűrű légköre pedig mintegy 4,2 milliárd éve elillant, így felszíne ki van téve a galaktikus és szoláris kozmikus sugárzásnak. Az InSight leszállóegység mérései – különösen a mágneses anomáliák és a felszíni tér vizsgálata – hozzájárultak az ősi magnetoszféra rekonstrukciójához. Egyes régiókban a felszínközeli kőzetek akár hússzor erősebb mágnesezettséget mutattak, mint azt korábban feltéte-

lezték, ami a korai globális mágneses tér maradványára utalhat. A napi ingadozások a napszél és az ionoszféra kölcsönhatására utalnak. A geofizikai mérések alapján a Mars magjának összetétele nem alkalmas aktív mágneses tér fenntartására, így a bolygón jelenleg nincs a Föld Van Allen-öveihez hasonló természetes sugárvédelmi övezet. Ez a sugárzás tartós egészségügyi kockázatot jelent az emberi jelenlét számára. [4] A gamma-sugárzás elsődleges forrásai az aktív galaxismagok, de a szupernóvarobbanások vagy pl. neutroncsillagok ütközésekor létrejövő „gammavillanások” rövid időre extrém módon megnövelhetik a sugárzás mértékét. Sajnos, mivel a gamma-sugárzás fénysebességgel terjed, semmilyen módszer nincs az előrejelzésére, így kiszámíthatatlan kockázatot jelent az űrutazás szempontjából.

Az Apollo-11 alumíniumborítása kb. 7 mm vastag volt, ami elméletileg egyenértékű 7 mm ólommal, mégsem nyújtott hatékony védelmet a mélyűri sugárzás ellen – különösen nem a gamma- és neutronsugárzással szemben. [16] A nagy rendszámú anyagok, mint az ólom vagy vas, bár hatékonyak, túl nehezek, ezért alternatívaként használható a víz: jó sugárelnyelő, emellett más funkciókat is ellát (pl. hűtés, ivóvíz). [19]

A védekezés elméleti lehetőségei között szerepelnek mesterséges mágneses pajzsok is, melyek a Föld magnetoszférájához hasonló módon térítenék el a töltött részecskéket – ezek fejlesztése még kísérleti szakaszban van. Emellett a SpaceX Starship koncepciójában az üzemanyagként alkalmazni kívánt folyékony metán megfelelően kialakított tartályokban való elhelyezése részleges védelmet biztosíthat, mivel a hidrogéntartalmú metán jó elnyelő a GCR és neutronfluxus esetében. [27]

A személyi védelem lehetőségei korlátozottak: a jelenleg használatos űrruhák [25] csak alacsony energiájú sugárzás ellen védenek rövid távon. Az ISS-en használt, továbbfejlesztett változatok modulárisak, SAFER (Simplified Aid

for EVA Rescue – űrbéli mentőegység) rendszerrel vannak ellátva. [11] A NASA 2022-es bejelentése szerint a Collins Aerospace új szakfanderei kiemelt figyelmet fordítanak a sugárzás- és a mechanikai védelemre, különösen marsi környezetben. [22]

A hosszú távú ott-tartózkodáshoz sugárvédett lakómodulok szükségesek. A Starship 4 mm vastag acélburkolata alapvető, de messze nem elégséges védelmet nyújt. [15] Kiegészítőként szolgálhat a Bigelow Aerospace B330 fel-fújható modulja, amely 330 m³ belső térrel és fokozott védelmi képességekkel rendelkezik – mind a sugárzás, mind a meteorbecsapódások ellen. [20] Az UV-szűrőkkel ellátott, többfunkciós belső térrel rendelkező B330 alkalmas kutatólaboratóriumnak és személyzeti egységnek egyaránt. A Starship és a B330 együttes alkalmazása komplex, hosszú távon fenntartható marsi környezet kialakítását teszi lehetővé.

ÖSSZEZEGÉS

Cikkünkben áttekintettük az emberes Mars-küldetés technológiai, élettani és környezeti kihívásait, különös tekintettel a sugárvédelem kérdésére. Bemutattuk a bolygó jellemzőit, az automata küldetések eredményeit és ezek korlátait, amelyek alapul szolgálnak a jövőbeli missziókhoz. Kiemelt figyelmet fordítottunk a hosszú távú utazások fizikai és pszichológiai terhelésére, valamint a kozmikus sugárzás okozta egészségügyi kockázatokra. Részleteztük az árnyékolási stratégiák főbb lehetőségeit, ideértve az anyagválasztást, az eszközök kialakítását és az indítás időzítését. A Starship és a B330 modul példáján keresztül bemutattuk, hogyan biztosítható tartósan lakható környezet a Mars felszínén. Az emberes Mars-küldetés így már nemcsak vízió, hanem elérhető cél – ha a műszaki, biológiai és környezeti kihívásokra megfelelő válaszokat találunk. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Schultz, Jim – Allen, Bob: Launching the Space Race: Making Space. NASA, 2017. <https://www.nasa.gov/langley/100/making-space> (Letöltve: 2022.07.22.)
- [2] Portee, David S. F.: History of Space Stations. Encyclopedia.com, 2020. <https://www.encyclopedia.com/science/news-wires-white-papers-and-books/space-stations-history> (Letöltve: 2022.07.25.)
- [3] Sheehan, William: The Planet Mars: A History of Observation and Discovery. University of Arizona Press, Tucson, 1996.
- [4] Williams, Dave: Mars Fact Sheet. NASA Goddard Space Flight Center, 2021. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html> (Letöltve: 2022.10.17.)
- [5] NASA: Mars Exploration Program – Mars Facts. NASA, Science Mission Directorate, Washington, D.C., 2024. <https://mars.nasa.gov/all-about-mars/facts/> (Letöltve: 2025.07.22.)
- [6] Life on Mars. A biologist's journey to the Red Planet: The view from Mount Olympus https://lifeonmarsdotme.files.wordpress.com/2014/04/olympus_mons_on_mars_wallpaper-800x600.jpg?fbclid=IwAR1kmeOBBhKwC2tRRnA0VPzgxdkLiNdRkCGHGAH_GVkBgI6NRSrIS9u8Qg (Letöltve: 2022.10.17.)
- [7] Európai Űrügynökség képtár. Perseverance marsjáró. Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal, Európai Űrügynökség képe https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2020/04/perseverance_rover/21916728-1-eng-GB/Perseverance_rover_pillars.jpg (Letöltve: 2022.10.16.)
- [8] Wiens, Roger: Red Rover. Hachette Book Group, New York, 2013.
- [9] Abel, Anthony J. et al.: Photovoltaics-Driven Power Production Can Support Human Exploration on Mars. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2022. (Letöltve: 2022.09.10.) <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.868519>
- [10] Maki, J. N. et al. (2020). The Mars 2020 Engineering Cameras and Microphone on the Perseverance Rover: A Next-Generation Imaging System for Mars Exploration, Space Science Reviews. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-020-00765-9> (Letöltve: 2022.09.16)
- [11] Meade, Carl J.: First Flight Test Results of the Simplified Aid For EVA Rescue (SAFER) Propulsion Unit. Symposium Proceedings – Society of Experimental Test Pilots, 1995. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120011735/downloads/20120011735.pdf> (Letöltve: 2025.07.13.)
- [12] Dingfelder, Sadie F.: Mental Preparation for Mars. American Psychological Association, 2004. <https://www.apa.org/monitor/julaug04/mental> (Letöltve: 2022.10.28.)
- [13] Townsend, Lawrence W.: Information Needed to Make Radiation Protection Recommendations for Space Missions Beyond Low-Earth Orbit. National Council on Radiation Protection and Measurements, 2006.
- [14] Polgár Andrásné: A radioaktív sugárzás hatásai. Pest Megyei Pedagógiai Intézet, Budapest, 1990.
- [15] Köteles György: Sugáregészség. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 2002.
- [16] Salerian, Alen J.: Apollo Flights and the Hazards of Radiation. Neuroscience Institute, Zaimi, Paleo Faloro, Athens, Greece, 2021. <https://www.heraldopenaccess.us/openaccess/apollo-flights-and-the-hazards-of-radiation> DOI: 10.24966/PMRD-8670/100061
- [17] Pinsky, L. S. et al.: Light Flashes Observed by Astronauts on Apollo 11 through Apollo 17. Science, Vol. 183, Issue 4128, 1974, pp. 957–959.
- [18] SPace ENvironment Information System (SPENVIS): Radiation belts simulations. <https://www.spenvis.oma.be/> (Letöltve: 2022.10.18.)
- [19] Seedhouse, Erik: Space Radiation and Astronaut Safety. Springer International Publishing AG, 2018.
- [20] Roulette, Joey: NASA eyeing inflatable space lodges for moon, Mars and beyond. Reuters.com, 2019. <https://www.reuters.com/article/us-space-exploration-habitat-idUSKBN1WW1H2> (Letöltve: 2022.10.19.)
- [21] Smithsonian Institution / NASA Science: Chapter 4: Trajectories – Earth–Mars via Least Energy Orbit. NASA Science, 2008. <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter4-1/> (Letöltve: 2025.06.18.)
- [22] Collins Aerospace: Collins Aerospace Selected to Develop NASA's Next Generation Spacesuits for the Moon and Mars. Collins Aerospace Newsroom, 2022. <https://www.collinsaerospace.com/newsroom/News/2022/06/NASA-Selects-Collins-Aerospace-for-Next-Gen-Spacesuits> (Letöltve: 2025.07.13.)
- [23] NASA's Perseverance Mars Rover Extracts First Oxygen from Red Planet. 2021.04.21. Elérhető: <https://www.nasa.gov/news-release/nasas-perseverance-mars-rover-extracts-first-oxygen-from-red-planet/> (Letöltve: 2025.11.07.)
- [24] Durante, M. – Cucinotta, F. A.: Space Radiation Protection: Destination Mars. Life Sciences in Space Research, 1 (2014), 2–9. (Letöltve: 2025.07.22.)
- [25] Swartout, Benjamin et al.: Exploration Extravehicular Mobility Unit (xEMU) Helmet and Extravehicular Visor Assembly (EVVA) Chamber B Thermal Vacuum Testing Results. 53rd International Conference on Environmental Systems, 2024.07.21–25., Louisville, Kentucky. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240004520/downloads/ICES_2024%20Helmet%20Final%20Strives%20Submit.pdf (Letöltve: 2025.07.22.)
- [26] NASA: Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions. NASA Human Research Program, 2023. <https://humanresearchroadmap.nasa.gov/evidence/reports/EvidenceBook.pdf> (Letöltve: 2025.07.22.)
- [27] Kingdon, Jack et al.: 3-months transit time to Mars for human missions using SpaceX Starship. Scientific Reports, 2025. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-00565-7> <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00565-7>
- [28] Végvári Zsolt: Kilopower – villamos erőmű a Marson 1. rész. Haditechnika, 2019/2, 43–46. DOI: 10.23713/HT.53.2.08
- [29] Végvári Zsolt: Kilopower – villamos erőmű a Marson 2. rész. Haditechnika, 2019/3, 39–42, 2019. <https://doi.org/10.23713/HT.53.3.07>
- [30] Risk of Inadequate Food and Nutrition Causing Decrements in In-Mission Health and Performance and Long-term Health (Food and Nutrition Risk) – Revision D. NASA Human Systems Risk Board, 2025.06.09. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2025/08/food-risk-record-rev-d-web-final.pdf> (Letöltve: 2025.11.07.)
- [31] G. A. Nelson: The Space Radiation Environment. TRISH Red Risk School Seminar Series, 2020.04.30. <https://www.bcm.edu/sites/default/files/2020-05/red-risk-talk-g-nelson-042920.pdf> (Letöltve: 2025.11.07.)