

A MARS BOLYGÓ KUTATÁSA

STUDYING PLANET MARS

Pál Bernadett

doktorandusz, tudományos segédmunkatárs

Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizika Doktori Iskola, Budapest

pal.bernadett@csfk.org

ÖSSZEFOGLALÁS

Naprendszerünk legintenzívebben kutatott bolygóinak egyike külső bolygósomszédunk, a Mars. A cikkben először áttekintem a Föld és a Mars főbb hasonlóságait, eltéréseit, valamint a vörös bolygó múltja és jelene közötti különbségeket. Ezután történelmi utazásra invitálom az olvasót, amelyben röviden összefoglalom a marslakók legendájának megszületését. Habár a kezdeti, intelligens étellel burjánzó Mars képe mára szertefoszlott, a marsi élet különböző nyomainak kutatása nem állt meg; cikkem lezárásaként a víz és élet nyomába induló leszállóegységek és marsjárók technológiai fejlődését, legfontosabb eredményeit szedem csokorba.

ABSTRACT

Our neighbouring planet, Mars, is one of the most intensively studied planets in our Solar System. In this article, I review the main similarities and differences between Earth and Mars, as well as the changes occurred between the past and the present of the Red Planet. Afterwards I encourage the reader to take a brief trip through history, in which I discuss the legend of the Martians. Although our initial dreams of finding intelligent life on Mars have since vanished, the search for various forms of life on Mars did not stop; I wrap up with the evolution and main results of landers, rovers that ventured out to seek signs of water and life on Mars.

Kulcsszavak: Mars, marskutató, csillagászat, planetológia, folyékony víz

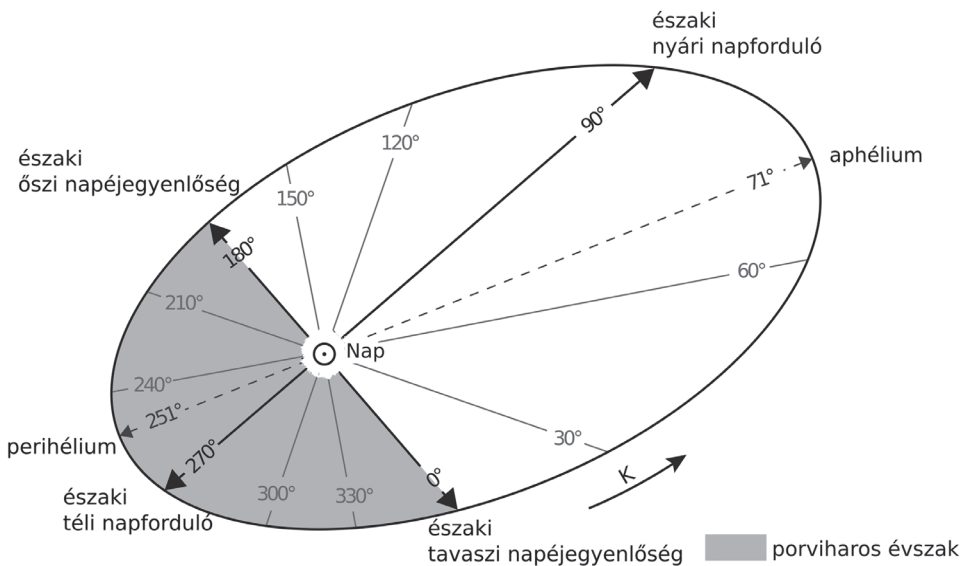
Keywords: Mars, Mars research, astronomy, planetology, liquid water

A MARS

Hiába telt el már közel ötven év az első sikeres látogatás óta, külső bolygósomszédunk, a Mars kutatása azóta is szakadatlan lelkesedéssel folyik. Mi teszi vajon ilyen népszerű célponttá a vörös bolygót? (A Mars jellegzetes, vörös színét a felszínén gyakori, vastartalmú kőzetek okozzák.) Első pillantásra sok hasonlóságot

találhatunk a Föld és a Mars között: mindkét bolygónak van légköre, időjárása, hasonló tengelyferdesége miatt évszakai, sőt a marsi nap (véletlenül) mindössze körülbelül 40 perccel hosszabb egy földi napnál. Közelebről vizsgálva azonban már egyre több eltérés árnyalja a képet. A marsi légkört 95%-ban szén-dioxid alkotja, légnomása pedig a földi átlagos 1013 millibar tengerszinti légnomással ellentétben mindössze átlagosan 6–8 millibar a felszínen, sűrűsége a földi légkör alig 1%-a. Atmoszférájában nincs ózonréteg, így a Napból érkező káros UV-sugárzás, illetve más forrásokból érkező sugárzások is alig gyengítve érik el a felszínt. Globális mágneses tere sincsen, amely megszürné a napszelet és a kozmikus sugárzást.

A földi légnomás éves szinten aligha változik, a légköri szén-dioxid mennyiségének évszakai eltérése miatt azonban a Marson már közel sem állandó a légnomás. Ennek a folyamatnak a fő mozgatórugója az északi és déli félteke sarkvidékein beköszöntő telek közötti hőmérséklet-különbség. Az északi poláris tél viszonylag rövid és meleg, a déli viszont hosszú és könyörtelenül hideg. A fagyos déli tél idején, mikor a hőmérséklet -123 °C alá esik, a légkörből szén-dioxid fagy ki dér, hó vagy jég formájában a déli poláris sapkára; emiatt pedig a légnomás 25-30%-kal csökken. Ezt elképzelhetjük úgy is, hogy az egyik polársapka felső rétege légnemű formában átvándorol a másikra, majd fél évvel később visz-



1. ábra. Egy marsi év leforgásának illusztrációja, rajta az északi félteke évszakainak jelentős fordulóival (ezekkel egy időben a déli féltekén ellentétes évszak van), valamint a napközeli (perihélium), naptávol (aphélium) és a porviharos időszak megjelölésével. A marsi év előrehaladtát általában az ábrán is feltüntetett, szoláris hosszúságban (Ls°) méri (Pál et al., 2019)

szatér. A két félteke ily módon eltérő évszakait a Mars erősen elnyúlt, excentrikus pályájával (*1. ábra*), illetve a keringési sebesség ezzel járó változásaival lehet magyarázni – ugyanakkor a déli pólussapka nyáron is megmaradó szén-dioxid fedőrétege magas albedójának (fényvisszaverő képességének) kialakulása még pontosan nem tisztázott.

Amikor a Mars napközbe ér, a déli félteke „dől” a Nap felé, míg az északi félteke a naptávol idején. Ez okozza azt, hogy a déli nyár jóval forróbb, mint az északi nyár. A déli féltekét érő extra hő, valamint az évszakai pólussapka gyors zsugorodása erős légáramlatokat, nagy szeleket és hatalmas viharokat okoz. Összességében a déli félteke évszakai „keményebbek”, például mivel a déli tél során van a legmesszebb a Naptól, így ez hosszabb is az északi télnél (Kepler II. törvényének következtében lassabban kering). A télből a melegebb tavaszba lépés egészen drámai is lehet, nagy viharokkal, erős szelekkel. A déli tavasz kezdete így egyben a poros évszak kezdetét is jelenti, amelynek során a bolygó különféle részein kialakuló lokális porviharok akár globális, az egész bolygót elnyelő hatalmas porviharokká is alakulhatnak.

A marsi légköri áramlatok részben egyszerűbbek a földieknél, mivel nincsenek a légtömegeket „megzavaró” óceánok. Alacsonyabb szélességeken a Hadley-cella dominál, ilyen típusú légköri áramlás a Földön is megfigyelhető. A Nap sugárzása az egész Földet melegíti, de a felszínen nem egyenletes a hő eloszlása – az egyenlítői és trópusi területeket több napsugárzás éri, mint a közepes földrajzi szélességű vagy sarki régiókat. Összességében a trópusokra több hő érkezik, mint amennyit kisugároznak, a sarkvidékeken pedig ez éppen fordítva történik. Ha nem lenne hőszállítás, a trópusi övezetek egyre melegednének, míg a sarkvidékek egyre csak hűlnének. A hőenergia a melegebbek felől a hidegebb területek felé áramlik, a Föld esetében részben légköri (60%), részben óceáni (40%) áramlatokkal. A Hadley-cella tehát az a légköri áramlás, amelynek során az Egyenlítőnél felszálló meleg légtömegek a sarkok felé áramolva kb. 30° szélességnél szállnak le; a felszálló meleg levegő nedvességet veszít (trópusi esők), a leszálló száraz légtömegek pedig szárítják a felszínt. A Marson ez a típusú légáramlás dominál, az Egyenlítőnél felemelkedő meleg levegő egy része észak felé, egy része pedig dél felé áramlik, és a 30° szélesség környékén lehül, lesüllyed, és a felszínen visszaáramlik az Egyenlítőhöz.

Mivel a bolygó forog, ezért a légtömeg nem tud tökéletesen észak–déli irányban áramlani, valamint a felszínformák is megzavarják a légáramlatokat. A felszínközeli szelek jellemzően az északi féltekén így északkelet felől, a délin délkelet felől érkeznek. Magasabb szélességeken, ahol a sarkköri levegő dominál, nyugatról keletre magasabb és alacsonyabb légnyomású légtömegek sepernek végig, amelyek a Hadley-cella áramlataival kölcsönhatásban éles frontokat, nagy viharokat okozhatnak. A marsi frontok azonban általában gyengébbek a földieknél, mivel a légkör jóval vékonyabb, alacsonyabb a hőmérséklete, illetve a légköri vízpára mennyisége (ami sok energiát szállít) szinte minimális.

ŐSI PARADICSOM

Ha visszautazunk az időben, akkor viszont egészen más kép tárulhat elénk a Marsról. Mára számos bizonyítékot találtunk arra, hogy évmilliárdokkal ezelőtt folyékony víz lehetett a bolygó felszínén. A kiszáradt folyómedrek, ősidőkből megőrződött partvonalak, vizes környezetben kialakult agyagos kőzetek és a sós felszintakaró is mind a vizes múltat sejtető nyomok közé tartozik (Kereszturi, 2006).

A vörös bolygón lezajlott ősi folyamatokat marsi meteoritok segítségével is lehet a Földön elemezni (Gyollai et al., 2019). A nehévíz és a H₂O ma mérhető arányát a meteoritokban megőrződött 4,5 milliárd évvel ezelőtti állapotokkal összevetve például becsülhető, hogy mennyi vizet veszített a bolygó a történelme során (Villanueva et al., 2015). A poláris jégsapkák deutériumdúsulását megvizsgálva a számítások szerint a Mars a jégsapkáiban jelenleg levő víz térfogatának mintegy 6,5-szeresét veszíthette el, ami azt jelenti, hogy az ősi Marson legalább 20 millió köbkilométer víznek kellett lennie. A ma látható felszínnel kalkulálva valószínűleg az északi síkságon terülhetett el a víztömeg java része, és az ősi óceán a teljes bolygó felszínének 19%-át boríthatta. Összehasonlításképpen, az Atlanti-óceán a Föld felszínének 17%-át borítja.

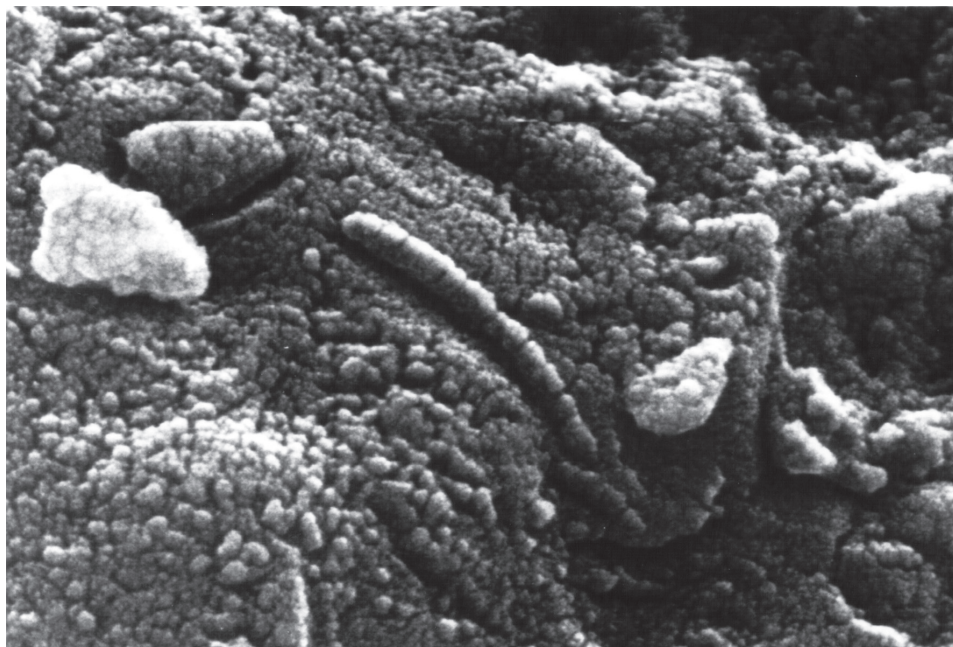
Lehet, hogy a vízkészleteinek elvesztésére a globális porviharokban találjuk meg a választ egy 2019-es Nature-tanulmány eredményei szerint (Vandaele et al., 2019). A tanulmány vezető szerzőjének korábbi eredményei is bizonyították már, hogy a globális porviharok a felszín felett 20 km-es rétegből akár 80 km magasra is felkapják a légköri vízpárát. A NASA Mars Reconnaissance Orbiter keringőegység is megfigyelt egy hasonló eseményt 2007-ben, mikor a légkör középső rétegeiben a porviharokhoz köthetően megnövekedett a vízpára mennyisége. Az emelkedő légtömegek tehát nemcsak a port kapják fel, hanem a vizet is. A MAVEN szonda, amely 2014-ben érkezett a bolygóhoz, a Mars Express keringőegységgel karöltve az atmoszféra szökését vizsgálja (Ramstad et al., 2017). Eredetileg, a MAVEN érkezése előtt arra számítottak, hogy a marsi légkörből nagyjából egyenletes mennyiségben szökik a hidrogén, a szökési ráta változásait pedig legfeljebb a napszél erejével lehet majd összefüggésbe hozni. A MAVEN és a Mars Express adatai azonban nem illeszkedtek ebbe a várt mintába, helyette azt figyelték meg, hogy a szökés a napaktivitás helyett az évszakokkal változik. A vízpárát a légkör felsőbb rétegeibe juttatva a porviharok megzavarhatják a marsi vízciklust, megakadályozva, hogy a vízpára kondenzálódva visszahulljon a felszínre.

A MARSLAKÓK LEGENDÁJA

Mára tehát egyre elfogadottabbá válik, hogy a Mars múltjában jelentős mennyiségű víz boríthatta a bolygó felszínét. A csillagászok érdeklődését azonban már jóval korábban felkeltette bolygósomszédunk: 1877-ben Giovanni Schiaparelli

olasz csillagász távcsövével vette szemügyre a Marsot, és egy potenciálisan buja, mesés világ jeleit vélte látni. Megfigyeléseiben tengereket és kontinenseket említ, valamint csatornahálózatokat is; ezekről később kiderült, hogy optikai illúziók lehettek, de az is elképzelhető, hogy saját szemfenekének érhálózatát látta.

Schiaparelli beszámolóit elolvasva Percival Lowell amerikai csillagász a marsi élet ötletét még tovább gondolva, 1908-ra megírta a *Mars as the Abode of Life* című könyvét, melyben a marsi civilizációkat leírva bemutatja azt is, ahogyan a csatornákat a sarkvidékektől az egyenlítői területek felé kiépítették, hogy vizet szállítsanak. A következő évtizedekben számos tudományos cikk jelent meg arról, hogyan jelezhetnénk a titokzatos marsi civilizációnak, illetve 1920-ban Max Fleischer rajzfilmkészítő a *Hello Mars* című rövidfilmjében mutatta be, milyen módon lehetne felvenni a kapcsolatot a marslakókkal. Felveti, hogy a Nap fényét egy óriási tükrökkel visszaverve világítsunk át a Marsra, vagy a Szaharában kifeszített rengeteg, felcsavarható fekete ruhadarabbal „kacsintsunk” rájuk, illetve, egy sor nagy teljesítményű elektromos lámpával villogjunk át valamilyen üzenetet. Akkoriban úgy tartották, ha sikerül felvenni a kapcsolatot a marslakókkal, sokat tanulhatunk tőlük.



2. ábra. Szokatlan, az emberi hajszál 1/100-nak vastagságával megegyező hosszúságú alakzat az ALH84001 jelű marsi meteorit nagyfelbontású, pásztázó elektronmikroszkópos felvételén.

A meteorit a legidősebb marsi meteoritok egyike, feltehetőleg 4 milliárd évvel ezelőtt, olvadt kőzetből kristályosodhatott ki, a bolygónak még azon időszakában, amikor felszínén folyékony víz lehetett (Fotó: NASA, URL1)

A marslakók övezte rejtély Orson Welles 1938-as rádiójátékával tetőzött, amelyben H. G. Wells *A világok harca* című könyvének túlságosan valóságosra sikeredett előadása keretében hozta rá a frászt a hallgatóságára. A rádió előtt ülők közül sokan elhitték, hogy a New Jersey állambeli Grover's Mill területén leszálltak a felfegyverzett marslakók, melynek hatására kisebb pánik tört ki. A marslakók létezése körül felépült legendáknak 1965-ben a NASA Mariner–4 szondája vetett véget, mikor a marsi felszínt lefényképezve először pillanthattuk meg, hogy sem városoknak, sem óceánoknak, de még az egyszerűbb életformáknak sincsen semmilyen jelük. 1976-ban indult útjára a Viking leszállóegység, amelynek fő célja a marsi életformák felkutatása volt – de nem járt sikerrel, sőt minden fényképe azt mutatta, hogy a Mars nem több egy kopár pusztaságnál. Halovány reménységként tűnt fel 1996-ban az ALH84001 jelű marsi meteorit, amiben lehetséges primitív marsi baktériumok jeleit találhatták meg (2. ábra). Habár vitatták ezek tényleges marsi eredetét, helyette inkább a meteorit Földön eltöltött ideje alatt kialakult mikrobiális élet nyomainak vélték a mikrofossziliákat, az ősi marsi élet keresése ismét új erőre kapott.

Az évek során összegyűjtött mérési adatokból 2021-ben jelent meg a Hargitai Henrik által összeállított *Mars 36* zsebatlasz. Az eddigi Mars-térképek többnyire fényképekből összemozsaikolt vagy különböző módszerekkel készített domborzati, földtani (marstani) térképek voltak. A hagyományos atlaszok azonban számos földrajzi tematikát ötvöznek, domborzati térképi alapon vizek, jeges területek, vulkánok, hegycsúcsok is megtalálhatóak rajtuk. A *Mars 36* alapja egy integrált, az eddig publikált tematikus felszínforma-adatbázisokat egységesítő NASA-adatbázis, amelyet szintén Hargitai Henrik állított össze. A tervek szerint két év múlva várható a Mars következő térképe, amely részletesebben mutatja majd be az egykori élet számára legalkalmasabb helyszíneket. A kiadvány ideálisan egészíti ki a *Mars – fehér könyv a vörös bolygóról* című munkát (Kereszturi, 2012).

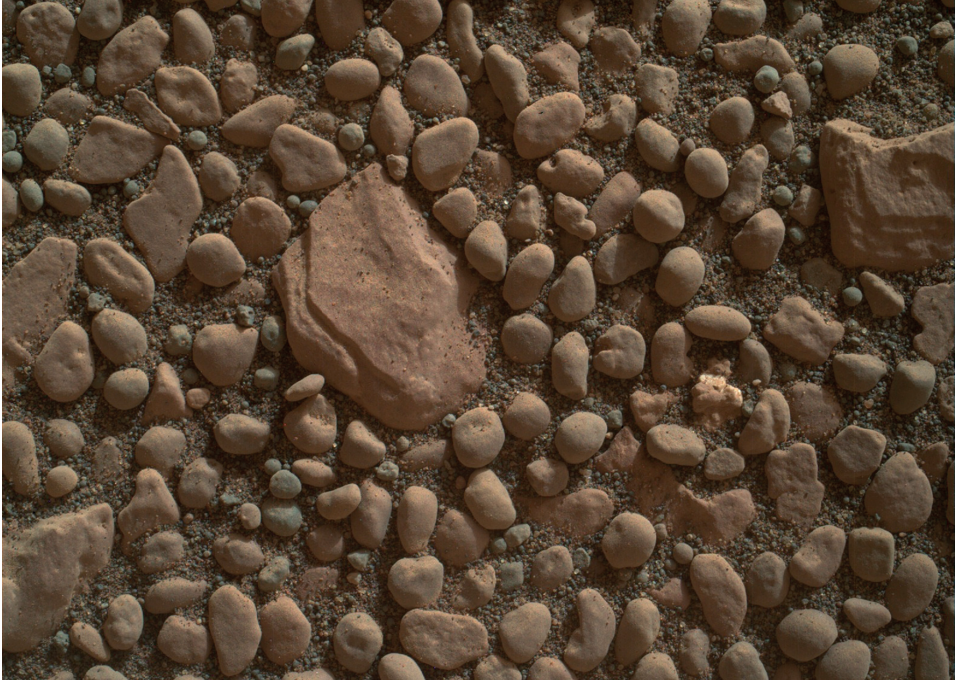
A VÍZ NYOMÁBAN

Mivel az általunk ismert élet elengedhetetlen eleme a víz, egy sor küldetés indult a marsi víz keresésére. A Mars Global Surveyor keringőegység 1997. szeptember 12. és 2006. november 14. között működött, ez idő alatt a teljes marsi légkört, a bolygó felszínét és szerkezetét is tanulmányozta. Éghajlati mintázatokat keresett, ismétlődő porviharokat, porördögöket, valamint rengeteg nagy felbontású képet készített vízmosásokról, törmelékfolyásokról is. Megfigyelt alakuló felszínformákat, becsapódásos krátereket, a déli jégsapkán változó szén-dioxid-jégborítást, továbbá megállapította, hogy bár a Marsnak nincsen globális mágneses tere, bizonyos részein vannak lokálisan mágnesezett régiók.

Egyfajta technológiai demonstrációként is indult a Pathfinder, valamint a Sojourner, az első robotikus marsjáró, amely sikeresen szállt le a vörös bolygóra. A rover 1997. július 4-én landolt, és 1997. szeptember 27-ig működött. A Sojourner marsjáró kerekeinek felfüggesztéséhez használt megoldás koncepcióját Pavlics Ferenc, Magyar Örökség-díjas magyar mérnök dolgozta ki; annak a holdjárónak a főkonstruktor, amellyel az Apollo–15, Apollo–16 és Apollo–17 küldetések űrhajósai a Holdon közlekedtek. A holdautó tervezésénél szerzett tapasztalatait hasznosította a Sojourner marsjáró tervezésénél is, részt vett a Spirit és az Opportunity kidolgozásában, valamint a Mars Science Laboratory készítésében is. A Pathfinder legfőbb eredményei közt említhetjük a leszállóhely környékén talált lekerekített kavicsokat, a légköri por mágnességének felfedezését, valamint a kora reggel megjelenő, alacsony légköri vízjégfelhők megfigyelését is.

Eredeti kilencvennapos küldetéseiket sokszorosan túlteljesítették a Spirit és Opportunity ikermarsjárók, amelyek 2004. január 4-én landoltak. A két marsjáró a bolygó két olyan áttellenes pontjára szállt le, ahol úgy vélték, hogy korábban folyékony víz lehetett. A Spirit egészen 2011. május 25-ig működött a Mars felszínén, az Opportunity pedig még tovább, 2019. február 13-ig maradt működőképes. A Spirit eredményei megerősítették az ősi marsi víz létezését, rengeteg izgalmas kőzetet talált, valamint számos porördögöt is megörökített mozgás közben. Az Opportunity is talált bizonyítékot arra, hogy a Mars egykor alkalmas volt a mikrobiális élet fenntartására, valamint arra, hogy az ősi Marson akár huzamosabb ideig is folyékony víz lehetett.

Fennálltak-e valaha a mikrobák fennmaradásához kedvező környezeti feltételek? Erre keresi a választ a 2012. augusztus 5-én landolt Curiosity marsjáró, ami a Gale-krátert a mai napig járva kőzet-, talaj- és levegőmintákat gyűjt (3. ábra). Fő feladatai közt szerepel annak a megállapítása, hogy volt-e valaha élet a Marson, illetve milyen a mai marsi klíma. Már küldetésének elején talált kémiai és ásványi bizonyítékokat is arra, hogy a múltban élhető lehetett a bolygó, például kimutatta a kalcium-perklorát jelenlétét is a felszíni regolitban. Ennek egyik jelentősége az elfolyósodás (deliquescence) folyamatához köthető. Ez a jelenség a Földön is megfigyelhető, a higroszkópos anyagok képesek közvetlenül a légkörből megkötni a vízpárát, a folyamat során önmagukat feloldva, elfolyósítva. Az így potenciálisan megjelenő, vékony, szinte mikroszkopikus vízfilmréteg ma is előfordulhat a Marson, illetve rövidebb-hosszabb ideig fenn is maradhat (Kereszturi, 2013). Ennek modellezésével foglalkozik dr. Kereszturi Ákos vezetésével az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetének Asztrofizikai Geokémiai Laboratóriumi kutatócsoportjában e sorok szerzője is. A magyar szakemberek közreműködnek a várhatóan 2022-ben induló ExoMars Rosalind Franklin rover HABIT-műszerének munkájában is, amely BOTTLE-berendezésével az elfolyósodás folyamatát fogja *in situ* vizsgálni a Marson (Martín-Torres et al., 2020).



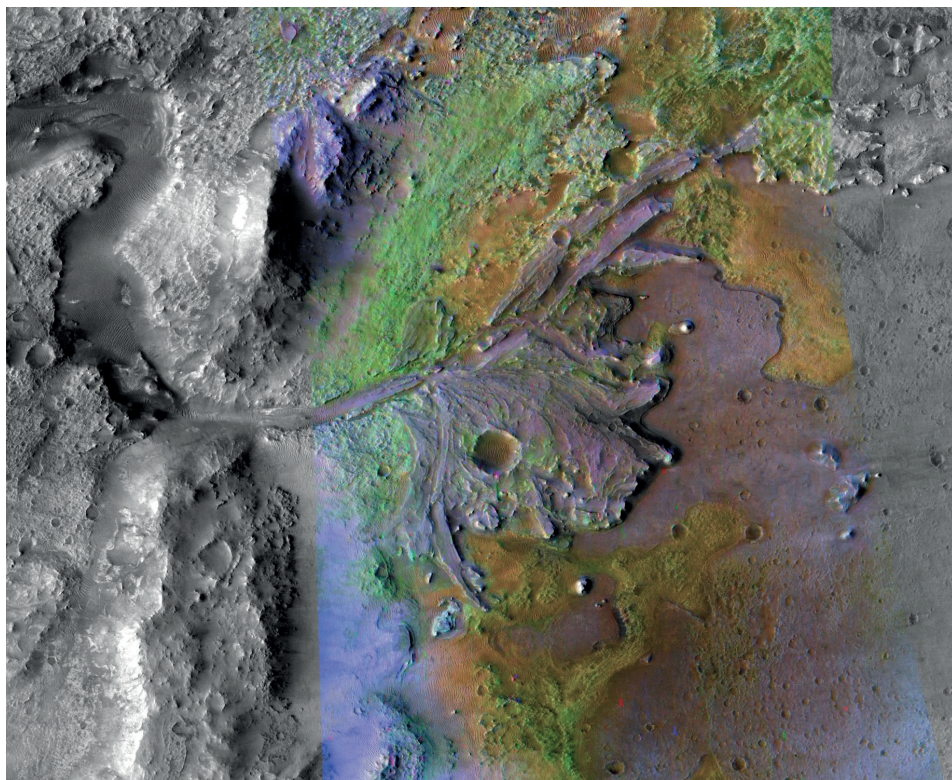
3. ábra. A NASA Curiosity marsjáró MAHLI berendezésének 2019. március 24-ei (sol 2357) felvétele a talajon látható lekerekített kavicsokról (Fotó: NASA/JPL-Caltech, URL2)

A technológia fejlődésének köszönhetően egyre részletesebben ismerhetjük meg a Mars különböző részeit is. Az InSight leszállóegység 2018. november 26-án landolt az Elysium Planitia területén, fő célja a bolygó belső szerkezetének vizsgálata. Vizsgálja a tektonikai aktivitást, meteoritbecsapódásokat, roppant érzékeny szenzorával marsrengéseket mér, valamint a szeizmométer méréseiből azt is meg lehet állapítani, vajon szilárd vagy folyékony-e a mag, milyen vastag a kéreg, milyen szerkezetű és miből áll a köpeny. Felszerelt időjárás állomásának adataiból pedig napi szinten tudhatjuk meg, hogy éppen milyen az idő a szomszédunkon.

Mára létrehoztuk az első időjárás-figyelő hálózatot is egy másik bolygó felszínén, amikor 2021. február 18-án a NASA legújabb marsjárója, a Perseverance landolt a Jezero-kráterben. A Curiosity és az InSight állomásai mellett harmadikként figyeli majd a szélereősséget, hőmérsékletet, páratartalmat, poreloszlást és más időjárás jellemzőket. A frissen landolt rover kutatásai közül nehéz lenne a legizgalmasabbat kiválasztani, de kétségkívül az egyik legrégebben várt küldetése a marsi minták visszajuttatása lesz a Földre, avagy a *Mars Sample Return* projekt. Ennek keretén belül az ősi marsi mikrobiális élet nyomaint potenciálisan őrző kőzetekből fog furatmintákat gyűjteni, amelyeket gondosan lezárva elraktározz.

A jelenlegi tervek szerint a 2030-as évek elejére várható, hogy egy másik küldetés összegyűjtse, és a Földre szállítsa ezeket, az Európai Űrügynökség (ESA) és a NASA együttműködésében. Ennek előkészítésében és a nemzetközi munka koordinálásában szintén részt vesz a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Asztrofizikai Geokémiai Laboratóriuma is.

A Perseverance fő célja annak meghatározása, hogy vajon évmilliárdokkal ezelőtt lehetett-e valamilyen egyszerű, mikrobiális élet a Marson. A leszállás helyszínéül választott Jezero-kráter egy kiszáradt ősi krátert, illetve folyódelta találkozásának közelében található (4. ábra). A földi hasonló környezetek ideálisnak bizonyultak az élet lenyomatainak megőrzésére, illetve, vizes múltját figyelembe véve, ha valaha volt élet a bolygón, akkor nagy valószínűséggel itt meg kellett jelennie. A Perseverance korszerű tudományos eszközeivel eddig sosem látott részletességgel indul az ősi élet keresésére.



4. ábra. A NASA's Mars Reconnaissance Orbiter keringőegységének felvétele a Jezero-kráterről, ahol 2021. február 18-án landolt a NASA Perseverance marsjáró. A látványos deltatorkolat spektroszkópiai adatai szerint az üledékben vizes környezetben keletkezett ásványok is találhatóak (Fotó: NASA/JPL-Caltech/MSSS/JHU-APL, URL3)

A Curiosity küldetéshez hasonlóan az emberes küldetések előkészítésén is dolgozik, például MOXIE nevű eszközével a légköri szén-dioxidból elektrolízissel oxigént állított elő a vörös bolygón. Különböző űrruhaanyagok darabjait is magával vitte, hogy a sugárzás és a környezeti hatások okozta változásokat folyamatosan nyomon kövessék. Vele együtt utazott az Ingenuity nevet viselő helikopter is, amely a cikk megírásáig már tizenegy alkalommal emelkedett a magasba. Egyre hosszabb és egyre több kihívást tartogató felfedezőútjait kamerájával is rögzíti, ezzel pedig egészen új utat nyitott más égitestek felfedezésében.

A cikkben említett munkák hazai támogatásához hozzájárult a GINOP-2.3.2-15-2016-00003, a GINOP 2.3.2-15-2016-00009 és az EuroPlanet projekt.

IRODALOM

- Gyollai I. et al. (2019): Analysis of Shock Metamorphic Processes in the Zagami Meteorite. *Central European Geology*, 62, 56–82. DOI: 10.1556/2F24.61.2018.12, <https://akjournals.com/view/journals/24/62/1/article-p56.xml>
- Hargitai H. (2021): *Mars 36*. Magánkiadás, ISBN 978-615-010-3891
- Kereszturi Á. (2006): Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből. *Magyar Tudomány*, 167, 8, 946–954. <http://www.matud.iif.hu/06aug/05.html>
- Kereszturi Á. (2012): *Mars – fehér könyv a vörös bolygóról*. Budapest: Magyar Csillagászati Egyesület
- Kereszturi Á. (2013): A marsi vizek fizikája. *Fizikai Szemle*, 63, 3, 77–82. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1303/kereszturi1303.html>
- Martín-Torres, J. et al. (2020): The HABIT (HabitAbility: Brine Irradiation and Temperature) Environmental Instrument for the ExoMars 2022 Surface Platform. *Planetary and Space Science*, 190, 104968. DOI: 10.1016/j.pss.2020.104968, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063320300611>
- Pál B. et al. (2019): Global Seasonal Variations of the Near-surface Relative Humidity Levels on Present-day Mars. *Icarus*, 333, 481–495. DOI: 10.1016/j.icarus.2019.07.007, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03104098/document>
- Ramstad, R. et al. (2017): Global Mars-solar Wind Coupling and Ion Escape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 8051–8062. DOI: 10.1002/2017JA024306, <https://bit.ly/3sM7lpR>
- Vandaele, A. C. et al. (2019): Martian Dust Storm Impact on Atmospheric H₂O and D/H Observed by ExoMars Trace Gas Orbiter. *Nature*, 568, 521–525. DOI: 10.1038/s41586-019-1097-3, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1097-3>
- Villanueva, G. L. et al. (2015): Strong Water Isotopic Anomalies in the Martian Atmosphere: Probing Current and Ancient Reservoirs. *Science*, 348, 6231, 218–221, DOI: 10.1126/science.aaa3630, <https://bit.ly/2Vw0VhW>
- URL1: <https://web.archive.org/web/20051218192636/http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/marsmets/alh84001/ALH84001-EM1.htm>
- URL2: <https://mars.nasa.gov/msl/multimedia/raw-images>
- URL3: <https://mars.nasa.gov/resources/22474/jezero-crater-mars-2020s-landing-site/>