

# Ásványok és kőzetek vizsgálata a Mars felszínén: vizsgálati, meghatározási lehetőségek

KERESZTURI Ákos<sup>1</sup>, CSORBA Ádám<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Collegium Budapest Institute for Advanced Study,  
ELTE TTK Planetológiai Műhely,  
Magyar Csillagászati Egyesület

<sup>2</sup>ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék

---

## *Mineralogical and petrographical analysis of the surface of Mars, possibilities for determination and classification*

### Abstract

The mineralogical and petrological characteristics of Mars could be ingrated into the general surface evolution of the planet with the methods of classical geology on the Earth. Basaltic rocks cover the southern, while andesitic or weathered basalts cover the younger northern hemisphere. The cooling and drying Martian environment produced phyllosilicates under relatively warm and wet conditions in the early period of the planetary evolution. Later cold and acidic episodic water produced sulphates, and their crystal water content is keep on changing according to the climatic changes. During the longest and most recent period ephemeral microscopic water films, and dry gas-mineral interactions produced various iron-oxides and oxihydroxides. Other mineral alterations point to the presence of ancient hydrothermal systems, migrating mobile elements, and cementation of the regolith's topmost layer. The differently aged primary and secondary minerals can be found together in mixed form inside the regolith, because of the lack of global plate tectonism and the slower speed of geologic changes on Mars than on Earth.

*Keywords: Mars, planetary science, petrology, mineralogy, weathering*

---

### Összefoglalás

A Mars felszíni ásványtani és kőzettani viszonyai a klasszikus „földi” megközelítés alapján a bolygó fejlődés-történetébe beilleszthetők. Üde, bazaltos felszín az idős déli felföldeken, andezites kőzetek, avagy mállott bazaltok az északi fiatalabb vidékeken jellemzőek. A felszínen mállással keletkezett ásványok jellege a bolygó hűlő és szárazodó viszonyait tükrözik: eleinte rétegszilikátok keletkeztek „meleg” és nedves környezetben. Később a ritkán megjelenő víz hideg és savas volt, szulfátok váltak ki belőle, amelyek kristályvíztartalma az éghajlati ingadozásoknak megfelelően ma is változhat. A Mars leghosszabb, ma is tartó időszakában mikroszkopikus skálájú vízbevonatok és gáz-ásvány kölcsönhatások révén vas-oxidok és oxihidroxidok keletkeztek. Az ásványtani jellemzők időszakos hidrotermális átalakulásokra, mobilis elemek migrációjára, és a regolit legfelső rétegének cementációjára is utalnak. A különböző korú elsődleges és másodlagos ásványok a lemeztectonika hiánya, és a földihez képest gyenge geológiai aktivitás miatt a felszínt borító regolit rétegben keverten fordulnak elő.

*Tárgyszavak: Mars, planetológia, ásványtan, kőzettan, mállás*

### Bevezetés

Habár a cím mást sejtet, a cikk sajnos nem arról szól, hogy geológuskalapáccsal a kézben bejárva milyen a Mars felszíne ásvány- és kőzettani szempontból. Ennek ellenére sok konkrét ismeretünk van már a vörös bolygóról, amelyeket a földiekkel összehasonlítva érdekes megállapítások tehetők, még akár az ásvány- és kőzetképződési, valamint átalakulási folyamatok is jobban megismerhetők, hiszen azokat a meg-

szokottól eltérő körülmények között figyelhetjük meg. Az alábbiak az ELTE TTK-n 2008-ben tartott „A Mars geológiája” című kurzus kapcsolódó részén alapulnak (KERESZTURI, HORVAI 2009, HORVAI, KERESZTURI 2009), célja, hogy példákat nyújtson arra, miként lehet a bolygó-tudományi ismereteket a földtudományi oktatás ásvány- és kőzettani vonatkozásaiban elhelyezni, felhasználni.

Az anyagfejlődés törvényszerűségeit annál jobban értjük, minél több példát találunk az egyes folyamatokra. Ha

például a bazaltok képződését, vagy mállásuk eredményét nem csak földi viszonyok között vizsgáljuk, jobban megérthetjük milyen tényezők játszanak fontos szerepet az ásványtani- és kőzettani átalakulásokban. Olyan ez, mintha adott folyamatot eltérő laboratóriumi viszonyok között hasonlítanánk össze. Az egyes égitesteket sajátos laboratóriumoknak is tekinthetjük: más jellemzői lesznek egy vulkánkitörésnek a Földön, mint a Marson, vagy a Vénuszon (GYENIZSE 2008), vagy esetleg a Vesta nevű kisbolygón.

Az alábbiakban ásvány és kőzettani viszonyok szempontjából tekintjük át a Naprendszer bolygói közül a Föld mellett a legjobban ismert, és a földi viszonyokhoz leginkább hasonló távoli helyszínt: a Marsot, főként az elmúlt évek új eredményeire fókuszálva, a korábban említett kurzus anyaga szerint. Ennek megfelelően itt nem tárgyaljuk a Marson kívül a meteoritok és holdkőzetek ásvány- és kőzettani jellemzőit — amelyekről gazdag irodalom érhető el magyar nyelven is (BÉRCZI et al. 2008; BÉRCZI 2007, 1991; GUČSIK et al. 2007).

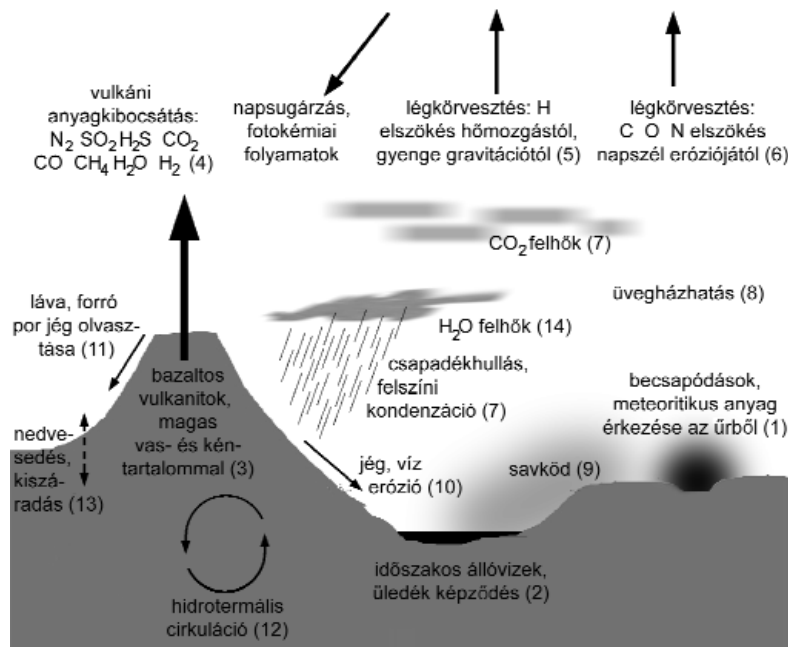
### A marsi környezet sajátosságai

A Mars tömege kb. tizede a Földének, összetételét tekintve a mi planetánkhoz hasonló kőzetbolygó. Átlagsűrűsége  $3,95 \text{ g/cm}^3$  kb. 1500 km sugarú fémes magját szilikátos köpeny, majd 50–150 km vastag kéreg borítja. A

földnél kisebb tömege miatt csekélyebb belső hőforrásai vannak. A marsfelszíni környezet több szempontból is eltér a földitől, amely a kialakuló kőzeteket, és azok későbbi átalakulását is befolyásolja (1. ábra). Mai ismereteink alapján a bolygó ásvány és kőzettani összetétele a Földhöz viszonylag hasonló, az oxigén-, és kéntartalma valamivel nagyobb a Földénél. Saját bolygónkhoz viszonyítva a kisebb tömeg kevesebb hőforrást jelent, a keletkezésekor lezajlott összeállás hőfelszabadulása, és a radioaktív bomlásból származó hő miatt. A gyengébb belső differenciáció, miatt köpenyének és kérgének ezért magasabb a vastartalma, amely a magmák összetételét befolyásolja.

A felszíni ásványi átalakulások terén is sok az eltérés, ezek: a nagyobb naptávolság és a gyengébb üvegházhatást okozó ritkább légkör miatt alacsonyabb az átlaghőmérséklet, ezért ritkább a folyékony víz előfordulása a Marson, mint a Földön. A földinél szerényebb belső energiaforrások miatt korán leállt a magban a dinamóhatás, és megszűnt a globális mágneses tér, ettől pedig a napszél (a Naptól kiáramló töltött részecskék együttese) gyorsabban erodálta a légkört. A légkörvesztés szintén a hűlés és szárazodás irányába hatott, utóbbiak lassú és gyenge mállást eredményeznek a bolygón (LAMMER et al. 2003).

A lemeztekonika feltételezett korai leállása vagy hiánya nyomán nincs globális anyagkörülforgás a Marson, a légkörből kiváló illók tartósan tárolódhatnak a kőzetekben. Emellett egymástól erősen eltérő korú, és így különböző kemizmusú, más-más átalakulást képviselő anyagok is



1. ábra. A felszín ásványtani és kőzettani fejlődése szempontjából fontos folyamatok a Marson, amelyek globálisan befolyásolják a mállást és a  $\text{H}_2\text{O}$  előfordulását

Figure 1. Processes on Mars, which are important for the mineral and petrological evolution, and affect the weathering and chemistry, as well as the presence of  $\text{H}_2\text{O}$

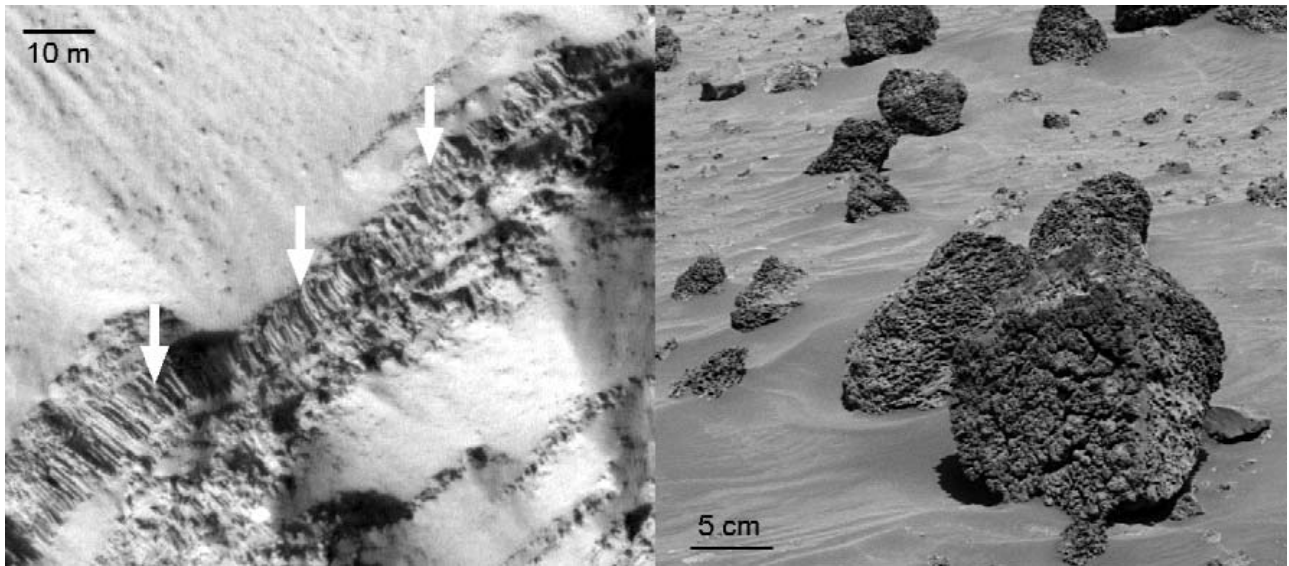
Where: 1 – meteoritic impacts, 2 – ephemeral standing water bodies, sediment formation, 3 – basaltic magmas with high Fe and S content, 4 – volcanic gas release, 5 – atmospheric gas escape, 6 – atmospheric erosion by solar wind, 7 – precipitation, 8 – greenhouse effect, 9 – acid fog, 10 – erosion by water and ice, 11 – ice melting by hot volcanic products, 12 – hydrothermal circulation, 13 – drying, wetting cycles, 14 – waterice clouds

egymás közelében halmozódhatnak fel a bolygón (McSWEEN és KEIL 2000).

### Ásvány- és kőzettani viszonyok a felszínen

A Mars felszínének összetételére távérzékeléses adatok, a leszállógységek felszíni vizsgálatai, valamint a Földre hullott marsi eredetű meteoritok elemzése alapján következtethetünk. A bolygó felszínét sok helyen a szelek átkeverő

középségen vízjégre és széndioxidjégre, valamint kőzetekre és azok törmelékére oszthatjuk. A jégmentes területeket egyenetlen eloszlású por borítja. Ezek főleg világos, kis hőtehetetlenségű (azaz gyorsan melegező és hűlő) területek, míg a sötétebb és nagyobb hőtehetetlenségű vidékek cementált anyagúak, a legsötétebbek és legmagasabb hőtehetetlenségűek a szálkőzetek. Ezért negatív korreláció mutatkozik a hőtehetetlenség és az albedo között: minél kisebb egy terület albedója (minél sötétebb), annál nagyobb a hőtehetetlensége. Ugyanakkor a sűrűség és a hőtehetetlenség között pozitív korreláció van: minél na-



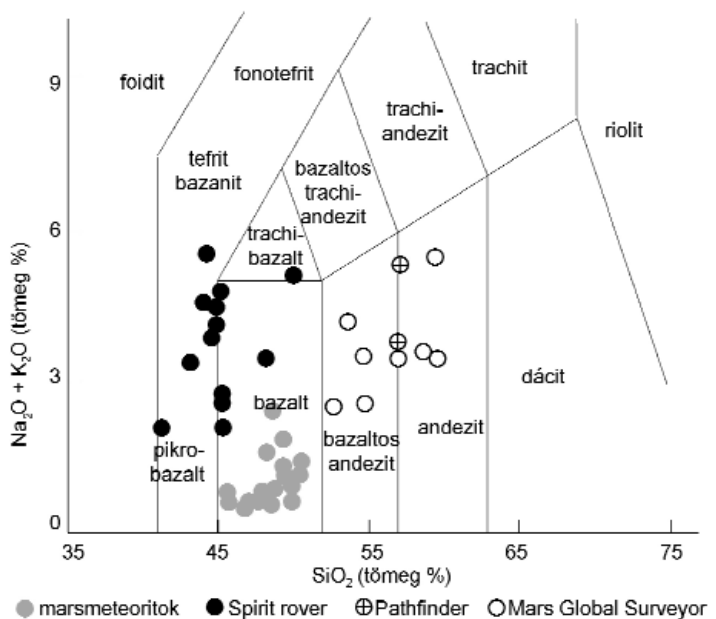
2. ábra. Oszlopos elválás alakzatok a Marte Vallis térségében lévő bazaltsíkságnak egy meredek falon kibukkanó 200 m széles részén (balra) és egy 40 cm-es, a becsapódások által kibott hólgyüreges bazalt szikla a Spirit rover felvételén (jobbra) (NASA/JPL-Caltech/Cornell/NMMNH)

Figure 2. Columnar jointing at the Marte Vallis area visible along the outcrops at a steep wall on the 200 m wide image (left), and a 40 cm diameter pitted basaltic impact fragment rock on the surface photographed by Spirit rover (right)

hatása által homogenizált anyagú por borítja, amely abszorpciós vonalakban szegény, főleg amorf vagy gyengén kristályos szerkezetű. Az általános vöröses szín az ultraibolya és kék tartományban fellépő erős elnyeléstől áll elő, amely vas-oxidoktól származik (FERGASON et al. 2006).

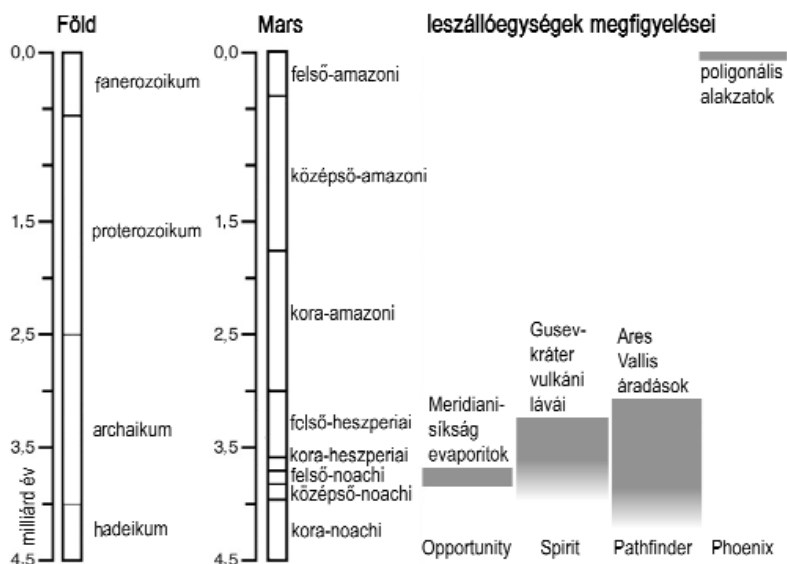
A marsi meteoritok mind bázisos-ultrabázisos jellegű magmás kőzetek, közöttük piroxenit, dunit, bazaltos és peridotitos kemizmusúak jellemzőek (metamorf és üledékes kőzetekből állók nem ismertek eddig). Anyaguk inkompatibilis elemekben a földi kőzetekénél szegényebb, ami a mi bolygónkon jellemzőnél kisebb belső differenciációra utal a Mars esetében (BREUER et al. 1993). A leszállógységek felszíni mérései alapján főleg bazaltok (2. ábra), alárendelten bazalt andezitek esetleg andezitek jellemzőek a bolygó felszínén (3. ábra) — de kisebb mennyiségben üledékes kőzetek is vannak, és különféle átalakulások nyomai is felismerhetők (BURNS & FISHER 1990). Utóbbiak az egykori mállási viszonyokra utalnak, amit a cikk második felében tekintünk át (4. ábra).

A felszínt színeképi jellemzői szempontjából első



3. ábra. A megvizsgált marsi magmás és vulkanikus kőzetek a TAS diagramon (WITTER et al. 2005 nyomán)

Figure 3. The observed magmatic and volcanic rocks of Mars on the TAS diagram



4. ábra. A földi (balra) és a marsi (középen) korszaka összehasonlítása, valamint az Opportunity, Spirit, Pathfinder és Phoenix-űrszondák leszállóhelyén megfigyelt képződmények keletkezési kora

**Figure 4.** Geochronological table of the Earth (left) and the Mars (middle), with the age range of rocks analysed in situ by the Opportunity (Meridiani evaporites), Spirit (volcanic lavas in Gusev crater), Pathfinder (water outflows by Ares channel) and Phoenix lander (polygonal features) (right)

gyobb a hőtehetetlenség, annál sűrűbb az anyag (tömör szálkőzet, vagy üregeit cement tölti ki).

A Mars felszíni üde kőzetei főleg bazaltok, illetve bazaltos andezitek, a keringő egységek (HAMILTON et al. 2003) és a leszállóegységek (LARSEN et al. 2000) mérései alapján. (Az alábbiakban tehát nem említjük az üledékes folyamatokkal keletkezett kőzeteket.) A legfontosabb kőzetalkotó szilikátok az olivin, a piroxének és a földpátok. Az ásvány- és kőzettani jellemzők globális elemzése révén a bolygó fejlődéstörténetébe is bepillanthatunk, amiben a távérzékelés nyújt segítséget.

### Színképi elemzések

A Mars sötét, szálkőzetekből álló, pormentes területei első közelítésben két eltérő területtípusra oszthatók, amelyeket 1-es és 2-es típusnak neveznek (Surface Type-1 [ST1], Surface Type-2 [ST2]) (BANDFIELD et al. 2000).

Az 1-es típus magas vastartalmú bazaltos vidék, plagioklász földpátokkal és klinopiroxénnel. Típusterülete a Syrtis Major, és főleg a déli idős, sűrűn kráterezett területeken jellemző. A bolygó idős, 4,0–4,4 milliárd évvel ezelőtti bazaltos, kevésbé átalakult kérgét képviselheti. (Hasonló korú, de nem üde, hanem mállás nyomát képviselő ásványok is előfordulnak a bolygón — lásd később —, de azok aránya túl kicsi ahhoz, hogy külön típusként sorolják be őket.) Az 1-es típus ott fordul elő, ahol vastagabb a kéreg, de kisebb előfordulásai a vékonyabb kérgű északi síkságokon is megtalálhatók — elképzelhető, hogy északon a 2-es típusú terület alatt helyezkedik el. Emellett az 1-es típusú vidék jellemzően idősebb a 2-es típusúnál (BANDFIELD 2002).

A 2-es típus főleg az északi mélyföldeken fordul elő, de

kisebb gyakoriságban a déli felföldeken is megjelenik, fő komponensei a plagioklász földpátok és korábbi megfigyelések alapján a vulkáni üveg. Az egyik lehetőség szerint anyaga andezit, erre utalnak a Mars Pathfinder egyes megfigyelései (REIDER et al. 1997), amely bazaltos kemizmusú kőzet részleges olvadásával keletkezhetett, és akár ősi szubdukcióra is utalhat. A másik lehetőség, amelyre főleg az újabb modellek utalnak, hogy vizes közegben átalakult bazalt alkotja (WYATT & MCSWEEN 2002), amelynek üvegtartalma vizes közegben elmállott. A két lehetőség között nehéz különbséget tenni távérzékeléses megfigyelésekkel, mivel a vulkáni üveg, valamint annak és a bazaltok mállásával keletkezett ásványok (szmektittek, palagonitok, zeolitok stb.) hasonlóan jelennek meg a színképekben a ma elérhető spektrális felbontás mellett (WYATT et al. 2004).

Az első lehetőség esetében a szilícium-dioxidban gazdagabb 2-es típus a fiatalabb vidékeken jellemző, amely egybevág azzal a képpel, hogy a korábban kialakult bazaltos kéreg esetleges recirkulációjával, alábukásával, átalakulásával, majd magmás és vulkáni tevékenység révén ásvány-differenciációval, andezithez hasonló anyag keletkezett. A második lehetőség pedig annak az elgondolásnak kedvez, amely szerint az északi területeket borították egykor ősi állóvizek (SIK & KERESZTURI 2005), ezek nyomán találhatóak ott mállástermékek. A 2-es típusból nem csak északon van több, hanem az általában nagyobb szélességen is jellemző, ahol szorosabb kapcsolatba kerülhetett a jéggel, és ennek nyomán a víz hatására történt mállással is. Utóbbi alapján (ha mállástermékek vannak benne) nem biztos, hogy azok az ősi felszíni vizek nyomát őrzik — elképzelhető, hogy inkább a nagy szélességen lévő jég alkalmi megolvadása hozta létre őket. Egyesek szerint a Mars fejlődéstörténete alapján nem is várható ilyen nagy mennyiségű

andezit a bolygón. A két területtípus térbeli előfordulása között némi keveredés is megfigyelhető, és nem minden esetben jelent az 1-es típus nagyobb kéregvastagságot (WYATT et al. 2004).

A 2005-ben Mars körüli pályára állt Mars Reconnaissance Orbiter-űrszonda (MRO) fedélzetén elhelyezett CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) részletgazdag felvételei bepillantást engednek a felszínt alkotó kőzetek, és ásványok optikai — azaz a látható és közeli infravörös — tartományban mutatott spektrális tulajdonságaiba. A berendezés 370 és 3920 nanométeres hullámhossz között, 100–200 m térbeli felbontással rögzíti a felszíni sugárzást. A módszer alapja az, hogy a felszíni ásványok a Napból érkező fényvel kölcsönhatásba lépve bizonyos hullámhosszúságú fotonokat átengednek (transzmisszió), elnyelnek (abszorpció), vagy visszavernek (reflexió). Az ásványokban e folyamatokat kémiai összetételük, és szerkezetük befolyásolja. A visszavert fényt %-os értékben a hullámhossz szerint ábrázolva az ásvány úgynevezett reflektancia spektrumát kapjuk, melyet az ásvány spektrális ujjlenyomatának nevezünk. Mivel minden ásvány pontosan meghatározott hullámhosszakon abszorbeál fotonokat, az abszorpciók minimumok vizsgálata segítségével detektálhatóak a felszínen.

Az alábbiakban példát mutatunk a módszerre, amelyet a NASA által közzétett adatbázison ENVI szoftver segítségével végeztünk ásványmeghatározás céljából (CSORBA és KERESZTURI 2009). A példaterület a Nili Fossae nevű tektonikus alakzat (é.sz. 22° k.h. 75°), amely rétegszilikátokban gazdag üledékkel van részben kitöltve, illetve karbonátok is azonosíthatók a térségben (5. ábra). Az 5. ábrán az alábbi jellemzők figyelhetők meg: a) A terület színmagasság ábrázolású térképe. b) A vizsgált részlet hamisszínű CRISM infravörös felvétele (vörös: 2,5295  $\mu\text{m}$ , zöld: 1,5066  $\mu\text{m}$ , kék: 1,08  $\mu\text{m}$  hullámhossz). c) A spektrális

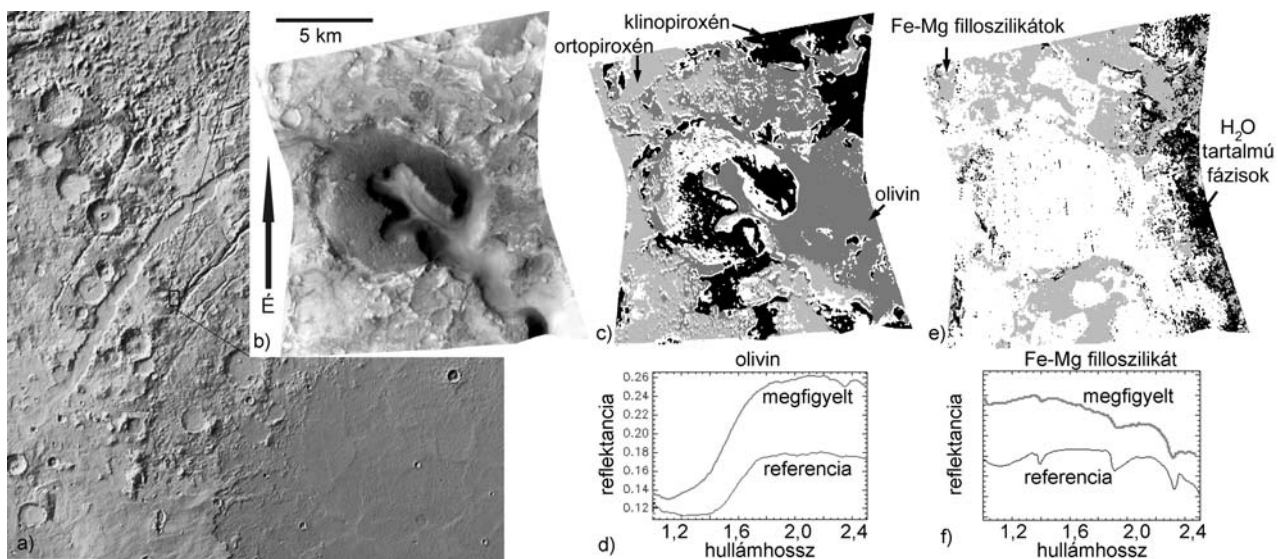
vizsgálatokkal kapott RGB kompozit képről készült szürkeárnyalatos változat a mafikus ásványok elterjedéséről. A középszürke szín olivint, a világosszürke ortopiroxént, a fekete klinopiroxént jelöl.

d) Színképek összehasonlítása: az olivinben gazdag terület spektrális görbéje (fent), és az USGS spektrális könyvtárából az ehhez legjobban illeszkedő olivin spektrumgörbe (lent). e) Spektrális RGB kompozit képről készült szürkeárnyalatos változat a filloszilikátok elterjedéséről (világosszürke: Fe-Mg filloszilikátok, fekete:  $\text{H}_2\text{O}$ -tartalmú fázisok). f) A Fe-Mg filloszilikát gazdag terület spektrális görbéje (fent) és az USGS spektrális könyvtárából ehhez legjobban illeszkedő nontronit spektrumgörbéje (lent)

### Elsődleges és másodlagos ásványok

A Mars felszíni összetételéről nagy méretskálán a keringő egységek által bolygó körüli pályáról végzett megfigyelések adnak információt. Ezek értelmezésénél fontos, hogy gyakran nem a szálkövetet, hanem a málladéktakarót figyelik meg, érdemes továbbá figyelembe venni, hogy általában a felszínen látható, és a helyben megvizsgált kőzetek többsége igen idős (4. ábra). A mállás igen lassú a Marson, és eléggé különbözik a földitől, regolit mégis szinte mindenhol található az égitesten. Először ennek morfológiai majd ásványtani leírása olvasható az alábbiakban.

A regolit morfológiai szempontból három egységre osztható: 1. por, a legfelső nem konszolidált rész, amely szoros kapcsolatban van a légkörrel, 2. összecementált réteg és rögök (kemény felszín „duricrust”), amely mechanikailag ellenállóbb a pornál, és szulfát sók valamint hematit cementálja, kloridtartalma is jelentős, 3. sziklák jelentős része a becsapódások során kilöködött törmelék. Megjele-



5. ábra. Színképelemzés eredménye a Nili Fossae térségében

Figure 5. Spectral analysis at the Nili Fossae region

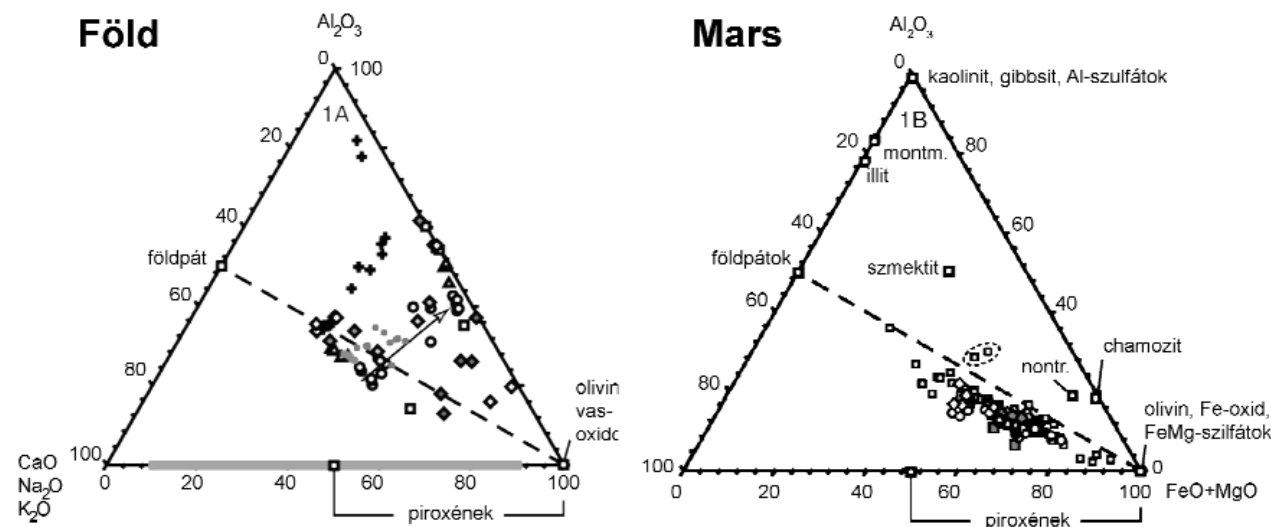
Where megfigyelt=observed, hullámhossz=wavelength, filliszilikátok=phyllosilicates,  $\text{H}_2\text{O}$  tartalmú fázisok= $\text{H}_2\text{O}$  containing phases

nésük változatos (tömör, lyukacsos, breccsás), néhol hólyagüreges, és a szélerózió nyomát viseli.

A marsi regolit idős, sokféle folyamat eredménye, ugyanakkor általánosságban kevésbé mállott, mint a földi hasonló eredetű kőzet (6. ábra). A Phoenix-leszállóegység például mállott vas-oxidot, de üde olivint és vulkáni üveg szemcséket egyaránt talált benne. Felszínközeli része 30–50% porozitású, nagy felületével fontos a légköri vízpára, és a szén-dioxid megkötésében. Mivel a bolygón (ha egykor volt is), már régóta nem lehet globális lemeztectonika, a regolit a felszíni folyamatok eredménye. Mélyebben (2–6 km mélységig) a gyengébben töredezett megaregolit lehet jellemző, amelynek szerkezetét főleg az ősi becsapódások tördelték fel.

a Valles Marineris völgyeiben található, ott néhol meglepően nagy, kilométer vastag, látványosan rétegzett összeleteket alkotnak. Vagy bepárlódó vizekből váltak ki evaporitok módjára, és/vagy bazaltokban lévő szulfidok mállásával helyben keletkeztek. Utóbbi átalakulást kiváltó tényezőt savkődnék is nevezik, amelyben mikroszkópikus vastagságú vízfilm borította be a felszíni anyagokat. A folyadék talán vulkáni kigőzölgéssel a légkörbe került  $\text{SO}_2$ -től volt savas kémhatású. Mivel a szulfátok kristályszerkezetükben sok vizet tudnak megkötni, fontosak a Marson (VANIMAN et al. 2004)(7. ábra).

— **Karbonátok:** a légköri szén-dioxid és az egykori folyékony víz jelenlétére utaló nyomok alapján sok karbo-



6. ábra. Földi és marsi kőzetek eloszlása az  $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{FeO} + \text{MgO}$  diagramon

Balra mállott földi magmás és vulkanikus kőzetek és mállástermékek láthatók, jobbra hasonló adatok a Viking-1 (háromszög), a Pathfinder (élére állított négyzet), a Spirit (négyzet) és az Opportunity (karika) felszíni méréseiből származnak. Jól megfigyelhető, hogy a Marson sokkal kisebb a földihez hasonló mállástermékek aránya (HUROWITZ és McLENNAN 2007 nyomán)

**Figure 6.** Distribution of rocks from Earth (left, magmatic rocks and their weathering products) and Mars (right, rocks analyzed by Viking-1, Phoenix, Spirit and Opportunity landers) on the  $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{FeO} + \text{MgO}$  diagram

Weathering products are much more rare on Mars than on Earth (földpát=feldspar, szilikátok=silicates)

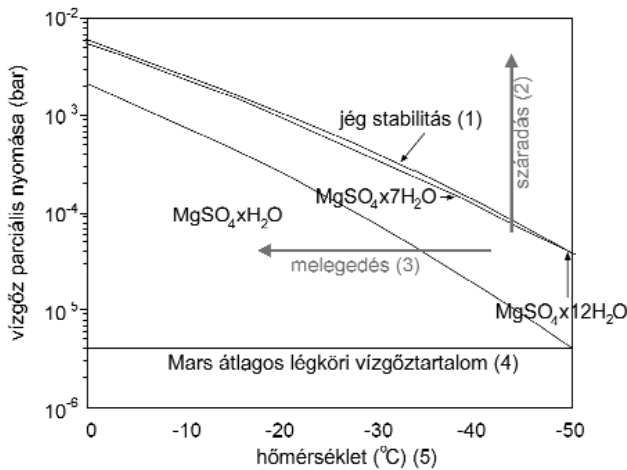
A regolitra néhol használt marstalaj kifejezés nem szerencsés, de elterjedt. Ez a mechanikai és kémiai hatásoktól átalakult néhány centiméter vastag felszíni rétege a regolitnak. A földi talajtól eltér abban, hogy míg bolygónkon az élőlények és aktivitásuk a fontos elemét képezik a talajnak, addig a Marson hasonlóról egyelőre nincs tudomásunk. Összetétel szerint legfontosabb komponensei:  $\text{SiO}_2$  43%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  18%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  7%,  $\text{SO}_2$  7%,  $\text{MgO}$  6%,  $\text{CaO}$  6%,  $\text{Na}_2\text{O}$  1%. A Spirit és az Opportunity kőzetkaparó berendezése alapján mállási kérgék is vannak egyes sziklákon.

Az átalakult felszíni anyagok a regolit idős kora révén az egykori felszíni viszonyokba, az ott zajló mállás jellegébe is betekintést nyújtanak:

— **Szulfátok:** ezek nagyobb arányban vannak a marsi felszínalkotó anyagokban, mint a Földön. Szinte mindenhol előfordulnak a regolitban, koncentrációjuk általában 8–12% körüli, de mértek már 25%-ot is. Fontos ásványuk a jarosit  $(\text{K}, \text{Na}, \text{H})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , a gipsz  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , a kieserit  $(\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$ , és a polihidratált szulfátok. Legtöbb belőlük

nátos üledék várható a Marson. Ezeknek sokáig nem akadtak a nyomára, és csak 5%-nál kisebb mennyiségben mutakoztak karbonátok (feltehetőleg hidromagnezit  $(\text{Mg}_2(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  vagy artinit  $\text{Mg}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  formájában), a regolitban. A legidősebb marsmeteoritban is találtak kevés Ca-Mg-Fe karbonátot. Eddig egy nagyobb kibukkanásukat azonosították egy 1500 km-es kráterben lévő Nili Fossae nevű törérendszer térségében (EHLMANN et al. 2008). Itt magnézium-karbonát lehet együtt olivinnel és agyagokkal. A karbonátos ásványok ősi, közel semleges vagy lúgos pH-jú vizes környezetre utalnak, ugyanakkor az üde olivin előfordulása a mállás hiányára utal és nehezíti a pontos magyarázatot.

— **Rétegszilikátok,** ezen belül főleg vasban és magnéziumban gazdag szmektitek. Az agyagtartalmú kőzetek az idős, noachi korból maradtak vissza (kb. 4,5–3,5 milliárd éve), és a mainál melegebb éghajlaton vizes mállással keletkeztek. Főleg az idős déli felföldeken bukkannak ki a fiatalabb lávatarakok alól, emellett üledékes képződmé-



**7. ábra.** Magnézium szulfátok stabilitása a mai marsi felszíni viszonyok között. A hőmérséklet tartomány a bolygó kis szélességen jellemző értékeket fedli le. Látható, hogy az  $MgSO_4 \cdot 12H_2O$  és epsomit ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) nem stabil ma a Marson, de pl. a kieserit ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ) stabil a legtöbb környezetben. Ellenben ha a jég is megjelenik, a korábbi kettő egyből stabil lesz újra, mivel az éghajlat és a felszíni viszonyok változása révén egyes marsi területek fizikokémiai adottságai változnak, ezért azok elhelyezkedése eltolódik a diagramon (MARION & KARGEL 2005 nyomán)

**Figure 7.** Stability of magnesium sulphates on Mars according to the environmental conditions for temperature ranges at low latitude regions of Mars.  $MgSO_4 \cdot 12H_2O$  and epsomit ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) are not, but kieserite ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ) is stable under the most environment types are present on Mars. When pure water ice is present, the former two are also stable. Because of the changes of surface conditions, the position of certain locations of the Martian surface on this diagram may shift (after MARION & KARGEL 2005) (where [1] ice stability, water vapor partial pressure, [2] drying, [3] warming, [4] average atmospheric water vapor content on Mars, [5] temperature, [6] water vapor partial pressure)

nyekben (pl. Holden-kráter, Jezero-kráter lerakódásaiban) is mutatkoznak, és marsmeteoritokban is előfordulnak.

— Vas-oxidok és -hidroxidok: a regolit fontos alkotói.

Ásványi összetétel szerint:

— Hematit: alfa  $Fe_2O_3$  a leggyakoribb vas-oxid a felszínen (mikrokristályos vörös, és kristályos szürke egyaránt előfordul). Feltehetőleg azért a legelterjedtebb vas-oxid a bolygón, mert stabil a mai felszíni viszonyok között, és sok egyéb vas-oxid, -oxihidroxid átalakulásának végső állomása. Keletkezhetett hidrotermális átalakulás (CATLING & MOORE 2003), illetve palagonizáció keretében alacsony hőmérsékletű mállással (lásd később) (BISHOP et al. 1998).

— Goethit (alfa- $FeOOH$ ) a hematit után a második leggyakoribb oxidált Fe-ásvány, marsmeteoritokban azonosították, valamint a Spirit rover által a Clovis nevű kődarabban is megtalálták. Feltehetőleg vizes közegben keletkezett, jelentős része később hematittá alakult.

— Magnetit ( $\gamma$ - $Fe_3O_4$ ) és titanomagnetit ( $Fe_{3-x}Ti_xO_4$ ) a fő mágnesezhető komponens lehet a regolitban (MADSEN et al. 2003)

— További bizonytalanabban ismert, illetve feltételezett vastartalmú összetevők: ferrihidrit ( $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ ), lepidokrokit ( $\gamma$ - $FeOOH$ ) és akaganéit (béta- $FeOOH$  vagy béta- $Fe^{3+}(O,OH,Cl)$ ), schwemannit ( $Fe^{+3}_8O_8(OH)_6(SO)_4$ ), ferroxhit (delta- $FeOOH$ ).

Összefoglalóan elmondhatjuk: A regolítot elsősorban átalakult bazalt képezi, a becslések alapján ennek kb. 5–8%-át adhatja kívülről érkezett meteorikus eredetű anyag. A

felszín felső, néhány cm vastag rétege ún. palagonitos jellegű, legjobb spektroszkópikus földi analógiája a Mauna Kea palagonitja. A földi palagonit barna és szürke színű gyengén definiált kőzetanyag, tufa és vulkáni üveg mállásával keletkezik vízzel kapcsolatos átalakulás révén (NELSON et al. 2005). Gyengén kristályos szerkezetű, főleg nontronit, montmorillonit, egyéb szmektitok, zeolitok, oxihidroxidok, szerpentinásványok, foszfátásványok, hematit és különböző amorf összetevők alkotják. Anyaga erősen oxidált, vastartalma a marsi bazalthoz hasonló, S-, Cl- és P-tartalma nagyobb az átlagos bazalténál, ami feltehetőleg vulkáni eredetű lehet, Ca-ban viszont szegényebb a bazalténál, amit feltehetőleg víz oldhatott ki belőle.

A regolit fontos alkotóelemei továbbá az oxidánsok. Ezek létezését a Viking-leszállóegységek, valamint a Phoenix-űrszonda vizsgálatai ( $KClO_3$ ,  $NaClO_3$ ) is jelezték, emellett  $H_2O_2$ -t földi távcsöves megfigyelésekkel is azonosították a légkörben. Az oxidánsokból mintha kis szélességen több lenne, amelynek egyik lehetséges oka, hogy a nagy szélességen előforduló  $H_2O$  lebontja azokat. Az oxidánsok kis koncentrációjuk ellenére fontosak, mivel lebontják a szerves anyagot, köztük pl. a légköri metánt, vagy a lehulló kondrit meteoritokban lévő széntartalmú molekulákat. Az oxidánsokat létrehozhatják elektrosztatikus hatások az összesűrűlő porszemcsék között (pl. porördögökben, becsapódások során, vagy a szélről vándorló porszemcséknél), emellett 100–200-szor kisebb gyakoriságban a regolit és az UV-sugárzás kölcsönhatásaként is keletkezhetnek (ATREYA et al. 2006).

## Összefoglalás

A földitől részben eltérő viszonyok között a bolygónkon megszokottól eltérő aprózó (KUTI & KERESZTURI 2009) és mállásos folyamatok jellemzőek a Marson, amelyek az egykori környezetre és folyamatokra engednek következtetni. Míg a Földön a mállás folyamán a folyadék-ásvány reakciók jellemzőek, a Marson gáz-ásvány reakciók is fontosak lehetnek, amelyek igen lassan mennek végbe. A nedvesebb periódusokban azonban a folyadék okozta mállás is fontos tényező, amelynek erősségét a vízáktivitás (relatív nedvességtartalom) segítségével jellemezhetjük. Utóbbi változása szerint tolóddhat el a mállás jellege a főként gázokkal vagy folyadékkal történő kölcsönhatás felé, de többnyire hűvös, száraz környezetre utalnak a mai felszíni ásványok. Fontos általános jellemvonás, hogy míg sok helyen a száraz viszonyokra utaló olivin jellemző, addig az egykori vizes környezetekben eredetileg limonit (goethit), majd abból dehidratációval képződött hematit várható, emellett szulfátok is képződtek a vizes környezetekben.

Mindezek segítenek az egykori felszíni viszonyok rekonstruálásában. Fontos tényező, hogy a Marson jó ideje nincs (vagy sosem volt) globális lemeztectonika, ezért az egyszer kivált ásványok jelentős része a lerakódás helyén maradt. Eltérés még a földitől, hogy a felszínre hullott

meteoritok is felhalmozódnak a bolygó felszínén, amelyek főleg redukált összetevőkből állnak, és egyes becslések alapján 20–30%-át is adhatják a regolitnak.

A bolygó fejlődéstörténete során jelentősen változtak a felszíni viszonyok, amelyek nem csak az egyes alakzatok morfológiájában (pl. idős folyóvölgyek, tó- és gleccsernyomok) követhetők, hanem hatására az ásványi jellemzők, a mállásos folyamatok is módosultak. A kráttersűrűség alapján elkülönített három nagy marsi időszak a jellemző mállástermékekben is megjelenik:

— Noachi időszak (4,5–3,6 milliárd éve): vizes mállás, mainál melegebb viszonyok között. Ekkor vízgőzben gazdagabb volt a légkör, magas víz/kőzet arány mellett zajlott az átalakulás, amely ekkor hasonlított leginkább a földire, jellemzően filloszilikátokat létrehozva.

— Heszepriai időszak (3,6–1,8 milliárd éve): helyenként és alkalmanként megjelenő hideg és savas vizekből alkalmanként kiterjedt szulfátos üledékek váltak ki, ekkor általában alacsony víz/kőzet arány mellett zajlott a mállás.

— Amazoni (1,8 milliárd évtől máig): hideg és száraz időszak, gáz-ásvány, vagy néha vékony vízfilm-ásvány reakciókkal. Időnként savkőd jelent meg, és gyengén kristályos fázisok, főleg vas-oxidok keletkeztek. Ez az időszak jellemző ma is a bolygón, de néha, nedvesebb periódusokban a földi palagonizációhoz hasonló folyamat is zajlott.

Alkalmanként, főleg a vulkáni aktivitáshoz kapcsolódóan hidrotermális átalakulások is történhettek a Marson. Erre utal számos vulkánon lévő, az ott lerakódott jég belső eredetű olvadására utaló nyomok (NEUKUM et al. 2004), valamint a becsapódásos krátereknél a törmeléktakaróban lévő folyásnyomok és a becsapódás becsült hőfelszabadulása, továbbá a marsmeteoritokban lévő egyes oxihidroxidok és az agyagásványok is keletkezhetnek így. A kén-, a klór- és a bróm-dúsulás a felszínen jelentős részben szintén hidrotermális eredetű lehet, főleg alacsony hőmérsékletű vizes átalakulásokból maradt vissza. Ezekhez nem minden esetben kellett nagyobb folyadéktest a felszínen, mikroszkópikus vastagságú vízfilm is kiválthatta őket, amikor kedvező éghajlati viszonyok közepette, vagy vulkáni aktivitás nyomán megjelent a bolygón.

Bár napjainkban a gáz-ásvány reakciók dominálhatnak a Marson, de helyenként ezek könnyen eltolódhatnak az

éghajlati kilengések miatt (KERESZTURI 2007) az erősebb folyadékhatás irányába. Ma a hematit a legstabilabb a vas-oxidok közül. A lassú változások szempontjából érdemes még kiemelni a szél hatását, amely rendszeresen és globálisan átkeveri, homogenizálja a regolit felső poranyagát. Emellett ahol a szél intenzív eróziót fejt ki (erre morfológiai jelek utalnak), ott üde kőzetanyagot hantol ki a felszínre.

A cikkben vázolt témakörök arra is példákat nyújtanak, miként lehet a Mars ásvány- és kőzettani jellemzőit az egyetemi földtudományi oktatásban felhasználni:

— A marsi jellemzők megismerése egyrészt segít annak megértésében, hogy a különféle folyamatok minden égitesten azonos fizikai és kémiai törvények szerint zajlanak.

— A Föld és a Mars közti különbségek segítenek az okozati összefüggések megértésében. A Marson a nagy tömeg és belső erőforrások hiányában korábban abbamaradt vagy meg sem indult a lemeztektonika, ezért nem alakultak ki olyan differenciált magmás kőzetek, mint az a Föld esetében megfigyelhető.

— A bolygó fejlődése során változó hőmérsékleti és folyadékviszonyok arra mutatnak példát, miben tér el az ásványátalakulás a meleg és nedves, valamint a hideg és száraz viszonyok között.

— A regolit néhány elem (pl. kén, klór) történő dúsulása (GREENWOOD et al. 2007) migrációs folyamatokra mutat extrém példákat, amelyek csak időnként, akkor zajlottak, amikor több folyékony víz volt elérhető a felszínen.

— A földi regolit egyveretű, avagy regionálisan/lokálisan homogénebb jellegéhez képest érdekes ellentét a marsi erősen kevert, eltérő keletkezési viszonyokról árulkodó, regionálisan azonos jellegű regolit jelenléte.

— Az ásványok stabilitására és víztartalmának változására a földi mellett további és szélsőséges példát nyújtanak a vas-oxidok és -oxihidroxidok a Marson.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk háttérét képező munka elvégzését a Pro Renovanda Cultura Hungariae alapítvány támogatta. Köszönet illeti továbbá SZAKMÁNY Györgyöt szakmai-tanácsaiért.

## Irodalom — References

- ATREYA, S. K., AH-SAN, W., NILTON, R., FARRELL, O., WILLIAM, M., GREGORY, T. D., SENTMAN, D. D., CUMMER, S.A., MARSHALL, J. R., RAFKIN, S. C. R. & CATLING, D. C. 2006: Oxidant Enhancement in Martian Dust Devils and Storms: Implications for Life and Habitability. — *Astrobiology* **6/3**, 439–450.
- BANDFIELD, J. L., HAMILTON, V. E. & CHRISTENSEN, P. R. 2000: A Global View of Martian Surface Compositions from MGS-TES. — *Science* **287**, 1626–1630.
- BANDFIELD, J. L., 2002: Global mineral distributions on Mars. — *Journal of Geophysical Research* **107/E6**, p. 9-1–9-19, doi: 10.1029/2001JE001510.
- BÉRCZI Sz. 1991: *Kristályoktól bolygótetekig*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 97–104.
- BÉRCZI Sz. 2007: A Mars kőzetei a marsi meteoritok alapján — *Fizikai Szemle* **2007/8**, 250–265.
- BÉRCZI Sz., GUCSIK A., HARGITAI H., JÓZSA S., KERESZTURI Á., NAGY Sz. & SZAKMÁNY Gy. 2008: Kis atlasz a Naprendszeréről (11): Kőzetközvetek a Naprendszerben. — ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport.



- BISHOP, J. L., FROSCHL, H. & MANCINELLI, R. L. 1998: Alteration processes in volcanic soils and identification of exobiologically important weathering products on Mars using remote sensing. — *Journal of Geophysical Research* **103** (E13), 31457–31476.
- BREUER, D., SPOHN, T. & WÜLLNER, U. 1993. Mantle differentiation and the crustal dichotomy of Mars. — *Planetary and Space Science* **41**, 269–283.
- BURNS, R. G. & FISHER, D. S. 1990: Iron-sulfur mineralogy of Mars - Magmatic evolution and chemical weathering products. — *Journal of Geophysical Research* **95**, 14415–14421.
- CATLING, D. C. & MOORE, J. M. 2003: The nature of coarse-grained crystalline hematite and its implications for the early environment of Mars. — *Icarus* **165**, 277–300.
- CSORBA Á., KERESZTURI Á. 2009: A marsi Terby-kráter litológiai elemzése multi és hiperspektrális adatok felhasználásával. — *Előadás, Ifjú Szakemberek Ankétja*, 2009, Keszthely.
- EHLMANN, B. L., MUSTARD, J. F., MURCHIE, S. L., POULET, F., BISHOP, J. L., BROWN, A. J., CALVIN, W. M., CLARK, R. N., MARAIS, D. J. D. & MILLIKEN, R. E. 2008: Orbital Identification of Carbonate-Bearing Rocks on Mars. — *Science* **322**, 1828–1832.
- FERGASON R. L., CHRISTENSEN P. R., BELL, J. F., GOLOMBEK, M. P., HERKENHOFF, K. E. & KIEFFER, H. H. 2006. Physical properties of the Mars Exploration Rover landing sites as inferred from Mini-TES-derived thermal inertia — *Journal of Geophysical Research* **111**, E02S21, doi:10.1029/2005JE002583.
- GREENWOOD, J. P., BLAKE, R. E., BARRON, V. & TORRENT, J. 2007: Phosphorus geochemistry of Mars: evidence for an early acidic hydrosphere — Seventh International Conference on Mars, abstract 3228.
- GUCSIK, A., PROTHEROE, J. R. JR., STIRLING, J. A. R. & OKUMURA, T. 2007: Phosphates from the Martian meteorites: A cathodoluminescence spectroscopical overview — *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Special Supplement for Goldschmidt Conference), abstract A361.
- GYENIZSE P. 2008: Planetomorfológia — In: LÓCZY D. (szerk.): *Geomorfológia II.* — Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs, 305–362.
- HAMILTON, V. E., CHRISTENSEN, P. R. & BANDFIELD, J. L. 2003: Volcanism or aqueous alteration on Mars? — *Nature* **421**, 711–712.
- HORVAI, F., KERESZTURI, Á. 2009: Geology of Mars: new university course in Hungary. — *40th Lunar and Planetary Science Conference* 1673.
- HUROWITZ, J. A. & MCLENNAN, S.M. 2007: A ~3.5 Ga record of water-limited, acidic weathering conditions on Mars — *Earth and Planetary Science Letters* **260/3–4**, 432–443.
- KERESZTURI, Á., HORVAI, F. 2009: Integration of Mars research into the education: synthesis at university level, — *European Planetary Science Congress*, abstract EPSC2009–309,
- KERESZTURI Á. 2007: Éghajlat változás a Marson I. rész. — *Léggör* **52/2**, 12–17.
- KUTI A. & KERESZTURI Á. 2009: Inszolációs aprózódás a Marson. — *Földrajzi közlemények* **133** (1), 1–12.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R., HOFFMANN, H., HAUBER, E., HEAD, J. W., BASILEVSKY, A. T., IVANOV, B. A., WERNER, S. C., VAN GASSELT, S., MURRAY, J. B., MCCORD, T. & The HRSC Co-Investigator Team 2004: Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera — *Nature* **432**, 971–979.
- LAMMER, H., LICHTENEGGER, H. I. M., KOLB, C., RIBAS, I., GUINAN, E.F., ABART, R. & BAUER, S. J. 2003: Loss of water from Mars: Implications for the oxidation of the soil — *Icarus* **165**, 9–25.
- LARSEN, K. W., ARVIDSON, R. E., JOLLIFF, B. L. & LARK, B. C. 2000: Correspondance and least square analyses of soil and rock compositions for the Viking Lander 1 and Pathfinder landing sites. — *Journal of Geophysical Research* **105** (E12), 29207–29221.
- MADSEN, M. B., BERTELSEN, P., GOETZ, W., BINAU, C. S., OLSEN, M., FOLKMANN, F., GUNNLAUGSSON, H. P., KINCH, K. M., KNUDSEN, J. M., MERRISON, J., NORBERG, P., SQUYRES, S. W., YEN, A. S., RADEMACHER, J. D., GOREVAN, S., MYRICK, T. & BARTLETT P. 2003: Magnetic properties experiments on the Mars exploration rover mission. — *Journal of Geophysical Research* **108** (E12), #8069.
- MARION, G. M. & KARGEL, J. S. 2005: Stability of magnesium sulfate minerals in martian environments. — *36th Lunar and Planetary Science* 2290.
- MCSWEEN, H.Y. & KEIL, K. 2000: Mixing relationships in the Martian regolith and the composition of globally homogeneous dust. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* **64**, 2155–2166.
- NELSON, M. J., NEWSOM, H. E. & DRAPER, D. S. 2005: Incipient hydrothermal alteration of basalts and the origin of martian soil. — *Geochimica et Cosmochimica Acta* **69/10**, 2701–2711.
- RIEDER, R., ECONOMOU, T., WÄNKE, H., TURKEVICH, A., CRISP, J., BRÜCKNER, J., DREIBUS, G. & MCSWEEN, H. Y. 1997: The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode. — *Science* **278**, 1771–1774.
- SIK A. & KERESZTURI Á. 2005: A víz és a jég szerepe a Mars felszínfejlődésében. — *Földrajzi Közlemények* **129** (54/3–4) 159–176.
- VANIMAN, D. T., BISH, D. L., CHIPERA, S. J., FIALIPS, C. I., CAREY, J. W. & FELDMAN, W. C. 2004: Magnesium sulphate salts and the history of water on Mars — *Nature* **431**, 663–665.
- WITTER, J. B., HAMILTON, V. E. & HOUGHTON, B. F. 2005: Thermal infrared spectroscopy of explosively erupted terrestrial basalts: potential analogues for surface compositions on Mars. — *34th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract 1114.
- WYATT, M. B. & MCSWEEN H. Y. 2002: Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars — *Nature* **417**, 263–266.
- WYATT, M. B., MCSWEEN, H. Y., TANAKA, K. L. & HEAD, J. W. 2004: Global geologic context for rock types and surface alteration on Mars — *Geology* **32/8**, 654–648.

Kézirat beérkezett: 2010. 05. 07.