

Üledékes képződmények vizsgálata a Marson: áttekintés

KERESZTURI Ákos^{1,2}

¹MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, H–1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 15–17.

²Nagy Károly Csillagászati Közhasznú Alapítvány

kereszturi.akos@csfk.mta.hu

Analysis of sedimentary structures on Mars: a review

Abstract

Special conditions on Mars — such as the carbon-dioxide atmosphere, the strong UV radiation, the surface gravity (which is smaller than on Earth), plus the presence of salty solutions (instead of the widespread pure water) — have caused differences in the sedimentation processes and sediment characteristics which can be observed on the Earth. The characteristics of the deposits on Mars changed along with the planetary evolution, and sediments of the greatest volume formed between the earlier warm plus wet, and the current dry plus cold periods. In this era a large volume of sulphates was deposited and this deposition might originally held more H₂O, but later it became drier. Given the evidence of low tectonic activity there are no strongly metamorphized and/or deformed sediments on the planet. Even the changes in the state of sediments due to lithostatic pressure and the subsurface fluids are smaller change than those on the Earth.

Keywords: Mars, sediments, planetary science

Összefoglalás

A Marson a szén-dioxid légkör, az erős UV sugárzás, a földinél gyengébb gravitációs tér és a ritkán előforduló tömény sóoldatok az okai, hogy az üledékek jellemzői eltérnek a Földön megszokottól. A bolygó fejlődésével párhuzamosan módosultak a kialakuló üledékek tulajdonságai. A legnagyobb térfogatot a kezdeti meleg, nedves időszak után, valamint a jelenlegi száraz hideg időszak előtt képződött üledékek képviselik. Ezek néhol több kilométer vastag szulfátos összleteket alkotnak, amelyek egykor magasabb víztartalommal bírhattak, de mára jóval szárazabbá váltak. Jelentős tektonikus aktivitás hiányában nincsenek átdolgozott üledékek a bolygón, és a rétegethelés valamint a talajoldatok hatása is kevésbé érezhető, mint a Földön.

Tárgyszavak: Mars, üledékek, planetológia

Bevezetés

Az üledékes képződmények azonosítása a Marson a földtől kissé eltérő megközelítést igényel. A különbségek egy része az eltérő kémiai környezettel kapcsolatos, ami a Földön ritka, illetve teljesen hiányzó összetételű üledékeket is eredményez. Ezek némelyike a vörös bolygó sajátos viszonyai között olyan formában is tartósan fennmaradhat, ami a földfelszínen instabil, illetve rövid élettartamú lenne. További fontos eltérés a gyengébb gravitációs tér, amely az ülepedési folyamatokat és az egykori vízfolyások hordalékszállítási képességét befolyásolta. Adott összetételű rétegsorban, adott mélységben a Marson a földinél kisebb litosztatikusan nyomás lép fel,

ami a kisebb geotermikus gradienssel együtt gyengébb átalakulást eredményez. Mindennek következtében adott metamorf fácies mélyebben jelentkezik a Marson, mint a Földön, vagy esetleg egyáltalán nem is lép fel. Ennek a cikknek a célja, hogy elsősorban külföldi eredményeket összefoglalva adjon pillanatképet a témakörrel, és emellett a hazai eredmények is említésre kerülnek, a megfelelő hivatkozásokkal. Ahol a hazai mű nem az alap forrásmű, de mégis fontos megemlíteni, ott az eredeti szakirodalmi hivatkozás is megtalálható a magyar nyelvű publikáció mellett. A bemutatott helyszínekről egy marstérkép ad áttekintést, és a használt rövidítések feloldása pedig a cikk végén olvasható. Az egyes szondák eredményeiről pedig KERESZTURI (2009) cikke ad áttekintést.

A Marson jellemző alacsony hőmérséklet miatt a vízjég és a szén-dioxid jég tartósan fagyott állapotban maradhat, és jelentős tömegben fordul elő a felszínen és alatta. A jeges lerakódások a keletkezési folyamataik és az általuk létrehozott morfológiai alakzatok miatt szintén üledékeknek tekinthetők, amely nem megszokott, de már szintén leírt helyzet a Földön (BÁLDI 1991). Jelen cikkben a földihez hasonló marsi üledékes folyamatok és alakzatok áttekintése olvasható — ennek megfelelően a jegek itt nem szerepelnek, azokról magyar nyelven KUTI & KERESZTURI (2009) cikkében olvasható további információ. Jelentős különbség a két bolygó között, hogy a ritkább marsi légkörből gyorsabban ülepednek ki a szemcsék, és a földinél nagyobb szélesség képes csak mozgatni őket — ennek ellenére a Marson jellemző porviharok és a forgószél által keltett portölcsérek miatt mégis sok por lebeg a légkörben. A cementáló oldatok összetétele, és mennyisége is eltér a földitől, emellett a Marson sokkal ritkább a folyékony halmazállapot. A felszíni kémiát még a ritka légkör miatt fellépő erős UV-sugárzás is befolyásolja. A Marson jellemző ásványokról és azok mállási folyamatairól KERESZTURI & CSORBA (2010) cikkében olvasható bővebb ismertetés, az alábbiakban csak kimondottan az üledékes folyamatokkal kapcsolatos jellemzőket tekintjük át. A tárgyalásban gyakran található olyan földi alakzatok vagy folyamatok elnevezései, amelyek nem biztos, hogy pontosan megfelelnek a földi viszonylatban megszokott értelmezésnek, ugyanakkor praktikusak, mivel más módon a marsi alakzatok és feltételezett folyamatok körülírása hosszú és körülményes lenne. A cikkben többször felbukkan a három nagy marsi korszak neve, amelyek az alábbi intervallumokat fedik le: noachi (4,5–3,7 milliárd éve), heszperiai (3,7–3,0 milliárd éve), amazoni (3,0 milliárd évtől napjainkig).

Üledékképződési folyamatok a Marson

A bolygón egykor a szél, a víz és a jég is fontos üledékszállító közeg lehetett, amelyek közül napjainkban csak az első működik jelentős mértékben. A lerakódó üledékek

keletkezésük után tovább változhatnak, részben a bolygón uralkodó éghajlati változásokkal együtt (pl. a víztartalom, vagy a jég területi eloszlásának módosulása miatt). Ilyen folyamat lehet például a poláris tételes üledékek (sarki jégsapka alatti, finom porból álló üledéksorok) pusztulása, vagy a savköddel kapcsolatos átalakulások (utóbbiak a légkörből a felszínre kicsapódó H₂O által beoldott kén-tartalmú anyagok mállasztó hatását jelentik), de itt említendő a cementáló hatású vas-oxidok és oxihidroxidok képződése, amelyek sok helyen keményedett réteget (duricrust) alkotnak a felszínen (I. táblázat).

Az üledékképződést is befolyásoló és a földitől eltérő tényező az ultraibolya sugárzás, amely a ritka légkör miatt a Mars felszínén nagyságrendileg 100-szor erősebb, mint a Földön. Ez a modellek alapján (CHUNG et al. 1978) oxidáló tevékenységet fejt ki. Bolygónkon általában csak regionális jelenség az erősen párolgó környezetekben zajló, kifejezetten sós üledékek képződése (sabkha), míg a Marson hasonló folyamat, a legkorábbi időszakot kivéve, mindig előfordulhat.

Fontos tényező a különböző felszín alatti oldatok hatása a Marson lévő regolit jellemzőire, illetve a diagenézisre. Ilyen vizes oldatok a megfigyelések (felszíni víznyomok, átalakult anyagok) és elméleti modellek alapján időnként megjelennek a Marson a mai száraz állapot ellenére. Ezeknek a sóoldatoknak a sűrűsége és viszkozitása lényegesen nagyobb a tiszta víznél, ami fizikailag is eltérő viselkedést eredményez a kémiai különbségek mellett (CHEVRIER & ALTHEIDE 2008). A szárazítás alapján az áramló sóoldatok valamivel magasabb és nagyobb hullámokat alakítottak ki a lerakódva keresztregtegzést mutató anyagban, mint a Földön (LAMB et al. 2011), ugyanakkor a Földön is sokat kutattott, kevésbé értett a lerakódás fizikai háttere és a keletkező rétegzettség kapcsolata. Az üledék hullámok méretének sűrűség, áramlási sebesség és egyéb körülmények szerinti alakulása a Földön is erősen vitatott kérdés, rengeteg kutatás nyomán úgy tűnik, csak laza összefüggések léteznek, ezért a Marsra vonatkozó következtetések is bizonytalanok. A keletkező üledékek kémiai és ásványos összetételét is jelentősen befolyásolhatták a

I. táblázat. Összehasonlító táblázat az üledékképződéssel kapcsolatos marsi és földi folyamatok között

Table I. Table to compare sedimentary processes on Earth and Mars

Üledékképződési tényezők és folyamatok	Jellemzők a Földön	Jellemzők a Marson
A légkör fizikai hatása	szélerózió és szállítás, üledékképzés kihullással	kis légsűrűség miatt gyors kihullás, csak erős szél tud homokot mozeatni
A folyóvizek jellemzői	sivatagot és sarki területeket kivéve tartós szállítás	főleg alkalmi események, rövid szállítási idő
Az állóvizek jellemzői	sivatagi és sarki területeket kivéve többnyire tartós vizes környezet	párolgás és hűlés miatt erősen betöményedő, vulkáni hatástól savas és általában rövid életű vizek
A jeges folyamatok	többnyire vékony vízfilm a jég/közet határfelületen, gyakran mozgó jégtakarók	amikor nincs vékony vízfilm a jég/közet határon, szárazbázisú gleccserek mozoghatnak, míg más időszakokban vékony adszorbeált vízréteg övezheti az ásványi felületeket
A légkör kémiai hatása	légköri oxigénnel jól kommunikáló közegben erős oxidáció	UV sugárzás keltette felszíni oxidánsok miatt igen erős oxidáció a szabad légköri oxigén hiánva ellenére
A talaifolvadékok hatása	evakori talaifolvadékok, változó kémhatással	ritka, rövidéletű és erősen sós talaifolvadékok

sóoldatok, többek között ioncserék segítségével (VANIMAN et al. 2011).

„Üledéktípusok” a Marson

Az alábbi ismertetés a legfontosabb marsi „üledéktípusok” felosztását mutatja be. Ez a kategorizálás jelenlegi, korlátozott tudásunkon alapul, ezért a jövőben jelentősen változhat. Kémiai szempontból a Marson előforduló üledékek fő típusai a következők:

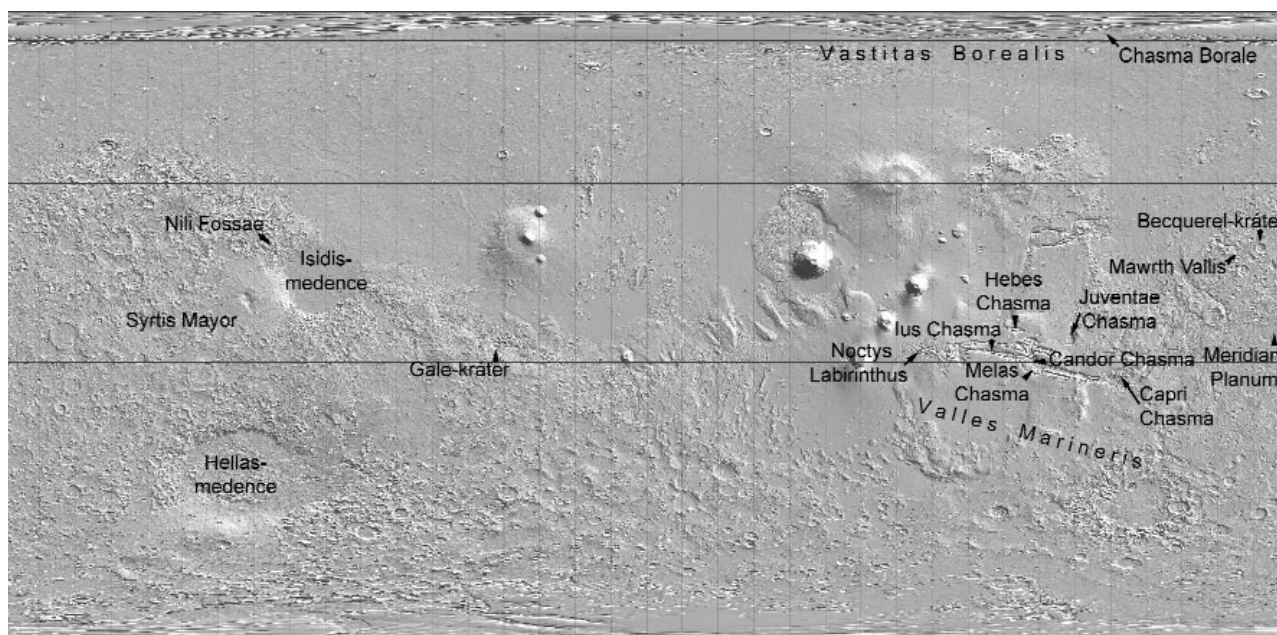
Hematit és egyéb vas-oxidok: világos üledékek formájában fordulnak elő a Valles Marineris árokrendszerében, egyes káoszterületeken és a Meridiani Planumon (ROACH et al. 2007).

Egyéb **sóüledékek**, kisebb mennyiségben, főleg kloridok a bolygó idős, déli felföldjén jelennek meg.

Vízjég és szén-dioxid jég, amely alkalmanként stabilan akár százmillió éves (!) időskálán is előfordulhatnak, és helyenként tipikus üledékes alakzatokat mutatnak, azonban a földi üledékektől való eltérések miatt itt nem tárgyaljuk azokat.

Fizikai szerkezetük alapján a II. táblázatban szereplő (a szerző által kategorizált, hivatalosan el nem fogadott) felosztás ad áttekintést a szakirodalomban gyakran említett marsi üledékes képződményekről.

A II. táblázatban bemutatott üledékek mellett a por is gyakran halmozódik fel jelentős mennyiségben, az egyenlítői térségekben például nagyságrendileg néhány millió km²-nyi területet borít sok por, amely erősen befolyásolja a terület hőháztartását (KUTI & KERESZTURI 2009). A Marson a por



1. ábra. Mercator vetületű domborzatárnyékolásos térkép a Marsról, rajta a cikkben említett felszínformák helyzetével

Figure 1. Mercator map of Mars by topography shading, indicated with the surface units discussed in this work

Szulfátok különböző formái változó víztartalmuk miatt fontos jelzői az egykori környezetnek és a későbbi változásoknak, keletkezésüket sokszor bepárlódással kapcsolják össze. Közülük a Marson az epszomit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) és az amorf Mg-szulfát lehet stabil fázis, nem pedig a kieserit, noha utóbbiból is sok van. A kieserit kristályos polihidratált magnézium-szulfáttá alakulása 10–38%-os térfogatnövekedéssel járhat, amely feszültséget, és deformációt eredményezhet a kőzetben (WILSON & BISH 2011). Gipszet a kieseritnél és a polihidratált szulfátoknál kevesebb helyen, de már azonosítottak a bolygón.

Filloszilikátok, amelyek neutrális pH-jú és nem hideg vizek tartós jelenlétére utalnak. Az Antarktiszon pl. a jelenlegi klimatikus viszonyok között kevés filloszilikát keletkezik, a marsi tömeges megjelenésüket alkalmi és kis térfogatú vizes időszakok nem tudták létrehozni. A filloszilikátok eloszlása általában nem követi a szulfátokét a bolygón.

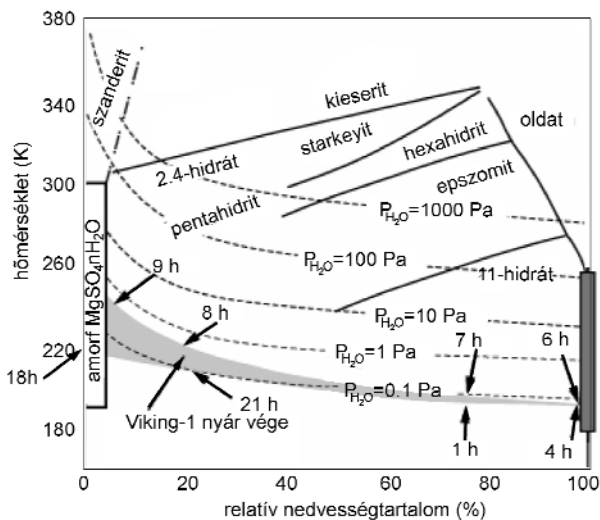
alatt a mikrométer körüli méretű szemcséket értjük, amelyeket a szél jelenleg is könnyen mozgat.

Víztartalmú ásványok főleg a bolygó fejlődéstörténetének első milliárd évéből maradtak hátra. (100 millió évnél fiatalabb, amazoni korú is van közöttük, amely elképzelhető, hogy hóval betemetett vulkanit mállásával jött létre [MANGOLD et al. 2010]). Az ásványok keletkezése idején jellemző környezeti paramétereket, valamint a későbbi átalakulásokat az eltérő H_2O -tartalmú szulfátos fázisok segítenek rekonstruálni. A 2. ábra a magnézium-szulfátok egyes típusait, valamint a marsi környezet hőmérséklete és relatív nedvességtartalma közti összefüggést mutatja. Az ábra jobb oldalán látható a nedvesebb környezeti feltételek (Marson magas földrajzi szélesség) esetén jellemző fázisok stabilitási tartományai, míg balra a szárazabb viszonyok (a Marson alacsonyabb földrajzi szélesség) tanulmányozhatók (VANIMAN et al. 2007). További részletek a Mars felszínét

II. táblázat. Üledékes alakzatok típusainak és néhány konkrét példájának áttekintése a Marson

Table II. Table to overview the types of sediments on Mars including some examples

Elnevezés	Keletkezés	Elterjedés, egyéb jellemzők	Kor
Delta torkolat jellegű alakzatok	folyóvízi szállításal, állóvízbe érve	a folyóvölgyek kisebb részénél jelennek csak meg	főleg 4,0-3,2 milliárd év
Közepes szélességek fedőüledékei	általában 1 m vastag, minden domborzati alakzatot beborító, légkörből kihulló por és a szemcsék közé faevő/hulló lég evűttese	közepes és magas szélességeken	10-0,1 millió év
Tavi üledékek	állóvízből történő kiülepedés	nincs kitértetett elterjedés, a fiatalabbak alacsonyabb szélességen jellemzőek	legtöbb 3,6 milliárd évnél idősebb, kevés 0,7 milliárd éves vagy még fiatalabb
Poláris réteges üledékek (PLD)	a légkörből történő por kihullása és iéekifagyása	kb. 70 foknál magasabb szélességen	100-0,1 millió év
Pólussapkák	légkörből történő kifagyás és esetleg H ₂ O kihullás	főleg vízjég, réteges szerkezet, eróziós nyomok	1-0,1 millió év
ILD	tavi vagy légkörből hulló, illetve vulkáni eredetű anyag	főleg a Valles Marineris árkaiban, de más alacsony szélességen fekvő mélyedésekben is	4,0-2,5 milliárd éve
Vastitas Borealis	anyagának legnagyobb részét bazaltos lávák alkotják, amelyek tetején jéges és vízi eredetű üledékek vannak	a Mars északi síkságának legnagyobb területe, ide futnak ki a vulkánok környékéről induló áradásos csatornák, felszíni jég nyomai is találhatóak a területen	3,0-2,0 milliárd év, legfelső rétegei kb. 0,1 milliárd év
regolit felső, cementált része (duricrust)	regolit legfelső részében lévő, a légkörből kivált H ₂ O segítségével átalakult, szulfátok és vas-oxidok által cementálódott réteg	gyakorlatilag bárhol a bolygón a laza porral fedett és jégsapkával borított területeket kivéve	10-0,1 millió éves
Medusa Fossae Formáció	eredete pontosan nem ismert, porózus vulkáni kőzet, vagy glaciális eredetű finom törmelék alkothatja, ami feltételezhetően nem vízből ülepedett ki	egyenlítői térségben, a mélyföld-felöld határvidékén (leginkább Ny.h. 127-221° között), 100-1000 m vastagság, szakadozott, könnyen erodálható, elnyúlt eróziós alakzatokkal szabdalta, követi a domborzatot	2,0 milliárd évnél fiatalabb
Hellas-medence felekén lévő üledékek	a nagy becsapódásos medence aljzatán néhán azonosítható eredetű üledékek, amelyeket feltehetőleg jég és víz szállított	morfológia változatos, néhol a PLD-khez hasonló, hőstetlensége alapján homokszem méretű anyagból áll	alsó-hesperiai



2. ábra. Magnézium-szulfátok stabilitása a hőmérséklet (függőleges tengely) és a relatív nedvességtartalom (vízszintes tengely) függvényében a Marson. A szürke sáv alul a Viking-1 leszállóegység nyári (balra) és téli (jobbra) méréseit mutatja, helyi időben (VANIMAN et al. 2007)

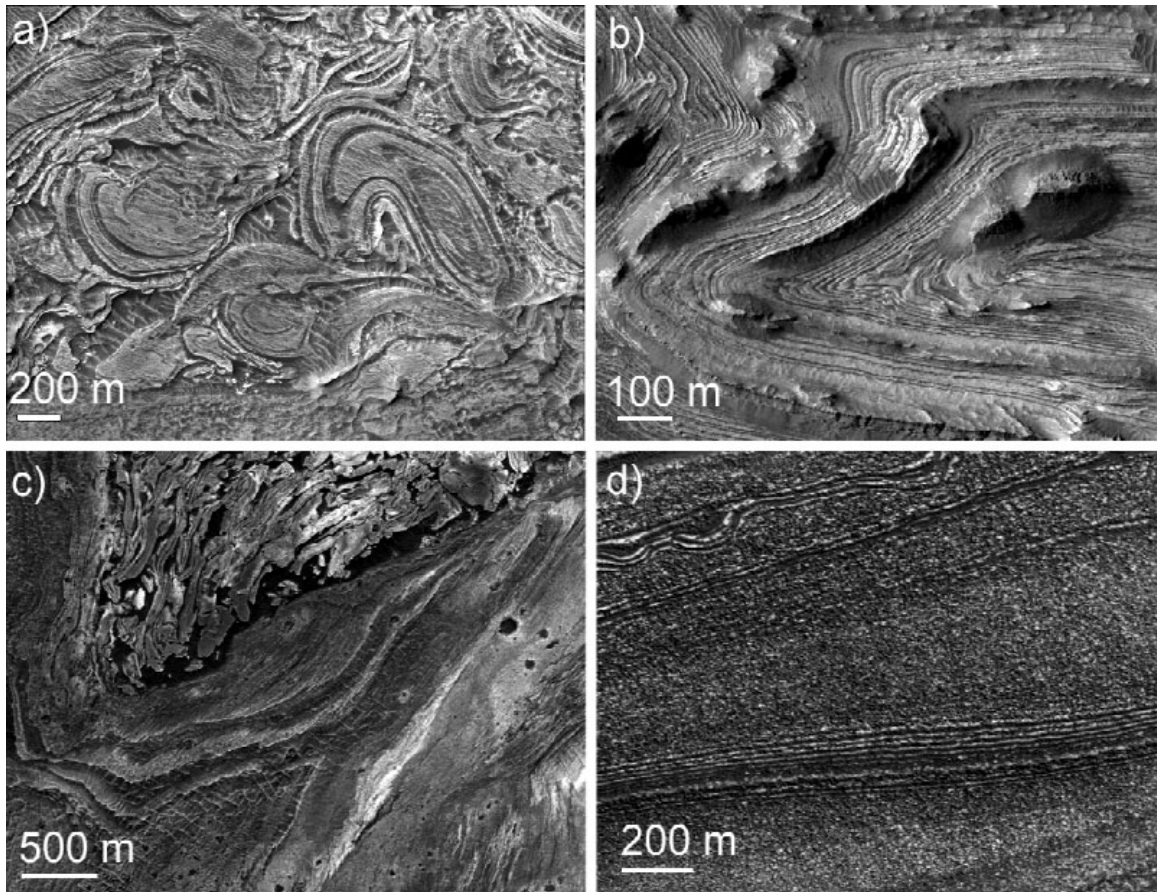
Figure 2. Stability of magnesium-sulphates according to different temperatures (vertical axis) and relative humidity (horizontal axis). The grey zone marks the in-situ measurements of Viking-1 lander summertime (left) and wintertime (right) (VANIMAN et al. 2007)

alkotó regolit összetételéről és ásványainak keletkezéséről KERESZTURI & CSORBA (2010) cikkében olvashatók.

Az üledékes kőzetekben helyenként deformációk nyoma figyelhető meg, ezek részben lágy deformációk, amelyek feltehetőleg még akkor keletkeztek, amikor a lerakódott anyag folyékony víztartalommal bírt, részben pedig rideg töréses formák (3. ábra). Ilyen alakzatok viszonylag ritkák a felszíni megfigyelések között (4. ábra). Ennek ellenére itt említendő a Spirit rover által vizsgált Home Plate nevű vulkanoszediment képződmény, amelybe lerakódása idején, még a kőzetté válás befejeződése előtt, vulkáni bombaként hullott bele legalább egy kőzetest, amely deformálta a rétegeket. Az Opportunity rover által vizsgált szulfátos homokkőben is akad néhány töréses jellegű, elmozdulás közben deformálódott alakzat.

Esettanulmányok

Az alábbi fejezetek a Mars egy-egy érdekes üledékes képződményét mutatják be. A jellemzések néhol hiányosak, gyakran egy-egy alapvető ismeret információ nem áll

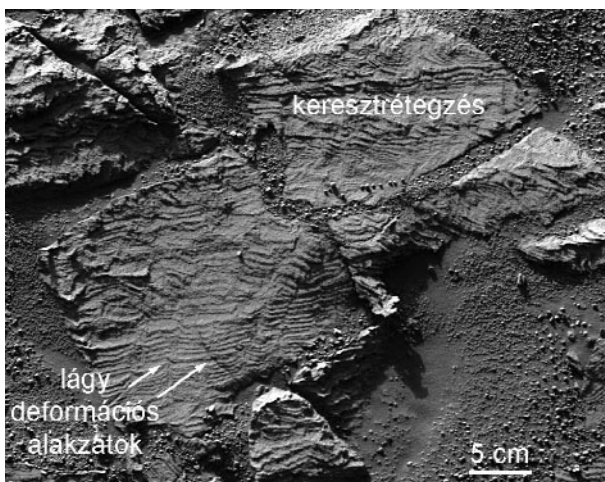


3. ábra. Példák üledékes kőzetek deformációira a Marson

a) konvolút rétegzés a Melas Chasma délnyugati részén (PSP_007087_1700 kép, MRO űrszonda), b) deformált rétegek a Candor Chasma területén (PSP_001918_1735 kép, MRO űrszonda), c) kaotikusan deformált anyag (ESP_013508_1665 kép, MRO űrszonda) a Melas Chasma területén (ábra felső részén lévő háromszög alakú terület), d) deformáció a poláris üledékes rétegek területén (M0001925 kép, MOC űrszonda, a képen közel sík felszín metszi el a korábban lerakódott anyagokat, és nem az egyenetlen felszín hozza létre látszólag az alakzatokat, akárcsak a b) ábrán (EDGETT & MALIN 2000) (NASA JPL)

Figure 3. Examples for deformation of sedimentary structures

a) convoluted stratification in the south-western wall of Melas Chasma (PSP_007087_1700 image, MRO orbiter), b) deformed layers in Candor Chasma (PSP_001918_1735 image, MRO orbiter), c) deformed and fragmented chaotic unit (ESP_013508_1665 image, MRO orbiter) Melas Chasma, d) deformed layers in the polar layered deposits (M0001925 image, MGS orbiter). The deformed appearance is related to real deformation and not to the surface topography. (EDGETT & MALIN 2000) (NASA, JPL)



4. ábra. Keresztretegzett homokkő az Opportunity rover felvételén az Erebuskráter falán, az Overgaard nevű feltárás 40 cm széles részletén a Marson. A megfigyelhető alakzatok áramló vizes közegre utalnak, emellett néhány deformációs képződmény is megfigyelhető

Figure 4. Cross-bedding in a sandstone imaged by Opportunity rover on the wall of Erebus crater, at the 40 cm wide Overgaard outcrop, suggesting the former presence of flowing water, and some soft deformation feature could also be identified there

rendelkezésre a képződményről, míg egyéb érdekes részletek már ismertek róla. Ennek ellenére a felsorolás bepillantást nyújt a marsi üledékes képződmények jellemzőibe.

Gipsztartalmú homokdűnék a sarkvidéken

A Mars Reconnaissance Orbiter űrszonda (MRO) észlelései megerősítették a gipsz ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) jelenlétét az északi dűnemezőben, amely egykori folyékony vízre utalhat a területen. A gipsz legnagyobb koncentrációja a dűnék felső tarajánál mutatkozik, és az egész pólus körül húzódó dűnemezőn a Chasma Borealétól nyugat felé csökkenő tendenciát mutat. Míg a dűnék gipsztes is tartalmaznak, valamint anyaguk hidratált, a terület aljzatában (amelyen a dűnék elhelyezkednek) jóval kevesebb a gipsz és szárazabb is a dűnék anyagánál. (LAHTELA et al. 2009) Ugyanakkor a dűnék közötti területen lévő világos anyag mégis elképzelhető, hogy valamilyen evaporitos (bepárolódó vizekből kivált) üledék. Az itt megfigyelhető íves futású, világos alakzatok az egykor megemelkedett talajvízes állapot nyo-

mát őrizhetik. Hasonló formák a Földön a San Andres és a Sacramento-hegységben jellemzőek (SZYNKIEWICZ et al. 2009), ahol a megemelkedett talajvíz a dűnék közötti területeken az apró tócsák peremén sókiválásokat okoz.

Szulfátos homokkő az Opportunity rover leszállóhelyén

A Mars részletesen kutatott területe a Terra Meridiani (Hematit régió), ahol az Opportunity rover landolt, és az egyes kráterek (Eagle, Endurance, Erebus, Victoria) falainál kibukkanó feltárásokban lévő felszín alatti anyagot vizsgálta. A területen sötét és vékony fedőréteg alatt néhol 1 km-es vastagságot is elérő homokkő található. Utóbbi 0,3–0,8 mm szemcseméretű, jól osztályozott, rétegzett, szulfátos anyagú szemcsékből álló, noachi korú képződmény. A kőzet kb. fele-fele arányban tartalmaz evaporitot és bazaltból átalakult szilikátos anyagot. Összetétel szerint legfontosabb ásványai: jarosit ($\text{KFe}_3^{+3}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), különböző Mg-, Ca-szulfátok, kloridok, hematit (Fe_2O_3), valamint további pontosan nem ismert szilikát(ok) és bromidok. Az összetétel

alapján lerakódása során változott a kiváló üledék kémiai jellemzője.

A területen részletesen vizsgált feltárásokban megismert 7 m vastag zónát Burns Formációnak nevezték el (SQUIRES et al. 2005). Az 5. ábrán ennek jellegzetes rétegsora látható a kibukkanó részek elemzése alapján. Három nagy egység különíthető el benne. Az alsó egység durvaszemcsés keresztrétegzett homokkőből áll, és fentről eróziós felület határolja. A középső egység finomlemez, néhol kis szögű keresztrétegzettséget mutat és, feltehetőleg szélfúttá eredetű, míg a felső egységtől egy diagenézis jeleit mutató, ásványkiválásokkal jelzett határ választja el, amely kapillárisvízből történő kiválással kapcsolatban keletkezhetett. A felső egység keverten tartalmaz eolikus eredetűnek tekintett és víz alatt keletkezett dűnéket, valamint dűneközi lerakódásokat (GROTZINGER et al. 2005)

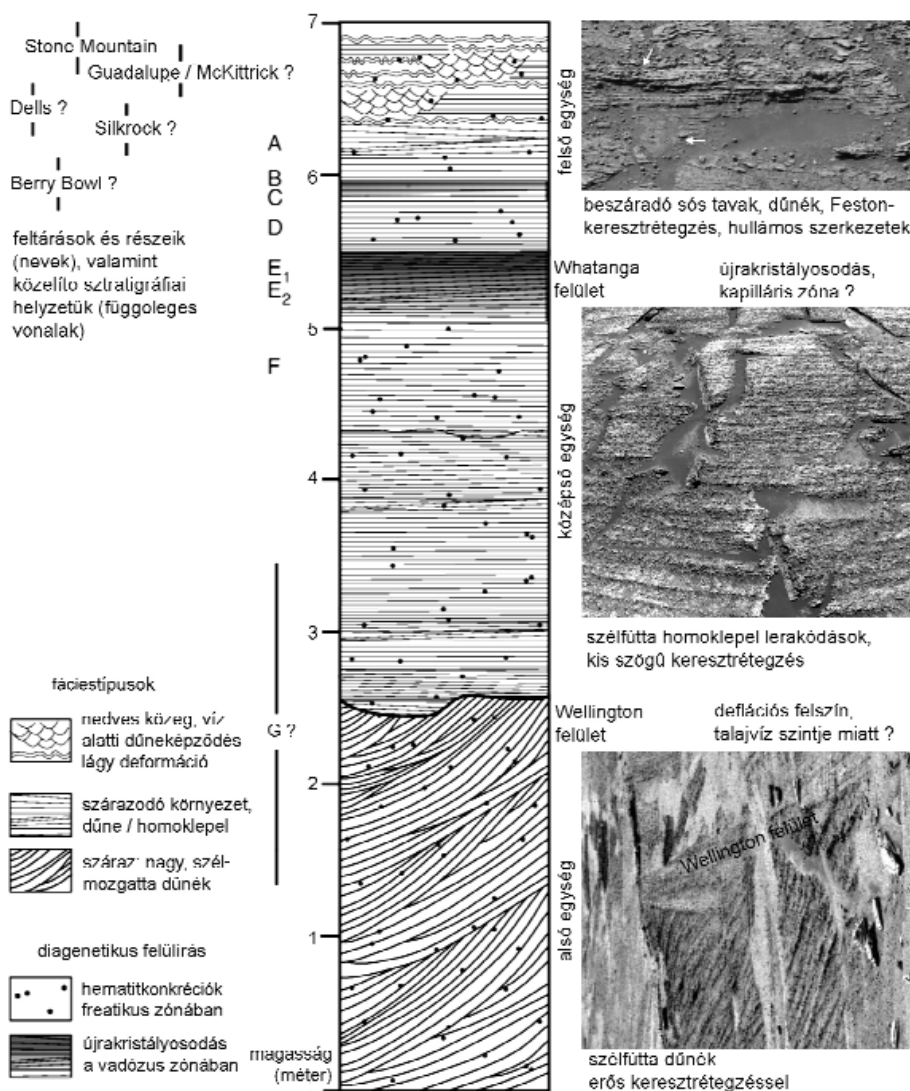
A homokkőben hematittartalmú, 1–5 mm átmérőjű konkréciók vannak mintegy 7% arányban, ezek színképi azonosítása nyomán választották ki a területet leszállóhelynek. A szakzsargonban néha csak „áfonyáknak” nevezett apró gömb alakzatok mérete a Victoria-kráterben vizsgált feltárásokban felfelé csökken, ami a felszín alatti víz

hatásának változására utal. A 10 m magas kibukkanó falak egykori szélfúttá, emellett áramló vízben lerakódott dűnékről árulkodnak. A kémiai változásokat tekintve az egyes kráterekben megvizsgált feltárásoknál hasonló vizes átalakulások történtek, eszerint az egykori vizes közeg legalább néhány kilométeres kiterjedésű lehetett.

A szulfátos üledékek képződése során savas volt a víz, feltehetőleg az olivinbazalt oldódása és egyéb diagenetikus folyamatok miatt. A modellek kis mennyiségű, erősen betöményedett, nagy sótartalmú vízzel számolnak itt, amelyek kéntartalma vulkáni eredetű volt (TOSCA & McLENNAN 2006). A szulfátos összetételekben a keresztrétegzés jelenléte, valamint a Br/Cr arány váltakozása felváltva sekélyvízi és eolikus szállítására utal. Az anyag, lerakódása előtt tehát jelentősen áthalmozódott a szél és

5. ábra. Az Opportunity rover által megvizsgált Burns Formáció ismert részének felépítése (középen és balra), valamint néhány részletképe (jobbra) (McLENNAN et al. 2005 nyomán)

Figure 5. The structure (left and middle) and some sample images (right) of the Burns Formation analyzed by Opportunity rover (after McLENNAN et al. 2005)



az áramló víz hatására, és legalább két alkalommal következett be, hogy a cementációnak köszönhetően, egyes ásványok oldatba kerültek, majd ismételtlen kiváltak (MCLENNAN 2005). A jarosit alacsony pH mellett, és az oxidált összetevők alapján erősen oxidatív viszonyok között vált ki. A jó oldhatóságú, mégis a kőzetben maradt Mg-, Fe-, Al- és Ca-szulfátok jelenléte arra utal, hogy nem tiszta víz, hanem nagyon tömény, magas ionerősségű oldat járta át a kőzeteket.

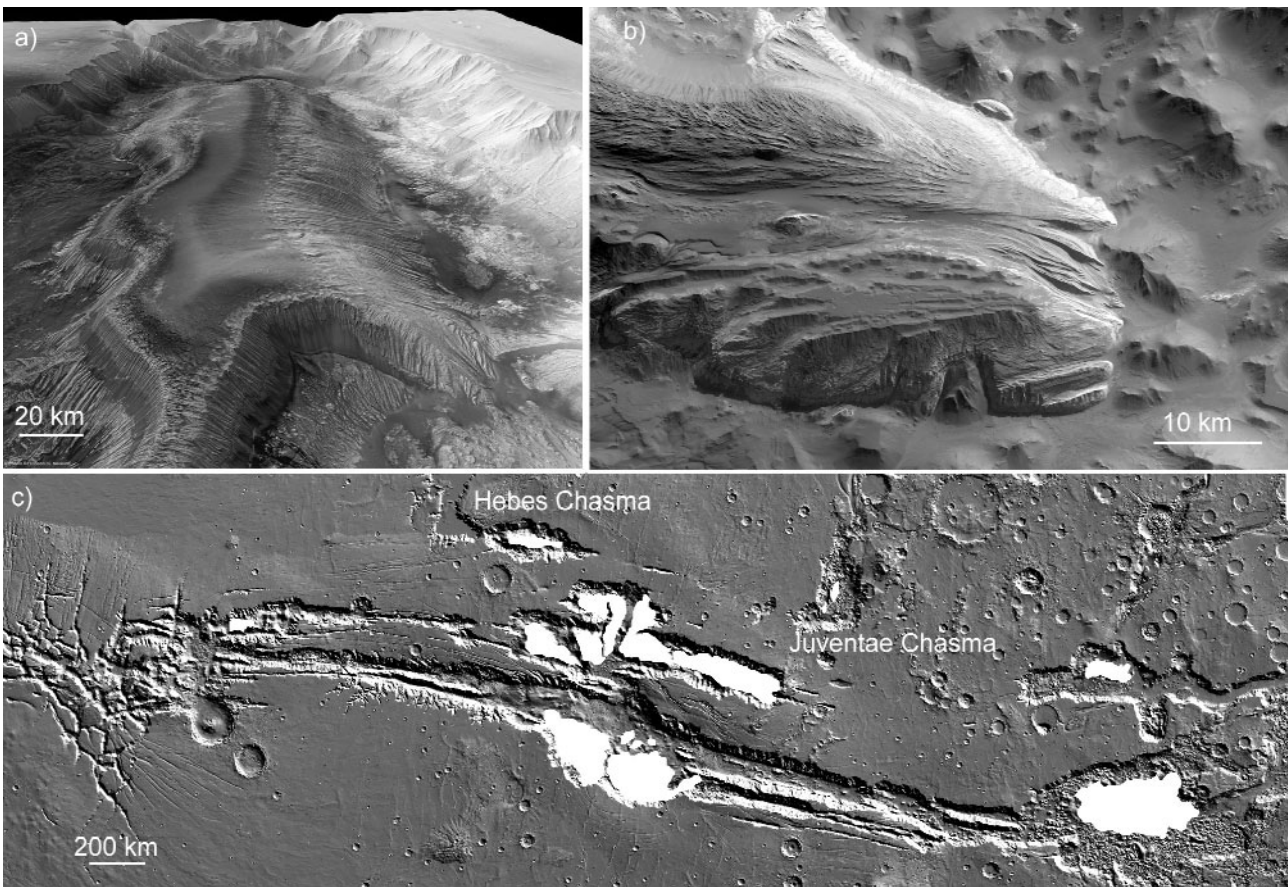
Szulfát- és opálhegyek a Valles Marineris területén

A bolygó fejlődésének hosszú, és eseménydús szakaszát örökítik meg a közel 4000 km hosszú, néhol akár 7 km mély Valles Marineris árokrendszerben lévő üledékek. Itt sokféle ásvány bukkan a felszínre, közöttük változatos mállástermékek is vannak, elsősorban hematit és szulfátok. A hematit fontos egykori vizes közegre utaló ásvány a Mars felszínén. Bár nem közvetlenül vízben keletkezhetett, inkább a vízben képződött goethit ($\text{FeO}[\text{OH}]$) átalakulásával képződött, és így közvetetten utal az egykori nedves környezetre. A szulfátok szintén jellegzetesen

vizes közegben képződnek, és jelentős H_2O tartalmuk lehet.

A Valles Marineris területén lévő üledékek legfontosabb képviselői az Interior Layered Deposit (ILD) nevű egységek (6. ábra). Ezek világos, közel párhuzamos rétegekből felépülő üledékes képződmények (LUCCHITTA et al. 1994), amelyek tavi, szélfúttá vagy vulkáni eredetű anyagból állnak, és vízzel kapcsolatos cementáció valamint átalakulás nyomait őrzik. Az üledékek a Valles Marineris árcai mellett néhány nagyobb kráter aljzatán, és helyenként kráterközi síkságokon is megtalálhatók az alacsony szélességű területeken (MCCAULEY 1978, KOMATSU et al. 1993). Anyaguk egy része az árkok falaiból pusztult le (LUCCHITTA et al. 1994), továbbá a tavi üledékes eredet mellett felmerült, hogy jég alatti vulkáni aktivitás nyomán is keletkezettek (CHAPMAN & TANAKA 2001), de a víztől független légköri ülepedés sem zárható ki (PETERSON 1981). Általában egy sötétebb fedőréteg borítja, amely konszolidálatlan, finomszemcsés, szél szállította anyagból áll.

A Valles Marinerisben található ásványok közül a **szulfátok** a legfontosabbak, de itt nem mindegyik előforduló üledékes képződményben sikerült őket azonosítani



6. ábra. Áttekintés a Valles Marineris területén előforduló nagyobb, üledékes eredetű ILD egységekről

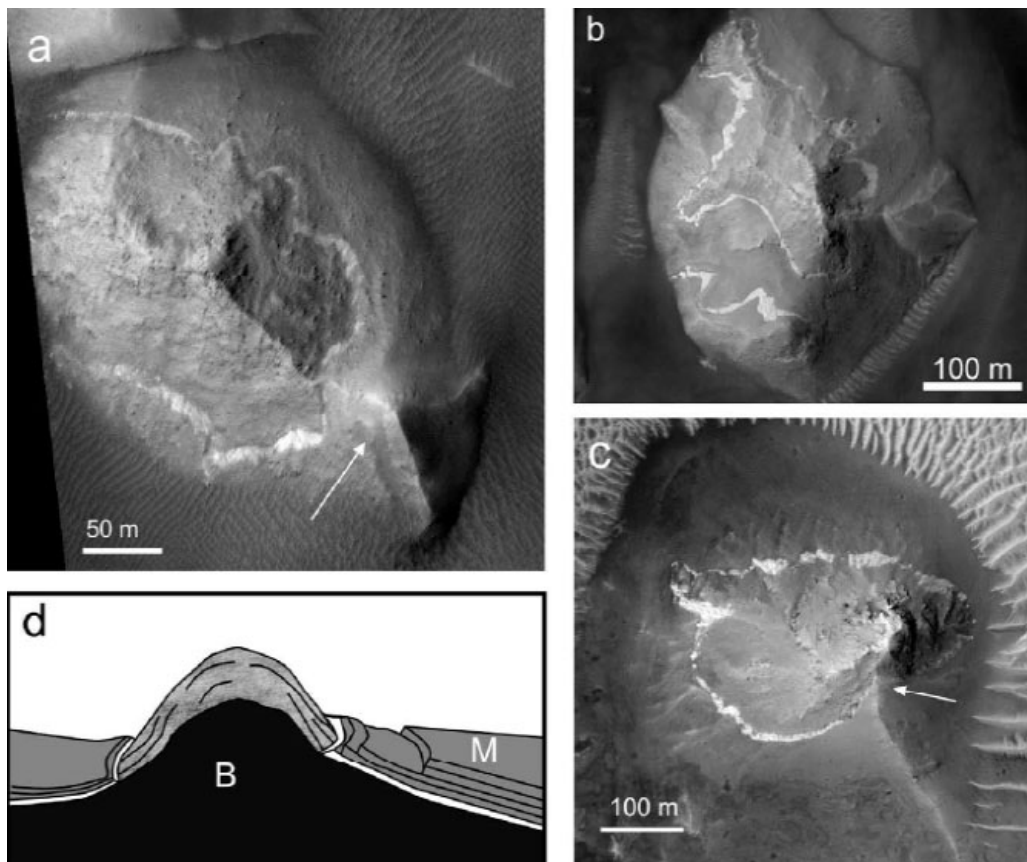
Az üledékek elterjedését fehér szín mutatja a c) képen (SCOTT & TANAKA 1986 nyomán), míg az a) képen a Hebes Chasma (HRSC kamera, MEX űrszonda), a b) képen pedig a Juventae Chasma árkokban lévő üledékek (CTX kamera, MRO űrszonda) kinagyított képei látszanak

Figure 6. Overview of the large ILD units in Valles Marineris

White colour marks the distribution of this sediment on image c) (SCOTT & TANAKA 1986), while in a) subset sediments in Hebes Chasma (HRSC camera, MEX probe), and in c) subset in Juventae Chasma (CTX camera, MRO probe) are visible

(7., 8., 9. ábra). Jellemző ásvány bennük a kieserit ($\text{MgSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) és a kristályszerkezetükben több vízmolekulát is tartalmazó polihidratált szulfátok ($[\text{Fe}, \text{Mg}] \text{SO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$), ezek közül a kieserit van általában

mélyebben. Az ILD-kben a vastartalom a kieseritben vagy a vörös kristályos hematitban lehet (a kettő együttesen fordul elő), ezek a szulfáttartalmú üledékek diagenézisével keletkeztek az üledékek alsó részén, ahol több km vastag

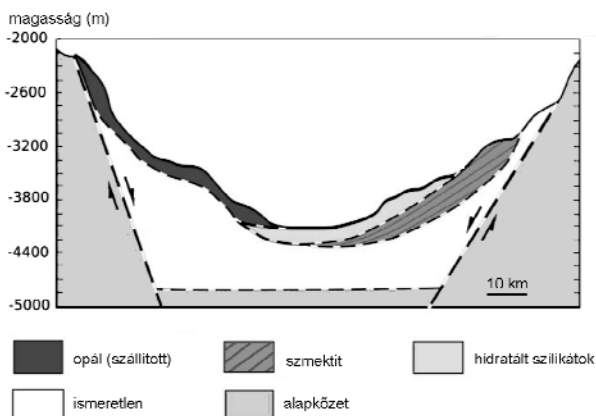


7. ábra. Néhány példa (a, b, c) a Noctys Labirinthus területén kibukkanó világos réteg megjelenésére a Marson

A megjelenést magyarázó lehetséges általános keresztmetsvény a (d) képen látható, amely mind az a), b) és c) képen ábrázolt kiemelkedés esetében érvényes. A fehér nyilak egy sötétebb fedőréteget mutatnak, amelyet a d) képen „M” jelöl. Ez alatt egy világos réteg, majd az alapkőzet („B”) következik (MANGOLD et al. 2010)

Figure 7. Examples for the appearance of the bright sedimentary layers exposed in Noctys Labirinthus (a, b, c), and their supposed internal structure (d) that is characteristic for the small heights in the a) b) and c) panels

The white arrows mark the the darker cap layer that is indicated by “M” in panel d). Below “M” first a brighter layer and then the bedrock (“B”) are present (MANGOLD et al. 2010)

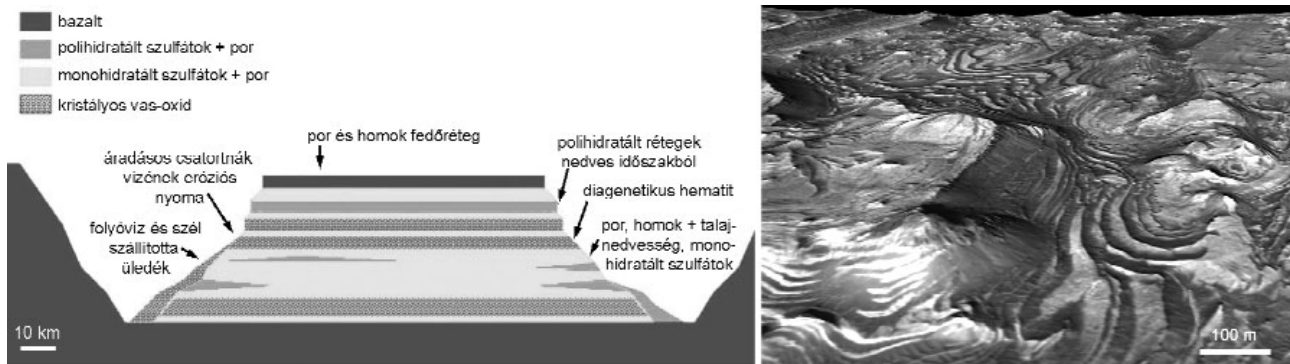


8. ábra. Az üledékes rétegek feltételezett sztratiográfiája az Ius Chasma területén, egy szulfátokat nem mutató vidéken, a Marson (ROACH et al. 2010 nyomán)

Figure 8. Probable stratigraphy of the sediments in Ius Chasma on Mars at a section where sulfates are not present (after ROACH et al. 2010)

fedőképződmény rétegterhelése hatott rájuk. A bennük található hematit durva kristályos szerkezetű, ez a külső erők hatására kimállik, és üledékként halmozódik fel a környéken. Az ILD egységek, szerkezetüket tekintve rétegzettek, felszínükön kevés apró kráter mutatkozik, ami arra utal, hogy bár idős, nemrég takaródtak ki, és azóta csak kevés becsapódás történt a felszínükön. Nagy hőtehetlenségük alapján az anyaguk cementált.

Az üledékes ILD egységek részletesen vizsgált területe az **Ius Chasma** árok, ahol legalul víztartalmú vas-magnézium szmektitek vannak. Ezek a bolygó fejlődésének korai állapotában keletkeztek vizes mállással, majd a meredek falak pusztulásával jutottak az árok fenekére. Eközben, illetve ezt követően sok szulfát vált ki a mélyedésekben. Az így lerakódott anyag később savas vizektől, részben H_2O -felvétellel, tovább alakult. Az oldatokra a szmektitek képződésének idején jellemző, a korai semleges vagy bázisos pH savassá



9. ábra. A Candor Chasma területén lévő üledékes alakzat feltételezett keresztmetsvénye (balra) és egy kis részének térbeli ábrázolása (jobbra) a Marson (MURCHIE et al. 2009 nyomán)

Figure 9. The proposed cross-section and structure of the sedimentary unit in Candor Chasma (left) and its small part in digital terrain model on Mars (after MURCHIE et al. 2009)

alakulását a vulkáni H_2S -kibocsátás, valamint a víz mennyiségének csökkenése okozhatta. Az egész rétegsor tetejére sok kristályvizet tartalmazó opálréteg rakódott le, a morfológiai jelek alapján folyóvízes szállítással (ROACH et al. 2010), a rétegsor keletkezésénél későbbi időszakban. A **Capri Chasma** területén mutatkozó több km vastag ILD egységek tetején szintén néhány vízfolyásnyom figyelhető meg (LEAH et al. 2010). Az alsó rétegekben a Földön bepárlódó, sós tengerpartokon keletkező kieserit ($MgSO_4 \cdot xH_2O$) található, emellett vörös hematit is előfordul itt. Mindezek fedőjében polihidratált szulfátok helyezkednek el, hematit nélkül.

Az IDL üledékek nagyobb része a heszperiai korban keletkezett, és főleg a Valles Marineris árkaiknak aljzatán, de néhol a belső falain is előfordulnak, leglátványosabb formáik több km vastag réteges összeteteket alkotnak. Anyaguk eredetét tekintve vulkáni, folyóvízi vagy állóvízi üledék, avagy szél szállította és a levegőből lerakott anyag. Képződésük az éghajlatváltozásokkal (KERESZTURI 2007) összefüggésben időnként alacsony szélességen kifagyott jéggel is kapcsolatban lehet (HEAD et al. 2005).

Az IDL üledékek a Valles Marinerisben eleinte közel semleges kémhatású vizes közegben a bazalt mállásával, később savas közegben történt átalakulással képződtek. Az üledékeknel a ma megtalálható ásványok között általában alul kieserit és hematit, felül pedig polihidratált szulfátok mutatkoznak, a felső rétegekben tehát több a nedvesség. Elképzelhető, hogy eredetileg az alsó réteg is polihidratált szulfátokként, esetleg epszomitként rakódott le, azonban később a rájuk települő újabb kőzettömegek nyomása, és a megemelkedett hőmérséklet miatt vizet veszítettek, és kieserit alakultak, a vastartalmú jarositból pedig hematit keletkezett (LEAH 2010). De az is elképzelhető, hogy felső rétegeik eredetileg is kisebb víztartalmú kieseritként rakódtak le, majd a légkörből a felszínre (tehát a legfelső rétegekre) rakódott jégből vízfelvétellel alakultak polihidratált szulfátokká. Eközben 10–30%-os térfogatnövekedés történt, és talán ez a tágulás hozta létre az üledékek felszínén néhol megfigyelt repedéseket. Néhány esetben a kieserit felett gipsz figyelhető meg.

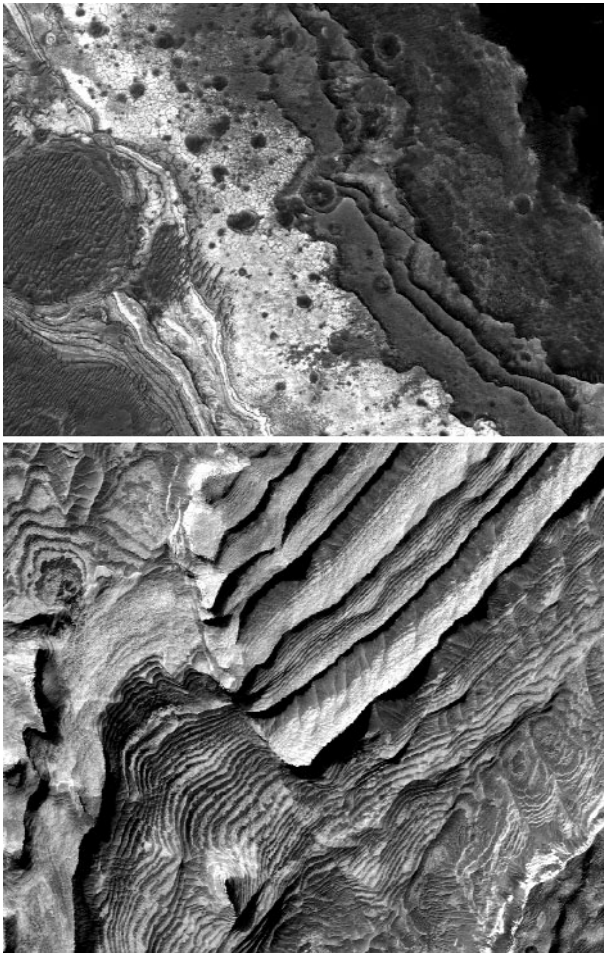
A vastag üledékes összetetkekben az alul fellépő nagyobb nyomás miatt vízvesztés történt, és az így keletkezett

sóoldatok vándoroltak. Mindezek felett nem csak a hatalmas árkokban, de néhány kisebb foltban a Valles Marineris környező síkságon is zajlottak ilyen vizes átalakulások, ahol szintén mutatkoznak hasonló üledékek (WEITZ et al. 2010). A víz forrásaként az úgynevezett káoszterületeket létrehozó, felszín alól feltörő folyadék is közreműködhetett. (A káoszterületek szabálytalan alakú, összetört blokkokból állnak, amelyek területén a felszín alól víz távozott el.)

A Valles Marineris térségében rekonstruált kémiai átalakulások illeszkednek a bolygó más pontjain megfigyelt, illetve azokból összeállított globális képbe. Ezek szerint a korai meleg és nedves éghajlaton semleges vagy enyhén lúgos közegben zajlott a mállás. Az azonosított hidratált szilikátok pedig fontos változást jeleznek a Marson ehhez képest. Azt a periódust mutatják, amikor a korábban lúgos vagy semleges vizek után már savasabb folyadékok jelentek meg a bolygón. A kémhatás változásának oka talán a vulkáni aktivitással kibocsátott H_2S gyarapodása, és az elérhető folyékony víz mennyiségének csökkenése volt. Utóbbinak egyre nagyobb része kötődött meg szilárd jéggé a hűvös bolygón, illetve részben el is szökött a világűrbe.

Opál a Valles Marineris területén

Az ásványtani vizsgálatok keretében több vízzel kapcsolatban keletkezett ásványt is megfigyeltek a bolygón. A frissen felfedezettek között említhető az opál, amely víztartalmú, gyengén kristályos oxidásvány (10. ábra). Vizsgált előfordulásai a Valles Marineris területén lévő rétegekben közel 2 milliárd évvel ezelőtt keletkezettek. Ezek az ásványok tehát lényegesen fiatalabbak, mint a korai meleg és nedves időszakból visszamaradt filloszilikátok, és többnyire fiatalabbak a bolygónak már hűvös és csak néha nedves periódusában keletkezett szulfátok jelentős részénél is. Az opál a vizsgált területen, sok helyen bukkan elő a felszín alatti rétegekből. Néhol vas-szulfát ásványokkal együtt mutatkozik, és több helyen folyásnyomokhoz kapcsolódik.



10. ábra. A Valles Marineris területén lévő, opált tartalmazó üledék 700 m széles részlete (fent) és a Becquerel-kráterben lévő üledékek 1,15 km széles területe, ahol az egyes legfinomabb rétegek kb. 3,6 m vastagok

Figure 10. Opal in a 700 m wide section of Valles Marineris (top) and the 1.15 km wide part of the sedimentary units in Becquerel Crater where the individual layers are about 3.6 m thick

Kisebb medencék és kráterek

Sokat tanulmányozott felszínforma az egyenlítőhöz közeli, 152 km átmérőjű **Gale-kráter**, ahol a Mars Science Laboratory űrszonda landolt 2012 nyarán. Ennek belsejében közel 4 km vastag üledékes rétegsor azonosítható. A leülepedett anyagban itt is hasonló változás figyelhető meg felfelé haladva, mint a Valles Marinerisnél: alul agyagásványok és kevés szulfát rakódott le, míg felfelé haladva csökken az agyagok mennyisége, majd csak szulfátok maradnak. Az alsó rétegek a korai, vízben gazdag és viszonylag meleg környezetet jelzik, míg a magasabban lévő üledékek egy szárazabb, és hűvösebb (tehát kevesebb mállásterméket létrehozó), bepárlódó, betöményedő vizes környezetre utalnak.

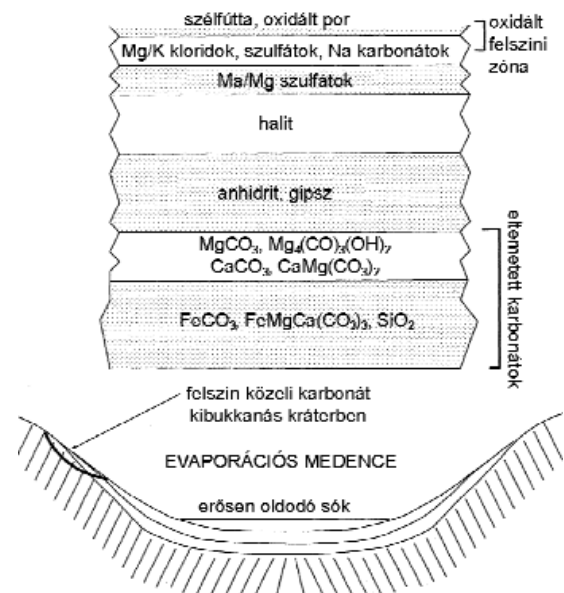
A 170 km-es **Becquerel-kráter** déli felén található egy világos, üledékes képződmény (10. ábra). Itt ciklikus rétegzést mutató üledékek figyelhetők meg, amelyek a feltételezések alapján a pályaelem-ingadozásokkal kapcsolatos

éghajlati változásokkal párhuzamosan jöhettek létre. Egyes morfológiai nyomok alapján valóban lehetnek egykor állóvizekkel kitöltött tavak a bolygón, míg más modellek szerint a folyékony fázis csak mikroszkopikus skálán volt jelen, és az üledékek a légkörből származó por és kifagyó jég együttes hatására keletkeztek.

A rég keresett karbonátok azonosítása

A régóta keresett karbonátokat több helyen is azonosították az MRO szinképi mérései alapján. Az Isidis-medence mellett elhelyezkedő Nili Fossae töréss alakzatnál sok helyen bukkan felszínre a karbonát, amely agyagokkal együtt fordul elő. Ezek szintén arra utalnak, hogy közel 3,6 milliárd évvel ezelőtt, vagy még korábban, semleges és enyhén lúgos pH-jú vizes környezetek is voltak a bolygón.

Egy másik fontos karbonátelőfordulást egy becsapódásos kráterben azonosították a Syrtis Major vulkáni területől délre. Ott a robbanás után kerültek a felszínre a korábban közel 6 km mélyen lévő kőzetek. A karbonátok itt víztartalmú szilikátásványokkal együtt találhatóak a terület deformált kőzeteiben. Az előbb említetthez hasonlóan a karbonátok agyagásványokkal együtt fordulnak elő, mindkettő folyékony vizes közegben keletkezett. Később láva takarta be ezeket, részben átalakultak, majd egy becsapódás robbanása nyomán kerültek ismét a felszínre. Valószínű rétegtani helyzetüket a 11. ábra mutatja be. Ha ez a térbeli helyzet máshol is jellemző a Marson, hatalmas eltemetett karbonátos közettömegek lehetnek a fiatalabb lávák alatt (MICHALSKI & NILES 2010).



11. ábra. Elméleti modell a betöményedő marsi tavakból történő sókiválásra, melynek folyamán a karbonátok elsőként ülepedhettek ki ezért eltemetett helyzetben lehetnek

Figure 11. Theoretical model on the stratigraphy of sediments deposited in ancient lakes with increasing salt content, where carbonates formed at the bottom, therefore they probably buried

Idős filloszilikátok a Mawrth Vallis térségében

A Marson a korai és nedves időszakból fennmaradt agyagásványok egyik legtöbbet vizsgált idős területe a **Mawrth Vallis** elnevezésű folyásnyom térsége, ahol közel egymillió km²-es területen bukkanak ki ezek az anyagok a felszínre. Itt az idős rétegek főleg két, a Földön is gyakori mállástermékből: kaolinitből és montmorillonitból állnak. Mindezek a felszínalkotó bazalt és a víz kölcsönhatása során keletkezettek, nedves és a mainál melegebb viszonyok között. A térségben azonosítottak egy kb. 600 m átmérőjű kerekded alakzatot, amely jarositot tartalmaz, akárcsak az Opportunity rover leszállóhelye. Ez az anyag már erősen savas környezetre utal. A bolygó fejlődése során az eltérő összetételű ásványok feltehetőleg más-más időszakban képződtek az egyes területeken (MCKEOWN et al. 2009).

Fejlődéstörténet az üledékek alapján

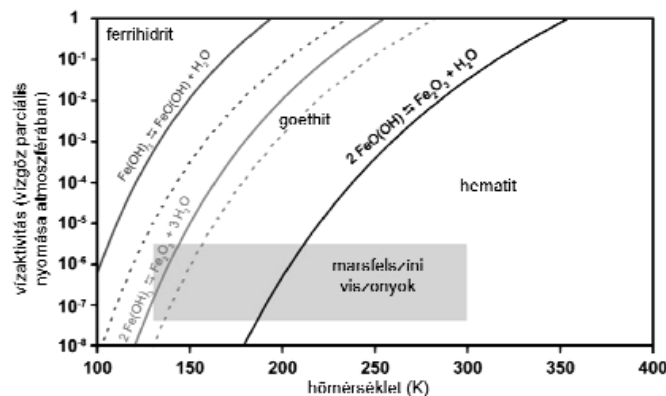
A marsfelszíni üledékek megfigyelése alapján az alábbi következtetések vonhatók le a bolygó fejlődéstörténetével kapcsolatban. A képződő üledékek **összetétele jellegzetesen változott** a bolygó fejlődése során. A noachi időszak meleg és nedves körülményei filloszilikátokká mállasztották a felszíni bazalt egy részét, azonban a sok idős folyásnyom ellenére nem ebből a korból maradtak vissza a leglátványosabb, több km vastag üledékek. Filloszilikátokat korábban csak az idős déli felföldeken azonosítottak, azonban az MRO színeképi mérései nemrég északon is kimutatták a létezésüket. Az északi mélyföldeken 91 vizsgált kráter közül 9 esetében mutatkoznak a felszín alól kibukkanó filloszilikátok, gyakran jelentős víztartalommal. A heszperiai korban a víz sokkal ritkábban jelent meg a felszínen, a globális átlaghőmérséklet ekkor lényegesen alacsonyabb

volt, és magas szulfáttartalmú, savas vizek lehettek jellemzők.

Ebből a periódusból maradtak vissza a hatalmas szulfátos ösztetek, főleg a Valles Marineris térségében. Az amazoni korban pedig még ritkább lett a víz megjelenése, és az oxidáció lehetett a jellemző mállási folyamat (12. ábra). Míg a földi oxidált üledékek kb. 2,2–2,4 milliárd évvel ezelőttől jellemzőek, addig a Marson kb. 4 milliárd éve is keletkeztek ilyenek, eszerint az ottani környezet gyorsabban érte el ezt az oxidatív állapotot, mint a földi.

Az üledékek **kémiai** jellemzői a későbbi változások nyomát is őrzik. Ezek keretében a szulfátos öszteteket átjáró vizek révén vaskiválás zajlott, illetve kompaktió révén vízvesztés történt. A bolygó globális szárazabbá válásával, és a víz gyakoriságának csökkenésével párhuzamosan egyre jellemzőbbek lettek a tömény sóoldatok, míg a tiszta víz egyre ritkábbá vált. Az elérhető vízmennyiség csökkenése egyre savasabb és oxidálóbb viszonyok felé vitte el a felszíni kémiai környezetet. Fontos lehet továbbá a légkör hatása, amely elsősorban szén-dioxidból áll, valamint alkalmanként sok kén-dioxid is lehetett benne. Ennek megfelelően savas kémhatásúak lehetnek a légkörrel egyensúlyban lévő felszíni vizek. Ugyanakkor, az ősi H₂O-nak jég formájában megkötődő része mellett, a fotodisszociációval felbomló vízmolekulákból a hidrogén könnyen elszökött, és a maradék oxigén a regolitban megkötődve oxidálhatta azt.

A kén és a vas fontos szerepét részben a Marsnak a Földénél kisebb tömege magyarázza. A kisebb belső hőtartalékok miatt gyengébb differenciáción ment keresztül a bolygó (SOHL & SPOHN 1997, BÉRCZI 1991), ezért a marsi köpeny és kéreg is gazdagabb maradt vasban és kénben. Az ősi szulfidos üledékek mállásával sok szulfát keletkezett, emellett a szulfid és a víz kölcsönhatása során savas vizek jöttek létre, amelyek elősegítették a mállást és nehezítették a karbonátok kiválását (CHEVRIER & MATHÉ 2007).



12. ábra. Vas-oxidok stabilitása a felszíni viszonyok függvényében a Marson

A vas-oxidok (ferrihidrit, goethit és hematit) stabil állapotai a hőmérséklet (vízszintes tengely) és a vízaktivitás (relatív nedvességtartalom, függőleges tengely) változásának megfelelően egymástól eltérnek. A jelenlegi felszíni viszonyokat az ábra alsó részén lévő szürke terület jelöli (CHEVRIER & MATHÉ 2007)

Figure 12. Stability of ferric-oxides under the Martian conditions

According to the change of temperature (horizontal axis) and water activity (relative humidity, vertical axis) different ferric-oxides (ferrihidrite, goethite and haematite) are stable on the surface. The grey area at the bottom marks the present surface conditions on Mars (CHEVRIER & MATHÉ 2007)

További eltérés a földi üledékes képződményektől, hogy a legősibb időszakot kivéve, jelentős tektonikus aktivitás nem zajlott a bolygón (WISE et al. 1979, GYENIZSE 2008, KERESZTURI 2012). Ennek megfelelően a lerakódott anyagok nem dolgozódtak át mechanikailag, nem gyűrődtek, nem deformálódtak. Egyedül kémiai jellemzőik módosultak jelentősen, elsősorban magas sótartalmú vizek cementációja, és az üledékek felszíni rétegeinél a tartós UV-sugárzás, valamint a légkörrel fellépő kölcsönhatás révén. Rétegethelés hatására fellépett átalakulásokat csak az alacsony szélességen lévő szulfátos ILD egységekben sikerült azonosítani, ahol feltehetőleg a víztartalmú szulfátokból kieserít, illetve a jarositból hematit keletkezett. Az egykor lerakódott karbonátok, a kémiai átalakulások keretében, talán a savas kémhatás miatt destabilizálódhattak, esetleg ki sem váltak, vagy eltemetett állapotban vannak, noha nagyon kis mennyiségben sikerült azonosítani ezeket.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott munka vízzel kapcsolatos vonatkozásait a OTKA PD 105970 program, valamint a CSFK Asztrofizikai és Geokémiai Laboratórium támogatta. A szerző emellett köszönetét fejezi ki UHRIN Andrásnak hasznos tanácsaiért.

Rövidítések

CTX: az MRO űrszondán üzemelő kontext kamera
 HRSC: a MEX űrszondán üzemelő nagyfelbontású sztereókamera
 ILD: rétegzett üledékes összletek neve a Marson
 MEX: Mars Express űrszonda
 MGS: Mars Global Surveyor űrszonda
 MRO: Mars Reconnaissance Orbiter űrszonda

Irodalom — References

- BÁLDI T. 1991: *Általános elemző (általános) földtan I–II. kötet.* — Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 797 p.
- BÉRCZI SZ. 1991: *Kristályoktól bolygótestekig.* — Akadémiai Kiadó, Budapest, 210 p.
- CHAPMAN, M. G. & TANAKA, K. L. 2001: Interior trough deposits on Mars: Subice volcanoes? — *Journal of Geophysical Research* **106**, 10087–10100.
- CHEVRIER, V. F. & ALTHEIDE, T. S. 2008: Low temperature aqueous ferric sulfate solutions on the surface of Mars. — *Geophysical Research Letters* **35**, CiteID L22101
- CHEVRIER, V. & MATHE, P. E. 2007: Mineralogy and evolution of the surface of Mars: A review. — *Planetary and Space Science* **55**, 289–314
- CHUN, S. F. S., PANG, K. D. & CUTTS, J. A. 1978: Photocatalytic oxidation of organic compounds on Mars. — *Nature* **274**, 875–876.
- EDGETT, K. S. & MALIN, M. C. 2000: The martian north polar cap: sedimentary aspects. — *Mars Polar Science Conference*, abstract 4043.
- GROTZINGER, J. P., ARVIDSON, R. E., BELL, J. F., CALVIN, D. W., CLARK, B. C., FIKE, D. A., GOLOMBEK, M., GREELEY, R., HALDEMANN, A., HERKENHOFF, K. E., JOLLIFF, B. L., KNOLL, A. H., MALIN, M., MCLENNAN, S. M., PARKER, T., SODERBLUM, L., SOHL-DICKSTEIN, J. N., SQUYRES, S. W., TOSCA, N. J. & WATTERS, W. A. 2005: Stratigraphy and sedimentology of a dry to wet eolian depositional system, Burns formation, Meridiani Planum, Mars. — *Earth and Planetary Science Letters* **240**, 11–72.
- GYENIZSE P. 2008: Planetomorfológia — In: LÓCZY D. (szerk.): *Geomorfológia II.* Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs, 305–362.
- HEAD, J. W., NEUKUM, G., JAUMANN, R., HIESINGER, H., HAUBER, E., CARR, M., MASSON, P., FOING, B., HOFFMANN, H., KRESLAVSKY, M., WERNER, S., MILKOVICH, S., VAN GASSELT, S. & HRSC Co-Investigator Team 2005: Tropical to mid-latitude snow and ice accumulation, flow and glaciation on Mars. — *Nature* **434**, 346–351.
- KERESZTURI Á. 2007: Éghajlatváltozás a Marson I., II. rész. — *Léggör* **52/2**, 12–17, **52/3**, 6–9.
- KERESZTURI Á. 2009: Megszondázzuk a Naprendszer. — *Fizikai Szemle* **2009/6**, 193–199.
- KERESZTURI A. 2012: Szemelvények a Földön kívüli tektonikai jelenségekről. — *Földtani Közlöny* **142**, 445–468.
- KERESZTURI Á. & CSORBA Á. 2010: Ásványok és kőzetek a Mars felszínén: vizsgálati, meghatározási lehetőségek. — *Földtani Közlöny* **140**, 293–301.
- KOMATSU, G., GEISSLER, P. E., STROM, R. G. & SINGER, R. B. 1993: Stratigraphy and erosional landforms of layered deposits in Valles Marineris, Mars. — *Journal of Geophysical Research* **98(E6)**, 11105–11121.
- KUTI A. & KERESZTURI Á. 2009: Inszolációs aprózódás a Marson. — *Földrajzi Közlemények* **133/1**, 1–12.
- LAHTELA, H., TITUS, T. N., GEISSLER, P. E., ROACH, L. H., VERBA, C. A., MUSTARD, J. F., MURCHIE, S. L., BROWN, A. J., SEELOS, F., SEELOS, K., CALVIN, W. M., PARENTE, M. & CORNWALL, C. 2009: Coordinated HiRISE/CRISM observation on Gypsum Signature in Martian polar dunes. — *40th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract No 2254.
- LAMB, M. P., GROTZINGER, J. P., SOUTHARD, J. B. & TOSCA, N. J. 2012: Were aqueous ripples on Mars formed by flowing brines. — *Special Publication of the Society for Sedimentary Geology*, 139–150.
- LEAH, R. H. 2009: Sulfates in Valles Marineris as indicators of the aqueous evolution of Mars. — *Manuscript*, PhD disszertáció, Brown University.

- LUCCHITTA, B. K., ISBELL, N. K. & HOWINGTON-KRAUS, A. 1994: Topography of Valles Marineris: Implications for erosional and structural history. — *Journal of Geophysical Research* **99** (E2), 3783–3798.
- MANGOLD, N., ROACH, L., MILLIKEN, R., MOUÉLIC, S. LE, ANSAN, V., BIBRING, J. P., MASSON, PH., MUSTARD, J. F., MURCHIE, S. & NEUKUM, G. 2010: A Late Amazonian alteration layer related to local volcanism on Mars. — *Icarus* **207**, 265–276
- MCCAULEY, J. F. 1978: *Geologic map of the Coprates quadrangle of Mars*. — U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Ser., Map I–897.
- MCKEOWN, N. K., BISHOP, J. L., WRAY, J. J., NOE DOBREA, E. Z. & SILVER, E. A. 2009: Textures and morphologies of phyllosilicate-bearing units at Mawrth Vallis. — *40th Lunar and Planetary Science Conference* abstract No 2433.
- MCLENNAN, S. M., BELL, J. F., CALVIN, W. M., CHRISTENSEN, P. R., CLARK, B. C., DE SOUZA, P. A., FARMER, J., FARRAND, W. H., FIKE, D. A., GELLERT, R., GHOSH, A., GLOTCH, T. D., GROTZINGER, J. P., HAHN, B., HERKENHOFF, K. E., HUROWITZ, J. A., JOHNSON, J. R., JOHNSON, S. S., JOLLIFF, B., KLINGELHOFER, G., KNOLL, A. H., LEARNER, Z., MALIN, M. C., MCSWEEN, H. Y., POCOCK, J., RUFF, S. W., SODERBLUM, L. A., SQUIRES, S. W., TOSCA, N. J., WATTERS, W. A., WYATT, M. B. & YENP, A. 2005: Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, Meridiani Planum, Mars. — *Earth and Planetary Science Letters* **240**, 95–121.
- MICHALSKI, J. R. & NILES, P. B. 2010: Deep crustal carbonate rocks exposed by meteor impact on Mars. — *Nature Geoscience* **3**, 751–755.
- MURCHIE, S., ROACH, L., SEELOS, F., MILLIKEN, R., MUSTARD, J., ARVIDSON, R., WISEMAN, S., LICHTENBERG, K., ANDREWS-HANNA, J., BISHOP, J., BIBRING, J.-P., PARENTE, M. & MORRIS, R. 2009. Evidence for the origin of layered deposits in Candor Chasma, Mars, from mineral composition and hydrologic modeling. — *Journal of Geophysical Research* **114**, E00D05.
- PETERSON, C. 1981: A secondary origin for the central plateau of Hebes Chasma. — *Proc. of Lunar Planet. Sci. Conf.* **11**, 1459–1471.
- ROACH, L. H., MUSTARD, J. F., LANE, M. D., BISHOP, J. L. & MURCHIE, S. L. 2010: Diagenetic haematite and sulfate assemblages in Valles Marineris. — *Icarus* **207**, 659–674.
- SZYKIEWICZ, A., EWING, R. C., FISHBAUGH, K. E., BOURKE, M. C., BUSTOS, D. & PRATT, L. M. 2009: Geomorphological evidence of plausible water activity and evaporitic deposition in interdune areas of the gypsum-rich Olympia Undae dune field. — *40th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract No 2038.
- SCOTT, D. & TANAKA K. 1986: Geologic map of the western equatorial region of Mars. — U.S. Geol Surv. Misc. Invest. Map, I–1802–A.
- SOHL, F. & SPOHN, T. 1997: The interior structure of Mars: Implications from SNC meteorites. — *Journal of Geophysical Research* **102**(E1), 1613–1636.
- SQUIRES, S. W. & KNOLL, A. H. 2005: Opportunity Sedimentary rocks at Meridiani Planum: Origin, diagenesis and implications for life on Mars. — *Earth and Planetary Science Letters* **240**, 1–10.
- TOSCA, N. J. & MCLENNAN, S. M. 2006. Chemical divides and evaporite assemblages on Mars. — *Earth and Planetary Science Letters* **241**, 21–31.
- VANIMAN, D. T., BISH, D. L., CHIPERA, S. J. & REARICK, M. S. 2011: Relevance to Mars of cation exchange between nontronite and Mg-sulfate brine. — *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, abstract No 2276.
- VANIMAN, D. T., CHIPERA, S. J., BISH, D. L. & PETERSON, R. C. 2007: Mars latitude, Mars obliquity, and hydration states of Mg-sulfates. — *7th International Conference on Mars*, abstract No 3156.
- WISE, D. U., GOLOMBEK, M. P. & MCGILL, G. E. 1979: Tectonic evolution of Mars. — *Journal of Geophysical Research* **84**, 7934–7939.
- WEITZ, C., MILLIKEN, R. E., GRANT, J. A., MCEWEN, A. S., WILLIAMS, R. M. E., BISHOP, J. L. & THOMSON, B. J. 2010. Mars Reconnaissance Orbiter observations of light-toned layered deposits and associated fluvial landforms on the plateaus adjacent to Valles Marineris. — *Icarus* **205**, 73–102.
- WILSON, S. A. & BISH, D. L. 2011: Formation of Gypsum and Bassanite by Solid-State Mineral Reactions: Implications for the Bioavailability of Water on Mars. — *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, abstract No 1327.

Kézirat beérkezett: 2012. 01. 02.