

A marsi Gale kráter fluviatilis-alluviális formakincsének térinformatikai elemzése

TDK dolgozat



Készítette:

Látos Tamás

ELTE TTK FFI

Geográfus MSC – geoinformatika szakirány

Témavezető:

Dr. Sik András

adjunktus

ELTE FFI Természetföldrajzi Tanszék

2012

Budapest

Tartalomjegyzék:

I. A dolgozat célkitűzése.....	3
II. Paradigmaváltás: víz helyett élet.....	4
III. Rövid Mars-történet.....	8
IV. A folyékony víz felszínformáló hatása	13
V. A Gale kráter folyékony víz hatására képződött formáinak elemzése során alkalmazott módszerek	21
VI. A Gale kráter nagyléptékű elemzése, öskörnyezet- rekonstrukciója.....	25
VI.1. A kráter területének általános jellemzése	25
VI.2. A Gale kráter morfológiai jellemzése	28
VI.3. A Mount Sharp üledékes rétegeinek ásványtani és sztratigráfiai jellemzése	36
VI.4. Elméletek a Gale kráter fejlődéstörténetére	42
VII. A Kíváncsiság-völgy térinformatikai elemzése	47
VII. 1. Az elemzés során használt módszerek.....	47
VII.2. A völgy tágabb környezetének nagyléptékű morfológiai elemzése	50
VII.3. A Kíváncsiság-völgy medertulajdonságainak vizsgálata	57
VII.4. A Kíváncsiság-völgy elemzése HiRISE felvételek alapján.....	65
VIII. Összefoglalás, a Kíváncsiság-völgy fejlődése és morfológiája	73
Felhasznált szakirodalom:.....	78
Ábrák forrása:	81

I. A dolgozat célkitűzése

Az olvasó által kézben tartott dolgozat írásakor több célkitűzést fogalmaztam meg magamnak, amikre szeretnék választ adni elkészültével. A Mars-kutatás az 1990-es évek óta reneszánszát éli, ennek folyamányaként tudjuk elemezni a bolygót az egyre fejlettebb keringő- és leszállóegységek segítségével.

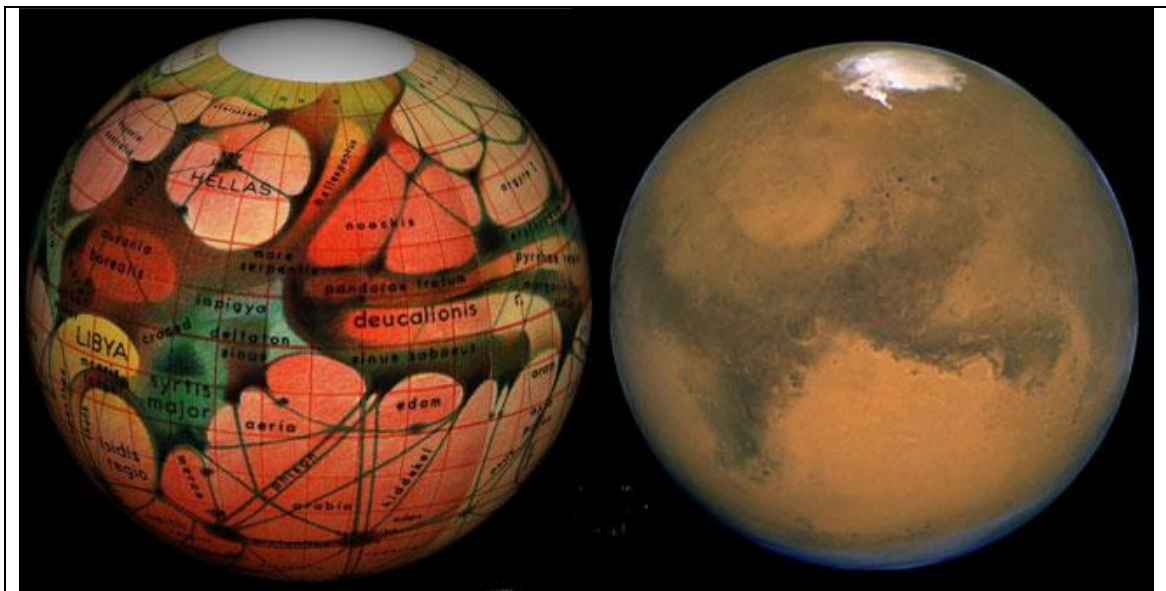
A térinformatika lehetővé teszi, hogy a különféle elemzési módszereket, mint a műholdfelvételek és felszíni felvételek kiértékelését, a roverek által végzett elemzések adatainak feldolgozását, valamint az összehasonlító planetológia módszerét komplexen, együttesen alkalmazva adjunk válaszokat a kutatás során felmerülő kérdésekre. A NASA legújabb leszállóegysége, a Curiosity 2012 augusztusában landolt a Mars felszínén, a Gale kráter területén. Ennek a kráternek a környezete adhat választ elsőként arra a kérdésre, hogy létezett-e valaha élet a Marson.

A dolgozat egyik célja, hogy a keringőegységek felvételeit és a Curiosity rover felszínen készített képeit integrálva, a térinformatika eszköztárának segítségével választ adjon arra, hogy a víz milyen szerepet játszott a terület felszínalakulásában. Ennek során komplex morfológiai elemzésen keresztül szeretném bemutatni, milyen ma is látható felszínformák utalnak arra, hogy egykor ez a terület folyékony vízben gazdag volt, ahol a marsi élet is potenciálisan jelen lehetett. Ezt az elemzést az összehasonlító planetológia elvének megfelelően, földi analógiákkal való párhuzamba állítással is igyekszem alátámasztani. A kráter területének nagyléptékű elemzésén túlmenően egy kiválasztott folyóvölgy részletesebb elemzését is elvégzem, azzal a céllal, hogy fejlődéstörténetét rekonstruálni tudjam.

A dolgozat másik célja, hogy bemutassam, milyen lehetőségek állnak rendelkezésünkre jelenleg egy másik bolygó, jelen helyzetben a Mars kutatására, milyen elemzési eljárások adhatják a legteljesebb képet egy adott területéről.

II. Paradigmaváltás: víz helyett élet

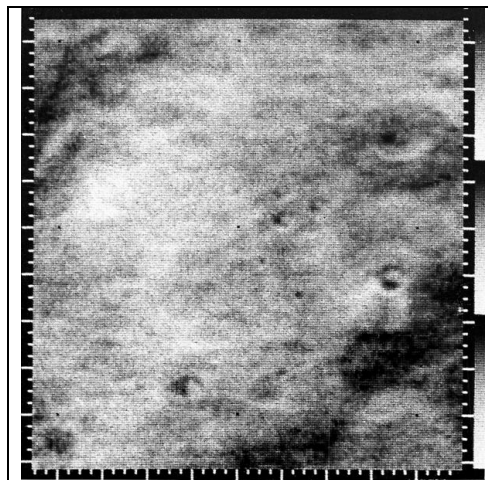
A Mars kutatásának modernkori, azaz a XIX. század vége óta tartó korszakára jellemző, hogy egyfajta ciklikusság figyelhető meg benne. Időről-időre valamilyen új elmélet, vagy felfedezés lökést adott ahhoz, hogy megélénküljön az érdeklődés a vörös bolygó kutatása iránt, ezeket a nagy fellángolásokat pedig olyan érák szakították meg, amikor lanyhult ez a felfokozott figyelem az égitest felé. Az első ilyen fordulatot Percival Lowell munkássága eredményezte, aki a századfordulón végzett kutatásai és Schiaparelli észlelései alapján kiterjedt, általa mesterségesnek vélt csatornahálózatot feltételezett a Marson, amivel a jégsapkák felől az Egyenlítő térségébe vezetik a folyékony vizet (1. ábra).



1. ábra, Percival Lowell csatornái és egy Hubble felvétel a Marsról.(NASA)

Elmélete nem maradt követők nélkül, így hamar elterjedt a teória, miszerint a szomszédos bolygón is kialakulhatott az értelmes, fejlett élet. Az űrkorszak kezdetéig azonban eldöntetlen maradt a kérdés, hiszen nem álltak az emberiség rendelkezésére olyan eszközök, amelyek alátámaszthatták, vagy cáfolhatták volna Lowell és követőinek elképzeléseit. Látható tehát, hogy ebben az esetben egy tudományos újítás adta a lökést, vagyis az, hogy már olyan teleszkópok álltak a megfigyelők rendelkezésére, amelyek segítségével a korábbinál részletesebben tudták vizsgálni az égitest felszínét.

A Mars kutatásának történetében 1965 eddig talán a legfontosabb mérföldkönek tekinthető, ekkor kezdődött a bolygó űrszondás megfigyelése. Ebben az évben haladt el mellette a Mariner-4 szonda, amely minden korábbinál közelebbi és részletgazdagabb felvételeket készített a felszínről, minőségük azonban még nem adott lehetőséget pontosabb elemzésekre. A képek azonban lehangelőak voltak a marsi civilizáció nyomai után kutatóknak, hiszen egy erősen a Holdéhoz hasonló táj bontakozott ki a szemük előtt, ahol nyoma sem volt az életnek (2.



2. ábra, A Mariner-4
Amazonis Planitia-ról
készített felvétele
(280x375km). (NASA)

ábra). Ezt követően amerikai - köztük még további három Mariner - és szovjet űrszondák sorát küldték a Mars felé, amelyek több-kevesebb sikerrel tovább folytatták a bolygó felderítését.

A következő mérföldkövet a két Viking űrszonda jelentette 1976-ban, amelyek a bolygó két különböző pontján leszállva olyan tudományos eszközöket vittek magukkal, amelyektől a kutatók azt remélték, hogy kimutatható velük a marsi élet. Már a leszállás után készített felvételek is kiábrándítóak voltak, leginkább egy földi fagyssivatag látképe bontakozott ki rajtuk, a mintavételek és elemzések pedig kudarcra zártak az élet keresésének szempontjából. Kb. harminc évvel később, földi tesztelések során kiderült, hogy a leszállóegységeken lévő műszerek ahhoz sem voltak elég érzékenyek, hogy a földi élet nyomait kimutassák itteni minták vizsgálata során (NAVARRO-GONZÁLEZ, R. et al. 2006). A mérések eredményei és a felvételeken látható sivár, kihalt táj visszavetette a lelkesedést a Mars kutatása iránt, amin az sem segített, hogy a következő évek során a bolygó felé indított legtöbb űrszonda kudarcot vallott.

Az 1990-es években azonban ismét lendületet kapott a bolygó kutatása és immár nem az élet, hanem a folyékony víz keresését helyezték középpontba, azon alapelvből

kiindulva, hogy ahol folyékony víz van, ott élet is lehet. Az már a Mariner- és Viking-űrszondák első felvételein is látható volt, hogy hatalmas vízfolyásnyomok szabdalják a Mars felszínét (3. ábra), az extrém fizikai körülmények azonban, mint például a rendkívül alacsony légnyomás, a



3. ábra, egykori vízfolyás medre a Viking-2 keringőegység felvételén.(NASA)

mágneses tér hiánya, a ritka légkör, az extrém hőmérsékletkülönbségek csekély eséllyel kecsegtettek, hogy jelenleg is megtalálható a bolygón a víz. Az elsődleges célkitűzés tehát az volt, hogy egyrészt bizonyítékot találjanak arra, hogy egykor valóban folyékony víz formálta a Mars felszínét, abban az esetben pedig, ha ez igazolódik, felmerül a kérdés, hogy mi történt ezzel a vízmennyiséggel, esetleg recens formák képében ma is tetten érhető-e a felszínalakító munkája. A válaszokat keringőegységek: Mars Global Surveyor (1997), 2001 Mars Odyssey (2001), Mars Express (2003), Mars Reconnaissance Orbiter (2006) és leszállóegységek: Mars Pathfinder (1997), Mars Exploration Rovers (Spirit, Opportunity 2004), Phoenix (2008), Mars Science Laboratory (2012) sorától remélték megkapni. Ebben a felsorolásban csak a sikeres küldetések szerepelnek, sajnos napjainkban is él az a tendencia, hogy a Mars felé indított űrszondák nagyjából fele nem tudja teljesíteni küldetését. Szerencsére a fent említett űrszondák viszont olyan eredményeket produkáltak, amelyek mára egyértelműen elfogadott tényré tették azt, hogy a Mars felszínén egykor nagymennyiségű folyékony víz volt megtalálható, sőt napjainkban is létrehozhatnak kisebb recens formákat vízfolyások, valamint a felszín alatt – van ahol csak néhány centiméter mélyen – vízjég is megtalálható (SIK-KERESZTURI-HARGITAI 2005.).

A keringőegységek felvételein olyan recens vízfolyásnyomok láthatók, amelyek kétséget kizáróan igazolják, hogy a folyékony víz napjainkban is formálja a bolygó felszínét (MELLON – PHILLIPS 2012). A Spirit és az Opportunity roverek a múltbeli, folyékony vízben bővelkedő

időszak bizonyítékait találták meg különböző üledékek és a víz hatására végbemenő diagenézis formakincsét vizsgálva (LÁTOS 2011.). A Phoenix-űrszonda, amely az északi jégsapka térségében szállt le szintén úttörő volt a víz keresésében, gyakorlatilag pár centiméterrel a felszíni törmeléktakaró alatt fagyott vízjeget talált (DUDÁS 2008.). A NASA legújabb űrszondája, a Curiosity (Mars Science Laboratory) pedig már a küldetése elején olyan kiszáradt folyómedret talált, amely morfológiája alapján akár a Földön is lehetne, annak ellenére, hogy ennek a rovernek már nem elsődleges feladata, hogy a víz nyomait kutassa (4. ábra).



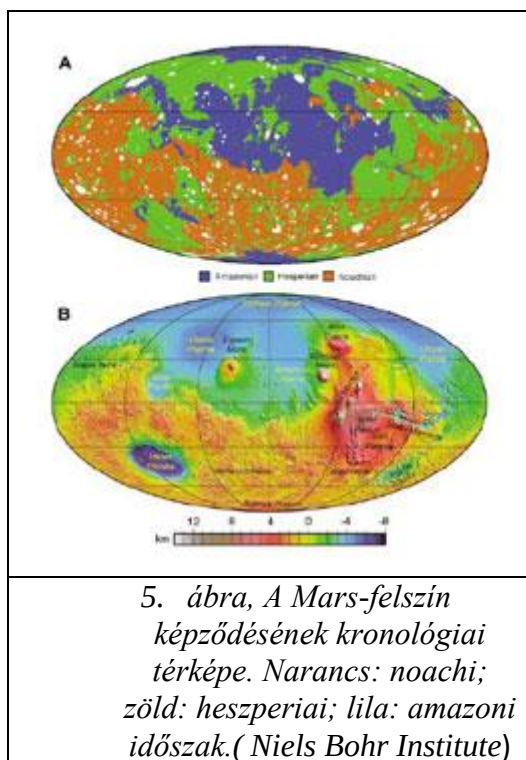
4. ábra, Curiosity által vizsgált folyómeder részlete a Gale kráterben, és a bal felső sarokban látható konglomerátum, mint jellemző üledékes forma.(NASA)

Miután ilyen formán bizonyítottá vált a Mars folyékony vízben gazdag múltja, kiemelt cél lett a karbonátok keresése, hogy megoldást találjunk az úgynevezett karbonát paradoxonra: ha a bolygó légköre túlnyomórészt CO₂-ból áll és a múltban tetemes mennyiségben fordult elő a felszínén folyékony víz, akkor miért nem találunk nagy mennyiségben karbonátos kőzeteket. Magyarázat lehet, hogy eltemetve ugyan, de léteznek ezek a kőzetek, vagy esetleg a túl savas környezet egy idő után nem tette lehetővé a képződésüket nagyobb mennyiségben (FAIRÉN ET AL. 2004.).

A fent említett űrszondák eredményei egy újabb, de korántsem előzmény nélküli korszakot nyitottak a Mars kutatásának történetében, lezárult ugyanis a víz keresésére indított lázas kutatás és újra az élet nyomai felé fordult a figyelem. Az utóbbi két évtized űrszondás vizsgálatai bebizonyították, hogy volt olyan folyékony vízben gazdag marsi időszak, ami alkalmas lehetett az élet kialakulására, ennek nyomait keresi a Curiosity a Gale kráterben. Tehát az új irány a biomarkerek keresése!

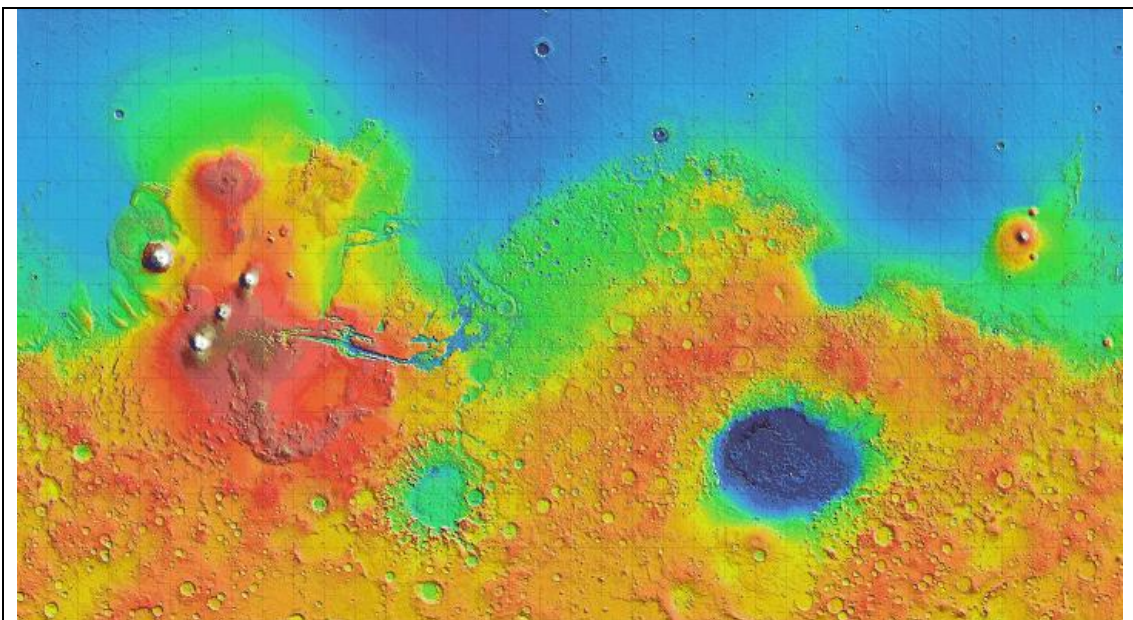
III. Rövid Mars-történet

Nehéz dolgunk van, ha a földtörténeti időskálához hasonló kronológiát szeretnénk felállítani a Mars esetében. Helyszíni mintavételek híján ugyanis csak relatív kormeghatározást tudunk végezni, hiszen a Marsból becsapódások hatására kilöködött, majd a Földön lehullott meteoritokon kívül jelenleg még nem rendelkezünk marsi mintákkal. Ezeken a mintákon tudunk abszolút kormeghatározást végezni, amelyek segíthetnek kalibrálni a főleg kráterstatisztikára alapozott relatív kormeghatározási skálát. Az így kapott korbeosztást a Holdra felállított kronológia segítségével korrigálták, amely esetben lehetőség volt a kráterstatisztikai és a Földre visszahozott kőzetminták abszolút kormeghatározásával kapott eredmények kombinálására. További pontosításra ad lehetőséget a Mars Express keringőegység által végzett anyagösszetétel-vizsgálat, amelynek alapján olyan ásványkémiai kronológiai skálát állítottak fel, amely a különböző egymásra települő rétegeket felépítő kőzetek képződési körülményeit veszi alapul (BIBRING, J.-P. ET AL. 2006). A különböző módszerek ötvözetével jöhetett létre a jelenleg elfogadott kronológiai felosztás (HARTMANN, W. K. – NEUKUM, G. 2001; 5. ábra).



A Mars fejlődéstörténetét több alapvető tényező befolyásolta, s ezekből fakadnak a lényegi különbségek, amelyek a Föld fejlődésétől eltérő pályára juttatták a bolygót. Ezen tényezők közül kiemelkedő, hogy a Mars átmérője mindössze fele a Föld hasonló adatának, ebből fakadóan, tömege, vasmagja is töredéke bolygónkénak. A kisebb tömeg és vasmag eredménye, hogy kisebb a gravitáció, a szökési sebesség, az

égitest belső hője hamarabb lecsökkent, a mágneses teret generáló dinamó korábban leállt. Jelentősebb méretű hold hiányában nincs olyan tényező a rendszerben, ami stabilizálni tudná a bolygó tengelyferdeségét, amely ilyen formán 15° - 60° között ingadozhat, s igen jelentős klímaváltozásokat okoz. A Marsra tekintve megtapasztalhatjuk milyen sors várt volna a Földre, ha nem jött volna létre a Hold. A Nagy meteoritbombázás mellett leginkább ezek a tényezők járultak hozzá ahhoz, hogy a Mars az általunk ismert fejlődési pályát járta be és végül elnyerte ma is látható formáját. A Mars-történet kronológiája mindezek alapján a következőképpen vázolható fel (Sík 2011):



6. ábra, a kétarcú marsi globális domborzat megjelenése a Mars Global Surveyor MOLA lézeres magasságmérő adatai alapján.(NASA)

- Prenoachi időszak (4,6-4 md): a bolygó kialakulása után eleinte hasonló fejlődésen ment keresztül, mint a Föld, az olvadt ásványok differenciálódtak, kialakult az égitest gömbhéjas szerkezete és megszilárdult a kéreg. Ekkor feltehetőleg beindult a mágneses dinamó is a magban, ennek bizonyítéka a ma is mérhető, kőzetekbe fagyott lokális mágneses terek megfigyelése. Globális lemeztektonika ugyan nem indult be elegendő tartós belső hő híján, de a déli félteke mágneses vizsgálata során normál és reverz mágnesezettségű sávok váltakozását mutatták ki, ami arra utal, hogy megkezdődött a szétsodródás (J.E.P. CONNERNEY ET AL. 2005). Feltehetően ekkor

volt az első jelentősebb nedves időszak a Mars történetében: a légkörből kicsapódó víz hatására jöttek létre az első vízfolyások és állóvizek a felszínen. Ezek térbeli elhelyezkedését alapvetően határozta meg, hogy szintén erre az időszakra tehető a kétarcú felszín, az északi mélyföldek és a déli felföldek kialakulása (6. ábra).

- Noachi időszak (4-3,7 md): a rövid időtávot felölelő második időszak elejét alapvetően a Prenoachi korban kezdődő nedves éghajlat határozta meg, a folyóvízi erózió lett uralkodó, a nagyobb mélyedéseket, mint például a krátereket, vagy az északi mélyföldek területét állóvizek töltötték ki, utóbbit Borealis-óceánnak nevezzük (7. ábra). Leginkább tehát a Földön is tapasztalt vízkörforgás formálta a bolygó arculatát, amelyet a Nagy meteoritbombázás becsapódásai zártak le.

A legnagyobb becsapódásos formák ekkor keletkeztek a Mars felszínén: a Hellas- és az Argyre-medence. A meteoritbombázásnak komolyabb következményei is voltak ennél: felborult a belső szférákban lévő egyensúly, a mágneses dinamó leállt, beindult a leginkább a Tharsis- és Elysium-hátságra koncentrálódó hot-spot vulkanizmus. Ekkorra datálható az ősi légkör jelentős részének elvesztése is, ugyanis a becsapódások ereje gyakorlatilag



7. ábra, elképzelt Mars felszín a noachi időszak elején. (Gill)

kifújta a gázokat az atmoszférából. A megmaradó légkör összetétele pedig az intenzív vulkáni tevékenység hatására átalakult, nagy mennyiségű szén-dioxid és a savas esőket előidéző kén-vegyületek dúsultak fel benne.

- Heszperiai időszak (3,7-3 md): ezen időszakkal vette kezdetét annak az uralkodó környezetnek a kialakulása, ami ma is jellemzi a bolygót, a Mars egyre barátságtalanabb égitestté vált, ahogy fokozatosan hűlt le és tűnt el felszínéről a folyékony víz. Az atmoszféra-vesztés nem állt meg, sőt fokozódott a mértéke,

mágneses tér hiányában a napszél ugyanis már szabadon pusztíthatta, amely hatást az alacsony szökési sebesség is erősített és máig hatóan degradálja a fennmaradt légkört. Egy további tényező is hozzájárult ehhez a folyamathoz: a ritkább légkör üvegházhatása is lecsökkent, így egyre nagyobb mennyiségben csapódott ki belőle a vízgőz. A fokozatosan vékonyodó légkör természetesen csökkenő légnyomást eredményezett, amely egy idő után olyan mértéket öltött, hogy a folyékony víz többé nem lehetett jelen stabilan a bolygó felszínén, mivel forráspontja a nullához közeli értékre csökkent (jelenleg ez az érték $+2^{\circ}\text{C}$). Ezzel megkezdődött a Mars felszínének kiszáradása, a H_2O azonban nem tűnt el a bolygóról, jelentős része a törmeléktakaró felszín alatti rétegeibe fagyott, kialakítva ezzel az úgynevezett krioszférát, emellett a pólusokon lévő jégsapkákba fagyva is jelentős mennyiség raktározódott el (P. S. RUSSELL AND J. W. HEAD 2002). Eltűntek a felszínről a vízfolyások és a mélyebben fekvő területeket kitöltő állóvizek. A vulkanizmus továbbra is intenzív maradt, főleg a két hátság területén, ahol hatalmas pajzsvulkánok fejlődtek ki a forró pontoknak és a felettük statikus helyzetben lévő kéregnek köszönhetően, a Tharsis-hátságtól kiindulva pedig a növekvő belső feszültség hatására felnyílt a 4000 km hosszú Mariner-völgyrendszer. Paradox módon az ilyen formán szárazzá váló Marson ekkor alakultak ki a legnagyobb vízfolyás-nyomok, az áradásos csatornák: a továbbra sem szünetelő becsapódások és a vulkanikus aktivitás hője helyenként ugyanis részlegesen megolvasztotta a krioszférát és az így létrejött káosz-területekről kiindulva hatalmas vízhozamú folyamok indultak meg jellemzően a mélyebb területek felé, tehát a nagyobb becsapódásos medencék és az északi mélyföldek irányába (KERESZTURI-SIK 1999).

- Amazoni időszak (3md-napjainkig): az utóbbi mintegy három milliárd év hatására a Mars egyre szárazabb és szélsőségesebb időjárású bolygóvá változott. A nagy becsapódások megszűntek, a vulkanizmust tápláló energiák elapadtak, a légkör pusztulása jelenleg is tartó folyamat. A felszínformálás a külső erőkre korlátozódott, a szél, a tömegmozgások, az aprózódás, valamint a jég felszínformáló hatása vette át a főszerepet, folyékony víz már csak elvétve és igen kis mennyiségben tör a felszínre speciális helyzetekben és valószínűleg a víznél jóval alacsonyabb fagyáspontú sóoldatok formájában. Erre az időszakra datálható a Mars jellegzetes színét adó

vöröses törmeléktakaró kialakulása is, amely a fokozódó oxidáció hatására vezethető vissza. Nem olyan formában, mint a folyékony vízben gazdag időszakokban, de az Amazoni időszakban is tetten érhető a víz egyfajta körforgása, a tengelyferdeség ingadozásának következményeként. Az ingadozás hatására az aktuálisan több besugárzást kapó területeken a légkörbe párolog el a víz és a kevesebb besugárzást kapó területeken pedig kifagy. Így alakultak ki periodikusan a közepes szélességek gleccserei és sziklageccserei, valamint a pólusok vízjég-sapkái és a sarkvidéki vízjég-tartalmú üledékek.

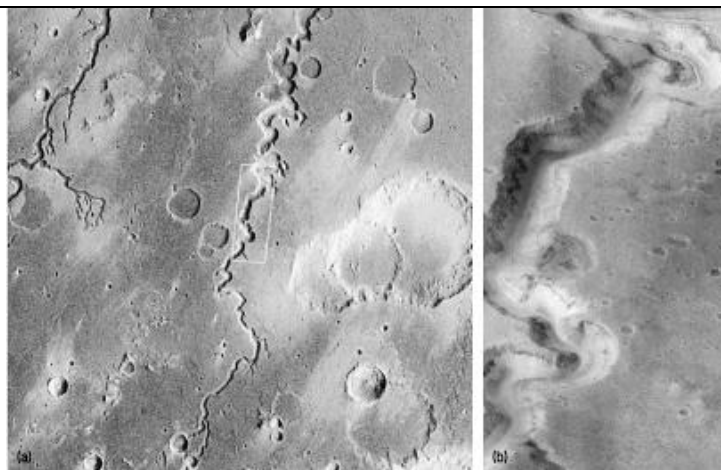
A felvázolt fejlődéstörténeti kronológia alapján jól végigkövethető, milyen események vezethettek oda, hogy az egykor Föld-szerű, folyékony vízben gazdag és jelentős belső, valamint külső erők által vezérelt aktivitást mutató bolygó hogyan nyerte el mai hideg, száraz, jelentősen inaktívabb formáját. A vízben bővelkedőbb periódusok azonban arra a feltételezésre engednek következtetni, hogy az élet valamilyen szinten kifejlődhetett ezen az égitesten is, még ha csak rövid időszakok során volt is erre lehetőség. Ebből kifolyólag leginkább az egykori víz formálta területeken érdemes ennek kutatását megkezdeni, ahogy a Curiosity teszi azt a Gale kráter üledékes területén.

IV. A folyékony víz felszínformáló hatása

A Mars-történet felvázolása során látható volt, hogy a bolygónak több, folyékony vízben bővelkedő időszaka volt, amely periódusok jelentős mértékben formálták át a felszínt. Ennek nyomai jelenleg is jól nyomozhatók leginkább a keringőegységek felvételein és ezek alapján különböző fluviális, illetve alluviális formákat lehet elkülöníteni:

Paraméter	Hálózatos csatornák	Áradásos csatornák	Vízmosások
Hossz	10-100 km	100-1000 km	0.1-1 km
Szélesség	0.1-2 km	10-50 km	0.01-0.1 km
Kor	4,2-3,5 md. év	3,8-1 md. év	~ millió, recens
8. ábra, a marsi vízfolyások főbb tulajdonságai. (Sik-Keresztúri-Hargitai)			

- hálózatos csatornák: a Noachi időszakra jellemző vízfolyástípusok által kialakított mederhálózatok, a déli felföldek jellegzetes felszínformái. Leginkább ezek hasonlítanak a Földön megszokott folyóhálózatokra, mégis struktúrájuk és fejlettségük jelentős eltéréseket mutat a földi vízfolyásokhoz képest, ami eredetüket is kérdésessé teszi. A különböző elméletek szerint csapadékhullás, illetve jégolvadás táplálhatta ezeket a folyamatokat. Forrásvidékük is több esetben kérdéseket vet fel, például olyan esetekben, amikor nem morfológia által vezérelt forrásvidékeket látunk, a vízgyűjtő terület hiánya okozza a bizonytalanságot ez esetben. Emellett ugyanakkor

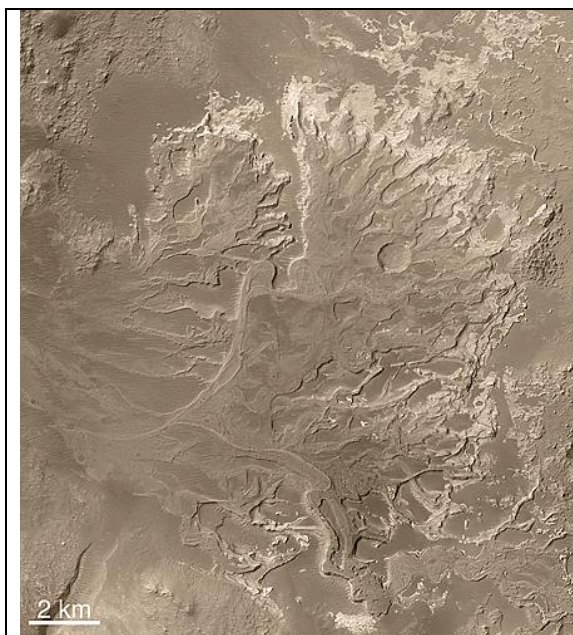


9. ábra, a Nandedi völgyrendszer részlete és a meder egy kinagyított részlete. (NASA)

jellemzőek a morfológia által meghatározott forrásvidékek is, amelyek lejtős

területről indulnak. A vízhálózat struktúrája hasonlít a földi vízfolyásokéra, mellékágak szövedéke csatlakozik a főághoz, viszont jellemzően az ezeket tápláló legkisebb méretskálájú vízfolyások hiányoznak, tehát legtöbb esetben fejletlen vízhálózatot látunk (9. ábra). Szintén a földi formákra emlékeztetnek a gyakran megfigyelhető kanyarulatok, egy meanderező folyó képét feltárva. Az egykor ezeket a medreket kitöltő folyók jelentős eróziós hatással bírtak, erre bizonyíték, hogy több esetben hirtelen mélyedéssel indulnak a forrásvidéken, partvonaluk meredek, a meder mélysége 100-600 méter között változik, nem látni akkumulációs formákat (SIK-KERESZTURI-HARGITAI 2005.). A folyamok elvégződése is különböző képet mutat, van ahol a forrásvidékhez hasonlóan, nincs a morfológia által meghatározott torkolati terület, pl. kráter, vagy valamilyen mélyebben fekvő, szerkezetileg zárt terület. Több esetben a torkolat területén teljes üledékhiány tapasztalható, amire az erózió adhat magyarázatot,

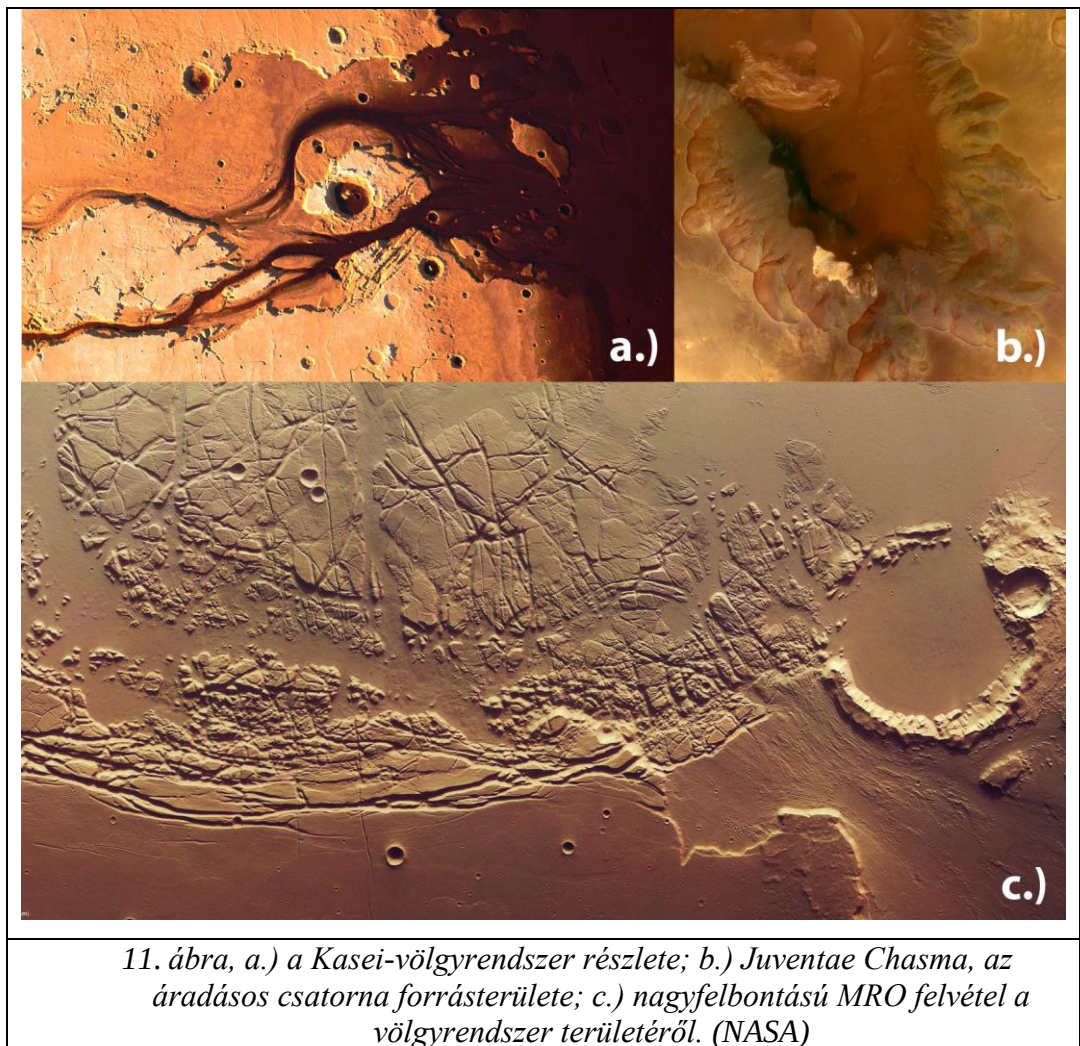
emellett a Földön is tapasztalható deltavidékek, alluviális formák is megjelennek egyes vízfolyások esetében (10. ábra). A felsorolt jellemzőkből fakadóan megkérdőjelezhető, hogy kizárólag csapadékhullás alakíthatta ki ezeket a vízfolyásokat. Ellene szól a vízgyűjtők hiánya, a morfológiai nem vezérelt forrásvidékek kialakulása, a hirtelen mélységben induló medrek és a nagy eróziós ráta. Mindezek arra engednek



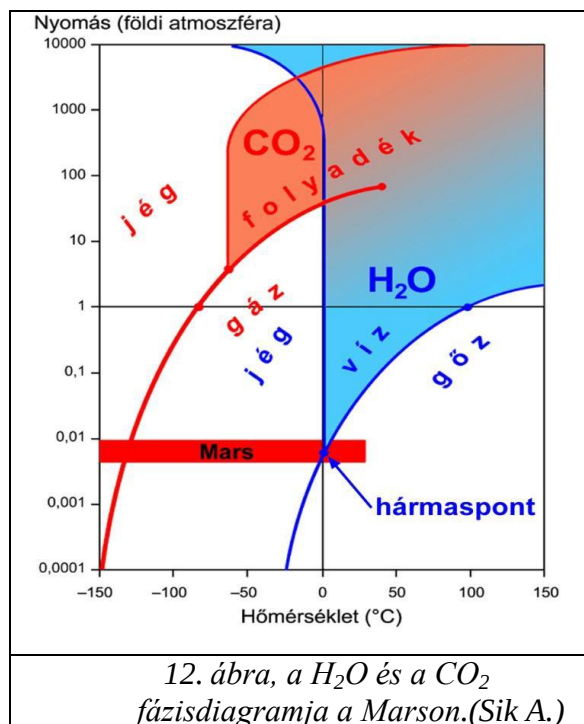
10. ábra, az Eberswalde kráterbe torkolló vízfolyás alluviális legyezője. (NASA)

következtetni, hogy a csapadék útján történő táplálás mellett jégolvadás idézhette elő a forrásvidékek kialakulását. A jég olvadását pedig a felszín alatti vulkáni aktivitás hője, illetve a becsapódások idézhették elő.

- áradásos csatornák: a Heszperiai és Amazoni időszakra tehető kialakulásuk, területileg a hálózatos csatornáknál sokkal jobban lehatárolhatók, a Chryse-síkság, Mariner-völgyrendszer, Elysium-hátság, Hellas-medence környezetének területén jöttek létre és az északi mélyföldek, valamint a Hellas-medence felé irányulnak. Ezen formák létrejöttének alapja, hogy ekkora már kialakult a vízkészletet magába záró fagyott krioszféra, s az alatta lévő folyékony víz tört fel hatalmas mennyiségben, például meteorit-bechapódás, vagy vulkáni aktivitás hőenergiájának, csuszamlások, esetleg szerkezeti mozgások hatására. Jellemzően tehát nyomás alatti vízkészletek, befagyott tavak, felszín alatti vízkészletek lehettek a források. Szerkezetüket tekintve két csoportba oszthatók, irányított és nehezen körvonalazható medertípus szerint. Jellemzően fonatos megjelenésűek, teljes szélességükben indulnak a forrásvidékről és hatalmas eróziós rátával rendelkeztek a több millió m^3/mp nagyságrendű vízhozamnak köszönhetően (11. ábra). A forrásvidékek minden esetben úgynevezett káoszterületek, ahol erősen összetöredezett, blokkokból álló felszín figyelhető meg. Élettartamuk nagyságrendileg napokban és hetekben mérhető, azonban ismétlődő vízfeltörésre utalnak a földi folyóteraszokhoz hasonlóan megjelenő képződmények (KERESZTURI – SIK 1999). Fontos megemlíteni, hogy ezen vízfolyások felszínét jég borította és ez alatt áramlott a folyékony víz, ebben az időszakban ugyanis már nem volt stabil a víz folyékony állapotban a bolygó felszínén. Torkolatvidékük is jobban tipizálható, mint a hálózatos csatornák esetében, jellemzően az északi mélyföldek, illetve a Hellas-medence területére esnek, az e területekre érkező víz lokálisan ismét feltölthette az egykori északi óceán részterületeit, de végül ez a vízkészlet is megfagyott, majd elszublimált.



- vízmosások: az Amazoni időszak néhány millió éves, illetve recens formái. A belső erők szinte inaktívvá válásával párhuzamosan az epizodikus áradások is megszűntek a bolygó felszínén és már csak speciális körülmények között fordulhat elő rajta folyékony víz, illetve leginkább sóoldat jelenhet meg. Ehhez a Marsra jellemző, a H_2O halmazállapot-változásaira vonatkozó fázisdiagramot érdemes megvizsgálni, amin látható, hogy



12. ábra, a H_2O és a CO_2 fázisdiagramja a Marson. (Sik A.)

jelenleg nagyon szűk tartományban fordulnak elő olyan nyomás- és hőmérséklet-viszonyok, amelyek esetében a folyékony H_2O stabil formában jelen lehet a bolygó felszínén (12. ábra). Nagyon csekély azon helyek listája, ahol manapság ez a két kritérium egyszerre teljesülhet: Amazonis-síkság, Nyugat-Arabia, déli Isidis-síkság és Elysium-síkság, Hellas-medence, Argyre-medence. Éppen ezért a jelenlegi elképzelés az, hogy víz helyett sóoldatok jelenhetnek meg napjainkban a felszínen, mivel a sótartalom nem csak a fagyáspontot csökkenti jelentős mértékben, hanem a párolgás mértékét is.

A jelenlegi viszonyok között is kialakuló egyik típusuk, a sárfolyások lejtőkön jönnek létre, hófoltok olvadása, csuszamlások során, valamint fagynyomás hatására is feltörhet a felszín alatti víz (WILLIAMS – MALIN 2002). Ilyen formák a Földön is megfigyelhetők sarkvidéki területeken (13. ábra).

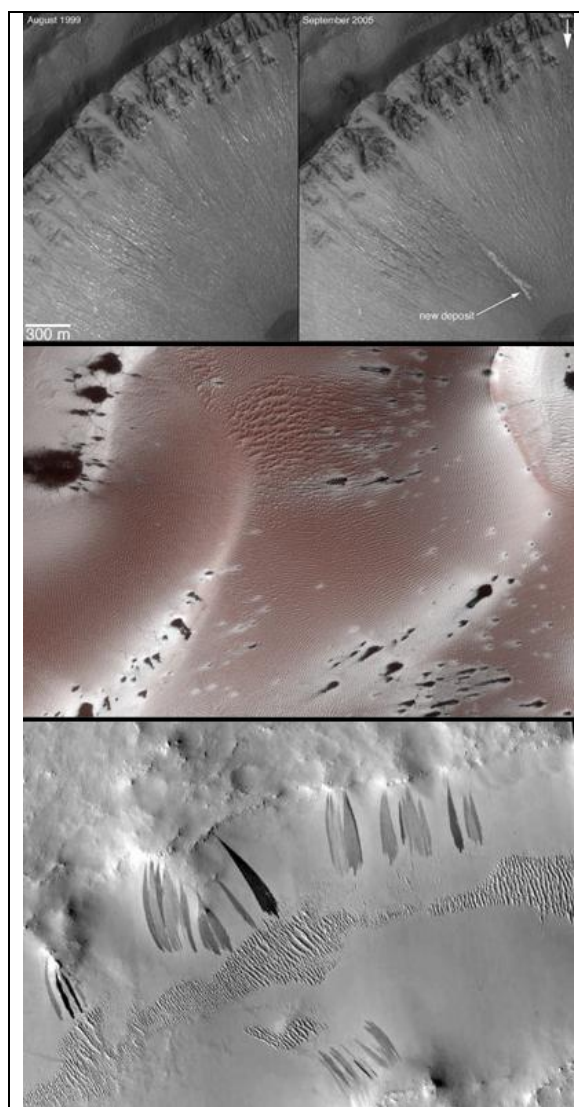
További potenciális recens vízfolyásnyomok lehetnek a lejtősávok, vagy nyakkendők. Szintén lejtős területeken alakulnak ki és jellemzően a forrásuktól elvégződésükig szélesednek. Nem egyértelmű, hogy ezen formák kialakításában a folyékony víz játssza-e a főszerepet, ugyanis a száraz csuszamlások is hasonló

struktúrát mutatnak (PELLETIER ET. AL. 2008)

A sötét dűnefoltok jellemző előfordulási területei a szubpoláris térségek, ahol ezek a formák szintén lejtős területeken alakulnak ki. Alakjuk ívelt, színük sötétebb a környezetüknél, elvégződésüknél felhalmozódás figyelhető meg. Megjelenésükben periodikusság figyelhető meg évszakosan ugyanazon területeken. A marsi tél végén jönnek létre a dűnék gerincén, illetve oldalain.

Közepük a legsötétebb, fokozatosan növekednek, majd a nyár elejére eltűnnek. Jellemző, hogy a lejtő irányába megnyúlnak és akár kifolyások is megindulhatnak belőlük, amelyek anyaga kis tócsaszerű képződményekben gyűlik össze a lejtő alján. Továbbá évek során ugyanazon területekről készített felvételek alapján megállapíthatóvá vált, hogy a foltok 70% ugyanott jön létre, mint az előző években során (PÓCS ET. AL. 2004).

- A folyékony víz felszínalakító munkája nem csak eróziós formákban köszön vissza a bolygón, a fenti vízfolyás-típusok mellett, ahogy az már említésre is került, akkumulációs formákat is láthatunk. Ezek egyrészt a fluviális formákhoz kapcsolódóan jelennek meg, de nem jöttek létre konzekvensen minden torkolatvidéken, vagy már



13. ábra, a legfelső képen egy recens sárfolyás, a középsőn sötét dűnefoltok, az alsón pedig nyakkendők láthatók. (NASA)

valamilyen külső erő lepusztította, illetve betemette őket. Az ellenpélda is megfigyelhető, több vízfolyás, jellemzően az időszakosan, rövid periódusokkal működő formák torkolatánál jól lehatárolható lebenyes hordalékkúpok alakultak ki. A folyóvizek által lerakott üledékek fontos támpontként szolgálnak az üledékképződés körülményeinek vizsgálata során, összetételük elemzésével információt kapunk az egyes rétegek lerakódása során jellemző környezeti viszonyokról.

Folyékony víz hatására lerakódott üledékek nem csak a különböző vízfolyásokhoz kapcsolódóan jöttek létre, hanem állóvízi üledékképződés során is. Nem csak a már említett északi mélyföldeken elterülő óceánra kell ez esetben gondolni, a nagyobb mélyedéseket, krátereket is kitölthette adott esetben a folyékony víz. Ugyan ezen tavak felszíne is fagyott állapotban volt, de alatta a folyékony víz továbbra is erőteljes átalakító munkát végzett, az üledéklerakódás és a mállás folyamatain keresztül. A víz forrására több lehetőség is fennáll: időszakos vízfolyások, jellemzően vulkáni aktivitás által okozott jégolvadás, illetve a felszín alól feltörő vizek tölthették fel a mélyedéseket. Mivel az állóvízi üledékképződések során jóval nagyobb mértékű volt a felhalmozódás, nagyobb időszakot átfogóan tudunk következtetni a paleoklimatológiai viszonyokra és a paleokörnyezetre. Legfontosabb jelentőségük azonban abban áll, hogy az idővel befagyott jégpáncél alatt elviekben ideális körülmények álltak fenn az élet kifejlődéséhez, illetve adott esetben a fennmaradáshoz. Rendelkezésre állt a folyékony víz, a felszíni jég pedig védelmet nyújthatott a mágneses tér hiánya és a ritka légkör miatt a felszínt érő erős sugárzás ellen. Ebből fakadóan ezek az üledékes területek kiváló terepei lehetnek az életnyomok keresésének - éppen ezért egy ilyen, vastag állóvízi üledékkal egykoron teljesen feltöltött kráterben keresi a Curiosity is az esetleges biomarkereket.

A folyékony víz által formált üledékek speciális megjelenési formája, amikor a felszín alól feltörő vizek átjárták a más erők által felhalmozott üledékeket és ennek hatására diagenézis ment végbe bennük. Jól példázzák ezt a folyamatot az Opportunity rover által vizsgált üledékek a Meridiani-síkságon. Az itt látható anyagot egykor a szél halmozta fel egy összetett draa

dűnerendszerbe (LÁTOS 2011), később a felszín alól több alkalommal is feltörő víz átjárta ezeket a rétegeket és cementálta őket. A diagenézis nyomai a magas hematit-tartalmú gömb alakú konkréciók, a kioldódott gipsz kristályok üregei az átkristályosodott kőzetek. A felszínt elérő víz a felső üledékeket pedig rétegtanilag is átformálta.

A fentiek alapján megállapítható, hogy egykor a Mars felszínformálásában legalább olyan összetett szerepet játszott a víz, mint a Föld esetében és ugyan mára ennek jelentősége csökkent, de még mindig formálja a folyékony H₂O a bolygó felszínét.

V. A Gale kráter folyékony víz hatására képződött formáinak elemzése során alkalmazott módszerek

A felszíninformák elemzése három pilléren alapul, amelyek egyike a térinformatika. Ennek alapját a Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) nagyfelbontású kamerájának, a HiRISE-nak a felvételei jelentik, amelyek terepi felbontása eléri a 25 cm/pixelt. Ilyen részletességű képeken már a közepes méretű sziklák is kivehetők, így igen alapos morfológiai elemzést tesznek lehetővé. További fontos elem a szintén a HiRISE által készített sztereo képek alapján a NASA által elkészített digitális domborzatmodellek alkalmazása. A megfelelő térinformatikai szoftverrel a nagyfelbontású űrfelvétel a domborzatmodellre illeszthető és ezzel lehetővé válik a 3D-ban történő megjelenítés és további elemzések elvégzése. Szintén a keringőegységeken elhelyezett spektrométerek segítségével információt szerezhetünk a vizsgálati területet felépítő kőzetek anyagi összetételéről. Ezek az adatok szintén az MRO-tól származnak, a CRSIM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars) ásványtani elemzésre képes optikai, illetve infravörös spektrométerétől. Emellett a Mars Global Surveyor űrszonda MOLA lézeres magasságmérő műszerének adatai alapján leképezett globális domborzatmodellt használtam még az elemzések során, valamint a Mars Odyssey THEMIS spektrométerének adatait az ásványtani összetétel vizsgálatokhoz. Ezek az adatok szintén alapvető fontosságúak, hiszen nem mindegy, hogy milyen kontextusban vizsgálunk egy adott felszíninformát, illetve a terület felszínfejlődését.

A keringőegységek adatai mellett a már említett Curiosity rover révén a felszínről is vannak közvetlen információink (14. ábra). Ezek is több részre oszthatók. A nagyfelbontású felszíni felvételek segítségével olyan mikroformák is elemezhetővé válnak, amelyek kiegészítik a keringőegységek felvételei alapján elvégezhető mezo- és makroformák vizsgálatát. Emellett kiemelten fontos kutatási lehetőség, hogy a térinformatika eszköztárával a felszíni képek és a keringőegységek nagyfelbontású felvételei integráltan elemezhetők olyan módon, hogy a felszíni képeket georeferálva az űrfelvételre illesztjük, így egy sokkal részletesebb képet tudunk elemezni 3D-ban és a felszíni felvételek is teljesebb kontextusban válnak értelmezhetővé. A rover továbbá

olyan tudományos berendezésekkel is rendelkezik, amelyek kiegészíthetik a térinformatikai elemzést, ezek közül a fontosabbak a következők:

- MastCam: az árbocon elhelyezett, két egységből álló főkamera, amelyből az egyik nagylátószögű, 1200x1200 pixel méretű színes képek készítésére szolgál.
- ChemCam: az árboc tetején található berendezés lézernyalábbal párologtat el anyagot a kőzetből, amelynek elpárolgott anyagát a spektrométere analizálja, ezzel nyerve információt annak összetételéről.
- MAHLI: a robotkaron elhelyezett mikroszkóp-képrögzítő, amely 14 mikrométer/pixel felbontású színes képek készítésére alkalmas.
- APXS: a robotkaron helyet kapó alfa-részecske/röntgenspektrométer szintén anyagösszetétel vizsgálatokra alkalmas.
- SAM: két anyagminta-elemző berendezés, amelyekbe a robotkaron lévő lapáttal, vagy a kőzetfúróval tud mintát helyezni a rover, feladatuk a biokémiai folyamatok nyomainak kimutatása.
- DAN: a felszín alatti vízjég készleteket felmérő műszer, amely fél méterrel lát a felszín alá. Neutronokkal bombázza a felszínt és a visszaverődés mértékéből nyeri az információt.



14. ábra, a Curiosity önarcképe a Marson.(NASA)

Fentebb a teljesség igénye nélkül soroltam fel a roveren található tudományos berendezések arzenálját. Azokat a műszereket emeltem ki, amelyek fontos kiegészítő információval szolgálhatnak a térinformatikai elemzések mellett és finomíthatnak az elméleteken. Ugyanis nem a rover és munkásságának műszaki/tudományos bemutatása a dolgozat célja, hanem a folyékony vízzel kapcsolatba hozható felszíni formák

térinformatikai elemzése. Ugyanakkor kétségtelen, hogy a felsorolt műszerek olyan eredményekkel szolgálhatnak, amelyeket figyelembe kell venni az ilyen jellegű elméletek felállítása során.

Az elemzés harmadik, de korántsem elhanyagolható pillére az összehasonlító planetológia elvének alkalmazása a kutatás során. Az összehasonlító planetológia alapelve a következőképpen foglалható össze: „Egy idegen égitest felszínén elvégezhetetlen mérések helyettesíthetők a vizsgált jelenség körültekintően kiválasztott földi analógiájának tanulmányozásával, majd a Földön felismert összefüggések alkalmazhatók a másik égitesten is, természetesen a két környezet különbségeinek figyelembevételével.” Tehát a földi folyamatok megfigyelése során szerzett tapasztalatokat így más égitestek kutatása során kamatoztathatjuk.

Napjaink planetológiai kutatásában kiemelt szerepet játszanak az ilyen típusú vizsgálatok, mivel a Hold kivételével nincsenek terepi méréseink az egyes égitestek felszínéről, kőzetminta pedig a Mars esetében például egyelőre csak a vörös bolygóból kiszakadt és meteorit formájában a Földre hullott állapotban áll rendelkezésünkre. Fontos azonban, hogy csak akkor végezzünk ilyen irányú kutatásokat, ha a földi analógia valóban összevethető a másik vizsgált helyszín formáival, illetve az azokat kialakító tényezőkkel. A Mars esetén a rendkívül sok hasonlóság miatt nagy biztonsággal végezhetünk ilyen összehasonlításokat, különösen akkor, ha a víz nyomai után kutatunk, hiszen jelenleg ez az a két bolygó a Naprendszerben, amelyek felszínét bizonyítottan formálta a folyékony halmazállapotú H_2O . Figyelembe kell vennünk azonban azt is, hogy valószínűleg a Mars esetén nem tiszta vízzel van dolgunk, hanem inkább sóoldatok töltötték ki az egykori medreket, amelyek fagyáspontja alacsonyabb. Nem hagyhatjuk figyelmen kívül természetesen a különbségeket sem, amelyeket mindig szem előtt kell tartanunk a párhuzamba állítás során, gondolok itt az eltérő klíma, gravitációs, vagy nyomásviszonyokra például.

Kiváló példa erre, ha megnézzük, hogyan alkalmazható a Marson két, a földi rétegek elemzésénél alkalmazott alapelmélet. Steno települési törvénye minden további nélkül alkalmazható mindenféle módosítás nélkül is, hiszen nem mond ki semmit a rétegek kialakulásának körülményeiről, csupán a helyzetüket vizsgálja. A Lyell-féle

aktualizmus elvével viszont már gondban vagyunk a Mars esetén, ugyanis még durva túlzással sem állítható, hogy a jelenlegi üledékképződési feltételek megegyeznének a marstörténeti múlt során fennállókkal. A bolygón látható rétegsorok döntő többsége a maitól eltérő klíma- és nyomásviszonyok között alakult ki, akár olyan erők befolyásoló hatására is, amelyek napjainkban inaktívak – ilyen például a vulkanizmus, vagy a folyékony víz szerepe. Látható tehát, hogy nem ültethető át minden elmélet, vagy vizsgálati módszer a másik égitest kutatásába.

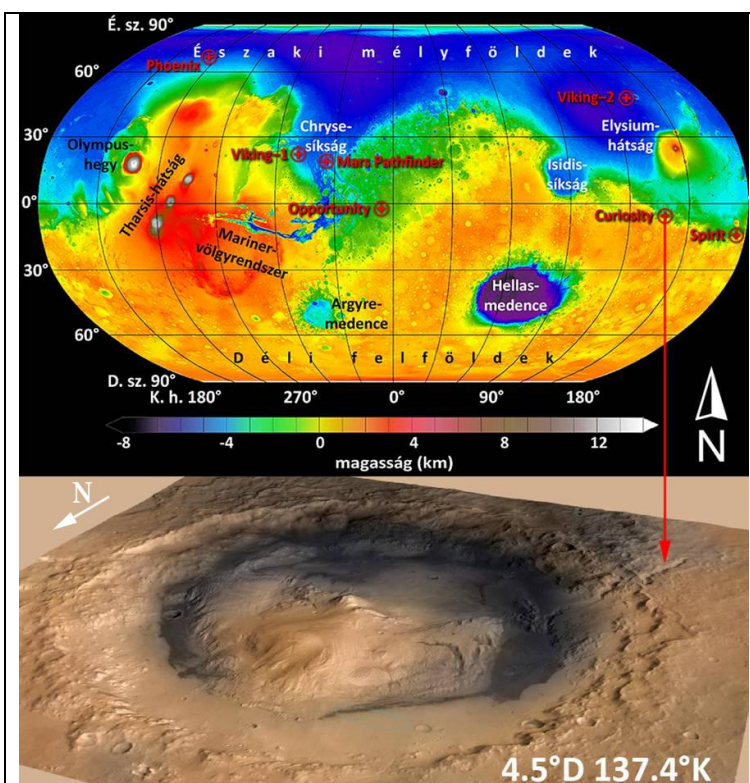
Jelen helyzetben olyan formán kívánom alkalmazni ezt az elemzési lehetőséget, hogy igyekszem olyan földi vízfolyások morfológiájával és egykori állóvizek üledékképződési körülményeivel párhuzamba állítani a Gale kráterben látható formákat, amelyek nagy valószínűséggel hasonló környezeti feltételek mellett formálódtak, mint a marsi felszínformák. Ezek az összehasonlítások korántsem szolgálják majd a végkövetkeztetések megalapozását, viszont olyan információkkal egészíthetik ki az elemzéseket, amelyekre a felvételek alapján nem adódna lehetőség.

Fontosnak tartom tehát ismételten kiemelni, hogy a marsi felszínformák elemzése során véleményem szerint minél inkább arra kell törekedni, hogy a lehető legtöbb rendelkezésünkre álló elemzési formát és adatot egymással integrálva, egy komplex rendszer részeként együtt használjuk, mert így kapható a legteljesebb kép az adott terület felszínfejlődéséről. Jelen esetben szerencsénk van, hiszen két keringőegység megfigyelései (MRO, Mars Express) és a földi analógiák lehetősége mellett még felszíni felvételek és közvetlen terepi vizsgálatok is rendelkezésünkre állnak a rovernek köszönhetően. A helyzet speciális voltát nem kell külön kiemelni, hiszen a felszín nagyon kis részéről áll rendelkezésünkre ilyen lehetőség, hogy ezt a három elemzési opciót ki tudjuk használni, hiszen a Curiosity mindössze a hetedik olyan leszállóegység, amely sikeresen elérte a bolygó felszínét (Viking1-2, Pathfinder, Spirit, Opportunity, Phoenix, Curiosity) és ezáltal pontszerű felszíni adatokat szolgáltat. Mielőtt konkrét formák elemzésébe kezdenék, összefoglalnám mit tudunk jelenleg a Gale kráter kialakulásáról és milyen nagyléptékű felszínfejlődés vezethető le az itt látható formákból, illetve ásványtani felépítésből.

VI. A Gale kráter nagyléptékű elemzése, őskörnyezet- rekonstrukciója

VI.1. A kráter területének általános jellemzése

Mielőtt konkrét fluviatilis, valamint alluviális felszínformák elemzésébe kezdenék úgy vélem szükséges, hogy egy áttekintő képet adjak a kráter és környezetének alapvető felépítéséről, illetve fejlődéstörténetéről. A XIX-XX. század fordulóján élt és dolgozott ausztrál csillagászról, Walter Frederik Gale-ről elnevezett kráter a marsi Egyenlítő közelében, a déli féltekén fekszik, középpontjának koordinátái: 5.4° D; $137,8^{\circ}$ K. Fekvése azért különösképp érdekes, mivel a már korábban említett északi mélyföldek és a déli felföldek határterületén helyezkedik el (15. ábra). Átmérője mintegy 154 km, ez a Marson koránt sem számít nagyméretű becsapódásos formának, nagyságrendileg úgy kell elképzelni, hogy Macedónia nagy részét lefedné ez a kráter. Elhelyezkedése már

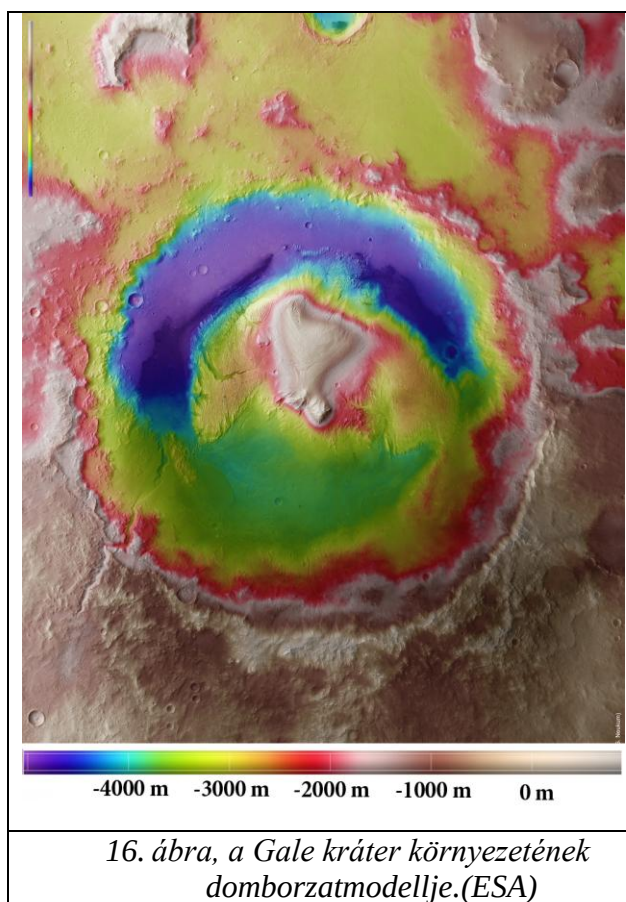


15. ábra, a Gale kráter elhelyezkedése a Marson, illetve egy Mars Express magasságadatok, MRO felvételek és Viking színekép adatok kombinálásával létrehozott felvétel a kráter területéről.(Sik - NASA)

azt is felfedi, miért lehet érdekes a kráter területe, ahogy már korábban említettem gyakorlatilag itt húzódott az egykori északi óceán partvidéke. A kráter peremén és tágabb környezetében is számos egykori vízfolyás medre látható, amelyek a felföldekről a mélyföldek felé tartottak. Ezek morfológiailag és kronológiailag jellemzően a Noachi

időszakban kialakult hálózatos csatornák közé sorolhatók. Már magában az a tény, hogy a kráter peremén vízfolyások nyomai láthatók elegendő lenne, hogy felkeltsék a kutatók érdeklődését, de az igazán nagy jelentőséggel bíró felszínforma a kráter közepén látható hegycsoport, amelynek hivatalos elnevezése Aeolis-hegy, de a NASA-nál Mount Sharp-nak nevezik. Nem szokatlan a Marson és más égitesteken sem, amelyek sűrűn kráterezettek, hogy a nagyobb méretű becsapódásos formák közepén központi csúcs található, amely a becsapódás során, annak középpontjában a megolvadt és visszalökődött anyag hatására jön létre. A Gale kráter esetén is kialakult ilyen központi csúcs, ugyanis a Marson 6 km-s kráterátmérő felett figyelhető meg ez a jelenség.

A Mount Sharp magassága, kiterjedése, formája, morfológiája és nem utolsó sorban ásványi összetétele is azt mutatja, hogy nem szimplán egy központi csúcsos kráter megszokott formakincse tárul itt elénk (16. ábra). Magassága a kráter aljzatától számolva, amely a kijelölt tengerszint alatt helyezkedik már el, mintegy 5,5 km. Összehasonlításképpen ez közel olyan magasságnak felel meg, mint a földrajzi Európa legmagasabb csúcsa, az Elbrusz-hegység. Ennek az adatnak igazi érdekességét az adja, hogy ilyen formán a Mount Sharp szinte magasabbra nyúlik, mint a Gale kráter peremének legmagasabb pontja. Ez



már magában kérdések sorát veti fel, hiszen a kráterek keletkezése során létrejövő központi csúcsok jellemzően nem magasabbak a kráterperemnél ilyen gravitációs viszonyok között. Logikus válasz lehetne a jelenségre, hogy a kráterperem pusztult le olyan mértékben, hogy a központi csúcs már szinte magasabbra nyúlik annak szintjénél. Az északi perem területén jelentős lepusztulás figyelhető meg a déli felföldek

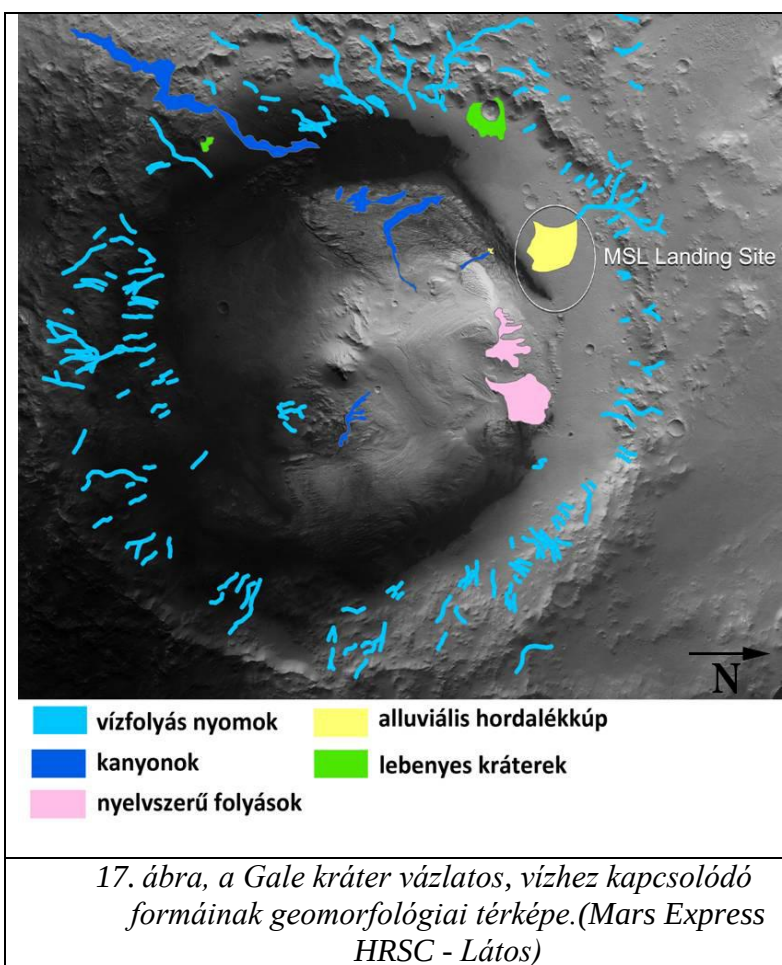
és az északi mélyföldek közötti átmenettől kezdődően, a déli perem is degradálódott valamilyen mértékben, de jóval kevésbé. A nyugati peremnél szintén az figyelhető meg, hogy jóval alacsonyabb, mint a déli perem, ez azzal magyarázható, hogy az itteni peremrész a felföldek és a mélyföldek közötti átmeneti területre esik már. A lepusztulás eltérő mértéket az is erőteljesen szemlélteti, hogy míg a déli perem átlagosan 3-4 km-el magasodik az itteni aljzat fölé, addig ez az érték az északi perem esetén csupán átlagosan 2 km, ráadásul ehhez az is hozzájárul, hogy az északi aljzat a legalacsonyabban fekvő része a kráternek, jelentős különbség realizálódik a déli aljzat átlagmagasságához képest. Tehát nem csak a kráterperemek erózióját kell figyelembe venni ebben az esetben, hanem azt a tényt is, hogy a kráter területén eltérő mértékben halmozódott fel, majd pusztult le az üledék (R.B. ANDERSON - J.F.BELL III. 2010).

A központi csúcsos kráterek karakterisztikáját, átmérő és hozzá tartozó központi csúcsmagasság arányát vizsgálva az is egyértelművé válik, hogy ilyen méretű kráterhez egyébként sem tartozhatna ekkora magasságú csúcs. A digitális domborzatmodelleket és műholdfelvételeket szemlélve látható, hogy az eredeti központi csúcs, ami a becsapódás során alakult ki jól elkülöníthetően látszik a Mount Sharp blokkjától délre. A fenti okfejtés alapján kijelenthető, hogy valamilyen belső vagy külső erő szerepet játszott ennek a blokknak a kiemelkedésében és ha megvizsgáljuk a hegység morfológiáját az is egyértelművé válik, hogy nem a belső erők által kiemelt vonulattal van dolgunk, ugyanis üledékes rétegek sora építi fel a Mount Sharp teljes látható részét. Kijelenthető tehát, hogy egyfajta geomorfológiai inverzió történt a területen, ugyan nem a legmélyebb pontból lett a legmagasabb a lejátszódó folyamatok során, de így is a kráterbelső legmagasabb pontja magasabban helyezkedik el a kráterperemnél, amelynek a legmagasabb helyzetben kéne lennie egy kráter morfológiáját tekintve.

VI.2. A Gale kráter morfológiai jellemzése

Kiterjedése és alakja is megkülönbözteti a Mount Sharp-t egy átlagos központi csúcstól, kezdve azzal, hogy a kráter északi felének közepét tölti ki teljesen szabálytalan és aszimmetrikus formában. Ez a forma szintén az üledék lerakódásának és az ezen időszakokat követő eróziós folyamatoknak köszönhető, amelyek nem egyenletesen mentek végbe a kráter területén. Illetve szerepet játszott ebben a különböző üledékek eltérő ellenálló képessége a degradációval szemben, ennek következményeként például rengeteg helyen figyelhetők meg kipreparált rétegfejek az üledéksorokban.

A kráter ma is látható formakincsét



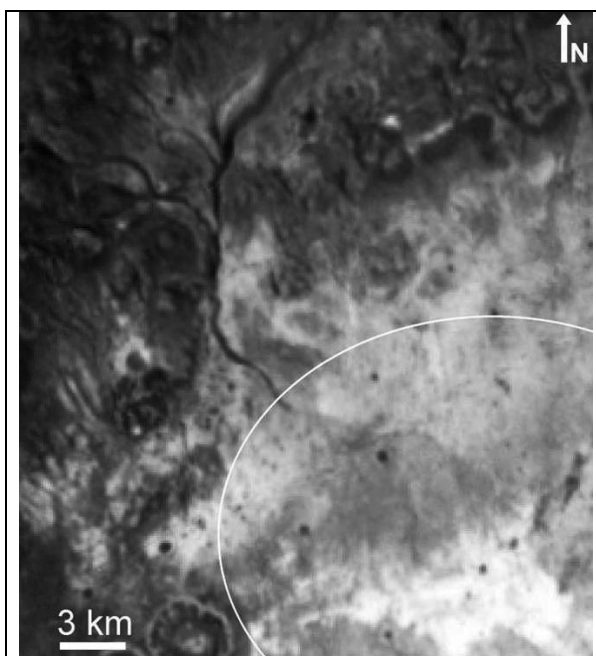
összetett külső erők által vezérelt folyamatok hozták létre. Megtalálhatjuk a fluviatilis, az eolikus erózió különböző jellemző formáit, emellett pedig az alluviális folyamatok és a lejtős tömegmozgások is szerepet játszottak a morfológiai kialakításában (17. ábra). Fontos, hogy a különböző erők által formált tájrészletek alapján egyfajta kronológia is felállítható, amikor azok éppen uralkodóan hatottak a felszínformálásra. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy egyszerre mindig csak egy külső erő volt uralkodó, de mindenképpen kiemelhetők olyan időszakok, amikor egy-egy tényező hangsúlyosabb

volt a többinél. Rengeteg forma jelenik meg a kráter és az üledékes hegy területén, ezek közül emelnék ki néhány jellemzőt.

A legszembeütőbb formák a területen a rendkívül nagy számban megfigyelhető változatos morfológiájú egykori vízfolyások völgyei. Ezeket is két részre érdemes osztani, vannak a kráterperemen megjelenő és a Mount Sharp rétegeibe bevágódó völgyek. A peremen több tucat különböző karakterisztikájú folyóvölgy fut az aljzat felé (LE DEIT ET. AL 2011). Van köztük a hálózatos csatornák morfológiájára emlékeztető meder, amelyek esetén több mellékágból áll össze a főág (18. ábra).

Ezzel szemben a délnyugati peremnél egy nagyságrenddel nagyobb, majdnem állandó szélességű, kevésbé kanyargó, erősen bevágódó völgy is megfigyelhető. Létezik olyan elmélet, amely szerint ez a nagyméretű völgy egy regionális vízgyűjtő rendszer része volt és a Herschel kráter közelében keresendő a forrásvidéke, amely a Gale krátertől dél-keletre található (IRWIN ET AL. 2005).

Továbbá az a tény, hogy a völgy egyes részeit a kráter keletkezésekor kidobott anyag befedte arra enged következtetni, hogy ez a folyóvölgy, már a kráter kialakulása előtt is aktív volt.



18. ábra, a kráter északi falán belépő fonatos forrású folyómeder és alluviális legyezője (MRO-CRISM-NASA)

Eloszlásukban érdekes

törvényszerűség figyelhető meg: a déli és a keleti, tehát a legmagasabb peremrészeknél egyetlen völgy forrásterülete sem követhető a kráter vonalán túlra. Ebből az a következtetés vonható le, hogy mindegyik itt látható vízfolyás a kráterperem belső falán jött létre és nem egy nagyobb vízgyűjtő rendszer tagjai. Keletkezésükre véleményem szerint több magyarázat is elképzelhető, kialakulhattak jég, vagy hófoltok olvadásával, vagy a felszín alól feltörő vizek okán. Ezeknek a kis vízfolyásoknak láthatóan sűrű hálózata alakult ki a kráter belső falán, ezért inkább utóbbit látom valószínűbbnek,

elképzелhető, hogy felföldek felől a mélyföld felé tartó kisebb vízfolyásoknak nem volt elég energiája ahhoz, hogy átvágják magukat az itt magasodó magas kráterperemen, így a felszín alá szivárgó vizek a perem belső falán érték el ismét a felszínt, de az is lehetséges, hogy eleve a felszín alatt migrált erre a víz a peremi hegység alatt. Ezzel szemben az északi és a nyugati alacsonyabb peremrészek nem jelentettek ilyen akadályt és itt a kráterfalon túlra is követhetők a vízfolyások.

Torkolatukat tekintve is eltérő típusokat lehet elkülöníteni, ebben az esetben már területi elhelyezkedésük is fontos paraméter lehet. Szembetűnő, hogy a déli és nyugati peremen az aljzatba érkező vízfolyások sötét anyagú dűnemezőkben végződnek, különösen nagy ez a dűnemező az imént említett nagyméretű, erősen bevágódó folyóvölgy végződésénél. Ennek az lehet az oka, hogy a folyók által ideszállított és lerakott nagy mennyiségű üledéket rendezte a szél később dűnékbe. Az északi peremrészekén át érkező folyók elvégződésénél viszont ezek a sötét dűnék szinte teljes mértékben hiányoznak és egy feltöltött, gyakorlatilag teljesen sík területet látunk. Néhol alluviális legyezők fedezhetők fel a folyók torkolatánál, egy ilyen képződményre szállt le a Curiosity is. Mindezek alapján az a következtetés vonható le, hogy ezek az északi folyómedrek fiatalabbak lehetnek a többinél, vagy tovább aktívak maradtak, mint a perem többi részén és itt még a szél nem tudta olyan mértékben megmozgatni az anyagot ahogy az imént említett déli völgyek esetén.

A folyómedrek több időszakban lehettek aktívak. Feltételezhető, hogy nem folyamatosan, hanem periodikusan is működhettek. Az ezeken a völgyeken a kráterbe érkező víz szerepet játszhatott a kráter feltöltődésében. A legutolsó működésük azonban biztos, hogy a Mount Sharp kialakulása után ment végbe, mivel, ha a kráter egykor teljesen kitöltötték a különböző üledékek azoknak előbb le kellett pusztulniuk a ma látható formára, hogy a folyóvölgyek bevágódhassanak a jelenlegi aljzatba, ahogy most is látjuk. Erre jó példa az a folyóvölgy, ami a Curiosity leszállóhelyét kialakító alluviális legyezőt kialakította (18. ábra). Magyar szakemberek kutatásai alapján a meder és az üledék karakterisztikáját és utóbbi mennyiségét megbecsülve elmondható, hogy a legyező akár pár hét alatt is kialakulhatott optimális éghajlati viszonyok mellett, viszont akár több száz év alatt is felépülhetett, ha csak a meleg évszakban a nap legmelegebb időszakában folyt víz a mederben (KERESZTURI 2012). A Curiosity egyik első, úttörőnek

tekinthető felvételén az egyik kráterperemen meanderező folyóvölgy látható, amely az első ilyen felvétel a Mars-kutatás történetében (19. ábra).

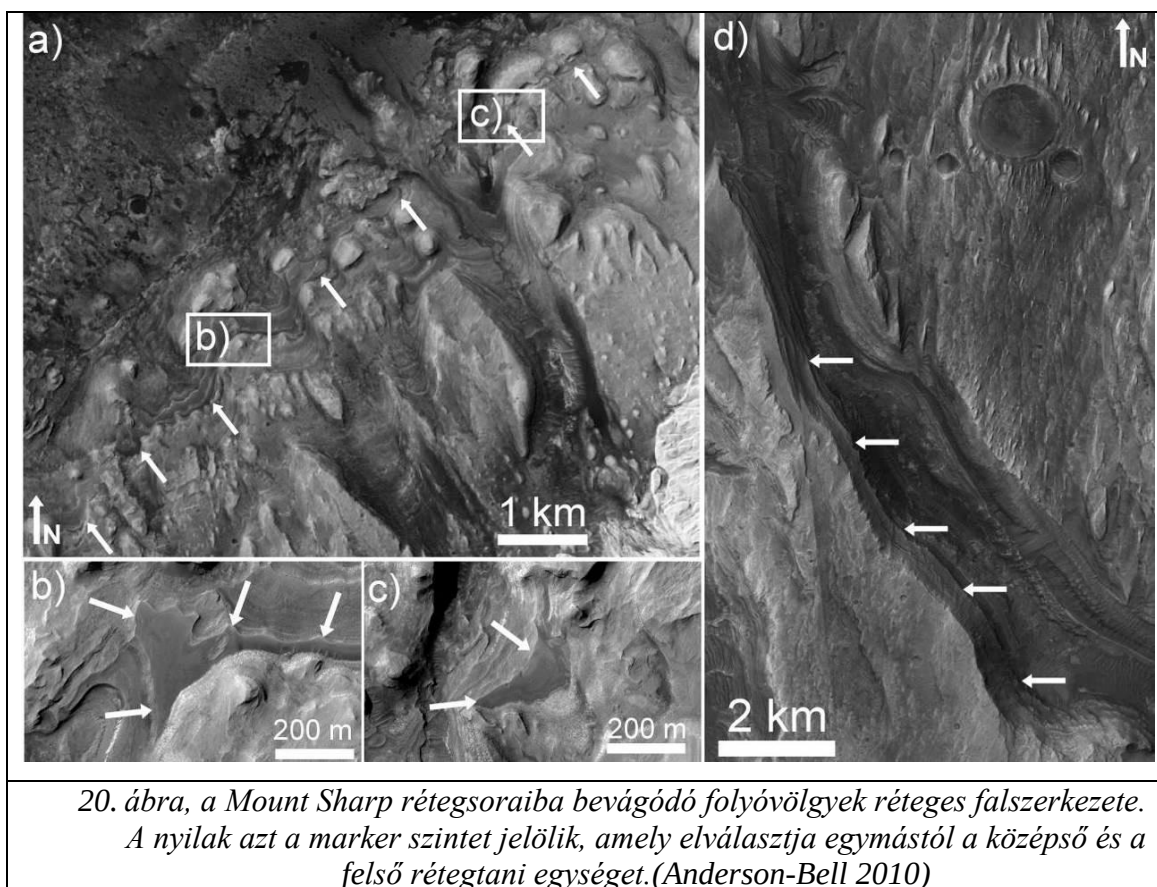


19. ábra, a Curiosity felvétele a kráterfalon meanderező folyóvölgyről. (NASA)

Több egykori mederhez kanyargó gerincek kapcsolódnak, ez főleg az északi aljzaton jellemző. Kialakulásuk feltöltődésükhöz kapcsolódik, a medrekben lefolyó üledékek cementálódtak és így ellenállóbbak lettek a környezetüknél, így a szélrózsió kihantolta őket.

A folyómedrek másik típusát a Mount Sharp üledékes rétegeibe keresztirányban bevágódó kanyonok jelentik. Ezek jellemzően jóval rövidebbek, mint a peremen futó medrek és jelentősen szélesebbek, illetve mélyebbek (17. ábra). A legtöbb teljes szélességében indul, sőt van olyan is köztük, amelynek forrásterülete szélesebb, mint a meder alsóbb szakaszai. Ezek a völgyek az üledékes rétegek lerakódása után keletkeztek, hiszen ezekbe vágódnak be. Ebből következik, hogy képződésük már arra az időszakra jellemző, amikor nem a meleg, tiszta víz számára kedvező éghajlat uralkodott a bolygón, hanem a sóoldatok felszínformálása volt az uralkodó. Karakterisztikájuk arra enged következtetni, hogy a vízfolyások forrása olvadásos

eseményhez köthető, mikor is valamilyen hatásra nagymennyiségű felszín alatti, vagy felszíni jég olvadhatott meg a forrásterületen és így rövid idő alatt hatalmas vízmennyiség folyt le ezeken a medrekben. Működésük szintén periodikus lehetett. A legnagyobb ilyen képződmény a földi Grand-kanyonra emlékeztető módon oldalfalain feltárja a rétegek sorozatát, amelyekbe bevágódott, ami lehetőséget ad az alaposabb elemzésükre (20. ábra).



A Mount Sharp szinte egész területén láthatóak a hol vékony, hol pados megjelenésű üledékes rétegek sorozatai. Ezek karakterisztikájában is eltérés mutatkozik a vastagságuk váltakozása mellett. Sok helyen kipreparálódott rétegeket látunk, amelyek a szélrózió hatására jöttek létre. Ez a folyamat a Földön is megszokott jelenség, keményebb anyagú, vagy erősebben cementált réteglapok, illetve rétegfejek jobban ellenállnak az erózióknak, mint a puhábbak és a rétegsorból kiugró formákként maradnak vissza. Ezek a kipreparálódott rétegek a Curiosity első felvételein is jól láthatók a Mount Sharp alsóbb rétegsoriban (21. ábra). A rétegek egymásra településében eróziós

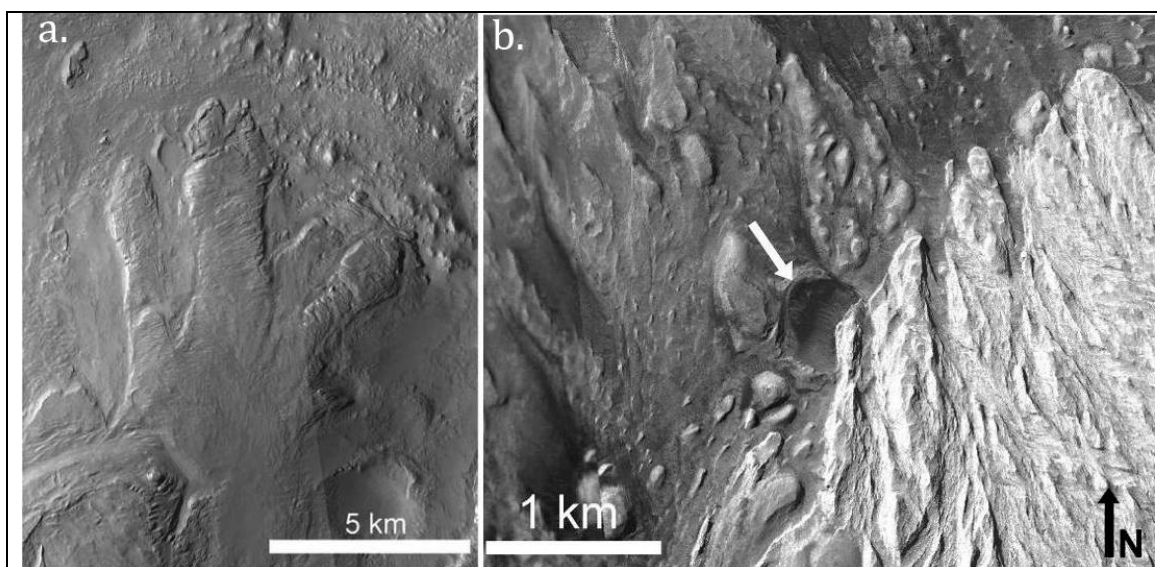
diszkordancia figyelhető meg a teljes rétegsor területén. Ebből arra lehet következtetni, hogy az üledékképződés több periódusban zajlott, amit degradációs folyamatok váltottak fel, jellemzően eolikus erózió formájában.



*21. ábra, a Curiosity felvétele a Mount Sharp kipreparált alsó rétegsorairól.
(NASA)*

A szélerózió nem csak a rétegek kihantolásába érhető tetten, hanem a földi jardangokhoz hasonló formák kialakításában is. Ezeket is két részre lehet osztani színük és ezáltal koruk alapján (22-23. ábra). Mindkét típusra ugyanúgy jellemző azonban, hogy az eolikus erózió alakította ki a maradékgerinceket, szintén az iménti kipreparálódás elvének alapján, az ellenállóbb egységek maradtak fenn. A sötétebb, finomabb szerkezetű jardangok a felsőbb rétegekre jellemzőek, míg a világos, fiatalabb, még durvább szerkezetűek csak lokálisan jelennek meg kisebb területeken.

Az üledékes hegy északi részéről több nyelvyszerű képződmény indul lefelé az aljzat felé. Eredetük egyelőre nem tisztázott, karakterisztikájuk némi hasonlóságot mutat a Marson több helyen is előforduló sziklagleccserekével. Csuszamlás is

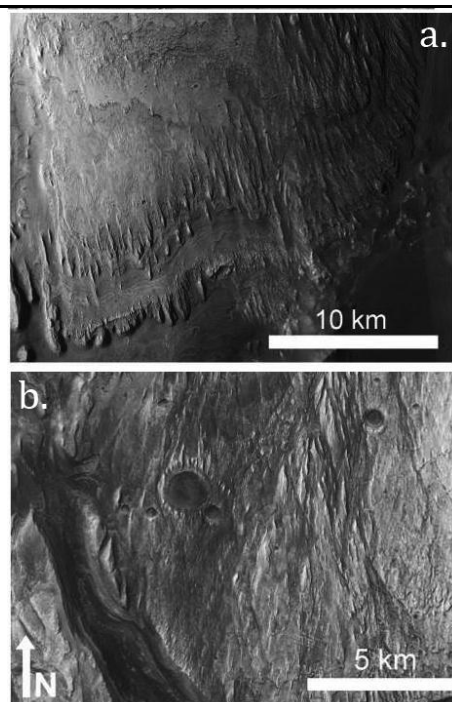


22. ábra, az a. jelű képen nyelvyszerű folyásnyomok a hegy oldalában; a b. jelű képen a fiatalabb jardangszerű képződmény látható egy félig kihantolt kráterrel.

(NASA)

kialakíthatta őket, bár a legnagyobb ilyen képződmény struktúráját vizsgálva ez valószínűtlennek tűnik, mert egy pontból indulva egyre terebélyesedik a nyelv, ami nem illeszkedik egy csuszamlás karakterisztikájához. Valamilyen folyáshoz kapcsolódó folyamat hozhatta létre őket (R.B. ANDERSON - J.F.BELL III. 2010).

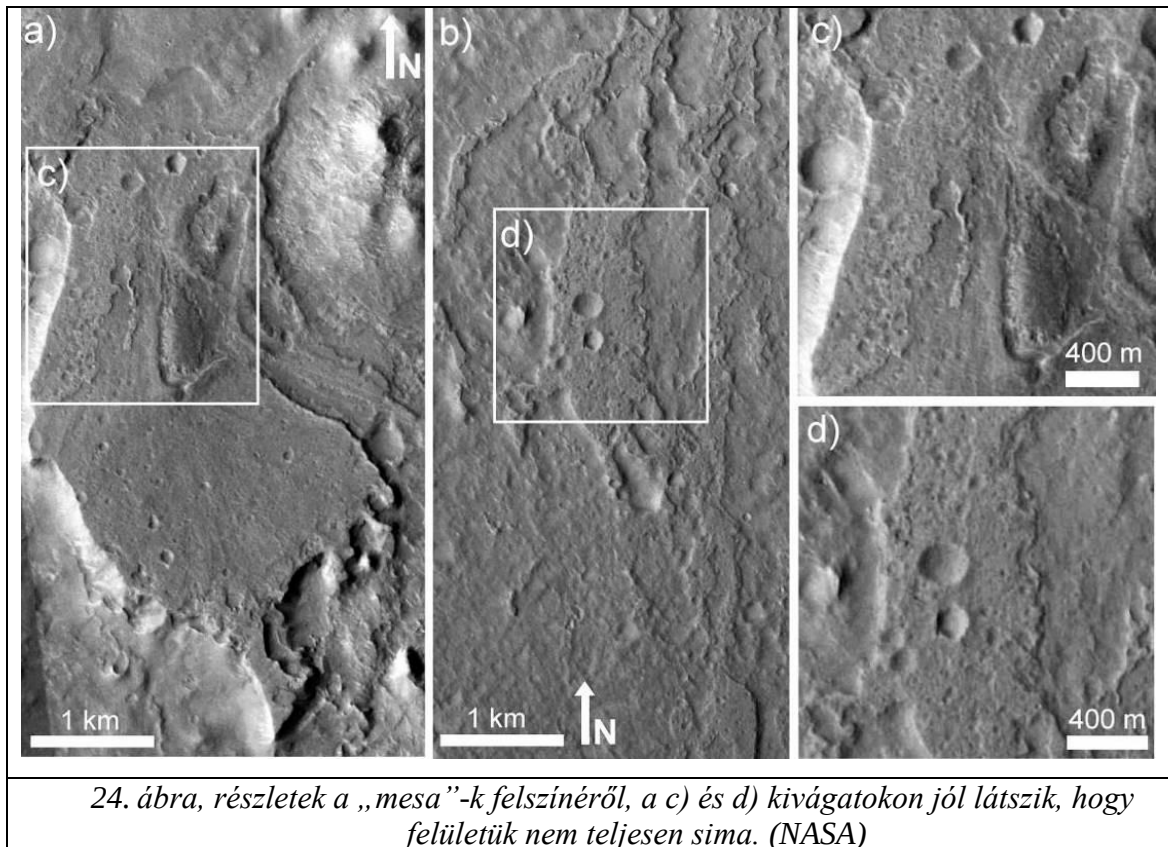
A Gale kráterben látható megannyi forma közül még egy típust emelnék ki, amit hegylábi egységként lehetne lefordítani. Szinte az egész üledékes hegy körül megtalálható ez a felszínforma-típus, sőt az északi aljzat esetében egyfajta láncot alkotva a peremig is követhető. Ezeken a területeken jellegzetes táblaszerű képződményeket látunk, az angol



23. ábra, idősebb jardangszerű képződmények.(NASA)

szakirodalomban *mesa*-ként emlegetik, tehát egy sík, platószerű formát kell elképzelni (24.ábra). Nagyfelbontású felvételeken azonban kirajzolódik a finomabb textúra és kiderül, hogy nem is olyan sima a felszínük, mint azt várnánk a kisebb felbontású képek

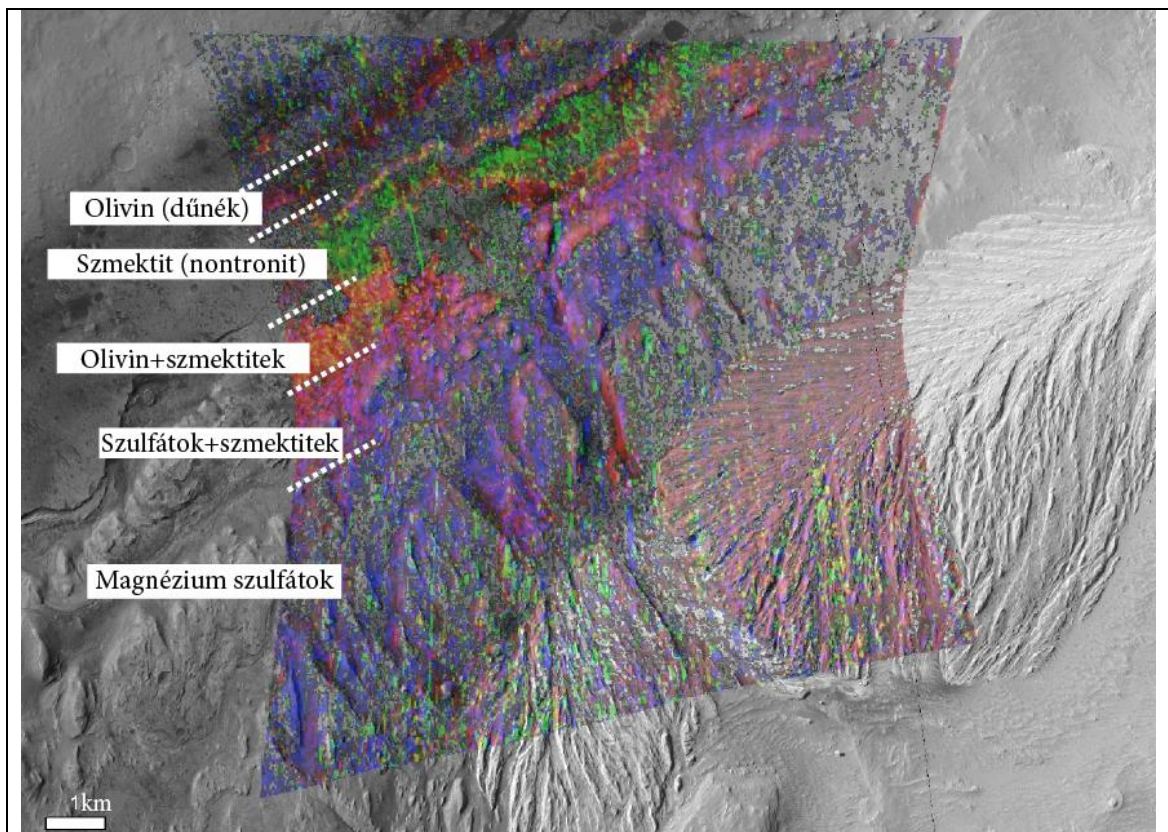
alapján. Számtalan kis gödör tarkítja a felszínüket, illetve egymást keresztező, vagy éppen olykor párhuzamos kis gerincek. Eredetük egyelőre kérdéses, az biztos, hogy viszonylag kemény anyagból állnak és jobban ellenállnak az erózióknak, mint a környező formák. Lehet, hogy víz hatására alakultak ki, de egykori megkövesedett dűnemezők is lehetnek (ANDERSON-BELL 2010).



24. ábra, részletek a „mesa”-k felszínéről, a c) és d) kivágatokon jól látszik, hogy felületük nem teljesen sima. (NASA)

VI.3. A Mount Sharp üledékes rétegeinek ásványtani és sztratigráfiai jellemzése

A Mount Sharpot felépítő üledéktömeg térfogata mintegy $2,5 \times 10^3 \text{ km}^3$ (N.A. CABROL – E.A. GRIN 1999). Ahhoz hogy megértsük milyen külső erők játszottak szerepet a felépülésében elemezni kell az ásványi összetételt és a geomorfológiai jegyeket. Az üledékes rétegek ásványtani összetételét már előzetesen elemezték a keringőegységek segítségével. Ebben nagy szerepe volt a 2001 Mars Odyssey THEMIS és az MRO CRISM nevű spektrométereknek, a műszerek adatai alapján főbb ásványcsoportokat lehet elkülöníteni, amelyek viszonylag éles vonalakkal határolhatók le a különféle rétegeket vizsgálva, de természetesen átmenetek is megfigyelhetők egyes ásványcsoportok megjelenésében (25. ábra).

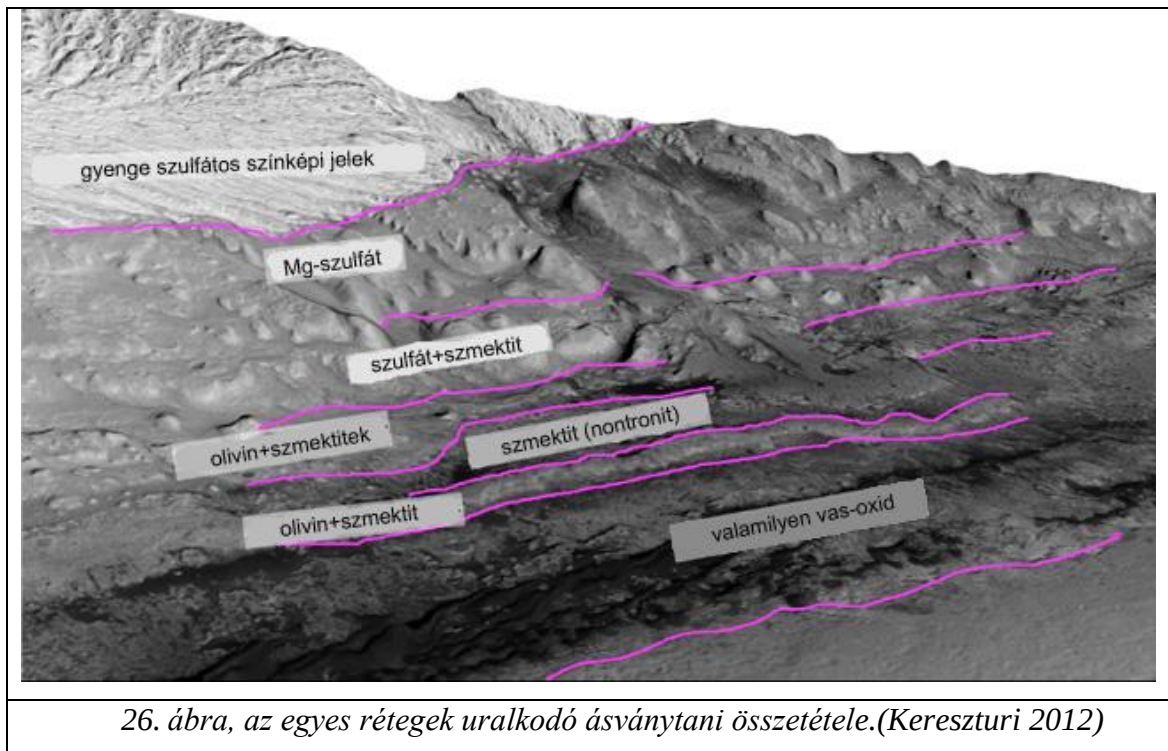


25. ábra, a Mount Sharp egyik lejtőjének ásványtani összetétele CRISM és THEMIS adatok alapján. (NASA)

A vas-oxidok megjelenése nem jelent meglepetést a Mars esetében, hiszen a bolygón gyakorlatilag mindenhol előfordulnak, ez okozza a felszíni törmeléktakaró jellegzetes vörös színét is. Olivin is több rétegsorban megfigyelhető, illetve a recens

dűnék anyagát is ez építi fel nagyrészt. Eredetét tekintve az olivin magmatizmushoz köthető kifejlődésű vas-magnézium szilikát, amely még nem esett át málláson. Ez az ásványi összetevő nem a kráter területén keletkezett, ugyanis nem zajlottak helyben vulkanikus folyamatok.

A megfigyelt ásványok közül nagy mennyiségben fordulnak elő és jellemzően az alsóbb rétegsorokban a kiemelt jelentőséggel bíró különféle szmektitess, vagyis duzzadó agyagásványok (26. ábra). Ide tartozik a nontronit, saponit, montmorillonit, ezek közül is kiemelten a nontronit jelenik meg tömegesen a spektrométeres méréseken (MILLIKEN 2011). Az agyagásványok ilyen mértékű előfordulása nagy jelentőséggel bír az őskörnyezetrekonstrukció szempontjából.



Az agyagok szemcsemérete 0,002 milliméternél kisebb és folyékony H₂O hatására képződnek. Ahhoz hogy ez a szemcseméret jöjjön létre az anyagnak hosszú ideig kell szuszpenzióban lennie. Ehhez olyan képződési körülmények szükségesek, ahol alacsony energiaszintű folyamatok mennek végbe, tehát egy nyugodt üledékképződési környezet elengedhetetlen hozzá. Ezek jellemzően a mélytengeri medencék, tavak, mocsarak, deltaüledékek disztális részei. A Mount Sharp alsó rétegsoraiban tömegesen megfigyelhető nontronit ásványok a Földön jellemzően a

Közép-Atlanti-hátság, a Galapagos-hátság és a Csád-tó területén keletkeznek nagy mennyiségben (PEDRO ET. AL 1978). Ezen ásványok ilyen mértékű megjelenése arra enged következtetni, hogy a kráter területét egykor meleg és édes vizű tó tölthette ki, esetleg egy nagyobb folyó deltája lehetett a területén.

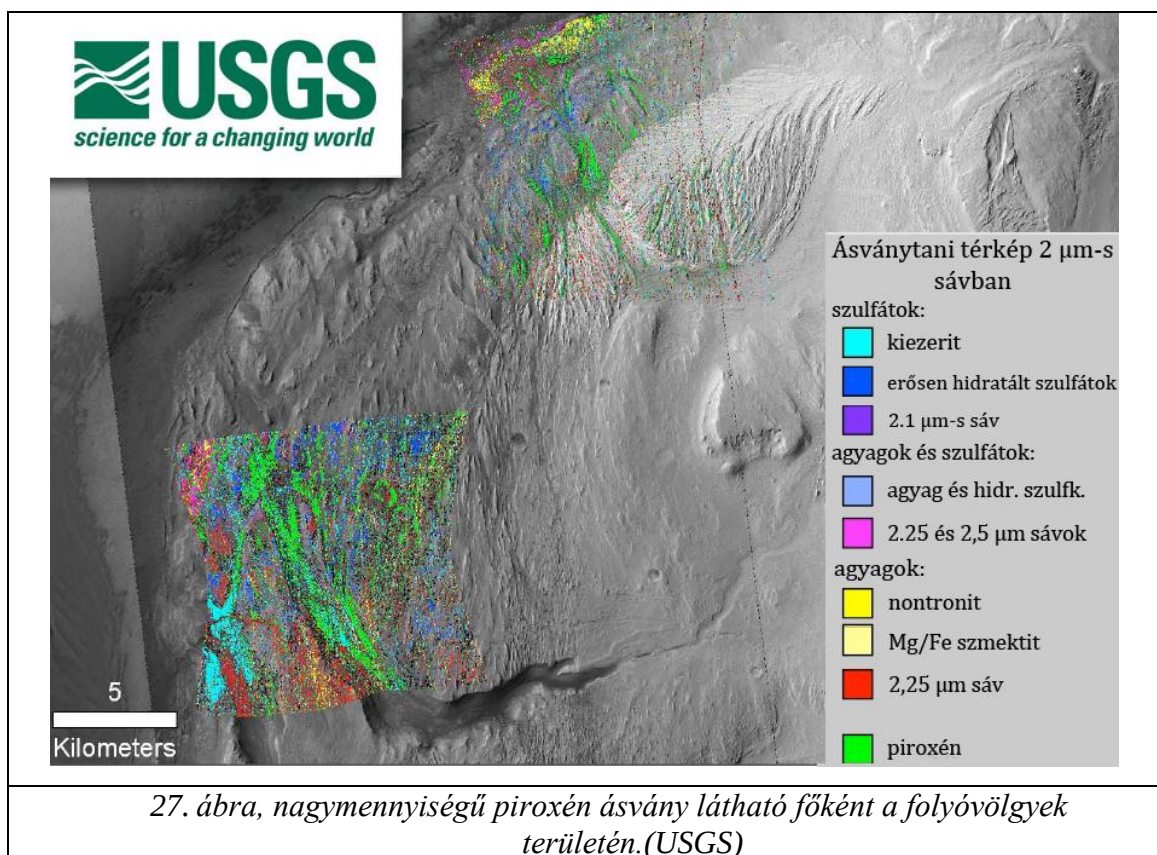
A következő nagy mennyiségben előforduló ásványcsoport a különféle szulfátok, ezen belül is kiemelten a magnézium-tartalmúak, amelyek megjelenése átmenettel megy végbe a szmektit-ekkel keverve és a felsőbb rétegek felépítésére jellemzők. Ezek közül is külön említendő a kieserit nevű víztartalmú Mg-szulfát, amely az egyes rétegekben különböző mennyiségű víztartalommal fordul elő (D. VANIMAN 2011). Ezek a kevert szmektit- és szulfát-tartalmú rétegek, majd a szulfátok uralkodóvá válása a felsőbb rétegekben ismét egy fontos indikátor, globális környezetváltozásra utaló jel. Az új anyagok képződése mindenképpen arra utal, hogy megváltoztak az üledékképződés körülményei. A magnézium-szulfátok képződése szintén folyékony H_2O hatására megy végbe, tehát elsősorban nem geomorfológiai változásra kell gondolni a megjelenésük vizsgálatánál. A Mars fejlődéstörténetének felvázolása során már említettem, hogy ahogy fokozatosan romlottak a felszíni viszonyok, ahhoz, hogy a folyékony H_2O stabilan jelen tudjon lenni a bolygón a víz által alakított formakincsek már sóoldatok hatására jöttek létre. Ezeknek az oldatoknak alacsonyabb a fagyáspontja a víznél, így mostohább körülmények között is stabilak tudnak maradni a Mars felszínén, mert szélesebb skálán mozog az ilyen szempontból optimális tartományuk a fázis diagramon. Mivel a különféle szulfátok kialakulásához sóvegyületek és savas kémhatás szükséges, ezen rétegek vizsgálatával a Noachi időszak végén kezdődő, majd a Heszperiai időszakban kiteljesedő globális környezetváltozást tudjuk elemezni.

A szulfátok megjelenése azonban nem csupán a felsőbb rétegekre koncentrálódik. A már említett agyaggal kevert rétegek leginkább a különféle korú rétegekbe keresztben bevágódó völgyrendszerekben figyelhetők meg, ami arra utalhat, hogy a felsőbb szulfátos rétegek a bevágódás hatására pusztultak és az így keletkezett hordalék keveredhetett a völgyrendszer alsóbb részein az idősebb, agyagos anyagú rétegekből képződő hordalékos üledékkel.

Ezen kívül egyes szelvényekben az agyagos réteg alatt is masszív vastagságú szulfátos rétegek figyelhetők meg. A rétegek ilyen periodikus váltakozása arra enged

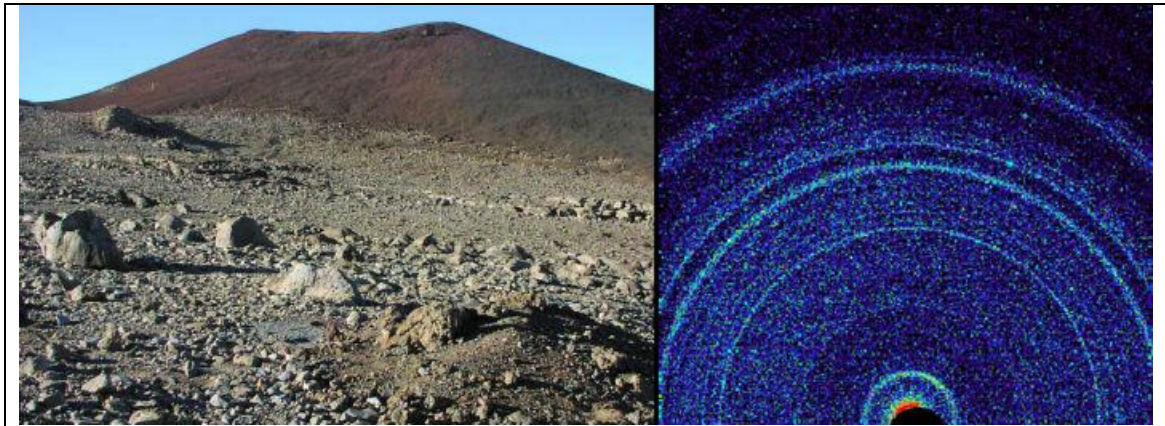
következtetni, hogy az üledékképződés körülményeiben és ezzel a globális viszonyok változásában is hasonló tendencia figyelhető meg.

A fent említett ásványokon kívül és azoktól eltérően nem rétegekhez kötődően nagy mennyiségű piroxén figyelhető meg, különös tekintettel a rétegekbe keresztben bevágódó fluviatilis völgyekben (27. ábra). Emellett gyakorlatilag az összes réteg területén megtalálható ez az ásványtípus az uralkodó kőzetanyag mellett (MILLIKEN 2011). A piroxén és a korábban már említett olivin ilyen mértékű jelenlétére a Curiosity mérései szolgáltatnak magyarázatot.



A rover mintát vett a Mount Sharp lábánál lévő felszíni törmeléktakaróból és a Mars esetében először röntgendiffrakciós módszerrel vizsgálta annak ásványi összetételét. Az eredmények alapján a fő összetevők a földpát, piroxén, olivin és amorf anyagok. Az elemzést kiértékelő kutatók földi analógiaként a Mauna Kea lábánál található mállott, bazaltos anyagot hozták példaként, amivel nagymértékű hasonlóságot mutat a marsi minta összetétele (BISH 2012-28. ábra). Az olivin mellett a piroxének is magmatizmus hatására kialakuló ásványok, tehát kijelenthető, hogy ezek az anyagok

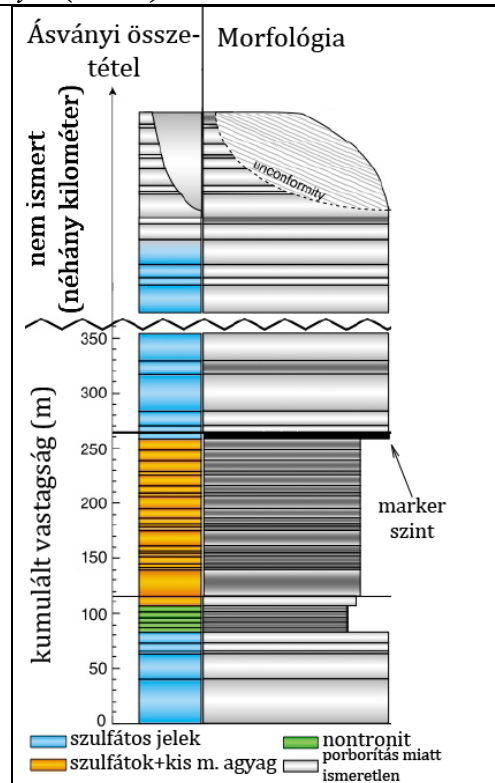
nem a Gale kráter területéről származnak, ugyanis jelenlegi ismereteink szerint nem zajlott vulkáni működés annak területén (K. S. EDGETT 2010).



28. ábra, a Mauna Kea törmeléktakarója és a marsi regolit első röntgendiffrakciós mérésének eredménye. (NASA)

A magyarázat ezen ásványok jelenlétére, hogy a szél munkájának hatására kerültek a kráter területére, a vulkanikus eredetű anyag pedig származhat a globális porviharokból, de akár a kráter szűkebb környezetéből is, mivel különféle vulkanikus régiók veszik körbe (K. S. EDGETT 2010).

Ezen ásványok eredetének feltárása jól példázza, hogy a mai Mars-kutatásban a komplex eljárások használhatók a legjobb produktivitással. A keringőegységek spektrométerei alapinformációt szolgáltatottak, hogy milyen eloszlásban és hol halmozódtak fel, a rover műszerei pontosan meghatározták az összetételt és az arányukat, a földi analógia az anyag eredetét tárta fel, a Marsról rendelkezésre álló ismereteink pedig, hogy mindennek fényében



29. ábra, a rétegek sztratigráfiai besorolása. (Anderson)

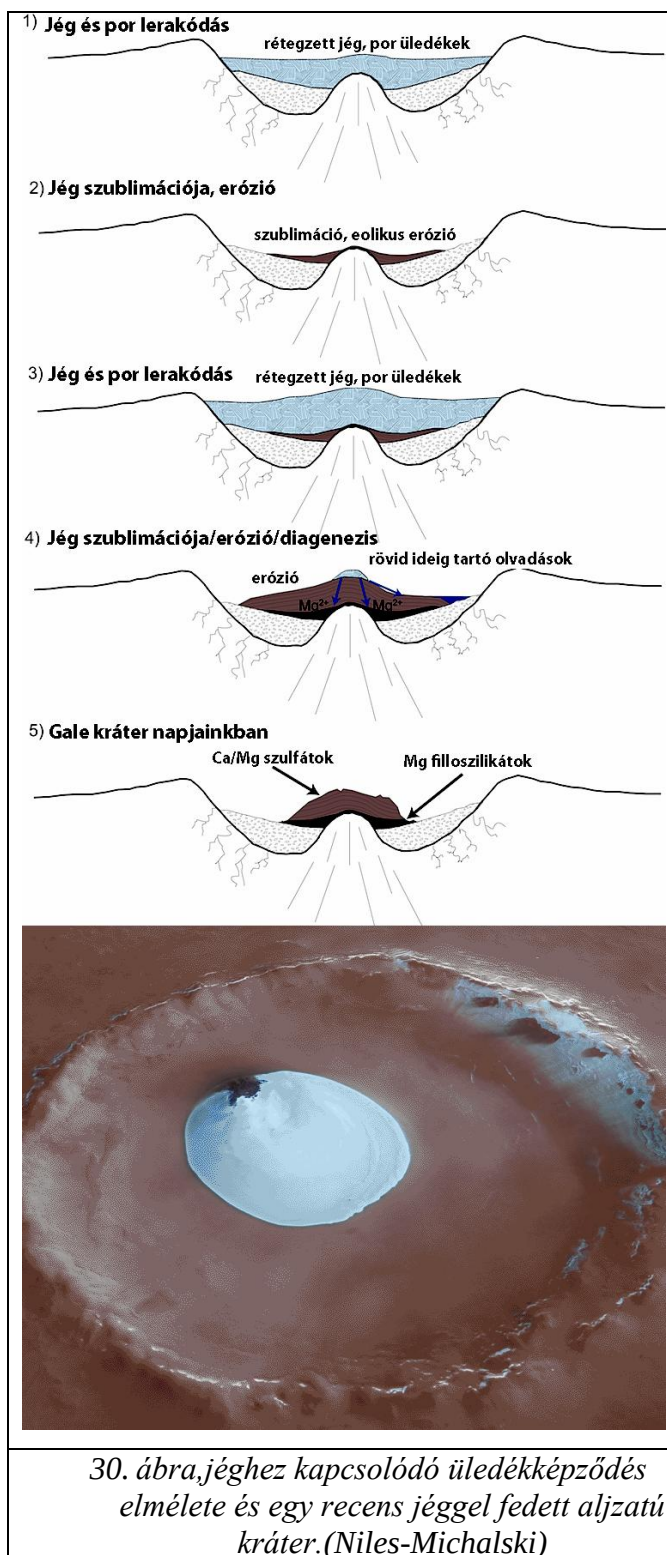
hogyan került a kráter területére. A szulfát-tartalmú rétegek között felfelé haladva a szulfátok spektrális jele egyre inkább gyengül és a magas vas-oxid tartalmú szokványos marsi por jelei erősödnek. A felső rétegek anyagát tehát nem tudjuk megállapítani

jelenleg, mert nagyrészüket törmeléktakaró borítja. Az itt látható rétegek vizsgálata, kronológiai skálába illesztése során alkalmazhatjuk a földi rétegtan egyik alapvető tézisét, Steno települési törvényét (29. ábra). Mivel a rétegeken nem láthatóak olyan belső, vagy külső erők nyoma, ami a rétegeket kimozdíthatta volna ezért a legalsótól a legfelsőig kronológiai sorrendben elemezhetjük őket feltételezve, hogy a legidősebb rétegektől haladunk a legfiatalabbakig. Révén, hogy anyagmintával nem rendelkezünk az egyes rétegekből, abszolút időskálában nem tudjuk elhelyezni kifejlődésük korát, viszont ha ismerjük a kráter keletkezésének nagyságrendileg pontos időpontját, akkor ebből kiindulva évmilliárdokra vissza lehet vezetni a Marson uralkodó globális környezet változásának mértékét és ütemét.

VI.4. Elméletek a Gale kráter fejlődéstörténetére

A Gale kráter fejlődéstörténetére különböző elméletek születtek. Amiben mindegyik egyetért, hogy a kráter körülbelül 3,6 milliárd éve jöhetett létre a Noachi és a Heszperiai időszak határán (LE DEIT ET AL. 2012).

Létezik egy elmélet, amely kizárja annak a lehetőségét, hogy az üledékes rétegek, egy a krátert kitöltő tóban jöttek volna létre. Keletkezésüket hasonló folyamattal magyarázzák, mint a sarki területeken kialakuló poláris rétegzett üledékekét (NILES – MICHALSKI 2012). Az elképzelés szerint a kráter kialakulása után por, jég és a légkörből kiülepedő, magas szulfát-tartalmú aeroszolok töltötték fel (30. ábra). Ezeket a felhalmozódási időszakokat megszakítva a jég elolvadt és a különféle üledékek visszamaradva belőle felhalmozódtak és az erózió vette át a fő felszínalakító szerepet, kiemelten az eolikus degradáció. Ez a két folyamat periodikusan

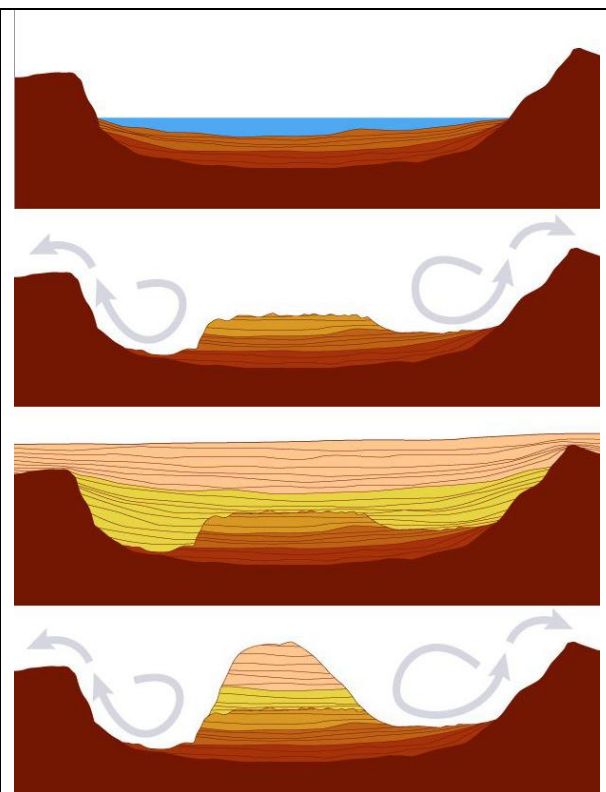


30. ábra, jéghez kapcsolódó üledékképződés elmélete és egy recens jéggel fedett aljzatú kráter. (Niles-Michalski)

felváltva zajlott le és így halmozódott fel a több mint 5 km vastagságú üledék, amelynek oka az elmélet szerint a Mars tengelyferdeségének változása, amely klímakilengéseket okozott. Az elmélet szerint az üledékrétegek még napjainkban is tartalmaznak jeget az utolsó ilyen periódus következtében. A folyékony H₂O hatására kialakuló agyag- és szulfátásványok jelenlétét azzal magyarázzák, hogy az olvadó jég hatására a víz kölcsönhatásba lépett a lerakódott anyagokkal és ennek során jöttek létre a fent említett anyagok, miközben a víz hatására diagenézis is végbement a rétegekben. Az elmélet szerint az üledékképződés és az erózió számtalan ciklusa mehetett végbe mire a ma látható állapot előállt. A jég rövid ideig tartó olvadási periódusaival magyarázzák az üledékes hegy oldalába vágódó völgyek kialakulását, illetve tiszavirág-életű kisebb tavak létrejöttét is a kráter területén. Az elmélet megmagyarázza a jelen lévő ásványok kialakulását és a látható morfológiai jellemzőket is, valamint a Mount Sharp alakját és kiterjedését is igazoltnak látja ezzel a levezetéssel, miszerint így egy a középponttól a peremek felé terjeszkedő üledéksor jön létre, amelynek végső alakját persze az erózió alakította ki. Érdekesség ezzel az elmélettel kapcsolatban, hogy kidolgozói gyakorlatilag teljességgel elvetik annak lehetőségét, hogy a Curiosity eredményei bármilyen tavi üledékképződésre utaló nyomot szolgáltatassanak majd vizsgálatainak során.

Ezzel szemben egy másik, népszerű elképzelés szerint folyóvízi-tavi üledékek alakították ki a Mount Sharp rétegeit (31. ábra). Az elmélet szerint a kráterben az utolsó vízhez kötődő üledékképződési időszak a kora-közép Amazoni időszakban mehetett végbe és hozzávetőlegesen 2 milliárd évig töltődött folyóvízi-tavi üledékekkel (N. A. CABROL – E. A. GRIN 1999). Ennek során a globális környezetváltozás hatására a meleg vizes

időszaktól kezdve a hideg, savas vizes viszonyokig változtak az üledékképződési körülmények. A felsőbb rétegek erózióját azzal magyarázza az elgondolás, hogy a kráterben a vízszint az Elysium medence vízszint-ingadozásait követve változott periodikusan, a csökkenésében pedig a párolgás és a beszivárgás is szerepet játszott. A kráterben az üledékek képződését egyfajta fluvio-lakusztikus vízrendszer alakíthatta ki. Emellett a felszín alól feltörő vizek típusát is kiemelten kezeli az elmélet, amely szerepet játszhatott az ásványtani átalakulások folyamatában és a diagenézisben. Az üledékes hegyen látható eróziós formákat hasonló módon magyarázza, mint a korábban bemutatott elképzelés.



31. ábra, tavi üledékképződés elmélet. (E. Hand)

Ehhez az elgondoláshoz hozzáfűznék egy gondolatot. A kráter felépítésének elemzésekor kifejtettem, hogy a Mount Sharp kiterjedése és magassága milyen mértékűnek tekinthető a kráter karakterisztikájához képest. Ahhoz, hogy az egész üledékes összlet tavi körülmények között alakuljon ki olyan vízszint-magasságra van szükség a teljes kráter területén, amely már szinte a legmagasabb egyes déli peremrészleteknél is magasabb a jelenlegi domborzati viszonyok között, tehát már az egész kráter tágabb környezete is víz alatt kellett hogy legyen (32. ábra). Egészen pontosan ehhez tengerszint feletti 562m-es magasságban kellett volna tetőznie a vízszintnek és akkor ehhez még tegyük hozzá azt a tényt is, hogy a jelenlegi nem a hegység eredeti magassága, hiszen az erózió folyamatosan pusztítja szárazulattá válása óta. Ehhez persze az is hozzátartozik, hogy nem csak a Mount Sharp pusztult az évmilliók során, hanem a kráterperem is, ráadásul, mindegyik részét egykori folyómedrek hálózák be, tehát a krátereknél szokásos eolikus és lejtős tömegmozgások

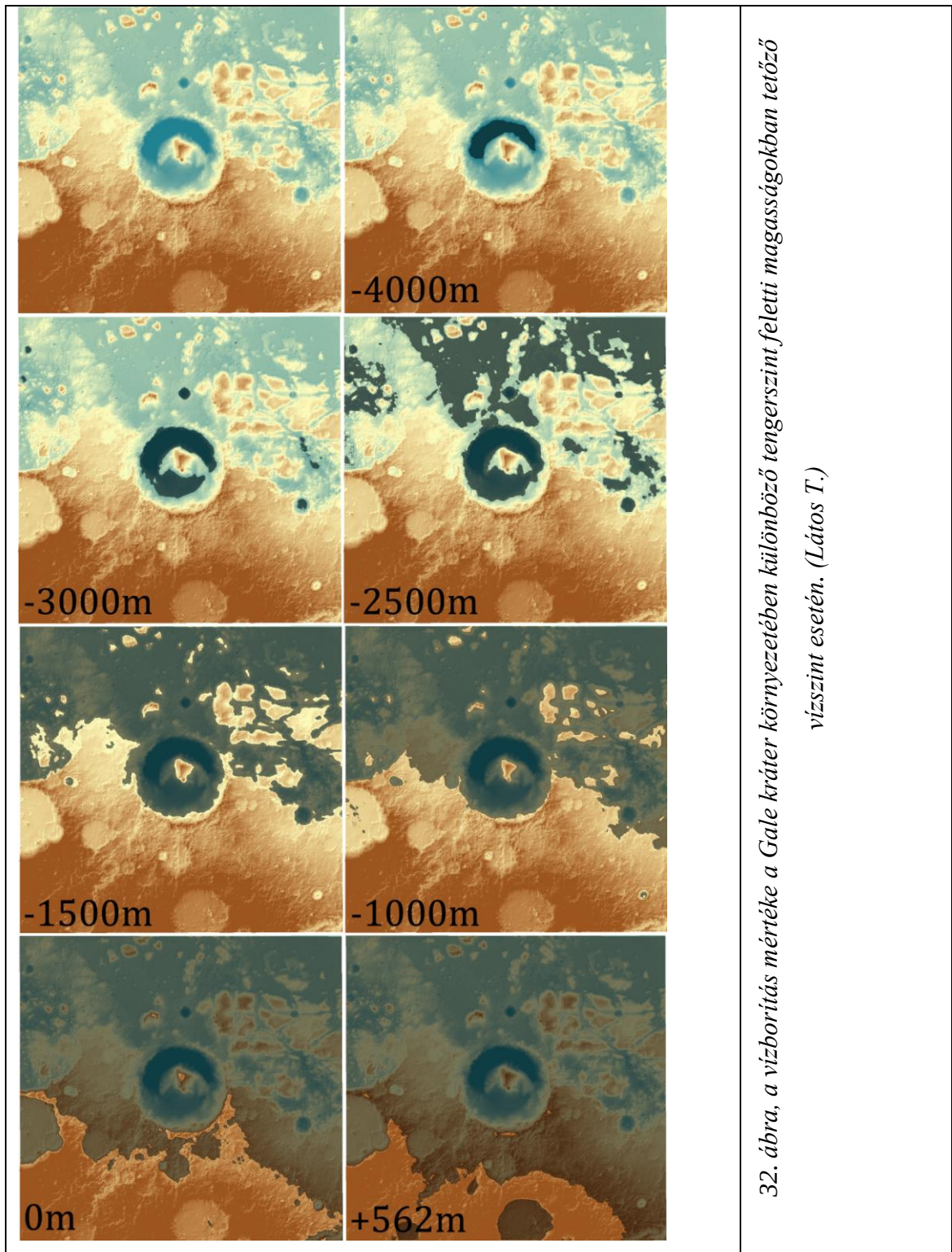
által vezérelt erózió itt a fluviatilis is kiegészül.

Készítettem egy ábrasorozatot a MOLA adatai alapján, amelynek 300m a felbontóképessége és megnéztem, hogy ha jelenleg bizonyos tengerszint feletti magasságban vízzel öntenék el a kráter területének 500x500km-s környezetét akkor mely részek esnének vízszint alá, illetve a fölé (32. ábra). A Mount Sharp legmagasabb pontját +562m-s magasságú vízszint esetén fedné el a vízborítás a MOLA adatok alapján. Ebben az esetben már csak a déli kráterperem pontszerű foltjai magasodnak a vízszint fölé. Tehát, ha figyelembe vesszük a kráterperem degradációját, akkor elvileg elég magas lehetett egykor a kráterfal ahhoz, hogy ne öntsön ki a kráterből a víz. Ugyanis látható, hogy ilyen vízszint-magasságnál már a kráter környezetének jelentős mértékét fedné vízborítás.

Azonban -1500m-s tengerszint feletti magasságú vízszint esetén a nyugati perem már nem tudja a kráterben tartani a vizet és az előnti a mélyföldek és a felföldek átmeneti területét is. Itt tehát egy közel 2000m-es differencia figyelhető meg a Mount Sharp üledékeinek kialakulásához szükséges vízszint magassághoz képest. Ez már elég jelentős különbség ahhoz, hogy elgondolkozzunk rajta degradálódhatott-e ilyen mértékben csak ez a peremszakasz, nem mellesleg pedig ez a falrész eleve alacsonyabb volt, mint a déli, ahogy azt már korábban is említettem. Mindezek alapján felmerül a kérdés, hogy ha ezen a szakaszon a víz a környező területekre is túlsordulhatott, akkor mért nem látunk a kráter környezetében másol a Mount Sharp üledékeihez hasonló formákat. Mindez igaz az északi, mélyföldek területére eső peremszakaszra is, amely a legalacsonyabb és ebben az esetben biztos, hogy itt vízborítás volt a kráteren kívül is.

Válasz lehet erre a kérdésre, hogy már eltemetődtek ezek az üledékek más területeken, illetve degradálódtak. Mindezzel arra kívánom felhívni a figyelmet, hogy a tókitöltés elméletével kapcsolatban is számos kérdés felmerülhet még, amely megválaszolásra vár.

Létezik azonban egy tényező, amelyben mindegyik elmélet egyetért, méghozzá az, hogy a Gale kráterben egykor fennálló körülmények alkalmasak lehettek az élet kialakulására és az egyik legjobb marsi vizsgálati terep lehet a biomarkerek kimutatására.

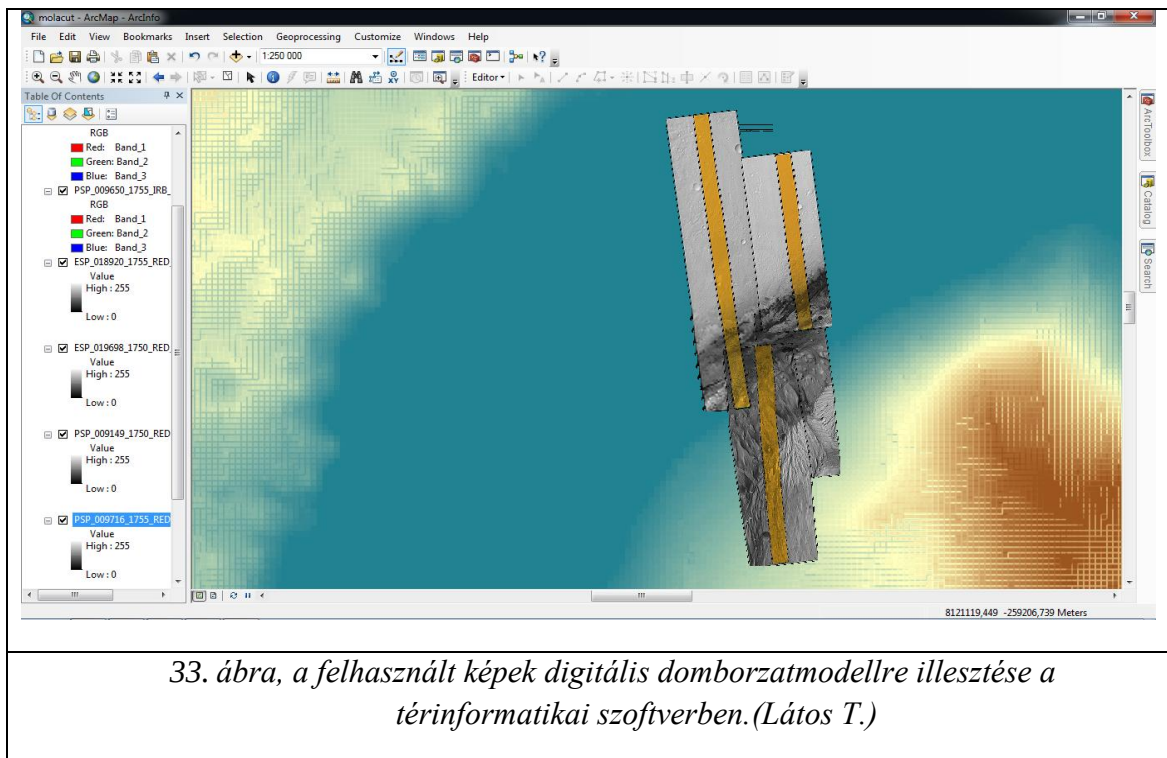


VII. A Kíváncsiság-völgy térinformatikai elemzése

VII. 1. Az elemzés során használt módszerek

A morfológiai elemzés során kitértem rá, hogy több tucat különböző morfológiájú és elhelyezkedésű folyóvölgy található a kráter és a hegység területén. Ezek közül kiemeltem egyet, amit részletesebben elemzek, leginkább térinformatikai eszközökkel.

A választásom a Curiosity leszállóhelyével szemben, a Mount Sharp északi oldalába bevágódó völgyre esett (33. ábra). Mivel a szakirodalomban nem találtam pontos elnevezést még erre a völgyre, ezért, hogy a későbbiekben egyszerűen tudjak hivatkozni rá a rover után Kíváncsiság-völgynek neveztem el. Azért választottam ezt a területet, mert a felsorolt morfológiai jellemzők közül szinte az összes megtalálható ezen a területen. A különféle felszínforma-típusok jellegzetes eloszlása a területen, illetve a különféle kifejlődésű és összetételű rétegek vizsgálata révén kiváló elemzési terület a Mars ciklikus környezetváltozásainak vizsgálatára.



További előnye a területnek, hogy a Curiosity rover leszállási ellipszisének pont a völgy torkolatával szemben jelölték ki és előzetesen erre a területre tervezték leendő útvonalát is. Ebből kifolyólag alaposan feltérképezték ezt a területet és számos nagyfelbontású felvétel, domborzatmodell, ásványtani elemzés készült a környezetéről, ami jelentős mennyiségű alapinformációt szolgáltat az elemzéshez. Maga a rover jelenléte is hatalmas potenciált rejt magában, remélhetőleg olyan felszíni felvételeket készít majd, amelyek interpretálhatóvá válnak a keringőegységek nagyfelbontású felvételeihez illesztve.

Az elemzéshez az MRO vörös sávban készült HiRISE felvételeit használtam, ezek 6 km széles sávot fednek le, hosszúságuk pedig változó, csak a fedélzeti memória aktuális kihasználtsága szab korlátokat neki. Ezen képek felbontása 25cm/pixel, ami azt jelenti, hogy kb. 75cm-s objektumok már biztonsággal azonosíthatók rajta. Ezek a felvételek már vetületi rendszerbe illesztve és georeferálva érhetők el a NASA honlapjáról, ahol a sztereo-képpárok kiértékeléséből készült digitális domborzatmodellek is rendelkezésre állnak (<http://hirise.lpl.arizona.edu/dtm/map.php>). A térinformatikai szoftverbe behívva ezeket a felvételeket az tapasztalható, hogy nem fedik egymást tökéletesen, ennek oka, hogy ugyan a vetületi rendszerük azonos, viszont a képek centrálmeridiánja nem, ebből kifolyólag további georeferálásra szorulnak.

A HiRISE felvételek középső, 1,2 km széles területéről hamis színes képeket is előállítanak a különböző sávokban készült felvételek kombinálásával, amelyeket szintén felhasználtam az elemzés során. Ilyen nagyfelbontású felvételek a bolygó felszínéről csupán korlátozott számú területről érhetők el, szerencsére, mint említettem a Curiosity közeli leszállópontja miatt erről a területről több is készült, viszont a völgy forrásvidékéről nem, ami nem hanyagolható el a kutatás során.

Az úgynevezett HiWish program keretein belül bárki javasolhat célterületet HiRISE felvétel készítésére, az általam fontosnak vélt területekről én is igényeltem képeket, ezek egyelőre azonban még nem készültek el.

A egész terület nagyléptékű vizsgálata során ezért a szintén az MRO szondán található CTX kamera (Context Camera) felvételeit használtam. Ez a műszer többek között arra szolgál, hogy a HiRISE és a CRISM által felvételezett területek tágabb környezetéről készítsen képeket. A CTX szürkeárnyaltos felvételei 160x30km-s

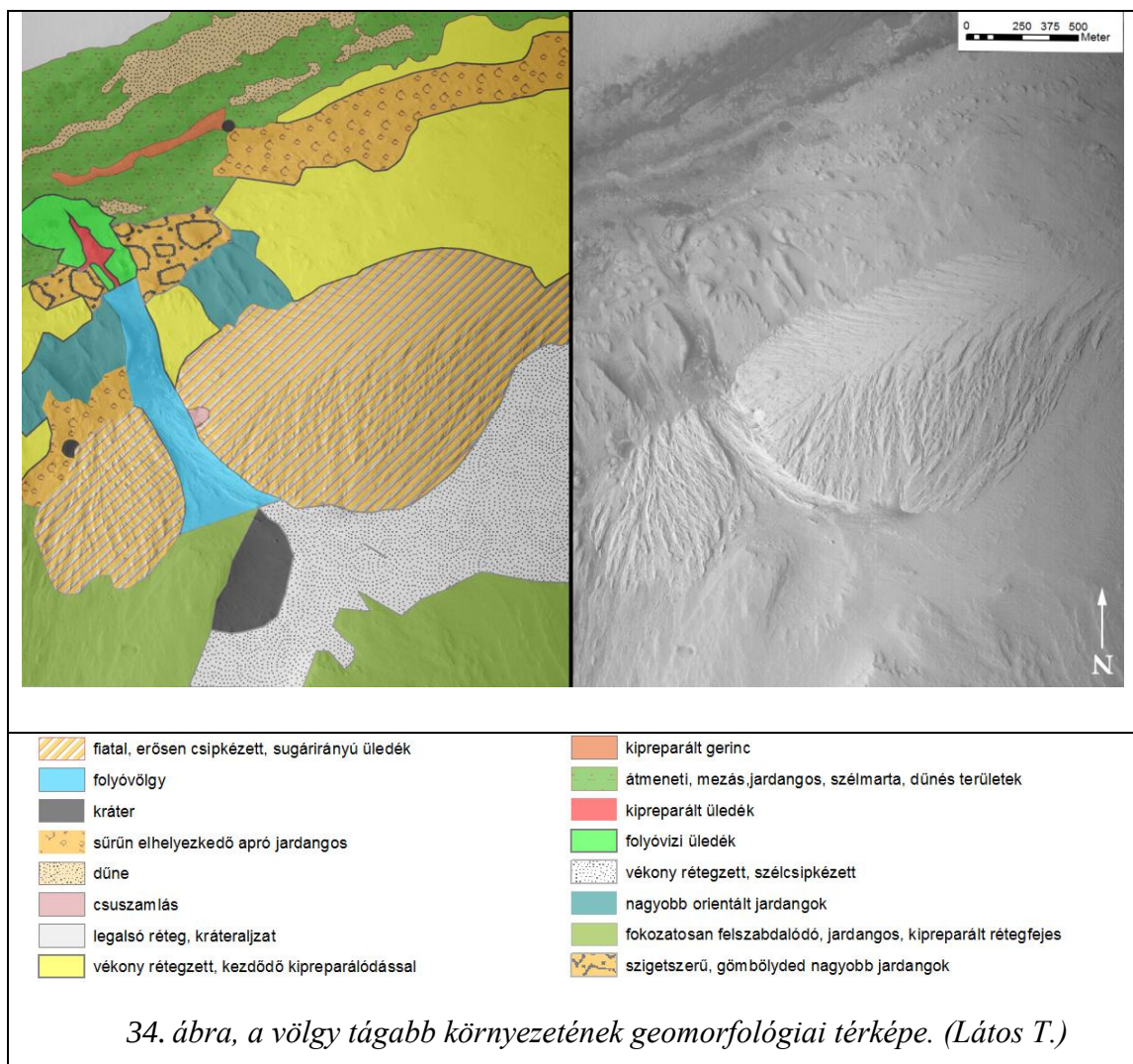
területet fednek le, felbontásuk pedig 6m/pixel, tehát még így is egy elég részletes felvétel elemzésére van lehetőség.

A felvételek elemzése során felhasználtam az MRO CRISM és a Mars Odyssey THEMIS nevű spektrométerei által nyert ásványtani adatokat. A két műszer méréseit kombinálva készítettek ásványtani összetétel térképeket a területről, amelyek már korábban is láthatók voltak a dolgozat fejezeteiben (THOMSON ET. AL. 2010). Az összetétel nagy segítséget jelenthet az egyes formák kialakulásának meghatározása során.

Az ArcScene 10. nevű szoftver segítségével a már korábban említett domborzatmodellek és a HiRISE képek használatával 3D-s megjelenítés válik lehetővé, ami nagyban megkönnyíti az egyes formák elemzését, hiszen körbejárhatóvá válnak.

VII.2 A völgy tágabb környezetének nagyléptékű morfológiai elemzése

A nagyléptékű elemzés során CTX felvételen tanulmányoztam a felszínformákat és igyekeztem egy geomorfológiai térképet készíteni a vizsgálati területről. A terület összetettségét jól mutatja, hogy a geomorfológiai térképezés során 16 kategóriát hoztam létre a különböző felszínformák besorolására, mindezt úgy, hogy csak nagyléptékben vizsgáltam a területet, gyakorlatilag mindegyik kategória tovább bontható lenne számos alkategóriára (34. ábra).



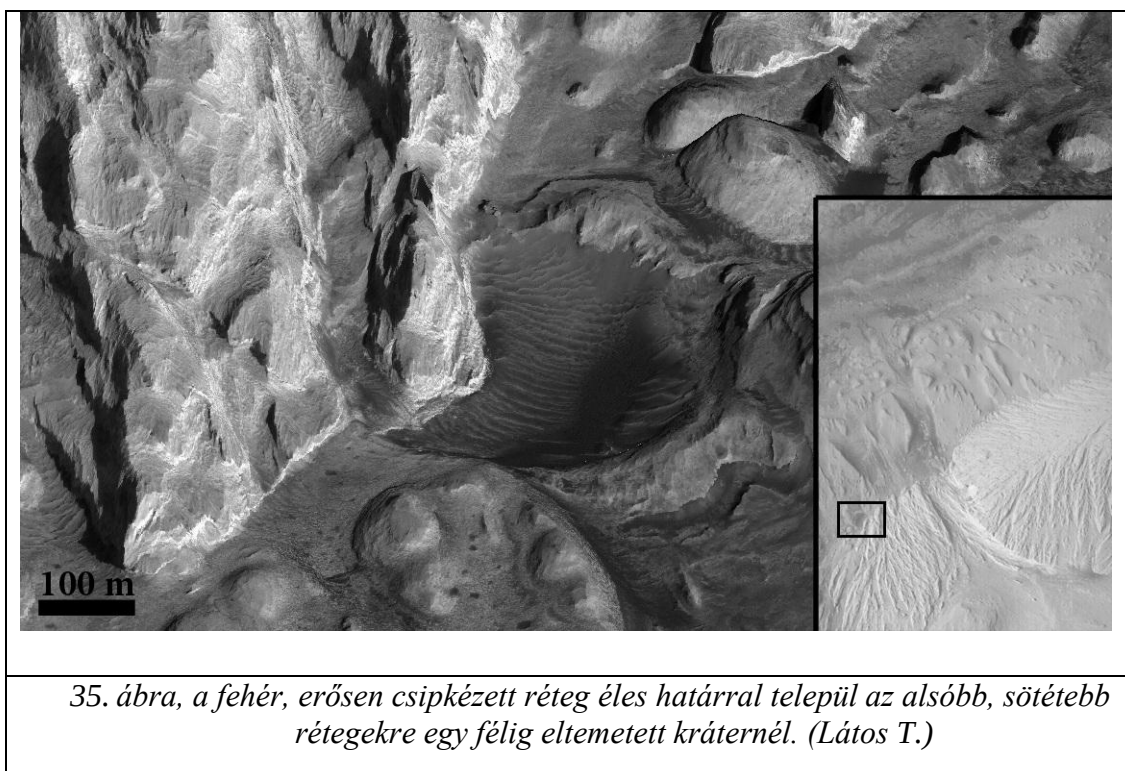
A CTX felvétel kivágatán és az erről készített geomorfológiai térképen a Mount Sharp északi lejtőjének tulajdonképpeni hegylábfelszíne látható. Egy rendkívül komplex felépítésű területről van szó, amelynek formálásában valószínűsíthető, hogy az összes külső erő szerepet játszott. A hegyoldal formálódása még semi-arid körülmények között kezdődhetett meg, amikor még időszakos vízfolyások bevágódása is alakította a környék morfológiáját, majd fokozatosan ment át a marsi globális környezetváltozásokkal párhuzamosan uralkodóan arid helyzetbe, ahogy ma is látjuk. A Mars tengelyferdeségének ingadozásával együtt ciklikusan válthatták egymást a semi-arid és arid viszonyok a területen. Az itt látható formakincshez hasonló példákat a Földön is találunk jellemzően a félsivatagos-sivatagos területeken, ahol a hegységek pusztulása során hasonló morfológia kialakulása megy végbe. Persze a Mars és a Föld esetében is vannak olyan speciális tényezők, amelyekből számottevő különbség is fakad a két égitest hasonló formái között.

Egyértelműen megjelenik a területen a folyóvízi erózió, a hegyoldalt felépítő rétegekbe bevágódó egykori folyóvölgy formájában. Természetesen nem csak az erózió, de az akkumulációs formák létrejötte is együtt jártak a völgy kialakulásával. Erről a területről kicsit később még bővebben lesz szó.

- A CTX felvételen szembevetendő az a nagy kiterjedésű a többi réteghez képest világosabb réteg, amelybe a folyóvölgy forrásterülete után bevágódott. A völgytől keletre eső, nagyobb kiterjedésű üledék leginkább egy alluviális legyezőre hasonlít. Felülete sugárirányban durván felszabdalt és a baloldali végétől kezdődő kiszélesedés arra engedhet következtetni, hogy egy magaslat lepusztulásának végterméke látható itt, egy felszabdaldó törmelékhalom, viszont elhelyezkedése megcáfolja ezt, révé, logikusan nem alakulhat ki ezen a területen, hanem a hegy lábánál kéne létrejönnie ilyen formának. Ráadásul, ha megnézzük a völgy másik oldalán lévő ugyanilyen eredetű üledéket, annak felszabdaldása merőleges erre. Tehát egy más jellegű üledéssel van itt dolgunk, amelynek felszabdaldását nagyrészt az eolikus erózió okozza.

Ez a világos üledék azonban fontos indikátora lehet egy ősi környezetváltozásnak, vagy legalábbis az bizonyosan megállapítható, hogy az

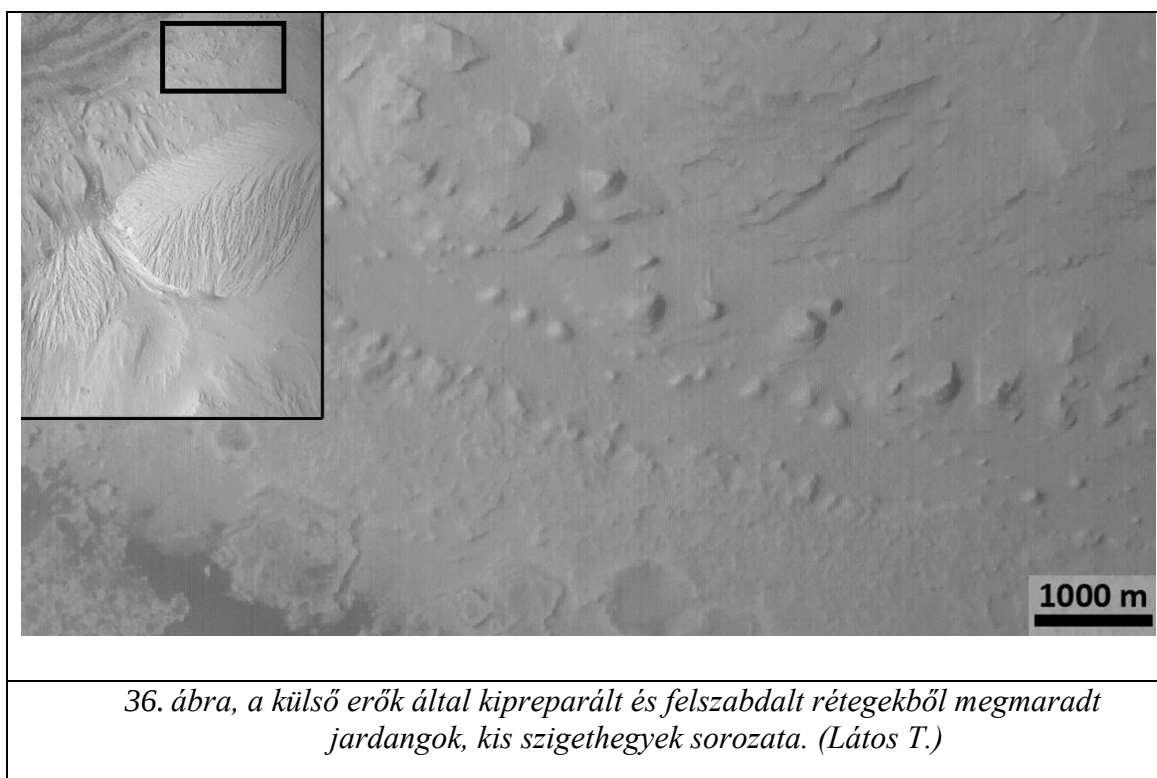
üledékképződési körülményekben gyökeres változás állt be lerakódásakor. Az üledék aljánál unkonformitás figyelhető meg szögdiszkordancia formájában. Az alatta látható rétegek felhalmozódásában szünet állt be és az erózió vette át a felszínformálás főszerepét, a világos réteg pedig minden átmenet nélkül települ rá erre a sötétebb rétegre (35. ábra). Ez kiválóan látható a völgytől nyugatra, ahol a sötétebb rétegek lepusztulása során egy kráter alakult ki, amit a világos üledék félig eltemetett.



A fehér üledék ásványtani összetétele az űrszondák spektrométereinek mérései alapján gyenge szulfátos jeleket mutat. Ez arra enged következtetni, hogy egy áthalmazott, kevert üledék települt erre a részre. A szulfátos összetevők származhatnak hideg, savas vízből, vagy légköri kiülepedésből.

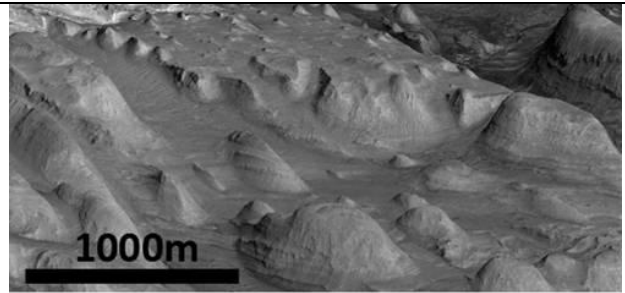
- A geomorfológiai térképen látszik, hogy több jardangos területet is megkülönböztettem, attól függően, hogy milyen méretűek, milyen pozícióban vannak és milyen az alakjuk. Mindegyik közös azonban abban, hogy kialakulásuk az eolikus eróziónak és a tömegmozgásoknak köszönhető. Jardangok kialakulására számos földi analógia hozható, például a kínai-mongol

Qaidam-medence területén bizonyos részeken nagy sűrűségben jelennek meg hasonló formák. Kipreparált rétegek felszabdalódásával jönnek létre. Alakjuk szerint vannak hosszan elnyúló, illetve gömbölydedebb, szigetszerűen megjelenő formáik. Emellett olyan apró sorozatok is több helyen látható, amelyek világosan kirajzolják az egykori felszabdalt kipreparált réteget (36. ábra). Elnyújtottabb formáik jellemzően a nagyobb lejtésű területeken alakultak ki. A hegyoldal minden részén megkezdődött a különféle hol vékony, hol vastagabb rétegek kipreparálódása, csak abban van különbség köztük, hogy milyen fejlettségi szinten állnak épp az erózióban.



A Curiosity leszállóhelye igen közel esik a célterülethez ennek köszönhetően, már a rover is le tudta fényképezni a hegyoldal területén folyamatosan formálódó jardangokat (37. ábra). Jelenleg ezen formák képződése zajlik aktívan a területen, ugyanis a víz felszínformáló hatásának háttérbeszorulásával a szél és a tömegmozgások vették át a fő felszínalakító erő szerepét. A jardangok körül jellemzően törmelékszkonya alakul ki az erózió hatására.

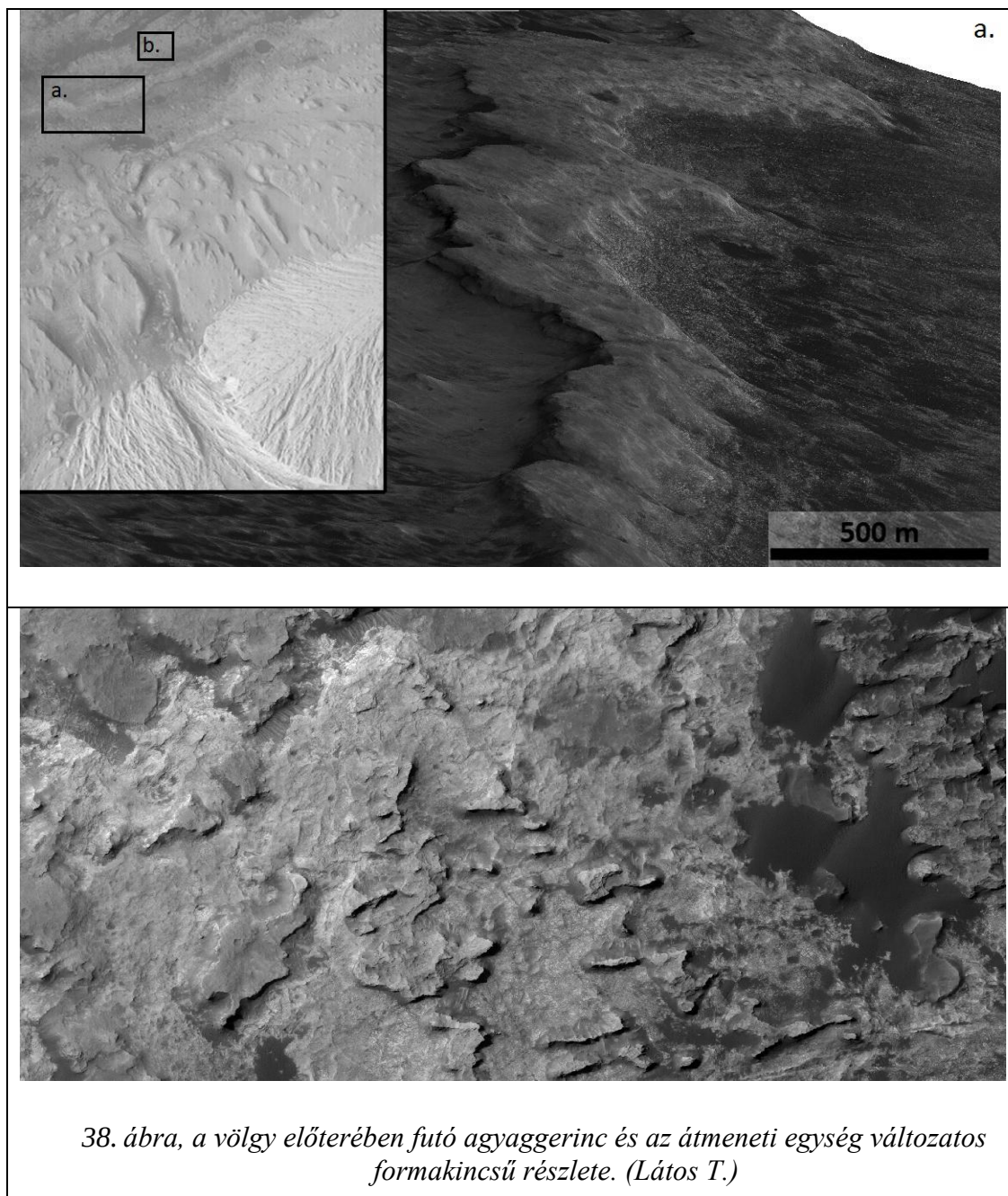
- A hegység lábának előterében egy kipreparált gerinc figyelhető meg, amely élesen emelkedik ki a környezetéből. A keringőegységek spektrométeres méréseiből tudjuk, hogy összetétele nagyrészt az agyagok közé tartozó szmektittel azonosítható (38. ábra). Tehát a környezeténél ellenállóbb, meleg, édesvízi környezetben kialakult üledékes réteget látunk. Hosszútávon nem fog ellenállni az erózióknak és valószínűleg hasonlóan fog felszabdaldódni majd, mint az imént említett sorban egymást követő apró jardangok. Tulajdonképpen itt még azt az állapotot láthatjuk, amikor a réteg már kipreparálódott a környezetéből, de még nem szabdalódott fel, idővel azonban ez is be fog következni. A Marson ehhez hosszabb időre van szükség,



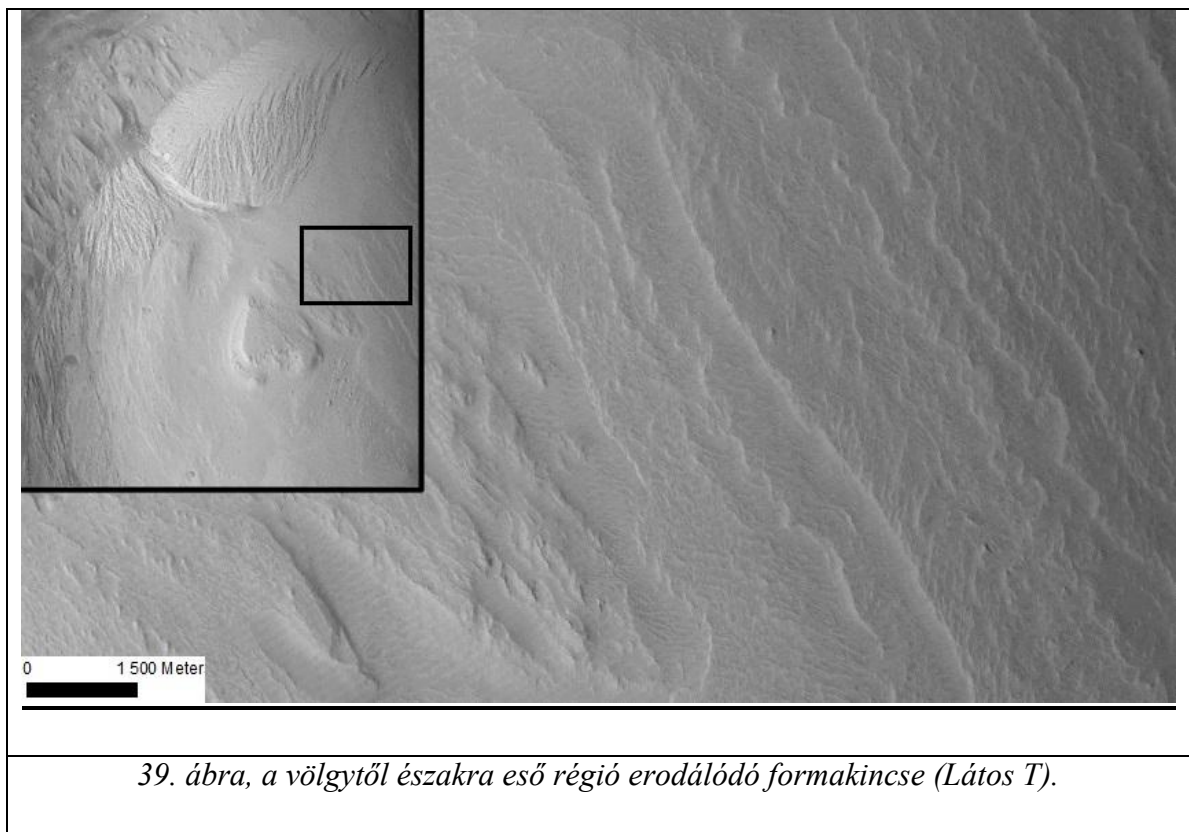
37. ábra, sorban a DDM-re húzott HiRISE felvételeken látható jardang-szigethegy mező, ugyanez a terület az MSL felvételén és egy földi analógia a Qaidam-medencéből. (Látos T.)

- mint a Föld esetében, hiszen a rendkívül ritka légkör miatt a bolygón nincsenek olyan erős szelek, mint a mi égitestünkön.
- A kipreparált agyagos réteg fokozatosan megy át a kráter jelenlegi aljzatát képező üledék és a hegy lábazata között elterülő átmeneti egységbe. Ez önmagában is egy rendkívül összetett felszínforma típus, amit jellemzően szintén a szélerózió és a

tömegmozgások formáinak. Szélmarta területek, kipreparált formák és meza-szerű kisebb táblák tagolják, valamint nagy kiterjedésű sötét dűnemezők halmozódtak fel területén, amelyek anyaga nem a kráterből származik, mivel anyaguk jellemzően olivin, tehát vulkanikus eredetű és a kráter körül kialakult valamelyik magmás területről származhat (38. ábra).

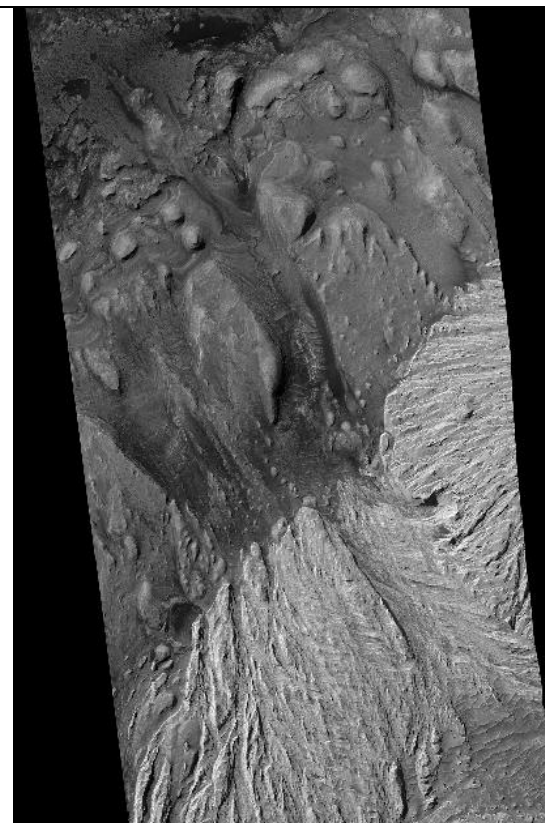


- A legfelső rétegtani egységek, amelyek a folyóvölgy forrásvidéke és a korábban említett világos, sugárszerűen szétterülő üledék felett, illetve körülötte helyezkednek el, kérdéses eredetűek. Spektrális jelei alapján fokozatosan gyengülő szulfátos jelek helyét a vas-oxid veszi át. Ez arra utal, hogy vagy por fedte be az itteni rétegeket, vagy már szél által felhalmozott rétegek jelennek meg itt. Eróziójuk szintén uralkodóan eolikus úton megy végbe, a rétegfejek kezdenek kipreparálódni és jardangosodni (39. ábra).



VII.3 A Kíváncsiság-völgy medertulajdonságainak vizsgálata

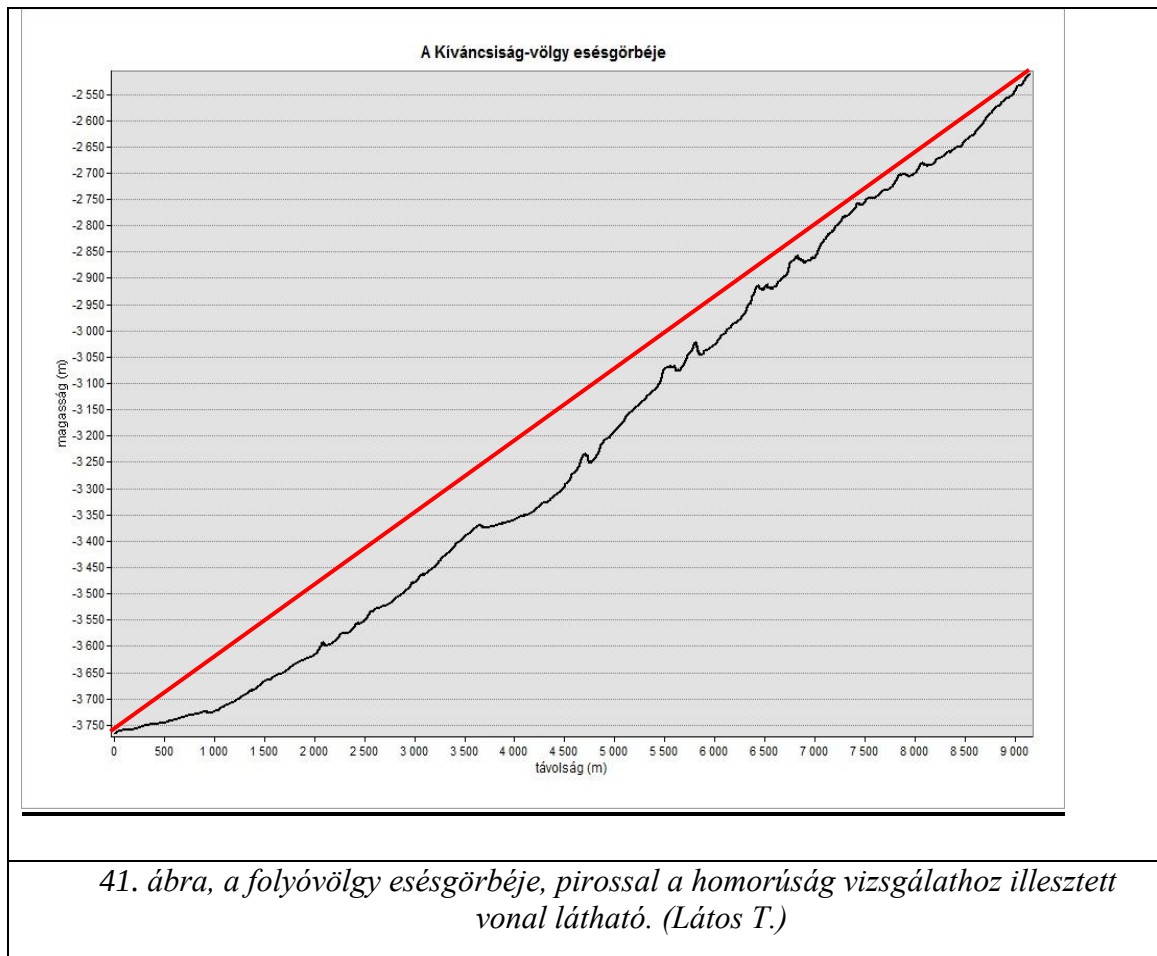
A CTX felvételen és a geomorfológiai térképen is jól látható, hogy az északi hegyoldal legfőbb, uralkodó felszínformája, az üledékes rétegekbe bevágódó folyóvölgy. Mivel legfelsőbb szakaszán már az üledékes hegy felsőbb üledékrétegeibe vágódik be elmondható, hogy az egyik legfiatalabb képződmény a területen (40. ábra). Azon időszak során alakulhatott ki, mikor a Mount Sharp területe már végleg szárazulattá vált, ha elfogadjuk, hogy a felső rétegeken kívül a hegység alapja tavi környezetben ülepedett le. Ekkor már az erózió volt uralkodó a hegység területén és a globális környezetváltozás hatására valószínűleg már nem volt stabil a víz a bolygó felszínén.



40. ábra, az északi hegyoldalba bevágódó folyóvölgy. (NASA)

A völgy hossza a bizonytalan forrásterülettől az alluviális formáig a torkolatánál hozzávetőlegesen 10 km. Szélessége viszonylag állandó 800-900 méter körül alakul. Teljes szélességében indul a forrásterülettől és ez nem is változik jelentősen a torkolati területig. Mellékvölgyek nem láthatók, amelyek bekapcsolódnának a főmederbe. Vízyűjtő terület a forrásterület bizonytalansága miatt egyértelműen nem határolható le.

A völgy esésgörbéjét megvizsgálva számos lényegi következtetés vonható le a folyó karakterisztikáját illetően (41. ábra). A völgy esése nagyobb ugrások nélkül, fokozatosan csökken, szinte állandó meredekséget tartva, a 10km-s távolság alatt ~1300 méteres szintkülönbséget áthidalva.



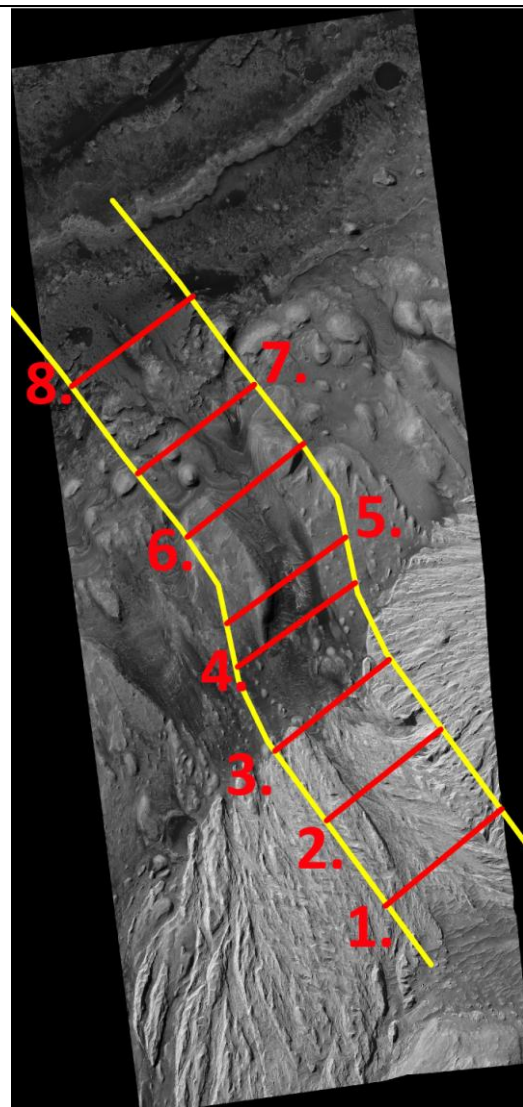
Az esésgörbe értelmezését több tényező is nehezíti, a forrásterület nem azonosítható egyértelműen, így a görbe kezdőpontja bizonytalan. A meder alját a felső szakasz kivételével változó vastagságú a folyó megszűnése után, szél által behordott üledék takarja, ezért nem közvetlenül az eredeti meder szintjéről származnak a magassági értékek. A görbe futásában megjelenő fűrészfogszerű minta is ennek a változó vastagságú üledéknek tudható be és nem annak, hogy a meder egyes részeit a folyó túlmélyítette volna működése során. A forrás utáni legfelső szakasz azért nem mutat ilyen fűrészfog jellegű mintázatot és homorúbb, mert ezen a részen nem figyelhető meg jelentős üledék-felhalmozódás. Az alsó szakasz szintén kiegyenlítettebb képet mutat és homorúbb formát vesz fel, aminek oka, hogy itt egy kipreparált üledékgerincen fut a meder középvonala. A két szélső szakasz között látható kidomborodó rész a már említett jelentősebb üledék-felhalmozódás területe.

Szakaszjellegeket nem lehet elkülöníteni az esésgörbe alapján leginkább bevágódó jellegnek felel meg, amit a völgyről készült felvételek is alátámasztanak. A

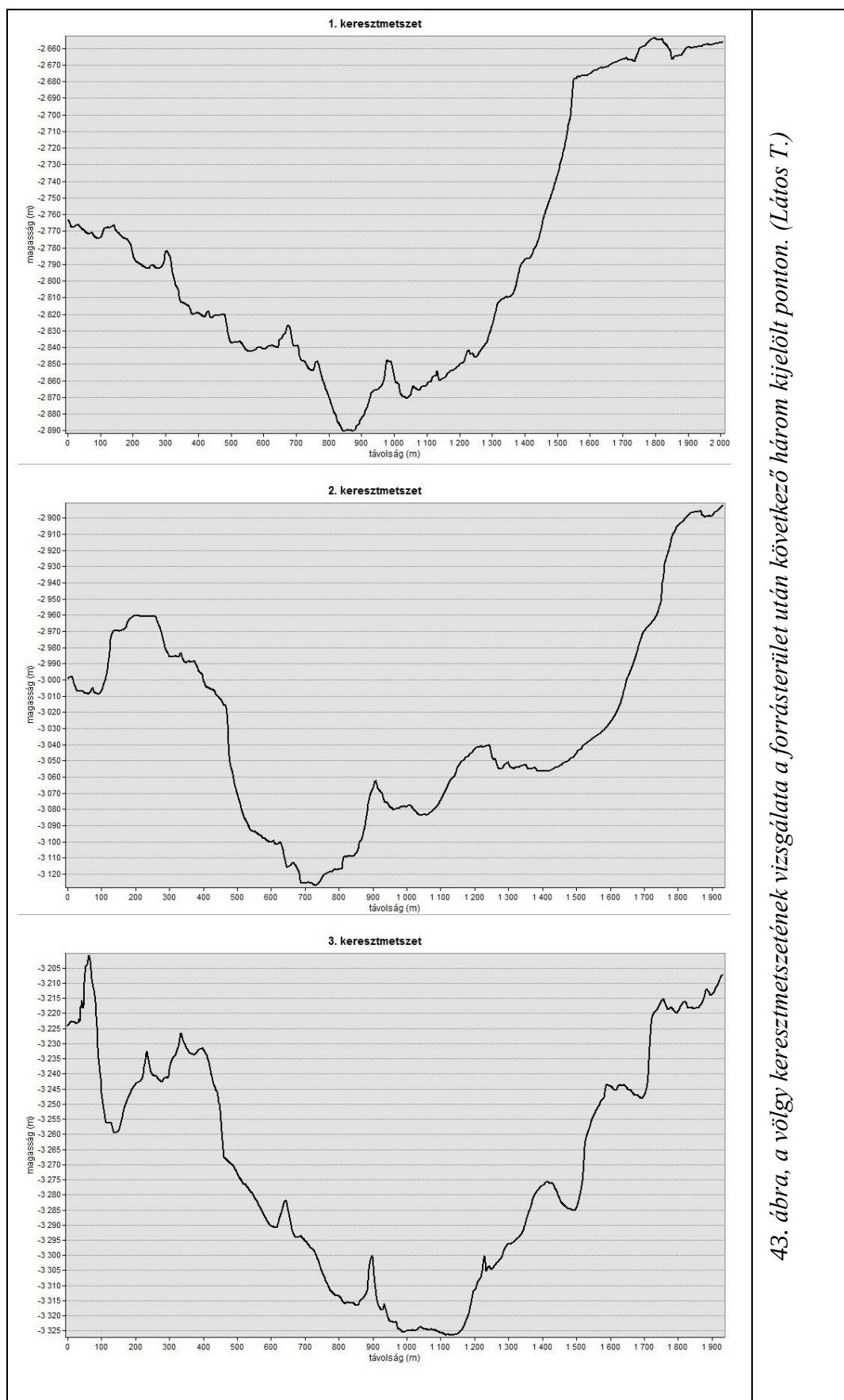
meder esése egyenletesnek mondható a forrástól a torkolatig, ezt támasztja alá a Langbein-féle homorúságot jellemző szám, amely megmutatja, hogy mennyire konkáv a görbe, tehát mennyire közelít a normál esésgörbéhez. Ezt úgy kapjuk meg, ha a forrás és a torkolati pontot összekötve megnézzük, hogy az esésgörbe felénél milyen magasságkülönbség van a vonal és a görbe között. Az így kapott értéket megszorozzuk kettővel, majd elosztjuk a teljes eséssel. Az így kapott érték a Kíváncsiság-völgyre vonatkoztatva 0,2. Ez alátámasztja, amit már szabad szemmel is jól láthatunk a görbén, hogy egyenletes a futása, a felső szakasz esése nem nagyobb jelentősen az alsó szakaszénál. Minél közelebb van ez az érték a nullához, annál kiegyenlítettebb az esés, és minél nagyobb, annál jelentősebb a különbség a két szélső szakasz esése között, ami a normális esésgörbe jellemzője. Összehasonlításképp az Amazonas esetén ez az érték 1,07. Ezen érték vizsgálatánál természetesen szintén figyelembe kell venni, hogy nem tudjuk az eredeti medermélységet vizsgálni mindenhol.

Az esésgörbe elemzésén kívül nyolc különböző helyen vizsgáltam a meder keresztmetszetének tulajdonságait 2km széles sávban, olyan módon, hogy a meder középvonala minden szelvényen azonos helyzetben legyen (42. ábra).

A forrástól számítva az első három keresztmetszet arra a területre esik, ahol a völgy a korábban már taglalt, bizonytalan eredetű fehér, erősen csipkézett üledékbe vágódik be. A meder alja ezeken a területeken erősen aszimmetrikus (42. ábra). Mivel ezen a szakaszon nem figyelhető meg jelentős mértékű feltöltődés, oka az lehet, hogy több szakaszban ment végbe a meder bevágódása. A meder alja közel sem mondható simának, hanem azt a durva szerkezetet mutatja, amely erre a világos üledékre a meder körül jellemző. Ez arra utal, hogy ellenálló anyagú üledékbe vágódott be a folyó, illetve, hogy nem volt tartós a folyó működése, különben ezeket a különbségeket elegyengette volna. A mederfalak is aszimmetrikus képet mutatnak, amennyiben összevetjük őket egymással, ennek oka, magának a fehér üledéknek a struktúrája lehet, ami lerakódásából és későbbi eróziójából ered.

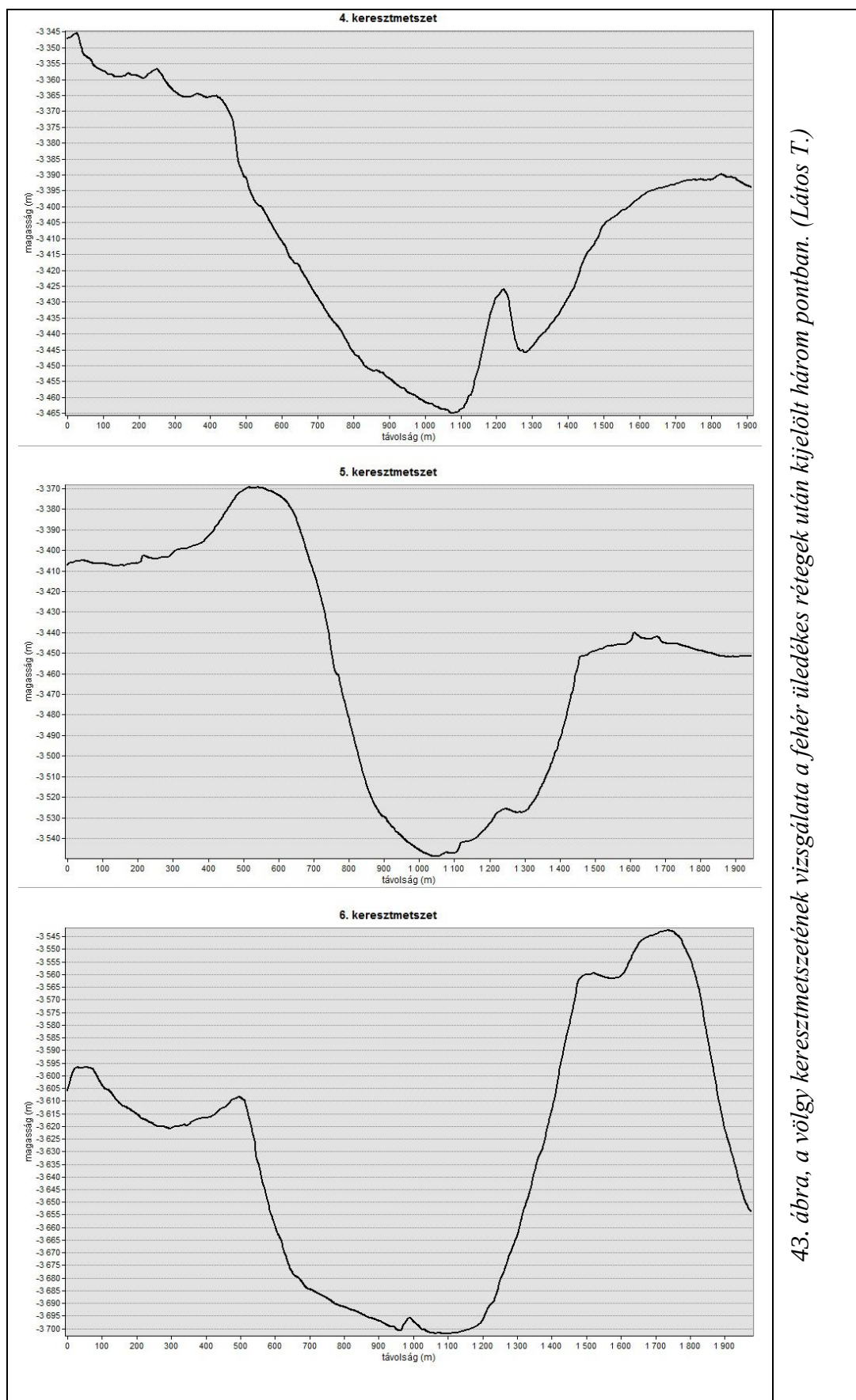


42. ábra, a meder keresztmetszet vizsgálatának helyei. (Látos T.)

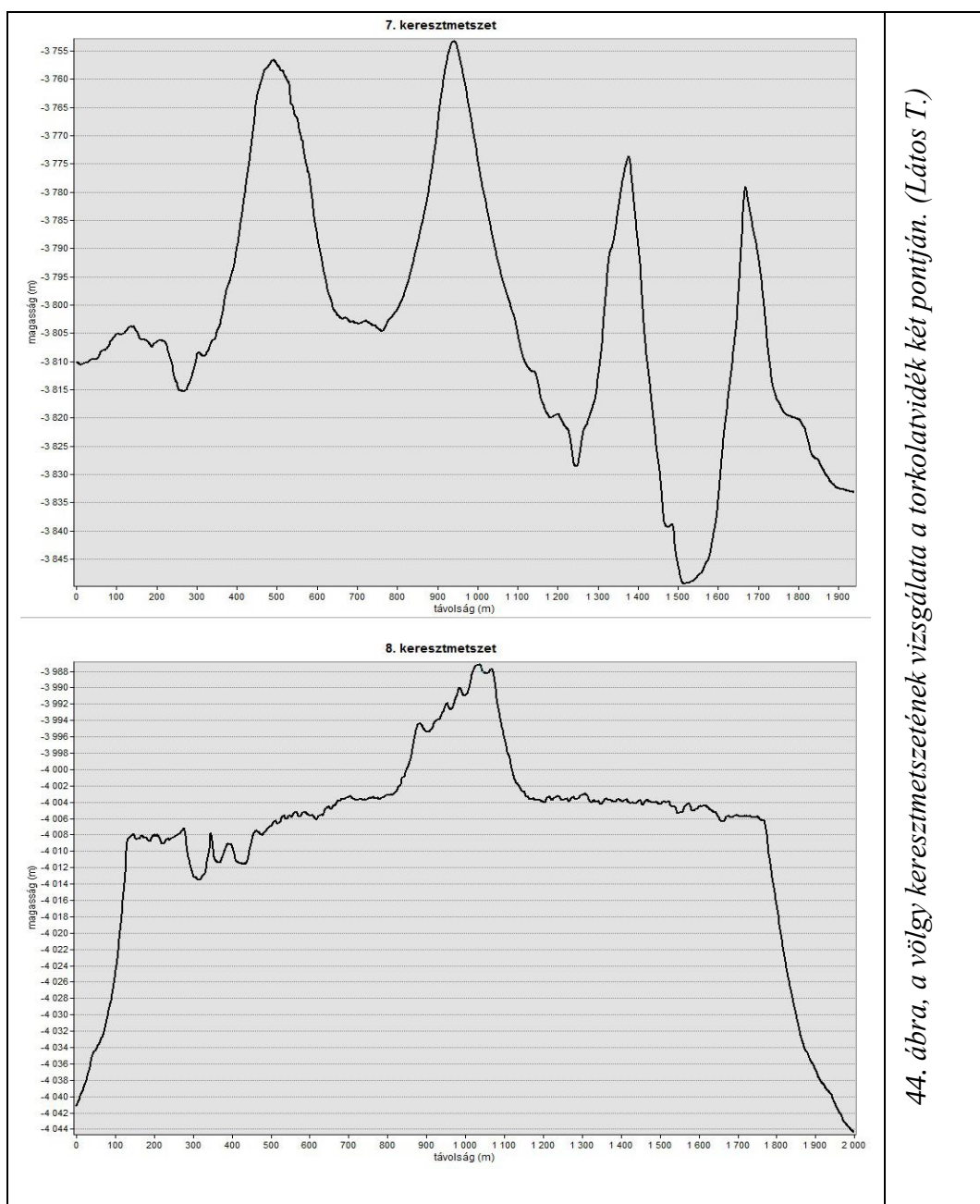


Ahogy a völgy kilép erről a világosabb üledékbe vágódó részről alapvetően változik meg a meder karakterisztikája, ez látható a 4-5-6. keresztmetszeteken (43. *ábra*). A meder formája egyre szabályosabb tál alakot vesz fel, az eleinte látható V, majd elnyújtott U alak után. Ebben az is szerepet játszik, hogy ezen a szakaszon már nagy volumenű feltöltődés is megfigyelhető, így az eredeti medermélység és karakterisztika nem nyomozható biztonsággal ezen a területen. Az előző metszetekkel szemben mutatott sima, szabályosabb mederforma a feltöltődésre és arra vezethető vissza, hogy itt már más minőségű rétegekbe vágta be magát a folyó, az előzőnél valószínűleg puhább kőzetekbe. Már a harmadik keresztmetszeten is kirajzolódik, de igazán a negyediken látható legjobban, hogy egy kisebb mellékág is becsatlakozott a főmederbe. Ennek közettani, morfológiai okai lehetnek, ugyanis a látható, hogy a világos felső üledékes részből kilépve két részre szakad a meder és kipreparált szigethegyek sora választja el őket az egyesülésig.

Nem csak a meder aljzata, de a partvonal futása is változó képet mutat. Felváltva magasodik az egyik part a másik fölé. Ennek oka, hogy eltérő mértékben preparálódtak ki gerincek és kisebb szigethegyek a két partvonalon. Ezeknek a jelentősége kiemelkedő a rétegtani vizsgálatok szempontjából, a Grand-kanyonhoz hasonlóan, ezeken a helyeken olyan vastagságban és olyan mélységig vizsgálhatók a hegységet felépítő rétegek, amelyre máshol nincs lehetőség a hasonló folyóvölgyeken kívül.



Az utolsó két keresztmetszet már a torkolat előtti szakaszt, illetve magát a torkolatot mutatja (44. ábra). A hetedik keresztmetszet a középső szakaszra jellemző, sima aljzatú, tál alakú mederképpel szemben egy teljesen ellentétes karakterisztikát mutat. Éles, fűrészfogszerű minta rajzolódik ki, amelynek oka, hogy ezen a részen kipreparált üledék tölti ki a meder közepét. Ez a jelenség az utolsó keresztmetszeten rajzolódik ki a legélesebben, ahol egy platószerű, éles peremekkel leszakadó réteg közepén szépen kirajzolódik ez a kipreparált üledékgerinc.



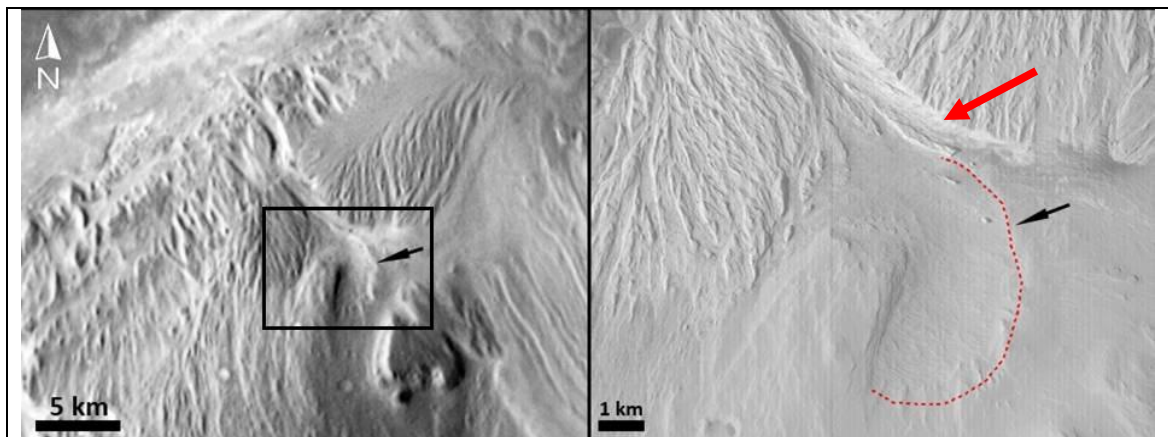
VII.4. A Kíváncsiság-völgy elemzése HiRISE felvételek alapján

A folyóvölgy kisléptékű morfológiai elemzését 25cm/pixel felbontású HiRISE felvételek alapján, illetve az ezekből készült digitális domborzatmodellek és ezekből kreált levezetett térképet segítségével végeztem.

Ahogy azt már többször is említettem, a völgy forrásterülete bizonytalan. Ennek több oka van, egyrészt egy kráter látható közvetlenül a völgy jelenlegi végződésénél, másrészt pedig a folyó működésének megszűnése óta is folyamatos a felhalmozódás a területen, a szél és a légkörből való kiülepedés miatt (45. ábra). Feltűnő azonban, hogy az említett kráter éppen a jelenlegi elvégződésnél helyezkedik el és a völgyhöz képest jelentős méretű, gyakorlatilag ugyanakkora az átmérője, mint a völgy szélessége. A kráter és a völgy kialakulása, illetve fejlődése között kapcsolat állhat fenn, amelyre három lehetséges elképzelésem van:

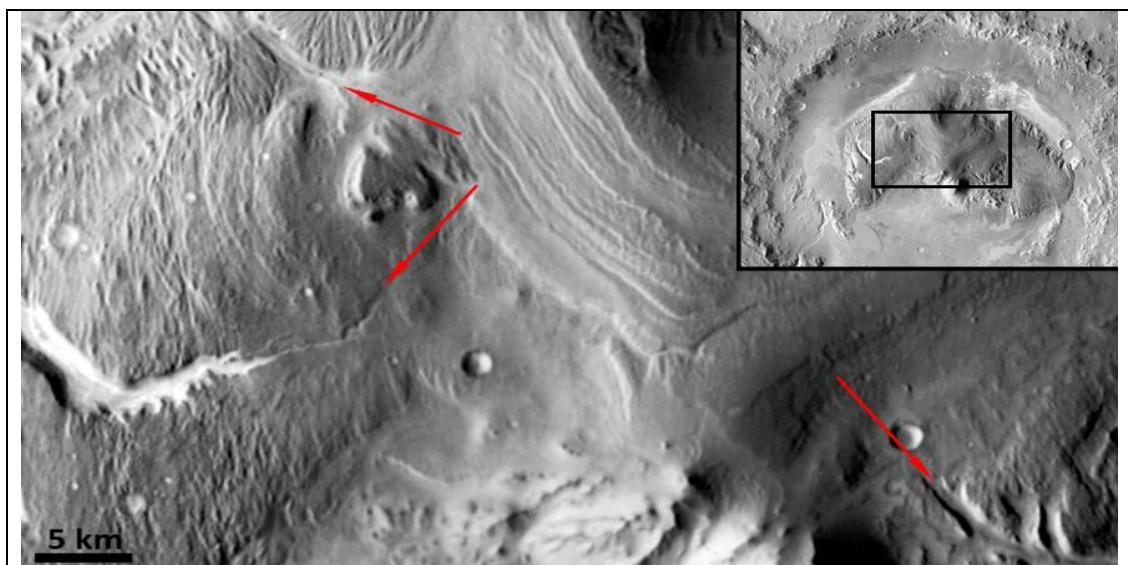
- a kráter és a völgy kialakulása között nincs kapcsolat, a kráter már a folyó keletkezése után jött létre és felülírta annak eredeti forrásterületét.
- a kráter kialakulása során, annak energiájának hatására a felszín alatti vízkészletek, vagy a felszín alatt fagyott állapotban lévő víz megolvadva a felszínre tört és innen származik a völgyet kialakító vízmennyiség.
- a kráter a völgy kialakulása után jött létre egy olyan ciklusban, amikor a völgy szárazon volt és az iménti elképzelés alapján felszínre jutó víz felújította a működését.

Mivel már maga a kráter több, mint a felét is szél által szállított, illetve légkörből kiülepedő üledék borítja és ez a kráter környezetére is elmondható, teóriákon kívül nehéz biztosat állítani arról, hogy hol található eredetileg a völgy forrásterülete és milyen hatások eredményeként jött létre. Ráadásul a további elemzéseket az is nehezíti, hogy nagyfelbontású HiRISE felvételek nem állnak rendelkezésre ettől a ponttól délre eső területekről.



45. ábra, a jelenlegi forrásterületnél látható féli eltemetett kráter az MRO CRISM, illetve CTX felvételén (fekete nyíllal). Piros nyíllal a kráteren kívül eső mederszakasz látható. (Látos T.)

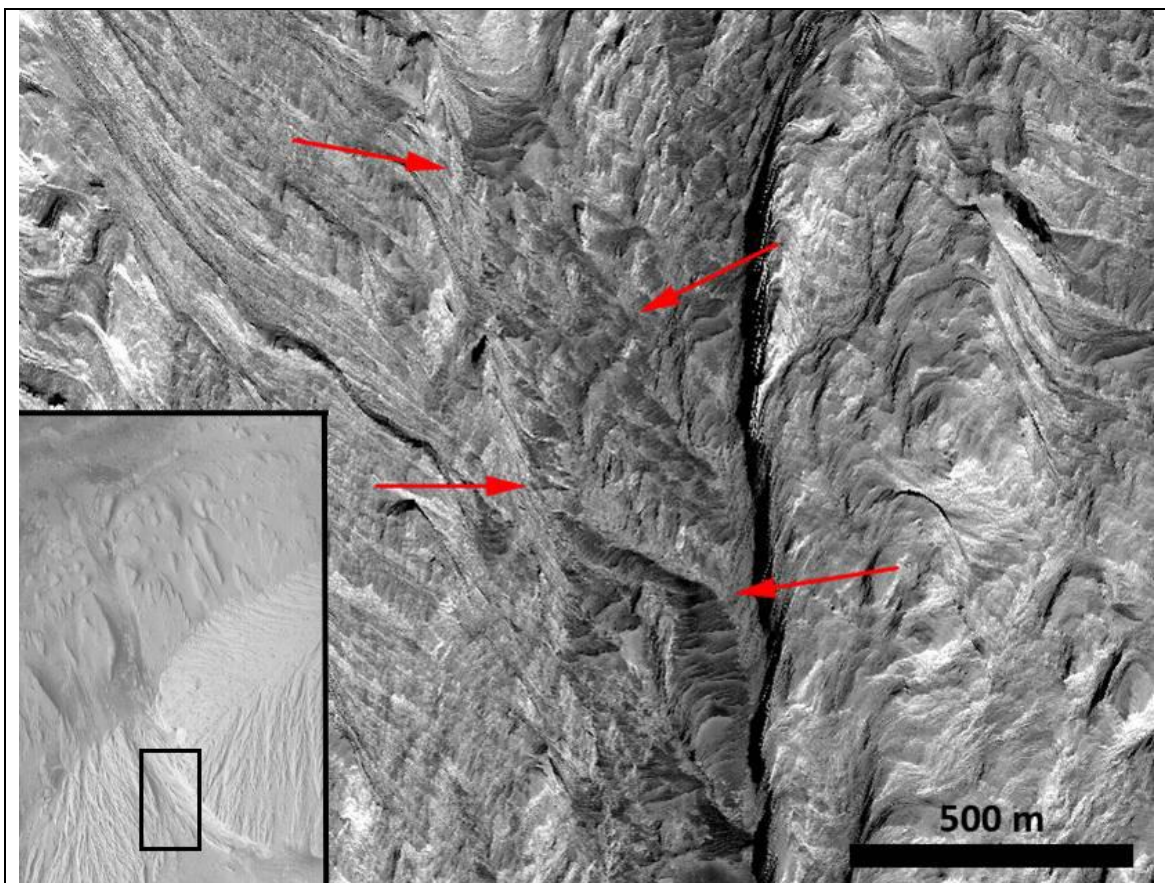
Ugyanakkor az is látható a fenti ábrán piros nyíllal jelölt helyen, hogy a kráterperem a völgy kezdeténél egy kipreparált gerincben folytatódik és a kráteren kívül eső részen, a gerinc másik oldalán is felfedezhető egy a völgybe tartó mederrész, tehát az kizárható, hogy csak a kráter hatására alakulhatott ki a folyóvölgy. Érdeemes megnézni, hogy a hegyoldalába más részeken bevágódó folyók és maga a Kíváncsiság-völgy is a legmagasabb pont felé mutatnak a forrásvidékükkel, tehát a legvalószínűbb, hogy eredetileg erről a területről eredhetett az összes folyam (46. ábra.)



46. ábra, a hegy csúcsrégiója felől lefutó folyóvölgyek. (Látos T.)

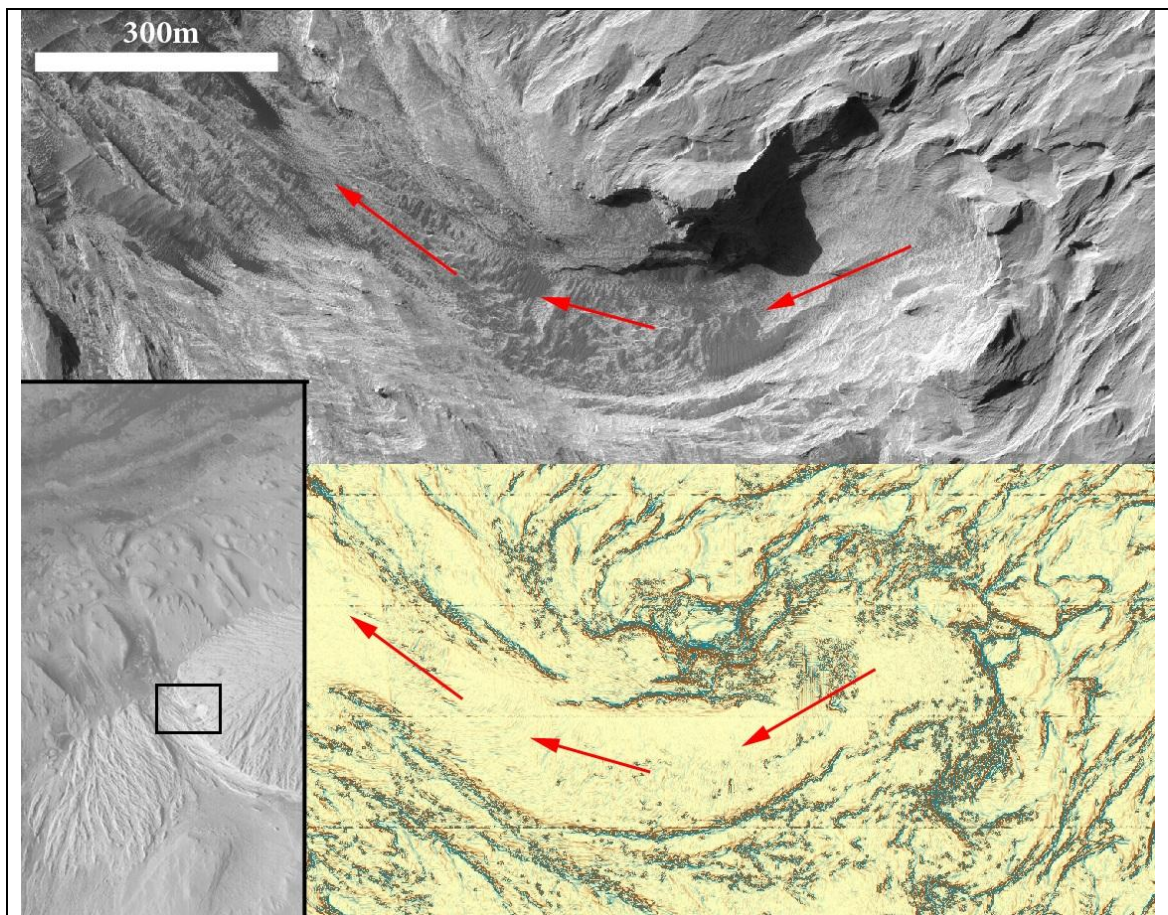
A forrásterület után következik a már sokszor emlegetett szakasz, ahol is a völgy a fehér, erősen felszabdaldódó üledéken halad keresztül. A nagyfelbontású felvételeken jól látható, hogy itt két tényező uralkodó egyrészt ennek a fehér üledéknek a szerkezete jól kirajzolódik a mederben is, másrészt pedig itt is látható a feltöltődés jele a sötétebb, szél által szállított anyaggal.

A digitális domborzatmodellre vetítve a képet dél felől felfelé, a forrásvidék felé tekintve azonban egy érdekes formájú üledékkitöltés rajzolódik ki (47.ábra). A sötét üledék egy kanyargó és a kráter felé tartó medret rajzol ki. Ez valószínűleg a folyóvölgy utolsó működése során formálódott, majd töltődött fel. Ennek alapján a folyó oldalazó erózióval is szélesíthette medrét.



47. ábra, a DDM-re vetített HiRISE felvételen jól kivehető az üledékkal kitöltött egykori kanyargó meder, a piros nyilak a kanyarulatokat jelölik (Látos T.)

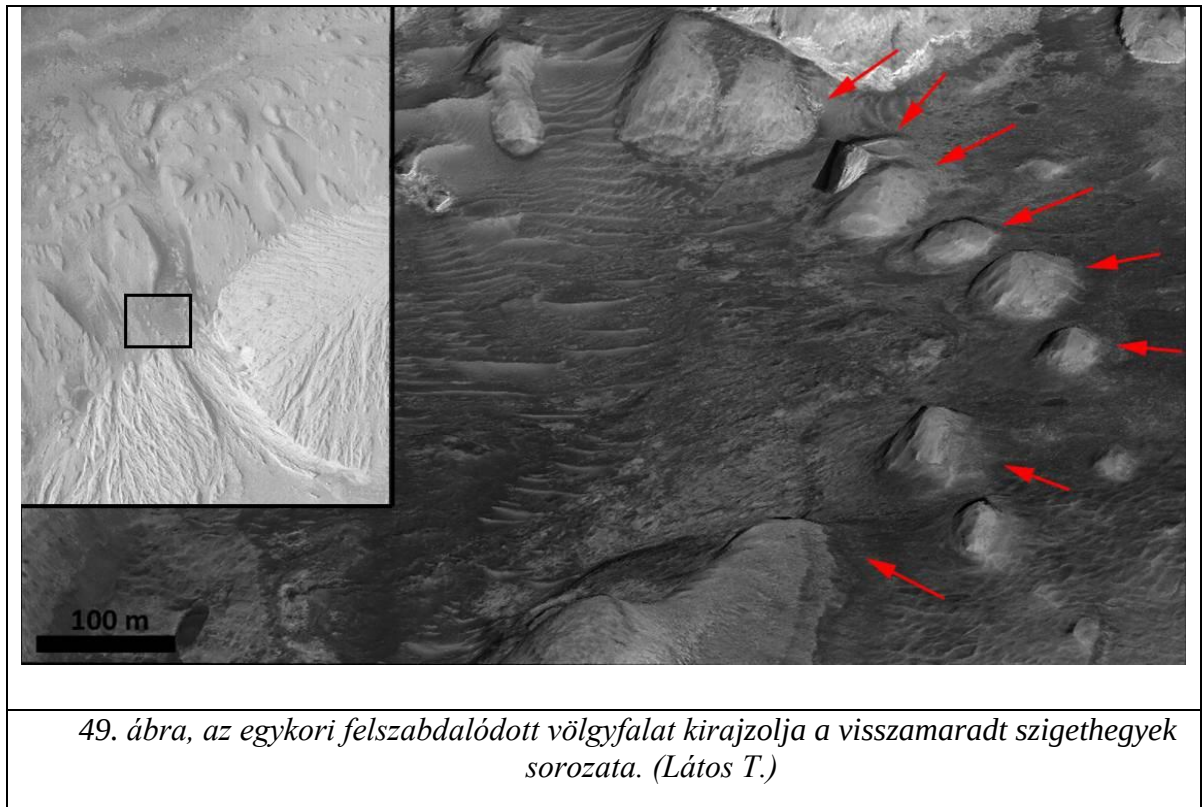
Szintén még ezen a világos üledékre eső szakaszon figyelhető meg egy nagyobb csuszamlás nyoma a nyugati mederfalán, amely egy határozott folyásnyomban folytatódik, majd csatlakozik a mederhez. Utóbbi forma élesen kirajzolódik a digitális domborzatmodellből levezetett sík görbület (plan curvature) vizsgálati térképen, amely a meredekség változását mutatja (48. ábra).



48. ábra, a meder oldalán látható csuszamlás nyoma HiRISE felvételen és sík görbületet megjelenítő térképen, a piros nyilak a csuszamlás irányát mutatják (Látos T.)

A világosabb üledékből kilépve alapvető különbség, hogy gyakorlatilag a meder teljes egésze sötét üledékkel van kitöltve, amit a szél halmozott fel a területen, valamint kis mértékben a légköri kiülepedés is gyarapított. A keleti mederpart szinte teljesen eltűnik, ami a feltöltődés mellett annak is köszönhető, hogy erősen erodálódott és

felszabdaldott ez a partszakasz a szélerózió hatására, de kis szigethegyek sorozataként követhető, hogy hol futhatott egykor. (49. ábra).



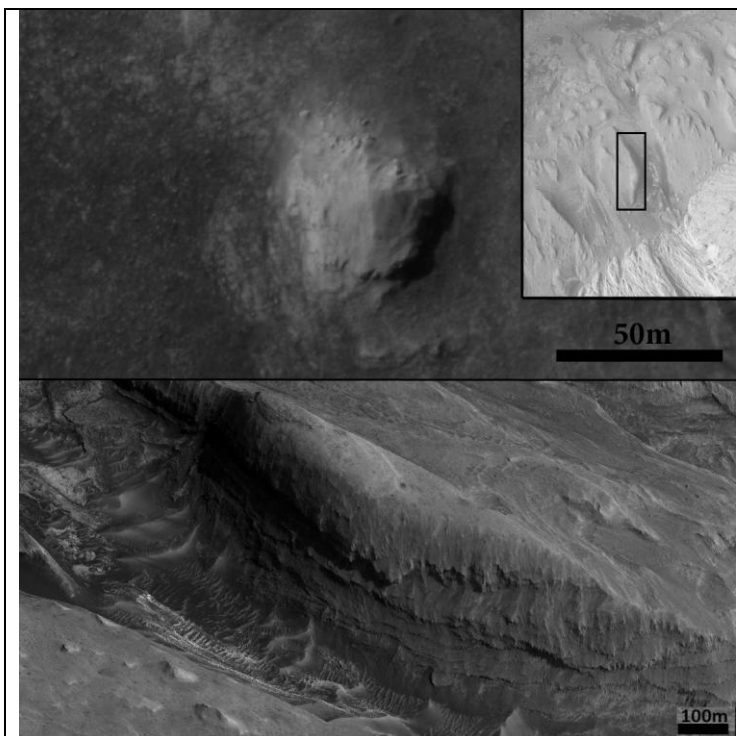
A kipreparált kis szigethegyek további eróziójához az aprózódás és a tömegmozgások is hozzájárulnak az eolikus erózió mellett. Ennek nyomai láthatók a nagyfelbontású képen, durva törmelék veszi körül őket, illetve omlások nyoma is felfedezhető (50. ábra).

Ezután egy épp ellentétes arculatú szakasz következik, ahol a keresztmetszet vizsgálatoknál már említett, magas, meredeken leszakadó partfalak közé érkezik a völgy itt tárulnak fel a hegységet felépítő idős üledékes rétegek (50. ábra). A meder felőli oldalát természetesen a víz pusztította, míg külső élét a szélerózió preparálta ki ezeknek a gerinceszerűen futó partszakaszoknak. Maga a meder aljzata továbbra is vastagon borított üledékkel, a homok itt már dűnéket is formáz.

Ezután fokozatosan érkezünk meg a torkolatvidékhez, amely talán a

legérdekesebb része az egész völgynek. A sötét üledék által takart völgyaljzat egy rövid szakaszon felszínre bukkan a homok alól és kirajzolódik egy kanyargó meder képe.

Annak ellenére, hogy ez a kis mederszakasz is üledékkal van kitöltve a partvonalak még nem töltődtek fel teljesen így szerencsére kirajzolódik egykori futása (51./a ábra). Rövid ideig tart ez a szakasz és egy még különösebb formába megy át fokozatosan. Az egykori medret egy kipreparálódott üledékgerinc váltja fel, tehát egyfajta geomorfológiai inverzió történt a területen (51./b ábra). Ez a jelenség volt látható a mederkeresztmetszet-vizsgálata-tok során is.

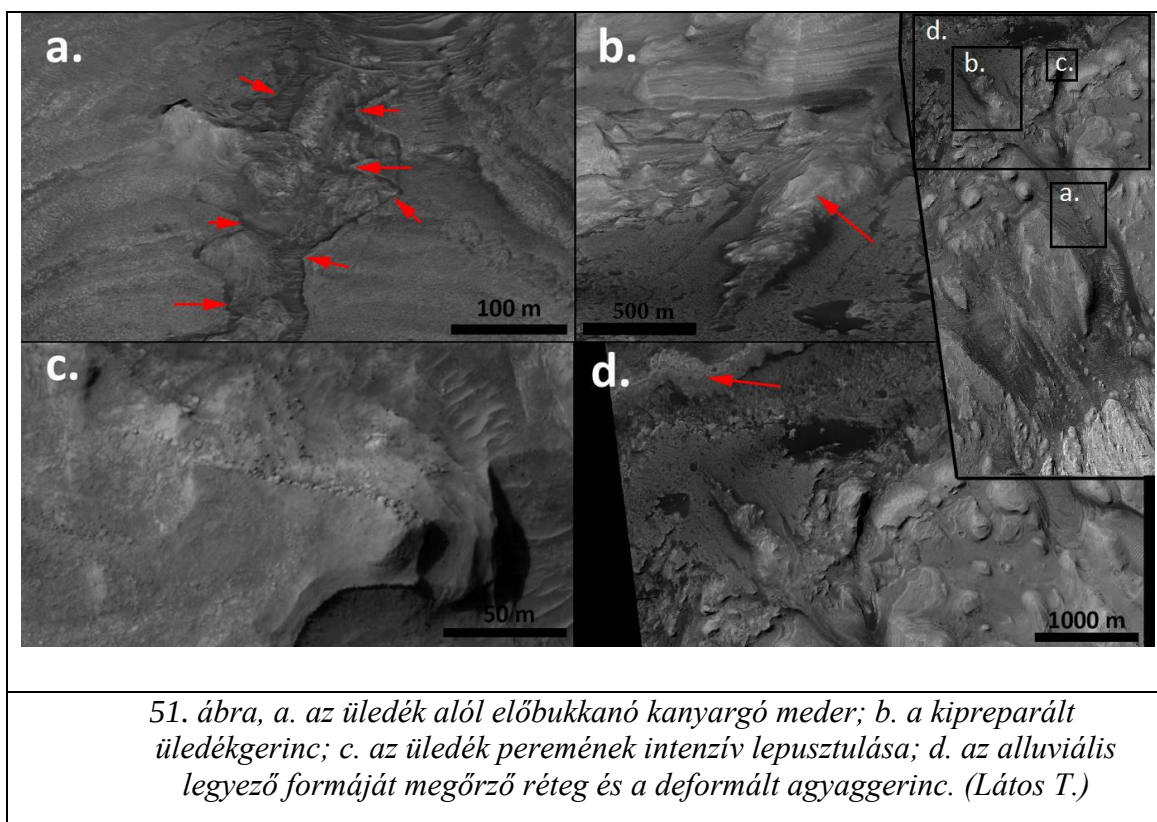


50. ábra, durva törmelékkel körülvett szigethegy és a meredeken leszakadó völgyfal oldalában látható rétegek sorozata. (Látos T.)

Ezen forma megjelenésével párhuzamosan a völgy partfalai fokozatosan kezdenek lealacsonyodni és felszabdaldódni szigethegyekre, amelynek a szélerózió lehet az elsődleges kiváltó oka. A kipreparálódó üledékgerinc egészen kifut a torkolatvidékre, folyamatosan szélesedik és magasodik, mígnem a torkolatvidékre kilépve, ahol már a partfalak teljesen eltűnnek, szétágazik és hosszan elnyúlik lealacsonyodva és elkeskenyedve a végénél. Tulajdonképpen tehát az egykori alluviális legyező maradékformáját láthatjuk itt, amely fokozatosan hátrál a völgyfő felé az erózióknak köszönhetően. Peremein erőteljesen pusztul az aprózódás, a szél és a tömegmozgások eredőjeként fellépő erózió miatt (51./c ábra).

Ehhez a formához kapcsolódóan egy további felszínforma-típus is

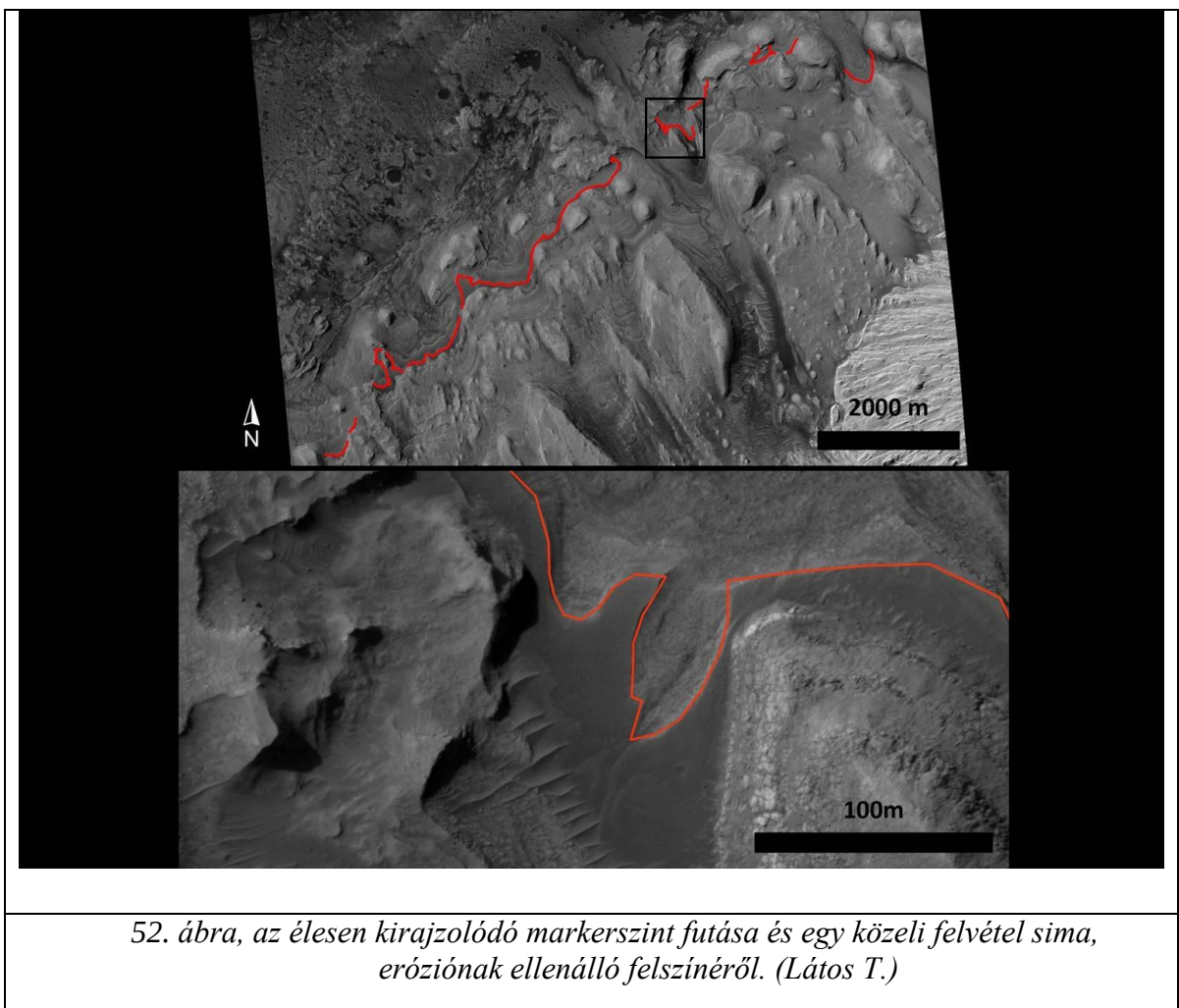
megfigyelhető. A fokozatosan hátráló üledék alatt egy egységes, barázdált felszínű réteglap tűnik elő, amelynek olyan alakja van, mint egy alluviális legyezőnek. Ez volt látható a 8. keresztmetszet ábrán, ahol előtűnt a kipreparált üledékgerinc alatt található, meredek falakkal leszakadó rétegtani egység. a pusztuló üledék erre a rétegre települt rá egykor és védte meg az eróziótól, tehát nem magát a folyóvízi üledéket látjuk itt, hanem egy más úton kialakult réteget. Viszont ennek köszönhetően láthatjuk, hogy milyen kiterjedésű és alakú volt egykor a folyó alluviális legyezője. Ezen kívül az is feltűnik, hogy a már korábban bemutatott kipreparált agyaggerincet, ami a völgy előterében fut keresztben deformálta a folyó által lerakott üledék (51./d ábra).



Az említett formákon kívül még egy említésre méltó jelenség figyelhető meg a torkolatvidék környékén, amely nem kapcsolódik a folyóvölgy fejlődéséhez. Ez egy élesen kirajzolódó sötét, sima felszínű, a többinél ellenállóbb réteglap, ami szinte az egész területen végig követhető, ahogy kibukkan a felsőbb rétegek alól változó mértékben (52. ábra). Jól látható a közeli felvételeken, hogy a környezeténél jóval ellenállóbb az erózióval szemben és közel sem aprózódik fel annyira, mint a környező rétegek, valamint a szél-erózió sem erodálja a felszínét jelentős mértékben. Az

ásványtani térképekkel összevetve az látható, hogy ez a markerszint egybeesik a szulfátok megjelenésével az agyagos rétegek fölött. Tehát ez a szint egy éles környezetváltozás határát jelölheti ki az üledékes rétegsorban.

Látható tehát, hogy egy rendkívül összetett felépítésű és fejlődésű területről van szó, ahol egyértelműen jelen vannak a folyóvízi felszínformálás egykori nyomai. Az elemzések összefoglaló eredményeit és az ezekből származó végkövetkeztetéseket a zárófejezetben mutatom be.



VIII. Összefoglalás, a Kíváncsiság-völgy fejlődése és morfológiája

A térinformatikai elemzések során bemutattam a völgy szűkebb környezetének jellemző geomorfológiai felépítését és magának a völgynek a részletes morfológiáját. A Mount Sharp kialakulására felállított elméletek és a vizsgálataim alapján a következő fejlődéstörténeti képet tudom felvázolni a völgy létrejöttére és fejlődésére.

A Mount Sharp több ezer méter vastag üledékeinek létrejöttére nem terjedtek ki kutatásaim, így nem is szeretnék egyértelműen állást foglalni egyik, vagy másik elmélet mellett. Annyi azonban bizonyos a keringőegységek ásványtani mérései és nagyfelbontású felvételei alapján, hogy a területen nagy mennyiségű víz volt jelen egykor, amely fluviatilis és akkumulációs munkát is végzett. Ennek nyomai vízhez kapcsolódó ásványok nagy mennyiségű megjelenése, a számos folyóvölgy a kráterperemen és a hegyoldalba vágódva, továbbá az alluviális legezók és még számos egyéb morfológiai jegy, mint például a kráteraljzaton látható lebenyes kráterek, amelyek jellemzően víztartalmú rétegekbe csapódó meteoritok esetén jönnek létre.

A Mount Sharp rétegein felfelé haladva azt a bolygófejlődési képet vetítik elénk, amit már a Mars történeti elemzésénél is felvázoltam, tehát a meleg vizes fázist felváltotta a savas, hideg, sós vizű időszak, amiben egy ideig ciklikus változás is megfigyelhető a tengelyferdeség-ingadozások miatt. Ennek megfelelően helyezkednek el alul az agyagtartalmú, majd a szulfátokkal kevert agyagos rétegek és feljebb a szulfátosak. A legfelső rétegek vas-oxidos jelei már azt mutatják, hogy a szél és a légköri kiülepedés váltotta fel a víz uralkodó szerepét, emellett pedig az aprózódás, a tömegmozgások és a szélerózió is folyamatosan jelen volt a területen.

A Kíváncsiság-völgy már akkor alakult ki, amikor az üledékes hegy rétegei valószínűleg már döntően nem a víz hatására formálódtak, hiszen a felső rétegek területén ered, ahol már csak gyenge szulfátos jelek észlelhetők és a vas-oxid kezd dominálni. Egyébként is a hegynek már szárazulatnak kellett lennie ekkor, hogy a folyóvölgy bevágódhasson az oldalába. Tehát ezek után már a szél, a légköri kiülepedés és esetleg a jégből való ülepedés növelhette a hegy tömegét.

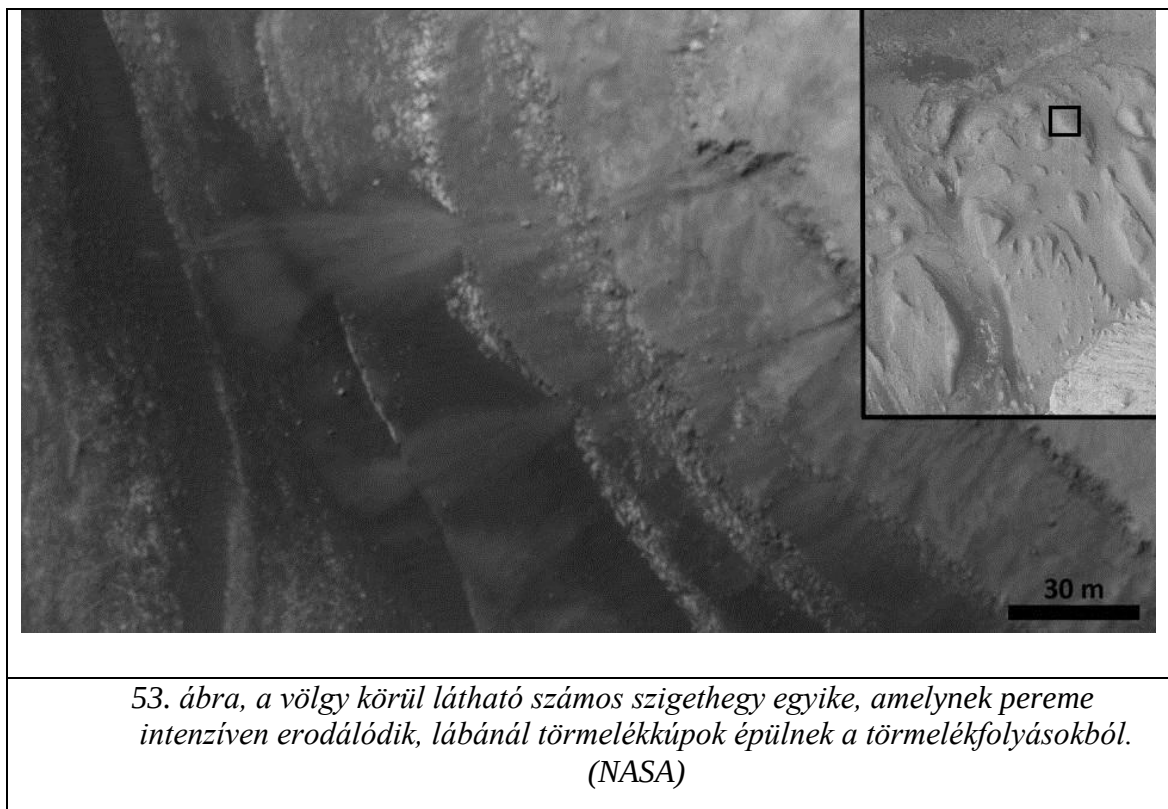
A folyóvölgy kialakulása bizonytalanságokat hordoz magában, ahogy az a

forrásterület elemzésénél bemutattam. Véleményem szerint az a legvalószínűbb, hogy a Mount Sharp központi részén eredhetett egykor, mivel mindegyik, a hegy oldalába vágódó folyóvölgy erre orientálódik forrásvidékével. Sajnos a Kíváncsiság-völgy esetében már nem követhető eddig a völgy futása a rárakódott üledékek és a jelenlegi forrásterületre települő kráter miatt. Véleményem szerint a kráter a meder felújulását is okozhatta, mivel a felső szakaszon kanyargó üledékkel kitöltött mederrészlet egyértelműen a kráterből indul ki, viszont a kráteren kívül is nyomozható a meder folytatása, tehát az is elvethető, hogy csak a kráter lehet a felelős a völgy kialakulásáért.

A folyó nem volt jelen állandóan a völgyben, hanem csak epizodikusan működhetett a köztes időszakokban pedig a szél halmozott fel benne üledéket. A fő kérdés, hogy honnan származhatott a völgyet kialakító víz, amikor már egy arid-semiarid környezet alakult ki a területen. Pont amiatt, hogy több folyóvölgy is azonosítható ugyanazon forrásterület felé orientálódva elvethető az a gondolat, hogy valamilyen lokális esemény folyamánként jelent meg ismét a víz, vagy sóoldat a területen, tehát nem egy csuszamlás, vagy aszteroida-beesés miatt törhetett a felszínre a víz. Véleményem szerint ebben az esetben is a tengelyferdeség ingadozásban kell keresni a választ. Amikor olyan erősen kilengett a bolygó forgástengelye, hogy az egyenlítői területek kerültek poláris-közeli helyzetbe megkezdődött a területen, egész pontosan a Mount Sharp csúcsrégiójában a légköri víztartalom kicsapódása és változó vastagságú jégrétegek alakulhattak ki a szél által szállított és a légkörből kiülepedő porral vegyítve. Amikor a bolygó tengelyferdesége elkezdett visszaállni és a terület kezdett több besugárzást kapni a por miatt sötétebb jégrétegek kezdtek felmelegedni és az ezekből kifolyt olvadékvizek hozhatták létre a hegyoldalba vágódó vízfolyásokat.

Ez a folyamat ciklikusan játszódhatott le, a melegebb időszakokban a fluviatilis erózió volt elsődleges, majd a hideg időszakokban a periglaciális területekre jellemző lepusztulás váltotta fel és a völgy feltöltődése. Valószínűbb, hogy ekkor már nem is tiszta víz, hanem sóoldatok folytak a völgyekben, mivel ebben az időszakban már nem volt stabil a víz a bolygó felszínén. Az utolsó működés óta, amit elképzelhető, hogy a kráter keletkezése váltott ki az erózió és az eolikus felhalmozódás az uralkodó a terület felszínformálásában. A völgy alsóbb részeit kitöltő sötét homok egyértelműen nem folyóvízi eredetű és még csak nem is a kráter területéről származik, mivel magas olivin-

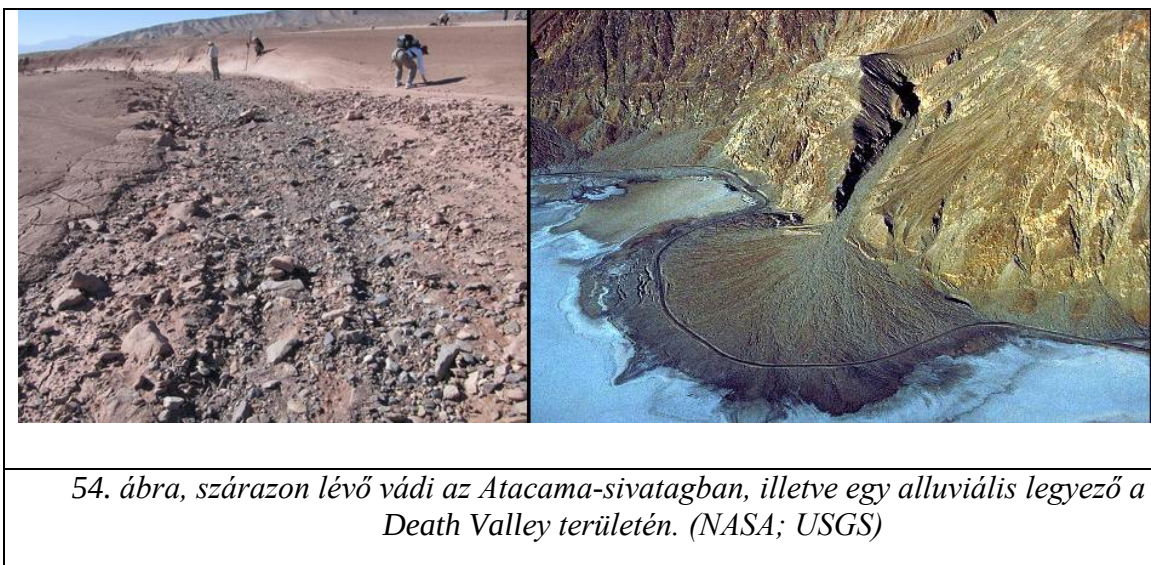
és piroxén-tartalmú, tehát vulkanikus eredetű, ami a krátert körülvevő számos vulkanikus terület egyikéről származhat. Az erózió leginkább a szél, az aprózódás és a tömegmozgások formájában érhető tetten. A hegyoldal elkezdett felszabdaldolni a völgy körül, rétegfejek preparálódnak ki, amelyeket aztán elsősorban a szél kis szigethegyekre szabdal fel, ezután pedig még erősebben érvényesül rajtuk az aprózódás és a tömegmozgások. Jellemzően ezeket a szigethegyeket törmelékszoknya veszi körül és törmelékkúpok alakulnak ki lábaiknál (53. ábra). Ez a folyamat persze már a folyóvölgy működése során is folyamatos volt, azon időszakokban, amikor jelen volt a víz a völgyben egyfajta semi-arid környezet volt a területen, ezt támasztja alá a Curiosity felfedezése is, amely a völgy előterében egy lapos, széles medrű egykori kisebb vízfolyás nyomát is megtalálta, amely a sivatagi vádik morfológiai jegyeit hordozza magán (BEATTY 2012). Maga a Kíváncsiság-völgy is vádi-szerűen működhetett az arid-semiarid periódusok váltakozásával.



A kipreparált üledékgerinc által megvédett alsóbb réteg segítségével az is nyomozható, hogy mekkora alluviális legyezőt épített az egykori folyó. Azért jelenthető ki, hogy ez a simább felszínű, egységes réteg nem maga a folyóvízi üledék, mert a

hegység lábánál, körben, szinte mindenhol látható ez a típusú rétegfelszín és nem csak folyóvölgyekhez kapcsolódóan. Viszont ez a réteg kevésbé volt ellenálló az erózióval szemben, mint a rátelepült üledék, ezért körülötte lepusztult ez a felszínre került réteg, míg itt megőrződött a völgyből üledék alatt és máig láthatóvá teszi az egykori legyező kiterjedését.

Nem egyszerű feladat földi analógiát találni, aminek a fejlődése hasonlítana erre a területre. A völgy és környezete több földi térség jellemző formakincsét hordozza magán, fagysivatagok, félsivatagok, hideg sivatagok morfológiája köszön vissza a területet vizsgálva. A folyóvölgyek működése vádiszerűen képzelhető el, ami leginkább a félsivatagos területekre jellemző, ezekre rengeteg példa hozható a Földről, pl. a hideg sivatagi éghajlatú Atacama-sivatag területéről, vagy Szaúd-Arábia területéről stb. (54. ábra). Az amerikai Death Valley-ben pedig hasonló alluviális legyezők láthatók a hegyoldalból kilépő időszakos vízfolyások torkolatánál, mint a Kíváncsiság-völgy esetén (54. ábra.). A lepusztulási formák is a sivatagi éghajlatra jellemző földi példákkal párhuzamosíthatók, az eolikus erózió, a tömegmozgások, az aprózódás dominanciája mind ezt mutatják. Véleményem szerint leginkább a hiperarid klímájú Mongólia és Kína területén fekvő Qaidam-medence formáival mutatnak párhuzamot a völgy körül látható eróziós formák, amelyek nem a víz munkájához kapcsolódóan alakultak ki: a kipreparált és felszabdaldódott rétegek, az erős aprózódás nyomai, az intenzív tömegmozgásos események, a törmelékszoknyák kialakulása (55. ábra).



Az bizonyosan állítható, hogy a jelenleg a Marson uralkodó globális éghajlati körülmények között ez a terület sivatagi, fagsivatagi állapotban van. A víz és stabilabb formája a sóoldatok manapság már nem alakítják recens módon a felszínt, legfeljebb pontszerű helyeken nagyon kis mértékben.



55. ábra, kipreparált formák a Qadhadha-medence területén. (USGS)

Az uralkodó felszínformáló tényezők hosszú időre a szél, a tömegmozgások és az aprózódás maradt. Nem vethető el azonban annak lehetősége, hogy egyszer újra bekapcsolódjon a hegyszemély formálásába a folyékony H_2O , ugyanis a felszín alatt lehetnek még jégtartalmú rétegek, amelyek valamilyen külső hatásra aktívvá válhatnak. Összességében tehát elmondható, hogy a Kíváncsiság-völgy és környéke nem halott ma sem, hanem folyamatosan formálódik és ez a jövőben is így lesz, a kérdés csupán az, hogy az aktuális külső körülmények és az éppen uralkodó globális éghajlat következtében a külső erők milyen arányban vesznek majd részt ebben.

Felhasznált szakirodalom

R.B. ANDERSON - J.F.BELL III. 2010: Geologic mapping and characterization of Gale Crater and implications for its potential as a Mars Science Laboratory landing site, The International Journal of Mars Science and Exploration,
http://marsjournal.org/contents/2010/0004/files/anderson_mars_2010_0004.pdf

BEATTY 2012: Curiosity Finds Ancient Streambed,
<http://www.skyandtelescope.com/news/Curiosity-Finds-Ancient-Streambed-on-Mars-171831321.html>

BIBRING, J.-P. ET AL. 2006: Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data. – Science, vol. 312., no. 5 772., pp. 400-404., doi:10.1126/science.1122659.

BISH 2012: NASA JPL,
<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/news/whatsnew/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=1385>

N.A CABROL – E.A. GRIN 1999: Hydrogeologic Evolution of Gale Crater and Its Relevance to the Exobiological Exploration of Mars, Icarus 139, 235–245 (1999)

J.E.P. CONNERNEY ET AL. 2005: - Tectonic implications of Mars crustal magnetism; Lunar and Planetary Science XXXVI nb.:1401

LE DEIT ET. AL 2011: Geological comparsion of the Gale crater mound to other Equatorial layered deposits (ELDs) on Mars. 42nd Lunar and Planetary Science Conference 2011, Abstr. nb.:1857.

DUDÁS 2008: Fagymintás területek a Marson, ELTE TTK FFI TFT, TDK dolgozat.

K. S. EDGETT 2010: Rock Stratigraphy In Gale Crater, Mars, Lunar and Planetary Science XXXII March 2001, Houston, Texas, Abstract No. 1005.

FAIRÉN ET AL. 2004: Inhibition of carbonate synthesis in acidic oceans on early Mars, Nature |VOL 431 pp. 423-426.

HARTMANN, W. K. – NEUKUM, G. 2001: Cratering Chronology and the Evolution of Mars. – Space Science Reviews, vol. 96., no. 1-4., pp. 165-194., doi:10.1023/A:1011945222010.

IRWIN *ET AL.* 2005: A NOACHIAN/HESPERIAN HIATUS AND EROSION REACTIVATION OF MARTIAN VALLEY NETWORKS. Lunar and Planetary Science XXXVI (2005) Abstr. nb.: 2221

KERESZTURI 2012: A legnagyobb marsjáró, Természet Világa, 143. évf., 8. sz. pp. 364-366

KERESZTURI-SIK 1999: Marsi felszínelakzat: A víz és a szél felszínformáló munkája, ELTE TTK FFI TFT, TDK dolgozat.

LÁTOS 2011: Egy üledékes síkság a Marson: A Victoria kráter fejlődéstörténete és ökosziszterekonstrukciója, ELTE TTK FFI TFT diplomamunka.

MELLON M. T. – PHILLIPS R. J. 2012: Recent gullies on Mars and the source of liquid water, Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012) Volume 106, Issue E10, pages 23165–23179

MILLIKEN 2011: The Mineralogical and stratigraphic Relationships at Gale crater, NASA 5th Mars Science Laboratory Workshop, http://marsoweb.nas.nasa.gov/landingsites/msl/workshops/5th_workshop/talks/Tuesday_AM/Milliken_MSLworkshop5_Final_opt.pdf

NAVARRO - GONZALEZ, R. *ET AL.* 2006: The limitations on organic detection in Mars-like soils by thermal volatilization – gas chromatography – MS and their implications for the Viking results. – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 103., no. 44., pp. 16 089-16 094., doi:10.1073/pnas.0604210103.

NILES – MICHALSKI 2012: Origin And Evolution Of Sediment In Gale Crater Through Ice-hosted Processes., 43rd Lunar and Planetary Science Conference (2012) 2575.

PELLETIER *ET. AL.* 2008: Recent bright gully deposits on Mars: Wet or dry flow?, Geology, vol. 36, pp.: 211-214.

PEDRO *ET. AL.* 1978: Peloidal nontronite formation in Recent sediments of Lake Chad, Chemical Geology, Volume 23, Issues 1–4, 1978, Pages 139–149

PÓCS T. ET. AL. 2004: Possible crypto-biotic-crust on Mars?, Proceedings of the Third European Workshop on Exo-Astrobiology, 18 - 20 November 2003, Madrid, Spain. Ed.: R. A. Harris & L. Ouwehand. ESA SP-545, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-856-5, 2004, p. 265 - 266

P. S. RUSSELL AND J. W. HEAD 2002: The martian hydrosphere/cryosphere system: Implications of the absence of hydrologic activity at Lyot crater, Geophysical Research Letters, Vol. 29, NO. 17, 1827, doi:10.1029/2002GL015178.

SIK 2011: Távérzékelés és felszínalaktan: Keringőegység-adatok térinformatikai integrálása a Mars jeges lejtőformáinak vizsgálatához, ELTE TTK FFI TFT doktori disszertáció.

SIK-KERESZTÚRI-HARGITAI 2005: A víz és a jég szerepe a Mars felszínfejlődésében, Földrajzi Közlemények CXXIX. (LIV) kötet, 2005. 3-4. szám, 159-176. o.

THOMSON ET. AL. 2010: Constraints on the origin and evolution of the layered mound in Gale Crater, Mars using Mars Reconnaissance Orbiter data, Icarus 214 (2011) 413–432

D. VANIMAN 2011: A Visit by Curiosity to Gale Crater's Stratigraphic Record of Sulfate and Claymineral Deposition, NASA MSL Landing Site Workshop, May 2011, http://marsoweb.nas.nasa.gov/landingsites/msl/workshops/5th_workshop/talks/Tuesday_AM/Vaniman_May_2011_Landing_Site_Workshop.pdf

WILLIAMS, R. M. AND M. C. MALIN, 2002: Evidence for mudflows in Kasei Valles, Mars, GSA Abstracts with Programs, v. 34, no. 6, Abstract 32-8.

JAMES J. WRAY 2012: Gale Crater: The Mars Science Laboratory/Curiosity Rover Landing Site, J. Astrobiol., in press, doi:10.1017/S1473550412000328.

Gyakran használt weblapok:

<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>

<http://mars.jpl.nasa.gov/mro/>

<http://crism.jhuapl.edu/>

Ábrák forrása:

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| 1. NASA | 30. Niles – Michalski |
| 2. NASA | 31. E. Hand |
| 3. NASA | 32. Látos T. |
| 4. NASA | 33. Látos T. |
| 5. Niels Bohr Institute, Mars Group | 34. Látos T. |
| 6. NASA | 35. Látos T. |
| 7. Kevin Gill | 36. Látos T. |
| 8. Sik-Kereszturi-Hargitai | 37. Látos T. |
| 9. NASA | 38. Látos T. |
| 10. NASA | 39. Látos T. |
| 11. NASA | 40. Látos T. |
| 12. Sik A. | 41. Látos T. |
| 13. NASA | 42. Látos T. |
| 14. NASA | 43. Látos T. |
| 15. NASA | 44. Látos T. |
| 16. ESA | 45. Látos T. |
| 17. Anderson et. al. | 46. Látos T. |
| 18. NASA | 47. Látos T. |
| 19. NASA | 48. Látos T. |
| 20. Anderson et. al. | 49. Látos T. |
| 21. NASA | 50. Látos T. |
| 22. NASA | 51. Látos T. |
| 23. NASA | 52. Látos T. |
| 24. Anderson et. al. | 53. Látos T. |
| 25. NASA | 54. NASA |
| 26. Kereszturi Á. | 55. NASA, USGS |
| 27. USGS | 56. NASA |
| 28. NASA | |
| 29. Anderson et. al. | |