

Válasz az opponensek kérdéseire

Kereszturi Ákos „Földtudományi módszerekkel a Földön kívüli víz nyomában” című, az MTA doktora cím megszerzésére beadott értekezésével kapcsolatban

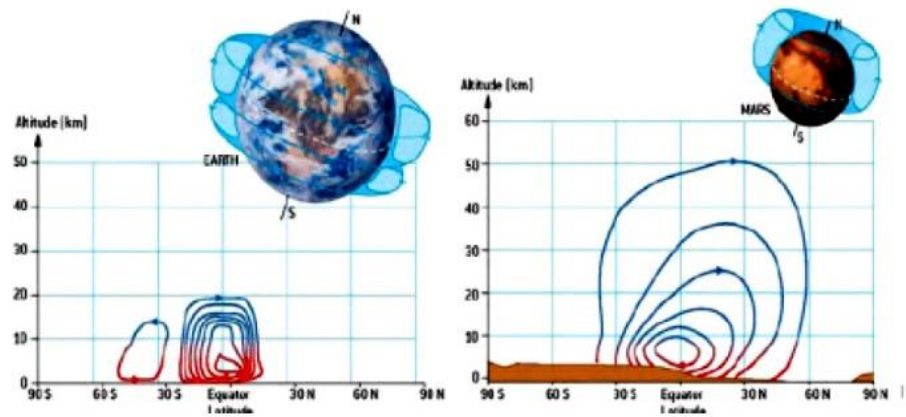
Tisztelt Szabó Gyula!

Köszönöm a dolgozat elolvasását, és a kapcsolódó megjegyzéseket. Az alábbiakban a három opponens kérdéseire külön-külön válaszolok. Az eredeti kérdést / megjegyzést idézőjellel és félkövér stílussal, balra törve jelölöm és sorszámoztam, míg az általam adott választ egy táblával jobbra helyeztem el. A válaszokhoz kapcsolódó egyes forrásokat a dokumentum legvégén soroltam fel. A bemutatott ábrák külön sorszámozást kaptak, ahol a dolgozatban eredetileg szereplő ábrákra hivatkozom, ott ezt külön jelzem.

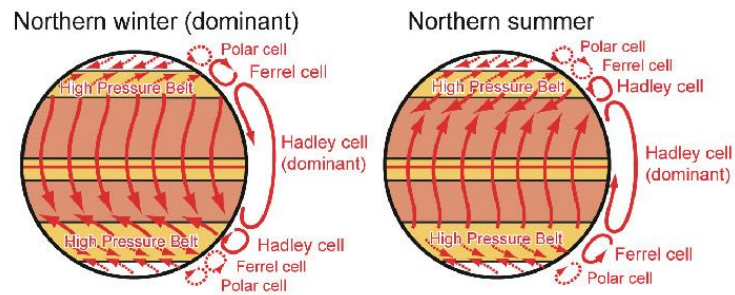
„Nagyobb hiányosságnak érzem, hogy a fogalmak és folyamatok között akad olyan, amit explicit módon (pl. a Bevezetésben taglalva) vagy legalább implicit módon (mint a dűnék stoss és lee oldalai esetében ez megtörténik, helyesen) szerencsés lett volna megmagyarázni. Kérem a védésen mutassa be:”

2/1. Hadley-cella kialakulását és szerkezetét a Földön és a Marson;

- Hadey-cellának nevezik azt a Földön, illetve más légkörrel és napfényt elnyelő felszínnel bíró égtesteken fellépő azon légáramlási rendszert, amely az erősebben besugárzott, alacsonyabb szélességű térségben kitáguló és felmelegedő légtömegek feláramlását, a magasban a pólus felé mozgását, majd közel a térítők térségében a leáramlását jelenti. A Hadley-cellák erősen befolyásolják a földi és a marsi globális légáramlást, továbbá mindkét bolygón a ferde forgástengely miatt időben változó beeső napsugárzás eloszlás nyomán hol az északi, hol a déli féltek fölé tolódnak. Mivel a Marson nincs nagy hőtehetetlenségű óceán, továbbá a gyenge az üvegházhatás, ezért a besugárzással kapcsolatban a földinél élénkebb az évszakos és napszakos hőváltozás. Mindezek felett függőlegesen kiterjedtebb az áramlás a földihez képest (1. ábra), részben a Mars gyengébb gravitációs tere miatt. A Marson a Hadley-cellák erősen eltolódnak az adott nyári félteke irányába, és esetenként párjuk a téli féltekéről hiányozhat is (2. ábra). A Marsnál eltérést okoz a föld esethez képest továbbá, hogy a porviharos déli nyáron a déli cella erősebben felmelegszik a légköri por fényelnyelése miatt (Magalhães 1987), ugyanakkor a déli féltekén a magasabb felszín valamivel csökkenti itt az áramlás függőleges kiterjedését.



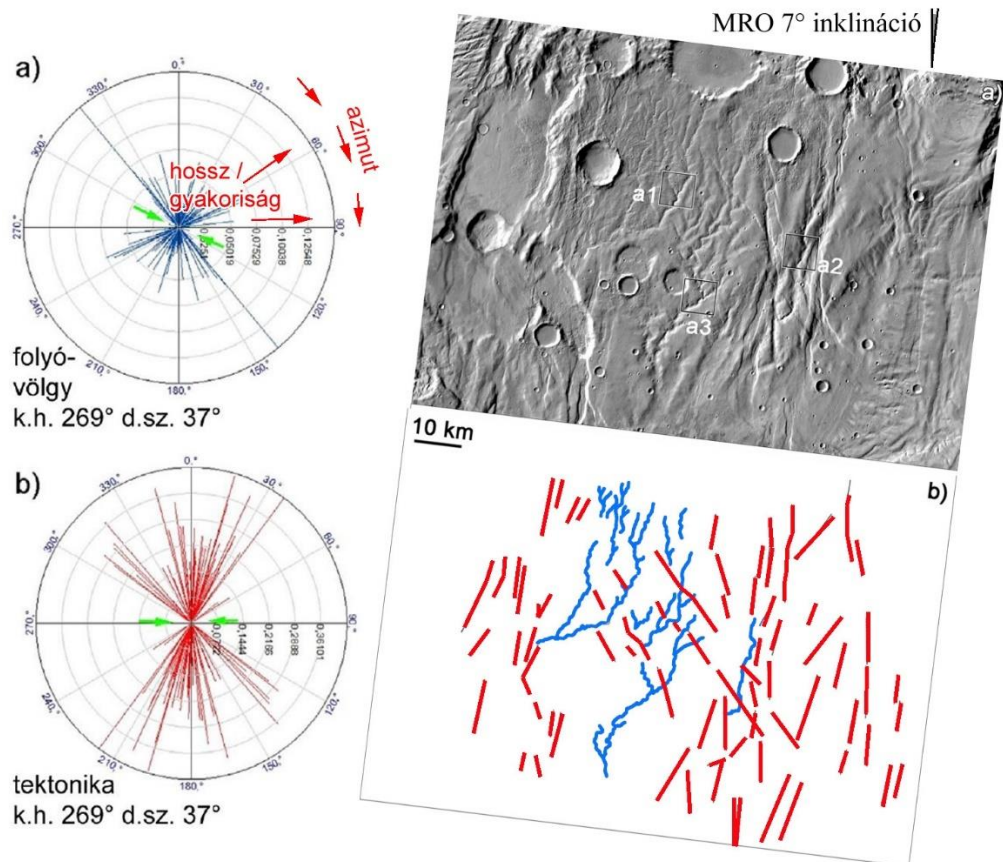
1. ábra. Hadley áramlással fellépő szélrendszerek skálája a Földön (balra) és a Marson (jobbra) (Forget F. et al. 2006 nyomán).



2. ábra. Az északi helyi tél (balra) illetve az északi nyár (jobbra) idején eltorzult Hadley cellák sematikus helyzete a Marson (Haseawa 2012 nyomán).

2/2. A dolgozatban bemutatott rózsadiagramok szerkezetét és olvasásának módját;

- A rózsadiagramok a vizsgált tektonikus törések és folyószakaszok azimutális irányeloszlását mutatják, amiket a képekkel együtt érdemes értelmezni (3. ábra).



3. ábra. A dolgozat 5.5 ábra kiegészítése egy területi példával, rajta a folyóvölgy (piros) és tektonikus lineamentek (kék) irányeloszlásával (balra), jobbra lent a piros a tektonikus törések, a kék a folyóvölgyek futását jelöli. A jobboldali ábra a fényképet készítő MRO inklinációja miatt nem áll függőlegesen, miközben az északirány a rózsadiagramokat felfelé van.

2/3. Illetve azt, hogy a marsi klatrátok lebomlásának említésénél milyen szerkezetű klatrátok lebomlására gondolt, milyen folyamatban.

- Legvalószínűbb a metánhidrát klatrát, amely a modellszámítások alapján (Gloesener et al. 2021) a mai éghajlati viszonyok között magas szélességen néhány méter mélységben, az egyenlítőnél néhányszor 10 m mélyen stabil lehet. Ennek vagy hasonló más pl. CO₂-klatrátok az esetében a lebomlás nyomáscsökkenéstől vagy melegedéstől történhet. Modellszámítás alapján (Kargel et al. 2003) a káoszterületeken fellépett kezdeti kisebb nyomáscsökkenés (pl. jég olvadása és a keletkezett folyadék felszínre préselődés) avagy hőmérséklet emelkedés (alulról érkező vulkáni fűtés) hatására fellépő klatrát lebomlással víz és gáz fázis keletkezik, amely tovább erősíti a káoszterület felbomlását és összeomlását. Az ilyen klatrát lebomlás akár tavak keletkezésében is közreműködhet (Kite et al. 2017).

2/4. A 15. oldalon írt albedómeghatározási módszer hibáját valamilyen forrás alapján becsüli (“néhány % lehet”) és a lehetséges hibaforrásokról a felszín szerkezetét érintő faktorok tekintetében részletesen beszámol. A kérdéses geometriai albedo a visszaszórás adott geometriájú mértékét írja le, függ a fényforrás, a megfigyelő és a megvilágított sík kölcsönös geometriájától. Ahol légkör van (pl. a Marson), ott a megvilágítás nem is egyetlen fényforrás, hanem egy inhomogén felület, és napszaktól függ a pontos fényeloszlás. Mindenképpen bonyolult viselkedésű mennyiségről van tehát szó; ha végzett azonos területeken különböző megvilágítás mellett méréseket, érdemes lenne ezeket is összevetni, és az albedo hibája meghatározásánál bemutatni; vagy ezekkel foglalkozó szakirodalomból idézni eredményeket (elég általános és fontos kérdéskör ahhoz, hogy sok helyen megtalálható legyen a tárgyalása).

- Az albedo elemzése valóban összetett művelet a Marson, amelynél a hiba illetve a bizonytalanság számítása nehéz. Ezért olyan képeket választottam ki, amelyekben a befolyásoló tényezők hatása minimális és várhatóan az elérhető legjobb közelítést adják az albedonak, továbbá egy független forrás (TES műszer) kontroll mérését is felhasználtam. Napszak szerint más megvilágításviszonyok alatt nem készültek képek, mivel az MRO szonda napszinkron pályán halad és általában azonos helyi időben készít felvételeket. A potenciális hiba illetve bizonytalanság forrásai az alábbiak:

- A felszín anyagi jellemzői, fényvisszaverő és fényszóró jellegének változékonysága az egyik legnehezebben becsülhető paraméter. Ez esetben Lambert (avagy Lambertianus) albedo közelítést használtam a dolgozatban, amiben egyszerű, izotróp módon szóró felületet feltételeztem, ahol mai ismereteink alapján a várható fő komponensek és közelítő referencia albedo értékek az alábbiak: alapkőzet (<0,15), por (>0,25), vízjég (0,2-0,5 vastagságtól függően) szén-dioxid jég (>0,4) (Jones et al. 2014). Az albedot tized érték, ritkábban század érték pontosságáig használják jellemzően a szakirodalomban a Mars esetében a sok befolyásoló tényező miatt. Ebben a munkában a mért albedo a HiRISE kamera vörös csatornájának (RED channel, 750-830 nm) ún. DN (data number) értékeiből származik.
- A felszín geometriai jellemzőit tekintve a domborzatnál kevésbé ismert a kis méretskálájú (méteres, 10 méteres) lejtőszög és lejtés irány, amelyekre nincsen elérhető adat (a domborzati mérések nagyságrenddel rosszabb felbontásúak, fotoklinometriai alapú becslés a változékonny kinézetű felszín miatt nem megbízható, megfelelő sztereó képpárok pedig nem elérhetőek ezen területekről). Az felszín geometriáját az albedo becslésénél „cos i”-vel szokták figyelembe venni, ahol „i” az „incidence angle” (a helyi merőlegeséhez viszonyított beesési szög), ennek bizonytalansága a domborzat kis méretskálájú ismeretének hiányához kapcsolódik. A mérési helyeket úgy választottam meg, hogy közel sík területeket vizsgáltam a hőmérsékelt becsléhez (7. tézispont), ahol a lejtőszög km-es méretskálán ismert, ami 3 foknál kisebb mértékben változott a vizsgált területen, majd az így nyert albedo értékek átlagát használtam.
- Légköri szóródás: itt tiszta légkör esetén gyenge hatás várható, mivel a légköri sűrűség közel 100-szor kisebb mint a földi, és a porviharokat

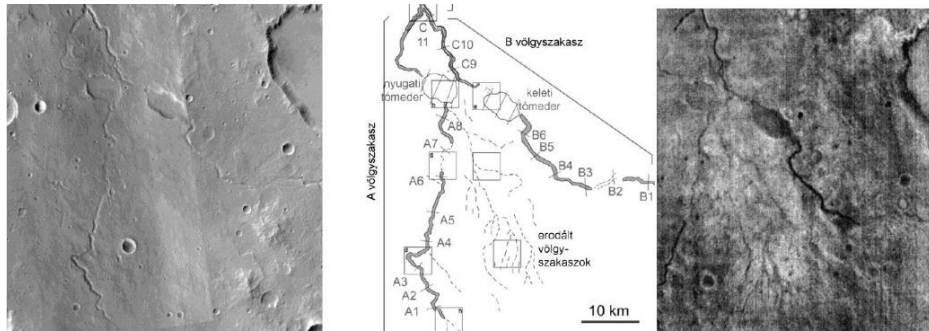
kivéve általában igen átlátszó a légkör (a gázmennyiséget tekintve kb. olyan mintha a Földön 40 km magasról néznénk az eget), noha a légkör hatása a légköri por és vízpára felhők által erősödhet. Ez elvben befolyásolja az albedo értékét, de ez a hatás a tél végi, általában porszegény és igen tiszta légkör alatt készült képeken csekély.

- A detektor adatrögzítésének jellemzői is befolyásolják a mért értékeket. A felhasznált radiometrikusan kalibrált képek eredeti „flat field” ellenőrzése pixelenként 0,5% alatti eltérést mutatott, míg az átlagos 2,5 másodperces expozíciós időknél a DN értékek hibája 20 körüli (átlag jól megvilágított részekenél a DN 3000-4000 körüli), ami a használt kódolásnál max. 1,7% eltérést jelent. Ennek megfelelően a Planetary Data System rendszeréből letöltött képek esetében az egy látómezőben felvett DN értékek eltérései 2% alattiak voltak.
- Kontroll mérések: a megbízható albedo értékek meghatározásában a HiRISE kamera képei mellett, egy attól független adatforrás: a Thermal Emission Spectrometer (TES) adataival korreláltam a számított albedo értékeket, ahol egymást néhány nappal követően készült HiRISE kép alapján elemeztem a felszínrészletek albedójának időbeli változását. A TES adatok térbeli felbontása a HiRISE detektorénál rosszabb, de a trendek és az átlagok egyezése alapján a TES méréseivel egyeznek a HiRISE képekről mért albedo értékek.
- Értelmezés: A fentiekben bemutatott bizonytalanságok ellenére az alábbiak miatt tartom indokoltnak a vizsgált albedo értékek használatát:
 - Az albedo a 6. és 7. tézisnél jelenik meg, de a 6. tézis esetében csak az albedo különbségek mértéke számít. A 6. tézisben tehát az albedo különbségek vizsgálata volt a lényeges, amikor egymáshoz közeli (néhány méterre lévő) pontok összehasonlítását végeztem. Ezeknél a légköri szóródás hatása várhatóan hasonló, és az értékeket a domborzat sem befolyásolta jelentősen.
 - Az abszolút albedo mérés a vízjéggel borított területen érdekes, ahol a geometria gyenge ismerete növeli a bizonytalanságot (ez a 7 tézist érinti). Az itt kapott albedo mért érték 0.26 és 0.32 között mozgott (erre értettem a kisebb mint 10% a bizonytalanság a maximális 1-es albedo értékhez viszonyítva), a modellben a 0,29-es átlagos albedo értéket használtam.
 - A megfigyelések alapján az albedo a sötétebb vízjéggel borított azaz CO₂ jégmentes területeken szórt a legkevésbé, a domborzat változékonyságának hatása itt volt a legkisebb.
 - Mint azt a 86. oldalon írtam: „Az így nyert eredmény a legjobb közelítése a valódi felszíni albedónak, amelynek még pontosabb értékét jelenleg nem lehet meghatározni, mivel a kis méretskálájú domborzat pontosan nem ismert.”

2/5. KÉRDÉSEK:

2.5.1. A 3.9. ábrán látható “erodált völgyszakaszok” ránézésre akár széleróziós folyamatok is lehetnek. Vannak további érvek ezeknek az erodált formáknak a vizes eredete mellett?

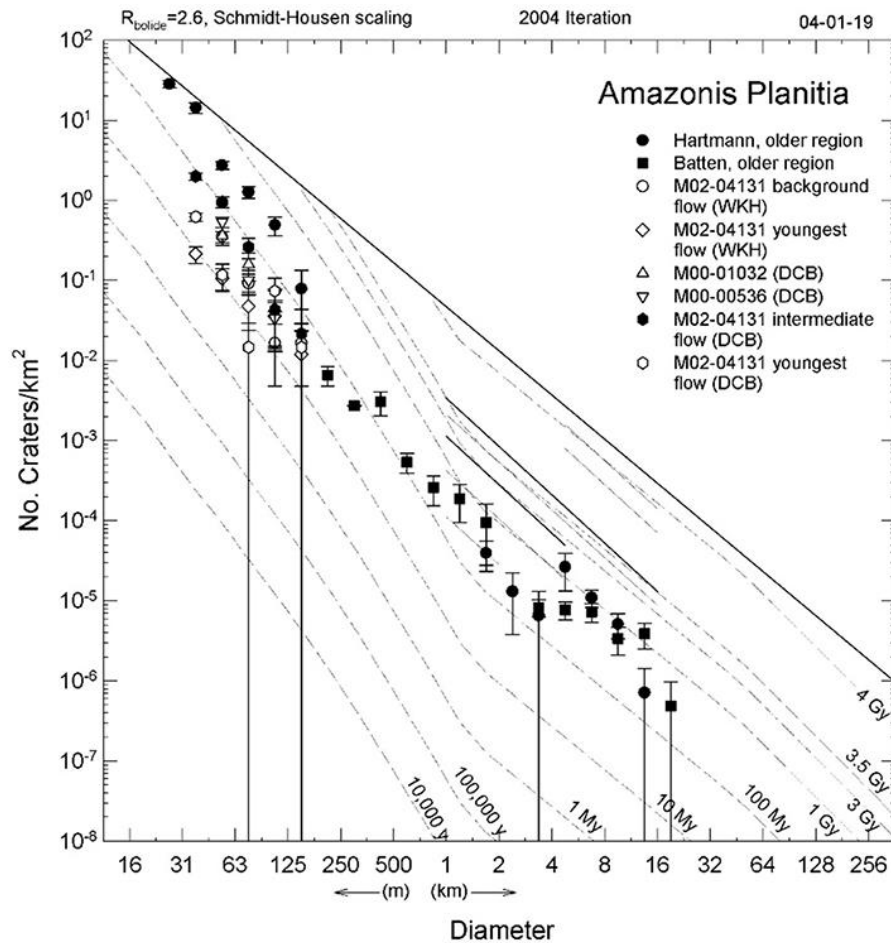
Az alábbi 4. ábrán együtt ábrázoltam a dolgozatban szereplő 2.3 és 3.9 képeket, mivel ugyanazt a területet mutatják. Itt a középen lent, szaggatott vonallal feltüntetett erodált völgyek azok, amelyek a bíráló alapján akár széleróziótól is keletkezhetnek. Mivel a környező völgyekkel párhuzamosan lejtőirányban haladnak, és igen elnyúltak valamint kanyarognak, más és egyértelműnek látszó folyóvölgyek mellett, azokkal párhuzamosan, ezért valószínűsítettem, hogy folyóvízi eredetűek.



4. ábra. Optikai kép (balra), a völgyek morfológiájának interpretációja (középen) és a terület éjszakai, infravörös felvétele (jobbra). A kérdéses erodált mélyedések (feltételezett völgyek) a középső képen, középen lent láthatóak.

2.5.2. A 3.12. ábrán a 3,5 Ga izokrón talán 1,5 Ga elírása? Ez az izokrón az ábrán az 1 Ga és a 4 Ga között középen, vagy attól inkább a fiatal irányban látható.

A 3,5 és 1,0 milliárd év izokronja azért mutatkozik meglepően közel egymáshoz, mert a korai időszakban (közel 3,5 milliárd évvel ezelőttig, a Nagy Bombázási Időszak (LHB) becsült végéig) sokkal nagyobb volt a becsapódási ráta, mint később. Ezért nem egyenletes az izokronok távolsága egymástól, mint az a témakör egyik kidolgozója (William K. Hartmann) módszertani munkájából idézett alábbi 5. ábrán is látható.



5. ábra. Krátergyakoriság alapú korhatározás példa ábrája (Hartmann 2020).

Az ábra alatt olvasható “távlati kutatási lehetőségekkel” kapcsolatos kérdésem, hogy a Mars mely területein lenne célszerű olyan területeket keresni, ahol a kráterstatistika pontosabb/önkonzisztensebb kormeghatározást tesz lehetővé?

Akadnak a folyóvölgyeknél sokkal jobb korhatározásra lehetőséget adó területek, ezek közül azok a legjobbak, amelyek úgy alkotnak sztratigráfiaailag egy összefüggő egységet (azaz közel egyidőben, egy folyamat által keletkeztek), amelyek közel sík, nagy kiterjedésű és erózióknak kevésbé kitett vidékek. Ilyenek a lapos lávafolyások, vulkáni kaldera kitöltések, idős és kiterjedt üledékes képződmények – de sajnos az egykori vízzel és jéggel kapcsolatos felszínformáknál ezek a jellemzők viszonylag ritkák együttesen, ezért a legérdekesebb képződmények korolása nehéz. Elméletileg a nagy tónyomok megfelelhetnének a fenti követelményeknek, de mivel ezek szükségszerűen mélyedések, egyéb felszínmódosító folyamatok számára is gyakran szolgáltak üledékcsapdaként, ezért ritka amikor egyértelműen egy ősi tó feneké korolható.

2.5.3. A 4.3. ábrán azt látjuk, hogy a völgyfenék folyásirányban, a 20-57. km szakasz között mintegy 100 métert emelkedik. Ha az MV valóban vízfolyás volt, feltételezhető, hogy a völgyfenék a vizes időszakban végig lejtett? Ha igen, milyen hatások miatt változhattak meg a magasságviszonyok mára?

- Az esés utólagos megváltozása is elképzelhető, azonban ha erre külön látható ok (pl. látványos tektonikus töréses elmozdulás) nem akad a térségben, logikusabb jég alatti áramlással magyarázni az ellenesésű szakaszokat. Utóbbiak a Földön is ismertek, főleg jégtakarókkal borított vidékeken (Sjogren et al. 2002), hasonlóak a Marson jól beilleszthetőek a feltételezett egykori geológiai környezetbe és magyarázhatók jég alatti vízfolyásokkal (Galofre et al. 2020).

2.5.4. A 2. tézispont konklúzióinak olvasása közben ellentmondást érzek az alábbi megállapítások között: “A lejtők stabilitása kevésbé ismert a Marson, de elméletileg várható, hogy a kráterek élettartama a lejtőkön rövidebb, mint a közel vízszintes felszíneken.” vs. “A részben elpusztult kráterek hiánya a lejtők stabilitására utal a térségben.” és “Torzult kráterek azonban gyakorlatilag nem mutatkoztak a törmeléklejtőkön, ezért valószínűsíthető, hogy a becsült kor nagyságrendileg releváns.” Az MV völgyfal törmeléklejtőjének valószínűsített fiatal kora a terület jelentős és folyamatos eróziójára utal, hiszen nem életszerű, hogy a vízfolyás lejtője eredendően recens képződmény volna. Ennek tükrében sem a lejtő stabilitását, sem a becsült kor nagyságrendi relevanciáját – legalábbis a kialakulást tekintve nem, a felszínformálást tekintve nyilván igen – nem érzem helytállóknak. Kérem, kommentálja ezt az észrevételt.

Valóban bonyolult a dolog, részben félreérthető volt a fogalmazásom. Három részre bontanám a választ: a) a lejtők elméleti alapú viselkedésére, b) a folyóvölgyek lejtőinek várható jellemzőire, c) valamint a kérdéses szöveg értelmezésére a kontextust tekintve:

- a) A lejtők stabilitásának mai ismeretét illetően elmondható, hogy nem letisztult a kép:
 - Elméletileg a lejtőkön a kráterek várható élettartama rövidebb, mint sík területeken. Furcsa, de ezt egyelőre nem támasztotta alá megbízható mérés – a dolgozatban is az elméleti várakozást jeleztem.
 - Általában kevés kráter van a lejtőkön és nem látszik részben leomlott kráter közöttük. Ez a kettő együtt is releváns, még a lejtők csökkent stabilitása esetében is. Ha a felszín fiatal, és ezért eleve kevés kráter van rajta, ebből eleve kevésből van pusztuló formában és ezért igen kevés részben lepusztult kráter várható.
 - Az egyes lejtők között jelentős különbség várható, ami tovább bonyolítja az értelmezést. A meredekebb lejtőn legkisebb a légkörből hulló por stabilitása, ezért az a szél hatására gyakran omolhat, ami könnyen betemetheti az ott keletkezett kis krátereket. Ugyanakkor ez a nagyobb kráterekre már feltehetőleg nem igaz, noha a mérethatár ilyen szempontból nem ismert. Ha ezt mérések alapján pontosabban ismernénk,

jobban értenék, mennyire tudunk korbecslést tenni egy-egy lejtőre.

- A kevés kráter (a pusztulók hiányát függetlenül) arra utal, hogy nem kifejezetten idősek a lejtők. Az azonosított kráterek mérete is indikátor: az 50-100 méternél kisebb kráterek élettartama nagyságrendekkel rövidebb, mint az 1-10 km-es krátereké, ennek megfelelően fiatalabbak kb. 1 milliárd évnél. A vizsgált lejtők területén 100 m-nél kisebb kráterek mutatkoznak, ezek a kráterek és a felszínek, amelyekeken keletkeztek szintén fiatalabbak kb. 1 milliárd évnél.
 - Mindezek alapján érett és alátámasztott modellt nincs a fentiek koherens kontextusba helyezésére, ez közreműködhet a látszólagos ellentmondásokban. A marsi lejtő felszínének megfiatalításában a légköri por hullásának fontos szerepe lehet, és az így kialakuló törmelékréteg pedig az időnként zajló cementáció révén akár szilárdulhat is – utóbbi kérdéskör sajnos szintén kevésbé ismert jelenleg.
- b) A folyóvölgyek oldalfal lejtőinek (és egyéb lejtőknek) a vizsgálatánál meg kell különböztetni az alapkőzet (bedrock) és a magasból látható felszín korát. Az alapkőzet által alkotott lejtő valóban a folyó eróziójával egyidőben keletkezett, noha későbbi egyéb fajta erózió is módosíthatta. Ennek megfelelően maga a lejtő mint felszínforma idős, de nem annak a korát adják a felszínén látható kráterek. Utóbbiak a lejtőt borító sekély, 1-2-3 méter vastag törmelékréteg lerakódásának korát adják. Ez a helyzet a mi esetünkben is, amint azt a 33. oldalon írtam: „...a völgyszakaszok falain jellemző 1-100 millió év közötti értékek a törmeléklejtőket borító törmelék keletkezési korát mutatják – ami feltehetőleg lényegesen későbbi, mint az egykori folyóvízi erózió.”
- c) Mindezek fényében az általam írt „A részben elpusztult kráterek hiánya a lejtők stabilitására utal a térségben” mondat fogalmazása valóban nem elég pontos, helyesebb lett volna ezt kihagyni vagy a fenti összetett érvelést és a még nem lezárt kérdéskört vázolni – de mivel ez az altéma (a lejtők kora) nem érinti a vízzel kapcsolatos vonatkozásait a tézispontnak, nem fektettem rá nagy hangsúlyt.

2.5.5. Az 5.6. ábrán bemutatott kráterszámok “jól viselkednek”, meglepően pontosan követi az eloszlás az izokronokat. Különösen a korábbi tézispontokkal kapcsolatban bemutatott, folyóvölgy-környéki területek esetében látható nagy “szétszéledéshez” képest meglepően jó itt az illeszkedés. Kérem, mutassa be az eltérés lehetséges okait.

- Az eltérés oka, hogy a dolgozatban az 5.6 ábrán sokkal nagyobb területet elemeztem (tektonikus lineamentek által érintett területek), mint a folyóvölgyek területe, ezért sokkal több kráter esett az elemzés alá, így a nagyobb mintán szebb eloszlás mutatkozik.

2.5.6. A dűnefoltokkal kapcsolatos folyási jelenségek értelmezésénél azt látjuk, hogy mindig a dűnék kiemelkedő részéről, „gerincéről” indulnak el a folyási jelenségek; az oldalakon ezek nem jellemzőek. Itt a folyadék utánpótlásával kapcsolatos kérdés merül fel, hiszen az egyszer lefolyt anyag többé nem található meg a dűnék felső részein. Ezek a folyások időszaki jelenségek lennének tehát, amelyek kimerülnek idővel; vagy valamilyen folyamat a víz utánpótlásaként működik a kiemelkedések tetején.

- Igen, időszaki jelenségek, azonban két tényező miatt „utánpótlást” is kaphatnak maguk a folyásos alakzatok: Az elnyúlt sötét nyomok újabb területeket érnek el haladásuk során, ahol feltehetőleg szintén van korábban lerakódott vízjég, ami növeli a potenciális folyamat és a folyásos alakzatok számára elérhető folyadék mennyiségét.

Források:

Forget F., Costard F., Lognonné P. 2006. Planet Mars - story of another world. Springer

Magalhães J.A. 1987 The Martian Hadley circulation: Comparison of “viscous” model predictions to observations. Icarus 70, 442-468

Gloesener E., Karatekin Ö., Véronique Dehant V. 2021. Stability and composition of CH₄-rich clathrate hydrates in the present martian subsurface. Icarus 353, 114099

Kargel, J. S. ; Prieto-Ballesteros, O. ; Tanaka, K. L. 2003. Is clathrate hydrate dissociation responsible for chaotic terrains on Earth, Mars, Europa, and Triton? EGS - AGU - EUG Joint Assembly, abstract id.14252

Kite, E., Gao, P., Goldblatt, C. et al. Methane bursts as a trigger for intermittent lake-forming climates on post-Noachian Mars. Nature Geosci 10, 737–740 (2017).

Jones E., Caprarelli G., Mills F.P., Doran B., Clarke J. 2014 An Alternative Approach to Mapping Thermophysical Units from Martian Thermal Inertia and Albedo Data Using a Combination of Unsupervised Classification Techniques. Remote Sens. 2014, 6, 5184-5237

Hartmann W.K. 2020. Impact Crater Densities as a Tool for Dating Planetary Surfaces. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.252

Sjogren D.B., Fisher T., Taylor L.D., Jol M.H. 2002. Incipient tunnel channels. Quaternary International 90(1)

Galofre G., Jellinek, A. & Osinski, G. Valley formation on early Mars by subglacial and fluvial erosion. Nature Geoscience 13, 663-668 (2020)

Budapest, 2023. 07. 15.

Kereszturi Ákos

Kereszturi Ákos