

Válasz az opponensek kérdéseire

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

Tisztelt M. Tóth Tivadar!

Köszönöm a dolgozat elolvasását, és a kapcsolódó megjegyzéseket. Az eredeti kérdést / megjegyzést idézőjellel és félkövér stílussal, balra törve jelöltem és sorszámoztam, míg az általam adott választ egy tabulátorral 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.

3/1. A szerző feltűnően nem alkalmazza, sőt kerüli a földi fluviális geomorfológiai nomenklátúra legalapvetőbb kifejezéseit is. Így mindjárt az első tételben kis lejtőszögű felső és nagy lejtőszögű alsó szakaszú folyóvölgyről ír, ellentétben a földi folyók klasszikus szakaszjelleg beosztásával. Természetesen értem, hogy jelen esetben nem szakaszjellegről, hanem fenti és lenti helyzetről van szó, ezzel együtt a szóhasználat problémás. A dolgozat egészére jellemző, hogy néhány egyszerű alapkifejezésen (part, meder) túl a földi fluviális geomorfológia kifejezéseit nem, vagy nem helyesen használja, azok helyett saját leíró kategóriákat alkot. Ez a nem kellően precíz szóhasználat különösen azért zavaró, mert a módszertani fejezet alapvetéseként földi analógiák alkalmazását ígéri.

A földi „klasszikus” fluviális nomenklátúra kifejezései több évtizedes használat, fokozatos fejlődés és pontosodás eredményeként jöttek létre. Sok közülük megalapozott, jelentős múltra tekint vissza, és esetenként az adott felszínforma keletkezési módjával is összekapcsolódik, illetve a specifikus keletkezési móddal együtt használják őket (pl. övzátony, ártér, holtág). A Mars egykori feltételezett vízfolyásnyomainak elemzésekor azonban a szakmai szokványok ritkán alkalmaznak specifikus kifejezéseket. A refereek általában kritikusak a földi nomenklaturából származó kifejezésekkel a Mars esetében, részben mert nem elegendő az ismeretünk, hogy biztosan alkalmazhassuk ezeket a kifejezéseket egy másik bolygóra. Ennek megfelelően többnyire általános morfológiai leírást használnak, mint én is ebben a dolgozatban. Ez természetesen néhol megkérdőjelezhető, de gyakran biztosabb csak a morfológiai leírás. Jellemző példa, hogy sok esetben ma még az sem egyértelmű, hogy adott fluviális mélyedés meder vagy völgy lehet, ami alapvető különbség.

Ezért fogalmaztam a 9. oldalon az alábbiak szerint: *„Leginkább logikus más égitestek felszínformáit a már ismert földi képződményekhez hasonlítani, és az itt található földi nomenklaturát alkalmazni – noha az egy az egyben történő megfelelés nem indokolt meglévő hiányos tudásunk alapján. ... A fentiek nyomán vagy körülményes körülírással, vagy kissé „elnagyoló” megközelítéssel lehet dolgozni – utóbbi azonban itt nem szakmai hanyagság, hanem egyszerű kényszer...”*

3/2. logikus választás lenne azok szigorú matematikai alapú megközelítése és feldolgozása. Minthogy ezt a szerző szintén ígéri a dolgozat módszertani fejezetében, az olvasó joggal várja el, hogy az adatfeldolgozás során numerikus elemzési eljárások precízen átgondolt körével fog találkozni. Az alkalmazott módszertan, mindazonáltal a leíró geomorfológia szintjét alig lépi túl; a különböző alapadatok alapján történt hosszúság-, terület- és térfogatmérést, valamint a sokaságok alapstatisztikáinak számítását nem tekintem morfometriai módszereknek. A rendelkezésre álló adathalmazok meggyőződésem szerint valódi morfometriai elemzésre is lehetőséget biztosítottak volna.

A rendelkezésre álló adatok további és részletesebb elemzése valóban lehetséges. Ha a bemutatott munka nem tartozik a morfometriai elemzések komolyabb köréhez, és az általam használt számszerű méretadatok sokkal egyszerűbbek, mégis célirányosan hasznosnak bizonyultak. A dolgozatban bemutatott úgymond numerikus feldolgozási „szintet” két okból nem léptem túl az értelmezésekben:

- A vizsgált még megválaszolatlan kérdések olyan alapvetőek, hogy azok „nagy skálájú” elemzésén véleményem szerint nem érdemes túllépni az előtt, hogy jobban nem tisztázzuk őket. Például fontosabbnak tekinteném annak megállapítását a numerikus adatok általános (és nem kifejezetten részletes) elemzésével, hogy az adott mélyedés meder avagy völgy, egy szigetszerű felszínforma erodált vagy főleg lerakódásos, avagy hogy egy üledékes legyező frontális pereme egy Gilbert deltához hasonlóan egykori tavi vízszintet jelez vagy későbbi egyéb eróziós folyamattal keletkezett. Mindezek megértéséhez hozzájárul a részletesebb matematikai elemzés is, de úgy vélem a nagyobb számú hasonló fajtájú, de eltéréseket mégis mutató felszínformák összehasonlító, általános elemzése megbízhatóbb eredményt ad az alapkérdések megválaszolásában.
- Noha ma már az nem kérdéses, hogy egykor a Mars felszínén folyt-e víz, de sok olyan alapvető kérdés még nem tisztázott, ami befolyásolja a kutatói közösség által preferált témákat és szokványokat. Ez többnyire nem terjed ki a nagy részletességű matematikai elemzések irányába, és ha akaratlanul is, de az ember valamennyire követi ezeket a szakmai szokványokat és nemzetközi trendeket.

Bár valóban lenyűgöző a használt mérési adatok pontossága, különösen a képek térbeli felbontását illetően, nyilván ezek a mérések is bizonytalansággal terheltek. A fent látott, talán legpontosabban „naiv matematika” néven illethető megközelítésen belül is különösen érthetetlen ennek a bizonytalanságnak a szélsőségesen amatőr megközelítése.

A használt adatok bizonytalanságát pontosabban is lehetett volna jellemezni, azonban többnyire azzal az adatkezelési jelleggel avagy „szinttel” végeztem a kutatást, ami a megcélzott alapkérdések megválaszolásához elegendő. Valóban lehetett volna ennél egzaktabb és részletesebb módon közelíteni a bizonytalanságokat, de úgy éreztem, hogy a célzott alapkérdések jobb megválaszolásához ez nem tenne sokat hozzá, inkább a minták bővítése (több folyóvölgy és tónyom elemzése, eltérő környezetben) lenne hatékonyabb.

A HiRISE képek 25 cm-es felbontása a dolgozat második fejezetében bemutatott folyásos kinézetű alakzatok elemzésében számít, ott a szükséges

bizonytalanságokat röviden jeleztem (pl. manuális pont kijelölés pontossága, pixel méretű hiba lehetősége, 15. oldalon): „... a képpont kijelölésnél pixel nagyságrendű hiba várható, amelynek mértéke a használt adatállományok pixelmérete függvényében közel 6 m (CTX képek) és 0,25 m (HiRISE képek) között változik, és a vizsgált felszínformák méretét figyelembe véve néhány %, és minden esetben 10% alatt” (lásd alább), mivel nagy felbontásnál a képernyőn történtek a képpont kijelölések. A kapott eredményekből általános következtetéseket vontam le, és nem állapítottam meg olyan numerikus „végeredményeket”, ahol a várhatóan fellépett hiba a végkövetkeztetést befolyásolhatta volna.

3/3. Mit ért „pixel nagyságrendű hiba” alatt, „... melynek mértéke néhány %, de 10% alatt marad”? Ez hiba vagy bizonytalanság? Milyen a típusa? Ezt honnét tudjuk?

A pixel nagyságú hiba alatt a képpontok egy pixelének mérete körüli hibát értem, amely akkor áll elő, ha egy pixellel nagyobbnak vagy kisebbnek mértem az adott távolságot. A pixelméret a dolgozatban vizsgált HiRISE képek pixeleinek mérete itt, azaz 0,25 m, ez itt a lehetséges hiba értéke, amely a munka kivitelezése során fellépő véletlenszerű hiba. Ez potenciális hibának tekinthető olyan értelemben, hogy a távolságmérések kivitelezésekor vagy fellép vagy nem. Ha abszolút értelemben veszem akkor 0,25 m, mivel a méréseket a képeken nagy nagyítással végeztem, ezért a képpont kijelölés pontossága 1 pixel körüli. A relatív értelemben vett hiba egy pixelnyi abszolút hiba esetén a teljes mért hosszától függ, amely legalább 10 pixel volt a képeken, azaz 10 %, de az esetek túlnyomó többségénél több mint 100 pixeles távolságokkal dolgoztam, ennek megfelelően az egy pixelre eső potenciális hiba 10 %-nál lényegesen kisebb, 1-2 % körüli vagy az alatti.

Rendszeres hibáktól mentes nagyszámú mérés eredményét tekintettem a mérendő mennyiség legjobb közelítésének. Mindezeknél a véletlen hibák adják a bizonytalanság egy részét, ami statisztikai módszerrel vehető figyelembe, és a vizsgált általános következtetéseket (pl. jellegzetes szélességű vagy meredekségű völgyszakasz, jellegzetes folt méretének és folyásos alakzat hosszának kapcsolata) nem befolyásolja érdemileg.

3/4. a mérések „függőlegesen 30–40 méteres hibát adnak”. Ez a hiba ugyanolyan típusú (matematikailag), mint az előző?

Az eredeti mondat: „...a marsi referencia ellipszoid pontatlansága, amely függőlegesen 30-40 m-es hibát is adhat, de csak regionális (100-1000 km-es) távolságokon végzett méréseknél”. Ebben a marsi „referencia ellipszoid” hibáját említem, amely a felhasznált adatállományban benne van, azaz számomra nem megkerülhető. Ezt bizonytalanságnak lehet tekinteni a kiindulási adatokra vonatkozóan, ugyanakkor mivel ez 100-1000 km-es távolságokon jelent eltérést a várható valódi értéktől (ami a valódi marsi bolygóalak és a geodéziailag definiált szferoid alak között mutatkozik), mindez a függőleges magasságmérések abszolút pontosságát befolyásolja. Ez a km-es, 10 km-es felszínformák (pl. völgyek, lejtők) magasságértékeit azok teljes kiterjedése mentén befolyásolja. Mivel a dolgozatban nem az abszolút magasságkülönbségeket, hanem a néhány 100 m-es, néhány km-es vagy 10 km-es távolságokon jelentkező magasságkülönbségeket elemeztem, ez a fajta hiba illetve bizonytalanság nem befolyásolja az eredményeket.

3/5. Megint máshol „a bizonytalanság a domborzat gyenge ismeretéből adódik”. Ez matematikai értelemben definiált bizonytalanság, vagy csak annyit jelent, hogy alig tudjuk. Ez utóbbi esetben a mondat tautológia, így teljesen fölösleges. Ha viszont matematikai értelemben ír bizonytalanságról, akkor az ebben az esetben hogyan számszerűsíthető?

A kérdéses rész az albedo becslésével kapcsolatos témánál szerepel: „*Itt a bizonytalanságok az adatbázisban lévő néhány %-os hibán túl a domborzat gyenge ismeretéből adódnak, amely a beeső napsütés szögének meghatározásánál okoz bizonytalanságot.*” Ennél a résznél arra céloztam, hogy a HiRISE képek alapján kinyert pixelek tónusértékeiből az albedo becsléséhez ideális esetben a képek pixelértékének megfelelő felbontású topográfiai adat is kellett volna, hogy minden pontra ismerjük a beeső napfény geometriáját – de ilyen adat sajnos nem elérhető. Ugyanakkor az elemzés során a sokaság viselkedésére voltam kíváncsi, így mindez a megállapításokat valószínűleg nem befolyásolja, de ha mégis, az elérhető legjobb közelítést adja, és a felszínformák elemzését az elérhető pontosság mellett is hasznosnak tekintettem.

3/6. Ugyanakkor a dolgozatban meghatározott értékek esetében a kérdéses pontok úgy lettek meghatározva, hogy a gyengébb felbontású domborzat ismerete ne befolyásolja a megállapításokat. Így ebben az értelemben a mondat felesleges.

Valóban felesleges, ki lehetett volna hagyni.

3/7. A 86. oldalon látható képletben szereplő szorzás mennyiben befolyásolja az eredeti hibák miatt az albedó hibáját, figyelembe véve a hibaterjedés törvényeit?

A kérdéses szorzás „ $I/F=(DN*SCALING_FACTOR)$ ” a detektor karakterisztikájának jellemzőit próbálja figyelembe venni, amit labormérések alapján határoznak meg és modellközelítéssel pontosítanak. A detektor pixeléből kiolvasott DN érték a tesztek alapján lineárisan korrelál a várható I/F (intenzitás / fluxus, avagy radiancia) értékkel, ami a megörökített célpontról érkező sugárzást jellemzi. A detektor vezető kutatója valamint gyártója által ajánlott érték szerepel a „SCALING FACTOR” paraméternél (legfrissebb specifikáció: Eliason et al. 2012) ami a felhasznált *Reduced Data Record (RDR)* adatállományok *label file*-jából olvasható ki, és általában 1,0 körüli, de ennél időnként nagyobb. Eszerint a magasabb DN értékekhez kapcsolódó albedo értékek emelkedhetnek nagyobb mértékben a szorzás során – de mivel ez egy skálázó faktor a detektor gyártója részéről, várhatóan javít és nem ront a kinyert albedo közelítésén. A kapcsolódó értékeknek és bizonytalanságnak csak a 7. tételben szereplő abszolút albedo becslésre van hatása.

A kiemelt néhány példán túl a kérdéskörrel kapcsolatos, matematikailag alig értelmezhető mondatok, kifejezések sora hosszan folytatható. Végül, megint máshol ezt olvashatjuk: „a hibák statisztikai szempontból veendő figyelembe”.

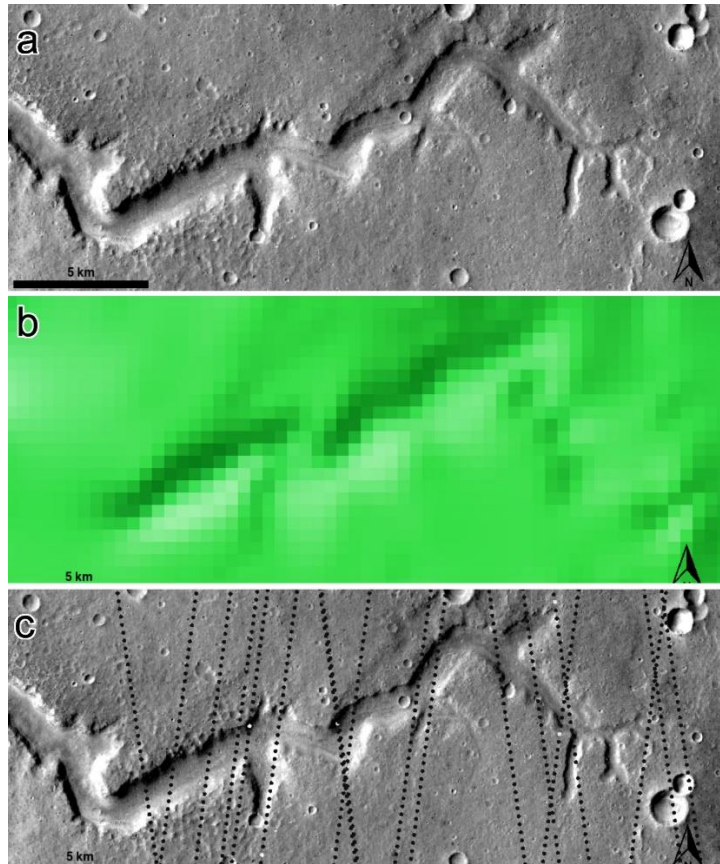
Köszönöm a megjegyzést, a pongyola fogalmazás mögött az volt az üzenetem, hogy noha a mért adatok tartalmazznak hibákat és bizonytalanságokat, de a célpontok megismerendő jellemzőiben annyival több, „alapvetőbb szintű” ismerethiány van, hogy ezért a nagyszámú mérésből a dolgozatban nyert trendek és tendenciák

annyira alapvetőek, hogy azokat érdemben nem befolyásolják a numerikus bizonytalanságok. Például: hiába / bizonytalanság van az albedo becslésében, de a különbség a szén-dioxid jéggel és vízjéggel borított valamint jég nélküli területek közötti olyan nagy és egyértelmű, valamint egybeesik morfológiai megfigyelésekkel, ezért a jégtípus elkülönítését nem befolyásolja (7. tézis); avagy bizonyára nem teljesen pontos a S völgyből kierodált anyag térfogatának becslése, de mivel a lerakódott üledék térfogata egy nagyságrenddel nagyobb, ezért a bizonytalanság nem befolyásolja jelentősen a keletkezési viszonyokkal kapcsolatos megállapítást (4. tézis).

3/8. Mit ért „viszonylag homogén térbeli eloszlás” alatt?

A kérdéses mondat a 16. oldalon: „A mérési helyszínek kiválasztása az elérhető adatok szempontjának és a viszonylag homogén térbeli eloszlás közelítésének figyelembevételével történt”. Ez a mondat a módszertant általánosan leíró fejezetben szerepel, és azt jelzi, hogy a lemért keresztshelvények helyét úgy választottam ki, hogy minél egyenletesebben fedjék le az adott völgyet, ugyanakkor az elérhető legpontosabb MOLA topográfiai adatok területén történjen egy-egy mérés. Tehát ahol két szomszédos még akár egymástól viszonylag távoli MOLA mérés átlagolása alapján ad magassági adatot a DTM, ott nem vettem a két mérés között harmadik mintát, hiszen az nem a fizikai domborzatból, hanem a szomszédos, valódi domborzatot mérő adatok átlagolásából született. Mindezekre a következő mondatban utaltam a 16. oldalon: „Ez főleg a topográfiára értendő, ahol az MGS-űrszonda keringése során felvett sávokban („track-ek”) a legjobb a domborzati adatok felbontása, ezért azokon a területeken történtek főleg mérések, amelyek ezen sávokba estek.”

A mellékelt példa (1. ábra) az ész. 9.66° k.h. 314.56° koordinátáknál található völgyszakasz részletet ábrázolja, ahol az a) panel a terület optikai képét mutatja, a b) panel a DTM szín-magasság ábrázolását, a c) pedig a területen futó magasságmérések vonalait jelzi. Utóbbiak tartalmazzák az elérhető legjobb domborzati adatot, ezért a keresztshelvények helyének kijelölése a c) panelen bemutatott megközelítés alapján történt, az elérhető adatok között igyekeztem térben egyenletesen kijelölni a kérdéses keresztshelvényeket.



1. ábra. Példa a keresztmetszvények térbeli kiválasztásánál figyelembe vett megközelítésre: a) a terület optikai képe, b) domborzatmodellje, c) valódi mérések helyzetei (pontsorok).

3/9. A 14. oldal utolsó mondatában megállapítja, hogy „... az extrapolációt nagy körültekintéssel kell végezni”, ami nyilván igaz, megjegyezve, hogy a marsi és földi felszínformák összehasonlítása nem extrapoláció.

- Köszönöm a megjegyzést, az „*extrapoláció*” esetében a földi keletkezési folyamatok háttérben álló tényezők kiterjesztését (illetve annak óvatosságát) értettem a Marsra, egy hasonló képződmény létrehozásának esetében. Például egy folyóvízi üledékes felszínforma képződése noha szintén történhet a folyóvízből lerakott üledék felhalmozódásával, de körültekintéssel kell ebből tovább extrapolálni mondjuk a vízramlás hordalékszállítására, mivel pl. a gyengébb gravitáció miatt nem csak a folyóvíz áramlása lehet más mint a Földön, hanem benne a szemcsék ülepedési sebessége is más lehet, amit a marsi gravitáción fellépő és nem eléggé ismert sajátos örvényképződés is befolyásolhat.

3/10. Trivialitásnak tűnik, hogy „a völgyek fiatalabbak, mint az a terület, amelybe bevágódnak”, ahogy az is, hogy a „a völgyek területét a peremük jelölte ki”. Utóbbi esetben kérdés, hogy ennek meghatározása mennyire egyértelmű? És ha nem, akkor milyen bizonytalansága van (matematikailag értelmezhető módon) a becslésnek a területre nézve?

- A mondat, amely szerint „*a völgyek fiatalabbak, mint az a terület, amelybe bevágódnak*” (47. oldal) valóban triviális. Ezt a korbecslés rész módszertanánál

említettem, arra utalva, hogy sok esetben csak azt a felszínt lehet datálni kráterstatisztikai módszerrel, amelybe a völgy belevágódott. De még ez is adhat információt, mivel a Mars felszínén jellemző lassú erózió miatt milliárd éves nyomok is fennmaradnak, ezért a triviális közelítés, mint egyetlen opció is értékes eredményt adhat.

- A „*völgyek területét a peremük jelölte ki*” (16. oldal) mondatlal jellemzett esetek többségében éles kontraszt mutatkozik a lejtő felső pereménél az optikai felvételeken, ezért azok felbontásának mértékéig egyértelműen kijelölhetők. Ennek megfelelően a pontosság a CTX felvételek esetében 6 m, a HiRISE képek esetében 0,25 m. A dolgozatban vizsgált konkrét esetekben néhány % az így felmerülő potenciális hiba a távolságmérésekben. Mindez a térfogatmérések tekintetében a 4. tézisnél okozhat bizonytalanságot, ahol egy HiRISE kép alapján jelöltem ki a közel 1 km-es völgy peremét (a dolgozatban 6.3 ábra), ahol a kijelölés pontossága a kierodált térfogat becslésének pontosságát befolyásolja. De mivel a lerakódott üledékes alakzat eleve egy nagyságrenddel nagyobb térfogatú, mint amennyi a völgyből hiányzik, eleve több üledék érkezését feltételeztem mint amennyi a völgyből erodálódhatott ki – így a térfogat elemzésének hibája nem befolyásolja az értelmezést.

3/11. Több helyen említi, hogy kisebb területek korbecslése bizonytalanabb, mint a nagyobbaké, ami a kráter statisztikai megközelítés alapján nyilvánvaló. Van-e számítás arról, hogy vajon erre a tulajdonságra nézve mekkora a reprezentatív elemi terület (REV, REA) és annak értéke ugyanakkora-e a bolygó egész területén? Ebben a tárgykörben a korábbiakhoz hasonló naiv matematikai megközelítéssel találkozunk, pl. a korhatározás jóságát meghatározza a tény, mely szerint „*kicsi az esély, hogy ... elegendő számú kráter mutakozzon*”.

A kráterstatisztikai alapú korhatározás bizonytalansága a használt terület csökkenésével (avagy az azonosított kráterek számának csökkenésével) párhuzamosan növekszik, de nem jelölhető ki olyan éles határ, amely alatt a bizonytalanság végtelenné nő, vagy amely felett a bizonytalanság infinitezimálisan kicsivé válna. Mindennek megfelelően csak közelíteni lehet a bizonytalanságot és pontosabban nem a területet nagysága, hanem a nyert adatpontok száma fontos (az adatpontok számát és az izokronokhoz viszonyított eloszlását veszik a módszer kritériumnak, részben szokványok alapján) (Michael et al. 2016).

A módszertanból adódóan a hibát egy-egy adatpontra külön (az adott mérettartományba eső kráterek területi gyakoriságára) az „ $1 / \sqrt{n}$ ” közelítéssel becslik, ami kis „ n ” esetében igen nagy potenciális hibát jelent. Ezt a használt CSFD ábrákon az adott adatpontnál feltüntetett függőleges hibaszár (*error bar*) mérete jelzi. Kevés kráter avagy kis területek esetén, ahol az „ n ” mindössze néhány (pl. 1, 2, 3), a hiba miatt az hibaszár akkora, hogy nem illeszthető kor az adott ponthoz. Ilyen esetben azonban mindig a kisebb mérettartományban, nagyobb „ n ” értékhez kapcsolódó adatpont korillesztése a releváns. A szokványok alapján legalább kettő adatpont szükséges, amelyek valamennyire azonos izokronokhoz közeleiek – de itt sincsen matematikailag definiált szigorú feltétel. Ha ennél kevesebb az adat, vagy az adatpontok

eloszlása feltűnően szabálytalan, akkor a korbecslést nem megbízhatónak tekintik.

Ez a ma ismert legjobb korhatározási módszer (képek és domborzat alapján gyakorlatilag az egyetlen), és a kérdéses célpontok (folyóvölgyek) esetében sajnos nem lehet tovább javítani a helyzetet a vizsgált terület növelésével. Ugyanakkor a jelentős bizonytalanságokat tartalmazó eredmények hasznát az növeli, hogy a Marson a globális lemeztektonika hiánya és a gyenge erózió miatt a nagyságrendi korbecslés is értékes.

3/12. A választott földi analógia megítélésem szerint jelen állapotában inkább érdekesség, számottevő bizonyító erő nélkül.

A földi esetet az alábbiak miatt jelöltem analógiaként:

- A jég vagy hó olvadása egy hideg és száraz térségben a Földön ritka, és önmagában is adhat a Marsra releváns felismeréseket.
- Száraz területeken időszakos havazást betemető por szintén viszonylag ritka a Földön, ugyanakkor a megfigyelések és elméleti számítások alapján ilyen folyamat sok helyen várható a Marson. Ezt feltételezik a közepes és magas szélességeken mutatkozó gully alakzatok jegének felhalmozódásánál. Az ott zajló jelenségek jobb megértésében is segíthet a dolgozatban bemutatott analógia. Erre utaltam a 106. oldalon ezzel a mondattal: „...*a marsi folyásnyomok az ún. szélességfüggő köpeny (latitude dependent mantle) anyagába mélyednek (Johnsson et al., 2014), amit por és jég keveréke alkot akár több méter vastagságban (Dundas et al., 2019)...*”
- Az intenzív besugárzás (az alacsony földrajzi szélesség miatti nagy napmagasság az égen, valamint időszakosan kifejezetten átlátszó légkör) a csökkent légnyomás és szárazság miatt a szublimációnak kedvez (ami Mars relevancia), míg kisebb tengerszint feletti magasságban és párásabb térségekben (a legtöbb havas, jeges környezetben a Földön) olvadás jellemző. Az időszakos, erős besugárzás nyomán fellépő csak nappali aktivitás Mars relevanciájára a 108. oldalon utaltam: „*Az itt bemutatott periodikus, csak nappalra korlátozódó aktivitás kifejezetten Mars-releváns, a modellszámítások is ezt valószínűsítik (Johnsson et al., 2014).*”
- A bemutatott földi analog helyszín további elemzésével megállapítható, miért pont ott ahol, és milyen folyamat keretében miként indult el az olvadás egy egyébként száraz és hideg helyen – hasonló kérdés a marsi folyások elindulásánál is felmerült, ehhez adhat támpontot ez a földi helyszín. Erre utaltam a 106. oldalon ezzel a mondattal: „*Laboratóriumi tesztek alapján Mars-releváns körülmények között is jellemző lehet, hogy az eróziós mélyedésben csak rövidebb távolságon áramlik a folyadék (Conway et al., 2011; Mase et al., 2016).*”

3/13. A jelölt több ponton hangsúlyosan többé és kevésbé elágazó völgyhálózatokról, elszigetelt völgyrendszerekről ír, valódi morfometriai elemzés igénye nélkül. Geometriai mintázatok (adott esetben vonalhálózatok) bonyolultsága mérhető, numerikusan jellemezhető tulajdonság, ugyanakkor a dolgozat megállapításai

összehasonlításra, mélyebb elemzésre aligha használhatók, így azok megmaradnak az elemi leíró geomorfológia szintjén.

A völgyhálózat morfológiáját tekintve a legtöbb tézisenél egyedüli vagy csak egy-két elágazással bíró völgyek a célpontok, ezeknél nem igazán van értelme a hálózat numerikus jellemzésének. A 2. tézisenél szerepelnek elágazó völgyek (SV völgyek, az eredeti dolgozatban 4.2 ábra), ezek néhány elágazást tartalmaznak, azonban mint azt a 39. oldalon említettem ezek *„egykor talán összefüggő hálózatot alkottak, de később erősen lepusztultak, ezért ma már csak néhány esetben azonosítható egymással összekapcsolódó jellegük”*. Ennek megfelelően, noha az egyes egymással összefüggő völgyek kisebb csoportjai numerikusan is jellemezhetőek lettek volna (pl. Strahler és Shreve számokkal), azonban mivel erősen lepusztultak, nem tudni közülük melyek melyekkel kapcsolódtak össze egykor, és az erózió miatt mára függetlenek lettek egymástól. Ezért a hálózat jellemzése és a kapcsolatok száma félrevezető lenne – emiatt nem vizsgáltam ilyen paramétereket. Emellett a kérdéses tézis fő témaköre egyetlen hálózatról szól, amelynek felső szakasza 3-4 egyenrangú erodált, kissé lepusztult ágat tartalmazott – így itt az ágak számának numerikus elemzése nem ad többlet információt.

3/14. Szintén több ponton olvashatjuk, hogy *„az egyes völgyszakaszok nem feltétlenül reprezentatívak”*. Mit ért matematikai (numerikus adatelemzési) szempontból reprezentativitáson?

A kérdéses rész az Összefoglalás fejezetben a 108. oldalon olvasható, és a dolgozatban közölt eredmények kontextusba helyezésénél szerepel. Ennek megfelelően a reprezentativitást a völgyek hosszára és a völgyek jellegéből a keletkezési körülményekre levont következtetésekre értem. A kérdéses rész rövidítve:

„...felszabdalthatták az egykor összefüggő hierarchikus völgyrendszereket, és a ma vizsgált szakaszok egy-egy része nem képviseli az adott völgyet teljes hosszában – ezért az egyes völgyszakaszok nem feltétlen reprezentatívak.” Ezzel a mondattal arra utaltam, hogy sok esetben a részlegesen lepusztult jelleg miatt nem tudni, hogy az adott völgy milyen nagyobb hálózatnak volt része, és ezért esetenként nem reprezentatív a völgy hosszára és az eredetükre nézve róluk levont megállapítás. A tézisekben ebből következtetéseket ezért nem vontam le.

3/15. Mi alapján feltételezhető, hogy az MV völgyek morfológiája felszín alatti vízmozgást generál?

A 47. oldalon említettem, hogy *„...az MV morfológiája alapján a felszín alatti vízmozgás is valószínűsíthető, amit sok helyen feltételeznek a bolygón a korai, nedves időszakot követő periódusra”*. Itt a völgy indulásánál látható, kezdeti meredek beszakadásos kinézet alapján említettem ezt a lehetőséget, magában a tézisben nem szerepel mivel valóban csak egy lehetőség, továbbá ez illik a bolygóró kialakult általános képbe, és a közel 1 milliárd éves becsült kor idején jellemző globálisan hideg és száraz éghajlatra.

3/16. A 49. oldalon azt olvashatjuk, hogy az adott területen „sugárirányú árkok”, később „radiális törések” keletkeztek. Ez a két kifejezés lényegében ugyanazt jelenti, mi alapján lehet a két szerkezeti elemet megkülönböztetni.

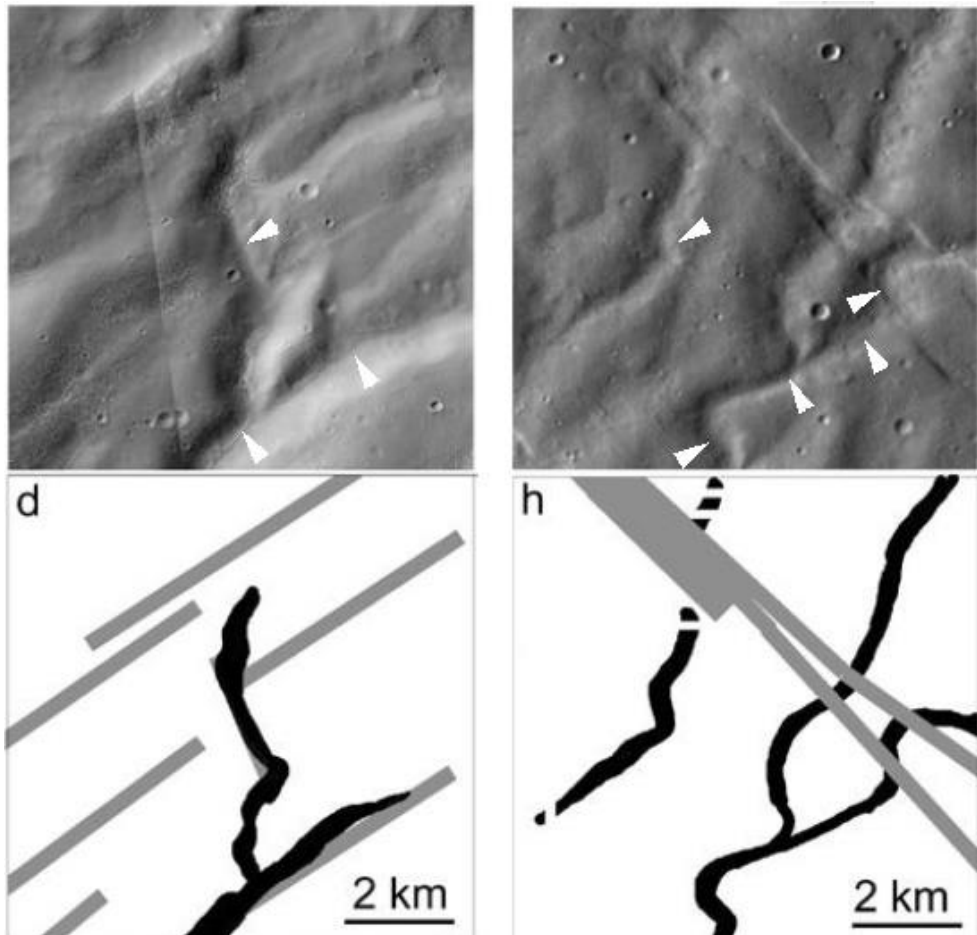
A „sugárirányú árkok” később „radiális törések” kifejezések valóban ugyanazt jelentik, csak szóismétlés elkerülése céljából használtam mindkettőt.

Földi analógiák alapján milyen tektonikai rezsimben keletkezhetett a két töréscsoport

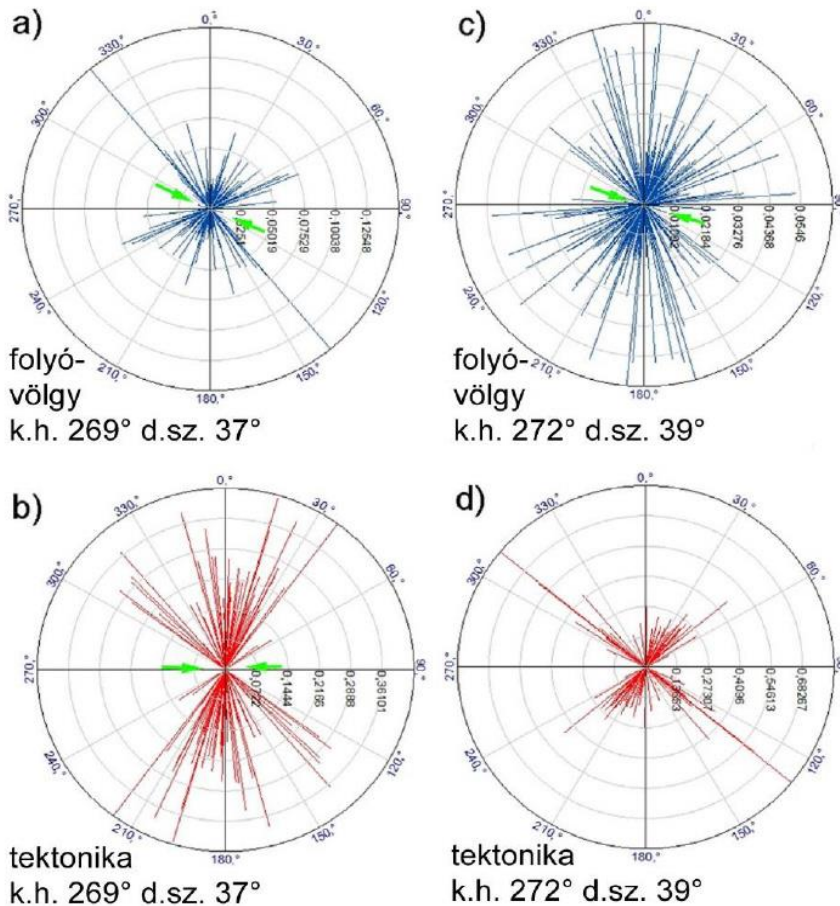
A kérdéses rész a 3. tézis háttérismeretének leírásában szerepel, ahol ezt írom a 49. oldalon: „Egy korábbi lokális kiemelkedő fázisban (Anderson et al., 2001) a Claritas Fossae térségére (az itt vizsgált területtől kb. 500 km-rel nyugatra) sugárirányú árkok képződtek...” – mindez a terület kiemelkedésével együtt járó tágulós tektonikai környezettel egyeztethető össze. A kiemelkedés és tágulás okaként a Tharsis hátság alatti magmabenyomulást feltételezik.

3/17. Hogy igazolható az az állítás, mely szerint „a tektonikus aktivitás nyomán megváltozott topográfia befolyásolta a folyásirányt”? Ennek bizonyítása nem szerepel a dolgozatban.

A 3. tézisről szól a megjegyzés. A morfológia alapján a törések többsége idősebbnek mutatkozott a folyóvölgyeknél, ezek befolyásolhatták a később keletkezett völgyek haladási irányát. A megváltozott topográfia itt a törések keletkezését jelenti, amelyek elnyúlt mélyedések formájában elterelték időnként a lefolyó vizet (alább a 2. ábra). A törések és a völgyirányok futásának kapcsolatát a dolgozatban az 5.5 ábra mutatja (alább a 3. ábra):



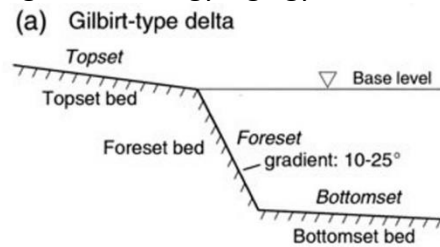
2. ábra. Példák a tektonikustörések által befolyásolt völgszakaszokra (fehér nyilak fent) amelyek az alsó ábrán látható fekete völgyek futását megtörik. Ezek a völgyirány változások nem következtek volna be a tektonikus hatások nélkül.



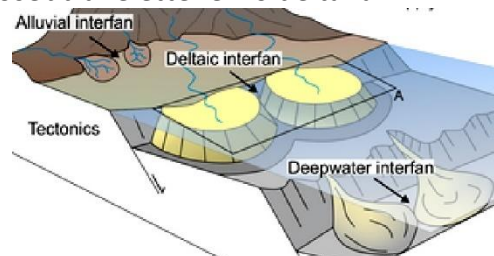
3. ábra. A rózsadiagramok alapján a kék folyóvölgyek (fent) és a tektonikus törések (lent) irányeloszlása hasonló, ami a kapcsolatot jelzi, erre mutat példát a (dolgozatban eredetileg 5.3) fenti 2. ábra részlete.

3/18. Az érvényes geomorfológiai terminológia alapján a „torkolati alsó elnyúlt kiemelkedés” milyen földi analógiával azonosítható?

A morfológiát és a völgytorkolati medencebeli helyzetet tekintve, a deltafront térségében illetve az előtti földi üledékek hasonlítanak erre, potenciális analógiák lehetnek a „bottomset” helyzetű üledékek (HoriYoshiki és Yoshiki 2003, alább a 4. ábra), illetve a delta területéről érkezett finomabb szemcsés hordalék alkotta anyag (Barrett et al. 2020, alább az 5. ábra), bár a Marson vizsgált az alsó egység egyértelműen idősebb a felette fekvő deltánál.



4. ábra. Elméleti szelvény a Gilbert-típusú delták „bottomset” része hasonlíthat a mélyebben lévő alsó üledékes egységre.



5. ábra. Elméleti tömbszelvény a földi delták előterében további tömegmozgásokkal vagy zagyrákkal jellemű áramlással keletkező üledékes legyezőkről.

3/19. A 67. oldal 7.5. ábrája az aláírás szerint „numerikus kapcsolatot” mutat két változó között, bármi konkrét matematikai információ nélkül. Mi ez a kapcsolat és mik a paraméterei?

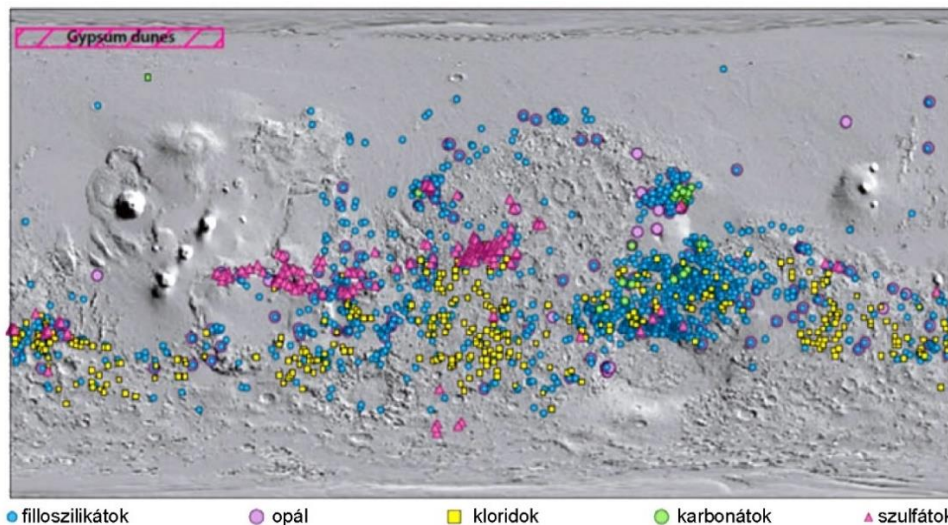
A 67. oldalon írom: „Egyszerű numerikus kapcsolat is mutatkozik a „forrás” DDS területe és a belőle kiágazó folyásos alakzatok hossza között: a nagyobb foltokból általában hosszabb folyásos alakzatok ágaznak ki (7.5 ábra).” A lineáris összefüggés korrelációs együtthatója $R=0,48$, ami mérsékelt, de létező kapcsolatra utal. Ez nem mutat többet, mint hogy az alakzatok morfológiai jellemzői kompatibilisek a potenciális folyásos eredettel, amiben mikroszkopikus skálájú folyadék síkosító hatása nyomán lép fel anyagmozgás.

3/20. Kérem, mutassa be a dolgozat számos pontján előkerülő „speciális fizikai körülményeket”, amelyek jóval a fagyáspont alatt cseppfolyós állapotban tartják a vizet!

A 3/22 jelű kérdésnél alább adom meg a választ erre.

3/21. A dolgozat több pontján igen fontos szerepet játszanak a különböző higroszkópos tulajdonságú evaporit ásványok. Mik ezek és mit lehet tudni az eredetükről, előfordulásuk környezetéről, térbeli eloszlásukról?

Helyszíni és távérzékeléses mérések alapján az alábbi higroszkópos ásványok mutatkoztak a Marson (6. ábra): szulfátok, karbonátok, kloridok és perklorátok (Davila et al. 2010). Ezek részben a regolitban vannak, ami a szél hatására globálisan összekevert és homogenizált lesz, de néhányuk nagy koncentrációban, üledékekben, egy-egy jól körülhatárolt területen mutatkozik. Utóbbiak a 1-3 milliárd éves szulfátos üledékek (jórészt feltételezett hidegvizes környezetben), valamint a még idősebb karbonátok és kloridok (kb. 3,5 milliárd évnél idősebb, kihantolt területeken), szintén ősi vizes, részben hidrotermálisnak feltételezett területeken. Eredetüket tekintve általában egykori vizes közeget feltételeznek, esetleg annak bepárlódással keletkezett és abból kivált anyagoknak tekintik őket, de az erózió miatt pusztulnak és a szél hatására globálisan elkeverednek.



6. ábra. Néhány higroszkópos só adó ásvány előfordulási térképe, rajta a kloridok (sárga) és szulfátok (piros) színnel jelezve (Rodríguez et al. 2016).

3/22. Amennyiben a szemcsefelületeken található mikroszkopikus vízfilm a (földi viszonyok között) tapadó víz, akkor az egyáltalán nem folyik. Kérem, tisztázza ebben az esetben a „folyásos jelenségek vízzel kapcsolatos” modelljét! Kérem, mutassa be a fizikai hátterét a jelenségnek, amikor a szemcsék „felületén megjelenő vízfilm áramlik”!

A mikroszkopikus skálájú H₂O-t a szakzsargon meghonosodott szóhasználata szerint nevezem folyékonynak, noha tulajdonságát tekintve több szempontból eltér a hagyományos folyadéktól. Ahogy a 74. oldal alján írtam: „*Ennek folyékony állapota, jellegét tekintve részben a kapilláris vízére hasonlít: speciális fizikai körülmények tartják cseppfolyós állapotban – ugyanakkor az interfacial water esetében még kisebb a méretskála, és még extrémebb fizikai folyamatokról van szó.*”

Három fő hatás miatt nem szilárd (azaz nem jég) halmazállapotú a H₂O a fagypontja alatt (noha a megfagyott tömbfázisú jég mellett fordulhat elő kisebb mennyiségben):

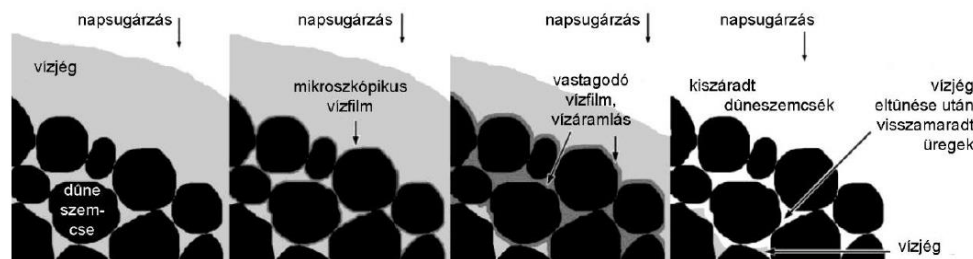
- A kapilláris hatás esetében az intermolekuláris erők révén a felületi feszültség és a folyadék-szilárd felület közötti adhézió nehezíti a szilárd jég kialakulását, 10-15 Celsius-fokkal csökkentve a fagyáspontot, közel mikrométeres vastagságú rétegben.
- A van-der-Waals erők pedig főleg a hidrogénkötés révén az ásványi felületeknél a H₂O molekula erős kötődésével akadályozzák meg a jég kristályrácsának kialakulást, 50-60 Celsius-fokkal csökkentve a fagyáspontot, néhány molekulányi rétegben.
- Mindezek felett a marsi regolitban előforduló és valószínűleg a vízben is jelenlévő oldott higroszkópos sók révén szintén 10-30 Celsius-fokkal csökken a fagyáspont.

Mindezen hatások révén a H₂O molekulák nem mindenhol alkotnak szilárd rácsot, elmozdulhatnak egymáson, és áramolhatnak, noha ez nem a makroszkopikus folyásnak megfelelő jelenség. A kapilláris víz és az adszorbeált víz valóban egyaránt „tapad” egyszerűen fogalmazva, ugyanakkor a felület mentén mobilisak, ezért az ásványi felülethez tapadó ívmolekulának nem kell elszakadnia a felülettől ahhoz, hogy a felület mentén mozoghasson. Ennek értelmében jöhet létre vízáramlás.

Mindezekről elérhető kísérleti adatok nem fedik le megfelelően a Marsra releváns viszonyokat, de adnak néhány támpontot. Például Li et al. (2020) munkájában fagypont alatti viszonyok között demonstrálták a cseppfolyós állapotú víz megjelenését; a fagyváltozékonyság jelenségéhez kapcsolódó töredezésnél is feltételezik a nulla fok alatti meg nem fagyott vízmolekulák migrációját, sőt azok domináns szerepét (Teng et al. 2023b); néhány fokkal fagypont alatt a cseppfolyós halmazállapot vándorlását élelmiszeripari kísérletek mutatják (nem Mars releváns anyagoknál, Mutoh et al. 2002); valamint mérnök geológiai vizsgálatok alapján a fagyott talajokban azonosították a felületi vízfilm vándorlását (Teng et al. 2023a), igaz a Mars relevánsnál általában magasabb hőmérsékleteken.

A folyásos jelleg a dolgozatban leírt morfológiára alkalmaztam (pl. az 5. tézis címe: „*Folyásos kinézetű...*”, továbbá a témakör említése egyéb helyeken

a dolgozatban „folyásos morfológiát mutató, „folyásos kinézetű alakzatok”, „folyásos jellegű” mozgás,” kifejezésekkel történik), jelezvén hogy nem a H₂O hagyományos folyására használom. A fizikai háttérben a szilárd kristályrácsot nem alkotó H₂O molekulák elmozdulása fontos, ami lehetővé teszi az évszakosan kivált por és a homokdűnéket alkotó szemcsék összességének elmozdulását is, a dolgozatban bemutatott 9.5 ábra további magyarázatával az alábbiak szerint:



7. ábra (a dolgozatban 9.5 ábra). A szemcsék és jégréteg viszonyának elméleti időSORA a folyásos jellegű alakzatok keletkezésekor, a helyi tavasz idején.

A fenti ábrán a telente lerakódó (baloldali 1. kép) jég és az ásványi felületek találkozása mentén megjelenő mikroszkopikus skálájú nem szilárd H₂O molekulák (2. kép) gyengítik a szemcseösszlet stabilitását (3. kép). Várhatóan por is rakódik a légkörből a jéggel együtt a dűnék felületére (ez az ábrán külön nem szerepel, a sötét jég esetében lehetnek belekeveredett porszemcsék), és a jég-szilikát szemcsekeverék rendszerében keletkező, szilárd rácsot nem alkotó H₂O molekulák szendvicsszerű együttese teszi lehetővé az áramlást, esetleg a dűnehomokszemcsék is mozoghatnak. A szemcsék elmozdulása, elgurulása egymáson okozhat folyásos morfológiát, noha itt nem a hagyományos értelemben folyik a víz. Erre utaltam a 90. oldalon az alábbi szöveggel: „az egymáson lévő szemcsék alkotta szerkezet fizikai gyengítésével okoz elmozdulást”. Ez a lehetőség kiegészítésként, mint potenciális ok olvasható a 7. tézis részletes magyarázatban, de a tézis szövegében nem szerepel.

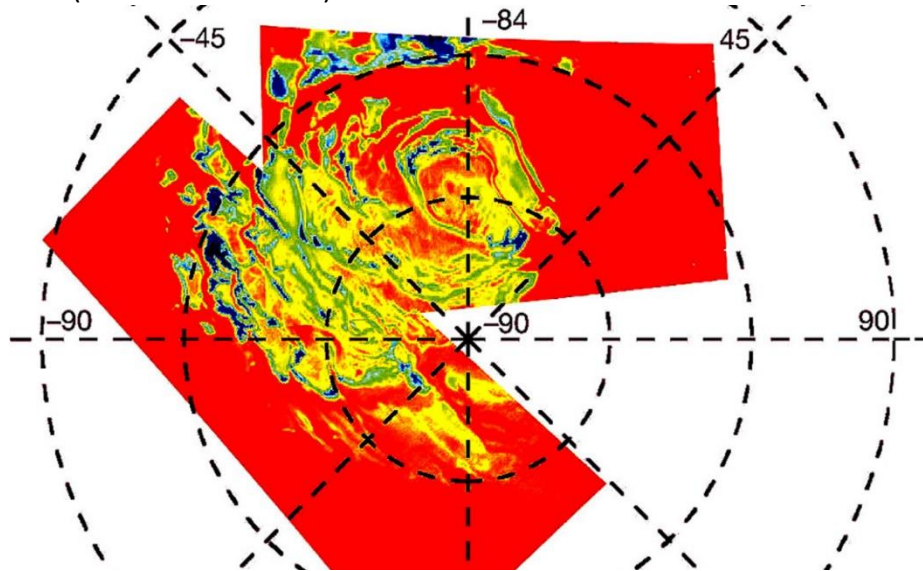
3/23. Milyen viszonyok között keletkezett a H₂O₂ és miért bomlik le jelenleg a Marson?

Megfigyelésekkel igazolt lebomlási út egyelőre nincs (noha a Curiosity szonda Sample Analysis at Mars (SAM) műszere, és a Phoenix szonda Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA) műszere a regolitból fűtés hatására észlelt olyan oxigén és vízgőz felszabadulást, ami H₂O₂ bomlásból is származhatott, de ezt egyelőre nem sikerült bizonyítani (Dame et al. 2017). Földi labormérések alapján az alábbi lehetőségek valószínűsíthetők:

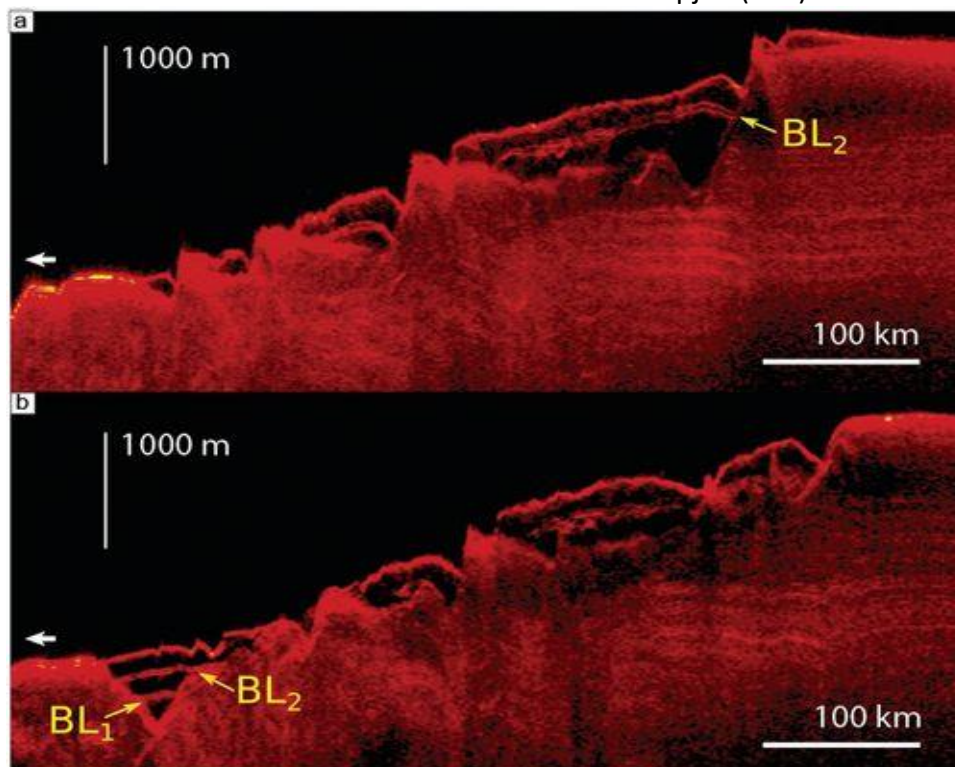
- mikroszkopikus skálájú víz segítségével elméleti számítások alapján átlagos marsi nappali hőmérsékleteken bomolhat le H₂O₂ (Kereszturi és Gobi 2014);
- hematit és pirit közreműködésével azokat oxidáló folyamat révén is bomolhat le (McKibben és Barnes 1986);
- egyes kísérletek alapján magnetit és sziderit is katalizálhat H₂O₂ lebomlást, de csak szobahőmérsékleten (Archer 2017).

3/24. Milyen bizonyítékai vannak a „több km vastag, vízjégből álló állandó jégsapkának” a déli sarkvidéken?

Az OMEGA és CRISM spektrométerek infravörös színképi mérései alapján a jégsapkát vízjég alkotja, ahol a fagyott CO₂ jég alól kibukkan (8. ábra, Bibring et al. 2004), vastagsága pedig a SHARAD és MARSIS felszín alá behatoló radarok mérései alapján becsülhető meg, alább a 9. ábrán két radarprofil mutat példát erre (Biersen et al. 2016).



8. ábra. A vízjég (kék) kibukkanása a szén-dioxid-jég (sárga) alól a Mars Express OMEGA műszereinek elemzése alapján (ESA)



9. ábra. Két radarprofil a déli állandó jégsapka területéről (a: 596801 és b: 582402 számú SHARAD profilok), ahol a BL jelzéssel azonosított részek CO₂ jeget, a kép többi részei H₂O jeget jeleznek.

3/25. a rendelkezésre álló adatok valóban modern numerikus elemzési módszereken alapuló morfológiai feldolgozása számottevően nagyobb súlyú tudományos eredményekre vezethettek volna.

Valóban, de az alapvetőbb kérdések elemzését a felszínformák eredetét illetően fontosabbnak tartottam, mint a részletesebb numerikus vizsgálatot. Az alapkérdések megértéséhez szerintem több felszínforma vizsgálata jobban visz közelebb, mint kevesebb felszínforma részletesebb elemzése – de ez a jelleg nehezen becsülhető a Marson, ahol a bolygótudományi kérdések megválaszolásának a kezdetén tartunk, egyes témakörökben már erős, de sok másokban még gyenge a tudásunk.

Források:

Archer, P. D., 2017. Effects of Martian Surface Materials on the Thermal Decomposition of Hydrogen Peroxide. NASA Technical Reports Server 2017-01-01

Barrett B.J., Gawthorpe R.L., Collier R.E.L., Hodgson D.M., Cullen T.M. 2020. Syn-rift delta interfan successions: Archives of sedimentation and basin evolution. *The Depositional Record* 6, 117-143

Bibring, J.P., Langevin, Y., Poulet, F. et al. 2004. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars. *Nature* 428, 627–630

Bierson C. J., Phillips R. J., Smith I. B., Wood S. E., Putzig N. E., Nunes D., Byrne S. 2016. Stratigraphy and evolution of the buried CO₂ deposit in the Martian south polar cap. *Geophysical Research Letters* 43, 4172-4179.

Dame, R.H.; Archer, P.D.; Hogancamp, J.C. 2017. Effects of Martian Surface Materials on the Thermal Decomposition of Hydrogen Peroxide. American Astronomical Society, DPS meeting #49, id.418.22

Davila A.F., Duport L.G., Melchiorri R., Jänchen J., Valea S., de los Rios A., Fairén A.G., Möhlmann D., McKay C.P., Ascaso C., Wierzchos J. 2010. Hygroscopic Salts and the Potential for Life on Mars. *Astrobiology* 617-628.

Eliason et al. 2012. Software Interface Specification for HiRISE Reduced Data Record Products

HoriYoshiki K., Yoshiki S. 2003. Morphology and Sediments of Large River Deltas. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)* 112(3), DOI: 10.5026/jgeography.112.3_337

Kereszturi A., Gobi S. 2014. Possibility of H₂O₂ decomposition in thin liquid films on Mars. *Planetary and Space Science* 103, 153-166

Li H., Mars J., Lohstroh W., Marek Koza M., Butt H.J., Mezger M. 2020. Water Mobility in the Interfacial Liquid Layer of Ice/Clay Nanocomposites. *Angewandte Chemie* 60, 7697-7702

McKibben, M.A., Barnes, H.L., 1986. Oxidation of pyrite in low temperature acidic solutions: rate laws and surface textures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50 (7), 1509–1520

Michael G.G., Kneissl T., Neesemann A. 2016. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Poisson timing analysis. *Icarus* 277, 279-285

Mutoh T.A., Ueda N., Doki K., Ootawara M., Shiinoki Y. 2002. Moisture Migration in Deep-Fried Food during Frozen Storage. *Food Sci. Technol. Res.* 8 (1), 50–54.

Rodríguez A., Varekamp J.C., van Bergen M.J., Kading T.J., Oonk P., Gammons C.H., Gilmore M. 2016. Acid Rivers and Lakes at Caviahue-Copahue Volcano as Potential Terrestrial Analogues for Aqueous Paleo-Environments on Mars. In book: *Copahue Volcano*, DOI: 10.1007/978-3-662-48005-2_7

Teng J., Dong A., Yan H., Tong C., Zhang S. 2023a. Predicting the hydraulic conductivity of frozen coarse-grained soils. *Journal of Hydrology* 617, Part B, 129048

Teng T., Gu X., Xia X., Zhang Q. 2023b. Numerical Simulation of Frost Heave Deformation of Concrete-Lined Canal Considering Thermal-Hydro-Mechanical Coupling Effect. *Water* 2023 15(7), 1412

Budapest, 2023. 07. 15.



Kereszturi Ákos