

## A MARS PERIGLACIÁLIS LEJTŐFORMÁINAK VIZSGÁLATA

SIK ANDRÁS

ANALYSIS OF PERIGLACIAL SLOPE LANDFORMS ON MARS

### Abstract

Recently, the investigation of Mars is carried out by space probes. Satellite images, DEMs and other types of planetary datasets can be integrated and analyzed in GIS software environment. I have investigated two groups of water ice-related Martian slope landforms in eight study areas. The periglacial debris aprons of mid-latitude regions developed in the last few hundred million years, as a result of the slow downslope movement and plastic deformation of rock-ice mixtures with cemented inner structure. Nowadays these are inactive or fossil landforms, indicating different climatic conditions in the past. The dark slope streaks on the dune fields of the sub-polar regions are the surface signatures of the pore volume-filling downslope seepage of liquid interfacial H<sub>2</sub>O, originating from the near-surface material in recent spring/summer periods. These two different types of ice-related slope landforms can be explained by the same process: partial melting of water ice in the shallow subsurface layers. Therefore, both can be considered as reliable locations and reachable sources of H<sub>2</sub>O reservoirs to be found on the planet.

**Keywords:** Mars, periglacial slope landforms, debris apron, dark streak

### Bevezetés

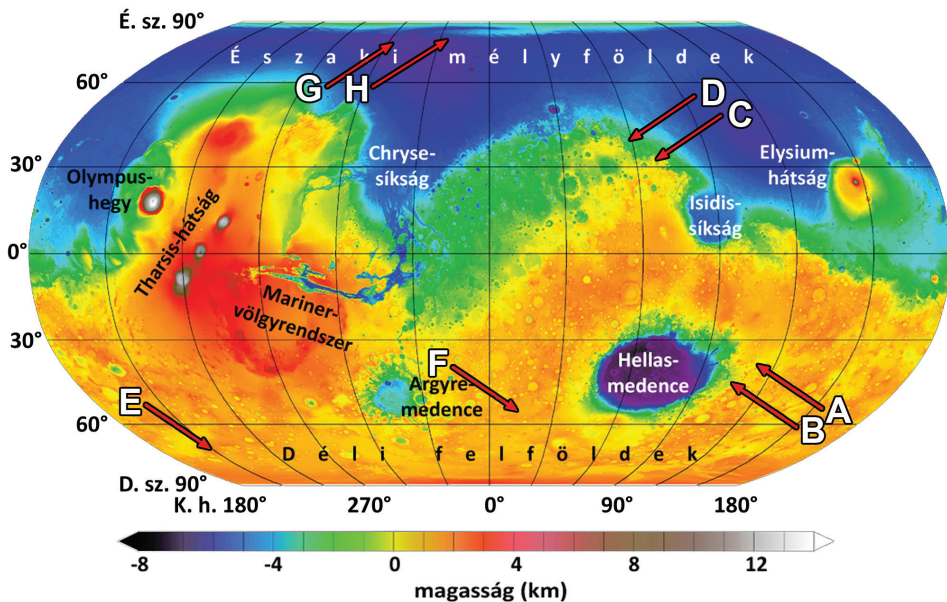
A vörös bolygó kutatása az emberiség egyik legizgalmasabb tudományos vállalkozása, amely sok szempontból a földrajzi felfedezések kalandos időszakára emlékeztet. A több évszázadon át végzett teleszkópos megfigyeléseket az 1960-as évektől űrszondák által végzett adatgyűjtés, földtudományi szemléletmód és korszerű planetológiai elemzés váltotta fel.

Kutatóeszközeink egyik fajtája a keringőegység (orbiter), amely sikeres pályára állás után a teljes égitestet tanulmányozhatja – azonban a Föld körül keringő műholdakhoz hasonlóan csak közvetett, távérzékelési eljárásokkal. A másik alaptípus, a leszállóegység (lander) célba juttatása kockázatosabb feladat, ám ha épségben eléri a felszínt, részletes mérésekkel és anyagvizsgálatokkal terepi bizonyosságot szerezhet a leszállóhely szűk környezetéről – vagyis módszerei közvetlenek, de eredményei nem általánosíthatók az egész bolygóra.

Tehát annak ellenére, hogy napjainkban két guruló jármű is dolgozik külső szomszédunk zord tájain (a NASA Opportunity és Curiosity leszállóegységei), a globális marsrajzi viszonyok (SIK A. et al. 2005), az általános felszínalaktani jellemzők és a múltbeli fejlődéstörténet (KERESZTURI Á. 2006) megismerését inkább a keringőegység-adatok teszik lehetővé.

Planetológiai kutatómunkám részeként a Mars felszínközeli törmelékkrétegeinek H<sub>2</sub>O-tartalmára utaló lejtőformák morfológiai és morfometriai sajátosságait vizsgáltam összesen nyolc mintaterület alapján (*1. ábra*), két eltérő mérettartományban:

- a közepes marsrajzi szélességű övezetekben létrejött periglaciális törmelék-lejtőket, vagyis az égitest legnagyobb jeges lejtőalakzatait (A, B, C, D jelzésű mintaterületek);
- a szubpoláris térségek dűnemezőin látható sötét lejtősávokat, amelyek a bolygó lejtős térszíneinek úrfelvételen megfigyelhető legkisebb képződményei (E, F, G, H jelzésű mintaterületek).



1. ábra A mintaterületek elhelyezkedése a Mars domborzati térképén – periglaciális törmeléklejtők: A: Greg-kráter; B: Euripus-hegy; C: Nilosyrtis-táblahegyvidék; D: Protonilus-táblahegyvidék; sötét lejtősávok: E: Konkoly-kráter; F: Russell-kráter; G: Escorial-kráter; H: Inuvik-kráter (Sík A.)

Figure 1 Locations of study areas on the topographic map of Mars – periglacial debris aprons: A: Greg Crater; B: Euripus Mons; C: Nilosyrtis Mensae; D: Protonilus Mensae; dark slope streaks: E: Konkoly Crater; F: Russell Crater; G: Escorial Crater; H: Inuvik Crater (Sík, A.)

## Kutatási módszerek és adatforrások

A távérzékelési eljárásokkal gyűjtött marsi téradatak digitális állományok, amelyeket több keringőegység különböző érzékelő-berendezései rögzítettek eltérő időpontban és változatos technikai paraméterekkel. Ezért integrált kezelésükhöz térinformatikai szoftverkörnyezet, illetve egységesen használt térbeli vonatkoztatási rendszerek és adatformátumok szükségesek (Sík A. 2010). Az utóbbi években szerencsére megszilárdultak és elterjedtek a marsi GIS szabványok, azonban néhány sajátos adatállomány feldolgozása még mindig összetett konverziós eljárásokat igényel (Sík A. 2011).

Kutatómunkám legfontosabb adatforrásai nagyfelbontású optikai űrfelvételek, digitális domborzatmodellek (DDM) és infravörös spektrométer-állományok voltak (1. táblázat), amelyek internetes adatbázisokban kereshetők és nyilvánosan hozzáférhetők (Sík A. 2013).

Az adatok integrálását, morfológiai/morfometriai elemzését, valamint az eredmények térképi megjelenítését és háromdimenziós ábrázolását is az ESRI ArcGIS for Desktop 9.3 térinformatikai szoftvercsomaggal végeztem el.

## Periglaciális törmeléklejtők a közepes marsrajzi szélességeken

A bolygó törmelékkel borított, periglaciális fagysivatagainak egyik jellegzetes formakincsű tájtípusaként határozhatók meg a kimart területek (angolul fretted terrain). Az északi

## Marsi keringőegységek legfontosabb érzékelő-berendezéseinek összehasonlítása (SIK A.)

Comparison of the most important instruments onboard Mars orbiters (SIK, A.)

Küldetés neve (rövidítése) időtartama	Érzékelő-berendezés neve	Érzékelő-berendezés típusa	Állományok maximális terepi felbontása
Mars Global Surveyor (MGS) 1997–2006	MGS MOC NA	optikai kamera	1,5 méter/pixel
	MGS MOLA	DDM-készítés (lézeres magasságmérő)	300 méter/pixel
	MGS TES	infravörös spektrométer	3 000 méter/pixel
Mars Express (MEX) 2004–jelen	MEX HRSC	optikai kamera	12,5 méter/pixel
	MEX HRSC sztereo	DDM-készítés	50 méter/pixel
	MEX OMEGA	infravörös spektrométer	300 méter/pixel
Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 2006–jelen	MRO CTX	optikai kamera	6 méter/pixel
	MRO HiRISE	optikai kamera	0,25 méter/pixel
	MRO HiRISE sztereo	DDM-készítés	1 méter/pixel
	MRO CRISM	infravörös spektrométer	18 méter/pixel

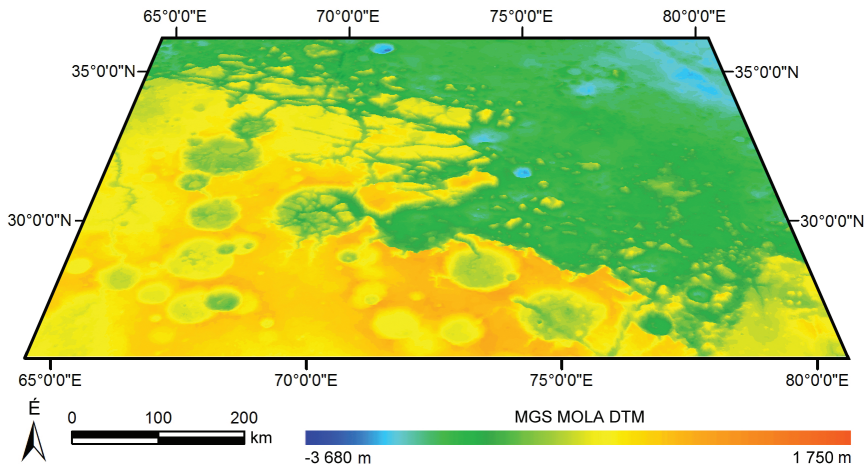
féltekén a 30-55. szélességi fokok közötti övezetben található Deuteronilus-, Nilosyrtis-, illetve Protonilus-táblahegyvidékek, a déli féltekén pedig elsősorban a Hellas- és Argyre-mencék körüli térségek sorolhatók közéjük (MCGILL, E. 2000).

Ezek a Mars leginkább felszabdalt, maximális reliefenergiájú területei. Formakincsük tulajdonképpen fokozatos átmenet a felföldek idősebb felszín típusa és a mélyebb helyzetű, fiatalabb síkságok között: eleinte a magasabb térszín csak nagyobb kiterjedésű platókra tagolódik, amelyek több kilométerrel emelkednek az őket elválasztó széles, lapos aljzatú völgyek fölé, ám végül már a mélyföld-jellegű felszínrészletek kerülnek túlsúlyba a néhány kilométer magasságú, elszórt táblahegyek között (2. ábra).

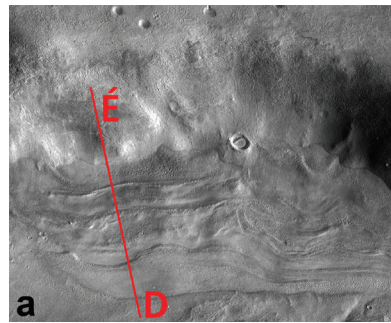
A meredek falú platók és szigetszerű táblahegyek oldalán, valamint a völgyek fala mentén azoknál sokkal fiatalabb korú, lebenyes lejtőformák figyelhetők meg, amelyek hatalmas méretű, köves-jeges összeleteire magyarul a periglaciális törmelékletítő kifejezés használatát javaslom. Általában kiemelkedéseket illetve völgyfalakat szegélyeznek (3/a. ábra), vagy táblahegyeket vesznek szoknyaszerűen körbe, de a kimart területeket platókra szabdaló völgyek aljzatán, továbbá kráterek és részlegesen vagy teljesen zárt mélyedések belsejében is előfordulhatnak.

Ezek a Mars legnagyobb méretű jeges lejtőformái, amelyek legjobb földi analógiái a sziklagleccserek. Cementált belső szerkezetüket minden bizonnyal plasztikus deformációk alakították lassú lejtőirányú elmozdulásuk során. Az egyre részletesebb optikai úrfelvételek és domborzatmodellek alapján a periglaciális törmelékletítők közös morfológiai/morfometriai jellemzői az alábbiak (HEAD, J. W. et al. 2005):

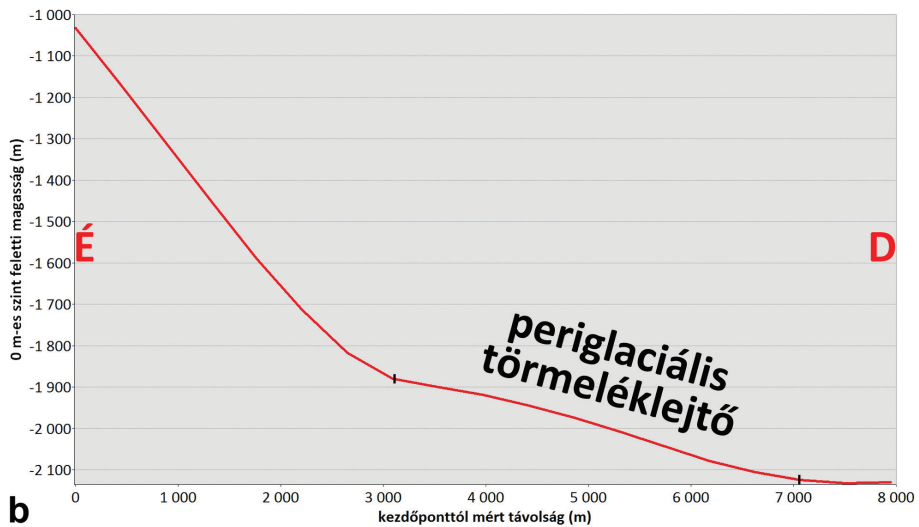
- határozott meredekség-változással különülnek el a mögöttük húzódó kiemelkedéstől;
- hosszúságuk 2-20 kilométer, de akár néhányszor tíz kilométer is lehet;
- relatív magasságuk több száz méter;
- hossz-szelvényük konvex lefutású, átlagos lejtőszögük pedig 1,5-3° közötti (3/b. ábra);
- homlokfrontjuk viszonylag meredeken végződik el;



2. ábra A Nilosyrtris-táblahegyvidék kimart területe digitális domborzatmodellen magassági színezéssel, 1:3 függőleges torzítással (Sík, A.)  
 Figure 2 Fretted terrain of Nilosyrtris Mensae represented by color ramp applied for digital elevation model with 1:3 vertical exaggeration (Sík, A.)



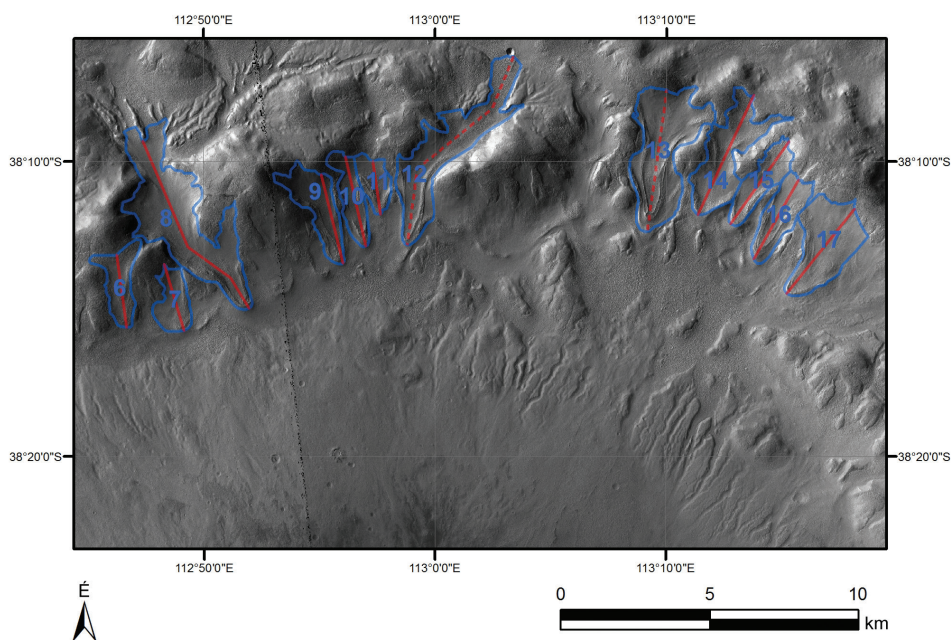
3. ábra Völgyfalat szegélyező periglaciális törmelékeltető  
 a) optikai űrfelvétel; b) az É–D vonal mentén készített szelvény 1:4 függőleges torzítással (Sík, A.)  
 Figure 3 Periglacial debris apron edging the wall of a valley  
 a) optical satellite image;  
 b) profile along É–D line with 1:4 vertical exaggeration (Sík, A.)



- keresztshelvényük domború vagy homorú, s oldalsáncaik nem mindig jelölhetők ki;
- gyakran lebenyes alakú részekre tagolódnak;
- felszínükön íves gerincek és árkos barázdák összetett mintázata látható.

### Greg-kráter mintaterület

A 68 kilométer átmérőjű és 2,5 kilométer mélységű Greg-kráter (D. sz. 38,2°; K. h. 112,9°) a Hellas-medence keleti peremvidékén helyezkedik el, s belsejében egy központi kúp található. A kráter északi részének belső oldallejtőin nyelv formájú törmelékalkazatok, illetve törmelékkejtő-kezdemények figyelhetők meg, amelyek közül a nagyfelbontású optikai űrfelvételek alapján 17 különálló forma határozható le (4. ábra).



### Jelmagyarázat

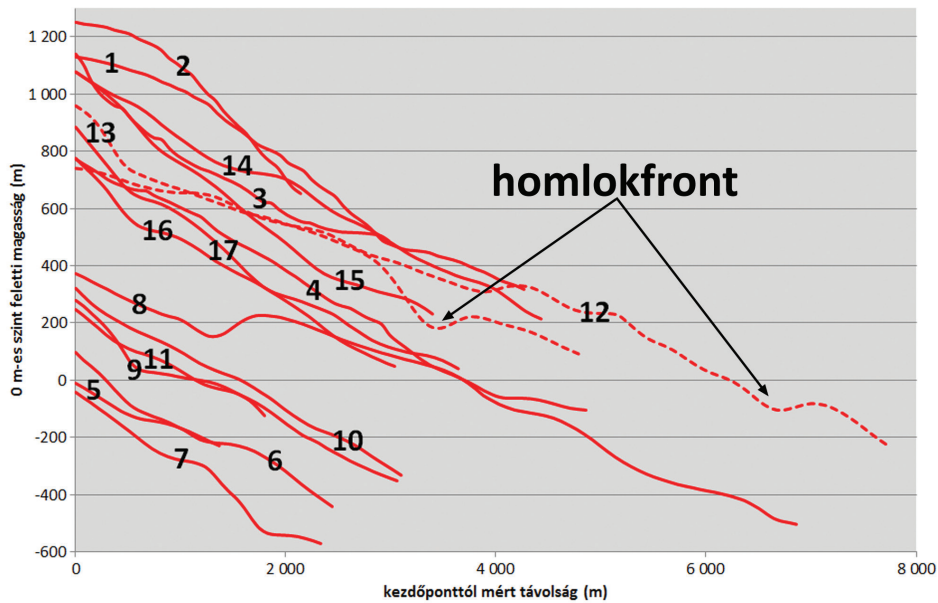
- — — — — Szelvény-vonal
- Törmeléknyelv

4. ábra A Greg-kráter délkeleti és délnyugati kitétségű belső lejtőin lehatárolt fejlettebb törmeléknyelvek, illetve hossz-szelvényeik elhelyezkedése (SIK, A.)

Figure 4 Advanced debris tongues on the inner slopes of Greg Crater with southeastern and southwestern aspect and the locations of their longitudinal profiles (SIK, A.)

A törmeléknyelvek elhelyezkedése nagymértékű irányfüggést mutat: szinte kivétel nélkül csak délkeleti, déli és délnyugati kitétségű lejtőkön található meg. Tehát a pólus felé néző, árnyékosabb térszíneken jöhetnek létre, feltehetőleg azért, mert a télen felhalmozódott vízjég ezeken a területeken olvad el a legkevésbé a nyári felmelegedés során. Az alattuk húzódó, átlagosan 3-8° közötti meredekségű lejtőszakaszokon megfigyelhető meder-maradványok a törmeléknyelvek feltételezett vízjég-tartalmának bizonyítékai, amelyeket a köves-jeges összeleteik éghajlat-ingadozások hatására történt részleges megolvadásából származó vízszivárgás lineáris eróziója hozhatott létre (KERESZTURI Á. 2007).

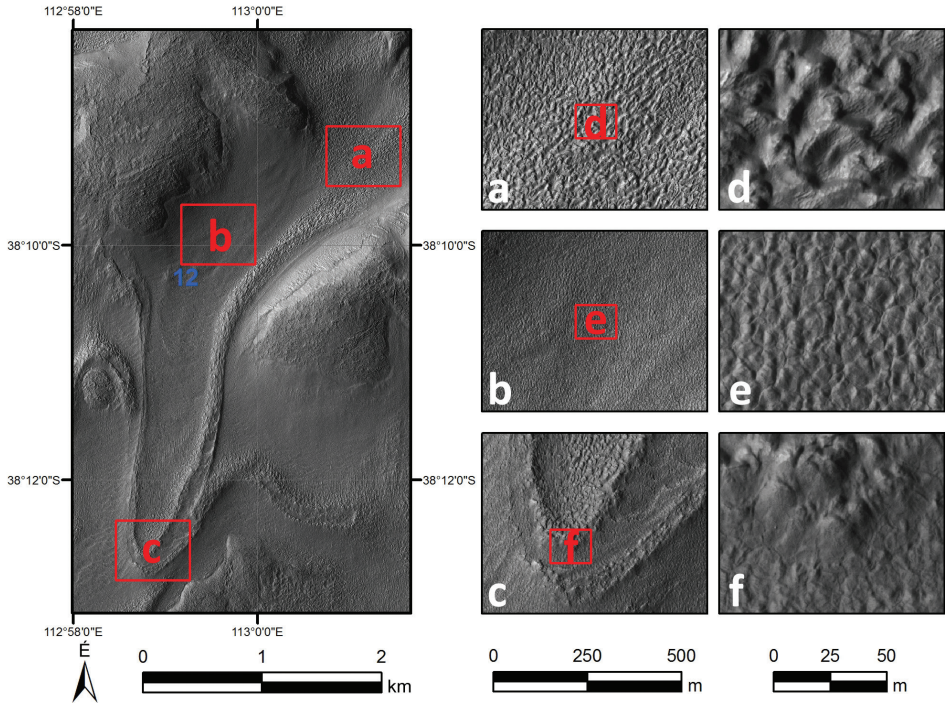
Az elérhető legpontosabb, kb. 75 méter/pixel terepi felbontású digitális domborzatmodell alapján a törmeléknyelvek hosszúsága 1 369-7 715 méter között, magassága 218-971 méter között változik, átlagos lejtőszögük középértéke pedig 11,5°. Hosszszelvényeiket egymás mellé illesztve látványosan kirajzolódik konvex lefutásuk (5. ábra).



5. ábra A Greg-kráterben lehatárolt 17 törmeléknyelv közös koordináta-rendszerben ábrázolt hossz-szelvényei 1:3 függőleges torzítással (Sík A.)  
 Figure 5 The longitudinal profiles of 17 debris tongues observed in Greg Crater combined in a common coordinate system with 1:3 vertical exaggeration (Sík A.)

Morfológiai szempontból a 8, 12 illetve 13 azonosítójú törmeléknyelvek tekinthetők a legfejlettebbeknek, valószínűleg azért, mert a többi alakzatnál jelentősen nagyobb táplálóterülettel rendelkeznek, így gyorsabban növekedhettek azoknál. A formakincs részletes elemzése éppen a 12 és 13 azonosítójú képződmények esetében lehetséges, mert ezekről állnak rendelkezésre nagyfelbontású optikai űrfelvételek.

Felszíni mintázatuk változása alapján mindkét törmeléknyelv hasonló jellegű szakaszokra tagolható. Kiterjedt táplálóterületüket (6/a. ábra) durva szerkezetű, egyenetlen sziklás térszín alkotja néhányszor tíz méter nagyságú blokkok mintázatával (6/d. ábra). Ilyen méretű kőzettömbök a sziklafalakra akár jelenleg is hordódhatnak az összletre, amelyek a lejtésirányt kirajzoló vonalakba rendeződnek, létrehozva a területre szintén jellemző párhuzamos sáv-mintázatot. Középső szakaszukon (6/b. ábra) sokkal egyenletesebb felszíni mintázat figyelhető meg, amely néhány méteres vagy kisebb átmérőjű, poligonyszerű egységekből áll (6/e. ábra). Ez idősebb lehet a táplálóterület blokkos mintázatú térszínénél, s annak fokozatos eróziójával alakulhatott ki, leginkább a törmelékanyag lejtőirányú előrehaladása során zajló aprózódás hatására. A tengelyvonal közelében – a térség gyorsabb mozgása miatt – a lejtésirányra merőleges, lefelé domborodó íves gerincek és barázdák váltakoznak. Az elvégződő szakaszokat (6/c. ábra) pedig meredek homlokfront zárja le (5. ábra), ahol szinte „oldalról” látható a táplálóterülethez hasonlóan blokkokra tagolódó felszíni szerkezet (6/f. ábra).



6. ábra A Greg-kráterben található, 12 azonosítójú törmeléknyelv felszíni szerkezet-típusai – a) táplálóterület; b) középső szakasz; c) elvégződő szakasz; d) blokkos mintázat; e) poligonális mintázat; f) homlokfront (Sík, A.)  
 Figure 6 The surface structure types of number 12 debris tongue of Greg Crater – a) source area; b) middle section; c) apex; d) blocky pattern; e) polygonal pattern; f) front slope (Sík, A.)

A két törmeléknyelv középső, illetve elvégződő szakaszait egy többé-kevésbé folyamatos perem szegélyezi, amelyet két részforma alkot: a táplálóterülethez hasonlóan blokkos mintázatú oldalsánc, valamint egy kívülről ezt határoló kettős árok. Az oldalsánc durvább felszíni szerkezete talán oldal- és végmorénák egykori képződésére, vagyis a törmeléknyelvek egykori nagyobb kiterjedésre utal, az árok pedig feltehetőleg a múltban zajlott nivációs folyamatok és/vagy olvadékvíz-szivárgások eróziós mélyítő hatásának eredményeként alakult ki. Poligonális mintázatú középső szakaszaik keresztmetszelve az oldalsáncok között gyakran lapos, vagy kis mértékben homorú lefutású, s csak néhány területen domború alakú.

Mindezek alapján a törmeléknyelvek inaktívnak tűnnek: jégkészletük talán megvan még, de periodikusan ismétlődő, részleges megolvadásukat a jelenlegi éghajlati viszonyok nem teszik lehetővé. Így felső törmelékanyagukból biztosan nem képződhet aktív felszíni réteg, vagyis formakincsük napjainkban szinte egyáltalán nem változik, s vízjég-tartalmuk fokozatos szublimációja miatt lassan fosszilis formákká válnak.

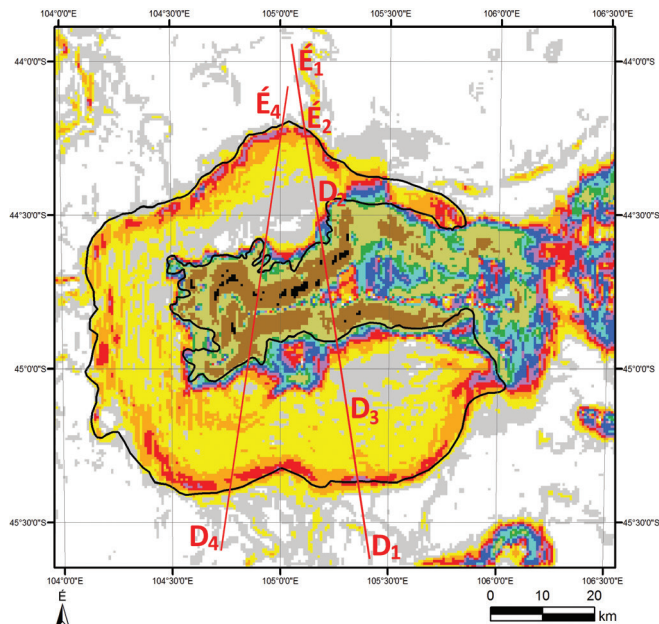
A vizsgált törmeléknyelvek kialakulásához szükséges időtartam megbecsülhető földi mérések alapján – természetesen figyelembe véve a két égitest felszíni környezetének eltéréseit. A marsi tájak legjobb földi analógia-helyszínén, az antarktiszi McMurdo-szárazvölgyek periglaciális térségében a sziklageccserek megfigyelt előrehaladási sebessége nagyságrendileg 10 milliméter/év (RIGNOT, E. et al. 2002), de becslésem szerint a Marson ennek csak 75-25%-a lehetett jellemző (a kisebb gravitációs gyorsulás, illetve alacsonyabb légköri H<sub>2</sub>O-tartalom miatt). Így az átlagosan 3,6 kilométer hosszúságú alakzatok kb. 0,5-1,5 millió év alatt jöhettek létre.

Keletkezési idejük tisztázásához viszont kráterstatistikai elemzés szükséges. S mivel csak néhány egészen kis méretű becsapódásos forma látható felszínükön, statisztikai vizsgálatuk alapján a Greg-kráter törmeléknyelvei legfeljebb 10 millió évesek lehetnek (ARFSTROM, J.–HARTMANN, W. K. 2005).

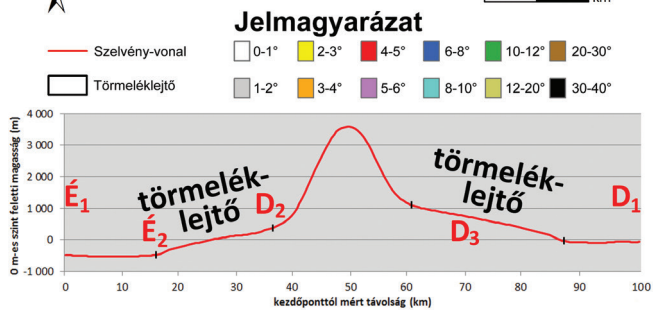
### Euripus-hegy mintaterület

A 73 kilométer hosszúságú és a síksági tájból 4,5 kilométer magasra emelkedő, kelet-nyugati csapásirányú Euripus-hegy (D. sz. 44,8°; K. h. 105,1°) a Hellas-medence keleti peremvidékén helyezkedik el, s egy kiterjedt lebenyes törmeléklejtő veszi szoknyaszerűen körbe.

A táblahegy gerincvonalától sugárirányba kifelé szétterülő törmeléklejtő legnagyobb átmérője kb. 90 kilométer, hosszúsága 5-30 kilométer között, vastagsága pedig kb. 300-1200 méter között változik (feltételezve, hogy alatta közel sík térszín található). Méretének irányfüggő különbségei nem jelentősek, ám a déli kitettségű táplálóterületeken eredő lebenyek kissé hosszabbak az északi oldal alakzatainál. A kiemelkedő sziklafalaktól határozott meredekség-változással elklönülő képződmény lejtőszöge átlagosan 1,5-3,5° közötti, amit lejtőmeredekség-térképe és jellemző keresztelvénye (7. ábra) egyaránt jól szemléltet.



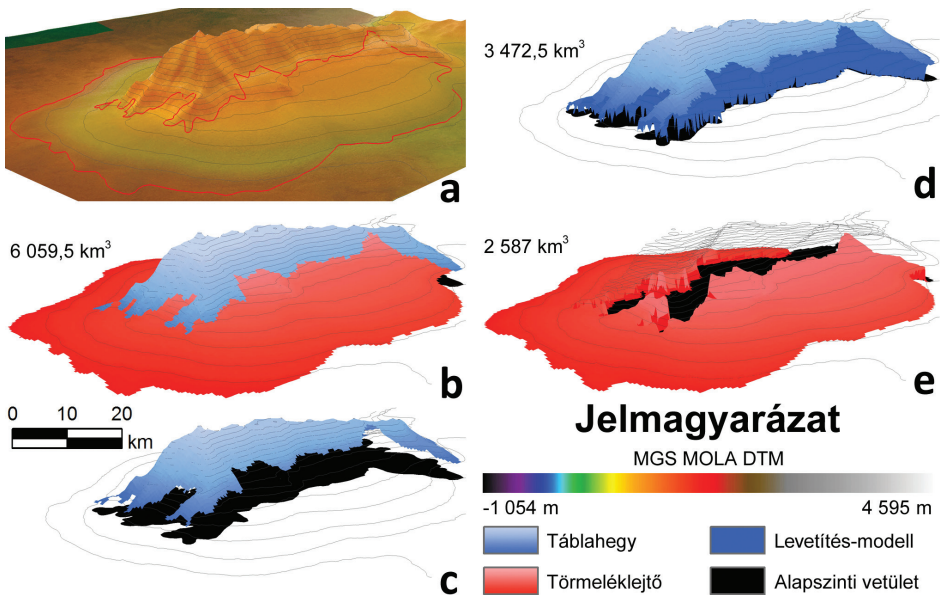
7. ábra Az Euripus-hegy körüli lebenyes törmeléklejtő digitális domborzatmodellből levezetett lejtőmeredekség-térképen és a terület jellemző szelvénye az É<sub>1</sub>–D<sub>1</sub> vonal mentén 1 : 5 függőleges torzítással (Sík A.)  
 Figure 7 Digital elevation model-derived aspect map of the lobate debris apron around Euripus Mons and the representative profile of the area along É<sub>1</sub>–D<sub>1</sub> line with 1 : 5 vertical exaggeration (Sík A.)





A területről rendelkezésre álló, kb. 463 méter/pixel terepi felbontású digitális domborzatmodell felhasználásával kiszámítottam a táblahegy körüli lebenyes törmelékletjtő hozzátvetőleges térfogatát, az alábbi módszerrel (8. ábra):

- a teljes formaegyüttes, vagyis a táblahegy és a lebenyes törmelékletjtő össztérfogatának meghatározása a terület legmélyebb pontjához igazított, –569 méteres magasságban húzódnó helyi alapszint felett;
- a táblahegy törmelékletjtő fölé emelkedő részének helyi alapszintre történő levétítése (a sziklafalak meredekségének bizonytalansága miatt függőleges oldalfalvonalakkal);
- az így kapott táblahegy-modell helyi alapszint feletti térfogatának kivonása a teljes formaegyüttes térfogatából.



8. ábra Az Euripus-hegy körüli lebenyes törmelékletjtő háromdimenziós megjelenítése és térfogata

1 : 3 függőleges torzítással – a) színes fotó-térkép, a háttérben magassági színezéssel;

b) a táblahegy és a törmelékletjtő elkülönítve, illetve a formaegyüttes térfogata; c) a táblahegy alapszinti vetülete;

d) a táblahegy térbeli modellje és térfogata; e) a törmelékletjtő térbeli modellje és térfogata (Sik A.)

Figure 8 Three dimensional visualization and volume of the lobate debris apron around Euripus Mons with 1 : 3 vertical exaggeration – a) color satellite image map with elevation color ramp in the background;

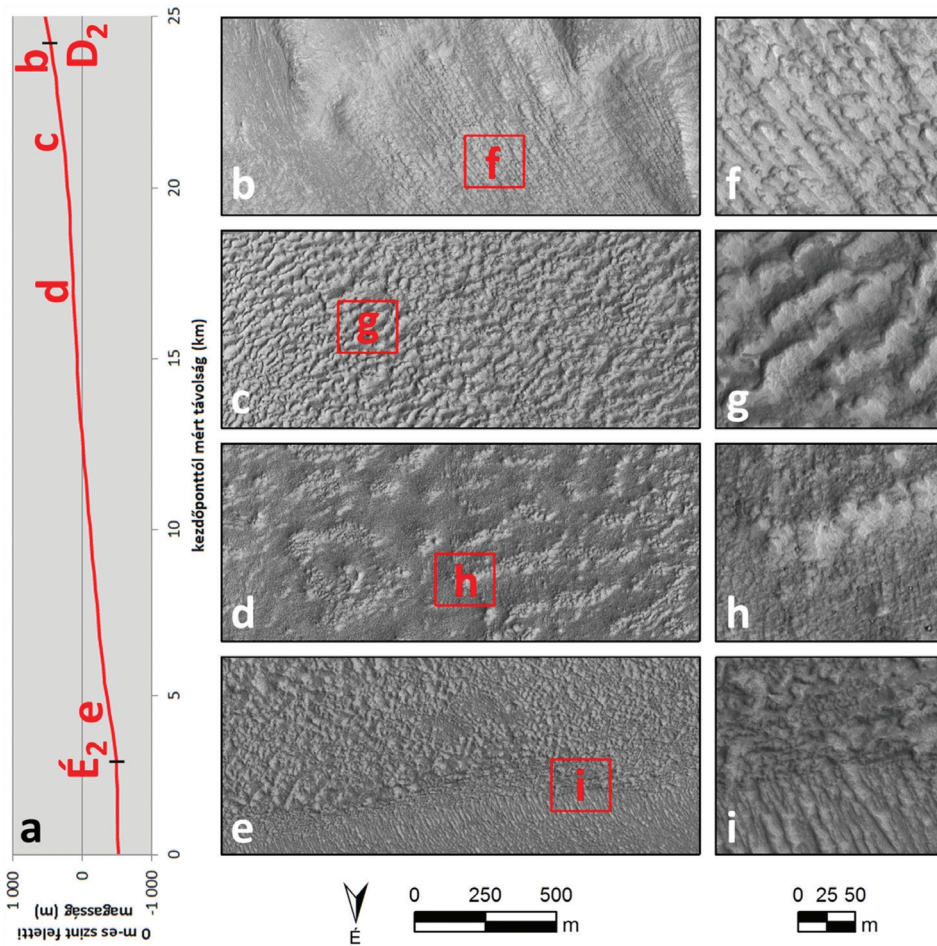
b) separation of the mesa from the debris apron and the volume of the complex; c) projection of the mesa to the base level;

d) spatial model and volume of the mesa; e) spatial model and volume of the debris apron (Sik, A.)

Az eredmény  $6\,059,5 - 3\,472,5 = 2\,587 \text{ km}^3$ , ami a vetítvonalak függőleges helyzete miatt csak közelítő felső határértéke a törmelékletjtő térfogatának. Ugyanis a táblahegy sziklafalainak jellemző meredeksége  $15\text{-}25^\circ$  között változik (7. ábra), ami azt jelenti, hogy legfeljebb 17%, de legalább 8% többletet hozzá kell adni a függőleges modell alapján kiszámolt térfogatához. A törmelékletjtő kiterjedéséből viszont le kell vonni ugyanezt, tehát annak valós értéke inkább  $2\,000\text{-}2\,300 \text{ km}^3$  között lehet.

A törmelékletjtő részletes morfológiai elemzését összesen 26 darab nagyfelbontású optikai űrfelvétel alapján végeztem el. Ezekon jól látható, hogy a képződmény nem egységes szerkezetű, hanem valójában a különböző táplálóterületekről érkező kisebb törmelék-

léknyelvek összecsatlakozó rendszere. Felszínén többféle szerkezet-típus váltakozik a táplálóterületek és a homlokfront között (9/a. ábra), amelyek számos hasonlóságot mutatnak a Greg-kráter formáinak mintázatával.



9. ábra Az Euripus-hegy körüli lebenyes törmelékletítő felszíni szerkezet-típusai

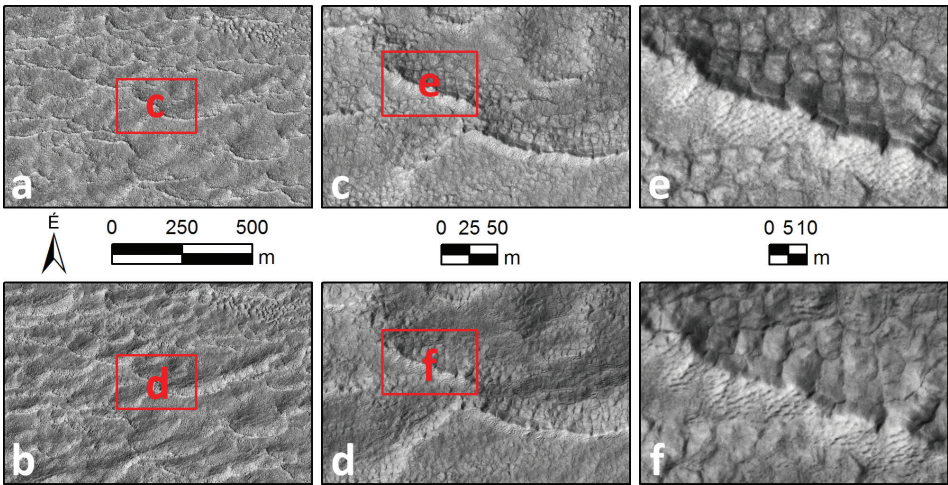
- a) a 7. ábrán látható szelvény É<sub>2</sub>-D<sub>2</sub> szakasza 1 : 2 függőleges torzítással és a további ábrarészek elhelyezkedése;
- b) táplálóterület felső része; c) táplálóterület alsó része; d) középső szakasz;
- e) elvégződő szakasz; f) párhuzamos sáv-mintázat; g) lejtésirányra merőleges gerincek és barázdák mintázata;
- h) lepusztított gerinc-mintázat; i) homlokfront (S1K A.)

Figure 9 The surface structure types of lobate debris apron around Euripus Mons – a) É<sub>2</sub>-D<sub>2</sub> section in profile line of Figure 7 with 1 : 2 vertical exaggeration and the locations of additional subsets;

- b) upper section of the source area; c) lower section of the source area; d) middle section; e) apex; f) parallel stripe pattern;
- g) pattern of ridges and grooves perpendicular to the slope direction; h) eroded ridge pattern; i) front slope (S1K, A.)

A sziklafal és a törmelékösszlet határvonala mentén (9/b. ábra) számos helyen figyelhető meg lejtésiránnyal párhuzamos sáv-mintázat (9/f. ábra), amelynek jellemzően 10-20 méter szélességű egységei a falról a törmelékösszletre gurult nagy méretű közettömbök irányítottág szerinti elrendeződésével jöhetnek létre, a táplálóterület kúszása miatti gyors deformáció következtében. A táplálóterület alsó részén (9/c. ábra) durva szerkezetű, egyenetlen

sziklás térszín látható, gyakran a Greg-kráter törmeléknyelveinek azonos szakaszához hasonlóan néhányszor tíz méter nagyságú blokkok mintázatával (6/d. ábra), bizonyos részekben pedig a lejtésirányra merőleges íves gerincek és barázdák váltakoznak (9/g. ábra). A lebenyek középső szakaszát „ritkább megjelenésű” felszíni szerkezet-típusok borítják. Egyes helyeken szintén a lejtésirányra merőleges gerincek rajzolódnak ki, ám távolságuk itt nagyobb s – feltehetőleg az aprózódás és más eróziós folyamatok eredményeként – sokkal lepusztultabbak is (9/d. ábra), a közöttük lévő mélyebb helyzetű, esetleg besülylyedtet térszíneket pedig osztályozatlan sötét törmelékanyag tölti ki elszórt sziklatömbökkel (9/h. ábra). Máshol viszont a szakadozott felszín inkább a földi girlandos gyepteraszokra, vagy periglaciális lépcsők sorozatára emlékeztet (10. ábra). Lefelé haladva a girlandok mérete növekszik, mintha a rétegek egyre hosszabb utat tennének meg egymástól függetlenül, s néhány helyen lejtésirányba domborodó koncentrikus sáncok is kialakultak. Az elvégződő szakaszt (9/e. ábra) nagyobb meredekségű homlokfront zárja le, ahol szinte „oldalról” látható a törmelékletítő összetételének réteges szerkezete, alóla pedig a táplálóterület felső részére jellemző párhuzamos sáv-mintázat indul ki (9/i. ábra) – ez akár a múltban zajlott aljzati olvadásból származó, felszínre jutott víz eróziós munkájának terméke is lehet.



10. ábra Az Euripus-hegy körüli lebenyes törmelékletjtőről elérhető legrészletesebb optikai űrfelvételek összehasonlítása a 7. ábra D<sub>3</sub>-pontjánál – a) a PSP\_003639\_1345 azonosítójú MRO HiRISE-felvétel részlete; b) a PSP\_005907\_1345 azonosítójú MRO HiRISE-felvétel részlete; c) az a) ábrarészleten kerettel jelölt terület nagyított képe; d) a b) ábrarészleten kerettel jelölt terület nagyított képe; e) a c) ábrarészleten kerettel jelölt terület nagyított képe; f) a d) ábrarészleten kerettel jelölt terület nagyított képe (SIK A.)

Figure 10 Comparison of the most detailed optical satellite images available for the lobate debris apron around Euripus Mons at the D<sub>3</sub> point of Figure 7 – a) part of MRO HiRISE image no. PSP\_003639\_1345; b) part of MRO HiRISE image no. PSP\_005907\_1345; c) enlarged view of the frame on a) figure subset; d) enlarged view of the frame on b) figure subset; e) enlarged view of the frame on c) figure subset; f) enlarged view of the frame on d) figure subset (SIK, A.)

A térség nyári időszakra jellemző felszíni hőmérséklet-értékeit is megvizsgáltam, két eltérő keringőegység infravörös spektrométerének helyi időben mérve 13.00-14.00 közötti napszakra (vagyis a déli félteke közepes marsrajzi szélességű övezetének legmelegebb időpontjaira) vonatkozó mérési eredmények felhasználásával.

Az egymással jól korreláló adatforrások átlagolásával kapott eredmények alapján úgy tűnik, hogy nyár közepén-végén a táblahegy sziklafelszíne a legmelegebb, a körülötte

lévő síkság jelentősen hidegebb, s a törmeléklejtő maximum-, illetve átlaghőmérséklete mindig a kettő közé esik (2. táblázat). Utóbbi azért lehet valamivel melegebb a környező síkságnál, mert felszíni rétegét nagyobb méretű sziklatömbök alkotják, s ezek besugárzásra merőleges helyzetű oldalfelületein több hőenergia nyelődhet el.

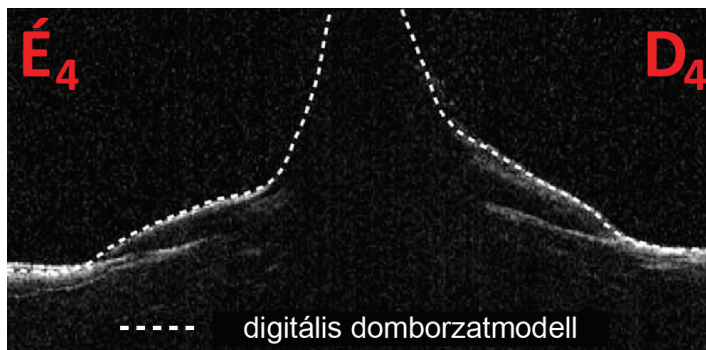
2. táblázat – Table 2

Az Euripus-hegy térségének nyári időszakra vonatkozó legmagasabb és átlagos felszíni hőmérséklet-értékei (Sík A.)  
Maximum and average summer surface temperature values of the Euripus Mons area (Sík, A.)

Felszín típus	Nyár közepe		Nyár vége	
	maximum	átlag	maximum	átlag
Táblahegy	+3,8°C	-5,7°C	-5,7°C	-23°C
Periglaciális törmeléklejtő	+1,2°C	-7,4°C	-14,7°C	-24,6°C
Környező síkság	-4,5°C	-10°C	-18,2°C	-26°C

A törmeléklejtő felszíni hőmérsékletének nyár közepére vonatkozó, kis mértékben 0°C feletti maximum-értéke arra utal, hogy a jelenlegi éghajlati viszonyok a marsi év legmelegebb pillanataiban elvileg lehetővé teszik a vízjég időszakos megolvadását (ám legfeljebb néhány napig/hétig, nyár végén ugyanis a képződmény maximális felszíni hőmérséklete már csak -14,7°C). Ezért rendkívül izgalmas annak kutatása, hogy jelenleg is található-e még nagyobb mennyiségű vízjég a törmeléklejtőben.

A kérdés eldöntéséhez a keringőegységek földradar-berendezéseinek mérései is felhasználhatók, amelyek szerint a kibocsátott radar-hullámok egy része nem az Euripus-hegy körüli törmeléklejtő felszínéről, hanem alatta húzódó réteghatárokról verődött vissza (11. ábra). A mélyebbről érkező jelek erősség- és időkülönbsége pedig arra utal, hogy a képződmény összetételében mintegy 90% lehet a vízjég aránya, amit legfeljebb 10 méter vastagságú száraz törmelékréteg borít be (HOLT, J. W. et al. 2008). Ezt az anyagi összetételre vonatkozó közvetett becslést, valamint a törmeléklejtő korábban meghatározott térfogatát figyelembe véve kiszámítható, hogy belsejében akár 2000 x 10<sup>9</sup> tonna fagyott H<sub>2</sub>O is tárolódhat.



11. ábra Radar-jelek felszín alatti visszaverődése az Euripus-hegy térségében, a 7. ábrán látható É<sub>4</sub>-D<sub>4</sub> szelvény mentén (HOLT, J. W. et al. 2008)  
Figure 11 Undersurface radar signal reflectance in the Euripus Mons region, along É<sub>4</sub>-D<sub>4</sub> profile of Figure 7 (HOLT, J. W. et al. 2008)

Mivel a hőmérsékleti adatok szerint évente rövid ideig történhet részleges olvadás a törmelékletű felszínközeli jégkészletében, talán jelenleg is zajlanak rajta olyan intenzitású formaváltozások, amelyek nagyfelbontású optikai űrfelvételek összehasonlításával kimutathatók. Ennek vizsgálatát két hasonló geometriai és megvilágítási viszonyok mellett rögzített 0,25 méter/pixel részletességű kép alapján végeztem el, amelyek a déli félteke tavaszának közepén illetve nyarának végéhez közeledve, vagyis nagyjából egy marsi évszak különbséggel ábrázolják a területet.

A felvételek pixel-pontosságú térbeli egymáshoz igazítása után a törmelékletű közelebbi szakaszán választottam egy területet az összehasonlításhoz (D<sub>3</sub>-pont a 7. ábrán, illetve 10/a. és 10/b. ábrák). Közelebről nézve a formakincs leginkább íves futású gerincekre emlékeztet (10/c. és 10/d. ábrák), még tovább növelt részletességnél pedig már a gerinceket alkotó kiemelt közettömbök szélei, s néhány deciméteres nagyságú mélyedésekből álló, tafoni-nak tűnő rajzolata, valamint a gerincek közötti terület 5-15 méter átmérőjű poligonokra tagolódo szerkezete is láthatóvá válik (10/e. és 10/f. ábrák).

A 0,25 méter/pixel terepi felbontású képpár összehasonlítása során azonban nem sikerült évszakos morfológiai változásokat azonosítanom – ahogy a legalább egy nagyságrenddel gyengébb minőségű, korábbi felvételek alapján végzett előző vizsgálataimban sem (Sik, A. 2003).

Ez mégsem zárja ki, hogy nagy mennyiségű fagyott H<sub>2</sub>O lehet jelen napjainkban is az Euripus-hegy lebenyes törmelékletűjében (BYRNE, S. et al. 2009), ám aktív réteg kialakulása nem lehetséges, mert:

- a képződmény vízjég-készletét kiszáradt törmelékborítás fedi be, amelyen a rövid ideig tartó nyári hőmérséklet-maximum lefelé haladó olvadás-hulláma nem képes áthatolni;
- a 0°C feletti maximális felszíni hőmérséklet nem biztosítja szükséges időtartamon keresztül a vízjég részleges megolvadását a felső törmeléktrétegekben;
- a marsi légkör alacsony sűrűsége annyira közel esik a H<sub>2</sub>O hármaspontjának légnyomás-értékéhez, hogy a keletkező folyékony víz szinte azonnal elpárolog.

Aktív réteg hiányában pedig biztosan nem zajlanak távérzékelési módszerekkel is kimutatható intenzitású morfológiai változások a terület formakincsében.

A lebenyes törmelékletű kialakulásához szükséges időtartam annak térfogata és a területre jellemző általános lepusztulási sebesség ismeretében határozható meg. Az utóbbi földi mérések alapján becsülhető, természetesen figyelembe véve a két égitest felszíni környezetének eltéréseit (főként a globális hőmérsékleti viszonyok és a légnyomás különböző értékeit). Az antarktiszi McMurdo-szárazvölgyek periglaciális térségében a rendkívül alacsony általános lepusztulási sebesség 0,001 mm/év (MORGAN, D. et al. 2010) – amit a Marson is érvényesnek fogadtam el. Feltételezve, hogy az Euripus-hegy körüli, hozzávetőlegesen 2 587 km<sup>3</sup> térfogatú képződmény (1) törmelékmenyiségének egyik fele a 3 100 km<sup>2</sup> felületűnek számított táblahegy eróziójából, másik fele pedig légköri kiülepedésből származik; (2) a táblahegyről lepusztult teljes anyagmennyiség helyben maradt; (3) továbbá összetételében a vízjég aránya 75-25% közötti lehet; (4) akkor a jelenlegihez hasonló éghajlati viszonyok esetén becslésem szerint kb. 100-300 millió év alatt jöhetett létre.

Az így kapott korrallal jól korreláló kráterstatistikai elemzésekből származó időadat alapján a Hellas-medence keleti peremvidékének periglaciális törmelékletűi hasonló korú, legfeljebb 100 millió éves formáknak tűnnek (HEAD, J. W. et al. 2005).

A periglaciális törmelékletűk másik két mintaterületére, illetve a szubpoláris dűnemezőkön megfigyelhető sötét lejtősávokra vonatkozó eredmények bemutatását jelen tanulmány terjedelmi korlátja sajnálatos módon nem teszi lehetővé.

## Összefoglalás és következtetések

A periglaciális törmelékletők elhelyezkedését leginkább két domborzati tényező határozza meg: a lejtőmeredekség és a besugárzás mértékét befolyásoló lejtőkíttetés. Képződésüket tehát besugárzás-mennyiségtől függő folyamatok – elsősorban az olvadás, illetve az aprózódás – irányítják, ami arra utal, hogy a H<sub>2</sub>O fontos tényező lehet eredetük szempontjából (DEMETER G.–SZABÓ SZ. 2008).

A Greg-kráter törmeléknyelvein és az Euripus-hegyet szoknyaszerűen körülvevő lebenyes törmelékletőn egyaránt megfigyelhető, hogy felszíni szerkezetük változik a táplálóterület és az elvégződő szakasz között: lefelé haladva egyre idősebb, lepusztultabb jellegű mintázatok követik egymást. Ezek a felszíni szerkezet-típusok jól párhuzamba állíthatók a földi periglaciális térségekben megjelenő rendezett kőzettörmelék-mintázatokkal (GÁBRIS GY. 2007).

A periglaciális törmelékletők formakincsének recens változása egyik mintaterületen sem mutatható ki. Még az Euripus-hegy körüli alakzatot 0,25 méter/pixel részletességgel ábrázoló, egy marsi évszak különbséggel készült felvétel-pár összehasonlítása alapján sem, annak ellenére, hogy a rendelkezésre álló adatok szerint a nyár legmelegebb időszakában a felszíni hőmérséklet rövid ideig akár a 0°C-ot is meghaladhatja a térségben. A morfológia változatlanóságának oka elsősorban az lehet, hogy a vizsgált formákon nem képződik aktív réteg, mert törmelékanyaguk néhány méter vastagságú felső része már szinte egyáltalán nem tartalmaz vízjelet – összhangban a felszínközeli H<sub>2</sub>O-mennyiség globális eloszlását vizsgáló mérések eredményével (FELDMAN, W. C. et al. 2002).

Mindezek alapján a Greg-kráter törmeléknyelvei és az Euripus-hegy lebenyes törmelékletője napjainkban már inaktív alakzatok, de belsejükben még létezhet múltbeli vízjég-készletük egy része (HOLT, J. W. et al. 2008). Ám a jelenlegi éghajlati viszonyok következtében jég tartalmuk fokozatosan elszublimál, így egyre jobban lepusztulnak, s végül fosszilis formákká válnak.

Felszíni szerkezet-típusaik lejtőirányú lepusztultság-növekedése alapján a periglaciális törmelékletők olyan kis sebességgel mozoghattak fejlődésük során, hogy közben a Mars alacsony intenzitású eróziós folyamatai képesek voltak jelentősen átalakítani törmelékanyaguk felszíni rétegeit. Tehát biztosan nem hirtelen történt omlási-csuszamlási események során keletkeztek, mert ebben az esetben lepusztultságuk mértéke azonos lenne teljes felszínükön.

Eredményeim megerősítik azt a feltételezést, hogy a periglaciális törmelékletők a marstörténet legfiatalabb morfológiai egységei közé tartoznak. Ám annak ellenére, hogy sok szempontból hasonlítanak a jeges földi lejtőformákhoz, nagyságrendekkel idősebbek azoknál, s fejlődésük során változatos formakincsű, komplex domborzatú tájakká formáltak a kimart területeket.

Mivel napjainkban nem egyensúlyi formák a Marson, keletkezésük során a jelenlegitől eltérő, minden bizonnyal hidegebb éghajlati viszonyok jellemezhetnék az égitestet – azt az egyre szélesebb körben elfogadott hipotézist támasztva alá, hogy az utóbbi 200-300 millió évben a Mars tengelyferdesége több időszakban is jelentősen nagyobb volt, mint napjainkban (LASKAR, J. et al. 2004). Ilyenkor ugyanis a poláris térségekben felmelegedés, a közepes marsrajzi szélességű övezetek felszínközeli rétegeiben viszont jégfelhalmozódás zajlott, völgyi gleccser-hálózatok kialakulását eredményezve. Azonban a részletesen vizsgált mintaterületeken nem találtam gleccserképződésre utaló nyomokat, vagyis a különböző típusú és korú törmelék-képződmények feltehetőleg periglaciális környezetben jöttek létre és fejlődtek tovább.

Ezek a formák a Marson található fagyott és/vagy folyékony H<sub>2</sub>O-készlet biztos előfordulási helyszíneinek, valamint könnyen elérhető forrásainak is tekinthetők, s további

tanulmányozásuk fontos ismeretekkel szolgálhat a bolygó késői fejlődéstörténete során zajlott globális környezetváltozások részletes feltárásához, illetve a múltbeli életlehetőségek (SZATHMÁRY E. et al. 2007) és feltételezett életformák kutatásához is, gyakorlati jelentőségük pedig a tervezett jövőbeli emberes küldetések helyszínének kiválasztásában lehet.

### Köszönetnyilvánítás

Kutatási tevékenységemet az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatja, amit ezúton is köszönök!

---

SIK ANDRÁS

ELTE TTK FFI Természetföldrajzi Tanszék, Budapest

sikandras@gmail.com

### IRODALOM

- ARFSTROM, J.–HARTMANN, W. K. 2005: Martian flow features, moraine-like ridges, and gullies: Terrestrial analogs and interrelationships. – *Icarus* 174. 2. pp. 321–335., doi:10.1016/j.icarus.2004.05.026
- BYRNE, S. et al. 2009: Distribution of Mid-Latitude Ground Ice on Mars from New Impact Craters. – *Science* 325. 5 948. pp. 1 674–1 676., doi:10.1126/science.1175307
- DEMETER G.–SZABÓ SZ. 2008: Morfometriai és litológiai tényezők kapcsolatának kvantitatív vizsgálata a Bükkben és északi előterén – A statisztikus felszínelemzés alkalmazásának lehetőségei a geomorfológiában. – Debreceni Egyetem, Debrecen.183 p.
- FELDMAN, W. C. et al. 2002: Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey. – *Science* 297. 5 578. pp. 75–78., doi: 10.1126/science.1073541
- GABRIS, GY. 2007: Földfelszín és éghajlat. – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. 225 p.
- HEAD, J. W. et al. 2005: Tropical to mid-latitude snow and ice accumulation, flow and glaciation on Mars. – *Nature* 434. pp. 346–351., doi:10.1038/nature03359
- HOLT, J. W. et al. 2008: Radar Sounding Evidence for Buried Glaciers in the Southern Mid-Latitudes of Mars. – *Science* 322. 5 905. pp. 1 235–1 238., doi:10.1126/science.1164246
- KERESZTURI Á. 2006: Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből. – *Magyar Tudomány* 8. pp. 946–954.
- KERESZTURI Á. 2007: Éghajlatváltozás a Marson II. – *Léggör* 52. 3. pp. 6–9.
- LASKAR, J. et al. 2004: Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. – *Icarus* 170. 2. pp. 343–364., doi:10.1016/j.icarus.2004.04.005
- MCGILL, E. 2000: Crustal history of north central Arabia Terra, Mars. – *Journal of Geophysical Research* 105. E3. pp. 6945–6959., doi:10.1029/1999JE001175
- MORGAN, D. et al. 2010: Quantifying regolith erosion rates with cosmogenic nuclides <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. – *Journal of Geophysical Research* 115. F3. 17 p., doi:10.1029/2009JF001443
- RIGNOT, E.–HALLET, B.–FOUNTAIN, A. 2002: Rock glacier surface motion in Beacon Valley, Antarctica, from synthetic-aperture radar interferometry. – *Geophysical Research Letters* 29. 12. 4 p., doi:10.1029/2001GL013494
- SIK A. 2003: Jelenkori felszínfejlődés a Marson. – Diplomamunka, ELTE TTK FFI Természetföldrajzi Tanszék, Budapest. 124 p.
- SIK A. 2010: GIS a Marson. – In: LÓKI J.–DEMETER G. (szerk.): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás, Debrecen. pp. 191–198.
- SIK A. 2011: Távérzékelés és felszínalakok: Keringőegység-adatok térinformatikai integrálása a Mars jeges lejtőformáinak vizsgálatához. – Doktori értekezés, ELTE TTK FFI Természetföldrajzi Tanszék, Budapest. 155 p.
- SIK A. 2013: Web-alapú térinformatikai alkalmazások a bolygókutatásban. – In: LÓKI J. (szerk.) Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IV: Térinformatikai konferencia és szakkiallítás, Debrecen. pp. 367–372.
- SIK A.–KERESZTURI Á.–HARGITAI H. 2005: A víz és a jég szerepe a Mars felszínfejlődésében. – *Földrajzi Közlemények* 129. 3–4. pp. 159–176.
- SZATHMÁRY E.–GÁNTI T.–PÓCS T.–HORVÁTH A.–KERESZTURI Á.–BÉRCZI SZ.–SIK A. 2007: Life in the dark dune spots of Mars: a testable hypothesis. – In: PUDRITZ, R.–HIGGS, P.–STONE, J. (szerk.) 2007: Planetary Systems and the Origins of Life. – Cambridge Astrobiology Series, Cambridge University Press, Cambridge. pp. 241–262.