

A Mars jeges lejtőformáinak vizsgálata keringőegység-adatok térinformatikai integrálásával

Dr. Sik András

adjunktus, ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet, Természetföldrajzi Tanszék, Budapest

Napjainkban a planetológia egyik legizgalmasabb részterülete a vörös bolygó lakhatóságának kutatása, s ennek részeként a H_2O előfordulási helyszíneinek azonosítása. A közepes marsrajzi szélességű övezetekben a felszínközeli rétegek jelentős mennyiségű fagyott vízjeget tárolhatnak, így az aprózódás és a tömegmozgások során köves-jeges anyagú, periglaciális törmeléklejtők jöttek létre. Ezek a nagyméretű, látványos képződmények pedig eredményesen vizsgálhatók a keringőegységek által gyűjtött adatok, illetve korszerű térinformatikai módszerek felhasználásával.

A Mars tanulmányozása távcsöves megfigyelések helyett napjainkban már a térségébe juttatott űrszondákkal zajlik. Ezek egyik fajtája a keringőegység (*orbiter*), amely sikeres pályára állás után megkezdí a teljes bolygóra kiterjedő térképezést és adatgyűjtést. A másik alaptípus, a leszállóegység (*lander*) célba juttatása sokkal kockázatosabb feladat, ám ha ép-ségben eléri a felszínt, részletes mérésekkel és anyagvizsgálatokkal „terepi bizonyosság” szerezhető a leszállóhely szűk környezetéről – vagyis módszerei közvetlenek, de eredményei nem vonatkoztathatók az egész égitestre.

Ezért a globális marsrajzi viszonyok, valamint a nagyobb térségek formakincsére jellemző sajátosságok elemzéséhez elsősorban a bolygó körül keringő űreszközök megfigyelé-sei használhatók. Az érzékelő-berendezéseik által, távérzékelési eljárásokkal gyűjtött optikai űrfelvételek, digitális domborzatmodellek (DTM), valamint más típusú adatok internetes adatbázisokban [1] nyilvánosan kereshetők és hozzáférhetők, így – a szükséges ismeretek birtokában – bárki elemezheti azokat.

A marsi térinformatika szabványai

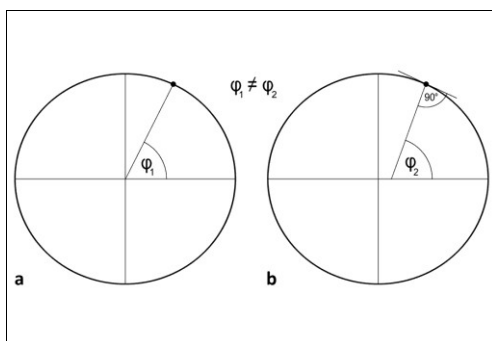
Az űrkorszak kezdete óta a keringőegységek felvételei alapján egyre jobb minőségű globális térképek készültek a bolygóról – kezdetben papíron, majd digitális változatban [1].

A különböző típusú érzékelő-berendezések mérési eredményei természetesen csak egy vizsgálati mintaterületre is összegyűjthetők, az eltérő küldetésekből származó adatok integrált kezeléséhez azonban számos technikai nehézséget kell megoldani konvertálási műveletekkel, például a térbeli vonatkoztatási rendszer (ellipszoid, fókálózat, vetület), a terepi felbontás, vagy a fájlformátum egységesítését [2].

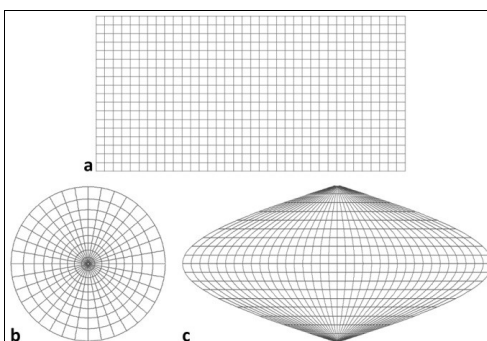
Jellemző	Szabvány
Ellipszoid	IAU2000-definíció [3]
Egyenlítői sugár	3396,19 km
Poláris sugár	3376,2 km
Szélességi fokok rendszere	planetocentrikus [4]
Hosszúsági fokok rendszere	kelet felé 0°-360° között
Domborzati alapfelület	MGS MOLA DEM
Globális térképvetület	ekvirektanguláris gömb (központi $\lambda = 0^\circ$)
Nem globális térképvetület	poláris sztereografikus vagy szinuszoidális
Raszter-formátum	PDS IMG vagy GEO-JPEG2000 [1]

1. táblázat A marsi térinformatika szabványai

Szerencsére az elmúlt évek során megszilárdultak a marsi térinformatika szabványai (1. táblázat), s így egyre ritkábban okoznak már problémát például a szélességi fokok eltérő meghatározási módjai (1. ábra), vagy az alkalmazott térképvetületek típusai (2. ábra).



1. ábra Szélességi fok meghatározási módjai –
a) planetocentrikus;
b) planetografikus



2. ábra Alkalmazott térképvetületek –
a) ekvirektanguláris gömb (központi $\lambda = 0^\circ$);
b) poláris sztereografikus; c) szinuszoidális

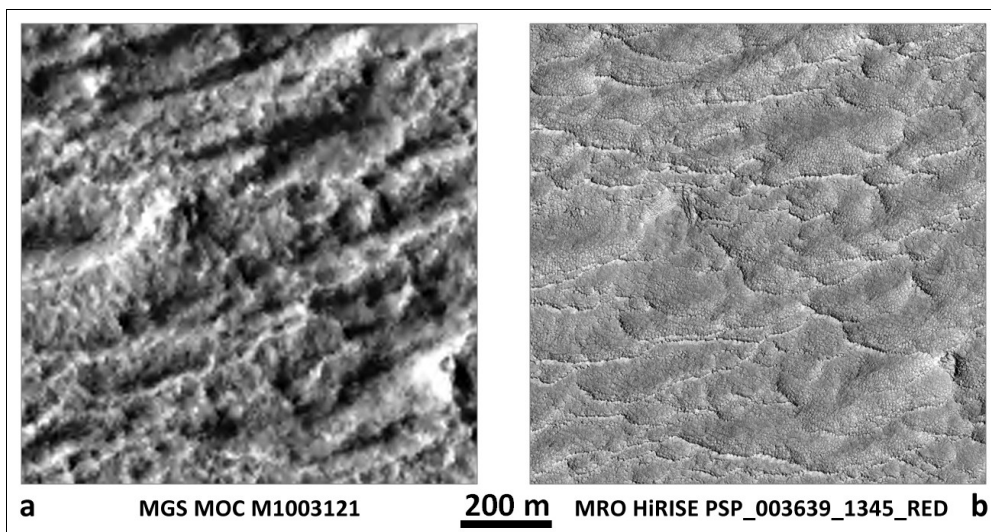
Adatforrások és pontosság

A marsi formakincs teljes körű elemzéséhez a keringőegységek érzékelő-berendezései közül elsősorban az optikai kamerákra, a domborzati adatgyűjtő műszerekre és a spektrométerekre van szükség – ami legalább tíz különböző adatforrás összehangolását jelenti (2. táblázat).

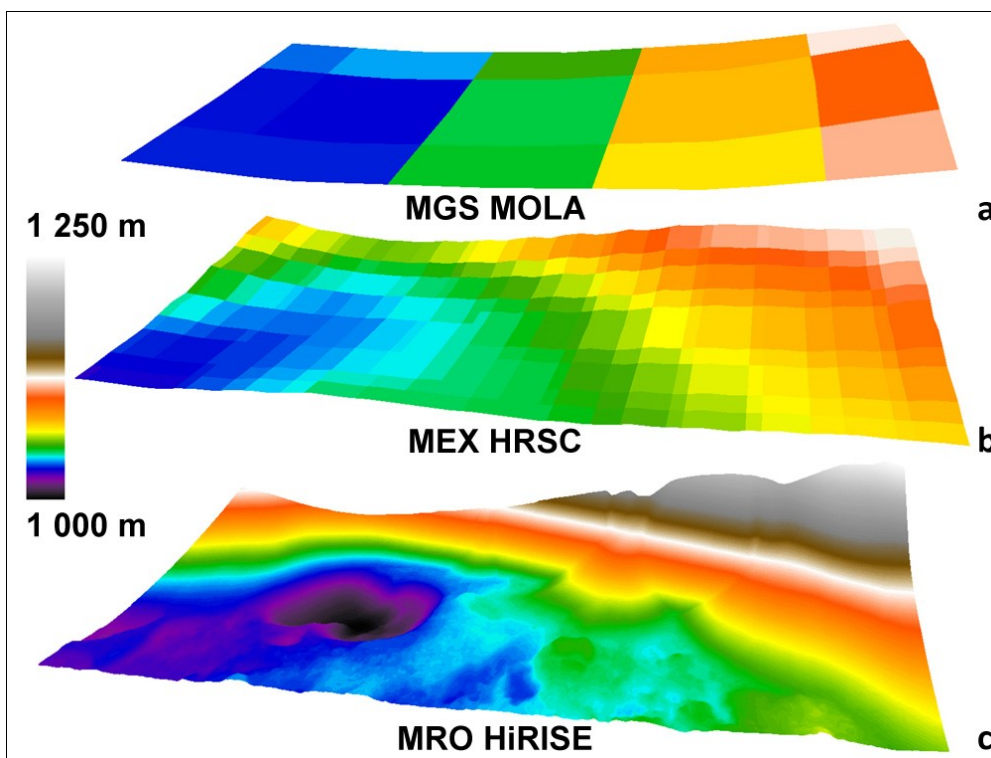
Küldetés elnevezése (rövidítése) időtartama	Érzékelő-berendezés rövid elnevezése	Érzékelő-berendezés felhasználása	Érzékelő-berendezés max. terepi felbontása
Mars Global Surveyor (MGS) 1996 – 2006	MGS MOC	optikai kamera	1,5 m/pixel
	MGS MOLA	DTM-készítés (lézeres magasságmérő)	300 m/pixel
	MGS TES	spektrométer	3 000 m/pixel
2001 Mars Odyssey (MO) 2001 – jelen	MO THEMIS VIS	optikai kamera	18 m/pixel
	MO THEMIS IR	spektrométer	100 m/pixel
Mars Express (MEX) 2003 – jelen	MEX HRSC	optikai kamera	12,5 m/pixel
	MEX HRSC sztereo	DTM-készítés	50 m/pixel
	MEX OMEGA	spektrométer	300 m/pixel
Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 2005 – jelen	MRO CTX	optikai kamera	6 m/pixel
	MRO HiRISE	optikai kamera	0,25 m/pixel
	MRO HiRISE sztereo	DTM-készítés	1 m/pixel
	MRO CRISM	spektrométer	18 m/pixel

2. táblázat A marsi keringőegységek fontosabb érzékelő-berendezései

A távérzékelési eljárásokkal gyűjtött felszíni adatok részletessége a terepi felbontás értékével jellemezhető. Az egymást követő keringőegységek műszerei természetesen egyre pontosabb űrfelvételeket és digitális domborzatmodelleket készítenek, így a Mars néhány térségéről jelenleg már jobb minőségű állományok érhetők el (3–4. ábra), mint például hazánk nagyvárosairól a legnépszerűbb internetes térképszolgáltatók adatbázisaiban.

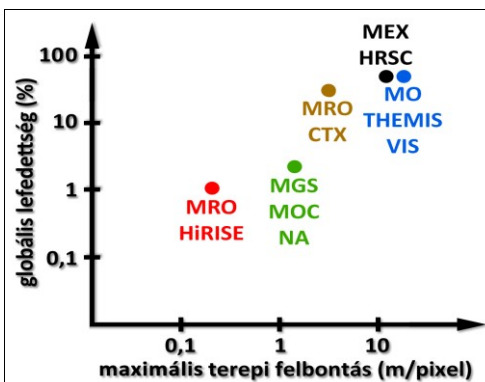
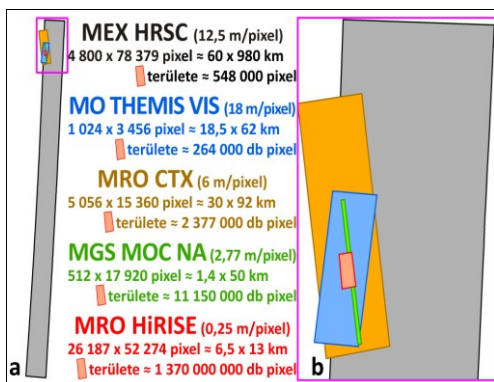


3. ábra Azonos terület látványa tíz év különbséggel (eltérő terepi felbontással) –
a) MGS MOC 2001-ben (3 m/pixel); b) MRO HiRISE 2011-ben (0,25 m/pixel)



4. ábra Azonos terület formakincse eltérő terepi felbontású digitális domborzatmodelleken –
a) 2001-ben (300 m/pixel); b) 2006-ban (50 m/pixel); c) 2011-ben (1 m/pixel)

A javuló felbontás természetesen növekvő adatmennyiséget eredményez (5. ábra), illetve általában kisebb területi lefedettséggel jár együtt (6. ábra).



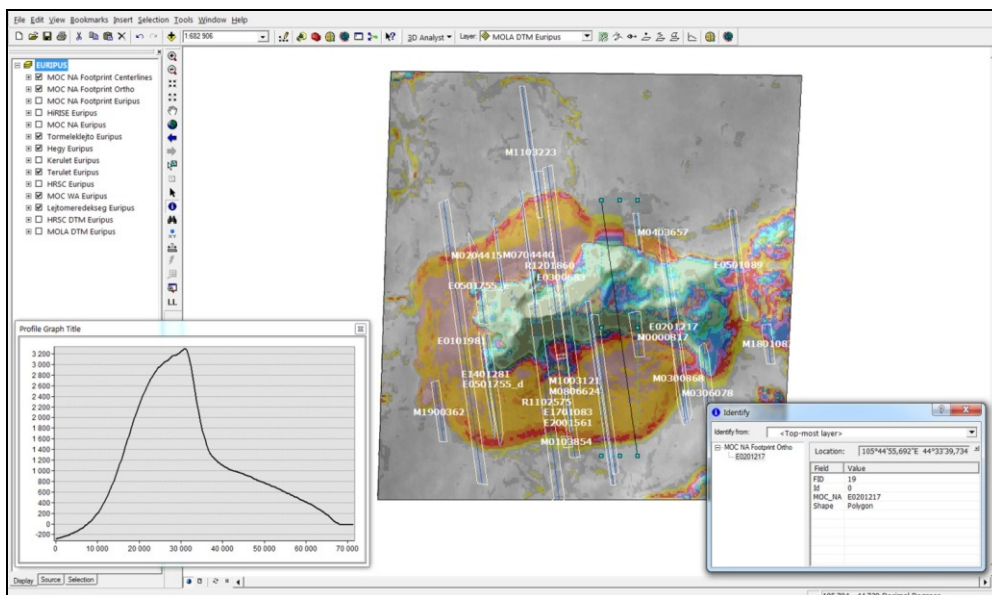
5. ábra Optikai űrfelvételek összehasonlítása –
a) jellemző térbeli kiterjedés;
b) MRO HiRISE-felvétel területének pixelszáma

6. ábra Optikai űrfelvételek összehasonlítása
maximális terepi felbontás és
globális lefedettség alapján

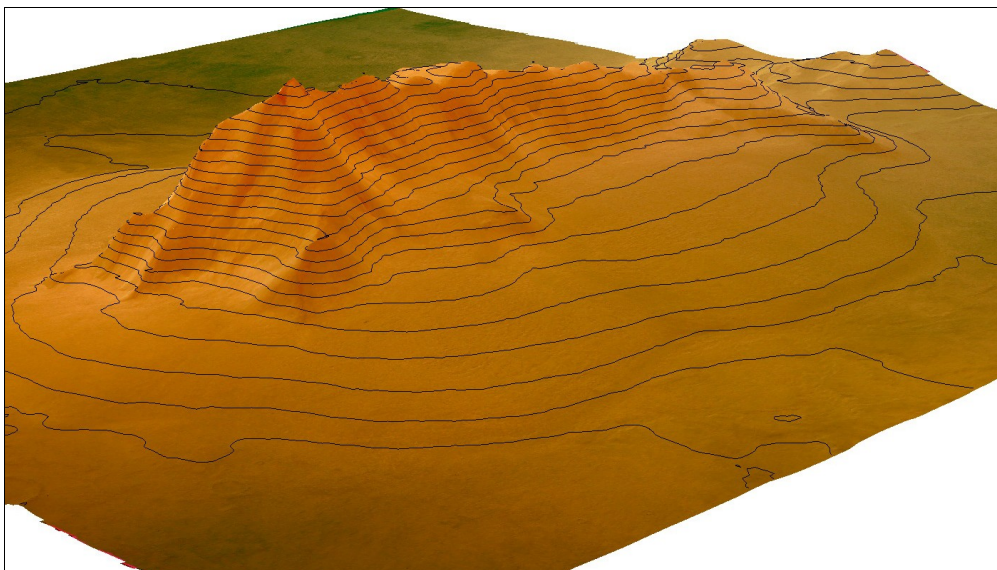
Szoftver-választás

A különböző adatforrások integrálásához és az elemzések végrehajtásához olyan térinformatikai szoftverre van szükség, amely ismeri a marsi állományok speciális térbeli vonatkoztatási rendszereit, s kezeli azok egyedi fájlformátumait, illetve adatbázisait [5].

Számos program tesztelése után kialakult véleményem szerint összességében az ESRI ArcGIS Desktop a legalkalmasabb szoftvercsomag a vörös bolygó formakincsének tanulmányozásához, valamint az eredmények megfelelő nevezéktannal [6] ellátott térképi ábrázolásához (7. ábra) és háromdimenziós megjelenítéséhez is (8. ábra).



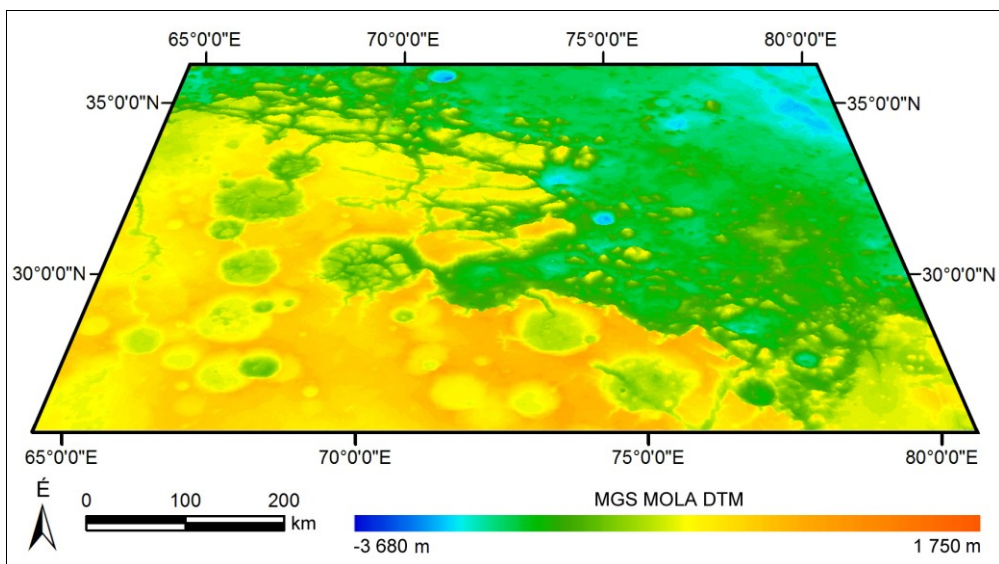
7. ábra A mintaterület elemzésének térképi megjelenítése ESRI ArcGIS Desktop szoftverrel: eltérő tulajdonságú felszínrészletek lehatárolása környezeti áttekintő felvétellel kombinált lejtomeredekség-térképen, valamint nagyfelbontású optikai űrfelvételek felszíni poligonjai, a terület jellemző keresztmetszévénye és az egyik nagyfelbontású kép attribútumai



8. ábra A mintaterület domborzatának háromdimenziós megjelenítése
színes űrfelvétel és szintvonalak kombinálásával, kb. 3-szoros függőleges torzítással

Periglaciális törmelékletjtők

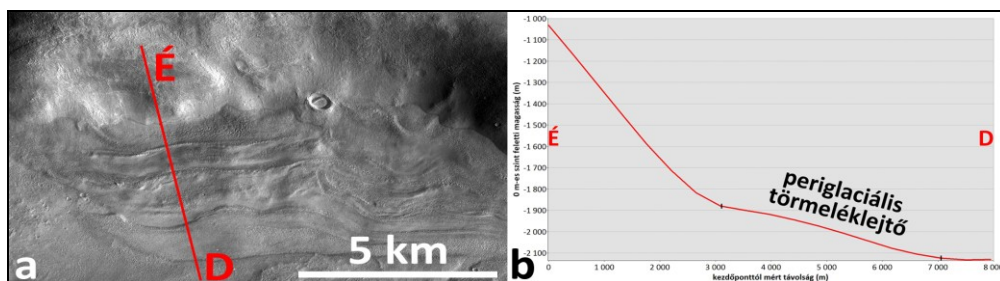
A Mars törmelékkel borított, fagysivatagos felszínén jellegzetes tájtípust alkotnak a közepes szélességű övezetek kimart területei, ahol az idősebb felföldek és a fiatalabb mélyföldek fokozatos átmenete figyelhető meg. Eleinte a magasabb térszín nagyobb kiterjedésű platókra tagolódik, amelyek több kilométerrel emelkednek az őket elválasztó széles, lapos aljzatú völgyek fölé, s végül már ezek a mélyföld-jellegű felszínrészletek kerülnek túlsúlyba a néhány kilométer magasságú, elszórt táblahegyekhez képest (9. ábra).



9. ábra A kimart területek jellemző formakincsének látványa digitális domborzatmodell alapján

A meredek falú platók és szigetszerű táblahegyek oldalán, valamint a völgyek fala mentén pedig fiatalabb korú formák láthatók: a periglaciális törmeléklejtőnek nevezett képződmények (10. ábra). Ezek a Mars legnagyobb méretű jeges lejtőformái, s alapvető morfológiai/morfometriai sajátosságai az alábbiak:

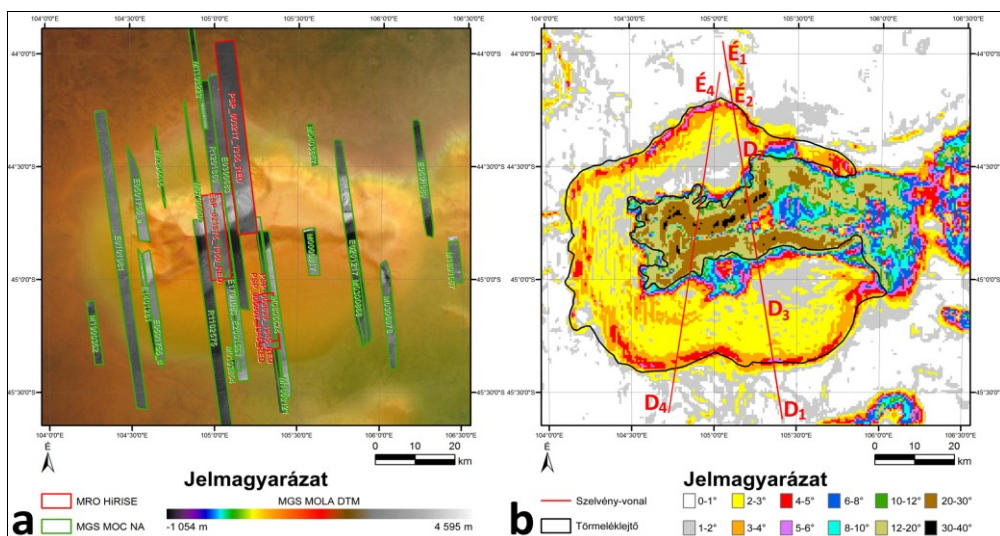
- éles meredekség-változással különülnek el a mögöttük húzódó kiemelkedéstől;
- hosszúságuk 2–20 km közötti, de akár néhányszor tíz km is lehet;
- relatív magasságuk több száz méter;
- hossz-szelvényük konvex, átlagos lejtőszögük 1,5–3° közötti;
- homlokfrontjuk viszonylag meredeken végződik el;
- kereszt-szelvényük általában domború, de oldalsáncaik nem mindig jelölhetők ki;
- gyakran lebenyes alakú részekre tagolódnak;
- felszínükön íves gerincek és barázdák összetett mintázata látható.



10. ábra Periglaciális törmeléklejtő – a) domborzati helyzet; b) jellemző szelvény

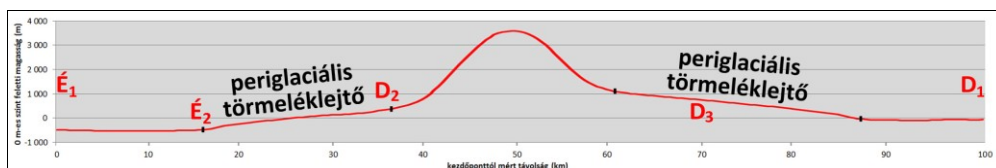
Euripus-hegy mintaterület

A 73 kilométer hosszúságú és a síksági tájból 4 500 méter 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, lebenyekből álló periglaciális törmeléklejtő veszi szoknyaszerűen körbe (11/a. ábra).



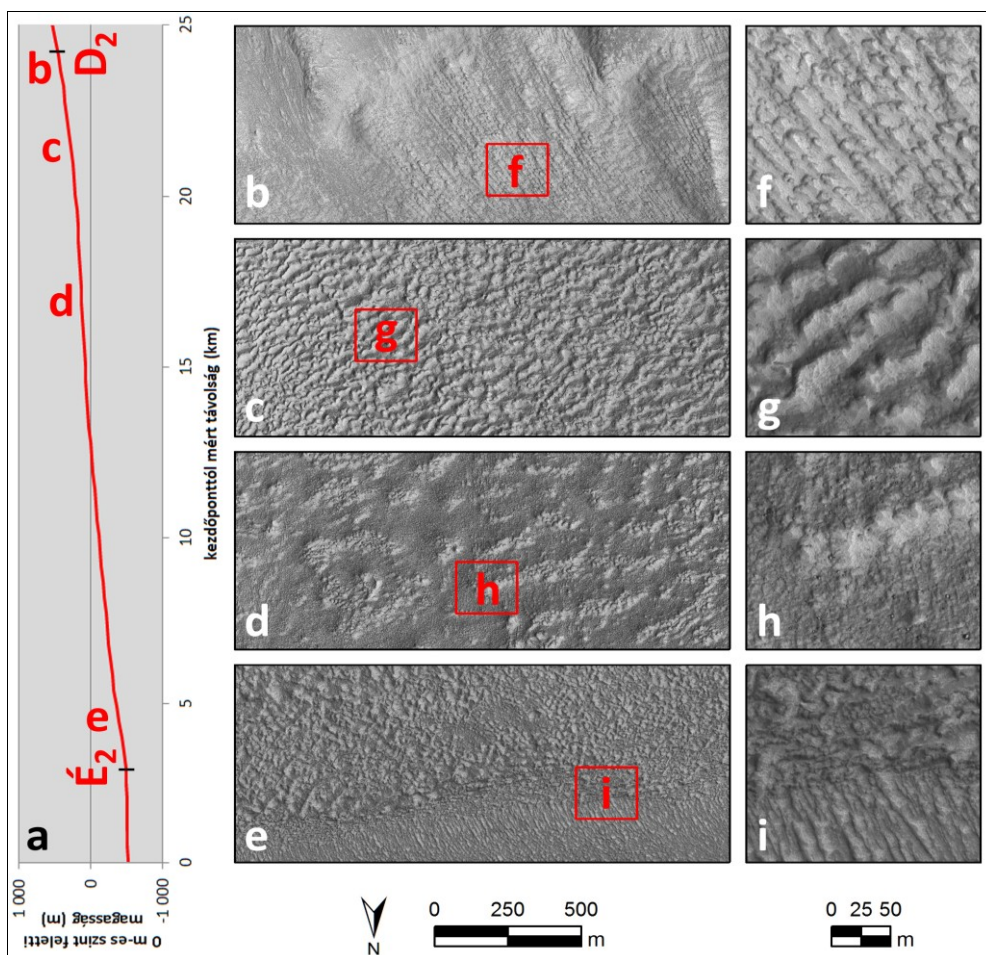
11. ábra Euripus-hegy mintaterület – a) magassági színezésű áttekintő térkép nagyfelbontású optikai űrfelvételekkel; b) lejtőmeredekség-térkép az $\bar{E}_1$ - D_1 kereszt-szelvény helyzetével

Az Euripus-hegy gerincvonalától sugárirányban kifelé szétterülő törmelékletjtő legnagyobb átmérője kb. 90 kilométer, hosszúsága 5–30 kilométer, vastagsága pedig kb. 300–1 200 méter között változik (feltételezve, hogy közel sík térszín található alatta). Domborzati viszonyait látványosan szemlélteti a terület lejtőmeredekség-térképe (11/b. ábra), illetve kereszttszelvénye (12. ábra).



12. ábra Az Euripus-hegy mintaterület kereszttszelvénye a 11/b. ábrán látható $\dot{E}_1$ - D_1 vonal mentén

A periglaciális törmelékletjtő részletes morfológiai vizsgálatához a 11/a. ábrán látható nagyfelbontású optikai űrfelvételek állnak rendelkezésre (22 db MGS MOC- és 4 db MRO HiRISE-kép). Ezek integrált elemzésével többféle felszíni mintázat-típus különíthető el a táplálóterület és a homlokfront között (13/a. ábra):



13. ábra Az Euripus-hegy körüli periglaciális törmelékletjtő felszíni mintázat-típusai

- a sziklafal és a törmelékösszlet határvonala mentén (13/b. ábra) számos helyen lejtésiránnyal párhuzamos sáv-mintázat figyelhető meg (13/f. ábra), amelynek jellemzően 10–20 m szélességű egységei a falról a törmelékösszletre hullott, nagy méretű közettömbök irányítottság szerinti elrendeződésével jöhettek létre, a terület lassú lejtőkúszására utalva;
- a táplálóterület alsó részén (13/c. ábra) durva szerkezetű, egyenetlen sziklás térszín látható, néhányszor tíz méter nagyságú blokkok mintázatával, valamint lejtésirányra merőleges íves gerincek és barázdák váltakoznak (13/g. ábra);
- a törmelékletítő középső szakaszát „ritkább megjelenésű” felszíni mintázat borítja, gyakran szintén a lejtésirányra merőleges gerincek rajzolódhatnak ki, ám távolságuk itt nagyobb és sokkal lepusztultabbak is (13/d. ábra), a közöttük lévő mélyebb helyzetű térszíneket pedig osztályozatlan sötét törmelékanyag tölti ki elszórt sziklatömbökkel (13/h. ábra);
- az elvégződő szakaszt (13/e. ábra) nagyobb meredekségű homlokfront zárja le, ahol szinte „oldalról” látható a törmelékletítő összletének réteges szerkezete, alóla pedig a táplálóterület felső részére jellemző, párhuzamos sávokhoz hasonló mintázat indul ki (13/i. ábra) – ez talán a múltban zajlott aljzati olvadásból származó víz eróziós munkájának terméke lehet.

Mindezek alapján az Euripus-hegy körüli periglaciális törmelékletítő változatos morfológiájú terület, recens aktivitásának vizsgálatához azonban hőmérsékleti adatokra is szükség van.

Két különböző spektrométer nyári, helyi időben mérve 13.00–14.00 közötti napszakra (vagyis a mintaterület legmelegebb pillanataira) vonatkozó felszíni hőmérséklet-értékeinek integrált elemzése alapján úgy tűnik, hogy azok rövid ideig akár 0 °C-nál magasabbak is lehetnek (14. ábra). Ez pedig arra utal, hogy a jelenlegi éghajlat a marsi év legmelegebb pillanataiban elvileg lehetővé teszi a vízjég időszakos megolvadását, így akár jelenleg is történhetnek olyan morfológiai változások a törmelékletítő mintázatában, amelyek nagyfelbontású optikai űrfelvételek összehasonlításával kimutathatók.

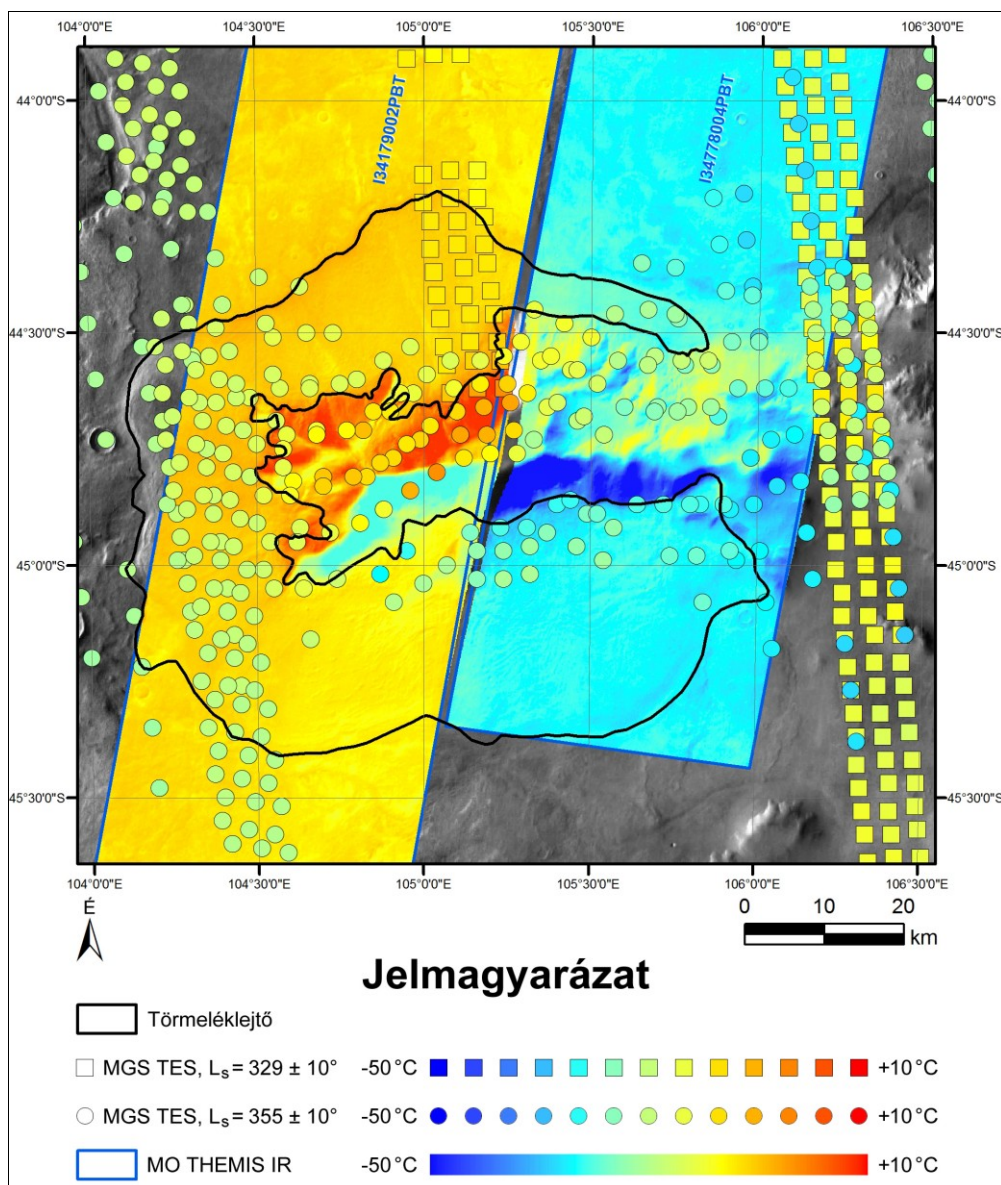
A rendelkezésre álló 0,25 m/pixel pontosságú felvételpár összehasonlítása során azonban sajnos nem sikerült ilyen évszakos változásokat találni. Ennek ellenére napjainkban is lehet nagyobb mennyiségű fagyott H₂O az Euripus-hegy periglaciális törmelékletítőjében, ami talán csak azért nem okoz formakincs-változást, mert

- a vízjég-tartalmú réteget kiszáradt törmelékborítás fedi be, s a rövid ideig tartó nyári hőmérséklet-maximum lefelé haladó olvadáshulláma nem képes áthatolni azon;
- a 0 °C feletti maximális felszíni hőmérséklet ehhez nem biztosítja elég hosszú ideig a vízjég részleges megolvadását a törmelékletítőben;
- a marsi légkör sűrűsége közel esik a H₂O hármaspontjának légnyomásértékéhez, s így az esetleg keletkező folyékony víz szinte azonnal elpárolog.

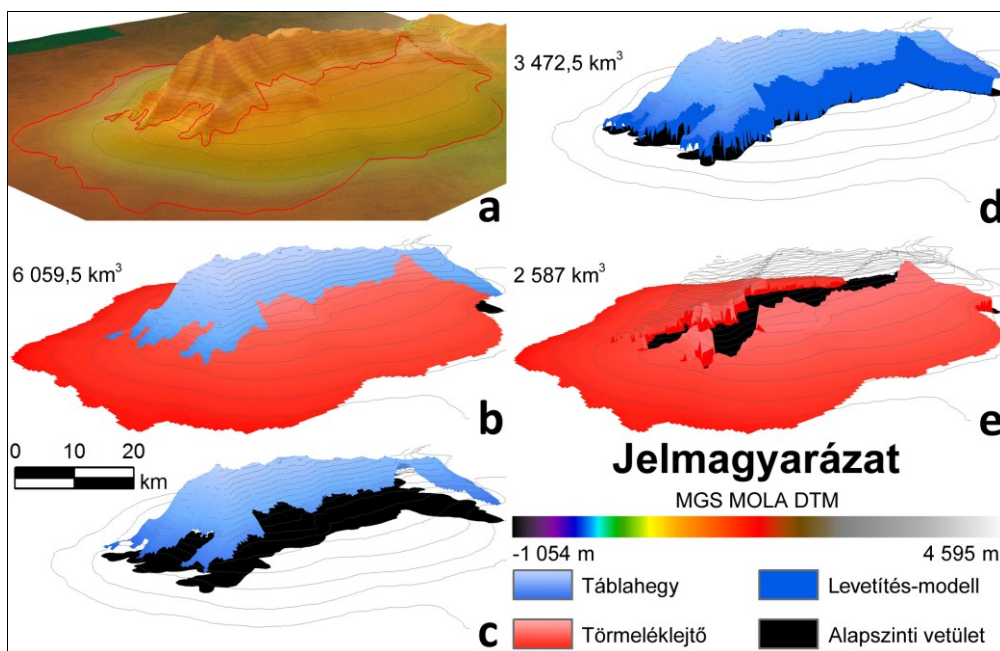
A mintaterület digitális domborzatmodelljét felhasználva az Euripus-hegy körüli periglaciális törmelékletítő térfogata is megbecsülhető, az alábbi módszerrel (15. ábra):

- a teljes formaegyüttes, vagyis a hegy és a törmelékletítő osztérfogatának meghatározása a terület legmélyebb pontjához igazított, –569 méteren húzódó helyi alapszint felett;
- a hegy törmelékletítő fölé emelkedő részének helyi alapszintre történő levetítése (a sziklafalak eredeti meredekség-értékének bizonytalansága miatt első lépésben csak függőleges oldalvonalakkal);
- az így kapott hegymodell helyi alapszint feletti térfogatának kivonása a teljes formaegyüttes térfogatából.

A becsült eredmény $6\,059,5\text{ km}^3 - 3\,472,5\text{ km}^3 = 2\,587\text{ km}^3$, ami a vetítővonalak függőleges helyzete miatt csak közelítő felső határértéke a törmelékletjtő valódi térfogatának. Ugyanis a 12. ábra alapján a hegy sziklafalainak jellemző meredeksége $15\text{--}25^\circ$ között változik, ezért legfeljebb 17%, de legalább 8% többletet hozzá kell adni a függőleges hegymodell alapján kiszámolt térfogathoz. A törmelékletjtő kiterjedéséből viszont le kell vonni ugyanezt, tehát annak valódi térfogata $2\,000\text{--}2\,300\text{ km}^3$ között lehet. S mivel az egyik keringőegység földradar-berendezésének mérései alapján kb. 90%-ra becsülhető a vízjég aránya a törmelékletjtő összetételében [7], annak belsejében összesen akár $2\,000 \times 10^9\text{ t}$ fagyott H_2O is tárolódhat.



14. ábra Az Euripus-hegy térségének nyári időszakra vonatkozó felszíni hőmérséklet-térképe az MGS TES- és az MO THEMIS IR-spektrométerek adatai alapján



15. ábra Az Euripus-hegy körüli periglaciális törmelékkejtő térfogat-számítási módszere –
 a) színes fotó-térkép, a háttérben magassági színezéssel;
 b) a táblahegy és a törmelékkejtő felülete; c) a táblahegy és alapszinti vetülete;
 d) a táblahegy függőleges falú térbeli modellje; e) a törmelékkejtő térbeli modellje

További mintaterületek

A periglaciális törmelékkejtők további három mintaterületére vonatkozó eredmények bemutatását jelen tanulmány terjedelmi korlátai sajnálatos módon nem teszik lehetővé.

Következtetések

A közepes marsrajzi szélességű övezetekben látható periglaciális törmelékkejtők cementált belső szerkezetű, köves-jeges összletek lassú lejtőirányú elmozdulásával, illetve az ennek során belsejükben zajló pasztikus deformációk eredményeként jöttek létre, kráterborítottságuk és felszíni mintázataik lepusztultsága alapján valószínűleg az utóbbi néhány százmillió évben.

Morfológiai és morfometriai sajátosságait, valamint formakincsük változatlanóságát figyelembe véve napjainkban fosszilis vagy inaktív képződményeknek tekinthetők, amelyek a jelenlegitől eltérő éghajlati viszonyokra utalnak az égitest késői fejlődéstörténete során. Így ha a következő évtizedek/évszázadok során lassú felmelegedés indul be a Marson, akár újra is aktivizálódhatnak majd.

Ezek tehát a felszínközeli rétegek vízjég-tartalmának múltbeli, részleges olvadásával magyarázható formák, amelyeknek a lakhatóság szempontjából is jelentősége van, ugyanis a Marson található fagyott és/vagy folyékony H₂O-készlet biztos előfordulási helyszíneinek, valamint könnyen elérhető forrásainak tekinthetők.

Mindezek mellett a periglaciális törmelékkejtők felszínalaktani elemzése azt is látványosan szemlélteti, hogy a korszerű térinformatikai módszerek eredményesen alkalmazhatók a planetológiai kutatások során.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

- [1] Sik A. (2011): Távérzékelés és felszínalaktan: Keringőegység-adatok térinformatikai integrálása a Mars jeges lejtőformáinak vizsgálatához. *Doktori értekezés, ELTE Természetföldrajzi Tanszék*, Budapest, 155 p.
- [2] Sik A. (2010): GIS a Marson. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában Konferencia és Szakkiállítás I.*, Debrecen, pp. 191–198
- [3] Seidelmann P.K. et al. (2002): Report of the IAU/IAG Working Group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 2000. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, Vol. 82, No. 1, pp. 83–111
- [4] Sik A., Kereszturi Á. (2006): A Mars felszínalaktani vizsgálata űrfelvételek alapján. *Geodézia és Kartográfia*, Vol. LVIII, No. 9, pp. 12–20
- [5] van Gasselt S., Nass A. (2011): Planetary mapping – The datamodel's perspective and GIS framework. *Planetary and Space Science*, Vol. 59, No. 11–12, pp. 1231–1242
- [6] Hargitai H. (2008): Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana. *Földtani Közlöny*, Vol. 138, No. 4., pp. 323–338
- [7] Holt J. W. et al. (2008): Radar Sounding Evidence for Buried Glaciers in the Southern Mid-Latitudes of Mars. *Science*, Vol. 322, Issue 5905, pp. 1235–1238