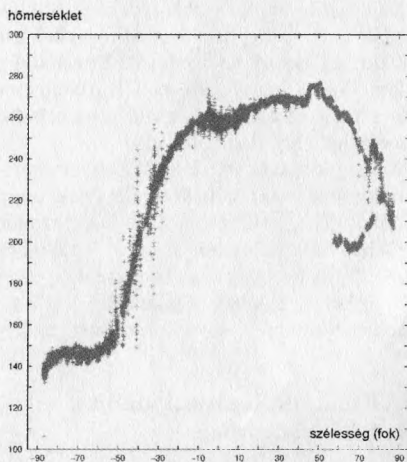


Morfológiai zónák a Marson

A vörös bolygó megfigyelésének fontos területe a planétán jelenleg és a közelmúltban zajló változások nyomon követése. Ezek hajtómotorjai a napi és az évszakos besugárzási változások; egyéb évszakos jelenségek; az éghajlat kisebb ingadozásai és a pályaelem-változásokkal kapcsolatos erősebb kilengései, valamint a bolygó csökkenő globális belső aktivitása. Az alábbi cikkben elsőként a hőmérsékletváltozások megfigyelését, majd az éghajlati hatásra jelenleg zajló és a közelmúltban történt változásokat, valamint a velük kapcsolatos övezetes felszínformákat tekintjük át.

Az évszakos jelenségek és hatások egzakt vizsgálatához megbízható meteorológiai adatok szükségesek. Ezek megszerzésében fontos szerepet játszott a TES (Thermal Emission Spectrometer), amely egyike a Mars Global Surveyor űrszondán található öt műszernek. Ez egy infravörös sugárázsmérő spektrométer, ami a felszín sugárzásának 6–50 mikron (infravörös), 5,1–150 mikron (szélessávú hőszugárzás), illetve 0,3–2,9 mikron (látható/közeli infravörös) tartományokból érkező részét méri. A technológia segítségével sok mindent megtudhatunk a vörös bolygó geológiájáról, légköréről, az adatok alapján ugyanis közelíthető a felszín ásványi összetétele, a különböző kőzetek eloszlása, vizsgálható a légköri folyamatok változása, valamint következtetni lehet a felszín hőtani tulajdonságaira is. A TES működésének minden fázisában szisztematikusan mérte a Mars felszínét és atmoszféráját: több mint 206 millió spektrumot gyűjtött. Működésének térképező fázisa egy teljes marsi éven át (2 földi év) tartott. A szonda pályájának köszönhetően napi szintű változások is kiszűrhetők az adatokból, ugyanis minden keringés alkalmával ugyanazon terület felett pontosan ugyanakor haladt át.

A TES-adatok felhasználásával készített görbékkel adott tartományokra megállapíthatjuk a különböző paraméterek változását.



A fenti ábra a felszíni hőmérsékletet mutatja a szélesség függvényében 250–260 fok közötti földrajzi hosszúság mentén. A felhasznált adatsorban a Mars ekliptikai hosszúsága (L_e) 106 és 110 fok közé esett, vagyis a bolygó északi féltekéjén (jobbra) nyár volt, míg a déli féltekén (balra) tél. A déli pólus környékén a téli éjszakákon a hőmérséklet egészen 130 K közelébe csökken, míg nappal ezeken a területeken hozzávetőlegesen 150 K a hőmérséklet. A sarkköről távolodva a görbe erősen emelkedik; az é.sz. 40–50 fokos környezetében helyenként eléri a 275–280 K-t. A nyári féltekén a görbe kevésbé meredek; jól látható, hogy hőmérsékletes nagyjából az 50. szélességi fok környékén következik be. Itt a téli féltekéhez képest már szignifikáns a különbség az éjszakai és a nappali értékek között is, amit az 57–77 fokos szélességek között kialakuló két ág szemléltet, amelyek közül az alsó az éjszakai méréseket mutatja. Az északi félteke sarkvidékénél a hőmérséklet 220–225 K.

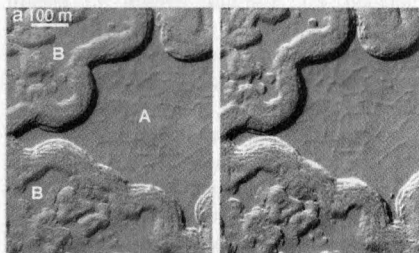
A bolygó felszíni átlaghőmérséklete hozzávetőlegesen 220 K, de a mért értékek – mint ahogy az a fenti példán is látható – széles skálán mozognak. Az egyenlítőnél mért legmelegebb hőmérséklet 300 K, míg a leghidegebb 100 K volt. Egy napon belül a nappali és éjszakai hőmérséklet közötti különbség a 60 K-t is elérheti. Mivel a bolygó légköre igen ritka, jóformán nincs üvegházhatás. A Mars – pályájának nagy excentricitása miatt – perihéliumban (nyár a déli féltekén) 40%-kal több napfényt kap, mint aphéliumban (nyár az északi féltekén). Ez az éves változás erős hőmérséklet-növekedéshez vezet a déli tavasz és nyár során. A főként ekkor kialakuló porviharok szintén hatással vannak az évszakok jellemzőire. A por ilyenkor több 10 km-es magasságba emelkedik, szétoszlik, majd ennek következtében elnyeli a napfényt és felfűti a légkört. Amikor a bolygó az aphéliumban jár, 3–10 km magasságban vízfélfelhők jelennek meg. Ezek nappal a felszínnél hűvösebbek, éjszaka pedig melegebbek. Ilyen felhőket azonosított a TES a Tharsis-hátság fölött; itt a légköri opacitás éjszaka nő meg jelentősen, ami visszatartja a meleget.

Ahogy a földi felszínformák (trópusi szigethegyek, sivatagok, löszös puszták, gleccservölgyek, periglaciális területek stb.) az egyenlítővel párhuzamos övezetes eloszlást mutatnak, ugyanígy a Marson is lehatárolhatók hasonló térségek. Kialakulásuk elsősorban a felszíni hőmérséklet és az éghajlat jellemzőivel, azok változásával mutat kapcsolatot – hasonló övezetes eloszlású felszínformák ezért pl. a Marson is várhatók. Az alábbiakban vázlatos áttekintést adunk ezekről, kiemelve az elmúlt években született új eredményeket.

A *pólussapkák* nem csak sarkvidéki helyzetüket, de finomszerkezetüket tekintve is zonális jellemzőket mutatnak. Míg az északi állandó vagy maradványsapkát csak télen borítja szén-dioxid, addig délen a pólussapka jelentős része nyáron is megmarad. A bolygó globális hűlése, vagy a hosszú időskálájú éghajlati kilengések miatt a csökkenő hőmérséklettel párhuzamosan

elsőként a vízjég fagyott ki, majd annak tetejére telepedett a szén-dioxid jég. A déli sapka állandó, felső szén-dioxid fedőrétegében legalább két eltérő képződmény azonosítható.

Az idősebb, „A” jelű rész szinte mindenhol 10 m vastagságú, és kb. 2 m vastag rétegek építik fel. Felületén 6–10 m széles, 30–50 m hosszú és 1 m-nél sekélyebb repedések alkotta sokszögletű mélyedések a jellemzők. Egykor a pólussapka egész területére kiterjedt. Felületén a fenti poligonális mintázatnál mélyebb, kerekded, izolált depressziók vannak, amelyek pereme marsi évente oldalirányban 1–3 métert hátrál. Ilyen ütemű zsugorodással kb. 1000 év alatt eltűnhetne. Az „A” egységénél fiatalabb, 1–2 méter vékony „B” jelű egységet vékonyabb rétegek építik fel, és ez csak az „A” jelű mélyedéseiben van. Felszíne sima, ennek pusztulásával, változatos mélyedések keletkeznek benne. Az alábbi ábrán az A és B egységekre látható példa két egymást követő marsi év során, ahol lassú zsugorodásuk is megfigyelhető (d.sz. 87 ny.h. 4). Jelenleg a déli maradványsapkából marsi évente felszabaduló CO₂ tömege nagyságrendileg 10¹⁶ g, azaz kb. 0,1%-a a légkörnek.



Elsőként az A egység rakódott le, aztán pusztulni kezdett. Később a folyamat megállt, és ismét halmazódni kezdett a pólussapka, ekkor keletkezett a B egység, amely legalább még egy erózió-akkumuláció cikluson ment keresztül. Eközben az A tetejéről teljesen lepusztult a B, és ezért csak annak mélyedéseiben található meg. Az A és B egységen váltakozó halmozódás és lepusztulás figyelhető meg, minderre az elmúlt néhány száz évben kerülhetett sor. Ez túl rövid idő

ahhoz, hogy pályaelem-változások okozzák – inkább a légkör portartalmának évtizedes skálájú változásával kapcsolatosak, amelyek eltérést okozhatnak a sapka albedója révén annak hőháztartásában.

A *poláris réteges üledékek* (PLD) mindkét sarkvidéken a pólussapka alatt lévő, annál kiterjedtebb képződmények, amelyek közel vízszintes, 100 km-es távolságon is követhető, sűrű rétegekből állnak. Északon az egyes rétegek főleg albedójuk alapján, délen inkább felületük morfológiája és pusztulásuk jellemzői alapján csoportosíthatók, ahol az egyes rétegek eltérő viszonyok között képződtek. Főként vízjégből, és ebbe keveredett porból, homokból állnak, plasztikus és rideg deformáció nyomai egyaránt megfigyelhetők bennük, legfelül néhány cm vastag porózus anyag borítja őket. Mindkét sarkvidéken térfogatuk kb. 10^6 km³, területük 10^6 km², átlagos vastagságuk 1 km. Délen a maximális vastagságuk 3,7 km, de összességében itt vékonyabbak és kiterjedtebbek. Az üledékekben lévő vízjég globálisan 10–20 m mély vízréteget adna.

Délen a legidősebb részeik 30–100 millió, a felszínük kb. 0,1 millió éves. Az északi üledékek kb. 5 millió évesek, itt legalul homokdűnékből álló réteg húzódik, amelynek képződésekor nem volt pólussapka. A poláris réteges üledékek a pályaelem-változásokkal kapcsolatos, nagy területen zajló ülepedés és erózió révén keletkeztek. Összetett szerkezetüket a szublimáció és a kifagyás tér- és időbeli vándorlása okozhatja, délen néhol ritmikusan ismétlődő rétegeik láthatók. Egyelőre nem tudni, hogy anyaguk jelenleg növekszik-e vagy csökken.

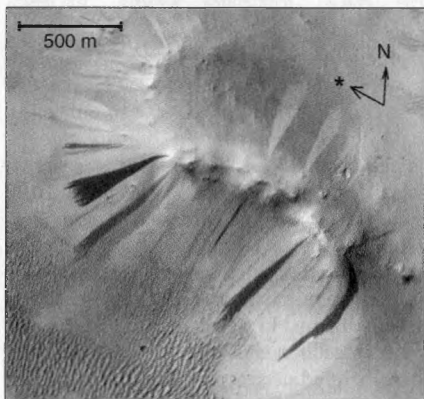
A *sárfolyások* 30 foknál magasabb szélességen jellemzők, pontos eloszlásuk még nem ismert teljesen. A mai napig nem sikerült általános magyarázatot adni a keletkezésükre, az elgondolások között még mindig szerepel a sekély, illetve a mély felszín alatti víztározókból történő feltörés, kis mélységben, illetve közvetlenül a felszínen lévő jég megolvadása, valamint a száraz törmelekmozgás. Övezetes eloszlásuk és a pólus felé néző lejtőkön jellemző helyzetük arra

utal, hogy nemrég lerakódott vízjég alkalmi megolvadásától keletkeznek.

A marsi *dűnék* általában sötét, feltehetőleg gyengén oxidált bazaltos szemcsékből állnak, elsősorban fizikai aprózódással, és nem kémiai mállással keletkeztek. Nagyrészként barkán jellegű, és őket kialakító stabil szélirányokra utal, emellett jellemzőek a kiterjedt lepel alakú homoktakarók is. Északon a poláris réteges üledékek körül 75–85 fokos szélesség között 680 ezer km² területű gyűrűt alkotnak főleg a 90 és 270 fokos keleti hosszúság között, míg délen elszórtan, főként 40 foknál magasabb szélességű kráterekben jellemzők, ahol együttes területük kb. 180 ezer km². Elképzelhető, hogy némelyik dűnét valamilyen anyag, feltehetőleg jég cementálja. Szemcséik valószínűleg akkor mozognak, amikor a klímaváltozások miatt az őket rögzítő jég eltávozik. Többségük ma inaktív, de egyes gyengén cementáltak tűnő dűnéknél vannak mozgásra utaló jelek. Mivel felszínük kráterektől mentes, fiatalok lehetnek, és az utóbbi évmilliók éghajlatai változásait tükrözhetik.

Mindkét féltekén a közepes és magas szélességeken kiterjedt, sima felszínű, de erősen pusztuló és szakadozott megjelenésű réteg mutatkozik. Nevüket magyarra talán *fedő* (mantled) és *felkent* (pasted-on) *üledék*nek lehetne fordítani. Minden típusú felszínformát beborítanak, kialakulásuk csak a földrajzi helyzethez kapcsolható. A közel méteres vastagságú képződményt jég cementálta por alkothatja, kora 1–3 millió év lehet, feltehetőleg 30 foknál ferdébb forgástengely esetén képződött, amikor sok jég szublimál el a pólussapkáról és húzódik az egyenlítő felé. A modellek alapján 30–50 ezer év alatt akár több méter vastag ilyen takaró keletkezhet. Amikor a forgástengely ferdesége csökken, a jég stabilitási határa a pólusok felé húzódik, és az üledék pusztulni kezd. Ezt persze a tetején felhalmozódó por hőszigetelő hatásával lassíthatja, valamint azzal, hogy a H₂O molekuláknak át kell diffundálniuk ezen a rétegen is, hogy elszökjenek.

A *lejtősávok* általában 30 foknál alacsonyabb szélességen jellemző, lefelé szélesedő, ritkán elágazó sávok. Többnyire környezetüknél sötétebbek, és az évek során világosodnak, majd eltűnnek. Jelenleg is keletkeznek, egy marsi év alatt minden korábbi lejtősávra 0,03 új sáv megjelenése jut. Talán száraz por lejtőirányú csuszamlásával keletkeznek, de az sem kizárt, hogy víz is közreműködik kialakulásukban; a megjelenésüket kiváltó folyamat(ok) az egyenlítői térségben jellemző(ek).



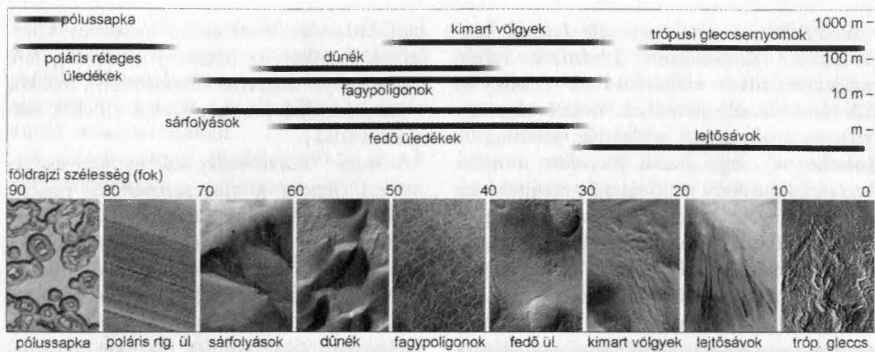
Az utóbbi évekig a Marson látható *poligonális szerkezetek* közül csak a sarkvidékieket tekintették vízzel kapcsolatosnak. Ezek a földi periglaciális, azaz jég környéki vidékeken a jég váltakozó olvadásától-fagyásától fellépő, periodikus térfogatváltozással keletkező poligonokra hasonlítanak. Néhány helyen (pl. Cerberus Planitia) azonban alacsonyabb szélességeken is megjelennek. Korábban ezeket vulkáni kőzetek hűlési repedéseinek tekintették, de részletes vizsgálatuk rámutatott, hogy fagypoligonok is lehetnek, néhol pedig olvadékvizek mozgására utaló egykori jelek is előfordulnak.

A Marson találunk a földi *gleccsernyomokhoz* hasonlókat. Ezeket két nagy csoportba oszthatjuk: néhányuk az egyenlítő közelében a Tharsis-hátság nagy vulkánjainak nyugati-északnyugati lejtőin van. Itt közzétörmelék borította, ún. száraz bázisú (aljzatukon vízréteg nélküli) gleccserek nyo-

mai láthatók, amelyek időszakosan kiterjedtek (amikor az alacsony szélesség felé mutató H₂O migráció felerősödött), máskor visszahúzódtak (amikor ezek a vidékek szárazzá váltak).

A nagy Tharsis-vulkánok nyugati-északnyugati lejtőin a gleccsernyomok mellett összetett szerkezetek sorakoznak ún. fáciéseket alkotva egymás után, az egykori jeges környezet eltérő részeinek nyomaiként. Amikor a bolygó forgástengelye ferdebb a jelenleginél, a pólussapka jége alacsony szélességre vándorol, és ott nem egyenletesen, hanem elsősorban a magas vulkánok északnyugati lejtőjén csapódik ki. A felhalmozódott jég gleccserek formájában néhol 140 km-es távolságra is elvándorolt. A legidősebb nyomok kb. 280 millió, míg a legfiatalabbak 4 millió évesek.

A gleccserszerű képződmények másik csoportjába a *kimart* (fretted) *völgyek* tartoznak, az é.sz. 30–50 és a ny.h. 290–360 fokok területén, a Deuteronilus-, Protonilus Mensae térségében, az északi féltekén a felföldek és a mélyföldek határvidékén. Ilyen domborzati helyzetű zóna kevés van a déli féltekén, pl. a Hellas-medence keleti peremvidékén, illetve elszórtan néhány magányos hegyvonulat körül. Az északi és déli előfordulásuk területén két felszínforma jellemző: a kiemelkedések lábától induló, 100–300 m vastag, legyezőszerű lebenyek, amelyeken lejtőirányban elnyúló vonalas szerkezetek mutatkoznak. Többnyire meredek peremű mélyedésekből indulnak, lassan lefelé kúszó folyamatra utalva. A másik jellegzetes formát a völgyeket kitöltő lapos, tetejükön egymással párhuzamos vonalakat mutató anyag adja. Itt a vonalas alakzatok feltehetőleg az áramlási iránnyal, a völgyeket környező falakkal párhuzamosak, és a földi gleccserek felszínén futó hosszanti alakzatokra emlékeztetnek. A kiemelkedéseket látványosan „körbefolyják”, útjuk mentén szélesednek, elvégződésük környékén már alig találunk kiemelkedéseket – feltehetőleg erre mindent elerodáltak. A lejtőkön lévő lebenyek és a völgyeket kitöltő típus a találkozási pontjaikon összekapcsolódik. Ezek törmelék



borította gleccserszerű alakzatok lehetnek. Erre utalnak az íves törmelék-lerakódások (morénák) és a jég szublimációja után visszamaradt mélyedések. Egyelőre nem tudjuk, hogy jelenleg is mozognak-e vagy sem, legtöbbjük a pusztulás jeleit mutatja, ami a jelenlegi „marsi interglaciális” éghajlattal kapcsolatos.

A fentebb említett képződmények mindegyike a bolygó jelenlegi vagy a közelmúltban kialakult felszínformái közé tartozik. Ezek helyzete, kora és egyéb jellemzője az egykori felszíni viszonyok rekonstruálásában segíthet. Több képződmény is arra utal, hogy a jég a közelmúltban aktívabban formálta a felszínt, mint napjainkban. Jelenleg a bolygó forgástengelyének viszonylag kis ferdesége a sarkvidékre koncentrálja az illó anyagokat, ezzel csökkentve a jég felszíni aktivitását és a légkör mennyiségét. A cikkben érintett képződmények egy-egy képviselőjének fotója és földrajzi szélesség szerinti eloszlása a mellékelt összefoglaló ábrán látható. Alul a felszínforma csoportok képei, fent közelítő földrajzi elhelyezkedésük figyelhető meg. A függőleges tengely az adott képződmény közelítő függőleges méretét (mélységét vagy magasságát) mutatja torzított skálán.

Globális felmelegedés a Marson?

Néhány jel arra utal, hogy a mai inaktív jellegű, néhol „marsi interglaciálisnak” nevezett periódus változóban van. A kli-

mamodelleket a Viking és az MGS felszíni albedó-megfigyeléseivel egybevetve úgy fest, hogy az elmúlt 20 évben átlagosan 0,65 fokot emelkedett a bolygó globális átlaghőmérséklete. Ebben fontos szerepet játszik a világos, fényvisszaverő por eloszlásának és területének változása. A sötét területek erősebben felmelegednek, és felettük erősebb szelek jelentkeznek. Ez még több port ragad magával, összetett visszacsatolási mechanizmust kiváltva.

Az erősebb szelek több és erősebb porviharokat eredményeznek, ami főként a déli nyár idején jellemző. Ekkor alkalmanként erősen felmelegszik a légkör, és a benne lebegő por miatt összességében talán több napfényt nyel el, ami hozzájárulhat ahhoz a melegedéshez, aminek eredményeként a déli pólussapka felső szén-dioxid-jégrétege az elmúlt négy évben minden nyárra egyre jobban fog. A Marson zajló globális felmelegedés durva becslés alapján kb. négyszer gyorsabb, mint amit jelenleg a Földön tapasztalunk. A jelenség kimenetele egyelőre nehezen becsülhető, főleg, mert a melegedéstől nőhet a légkör mennyisége, amitől változik az áramlások és az illó anyagok szállítása. Ha ennek eredményeként alacsony szélességen egyre több vízjég halmozódik fel, a jelenleg „marsi interglaciális” egy aktív periódus válthatja fel, amelyben a halmozódó jég ismét beindítja a gleccser jellegű alakzatokat, néhol pedig átmenetileg akár víz is megjelenhet.

Kereszturi Ákos, Kuti Adrienn