

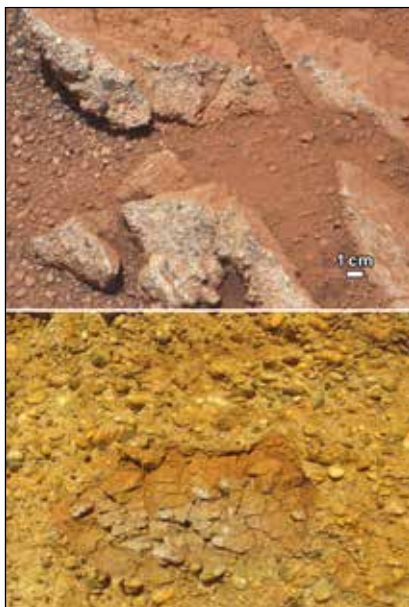
KERESZTURI ÁKOS–BRADÁK BALÁZS–ÚJVÁRI GÁBOR

# Hogyan vizsgálhatnánk más égitesteket a Kárpát-medencében?

**K**ülönböző bolygók, holdak és egyéb égitestek megismerésében a földi megfigyelések, analógok vagy analógiák segíthetnek: gondoljunk azokra a filmekre, melyekben a jövő Marszondáit tesztelik földi sivatagos vidékeken. Néhány évvel ezelőttig ilyen munkákat csak extrém száraz vagy hideg, a marsihoz részben hasonló területeken végeztek. A kutatómódszerek és célpontok szélesedése révén ma már sok egyéb országban is azonosítottak a Földön kívüli térségek megismeréséhez hasznos terepi adottságot. Magyarországon is lehetséges a földtudományok és kapcsolódó műszeres kapacitások, valamint a csillagászat ilyen „alkalmazott” hasznosítása. Az alábbiakban előbb általánosan áttekintjük ezen kutatások körét, majd olyan témákat veszünk sorra, melyekben hazánknak is jó adottságai vannak.

Az emberes expedíciók módszertani fejlesztése még az Apollo-holdutazások időszakában indult, amikor a műszereket, azok szállítási lehetőségét és a gyalogos/motorizált munkavégzés logisztikáját tesztelték. A holdutazó űrhajósok az Egyesült Államok sivatagos belső vidékein néha szakfanderben sétálva, máskor a holdi terepjáró másán tesztelték, milyen logika szerint érdemes a felszínt vizsgálni és a mintákat begyűjteni. Később a Marsra fókuszált az analóg kutatások többsége, és száraz, hideg, esetleg csak időszakosan nedves vidékeket elemeztek. Bevett szokás lett, hogy a vörös bolygó geológiai vizsgálatánál a földi analógiák alapján becsülik meg például, hogy hol és mennyi felszíni és felszín alatti jég lehetett korábban, esetleg a folyóvölgyek lerakódott üledék mennyiségéből, és a domborzat alapján becsülik egykori vízhozam segítségével közelítik, mennyi ideg volt aktív a kérdéses folyó.

Napjainkban az egzotikus adottságok nélküli, a számunkra „megszokott”, mérsekletűvi Európában is dolgoznak hasonló céllal a szakemberek. Tektonikus és vulkanikus, valamint üledékes alakzatokat vizsgálnak, a gyorsan fejlődő műszaki lehetőségek révén pedig technológiai tesztek végeznek földi területeken (Táb-



**1. ábra, fent. Konglomerátum a Marson: ahol a Peave Vallis vize a Gale-kráterbe érkezett lerakta a magával szállított koptatott, enyhén kerekített szemcséket. A Curiosity rover képén a Link feltárás látszik, ahol a cementált köztöböl sok kihullott cm-es kavics látható a kép bal szélén (NASA/JPL-Caltech/MSSS). Lent: Csömör környéki kavicsbánya, a Duna Pesti-síkságon épült hordalékkúpjának részét képező üledékeket (homok, kavics) tartalmazó rétegsora. A képen egy közepesen-gyengén osztályozott, jól koptatott, közepesen kerekített és gyengén irányított kavicsos réteg látható, melybe áthalmazott, kompakt „agyagtömb” keveredett. A fenti képen látható méretskála mindkét felvételre érvényes**

lázat). Űrszondák kameráit, meteorológiai szenzorait, mintavevő berendezéseit tesztelik, egy-egy speciális tényezőre fókuszálva. Ennek megfelelően nem gond, ha a földi gravitáció nem azonos az adott égitesten jellemzővel, vagy a kérdéses objektumnak légköre sincs – ez nem befolyásolja jelentősen az infravörös képrögzítés tesztelését, a mintavétel módját, a porított

minta helyszíni laborvizsgálatát, vagy az adott űrszonda földi példányának autonóm munkáját, esetleg rádióan keresztüli irányítását egy földi csapattal.

## Analóg bolygó kutatási lehetőségek Magyarországon

Hazánk adottságait tekintve a lösz (Bradák et al. 2014), az alföldeket feltöltő folyók üledékei, a pleisztocén korból visszamaradt, periglaciális, esetleg permafroszt környezetre utaló alakzatok (Kovács et al. 2007; Fábán et al. 2014), valamint a bazaltvulkánok vizsgálata a legcélszerűbb. A szél által továbbított és a légkörből kihulló por felhalmozódási és szállítási folyamatoknak, a vízfolyások hordalékot szállító és felhalmozó jellemzői, és a jégtakaróval fedett térségek környezetének felszínalakulása megértésében, rekonstruálásában, vezethet marsi mechanizmusok felismeréséhez. A vulkáni területek hidrotermális átalakulásainak vizsgálata a meteoritok szülőégitesteiben ásványi szinten zajló folyamatokról adnak pontosabb képet.

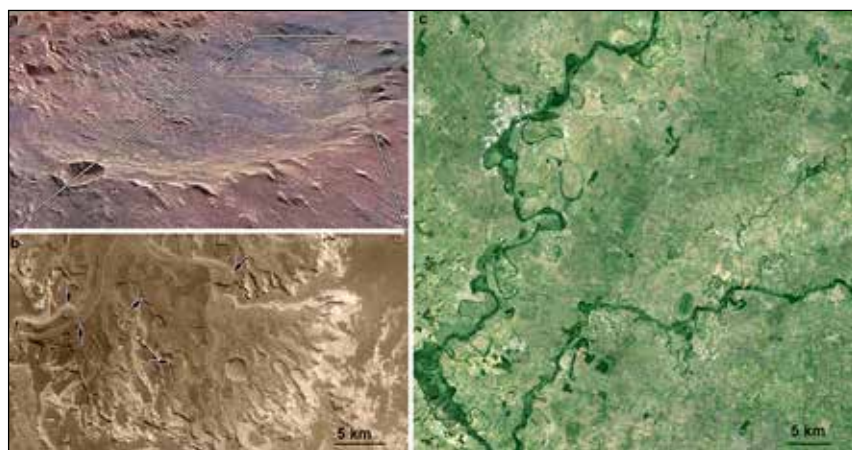
A földi löszhöz hasonló finom és durva közetliszt méretű (2–63 mikron), de sok esetben még ennél is finomabb (<2 mikron), légköri eredetű, porüledékek a Marson is gyakoriak. Míg korábban ilyen nagy vastagságban csak a két pólussapka alatti ún. poláris réteges üledékekben vártak, az utóbbi évek elemzése alapján úgy fest, a bolygón sok helyen léteznek ún. porkövek, amelyek évmilliók, év-százmilliók során felhalmozódott finomszemcsés anyag közötté válásával keletkeztek. A Curiosity rover által vizsgált Gale-kráter központi hegyének magasabb részét is ilyen anyag alkotja, és sok hatalmas, az egyenlítő környéki üledéksorról feltételezik, hogy azokat hulló por hozta létre.

Magyarország löszös területeinek elemzése a poranyag felhalmozódása (Újvári et al. 2010) és a közötté válást követő folyamatok megismerésében segítenek, ahol kiszűrhetők a biogén tevékenység hatásai. Ez esetben nemcsak a szemcsék méreteloszlása és alakja (Varga et al. 2012), valamint cementációja mu-

**Táblázat. Néhány népszerű analóg kutatási témakörök áttekintése**

folyamat/alakzat	égitest	földi analógia	vizsgálandó jellemzők	potenciális hazai példa
mintavétel tervezése	mindegyik	szinte bármely terep	megcélzott réteg / anyag eloszlása	szinte bármely terep
riftesedés	Vénusz, Mars	Kelet-afrikai-árok	tektonika/magma- és vulkanizmus kapcsolata	
vulkanikus képződmények	Merkúr, Vénusz, Hold, Mars, Io	geokémiailag primitív lávát produkáló vulkánok	vulkánmorfológia, lávaképződmények, jégolvasztás, termális erózió	részben a bazalt láva képződmények
kőzetblokkok szétbomlása belső hő olvasztó hatására	Europa (jég), Io, Mars (kőzetblokkok a káoszterületeken)	tengeri jég feldarabolódása	blokkok alakja, helyzete, eloszlása	
metasomatikus átalakulás	meteoritok, marsi meteoritok	vulkáni forró vizes átalakulás geokémiailag primitív környezetben	elem migráció, másodlagos ásványok keletkezése	Balaton-felvidék, bazalt hidrotermális metasomatózisa
szemcsetranszport, eolikus üledékek	Mars, Titán	szél szállította üledékek	erózió/szedimentáció aránya, jellemzői, eltérő frakciók lerakódása, szerves anyag halmozódása	löszös területek
folyóvízi üledékképződés	Mars, Titán (alárendelten lávafolyások: Hold, Merkúr, Vénusz)	folyóvölgyek eróziója, akkumulációja	szemcseméret, alak, beágyazódás, üledék sztratigráfiája	feltöltő tevékenységű hazai folyók
krioszféra (felszín alatti jég és kőzetek együttese)	Mars	permafroszt és periglaciális területek	krioturbáció, alakzatok felismerhetősége, megtartása	pleisztocén fagyképződmények
mállásos jelenségek	Mars	sivatagi mállás, kéregképződés, fagyhatás	kőzetátalakulás megkezdése, H <sub>2</sub> O hatása, elem migráció	
biomineralizáció	marsi agyagásványok	agyagásvány képződés felszíni mállás / mélységi hidrotermális hatásra	biogén/abiogén hatások, agyagásvány szerkezetek kapcsolata képződési környezettel	úkúti mangánércesedés

tathat hasonlóságokat a marsi porkövekkel, hanem a szállítás távolsága, a szemcsék forrásterületei is megbecsülhetők pl. a nehézasványok alapján (Újvári et al. 2012). Az elmúlt években a Marson az Opportunity és a Curiosity rover egyaránt vizsgáltak szemcsés üledékes területeket. A vörös bolygón a rendszeres szelek, valamint az általánosan gyenge geológiai aktivitás miatt a felszíni por összetétele globálisan homogén, nem biztos azonban, hogy ez mindig így volt. A területi eltérések, és a szemcsék méreteloszlása, valamint koptatottsága a korábbi szállítás módjára, távolságára, esetenként forrására is utalhat. Itt a módszertani tapasztalatok is hasznosak: a hazai löszfeltárások elemzése alapján a szakemberek becsülni tudják, hogy milyen felbontásban (mintaszám/egységnyi mélység) érdemes vizsgálni egy adott rétegsort, és az eredmények értelmezéséhez milyen információra van még szükséges az adott feltárásról. Tapasztalatok vannak arról is, hogy a szemcsék aggregátumai miként befolyásolják a szemcseösszetételi méréseket, hogyan lehet kezelni ezeket. Bár



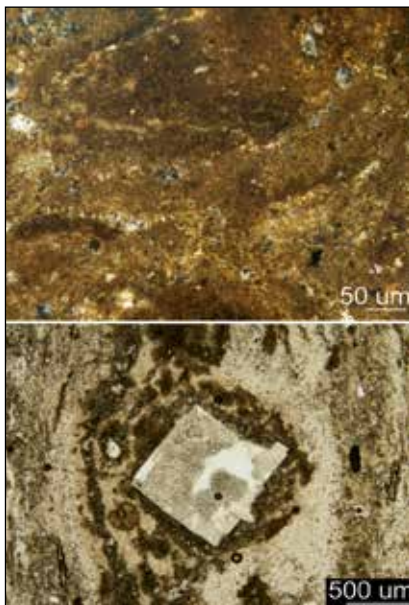
**2. ábra. Folyókanyarulatok és üledékeik a Marson (balra) és a Tiszánál (jobbra). Az 'a' ábrán az Eberswalde-kráterbe torkolló folyásnyom, a 'b' ábrán annak kinagyított része látszik, ahol a nyílak kanyargó torkolati ágakat jeleznek. A 'c' ábrán a Tiszánál egy kanyarulatot fejlesztő, meanderező szakasza látható, ahol a vándorló meanderek (kanyarulatok) esetében vizsgálható, hol és milyen hordalék ülededik ki, merre érdemes hasonlókat keresni a Marson**

az aggregátumok sokszor megnehezítik a szemcseösszetételi méréseket és a mögöttes szállítási folyamatok fizikájának

megértését, mégis a marsi aggregátumok fontosak, hiszen az egykori vizes folyamatokról is árulkodhatnak.

A folyó völgyek, meanderek, vándorló folyókanyarulatok, valamint az utánuk visszamaradó üledékek elemzése nagy múltra tekint vissza hazánkban. A marsi alakzatok sokban különböznek a nálunk megfigyelhetőktől (a vörös bolygón sok időszakos folyó lehetett, gyakran meredekebb és sebesebb sodrású, esetenként az ittenieknél lényegesen nagyobb folyók voltak, de bizonyos párhuzamok itt is kimutathatók. A földihez hasonlóan például az egykori marsi folyók esetén is összefügg a kanyarulatok mérete és a jellegzetes vízhozam is, azonban a legtöbb érdekesség a lerakott üledék rétegsorában várható. A vörös bolygón lévő folyóvízi-tavi üledékeknek az egyes rétegek között látványos eltérések mutatkoznak a domináns szemcseméretben vagy a cementáltságban, már keringési pályáról figyelve is. Koptatott kavicsokat tartalmazó konglomerátumot már közvetlen közléről is sikerült megfigyelni a Curiosity rover révén (1. ábra). Ha a következő űrszondák hasonló mobilitást (km-es távolságskála) mutatnak, mint a Curiosity, akkor pontosabban lehet egy-egy ősi vízfolyás mintavételét megtervezni. A leginkább biztató helyszínek az ősi folyók tavakba torkolló részei, ahol a folyó szétterítette hordalékát. Az ilyen területeken sok elágazó meder mutatkozik, amelyeknél fontos a fűrésok és ezt követő mérések pontos hely kiválasztása. Itt a földi analógiák és a vízhalózat egykori rajzolata segíthetnek megbecsülni, hol várható a legtöbb finomszemcsés üledék és merre halmozódhatott fel az esetlegesen szállított szerves anyag (2. ábra).

A Mars *periglaciális*, illetve permafroszt vidékeinek elemzéséhez a pleisztocén kor eljegesedési időszakai során létrejött különböző felszínalakítási formák, vagy egyes üledékekben kialakult jellegzetes mintázat nyújthat terepi segítséget. Mivel hazánkban, de főként Kelet-Közép-Európa fölött északabbra lévő területein eltérő módszerekkel is vizsgálhatjuk ezeket a képződményeket, általában jó esély van rekonstrukciójukra, és bőséggel vehető minta is belőlük. Sok helyen azonosítható a fagyaprózódás, periglaciális lejtős áthalmozódások, illetve fagyás-olvadás változásához, valamint az örökfagy megjelenéséhez köthető jégékek, fagyékek, illetve krioturbaáció nyomai. Maga az azonosítás is hasznos ismereteket ad az ilyen képződmények utólagos felismeréséhez. A kőzetek hajszálrepedéseire hasonlóak a Marson is előfordulhatnak, noha ott szárazabb viszonyok lehetnek még a nagy hidegben is, de hazánk területén viszont arid és szemi-arid klíma is előfordult egykor. A földi és marsi törmelékletjők szinte kimeríthetetlen célpontot adnak, amelyek statisztikai vizsgálata, a blokkok eloszlásának jellemzése a mozgások jellegére



3. ábra. Az NWA 3118 meteorit folyásos szövete (fent), hasonló deformációs-szemcsenövekedéses képződmény riolitban Gyöngyössolymosról (lent) (Józsa Sándor nyomán, Kereszturi et al. 2014)

utal. A Mars esetében pl. sokkal kevesebb a lejtők távoli végén lévő nagy blokkok száma, ami feltehetően azzal magyarázható, hogy az erőteljes aprózódás miatt kevesebb nagy tömb maradt fenn. A műszeres munka itt kísérletekkel is segíthet: kevésbé értett, de fontos folyamat lehet a különféle vízben oldott sók (főleg szulfátok) eutektikus fagyásának elemzése, geológiai hatásuk megismerése, ami ma még szinte teljesen ismeretlen témakör.

A meteoritokban mikroszkopikus méretskálán megfigyelhető folyamatok analóg változata is tanulmányozható hazai kőzetmintákon, amelyek sokkal nagyobb számban érhetőek el, akár roncsolásos vizsgálathoz is, mint a kozmikus anyagok. Ebben a témakörben érdekesek a forró vizes, hidrotermális átalakulások, amelyek során vulkáni területeken magas hőmérsékletű oldatok áramlottak a kőzetek repedéseiben, átalakítva ezzel az ott található ásványokat. Az ekkor keletkezett másodlagos ásványok elemzése a vizes oldat hőmérsékletének, pH-jának, oxigéntartalmának és egyéb jellemzőinek durva becsülésében segítenek. Ezt a szöveti vizsgálatokkal összekapcsolva pedig jó esetben az eseménye sorrendje is rekonstruálható.

Míndez a meteoritok belsejében a <sup>26</sup>Al izotóp radioaktív bomlásának hőtermelésétől megjelenő forróvízes oldatok hatásának értelmezésében segít, de a marsi meteoritoknál is hasznos, mivel támpontot ad, milyen viszonyok között jöttek létre az átalakult ásványok. A Balaton-felvidék bazaltos vulkánjai ideális vizsgálati

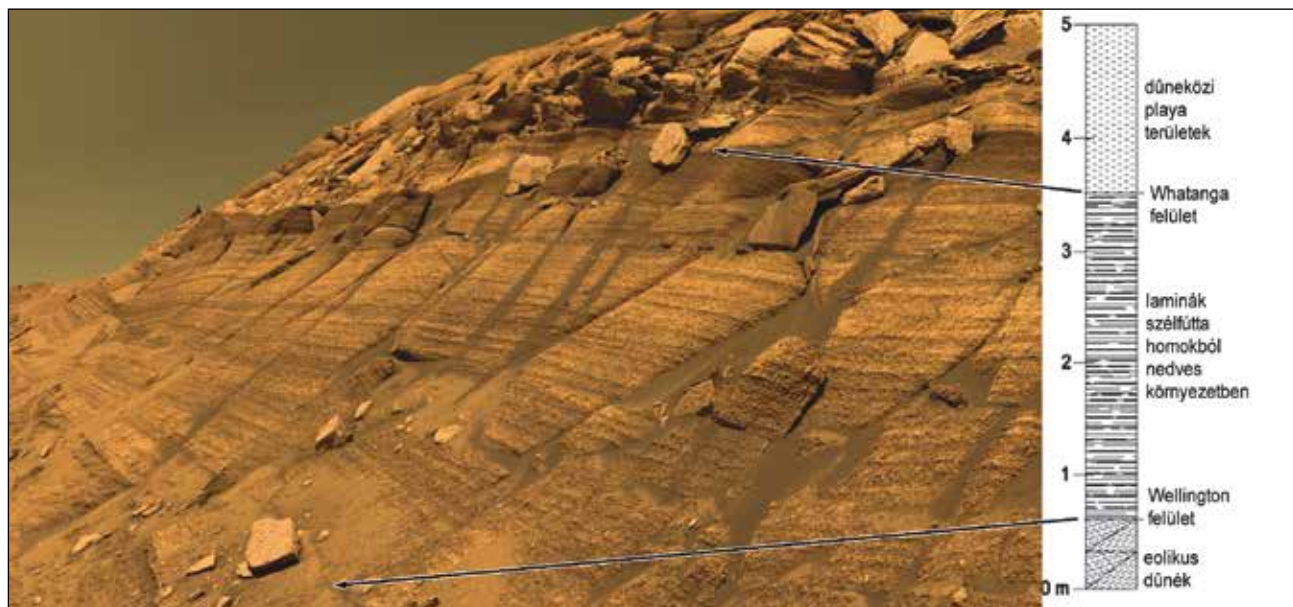
célpontok ilyen szempontból, amelyekhez hasonló összetételűek a Marson is működhetnek egykor. Egy meteoritokkal kapcsolatos másik példa a gyöngyössolymosi Kis-hegy, Lilakó bányából nyert riolit lávadóm kapcsán azonosítható. Noha a meteoritokban nem várunk riolithoz hasonló, geokémiaileg fejlett kőzeteket, itt az ásványok helyzete és eloszlása tartogat érdekességet. A riolit nagyon viszkózus, lassan folyó szövetében sikerült hasonló ásványmintázatot megfigyelni, mint pl. a NWA 3118 jelű CV3 típusú meteoritban. A 3. ábrán látható képződmények feltehetőleg a legtöbb ásvány megszilárdulása utáni, csekély mértékű plasztikus deformáció során, még a kőzet meleg állapotában keletkeztek, és talán a kérdéses meteoritban is hasonlóan jöttek létre.

### Modern analóg kutatások világszerte

A fenti analógiák esetében természetesen nem szabad az eredmények alapján közvetlenül és egy az egyben más bolygókra vonatkozó következtetéseket levonni. De ha az eltéréseket szem előtt tartjuk, illetve a vizsgálat tárgyát úgy választjuk meg, hogy azt ne befolyásolják ezek a különbözőségek (pl. a biogén hatás), hasznos ismeretek nyerhetők. Előny, hogy a vizsgálatok földi mintákon és körülmények között igen egyszerűek, a módszereket tekintve gazdag tapasztalatokra támaszkodunk és minimális költséggel többször megismételhetők. Szükség esetén akár sokkal nagyobb anyagmennyiségben is elvégezhetők. A fent bemutatott témakörök az űrszondás kutatások trendjével is összhangban állnak. A Mars esetében például a következő felszíni küldetések adatértelmezéséhez már olyan méretskálán szerzett műszeres tapasztalat és tudás szükséges, ami a terepen és a laboratóriumban a méter-mikrométer tartomány elemzésével nyerhető. Nem véletlen, hogy egyre több ország kapcsolja be saját terepi és laboratóriumi adottságait az űrszondás programok előkészítésébe, referenciamérések végzésébe és különféle tesztlécekbe.

Az ilyen kutatásokkal gyakran csatlakoznak NASA-szakemberek az öreg kontinensre, és a tudományra a tengerentúlon áldozott összegek kis része európai analóg kutatásokban is megjelenik. Jó példa Izland a vulkán-jég kölcsönhatások vonatkozásában, vagy Norvégia periglaciális (jég környéki) formakincsével és permafrosztjával. De kevésbé „egzotikus” államok is aktívak a témakörben: Spanyolország a Tinto folyó forrásvidékének vastartalmú pirites ércesedésére „csapott le”, és kutatja amerikai szakemberekkel együtt. A területen autonóm





4. ábra. A marsi Burns Formáció képe (balra) és rétegsora (jobbra) az Endurance-kráterben, amelyben alulról felfelé haladva a szélfúttá dűnétől az egyre nedvesebb viszonyok irányába tolódtak el az egykori környezeti feltételek az Opportunity rover mérései alapján. Hasonló környezeti változások hazai rétegsorokban is felismerhetőek és vizsgálhatóak (NASA, Grotzinger et al. 2005)

(tehát emberi beavatkozás nélküli) fúrás folytattak, amely a vashoz kapcsolódó felszín alatti mikrobiális életközösség viselkedését is tanulmányozta és technológiai tapasztalatokkal szolgált a jövőbeli marsi fúrásokhoz. Az itt, rendkívül alacsony pH mellett zajló ásványátalakulások hasznosak egyes Földön kívüli folyamatok megértéséhez. Franciaország olyan közetgyűjteményt állított össze (Orleans Mars Analogue Rock Collection), amelyen az űrszondás méréseket földi viszonyok között tesztelik. Svájcban kémiai elemzés helyett mikroszkópos képeket rögzítettek különféle szemcséket tartalmazó anyagokról, amit a Beagle-2 leszállóegység munkájához használtak volna. (Az űreszközzel azonban sajnos idő előtt megszűnt a kapcsolat annak valószínű becsapódása miatt.) Lengyelországban eltérő keménységű üledékeken tesztelnek ún. penetrátorokat (a felszín alá magukat „bekapáló” űreszközöket) a Hold, a Mars és kisbolygók valamint üstökösök kutatására, míg Romániában a Movile-barlang oxigénben szegény és hidrogén-szulfidban, valamint szén-dioxidban gazdag viszonyait tanulmányozzák és keresik a marsi analógiákat.

Az imént említett sor a kutatók kreativitása függvényében folytatható és a fenti példák mutatják, hogy az analóg kutatás a laboratóriumi lehetőségekkel együtt ma már sok űrszondás programhoz és ennek keretében az Európai Űrügynökség (ESA) munkájához is kapcsolódik. Az egyes államok adottságait kihasználva a nemzetközi együttműködések révén magas technológiai

ismereteket nyerhetnek. Hazánkban is sok egyedi terepi adottsága, valamint laboratóriumi tapasztalata van, amelyek európai szinten is hozzájárulhatnak a Naprendszer megismeréséhez. A Kárpát-medence területén végzett öskörnyezet-rekonstrukciók révén a munkamódszert tekintve is komoly tapasztalatunk van (Bajnóczi et al. 2003, Kovács 2014). Mivel az űrprogramok rendkívül drágák, egy-egy elemüket, akár egyetlen műszert is megéri földi viszonyok között, élesben is tesztelni. Utóbbi a tapasztalatok alapján jelentős fejlesztésekkel is jár, ahol az ipari szegmens is bekapcsolódhat, még értékeőbb végterméket és tudást eredményezve. ▲

*A cikkben bemutatott földi analógiák elemzését az OTKA PD 105970 pályázat támogatta.*

### Irodalom

Bajnóczi B., Demény A., Korpás K. 2003. Stable isotope study in a weakly developed paleosol horizon in the Quaternary Várhegy travertine (Budapest, Hungary). *Acta Geologica Hungarica* 46, 149-160.  
 Bradák et al. 2014. Different paleoenvironments of Late Pleistocene age identified in Verőce outcrop, Hungary: Preliminary results. *Quaternary International* 319, 119-136.  
 Fábán S.A., Kovács J., Varga G., Sipos G., Horváth Z., Thamó-Bozsó E., Tóth G. 2014. Distribution of relict permafrost features in the Pannonian Basin, Hungary. *Boreas* 43, 722-732.

Kereszturi A., Ormandi Sz., Jozsa S., Szabo M., Toth M. 2014. Analysis of ripple or flow-like features in NWA 3118 CV3 meteorite. *Planetary and Space Science* 104, 200-210.  
 Kovács J. 2014. Pliocén – pleisztocén paleokörnyezeti rekonstrukció paleotalajok és ősmaradványok ásványtani-geokémiai adatai alapján. Pécsi Tudományegyetem  
 Kovács J., Fabian S.A., Schweitzer F., Varga G. 2007. A relict sand-wedge polygon site in north-central Hungary. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 379-384.  
 McSween H.Y., Keila K. 2000. Mixing relationships in the Martian regolith and the composition of globally homogeneous dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 2155-2166.  
 Újvári G., Kovács J., Varga Gy., Raucsik B., Markovic S.B. 2010. Dust flux estimates for the Last Glacial Period in East Central Europe based on terrestrial records of loess deposits: A review. *Quaternary Science Reviews* 29, 3157-3166.  
 Újvári G., Varga A., Ramos F. C., Kovács J., Németh T., Stevens T. 2012. Evaluating the use of clay mineralogy, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb ages in tracking dust provenance: An example from loess of the Carpathian Basin. *Chemical Geology* 304-305, 83-96.  
 Varga G., Kovács J., Újvári G. 2012. Late Pleistocene variations of the background aeolian dust concentration in the Carpathian Basin: An estimate using decomposition of grain-size distribution curves of loess deposits. *Geologie En Mijnbouw-Netherlands Journal of Geosciences* 91, 159-171.