

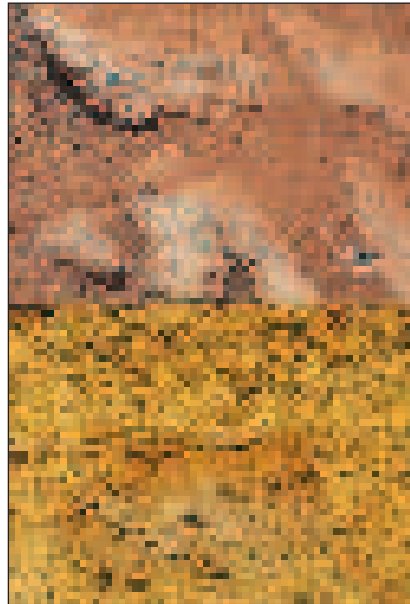
KERESZTURI ÁKOS–BRADÁK BALÁZS–ÚJVÁRI GÁBOR

# 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 vidéken. 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 becslilik meg például, hogy hol és mennyi felszíni és felszín alatti jég lehetett korábban, esetleg a folyóvölgyek lerakódott üledék mennyiségéből, és a domborzat alapján becslült egykori vízhozam segítségével közelítik, mennyi ideg volt aktív a kérdéses folyó.

Napjainkban az egzotikus adottságok nélküli, a számunkra „megszokott”, mérsékeltvívi 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 (**Táblázat**). Űrszondák kameráit, meteo-



**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 kőzetből sok kihullott cm-es kavics látható a kép bal szélén (NASA/JPL–Caltech/MSS). Lent: Csömör környéki kavicsbánya, a Duna Pestí-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 méretek kála mindkét felvételre érvényes**

rológiai szenzorait, mintavető 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 keresztül 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; Fábíán et al. 2014), valamint a bazaltvulkánok vizsgálata a legcélszerűbb. A szél által továbbított és a légkörből kihulló por felhalmozódási és szállítási folyamatainak, a vízfolyások hordalékot szállító és felhalmozó jellemzői, és a jégtakaróval fedett térségek környezetének felszínalakulása megértésében, rekonstrukciójában, vezethet marsi mechanizmusok felismeréséhez. A vulkáni területek hidrotermális átalakulásainak vizsgálata a meteoritok szülőégitesteiben ásványi szinten zajló folyamatokról adnak pontosabb képet.

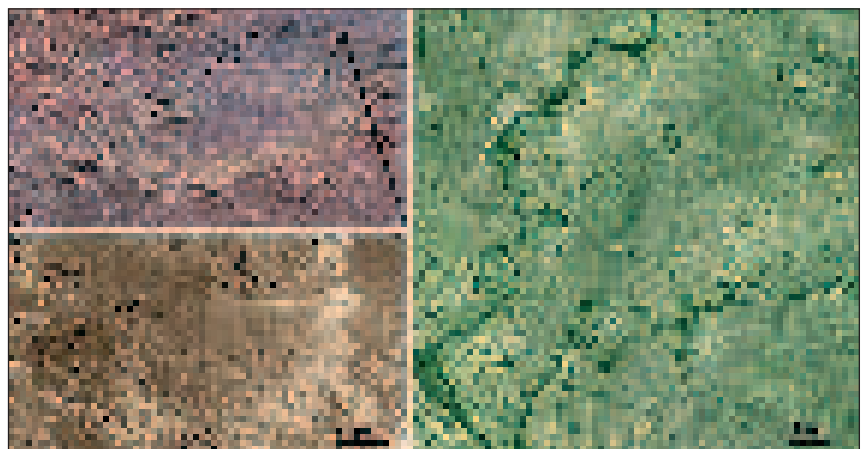
A földi *löss*höz hasonló finom és durva közetliszt méretű (2–63 mikron), de sok esetben még ennél is finomabb (<2 mikron), légköri eredetű, porüledékek a Mars-on is gyakoriak. Míg korábban ilyen nagy vastagságban csak a két pólussapká alatti ún. poláris réteges üledékekben vártak, az utóbbi évek elemzése alapján úgy fest, a bolygón sok helyen léteznek ún. porkövek, amelyek évmilliók, év-százmilliók során felhalmozódott finomszemcsés anyag közzétté 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 közzétté 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 mutathat hasonlóságokat a marsi porkövek-

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                                | geokémiaileg 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 geokémiaileg 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, kéreg képződés, 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             | úrkúti mangánércesedés                                |

kel, 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 szállítási 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 informá-



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 nyilak kanyargó torkolati ágakat jeleznek. A 'c' ábrán a Tiszának egy kanyarulatot fejlesztő, meanderező szakasza látható, ahol a vándorló meanderek (kanyarulatok) esetében vizsgálható, hol és milyen hordalék ülepedik ki, merre érdemes hasonlókat keresni a Marson

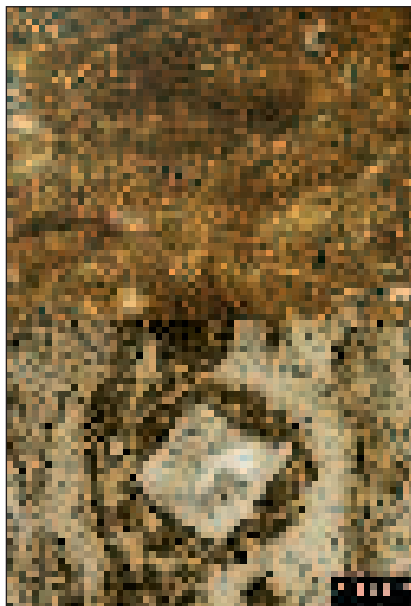
cióra van még szükség az adott feltárásról. Tapasztalatok vannak arról is, hogy a szemcsék aggregátumai miként

befolyásolják a szemcséösszetételi méreteket, hogyan lehet kezelni ezeket. Bár az aggregátumok sokszor megnehezítik

a szemcseösszetéti méréseket és a mögöttes szállítási folyamatok fizikájának megértését, mégis a marsi aggregátumok fontosak, hiszen az egykori vizes folyamatokról is árulkodhatnak.

A folyóvölgyek, 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 itteniéknél 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 üledékeknél az egyes rétegek között látványos eltérések mutatkoznak a domináns szemcseméretben vagy a cementáltságban, már keringési pályáról figyelve is. Koptatott kavicsokat tartalmazó konglomerátumot már közvetlen közélről is sikerült megfigyelni a Curiosity rover révén (**1. ábra**). Ha a következő űrszondák hasonló mobilitást (km-es távolságkála) 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 fűrészek és ezt követő mérések pontos helykiválasztása. Itt a földi analógiák és a vízhálózat 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 tőlünk északabbra lévő területein elterjedt módszerekkel is vizsgálhatjuk ezeket a képződményeket, általában jó esély van rekonstruálásukra, 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 krioturáció nyomai. Maga az azonosítás is hasznos ismereteket ad az ilyen képződmények utólagos felismeréséhez. A kőzetek hajszálpredációihoz hasonlóak a Marson is előfordulhatnak, noha ott szárazabb viszonyok lehettek még a nagy hidegben is, de hazánk területén viszont



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

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 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 becslésében segítenek. Ezt a szöveti vizsgálatokkal összekapcsolva pedig jó esetben az események sorrendje is rekonstruálható.

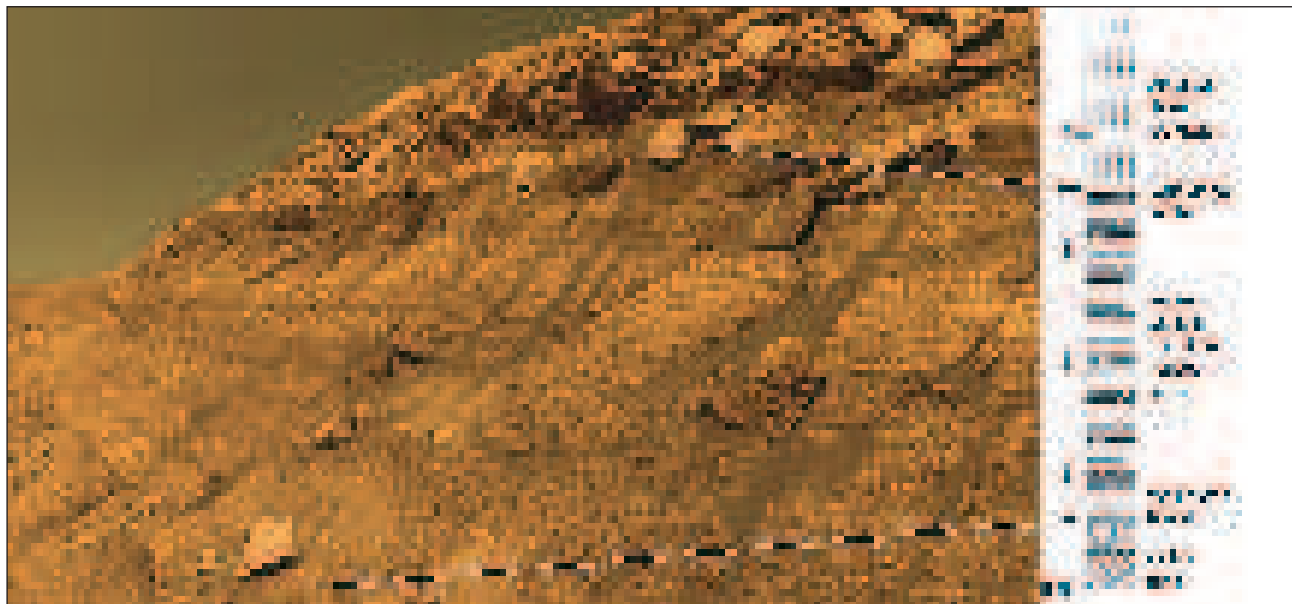
Mindez a meteoritok belsejében a  $^{26}\text{Al}$  izotóp radioaktív bomlásának hőtermelésétől megjelenő forróvizes oldatok ha-

tásának 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, Lilakő bányából nyert riolit lávadóm kapcsán azonosítható. Noha a meteoritokban nem várunk riolithoz hasonló, geokémiailag fejlett kőzeteket, itt az ásványok helyzete és eloszlása tartogat érdekességet. A riolit nagyon viszkozus, lassan folyó szövétében 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 ismereteket 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 anyagtömeget 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 tesztlekésbe.

Az ilyen kutatásokkal gyakran csatlakoznak NASA-szakembereket 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 „eg-



**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)

zotikus” állapotok is aktívak a témakörben: Spanyolország a Tinto folyó forrásvidékének vastartalmú pirites ércesedésére „csapott le”, és kutatja amerikai szakemberekkel együtt. A területen autonóm (tehát emberi beavatkozás nélküli) fúrásokat 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 kőzetgyűjteményt 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 üledéken 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 Űr-

ügynökség (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 (Bajnóczy 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 értékesebb végterméket és tudást eredményezve. ▲

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

## Irodalom

- Bajnóczy 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.
- Fábián 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.