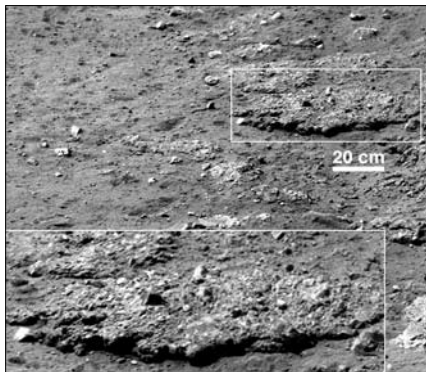


# Folyóvízi hordalékon gurul a Curiosity

Látványos eredményeket produkált a Mars-on dolgozó Curiosity rover tavaly nyári leszállása óta, ezeket tekintjük át az alábbiakban. Az újfajta landolási módszer tökéletesen vizsgázott, az ereszkedés végén az eddigi legkisebb, 6x19 km-es landolási ellipszist jelölték ki a szakemberek (amelyen belül a rover eléri a felszínt), és a Curiosity ennek a közepétől mindössze 100 m-re szállt le. Mindez azt mutatja, hogy már a közeljövőben tervezhetőek további precíz landolások. A leszállás végén a rakétás fékezés sok törmelékert vert fel, amely a szonda tetején landolt. Feltehetőleg egy nagyobb kődarab az egyik meteorológiai mérőeszközt meg is rongálta. A landolás után készült első képeken sikerült megörökíteni a leszállást végző légidaru tervezett becsapódásától keletkezett porfelhőt.

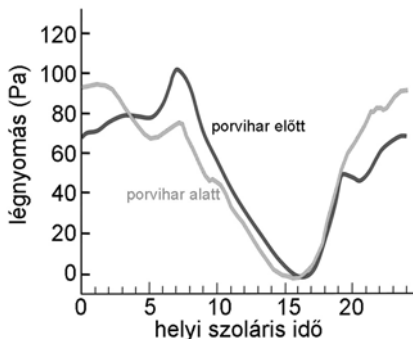


A Golburn Scour nevű, a fékezőhajtómű által létrehozott mélyedés (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

A magasból a roveren kívül az ejtőernyő, a hóvédőpajzs, és összesen 8 db helyzetstabilizáló nehezeék becsapódásnyomát rögzítették, valamint az űrben levált műszaki egység becsapódási helyét is megfigyelték. Utóbbi a leszállás előtt 2 perccel vált külön a még „becsomagolt” rovertól, majd a légkörben két darabra szakadt. A különböző becsapódó testek 3–5 m-es krátereket és belőlük a lapos

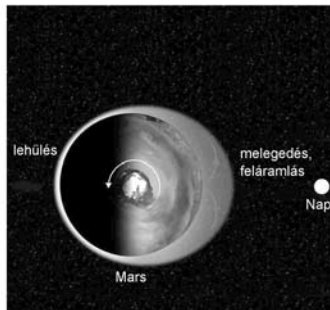
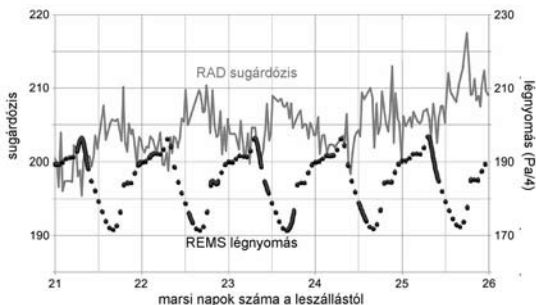


becsapódási szög miatt aszimmetrikusan kiágazó törmelékmintázatokat hoztak létre. A magasból nézve a fékezőrakéta által elfújt por nyoma sötét foltként látszott. Bár az első képek még a homályos, porral teleszórta, de átlátszóra készített objektívsapkákon keresztül készültek, később a sapkák ledobása után látványos táj bontakozott ki: a tájat apró kővek borítják, és jól kivehetők a központi üledékes hegy kőzetrétegei.



A légnyomásváltozás napi menete porvihar előtt és alatt (NASA/JPL-Caltech/CAB(CSIC-INTA)/FMI/Ashima Research)

A meteorológiai műszerek mérései alapján napközben a légkör besugárzás okozta mele-



Összefüggés a légnymomás és a mért felszíni sugárzás között (balra), és a Mars légkörének napi viselkedése (jobbra)

gedéstől erősen tágul, a napi nyomásváltozás kb. 10–12%. A légnymomás napi ciklus szerint ingadozik, nappal a besugárzástól feláramlás jelentkezik, ami nyomáscsökkenést vált ki. A meteorológiai műszerek heves konvektív áramlatokat érzékelnek, néhány alkalommal porördögök jelenlétére utalt a másodperces időskálájú nyomáscsökkenés és szélirányváltozás – azonban a magasból nem látszóttak porördögök. Elképzelhető, hogy a leszállóhely porszegény vidéknek számít a Marson, ezért maradtak „láthatatlanok” a mini forgószeklek. Emellett a Naphoz közeledő bolygón a Curiosity a légnymomás évszakos növekedését is megfigyelte, amit a déli pólussapkáról szublimáló CO<sub>2</sub>-től növekvő légköri gázmennyiségtől származott. A mérési sorozatokban jól kimutathatók a Marson jellemző lejtőszeklek, amelyek nappal „felfelé”, éjszaka „lefelé” fújnak.

Kimutatható, hogy a rover teste mind a szelet, mind a hőmérsékletet érezhetően befolyásolja. A legalacsonyabb mért hőmérséklet a 100. marsi napig terjedő időszakban  $-81 \pm 7$  °C volt, míg a legmelegebb  $+10 \pm 1$  °C körül alakult. A nedvességtartalom-mérések elég zajosak voltak, de a napi ciklus kimutatható bennük, és az értékek mindvégig a telítettségi szint alatt maradtak. Felhők nem mutatkoztak, noha a NavCam megfigyelések a 24. marsi napon néhány keskeny felhősávra utaltak. A landolás helyétől mintegy 1000 km-re regionális porvihar jött létre november 10-től, amelynek hatása a napi légnymósváltozásban érezhető volt.

A légköri gázösszetétel a korábbi mérésekhez hasonlóan mutatkozott: 95,5% szén-dioxid, 2,0% argon, 1,9% nitrogén, 0,06% szén-

monoxid. Metánt nem sikerült eddig kimutatni – koncentrációja 95% valószínűséggel 5 ppb (milliárdod rész) alatti volt a mérés helyén és idején (korábbi mérések alapján a globális átlagot 10–15 ppb-nek becsülték). A légköri gázok izotóparányainak alapján (SAM műszer) a nehéz szénizotóp dúsulása kb. 5%-kal több, mint ami a Mars helyzetéből várható a Naprendszerben. Emellett a deutériumizotópnak erős dúsulása is mutatkozott, ami alátámasztja a feltételezést, hogy a bolygó sok gázt veszített fejlődése során.

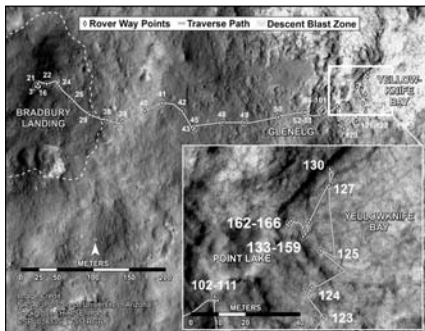


Áramló közegeben lerakódott keresztregéztett üledék a Shaler-feltárasnál. A rétegeket jelölő látványos fekete vonalak valóban így néznek ki a Marson, a Nap által vetett keskeny árnyék miatt (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Először mérhették a töltött részecskesugárzást a Mars felszínén. A RAD detektor már a bolygó felé haladva is üzemelt, és 5–6 koronakitörést észlelt. A Mars felszínén gyengébb sugárzás mérhető, mint az űrben, a ritka légkör a globális mágneses tér hiányában is is szűr keveset. A sugárzás azonban a felszí-

nen sem konstans, de változásainak oka még pontosan nem ismert.

A napi légnyomás- és légsűrűség-változás hatására napközben tágul a légkör, csökken a légnyomás és növekszik a felszíni sugárzás intenzitása. A sugárzás fokozatosan erősödött a küldetés első 30 napjában – a jelenség a nyár felé közelítő évszakos nyomásváltozással kapcsolatos. A RAD műszer a nagyenergiájú protonok és neutronok (>5 MeV) gyakoriságában a légsűrűséggel és a felszíni hőmérséklettel talált korrelációt. Ugyanakkor a neutronokra vadászó DAN műszer kis energiájú neutron (<1 MeV) méréseinél nem mutatható ki korreláció a légnyomással, és a hőmérséklettel is alig. A két műszer eredményei közti különbség magyarázata az, hogy amíg a DAN a felszín alatti viszonyokra érzékenyebb, addig a RAD a légkör hatását mutatja ki jobban. A DAN műszer mérései alapján a felszín alatti nedvességtartalom 0,5 és 2,5 tömegszázalék között volt, és a felső 10 cm szárazabb, mint a mölébben lévő rétegek.



A Curiosity első 166 napos útvonala (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

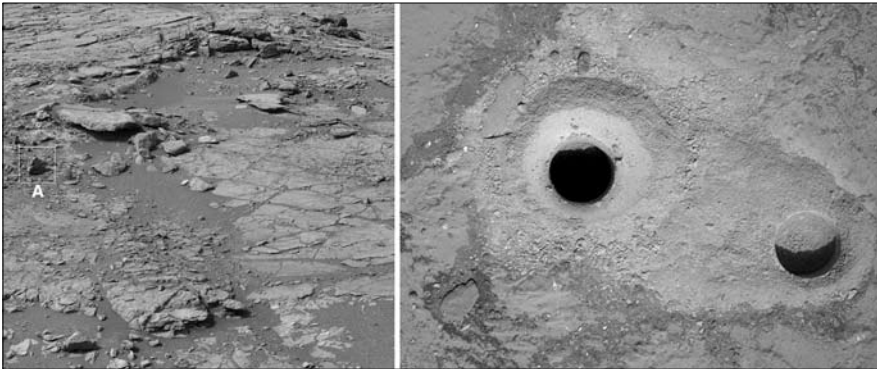
A regolit felső rétege cementált volt, a keményebb anyagba több cm mély gödröket vájtak a fékezórakéták. A leszállóhelyen egymáshoz hasonló, néhány cm méretű, koptatott, de nem kerekített kőzetdarabok találhatóak. Jól szortírozott ez a törmelék, feltehetőleg ősi folyóvízi (a Gale-kráter peremvidékéről eszkezdő Peace Vallis) szállította ide. Ez az első, a Mars felszínén közvetlenül is megfigyelt ún. mederüledék.

A leszállóhelyen konglomerátum kőzetek találhatóak, amelyek koptatott szemcsékből és azokat egymáshoz cementáló anyagból állnak, az erősebben cementált szemcséket az erózió kihangsúlyozta, mintegy „kiemelve” a kőzetből, miközben annak puhább részeit pusztította. Ilyen konglomerátumot a rover későbbi útvonalanál közel 600 m-en keresztül sikerült kimutatni, de nem folyamatosan, hanem csak egy-egy kőzetkibukkanás (Goulburn, Link, Hottah stb.) formájában. Ezek anyagában sík rétegzés jellemző, és a becslés alapján nagyságrendileg 0,1–0,8 m mély és 14–63 cm/s sebességű áramlás szállította őket – ezek azonban még csak közelítő adatok.

A leszállóhelytől távolodva növekszik a finomszemcsés anyag aránya. A regolitban a Rocknest területen főleg 150 µm-nél kisebb szemcsék találhatóak. Milliméternél kisebb sötétebb és világosabb gömböcskék (szferulák) is vannak a területen, némelyik üveges megjelenésű. Ezek vulkáni vagy becsapódásos eredetű szemcsék lehetnek – most sikerült első ízben ilyeneket megfigyelni a Marson. Az Opportunity rover által korábban talált hematitban gazdag konkréciók („afonyák”) másrészt keletkeztek, azok üledékes eredetűek.

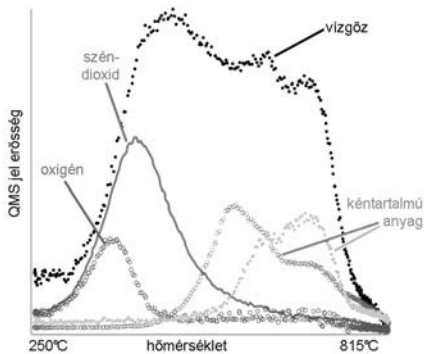
A világos és vörös porban 445 és 750 nm között jelentkező erős reflexió a nanofázisú vas-oxidtól (Fe<sup>3+</sup>) ered. A regolit összetétele a Curiosity, az Opportunity és a Spirit leszállóhelyén nagyon hasonlóan mutatkozik, ami a szél globális átkeverő hatásával magyarázható.

A Curiosity általt megvizsgált egyes sziklák alapján még nem állt össze egységes összkép a leszállóhelyről, de sok információ látott már napvilágot. A Jake Matijevic nevű szikla például feltehetőleg egy dreikanter, azaz éles, sarkos kavics, amelybe a tartós szelek csiszoltak lapokat. Felületét úgynevezett ventifaktok borítják: apró, közel 2 mm-es mélyedések. Ezek inhomogén anyagú kőzetben, az erózió által kivájt puhább szemcsék helyén képződnek. A területen azonban viszonylag kevés a homok, és ma már feltehetőleg nem keletkeznek ventifaktok. A kőzet bazaltos összetétele mellett geokémiailag viszonylag „fejlett”, ami magas alkália tartalmat jelent.



A John Klein névre keresztelt szikla (A betűvel jelölve balra), és két fúrásnyom közelről (jobbra) (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Feltehetőleg a bolygó köpenyének nagyfokú részleges olvadásától keletkezett. Durva szemcsés anyagát főleg piroxén és plagioklász ásványok alkotják.



A fúrás minta hőkezelése során felszabadult anyagok a SAM műszerben (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

A szonda lézerspektrométerével (LIBS) a kőzet anyagát mikrométerenként párologtatják el, ezért kívülről befelé megjelentető összetétel-változás is azonosítató segítségével. Egy-egy pontra átlagosan 30 lövést leadva közel 15  $\mu\text{m}$  behatolási mélység érhető el így. A mérések alapján sikerült megfigyelni, hogy a kőzetek felszíni rétegében sok lerakódott por volt, gazdag Ca, Mg és szegény Fe, Si elemekben, emellett sikerült megfigyelni, hogy a Mn koncentrációja befelé nő. A későbbi lövések alapján mélyebben homogénebb az összetétel, de a mérésekben heterogenitás itt is mutatkozott, ami az egyes ásványszem-

csék közti különbségektől eredt. Az egyes lövéssorok közötti eltérést pedig az okozhatja, hogy azok más-más, nagyobb szemcséket találtak el. A konglomerátumok esetében mindez a szemcsék eredetével kapcsolatos.

Érdekes szikla még a Crest és a Rapitan (Yellowknife Bay area), ahol a kőzetekben világos, hézagkitöltő anyag található, ami hidratált szulfát lehet (gipsz  $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) vagy basanit ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot \text{H}_2\text{O}$ ), és ősi víz cirkulációja nyomán képződhetett.

A Rocknest területen vettek először mintát a SAM műszer számára, amelyben az anyagot 35 °C/perc sebességgel +825 °C-ra hevítették. A melegítés során felszabadult  $\text{H}_2\text{O}$ -ból sok +120 °C alatt távozott, ez feltehetőleg adszorbeált volt, de erősebben kötött formában is előfordult a mintában. Emellett felszabadult még  $\text{CO}_2$  (karbonát ásványokból),  $\text{O}_2$  (talán perklorátból),  $\text{SO}_2$  (feltehetőleg szulfátból). A tipikus vulkáni anyagban emellett deutériumdúsulás is jelentkezett. Szerves összetevőkből három féle is mutatkozott, amelyek klórtartalmú anyagok voltak ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CHCl}_3$ ). Azonosításuk azonban nem felétlenül jelent marsi szerves anyagot, klorometánt ugyanis a műszer földi tisztítására is használtak (noha utána ebből alig maradhatott a kamrában). Ugyanakkor keletkezhetnek más marsi szerves anyagból és perklorát hatására is – ebben az esetben a kísérlet „gyártotta le” azokat. A szerves anyagra vonatkozóan eddig tehát nem sikerült végleges választ kapni: az anyag nem volt a mintában, vagy lebomlott, illetve

átalakult, és valamilyen úton a fenti molekulák maradtak csak meg belőle.

A Yellowknife Bay területen, a vízfolyásnyomok végén, egy esetleges ősi tó térségében a rover 6,4 cm mélyre fúrt a John Klein szikla belsejébe. A kődarab ún. finomszemcsés agyagkő volt, anyagában kb. 20%-ban agyagásványok (fillosziliátok), valamint szulfátok mutatkoztak. Az elemek közül ként, nitrogént, hidrogént, oxigént, foszfort sikerült azonosítani. A talált kalcium-szulfát és agyagásványok együttes jelenléte neutrális vagy enyhén lúgos egykori pH-ra utal. Eszerint az itt előforduló ősi víz nem volt erősen oxidatív, sem savas, sem nagyon sós. A fúrás során egyébként nem vörös, hanem szürkés anyag jött a furatból, tehát a kőzetek belseje néhány milliméter mélységtől befelé nem annyira erősen oxidált, mint a felszíne. A vizsgált kőzet belseje tehát sokkal kevésbé oxidált, mint a marsi felszín, továbbá nagyon eltérő oxidáltságú ásványok fordultak elő benne együttesen – ami elvben potenciális energiaforrás is lehetett volna egykor mikrobák számára, de ez egyelőre csak hipotetikus lehetőség. Egyesek a megszokott „vörös Mars” helyett tréfásan szürke Marsot kezdtek emlegetni, mivel a szürke szín nem sokkal a felszín alatt az egész bolygóra jellemző lehet.

Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy a Curiosity egy jól felismerhető, egykor folyóvíz borította területen landolt. A leszállóhelytől megtett útszakaszon nincsenek folyamatos kőzetkibukkanások, de sok helyen előfordulnak. Főleg konglomerátum, emellett finomszemcsés, kereszttrétegzett anyag fordul elő, néhol csoportos réteggöttegek, valamint finom, ún. laminált rétegek. Mindezek alapján változatos, vizes üledékes környezet volt egykor a területen. A megfigyelések alapján eltérőek a környezeti feltételek a rover útja mentén: a leszállóhelyen az elfújtt por alatt „kavicsos” konglomerátum van, majd távolabb (Jake Matijevic, Akaitcho térségtől) a finomabb szemcsékből felépülő, fodros mintázatú homok mutatkozik. Az egyre finomabb szemcsék előfordulásával együtt a SiO<sub>2</sub> tartalom is módosult, de ebben nem sikerült

egyértelmű tendenciát találni, mindenesetre a leszállóhelyen volt a legváltozatosabb. A kőzetek általános összetétele alapján az SiO<sub>2</sub> arány kb. 40%, de néhol lényegesen magasabb is lehet, és akár kvarc is előfordulhat kisebb arányban. A regolit részben hidratált, tehát kötött nedvességet tartalmaz.

Néhol kereszttrétegzés mutatkozik (a legszebb a Shaler-feltárásnál), emellett szögdiszkordanciák, lágy deformációs alakzatok is előfordultak – amelyek az üledékképződés során bekövetkezett változásokat, illetve az egykor lerakódott anyag képlékeny állapotát jelzik. A kereszttrétegzés oka vagy folyóvízi szállítás, vagy finomszemcsés, gyorsan áramló vulkáni törmelékárból (piroklaszt ár) történő lerakódás lehet. Utóbbi azonban valószínűtlen, mivel egymáshoz közel, egymástól kissé eltérő irányba mutatnak az egykori áramlási nyomok. Ilyen egy szétágazó folyónál lehetséges, egy vulkáni törmelékárnál viszont egyetlen irányba mozog az anyag. Emellett nagyobb vulkáni bombák sem mutatkoztak a térségben, tehát a folyóvízi eredetet elfogadhatjuk.

A küldetés műszaki vonatkozásaival kapcsolatban elmondható, hogy a landolási technika tökéletesen vizsgázott, bár legközelebb érdemes a felverődő szemcsék ellen jobban védekezni. A műszerek jól működtek, az első 100 marsi napon az egyes detektorok az alábbi számú mérést végezték: APXS – 11, ChemCam – 425, LIBS – 14 000 lézertűzés, DAN – 171 (480 000 neutronimpulzus, 58 aktív, 113 passzív megfigyelés), RAD – 14 000 mérés, SAM+GCMS – 4 mérés, SAM+TLS/QMS – 8 mérés, REMS – 2 500 000 másodpercnyi adatrögzítés. A Curiosity már több hónapot haladt a felszínen, de még mindig nem érte el a központi üledékes hegy lábát. Nagy kérdés, hogy ezt követően azonnal elkezdi „megmászni” a hegyet (ha erre lehetőség nyílik), vagy inkább a hegy lábánál oldalra fog mozogni egy ideig. Nukleáris energiaforrása révén a kutatók jogosan remélhetnek hosszú és stabil üzemelést a rovertől.

A cikk megszületését az OTKA PD 105970 projekt támogatta.

*Kereszturi Ákos*