

*Kereszturi Ákos*

**Földtudományi módszerekkel  
a Földön kívüli víz nyomában**

**Az MTA doktora cím megszerzéséért  
készített értekezés tézisei**

Budapest, 2022.

## A kutatási téma előzménye és a kitűzött célok

A dolgozat a Föld bolygótársán, a Marson előforduló/előfordult cseppfolyós víz néhány jellemzőjét elemzi. Földtudományi vizsgálati módszereket használ, ennek megfelelően a földtudományi témakörökhöz áll közel, noha a csillagászat határterületeként is értelmezhető. Célja elsősorban annak elemzése, milyen környezeti és fejlődéstörténeti paraméterekre lehet a víz vizsgálatából következtetni, valamint hogy milyen formában fordulhat elő víz esetleg napjainkban is vörös bolygón.

A Földön kívüli víz elemzése a **nemzetközi kutatások** élvonalában van, a Mars esetében az egykori és mai vizet keresik a kutatók, a jeges égitestek felszíne alatti meghúzódó kiterjedt vízrétegek nyomait is kutatják, a távoli csillagok körül keringő bolygók, az ún. exobolygók esetében a víz megjelenésének kedvező égitesteket keresnek, míg a Föld felszínén talált meteoritokban a születő bolygók belsejében előfordult víztartalom nyomát kutatják. Mindennek oka, hogy a cseppfolyós víz érzékeny környezetjelző, emellett a műszeres technológia fejlődése sok új lehetőséget nyitott meg a témakör behatóbb vizsgálatára az elmúlt időszakban. Az ősi marsi viszonyok, a feltételezett korai nedvesebb klíma rekonstrukciójában kulcsszerepet játszanak a folyóvölgyek és tónyomok, valamint a vizes közegben elhelyezkedő ásványok elemzése.

A jelenlegi száraz marsfelszíni viszonyok között kritikus pont a cseppfolyós víz megjelenési lehetőségének azonosítása, amelyre több űreszköz is „vadászott” az elmúlt időszakban - eddig közel 50 Mars-szondát küldtek külső bolygósomszédunkhoz. Mindezeket túl a Földön kívüli élet lehetőségének kutatása terén is fontos a víz Földön kívüli előfordulása azonosítása, ami a következő űrszondák tervezését és célpontjainak kiválasztását segíti. A dolgozat konkrét **céljai** az egykori marsi folyóvölgyek jellemzőinek jobb megértése és a mai felszíni víz egy speciális, mikroszkopikus skálájú előfordulási lehetőségének elemzése. A bemutatott kutatás téma szerint két nagy csoportra bontható: az egykori víz nyomainak elemzésére (1, 2, 3, 4 tézispontok) és a mai lehetséges vízelőfordulás vizsgálatára (5, 6, 7, 8 tézispontok).

## A kutatás módszerei

A dolgozatban bemutatott kutatási eredmények eléréséhez űrszondás távérzékeléses mérési adatokat használtam fel (Mars Global Surveyor-, Mars Express-, Mars Reconnaissance Orbiter-űrszondák), ezen belül az optikai és a közeli infravörös tartományban rögzített méréseket elemeztem a Mars felszínéről (MOC, HiRISE, CRISM és OMEGA műszerek). Az adatok alapján a felszín morfológiáját és számszerűsíthető jellemzőit vizsgáltam (alak, albedo, környezet és kontextus, távolság, területi gyakoriság), a lézeres mérésekből és sztereóképekből összeállított domborzatmodellek alapján a topográfia jellemzőit tanulmányoztam (magasság, alakzatok mélysége, térfogata), és a kráterek mérete és területi gyakorisága alapján korbecsléseket végeztem. Az infravörös és hiperspektrális mérések színképi sávjai alapján a felszíni jég összetételét, tér és időbeli változásait vizsgáltam térinformatikai és egyéb szoftverekkel (főleg JMARS, Surfer, ArcGIS, ENVI programokkal).

A kapott eredmények alapján a felszín morfológiai kinézetét értelmeztem, a folyóvölgyek keresztmetszvényeit és esésgörbéit hasonlítottam össze, felszíni alakzatok területi előfordulását és gyakoriságát, a víz- és szén-dioxid-jegek előfordulását, infravörös adatokból pedig a nappali és éjszakai hőmérsékletet vizsgáltam. Mindezek mellett a felszínformákat kráttersűrűség-mérések alapján a marsi korszakok jellemzőinek kontextusába helyezve értelmeztem.

## Eredmények, tézispontok

### 1. A Mars Xanthe Terra idős folyóvölgyei eltérő viszonyok között keletkezett alsó és felső szakasz jellegűek

A Mars Xanthe Terra térségében található egykori folyóvölgyeinél több esetben két eltérő szakasz határolható le: egy kis lejtőszögű, keskeny és sekély felső szakasz, valamint egy nagyobb lejtőszögű, szélesebb és mélyebb alsó szakasz, amelyek eltérő klimatikus viszonyok között, esetleg részben eltérő folyamatok révén jöhettek létre. A felső és alsó völgyszakaszok tehát keresztmetszvény-méret és alak, valamint esésgörbe-meredekség alapján morfológiailag elkülönített völgytípusokat alkotnak. A két típus között helyenként éles a váltás, és néhol egy olyan felszín alatti réteg is kibukkan, amelyet a jobban bevágódó alsó szakasz metszett át. A két völgyszakasz eltérő körülmények között, esetleg eltérő időszakban jöhetett létre. Az alsó szakasz meredekebb részein a völgyfal állékonysága csekély lehet, amely ezért gyengén őrzi meg a krátereket, és így nehéz az eltérő keletkezési kort kimutatni a két szakasznál. A két szakasz közötti eltérést a felszíni regolit erodálhatóságának változása okozhatja, amely a felszín alatti krioszféra jellemzőinek változását jelenti: Geológiai időskálán megjelenhet, illetve eltűnhet a felszín alatti, a kőzetek repedéseibe fagyott jég az éghajlatváltozásoknak megfelelően – ez a változás pedig erősen befolyásolja a regolit erodálhatóságát.

Kapcsolódó publikációk:

- Kereszturi Á. 2013. An unnamed fluvial valley system formed under different climates at Xanthe Terra, Mars. *Planetary and Space Science* 85, 220–231.
- Kereszturi Á. 2010. Analysis of two sections of Shalbatana Vallis' tributary channels. *Planetary and Space Science* 58, 2008–2021.

### 2. Az é. sz. 0,4°, k. h. 301,3° koordináta körül levő marsi folyóvölgyek a víz forrásának térbeli koncentrálódását, majd dűnehalmozódás és lejtős tömegmozgás nyomait mutatják a 4,0 milliárd és 5 millió évvel ezelőtti időszak között.

A Marson általában jellemző gyenge felszíni erózió miatt igen idős képződmények is megfigyelhetők, és esetenként széles időskála eseményei tanulmányozhatóak egy-egy területen. Ilyen szempontból kedvező adottságú, de mások által korábban nem tanulmányozott folyóvölgyek hálózata mutatkozik az é. sz. 0,4°, k. h. 301,3° koordináták körüli területen. Ezek morfológiai, morfometriai és kor szerinti elemzése alapján az alábbi fejlődéstörténeti jellegek azonosíthatóak. A legkisebb és nagy sűrűségben megjelenő (SV) völgyek a bolygó fejlődéstörténetének korai időszakában keletkeztek (4,0–3,5 milliárd éve) kiterjedt vízforrás révén. Lényegesen később alakultak ki a nagyobb, de kisebb számban előforduló völgyek (UV és MV jelölés), már egyedi, lokális vízforrások nyomán. Közülük a később kialakult (MV) völgy morfológiája alapján a felszín alatti vízmozgás is valószínűsíthető, közelítőleg 1,5–0,8 milliárd évvel ezelőtt. A dűnék a vizsgált térségben 80-200 millió éve halmazódtak fel, végül a völgyek meredek peremi lejtőin keletkezett törmelék 5–15 millió éve. Mindezek a korbecslések egybevágnak a Mars fejlődéstörténetének jellegzetes adataival, de a fő völgy (MV) aktív időszaka egy olyan periódusban mutatkozik, amikor ritkának várt a folyóvízi aktivitás a Marson.

Kapcsolódó publikáció:

- Kereszturi Á. 2014. Case study of climatic changes in Martian fluvial systems at Xanthe Terra. *Planetary and Space Science* 96, 35–50.

### **3. A Mars Thaumasia Plateau nevű területén a folyóvölgyek és tektonikus alakzatok kapcsolata alapján a folyóvölgyek 3,5-3,7 milliárd évvel ezelőtt keletkeztek.**

A Mars erősen tektonizált, Thaumasia Plateau nevű kiemelkedésén a folyóvölgyek és tektonikus alakzatok kapcsolatát, kölcsönhatását elemeztem. Az itt vizsgált, viszonylag kisméretű folyóvölgyek korbecslése nehéz, mivel kevés kráter jut a területükre, ezért a becslés bizonytalan. A hosszú tektonikus törések azonban segítenek ebben, ha elég sűrűn helyezkednek el, és sztratigráfiai kapcsolatuk megállapítható az ugyanitt mutatkozó folyóvölgyekkel. A tektonikus alakzatokra már statisztikailag releváns mennyiségű kráter jut, amelyek elemzése alapján a Thaumasia Plateau területén a d. sz.  $33^\circ$ , k. h.  $272^\circ$ , és a d. sz.  $37^\circ$  k. h.  $269^\circ$  koordinátáknál található viszonylag kisméretű, eddig nem ismert korú idős folyóvölgyekre első alkalommal sikerült korbecslést végezni. A folyóvölgyek keletkezési kora 3,5-3,7 milliárd év közötti – azaz nem egy igen korai, kb. 4,0 milliárd év körüli nedves időszak során keletkeztek, mint azt régebben feltételezték, hanem közel akkor, amikor sok nagyobb, könnyebben meghatározható korú folyóvölgy.

Kapcsolódó publikáció:

- Kereszturi A., Petrik A. 2020. Age determination for valley networks on Mars using tectonic-fluvial interaction. Planetary and Space Science 180, 104754.

### **4. A Xanthe Terra területén az é. sz. $11,6^\circ$ , k. h. $308,7^\circ$ koordinátánál levő névtelen kráterben egy folyóvölgy elvégződésénél lévő üledékes lerakódás alapján 3,4 milliárd évvel ezelőtt folyóvízes aktivitás mutatkozott, amely egy maximálisan 157 m mély tavat hozott létre.**

A Xanthe Terra területén az é. sz.  $11,6^\circ$ , k. h.  $308,7^\circ$  koordinátánál levő névtelen kráter peremvidékén lévő folyóvölgy elvégződésénél két, feltehetőleg üledékes eredetű anyaglerakódás mutatkozik. Míg a nagyobb méretű és térfogatú alsó egység a felszínét borító, fiatal porréteg miatt nehezen vizsgálható, addig a felső egység kora 3,4 milliárd év. Ennek teteje közel sík, azon az utolsó folyóvízes aktivitás nyomán néhány keskeny sugárirányú folyásnyom mutatkozik, frontális íves pereme pedig a befogadó kráterben egykor létezett, maximálisan 157 m mély tó ősi jelenéteire utal.

Kapcsolódó publikáció:

- Kereszturi A. 2021. Record of environmental changes based on a low latitude Martian crater. Icarus 357, 114296.

### **5. Folyásos kinézetű alakzatok találhatóak a Mars déli cirkumpoláris területén tavasszal megjelenő sötét dűnefoltoknál, amelyek morfológiája megfelel a nedves keletkezés szcenáriónak.**

Sikerült a bolygó jelenlegi éghajlati viszonyai között megjelenő és minden tavasszal fokozatosan növekvő folyásos alakzatokat felfedezni a Mars déli és északi cirkumpoláris területein. Ezek a képződmények a tavasszal zsugorodó pólussapka vízjég borította foltjaiból indulnak ki, és közelítőleg napi 1 méteres átlagsebességgel haladnak. Jellegzetes morfológiájúak: a lejtőkön lefelé kanyarognak, frontális zónájuk a legsötétebb, időként szétágaznak, és a lejtők lábánál „tócsa” kinézetű foltokban halmozódnak fel. Egy-egy ilyen akkumulációs alakzatban több folyásos sáv is végződhet. A felfedezés a tavasszal erősen

besugárzott és gyorsan melegedő cirkumpoláris zónák fontosságára irányította a figyelmet. A jelenséget a felfedezése óta eltelt több mint egy évtizedben is a mai Marson lehetséges cseppfolyós víz nyomaként tartják számon – noha ezt bizonyítani eddig még nem sikerült.

Kapcsolódó publikációk:

- Kereszturi Á., Möhlmann D., Bérczi Sz., Horváth A., Sik A., Szathmáry E. 2011. Possible role of brines in the darkening and flow-like features on the Martian polar dunes based on HiRISE images. *Planetary and Space Science* 59, 1413–1427.
- Kereszturi Á., Möhlmann D., Bérczi Sz., Gánti T., Horváth A., Kuti A., Sik A., Szathmáry E. 2010. Indications of brine related local seepage phenomena on the northern hemisphere of Mars. *A. Icarus* 207, 149–164.
- Möhlmann D., Kereszturi Á. 2010. Viscous liquid film flow on dune slopes of Mars, *Icarus* 207, 654–658.
- Kereszturi A., Möhlmann D., Berczi Sz., Ganti T., Kuti A., Sik A., Horvath A. 2009. Recent rheologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water? *Icarus* 201, 492–503.

## **6. Vízjég alakul ki tavasszal a Mars déli cirkumpoláris vidékének évszakos sapkája területén megjelenő sötét dűnefoltokban.**

Elsőként sikerült azonosítani vízjeget a marsi déli sarkvidék tavasszal visszahúzódó pólussapkájánál megfigyelhető méteres nagyságú foltok területén. Korábban csak nagyobb méretskálájú vízjég-előfordulás volt ismert a cirkumpoláris vidékeken. A kérdéses vízjég vékony réteget alkot tavasszal a felszínen ott, ahonnan a CO<sub>2</sub>-jég már eltávozott. A mérések során az utóbbi jégréteg vastagsága közel 10 cm. A felfedezés az inhomogén H<sub>2</sub>O-előfordulás kialakulására is rámutat: az ún. CO<sub>2</sub> gázkilövellésekből lehulló vízjég-szemcsék felhalmozásával történt. A folyamat az átlagos marsi viszonyok között szokatlanul vastag (azonban így is feltehetőleg 1 mm alatti vastagságú) helyi vízjég réteg megjelenéséhez vezethet. Az ilyen jeges „foltok” jelentősége, hogy az egyébként igen száraz bolygón ritka és sajátos, helyi H<sub>2</sub>O-akkumulációval járnak, emellett talán közreműködnek a folyásos alakzatok kialakításában.

Kapcsolódó publikáció:

- Kereszturi A., Vincendon M., Schmidt F. 2011. Water ice in the dark dune spots of Richardson crater on Mars. *Planetary and Space Science* 59, 26–42.

## **7. A Mars déli cirkumpoláris vidékén tavasszal elegendően magas hőmérséklet van ahhoz, hogy a vízjég borította foltokban mikroszkopikus skálájú cseppfolyós víz jelenjen meg; hasonló helyzet az északi féltekén is feltételezhető.**

Sikerült a színeképi megfigyelések alapján a **déli cirkumpoláris térségben** tavasszal megjelenő foltokban (5. tézispon) azonosított vízjég-előfordulás hőtani méréseivel, valamint modellezés alapján olyan területeket találni, ahol mikroszkopikus skálán cseppfolyós víz jelenhet meg. Ez a közet-jég határfelület mentén fordulhat elő, a nap legmelegebb órájában. A kérdéses, ún. interfaciális vízréteg a rendkívül alacsony hőmérséklet (180 K) ellenére cseppfolyós halmazállapotú, azonban más fizikai jellemzőkkel bír, mint a makroszkópos (tömbfázisú) víz, még a kapilláris víztől is sok szempontból különbözik. A Mars déli sarkkörének zónájában, tavasszal néhány héten keresztül jelenhet meg ilyen mikroszkopikus

folyadék. Ez a területtípus azóta is az egyik legjobb jelölt a cseppfolyós víz mai előfordulási lehetőségére a Marson, és fontos lehet mint a bolygó jelenlegi igen száraz, közel 2 milliárd éve tartó időszakában leggyakrabban előforduló cseppfolyós állapot. Részben azért is jelentős a kutatása, mert extrém jellemzői ellenére elméletileg befolyásolhatja a kémiai átalakulásokat.

Tavasszal a Mars **északi** pólusa körül zsugorodó vízjég pólussapka peremvidékén is megjelenhet a mikroszkopikus skálájú cseppfolyós víz. Távérzékeléses hiperspektrális és hőmérsékleti mérések korrelálásával olyan vidékek azonosíthatók, ahol H<sub>2</sub>O-jég fordul elő CO<sub>2</sub>-jég nélkül, emellett a hőmérséklet valószínűleg felette van az interfaciális víz keletkezési küszöbének – igaz itt a megfigyelések térbeli felbontása rosszabb, mint a déli féltekén. Sikerült jelentős területi különbségeket is kimutatni az északi cirkumpoláris vidéken az ideális előfordulás tekintetében: az é. sz. 40°–55° és a k. h. 300°–330° közötti zónában marsi időben mérve kb. 80–110 napon keresztül valószínűleg megfelelőek a körülmények a mikroszkopikus skálájú cseppfolyós víz napi megjelenésének. A terület kiemelt figyelmet érdemel az esetleg ezzel kapcsolatos mállási vagy kémiai változások kimutatása érdekében.

Kapcsolódó publikációk:

- Kereszturi Á., Rivera-Valentin E.G. 2012. Locations of thin liquid water layers on present-day Mars. *Icarus* 221, 289–295.
- Kereszturi Á., Gobi S. 2014. Possibility of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decomposition in thin liquid films on Mars. *Planetary and Space Science* 103, 153–166.
- Kereszturi Á., Appere T. 2014. Searching for springtime zonal liquid interfacial water on Mars. *Icarus* 238, 66–76.

## **8. Mars-releváns vízáramlási jelleg felfedezése az Atacama-sivatag térségében lévő Ojos del Salado vulkán lejtőjén**

Az Ojos del Salado vulkán lejtőjén, 5200 m-hez közeli tengerszint feletti magasságban betemetett hó- és jégtömegek olvadása révén, áramló folyóvízzel térben csak szakaszosan kitöltött völgyek vannak, amelyekben az egymással össze nem érő nedves szakaszok csak nappal aktívak. Az itt megolvadó hó- és jégtömegeket valószínűleg egy korábbi téli havazás hozza létre, amelyeket a szél szállította finomszemű törmelék hamar betemette, megvédve azokat a szublimációtól az egyébként száraz területen. A felfedezett aktivitás a Mars közepes szélességű területein mutatózó folyásnyomok keletkezésére és a víz forrására jelenthet potenciális földi analógiát (Kereszturi 2020).

Kapcsolódó publikáció:

- Kereszturi Á. 2020. Unique and Potentially Mars-Relevant Flow Regime and Water Sources at a High Andes-Atacama Site. *Astrobiology* 20, 723–740.

## A tézispontokkal kapcsolatos impakt faktoros saját cikkek

1. **Kereszturi Á.**, Möhlmann D., Bérczi Sz., Gánti T., Kuti A., Sik A., Horváth A. 2009. Recent rheologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water? *Icarus* 201, 492–503.
2. **Kereszturi Á.** 2010. Analysis of two sections of Shalbatana Vallis' tributary channels. *Planetary and Space Science* 58, 2008–2021.
3. **Kereszturi Á.**, Möhlmann D., Bérczi Sz., Gánti T., Horváth A., Kuti A., Sik A., Szathmáry E. 2010. Indications of brine related local seepage phenomena on the northern hemisphere of Mars. *A. Icarus* 207, 149–164.
4. Möhlmann D., **Kereszturi A.** 2010. Viscous liquid film flow on dune slopes of Mars, *Icarus* 207, 654–658.
5. **Kereszturi Á.**, Möhlmann D., Bérczi Sz., Horváth A., Sik A., Szathmáry E. 2011. Possible role of brines in the darkening and flow-like features on the Martian polar dunes based on HiRISE images. *Planetary and Space Science* 59, 1413–1427.
6. **Kereszturi Á.**, Vincendon M., Schmidt F. 2011. Water ice in the dark dune spots of Richardson crater on Mars. *Planetary and Space Science* 59, 26–42.
7. **Kereszturi Á.** 2011. Geologic field work on Mars: distance and time issues during surface exploration. *Acta Astronautica* 68, 1686–1701.
8. **Kereszturi Á.** 2012. Crater wall outcrop analysis for targeting subsurface sampling on Mars. *Planetary and Space Science* 67, 14–27.
9. **Kereszturi Á.** 2012. Landing site rationality scaling for subsurface sampling on Mars — Case study for ExoMars Rover-like missions. *Planetary and Space Science* 72, 78–90.
10. **Kereszturi Á.** 2012. Review of wet environment types on Mars with focus on duration and volumetric issues. *Astrobiology* 12(6), 586–600.
11. **Kereszturi Á.**, Rivera-Valentin E.G. 2012. Locations of thin liquid water layers on present-day Mars. *Icarus* 221, 289–295.
12. Marschall M., Dulai S., **Kereszturi Á.** 2012. Migrating and UV screening subsurface zone on Mars as target for the analysis of photosynthetic life and astrobiology. *Planetary and Space Science* 71, 146–153.
13. **Kereszturi Á.** 2013. An unnamed fluvial valley system formed under different climates at Xanthe Terra, Mars. *Planetary and Space Science* 85, 220–231.
14. **Kereszturi Á.** 2013. Paleoflood reconstruction in the Gale crater of Mars. *Astronomische Nachrichten* 334(9), 944–947.
15. **Kereszturi Á.** 2014. Case study of climatic changes in Martian fluvial systems at Xanthe Terra. *Planetary and Space Science* 96, 35–50.
16. **Kereszturi Á.**, Góbi S. 2014. Possibility of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decomposition in thin liquid films on Mars. *Planetary and Space Science* 103, 153–166.
17. **Kereszturi Á.**, Appere T. 2014. Searching for springtime zonal liquid interfacial water on Mars. *Icarus* 238, 66–76.
18. **Kereszturi Á.**, Bradák B., Chatzitheodoridis E., Újvari G. 2016. Indicators and Methods to Understand Past Environments from ExoMars Rover Drills. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 46, 435-454.
19. **Kereszturi Á.**, Rivera-Valentin E. 2016. Possible water lubricated grain movement in the circumpolar region of Mars. *Planetary and Space Science* 125, 130-146.
20. Pál B., **Kereszturi Á.** 2016. Possibility of microscopic liquid water formation at landing sites on Mars and their observational potential. *Icarus* 282, 84–92.
21. **Kereszturi A.**, Petrik A. 2020. Age determination for valley networks on Mars using tectonic-fluvial interaction. *sw Planetary and Space Science* 180, 104754.
22. **Kereszturi A.** 2021. Record of environmental changes based on a low latitude Martian crater. *Icarus* 357, 114296.