

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZ- ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET
GEOFIZIKAI ÉS ŰRTUDOMÁNYI TANSZÉK

A marsi Nirgal Vallis tektonikus fejlődésének vizsgálata

OTDK dolgozat

Készítette:

Szilágyi-Sándor András

Témavezető:

Dr. Székely Balázs

egyetemi docens



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



Új Nemzeti
Kiválóság Program

Készült a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-6 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával.

Budapest

2022

Tartalomjegyzék

1. Absztrakt.....	3
2. Bevezetés.....	4
3. A felhasznált adatok és módszerek.....	5
A sávszelvény-elemzés módszere.....	6
Sztereo párok feldolgozása.....	6
További felhasznált adatok.....	9
4. Areológiai környezet.....	10
5. Eredmények.....	12
Szakaszfelosztás.....	12
6. Az eredmények interpretációja és diszkussziója.....	16
Wrinkle ridge–Nirgal Vallis kapcsolat.....	16
Mellékvölgyek, <i>gully</i> k.....	19
Mikrostruktúrák a Nirgalban.....	24
Az alvízi régió tektonikai bizonyítékai.....	26
Uzboi Vallis.....	26
Luki-kráter.....	26
Holden-kráter.....	28
7. Önálló következtetések.....	30
8. Kitekintés.....	31
9. Irodalomjegyzék.....	32
10. Függelék.....	34

1. Absztrakt

A Mars bolygó egyik legsajátosabb völgye a déli féltekén található, több mint 700 km hosszúságú Nirgal Vallis. A heszperiaiban, azaz nagyjából 3000 – 3700 millió éve keletkezett egykori folyóvölgy területét az idők során számos hatás formálta. Ezen tanulmány egyik célja az, hogy ezeket a hatásokat, feltárja és elkülönítse. Ilyen hatás az erózióbázisául szolgáló Uzboi Vallis vízszintjének változása, a kőzetek lokális tulajdonságai. Másik célja az általunk újonnan feltárt tektonikus folyamatok ismertetése. Mint közismert, a Mars klímája drasztikus változásokon esett át a múltban, a folyékony víz jelenleg nem stabil a felszínen. Az egykori folyóvölgyek formálódása azonban az aktív vizes időszakot követően számos ok miatt tovább folytatódott, jelenleg is zajlik. A tektonikus folyamatok olyannyira átalakították a meder morfológiáját, hogy jelenleg nem tudna lefolyni benne a víz, hanem kis szakaszokra (medencékre) oszlik. A Marsra vonatkozó extraterresztriális okok is befolyással vannak erre, azaz kisebb-nagyobb kráterek keletkezése szintén nyomot hagyott a topográfián.

A mindezek feltárására vonatkozó átfogó vizsgálatok esetén használatos MOLA és THEMIS nem nyújtanak megfelelő adatforrást, ezért a völgy részletes elemzését a HiRISE-felvételek és a HiRISE adatokból származó, e célból elkészített digitális domborzatmodellek felhasználásával végeztem el. A HiRISE DTM-ek lehetővé teszik a felszín néhány deciméteres felbontásban végzett vizsgálatát és kiértékelését.

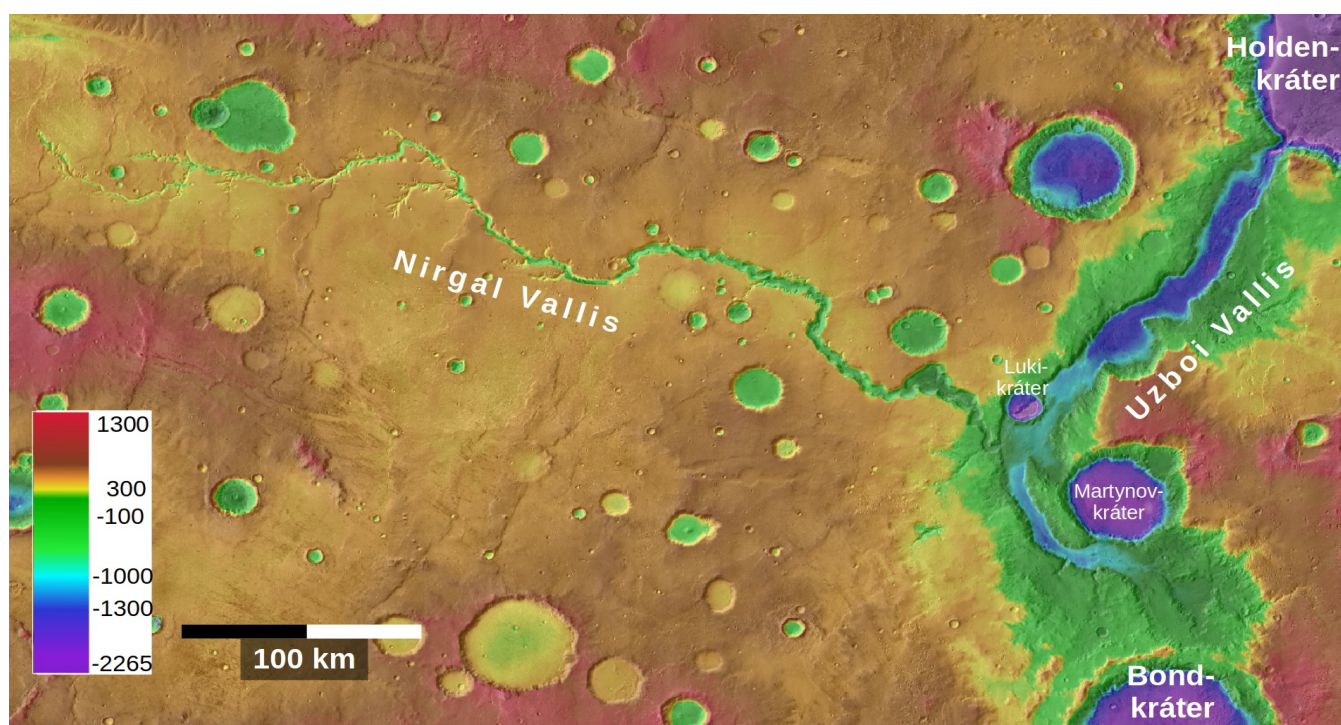
Létrehoztam a Nirgal Vallis tektonikus geomorfológiai struktúrák általi felosztását.

Mindezek mellett számos olyan kis skálájú morfológiai elemet fedeztünk fel, melyek azelőtt a MOLA adatokon nem látszódtak.

Ezen eredmények arra engednek következtetni, hogy a Nirgal Vallis területét jelenleg nem becsülhető, de vélhetően hosszabb ideig tektonikus hatások érték.

2. Bevezetés

A dolgozatom témája a Mars déli féltékén lévő Nirgal Vallis (1. ábra). A több mint 700 km hosszú ősi folyóvölgy átlagos mélysége 200 m, szélessége 2 km. A marsi völgyek félkörívben kezdődő típusának (*amphitheatre-headed valley*) egyike, az erózióbázisául szolgáló Uzboi Vallisra ez a morfológiai jelleg viszont nem jellemző. A 3. ábrán a vizsgált terület méretének érzékeltetése végett Magyarország körvonala látható arányos méretben. A relatív magasságkülönbség a piros színnel jelölt legmagasabb és a lila színnel jelölt legmélyebb területek között kb. 3500 méter. A Nirgal mélysége a torkolat előtt kb. 1200 méter. Vízigyűjtő területe a Kárpát-medencéhez hasonló méretű (a méret érzékeltetése végett lásd a 3. ábrát.). A méretéhez képest sajátos módon nagyon kevés mellékvölgye van. A meglévő mellékvölgyek pedig túlnyomórészt viszonylag rövidek. A forrásvidéki néhány példától eltekintve nem elágazó szerkezetű. Ez a későbbiekben elemzésre kerül. A Nirgal Vallis az Uzboi Vallis legnagyobb bal oldali

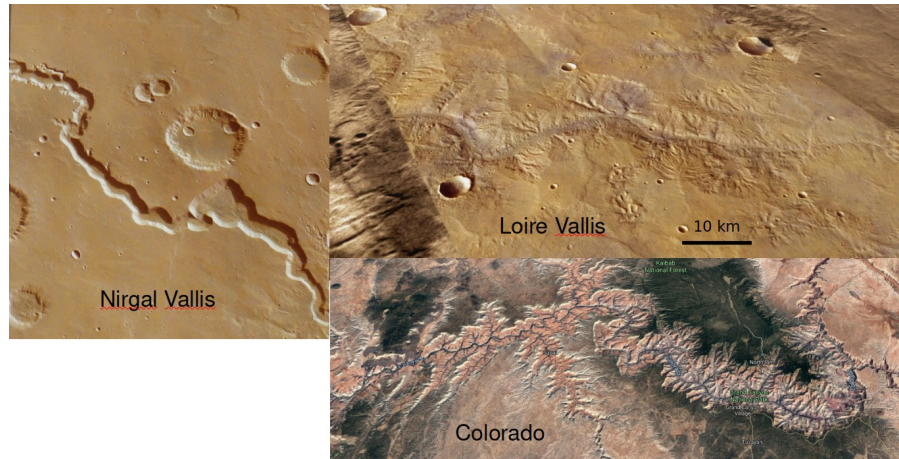


1. ábra: A vizsgált terület: A Nirgal Vallis és az Uzboi Vallis és környezete árnyékolt domborzati modellje (MOLA adatok; lila: legalacsonyabb, piros: legmagasabb terület)

mellékvölgye (egykori mellékfolyója). Az Uzboi Vallis az Argyre-krátertől északi irányba tartó völgyrendszer, az Uzboi–Ladon–Morava-folyórendszer egyik szakasza. A terület domborzati viszonyait megnézve (2. ábra) szembetűnő, hogy a két völgy morfológiája nagyon eltérő. (1. ábra).

Jelen kutatásban azt a kérdést vizsgáltam meg, hogy tektonikus folyamatok mindkét völgy fejlődésében szerepet játszhattak.

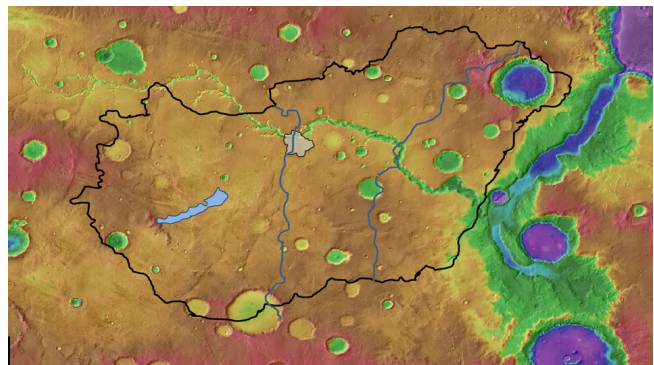
A Mars Global Surveyor (MGS) műszere, a Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) adataiból származó



2. ábra: A Nirgal Vallis összehasonlítása a Loire Vallis (Mars) és a Grand Canyon (Google Earth alapján) távlati képével

domborzatmodell aranystandardnak

tekinthető az areológiában (a Mars bolygó felszínének vizsgálatában). Úgy vélhetnénk, hogy a Nirgal és az Uzboi Vallis mentén húzott magassági hossz-szelvények a földi folyókhoz hasonlóan folyamatos lejtést mutatnak, a kutatás során viszont kiderült, hogy a valóságban nem ez a helyzet. Ennek részletezését lásd később.



3. ábra: A Nirgal Vallis domborzatárnyékolt térképe, összehasonlításul Magyarország körvonala

3. A felhasznált adatok és módszerek

A Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 2006 márciusában érte el a Marsot. 16 éve és 10 hónapja (2023 januárjában) folyamatosan figyeli a bolygót. A pálya apoapsziszt évenként lassan közelítették a bolygóhoz, hogy végül nagyjából kör alakú; 15:00 LTAN-os napszinkron pályáról figyelhesse meg azt. A fedélzetén található a High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) műszer készíti a felszínről mindmáig a legnagyobb felbontású képeket, melyek négy nagyságrenddel jobbak a MOLA-adatoknál. A HiRISE felvételek megfelelően bizonyultak a terület vizsgálatához mind a felbontás, mind a spektrum szempontjából. Hátránya, hogy nincs adat a teljes területről, a képek csak mozaikosan helyezkednek el. Ez azonban kielégítőnek bizonyult jelen a vizsgálatokhoz. A HiRISE adatok felhasználásának módja, hogy ahol rendelkezésre áll, ott van lehetőség a kisebb felbontású adatok

alapján alkotott feltételezéseinket bebizonyítani. Például egy néhány tíz méteres becsapódási kráter a MOLA-n egyáltalán nem látszik, a HiRISE-on viszont kiválóan elemezhető.

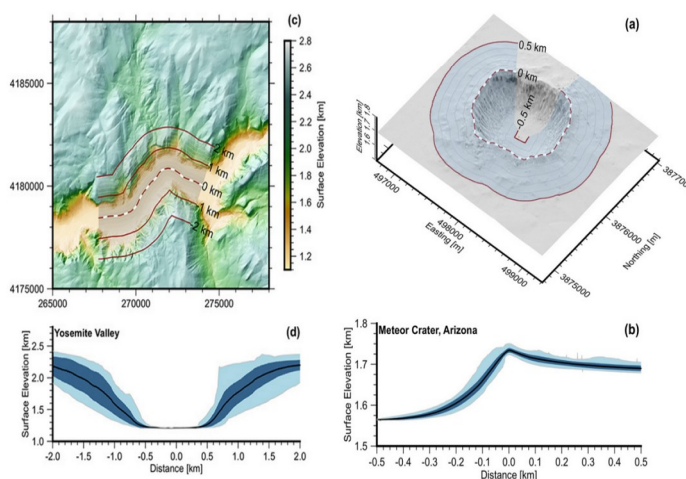
Az adatok feldolgozása több folyamatot is magába foglal, melyek célja, hogy minél részletesebb (a földi megfigyeléséhez hasonló felbontású) eredményeket kapjunk, és a különféle tektonikus és atektonikus folyamatok eredményeit szét tudjuk választani és meg tudjuk határozni, hogy az egyes folyamatok hogyan befolyásolták egymást.

A sávszelvény-elemzés módszere

A nagy felbontású domborzatmodellek alkalmazásának elsődleges célja a MOLA adatokból származó lefolyákszámítások ellenőrzése. Annak megválaszolása, hogy a konkrét morfológiai formák alátámasztják-e a kis felbontáson megjelenő adatokat. A hossz-szelvény nyomvonalából adódó hibák kiküszöbölése érdekében sávszelvény-elemzést végeztem a területre. E módszer lényege, hogy a vizsgált

felszínnek statisztikai szempontból való elemzésére ad lehetőséget a kitűzött sáv egy-egy pontján matematikai értékeket számolva a magassági adatokból (minimum, maximum, átlag magasság, stb). A sáv irányát a kutató határozza meg, a célnak megfelelően a topográfia alapján. A magassági kereszt-szelvényhez hasonlóan tetszőleges 2,5-dimenziós felületre alkalmazható. Alkalmazása statisztikai adatrendszert eredményez. Az alapvonalra eső pontok magassági értékeit a sáv sélénél kezdődően, a magasság

függvényében ábrázoljuk. Ezt az alapvonalra merőlegesen, megadott sűrűséggel lépkedve a következő pontokra is elvégezzük, így alakul ki a sáv-szelvény (lásd 4. ábra). A sáv-szelvény-elemzéshez Telbisz et al. (2013) módszerét alkalmaztam. A létrehozott minimumgörbe, ami jelen esetben a sáv-szelvény-elemzés módszere alkalmazásának egyik célja, így mindenképpen megmutatja a legkisebb értékeket. A Nirgal Vallis sáv-szelvény-elemzésének eredményeit a 11. ábra mutatja be.



4. ábra: Sáv-szelvény készítésének módszere: folyóvölgy és becsapódási kráter sáv-szelvénye Hergarten et al. (2014) alapján

Sztereopárok feldolgozása

Az MRO HiRISE műszere által produkált adatok az Arizona State University (ASU) által kezelt adatbázisban hozzáférhetőek. A vizsgált területre vonatkozó HiRISE adatok innen kerültek letöltésre. A MOLA és a THEMIS adatok a NASA Jet Propulsion Laboratory és a USGS Astrogeology Science

Center által üzemeltetett Planetary Data System (PDS) honlapján érhetőek el. A letöltött képek megfelelő térinformatikai szoftverben (pl. QGIS, ArcGIS) megjeleníthetők. Jelen kutatás céljának eléréséhez azonban ezen (deciméteres felbontású) képek csak az egyik pillérét adják. A másik pillér a digitális domborzatmodellek (DTM) vizsgálata, amiket a HiRISE sztereopárokból állítottam elő.

A sztereopárok egymást részben átfedő felvételek. Alapelve, hogy egyazon területet különböző (nem túl nagy és nem túl kis) szögekből egyszerre nézve észlelhetővé válik a szemlélő irányába eső dimenzió. Így működik az emberi szemek térlátása is. A Mars műholdas megfigyelése esetén a felszínt az űrszonda két átvonulása között változatlanul feltételezhetjük. Az idő túlnyomó részében időjárási jelenségek sem zavaróak. Adott területről egy vagy több pálya megtétele után, más pozícióból készülhet el a második kép. Mindez lehetővé teszi, hogy a területről készült két felvételből mint sztereopárból kinyerjük a magassági adatokat és 3D-s ábra készüljön. A módszer Z magassági dimenziós hibája sok paramétértől függ, megfelelő feldolgozás esetén legfeljebb néhány centiméter.

A HiRISE sztereokép adatok feldolgozásához a NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) v3.0 geodéziai és sztereofotogrammetriai eszközt és a USGS által fejlesztett Integrated Software for Imagers and Spectrometers (ISIS) nyílt forráskódú programcsomagokat használtam. Ehhez Linux környezetre volt szükség.

Az alább bemutatott saját készítésű HiRISE domborzatmodellek feldolgozásának menete¹ a következő:

(X és Y a sztereopár két fájljának neveiben szereplő számokat jelöli.)

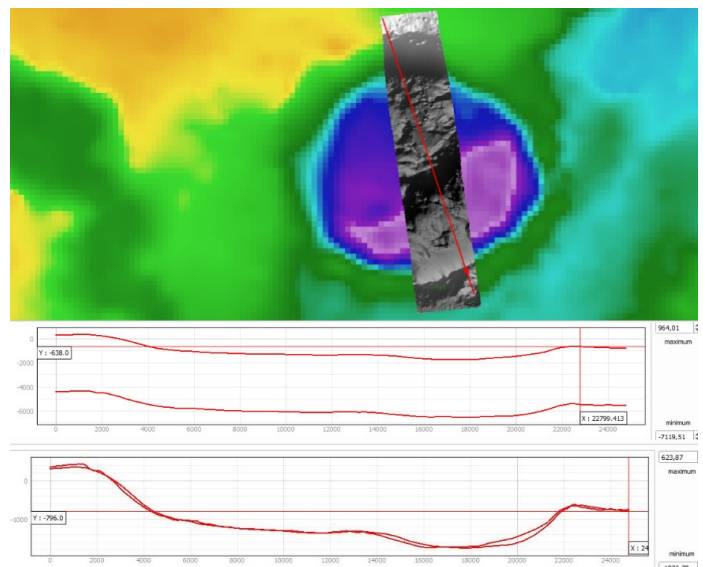
- A megfelelő képpárok (összes EDR Product) letöltése az Arizona State University (ASU) adatbázisából a fent említett programok telepítéskor előre definiált elérési útvonalú és nevű mappába (mars).

- Ebben üres almappa létrehozása (result néven).

- A kívánt paraméterek szerint előre megírt stereo.default fájlt bemásolni a mars mappába. Az EDR fájlok bemásolása a mars mappába. Ezek a

lépések minden képpár elkészítésekor szükségesek. A Linux terminál megnyitását követő lépéseket a 6. ábra mutatja be.

- Az ISIS stereopipeline elindítása, navigálás a megfelelő mappába.



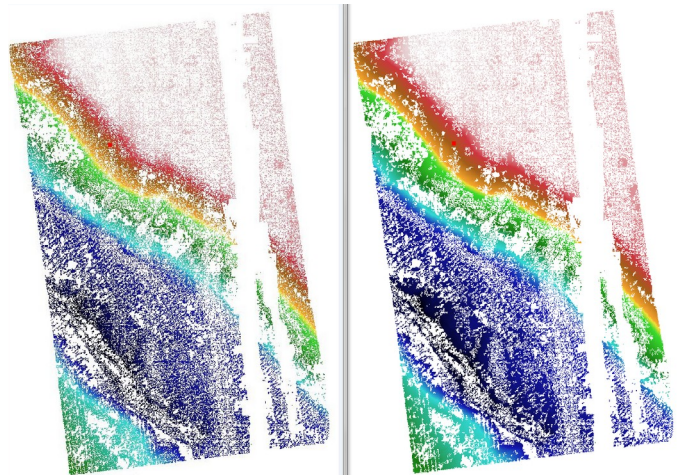
5. ábra: A Luki-kráter kétféle domborzatmodelljének (MOLA, HiRISE) összehasonlítása (felül), és a jelzett nyomvonal mentén szerkesztett magasságszelvény (alul: MOLA: színes, HiRISE: szürkeárnyaltos)

¹ <https://www.youtube.com/@meredithcampbell2638/videos> alapján, jelentős módosításokkal élve

- A letöltött RED fájlok cub fájlkká konvertálása külön a két (X és Y) kép esetében. Ez két új fájl eredményez, melyet az előző lépésben kapott *.cub fájlok ortorektifikációja követ. A folyamat közben létrehozott fájlok a result mappába kerülnek a megadott néven, jelen esetben VALAMI-ként.

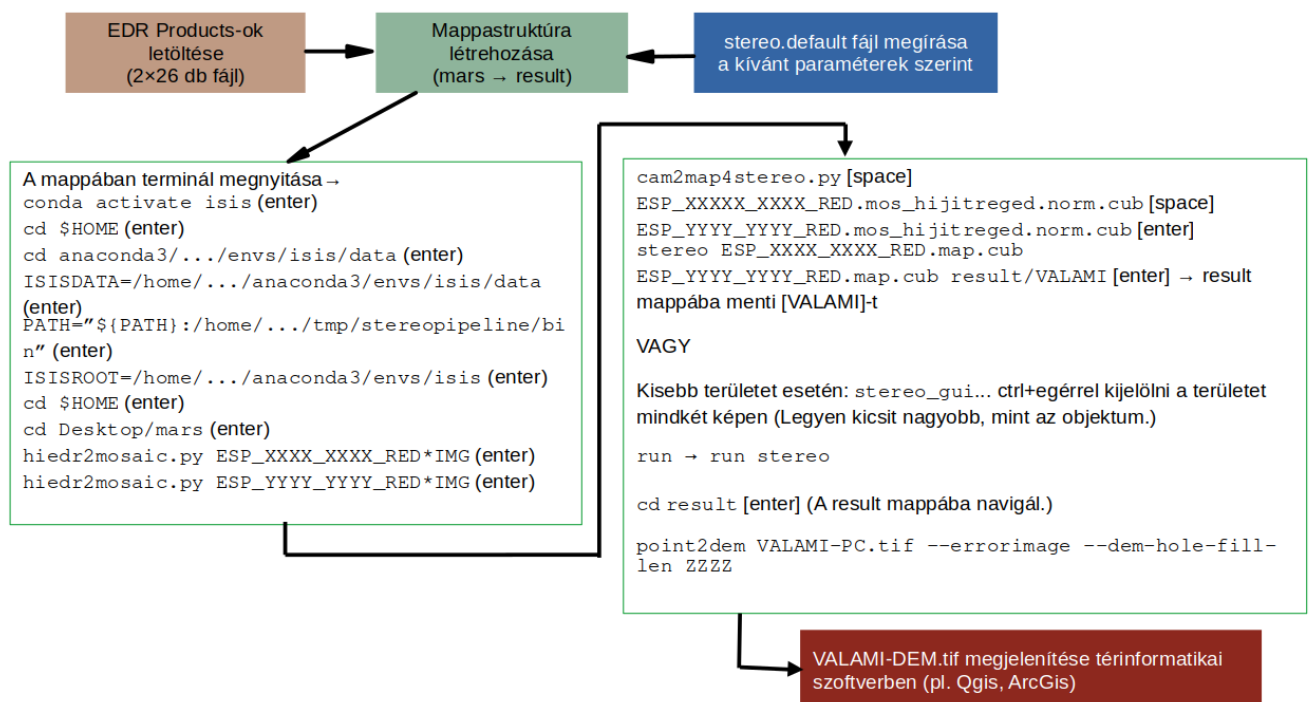
Abban az esetben, ha nem a teljes átfedett terület, hanem csak azon belül egy kisebb terület feldolgozása a cél, a megjelenítőben való kijelöléséhez: *stereo_gui...* ctrl+egérrel kijelölni a területet mindkét képen ráhagyással, majd *run* és *run stereo*. Majd navigálás a result mappába.

- Utolsó lépésként az esetleg jelen lévő érték nélküli képpontok kitöltését szolgáló interpoláció elvégzése, ahol Z a *dem-hole-fill-len* parancs paramétere, pozitív egész szám, (pl. 5000). A 7. ábra egy olyan példát mutat be, ahol a módszer kevés pontot tudott meghatározni, így a kitöltés nélkül az adatok nagy aránya érték nélküli. A feldolgozás végeztével a VALAMI-DEM.tif megjelenítése megfelelő térinformatikai szoftverben (pl. QGIS, ArcGIS). Az elkészült



6. ábra: Példa a *dem-hole-fill* értékének megválasztására. Bal oldal: Z=7, jobb oldal: Z=200. Kirívóan sok nullértékű adatpontot tartalmazó példa a plató és a mederfenék lokális, sajátos geometriája miatt

domborzatmodellek magasságát a MOLA által használt GMM-2B areoid felett értelmezett magassághoz korrigáltam (lásd 5. ábra). Az areoidunduláció nagy értékei miatt a korrekció DTM-enként eltér.



7. ábra: A sztereopárok feldolgozásának menete NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) v3.0 és USGS Integrated Software for Imagers and Spectrometers (ISIS) segítségével

Egy-egy HiRISE domborzatmodell elkészítésének ideje a fent részletezett módon a sztereopárok méretétől és a használt számítógép tulajdonságaitól függ. A vizsgált területre eső és sztereopárként való feldolgozásra alkalmas adatok 2 darab, átlagosan 130 km²-t lefedő, nagyjából 30 cm/pixel felbontású képekből állnak. A teljes felbontású HiRISE képekhez elkészült digitális domborzatmodellek (DTM-ek) felbontása 1 méter körüli. Elkészítésük darabonként 5-8 napot vett igénybe.

A létrehozott HiRISE DEM-eket a MOLA-hoz viszonyítva georeferáltam. A magassági (Z) dimenzió esetén egy kb. 700 méteres eltérés adódott, ami minden HiRISE DEM esetén különbözött. Ezt a helyi areoidundulációval korrigálva megkaptam a valós magassági adatokat.

A kutatás során a fent ismertetett módszerrel a területre vonatkozó összes releváns sztereopár felhasználásra került. Összesen 14 darab HiRISE domborzatmodell készült el. További 5 darab, az ASU adatbázisában elérhető HiRISE domborzatmodell került vizsgálatra, melyek közül egy bizonyult relevánsnak.

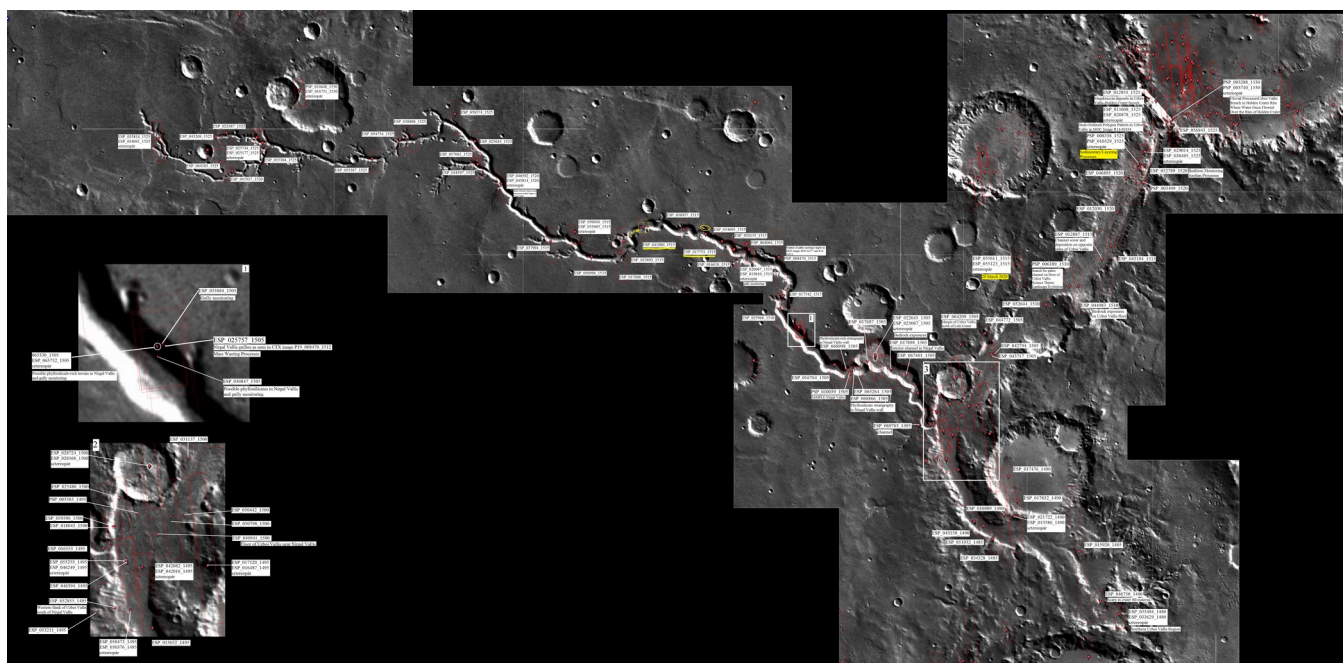
További felhasznált adatok

Ezek mellett 39 darab Merged IRB HiRISE felvétel (infravörös, vörös, kék) és 4 darab HRSC domborzatmodell (ESA Mars Express, 25 m/px) vizsgálata történt meg. Továbbá, mivel ezek mozaikosan helyezkednek el és nem fedik le a teljes vizsgált területet (lásd 9. ábra), az értelmezhetőség végett globális adatokra is szükség volt. Erre a korábbi vizsgálataim során már használt, MGS adataiból származó 463 m effektív felbontású (az egyenlítőn $\frac{1}{128} \frac{fok}{pixel}$) MOLA domborzatmodellt alkalmaztam. Emellett a MOLA areoid (4 pixel/fok) és a Mars Odyssey által készített THEMIS IR Day mosaic (100 m) került felhasználásra. Az elkészített és felhasznált adatok fő tulajdonságait táblázatba foglalva lásd az 1. táblázatban. Az adatok részletes táblázatát az 1. melléklet mutatja. A 8. ábra (táblázat) a vizsgált adatok térképi megjelenítését tartalmazza (részletesebben lásd a 2. mellékletet). Az elkészült HiRISE domborzatmodellek megjelenítése georeferálás után részben átlátszó színskálával és háromszoros magasságtorzítású domborzatárnyékolással történt.

Űrszonda	Eszköz	Adattípus	Felbontás [méter/pixel]	Darab
Mars Reconnaissance Orbiter	HiRISE	DTM & MIRB felvétel	0.3	20 42
Mars Global Surveyor	MOLA	DTM	463	1 (globális)
Mars Odyssey	THEMIS version 12	Nappali infravörös	100	1 (globális)
Mars Express	HRSC	DTM	50 – 125	~8

8. ábra: A felhasznált adatok. A táblázat nem tartalmazza a felhasznált GMM-2B areoidra vonatkozó adatokat.

DTM: Digitális Terepmodell, MIRB: Merged InfraRed és Blue



9. ábra: A Nirgal Vallis és az Uzboi Vallis környékén található HiRISE-képek átnézetes térképe ASU HiRISE térképe alapján

4. Areológiai környezet

A wrinkle ridge nevű morfológiai elemekre (magyarul „fodorhát”, vagy „ráncos gerinc” a megfelelő név) a Mars felszínén több helyen is találunk példát, többek között a Tharsis-fennsíkon (An Yin, 2012). Ezek a képződmények akár 400-800 kilométer hosszú, egymással nagyjából párhuzamos, kb. 150 m magas morfológiai elemek. A planetológiai szakirodalomban ellentmondásokat találunk a kialakulásuk okára. A különböző hipotézisek:

1. Tektonikus eredet (redők és törések) – An Yin (2012)
2. Vulkanikus eredet (lehűlt és megszilárdult láva) – Golombek et al. (2001)
3. Glaciális eredet (nagy jégtartalmat feltételez) – Mangold et al. (1998)

E három közül a tektonikus eredet a legvalószínűbb. A Nirgal Vallis körüli régió (síkság) területén lévő wrinkle ridge-kről nincs említés a szakirodalomban. Ezek mérete (magassága és szélessége), domborzata, csapásiránya és egymástól való távolsága hasonlít a Tharsis-fennsíkon lévőkre.

A Mars bolygón a tektonika szerepének bizonyítása nagyon nehéz, mert több különböző folyamat formálta terület is azonos jellegeket hordozhat. A víz (fagyott formában való) jelenléte mára már közismert. Az sem vitatott, hogy a bolygó történetében volt vagy voltak olyan periódusok, amikor a víz tartósan folyékony állapotban létezett, így formálva a felszínt. De ennek az ideje és időtartama nem ismert. Dohm et al. (2015) szerint a heszperiai kor után a bolygónak további nedves időszakai lehettek, melyek a vulkanizmushoz, legfőképpen a Tharsis szuperfeláramláshoz és a (Nirgal vidékéhez közeli) Tharsis-régió fejlődésének 5 legaktívabb időszakához köthető. Az utolsó ilyen 1–0,5 milliárd évvel ezelőtt ért véget. Ezen időszakokat a vízkörforgás (időjárás) jellemezhetette, számos tó és az északi féltekén nagy kiterjedésű óceán jelenléte valószínűsíthető.

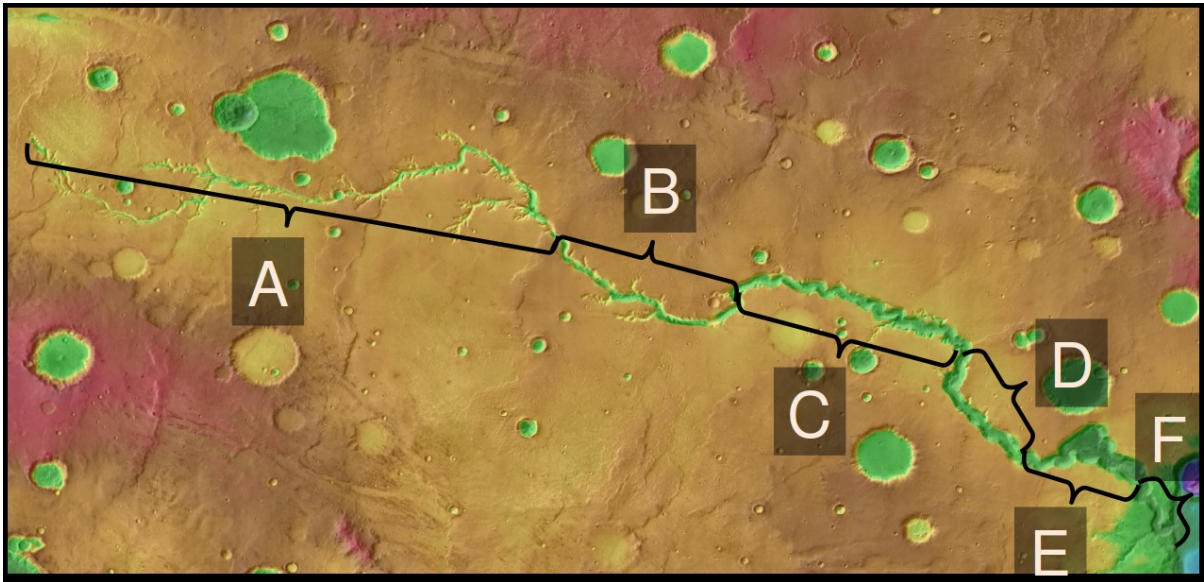
Az Uzboi Vallis-on déli irányból folyt a víz északra, vélhetően az északi óceánba. A folyását elgátolta egy meteorit becsapódása, ami kialakította a Holden-krátert. (lásd 1. ábra) Ez az Uzboi-tó elmélete (Grant et al., 2011). Az Uzboi Vallisban felgyülemlett víz szintjét a völgy két falán azonos magasságig filloszilikátok jelzik, amit Wilson et al. (2018) elemzett CRISM spektroszkópiai adatok alapján. Ez az esemény minden bizonnyal hatással volt a Nirgal Vallis hidrológiájára. És a Nirgal Vallis hordalékkúpjának sajátos, két részből összetevődő alakjára, melyet Grant et al. (2011) vizsgált. A Holden-kráter déli falának átszakadásakor a Holden-kráterbe beáradt a víz, ahol legfeljebb néhány évszázadig volt jelen (Grant et al., 2011).

A Nirgal Vallis mellékvölgyeinek folyékony víz általi kialakításának nyomai a legtöbb esetben a mederben fellelhetőek: A völgy alján másodlagos csatornák utalnak a legutóbbi vízfolyásokra, folyó víz alakította hordalékkúpokat láthatunk néhány mellékvölgy alján. A falakon jószerivel található úgynevezett gullyk – habár kialakulásuk mindmáig vita tárgyát képezi –, minden bizonnyal nem száraz törmelékáthelyeződés eredményeként alakulnak ki. A felsorolt kisméretű struktúrák észleléséhez és megfigyeléséhez nagy felbontású felvételekre van szükség. Ilyen a HiRISE adatrendszer.

5. Eredmények

Szakaszfelosztás

A kutatás elején a Nirgal Vallist szakaszokra osztottam a nagyléptékű morfológia alapján, melyek külön is alkalmasak a vizsgálatra. A 10. ábra a Nirgal Vallis szakaszait mutatja, melyek fő tulajdonságai a következők:



10. ábra: A Nirgal Vallis szakaszfelosztása (magyarázat a szövegben)

A: Mellékvölgyek és dendrites struktúrák gyakoriak

B: Átmeneti szakasz

C: Kanyargós szakasz, dendrites völgyfalakkal

D: Mellékvölgyek alig vannak jelen.

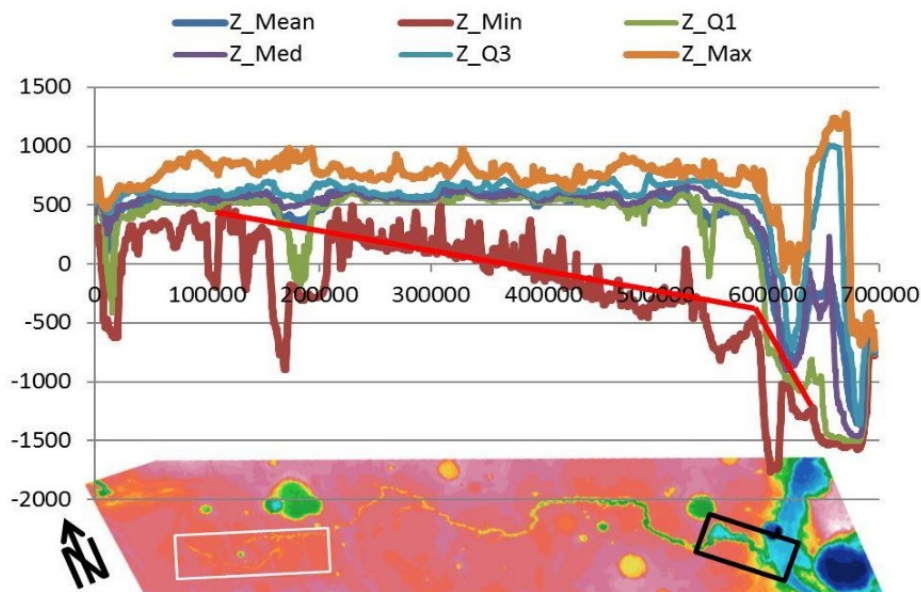
E: Feltételezhetően egy kráter eróziója következtében kialakult szakasz.

F: Az Uzboi Vallis nagymértékű hatása

Megfigyeltem, hogy a környező domborzat és a völgy geometriája alapján a völgy mentén végig valószínű a tektonikus hatás. A megfigyelések alapján a szakaszhatárok definiálását nagyskalájú, feltehetőleg tektonikus eredetű geomorfológiai elemek, a wrinkle ridgek vezérelték. A torkolat vidékén (F szakasz) a völgy olyan morfológiát mutat, ami egyértelműen tektonikus okokra utal. Ezek tisztázása végett fontos a nagy felbontású HiRISE adatok elemzése.

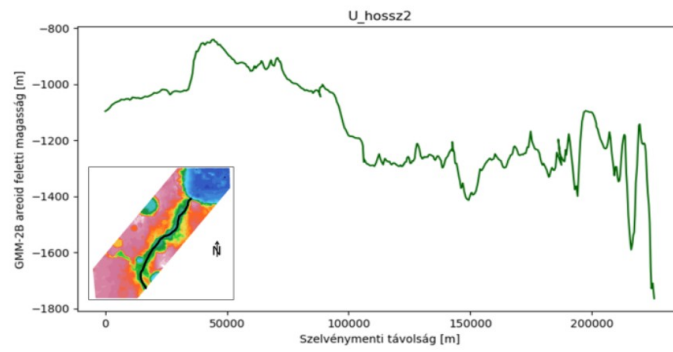
A Nirgal Vallis Uzboi Vallisba érő torkolatát és környékét az 1. ábra mutatja be. Az 12. ábra sávszelvényének első kilométereinek értékei azt a terepszintet mutatják, amelybe a folyó bevágódott. A minimumgörbe első 9 km-én kb. 1400 méter szintkülönbség van, azaz átlagosan 15,6 %-os lejtő. A szelvény 10–50. kilométeréig kb. 400 méternyi emelkedést látunk (1%), amit meredek lejtő követ: 400

m süllyedés kevesebb mint 2 km-en (20%) (11. ábra, fekete keret bal oldal). A 150–200. km közötti nagy különbséget mutató értékek a Nirgaltól északra lévő kráterek és azok északi magasabb pereme miatt jelennek meg.

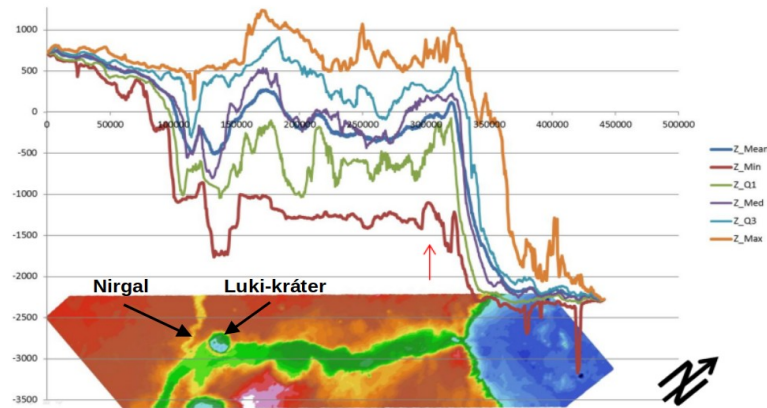


11. ábra: A Nirgal Vallis sávszelvény-elemzésének eredményei. Figyeljük meg a piros színnel jelzett trendvonal törését a torkolathoz közeli szakasznál.

Az Uzboi Vallis hossz-szelvényén (12. ábra) a leginkább kiugró magassági értékek a középső szakaszon találhatóak, amit a Nirgal Vallis hordalékkúpja okoz (lásd 12. ábra sávszelvényén, 40-50 km között), amit Wilson et al. (2018) elemzett részletesen. A hordalékkúp a déli oldalán meredekebb, északi oldalán kisebb lejtőszögű. Az elnyúlt alakja alátámasztja az Uzboi Vallis egykori vizének feltételezett folyási irányát. A Nirgal Vallis területére eső MOLA magassági adatok ettől jelentősen eltérő karakterisztikát mutatnak. Az akár több száz méter magas, a völgyben elhelyezkedő objektumok miatt a lefolyásirány a Nirgalban hosszabb-rövidebb szakaszonként ellentétes irányú a völgy átlagos lejtésével. Az egyik lehetséges magyarázat, hogy a Nirgal Vallis aktív vizes időszaka után utólag, tektonikailag módosult a felszín.



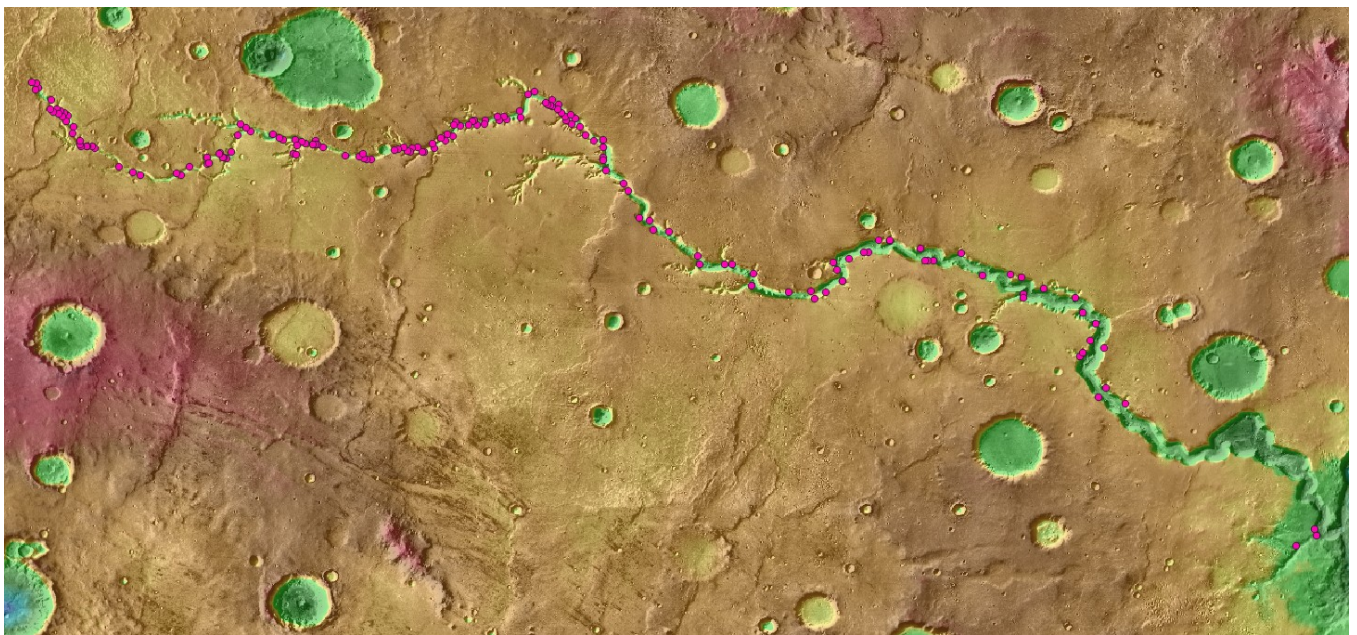
9. ábra Magassági (hossz-) szelvény az Uzboi Vallis vizsgált szakaszáról



12. ábra: Az Uzboi Vallis hossz-szelvénye (fent) és a sávszelvény-elemzés eredményei (lent)

A Nirgal Vallis hordalékkúpja a hossz-szelvényen 40000-50000 m-ig látszik. A sávszelvény esetében az átlagérték mutatja a 12. km környezetében (lásd a méretarányos kivágaton a Nirgal Vallist

A mellékvölgyek részletes elemzésének három oka van. Egyrészt a wrinkle ridgek ellentmondásosságának megértése: a völgy belevág ezen formákba. Ha esetleg tektonika játszik szerepet a folyamatban, akkor az ezzel a módszerrel kimutatható. Másrészt, arra kerestem a választ, hogy miért nem egyenletes a mellékvölgyek eloszlása a völgy mentén hosszirányban és a jobb és bal part esetén? A vizsgálatok során felmértem és elemeztem minden egyes a MOLA modellen azonosítható mellékvölgyet.



13. ábra: A mellékvölgyek talppontjait (lila pontok) bemutató térképen szembeötlő, hogy a mellékvölgyek sűrűsége az egyes szakaszokon változik. A völgy alsó szakaszain a mellékvölgyek száma csökken, bizonyos szakaszokon szinte nem is találunk mellékvölgyet.

6. Az eredmények interpretációja és diszkussziója

Az elkészített HiRISE digitális domborzatmodelleken és a többi felhasznált adaton alkalmazott módszerek alapján a vizsgált terület tektonikai módosulására kettő bizonyíték van. A fodorhátak (winkle ridge) előbukkanása a Nirgal medrében és az alvízi régió (a Nirgal F szakasza és az Uzboi Vallis) morfológiája.

A Nirgal Vallis mentén húzott magassági hossz-szelvények alapján kiderült, hogy a völgy lejtése nem folytonos. A 11. ábra sávszelvényén egyértelműen látszik, hogy a völgy lejtése nem csak nem egyenletes, de időnként még ellenkező irányba is fordul.. Akár több száz méteres magasságkülönbségek is jelen vannak. Ezt három dolog okozhatja: (1) Feldolgozási hiba: A magassági hossz-szelvény nyomvonala nem megfelelően került megválasztásra, tehát nem mindenhol a legalacsonyabb pontokat köti össze. (2) Adathiba: A MOLA 463 m-es felbontása alulmintavételezte a területet. A jelenség nem feldolgozási hibából ered, hanem magából az adatból. (3) A jelenség valós, tehát nincs sem adathiba, sem feldolgozási hiba. Tehát a MOLA alapján a terület jelenleg nem lefolyásos, ennél részletesebb adatokra van szükség, mert a Nirgal Vallis feltehetőleg eredetileg valóban lefolyásos terület lehetett. Grant et al. (2011) szerint a Nirgal Vallis területén a legutóbbi nagy tömegátrendeződése a heszperiai korban, 3-3,7 milliárd éve történt.

A Nirgal Vallist a torkolati vidékén (F szakasz) tektonikus hatás alakította ki. A bevágódás vízszintcsökkenés vagy erózióbázis-csökkenés eredménye, ami a Holden-kráter déli falának áttörésekor bekövetkezett vízszintcsökkenéshez köthető. Ekkor a kráterfal által elgátolt Uzboi-tó vize részben átömlött a Holden-kráterbe, elárasztva azt.

A Nirgal körüli platón megfigyelt fodorhátak véleményem szerint tektonikus eredetűek, kialakulásuk talán a Tharsis-hátsággal áll összefüggésben.

A legfontosabb megállapítás tehát az, hogy a völgyet a víz és a tektonika is formálja.

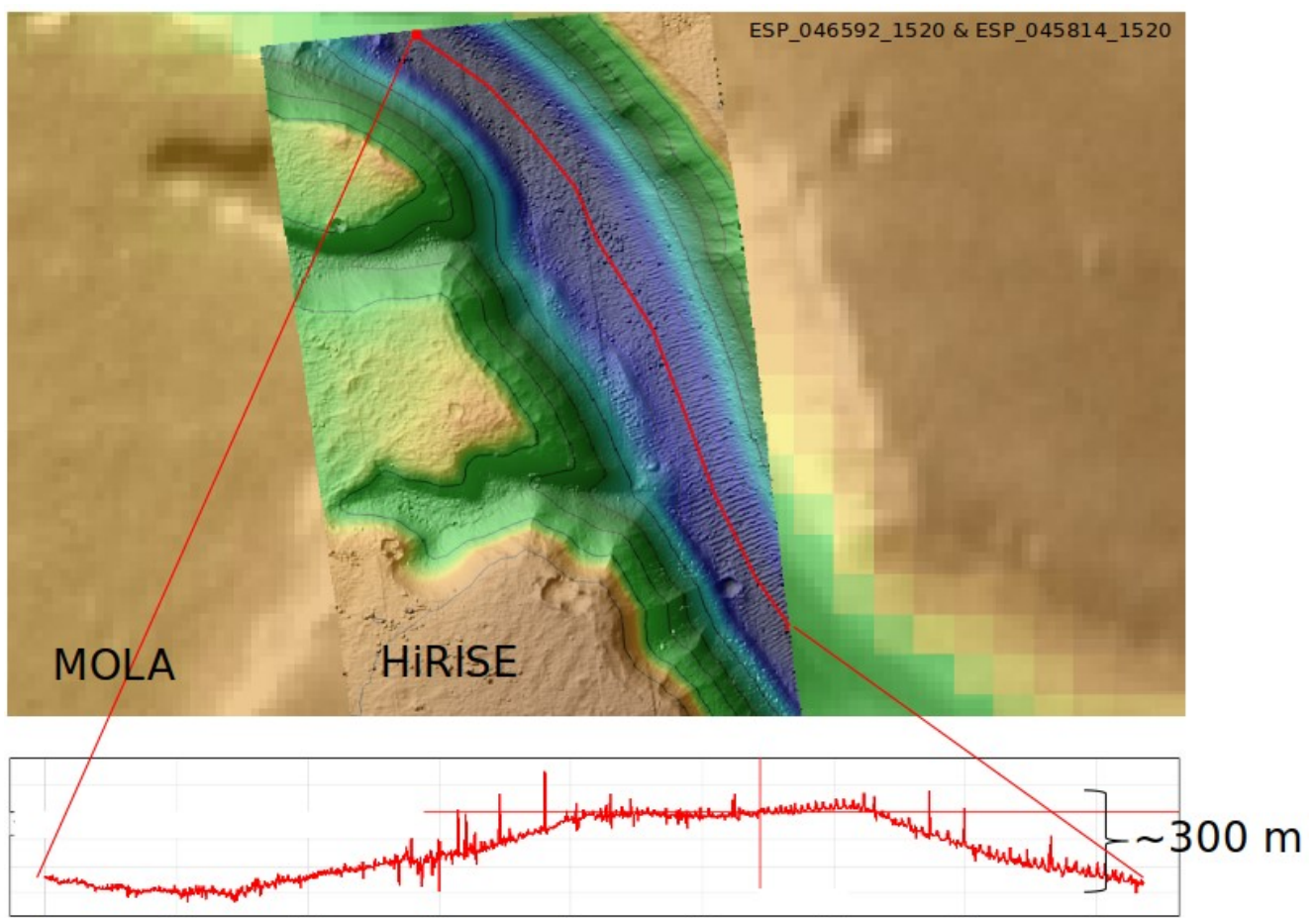
Wrinkle ridge–Nirgal Vallis kapcsolat

Az a plató, amelybe a Nirgal Vallis bevágódott, sík terület, nagyon kis relatív szintkülönbségekkel. Az egyetlen sajátossága a fodorhátak jelenléte. A fodorhátak (winkle ridge) kialakulásának legvalószínűbb módja a tektonika. A Nirgal sávszelvény-elemzésén (11. ábra) ezek nem feltűnőek, mert a módszer jellegéből adódóan a távolabbi, magasabb hegyek felülírják a fodorhátak magassági értékeit.

Az alkalmazott módszerek alapján megállapítottam, hogy a Nirgal egyes szegmensei lefolyástalan területek, melyek a mai domborzat szerint nem tudnának lefolyni minden szegmensben.

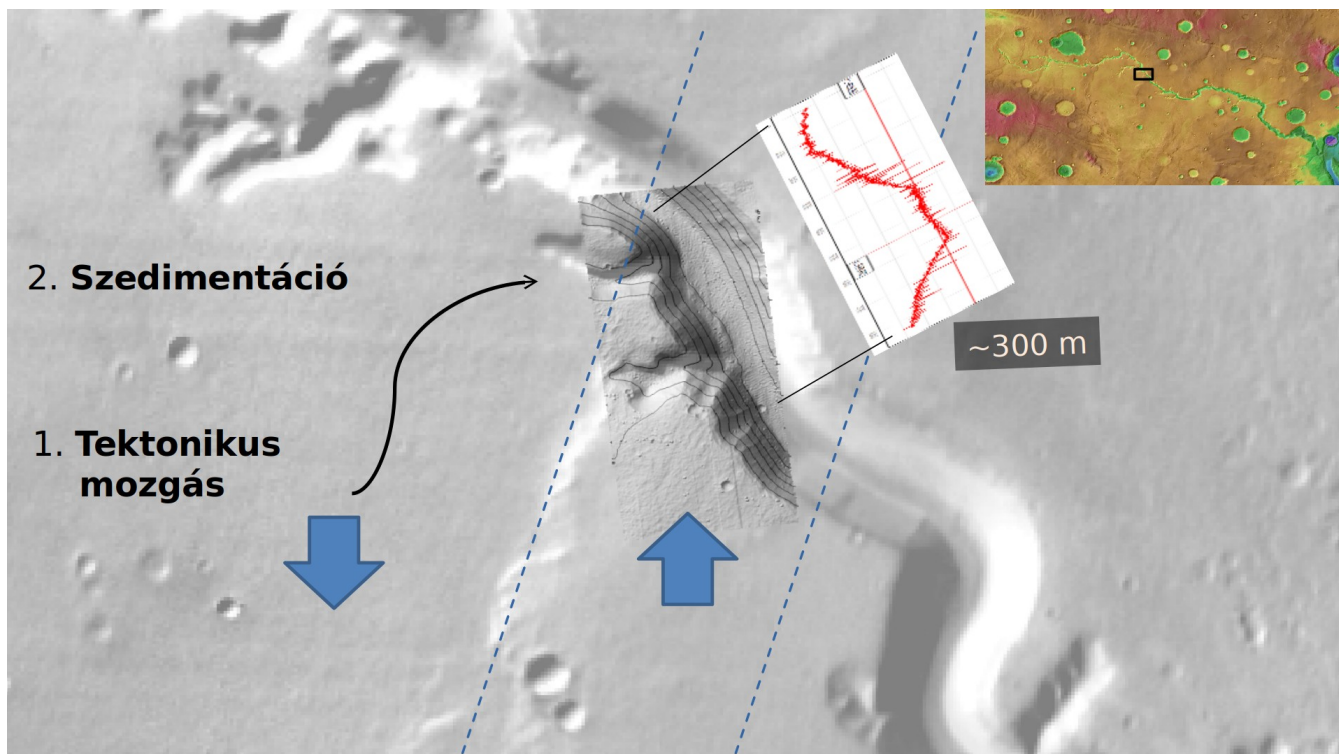
A 14. ábrán bemutatott példa a Nirgal Vallis és az A és B szakasz határán fekvő wrinkle ridge kapcsolatát mutatja be 463 m-es MOLA, 100 m-es THEMIS és 1 m-es HiRISE DEM alapján. A Nirgal Vallis medrében felfedezett völgyi hegyhátak jelenlegi morfológiája valószínűleg két folyamat együttes hatásaként alakultak ki.

A Nirgal Vallis sávszelvény-elemzése minimum görbén (piros görbe a 11. ábrán) megjelenő lokális maximumok egybeesnek a domborzatmodellen látható fodorhátakkal. Az elsődleges folyamat tektonikus eredetű: a Nirgal völgyének kialakulása után a wrinkle ridge-k továbbfejlődtek (utólagos felszínmódosulások), ez pedig a völgy alján is megjelenik, völgyi vízvásztókat létrehozva. Völgyi hegyhátak nem ismeretlenek Magyarországon sem, pl. a Somogyi-dombságban, de azon formák mérete eltér és kialakulásuk időbeli lefolyása is valószínűleg egészen más, bár a tektonikus ok lehet közös.



14. ábra: A Nirgal Vallis egy szakaszának hossz-szelvénye. A szelvényben mintegy 300 méter magas kiemelkedés mutatkozik. A jelen morfológia megakadályozná a lefolyást, ezért a kiemelkedés feltehetőleg utólagos hatásra jött létre.

A wrinkle ridge és a Nirgal Vallis viszonya alapján megállapítható kettejük relatív kora. A Nirgal Vallis sávszelvény-elemzése alapján bizonyos, hogy nem visszafelé (azaz nyugati irányba) történt a lefolyás, hanem az Uzboi Vallis irányába, keletre. A völgyi hegyhátak későbbi módosulás eredményei. A wrinkle ridgek –legalábbis formálódásuk utolsó szakaszai – posztdataálják a Nirgal Vallist. Ebből arra is lehet következtetni, hogy a wrinkle ridgeket kialakító erők a mélyebben hatnak, mint a Nirgal medre, tehát a wrinkle ridgek tektonikus eredetűek.



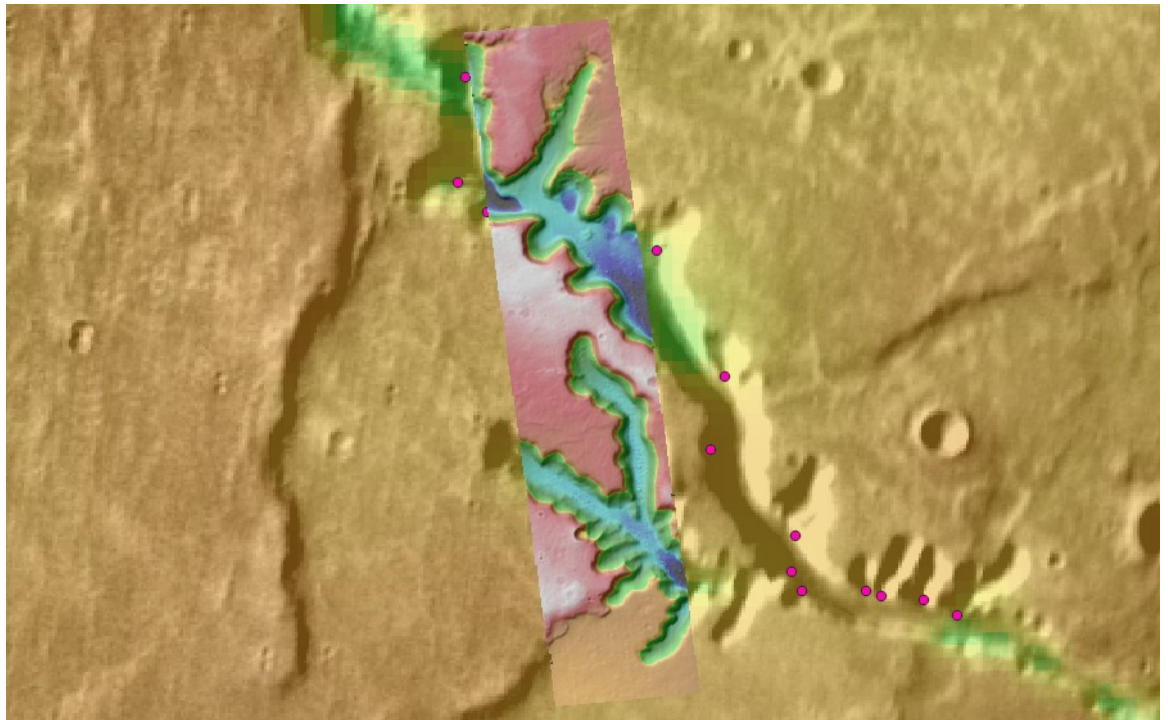
15. ábra: A Nirgal Vallis völgyi hegyhátaik kialakulásának interpretációja. A völgy kialakulását követően a wrinkle ridge-k továbbfejlődtek. Ez a völgy alján is megjelent. A későbbiekben a környező platóról erózió következtében további anyag hordódott be a wrinkle ridge mentén, kis mellékvölgyeket kialakítva. A szedimentáció hatása rátevődik a tektonikus mozgás kiemelkedett térszínre. A piros magassági szelvény a 14. ábrán bemutatott szelvény torzítva.

A Nirgal Vallis völgyi hegyhátaik kialakításában résztvevő másodlagos folyamat a wrinkle ridge mentén felgyülemelő anyag valamilyen tömegtranszport-folyamat általi a Nirgal völgyébe kerülése és ülepedése. Néhány kivételtől eltekintve minden Nirgal–wrinkle ridge találkozás esetén jelen vannak mellékvölgyek a déli (jobb) parton, azonban nincsenek jelen az északi (bal) parton. Ez tehát anyag behordására utal, azonban ezek a völgyek viszonylag rövidek. Ez a folyamat morfológiai megfontolások alapján kevésbé jelentős, és nem minden helyen van jelen (lásd pl. 14. és 21. ábra).

Az Uzboi Vallis lehetséges tektonikus hatása alakította a torkolathoz közeli (F) szakaszt. Véleményem szerint a Luki-kráterben lévő elvetés és a Nirgal torkolatában lévő felső üledékegység egyazon tektonikai elvetés következtében alakult ki. Az Uzboi Vallis pull-apart medenceszerű kinyílása következtében az Uzboi blokkja relatíve alacsonyabbra került a Nirgal blokkjánál, ennek következtében ülepedett le a felső egység. Ez a Nirgal torkolat körüli meredekedését is magyarázná.

A völgy A szakaszán jelen lévő sűrű mellékvölgy-hálózat vélhetően annak a következménye, hogy az A szakasz

működött a Nirgal legjelentősebb betáplálási szakaszaként. Azonban itt olyan mellékvölgy-struktúra van jelen, amelyet a földi folyók ritkán



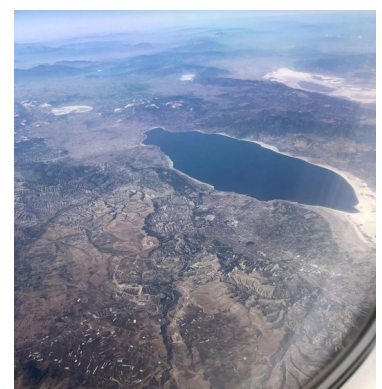
produkálnak. Ennek oka az 16. ábra: A Nirgal Vallis egy szakaszának MOLA és HiRISE domborzatmodellje. A lila pontok a MOLA-modellen kijelölt mellékvölgyek talppontjait jelzik.

lehet, hogy a felszíni vízvásztó nem egyezik meg a felszínalatti vízvásztóval, amit a permafroszt időnkénti felolvadása okozhat.

Mellékvölgyek, gullyk

A mellékvölgyek részletes elemzésének talán legfontosabb eredményeként kijelenthetem, hogy a folyamat nem képez a földi környezetben igen gyakori dendrites völgyhálózatot.

A dendrites vízelvezetési minta a leggyakoribb a geomorfológiában. A fák gyökereinek elágazási mintázatához hasonlít. A Földön homogén, horizontálisan jórészt izotróp anyaggal fedett területeken alakul ki. Ez azt jelenti, hogy a felszín alatti geológia hasonló állékonysággal és időjárással szembeni ellenállással (erodibilitással) rendelkezik, így a mellékfolyók irányát látszólagosan nem befolyásolja. A lefolyási



17. ábra: A törökországi Burdur-régió légifelvételén az árkos erózió jellegzetes példája látható (saját felvétel).

mintázatok hálózatos textúrájuk. Alakjukat és mintázatukat a helyi domborzat és a felszín alatti geológia alakítja.

Abban az esetben, amikor egy felszín teljes térfogata erodálódik, vagyis a badland dendritesedik, a hosszú aktív szakaszon felharapózik, vagyis nem beszélhetünk lavakaszerű erózióról. Ilyen területre számos földi példát lehet hozni, a 11. képen a törökországi Burdur régió látható. Jelen esetben azonban csak egy-egy oldalvölgy alakul ki, inkább lavakaszerű folyamatok sorát látjuk. Például a 15. ábrán a jövőbeni mellékvölgy kialakulásának kezdeti fázisát láthatjuk. Alulról, egyfajta felső kéreg alól indul a folyamat. Véleményem szerint az erózió nem a felszínen, hanem a felszín alatt történik, ezért nem tud kiterjedni és dendritesedni. Véleményem szerint a permafrosztnak van jelentősége ebben. A finom szemcsék könnyebben eltávoznak az erózió következtében. Erre hazai példát is találunk: árkos erózió Somogybabod környékén. Bizonyos helyeken a mellékvölgy komplex morfológiát mutat (hordalékkúpot képez, abba is belevág).

A folyamat időbeli lefolyásáról nem áll rendelkezésre információ. Abszolút kor meghatározás még nem készülhetett, és a legáltalánosabb datálási módszer alapja a krátorsűrűség-számítás (NEUKUM et al., 2001), mivel a földihez hasonló mértékű lemeztektonika hiánya miatt a nagyobb becsapódások kráterei évmilliárdokig megmaradnak. A terület kora a környező kráterek karakterisztikája alapján 4–3,5 milliárd évre van becsülve (ESA, 2019).² A Nirgal völgyének területén két nagyobb becsapódási krátert találunk. Ez egyrészt kevés adatot jelent a krátorszámlálás módszerének alkalmazásához, másrészt arra utal, hogy a folyamatgyűttes nagyon fiatal. Viszont ezen példákat részletesen megvizsgálhatjuk.

A nagyléptékű topográfia alapján előre elkészített szakaszfelosztás megállja a helyét a részletes vizsgálat után is. A korábban bemutatott eredmény (13. ábra) a völgy mentén hosszirányú (longitudinális) különbségek mutatkoznak a mellékvölgyek eloszlása tekintetében, ami mind a jobb, mind a bal part esetében megfigyelhető. A 18. ábra a szomszédos mellékvölgyek közötti távolságot mutatja.

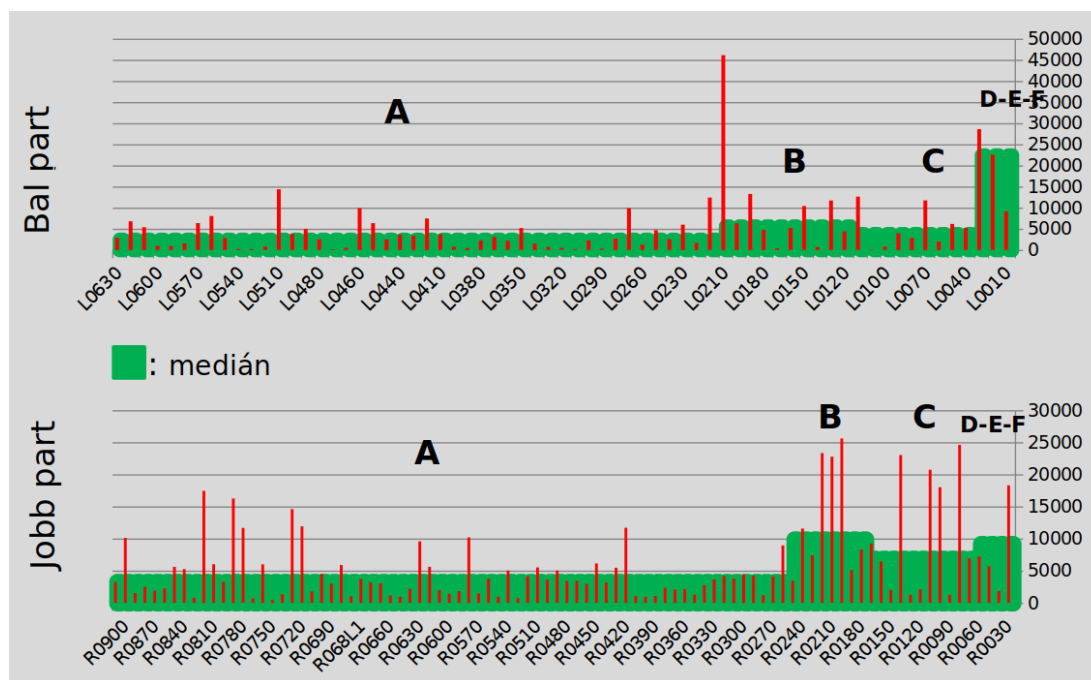
Az egyes szomszédos mellékvölgyek közötti távolság méterben kifejezve. A zöld háttér a távolságok mediánját mutatja az egyes völgyszakaszokra.

A jobb és bal part különböző a mellékvölgyek számának szempontjából. 101 darab mellékvölgyet számoltunk a jobb parton és 60 darabot a bal parton. Ezek torkolatai a 12. ábrán rózsaszínű pontokkal vannak jelölve.

A korábbiakban a wrinkle ridgekhez köthető magasabb térszínekről értekeztem. Ezzel ellentétben az E szakasz a Nirgal Vallis legmélyebb (a környező platóhoz képest –1400 m) és legszélesebb (20 km) szakasza. Lehetséges, hogy ez azt bizonyítja, hogy egy egykori kráter formálódott át a völgy ezen szakaszává. Az E szakasz morfológiája nem hasonlít a felső folyáson (nyugati oldal) megfigyelt, áttört,

²https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/River_relic_spied_by_Mars_Express?fbclid=IwAR3HYBUJvAndVxEI8oIlEa5LTPPlGy9StIhLuF1kHT-saCrIeIzYy0Bqvs

erodált kráterekre. A völgy és a kráter feneké között magassági szelvényt húzva még megfigyelhető a kiemelkedett kráterperem. Ilyen az E szakasz esetében nincs jelen. Ennek oka az itteni, feltételezhetően jóval nagyobb vízhozam erodálóképességével és az általa szállított nagyobb mennyiségű hordalékkal magyarázható.

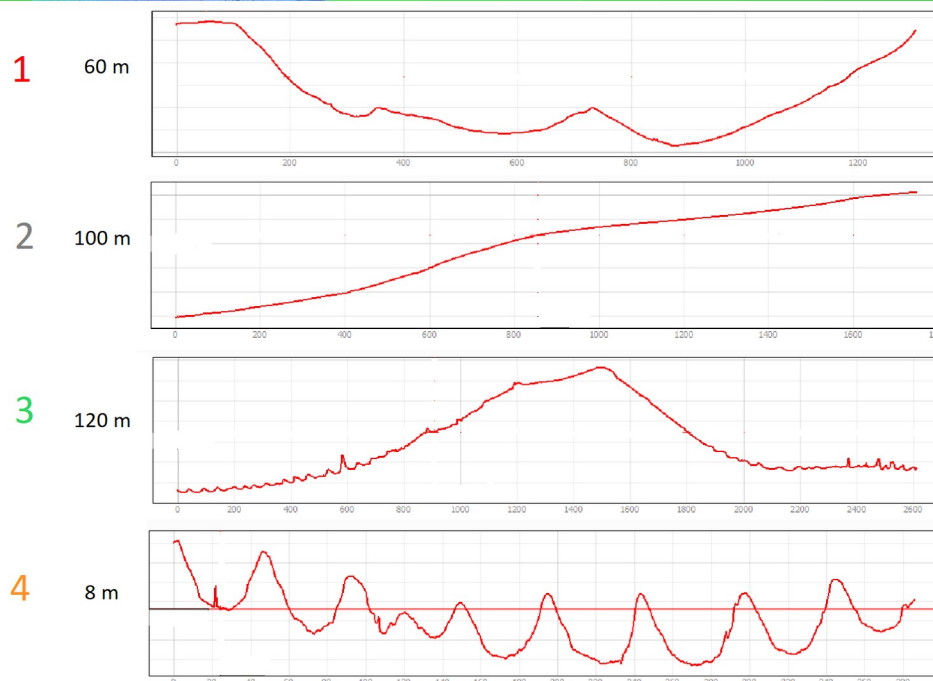
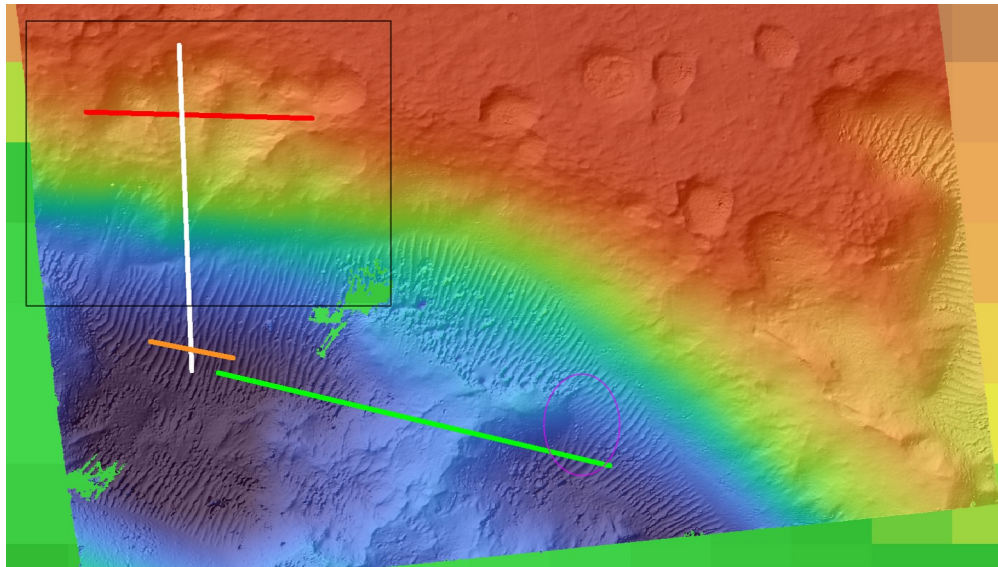


18. ábra: A bal- és jobbparti mellékvölgyek eloszlása és a szakaszfelosztás
A piros vonalak két szomszédos völgy torkolatai közötti távolságot jelzik. A zöld háttér a távolságot mediánja az adott szakaszra.

A 19. ábrán (ESP_033603_1515 ÉS ESP_050930_1515 sztereopárokából készített domborzatmodell) a nyugati oldalon három csuszamlásos perem tűnik fel (1), a völgy hossza a torkolatáig 1200 méter. Ezek



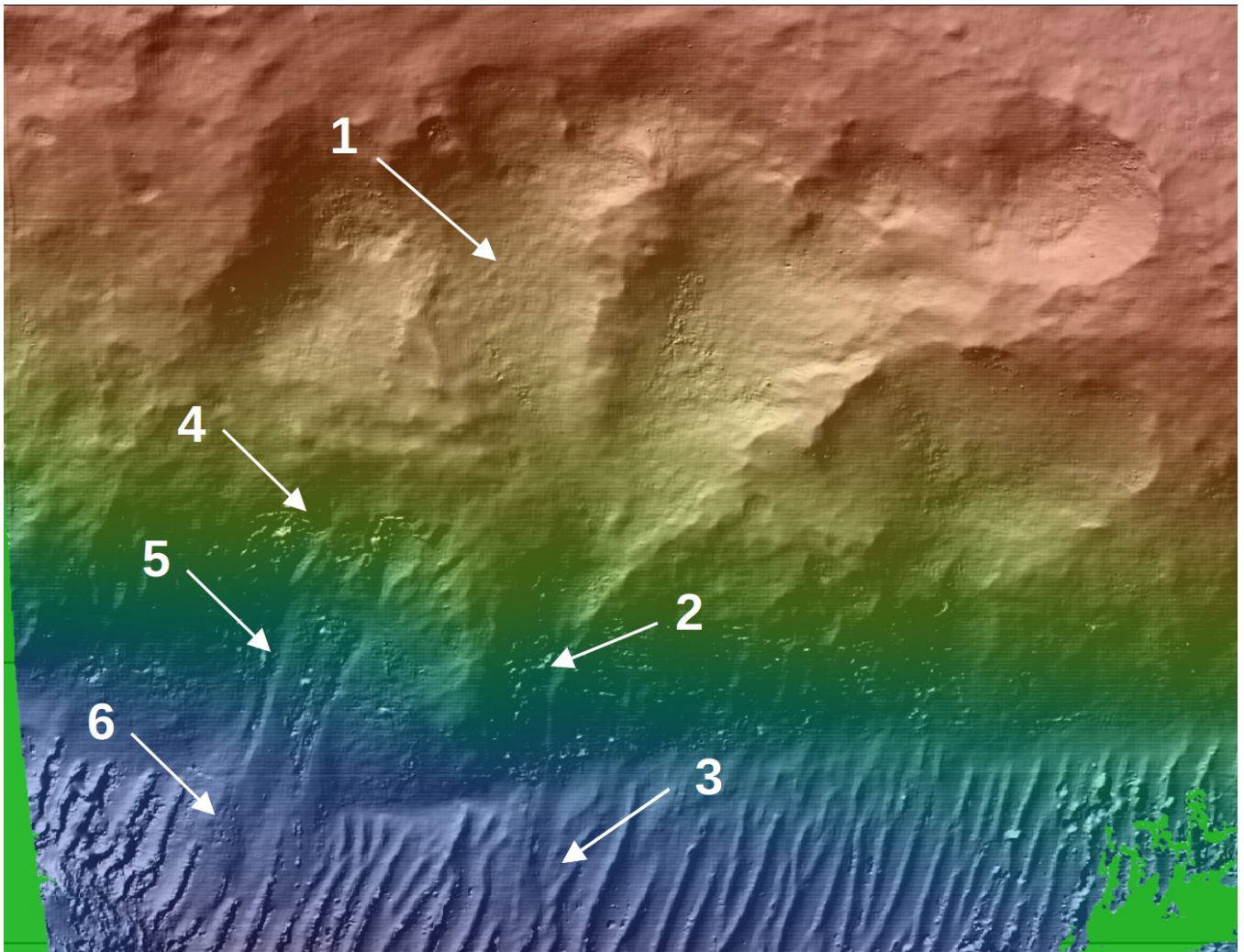
19. ábra: A wrinkle ridge-k potenciális összefüggése a Nirgal Vallis morfológiájával (magyarázat a szövegben)



20. ábra: A Nirgal Vallis völgytalpának egy szakasza HiRISE domborzatmodellen. Fent: a profilok nyomvonala színkódolva, lent: a profilok: 1. forrásfülkék (alcove), 2. völgyoldali szelvény, 3. a völgytalpon jelentkező magaslat (völgyi vízvásztó lenne), 4. homokfodrok
Fekete kerettel a 21. ábra helye van jelölve.

kereszt- és hossz-szelvényeit a 20. ábra 1. és 2. grafikonja mutatja. Az anyag egy elvezető csatornán (2) keresztül jutott a meder aljára, ahol viszont nincs nyoma hordalékkúpoknak (3). Két nagyon fiatal gully van jelen az elvezető csatornától csupán 230 méterre. Ezek hossza körülbelül 680 méter. Forrásfülkékük (alcove, (4)) a völgy falán van, a törmelékletjtő aljáig (apron, (6)) 320 méter szintkülönbséget ívelnek át. Costard et al. (2002) recens gully mozgásokat azonosított a Nirgal területén a Mars Global Surveyor MOC felvételei alapján, melyeket a felszínközei jég helyi megolvadásának tulajdonítottak. Ezt az

álláspontot a HiRISE adatok saját elemzése alapján alá tudom támasztani. Mindkét gully belevág (5) a saját maga által lerakott hordalékkúpba (apron). Bizonyos helyeken a mellékvölgy komplex morfológiát mutat (hordalékkúpot képez, abba is belevág)



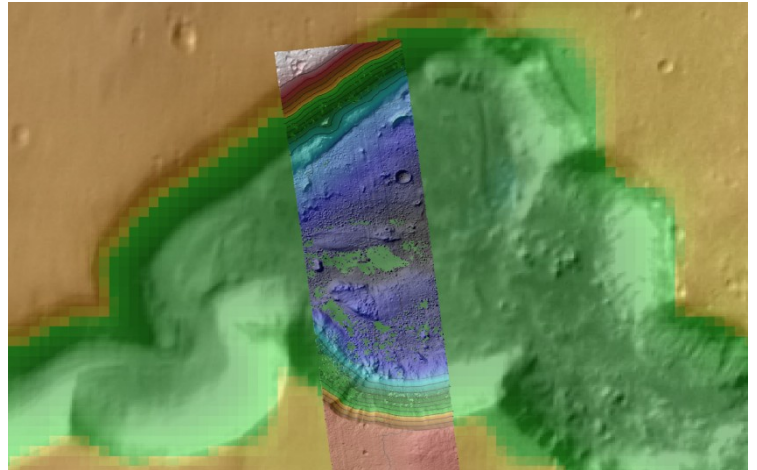
21. ábra: Sajátos formájú mellékvölgyek HiRISE domborzatmodellen (magyarázat a szövegben)

A 18. ábrán délkeletre, a meder fenekén egy 120 méter magasságú domb látszik. Ez kialakulása vagy utólagos folyamatként akkumulálódással történt, vagy szelektív denudáció eredményeként keletkezett. Ez utóbbi esetén maradványgerincről beszélünk. A meder alsó, sík részét homokfodrok (ripple mark-ok) borítják. Ilyenek az említett dombon nem tudtak kialakulni az elegendően vízszintes terület hiánya és feltehetőleg anyaghiány miatt. Ennek szélén, ahogy ott is, ahol a völgy oldala meredekké válik, a homokfodrok elvégeződnek. Helyzetük a szél irányát mutatja. A homokfodrok diffrakciója látszik a domb keleti oldalán. Az északnyugati szél a maradványgerincen lebukva irányváltoztatásra kényszerül, ahol kinyílik a völgy.

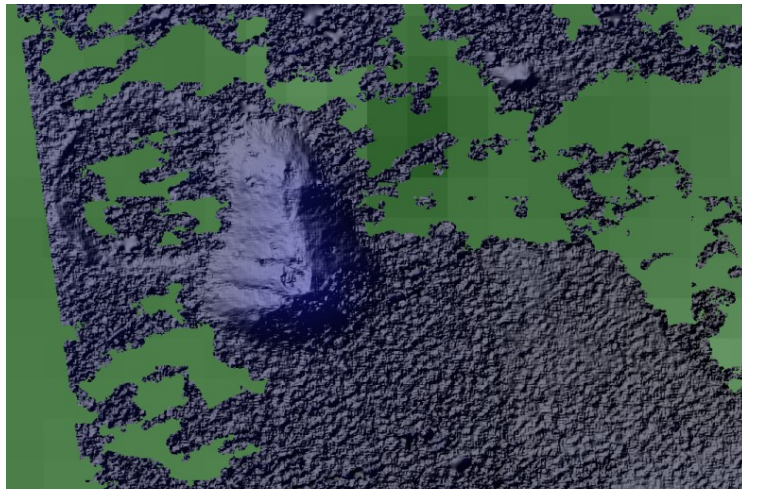
Az időbeliségről semmit nem tudunk (kráterszámlálás), 2 helyen van ilyen. Nagyon fiatal folyamatgyűttes.

Mikrostruktúrák a Nirgalban

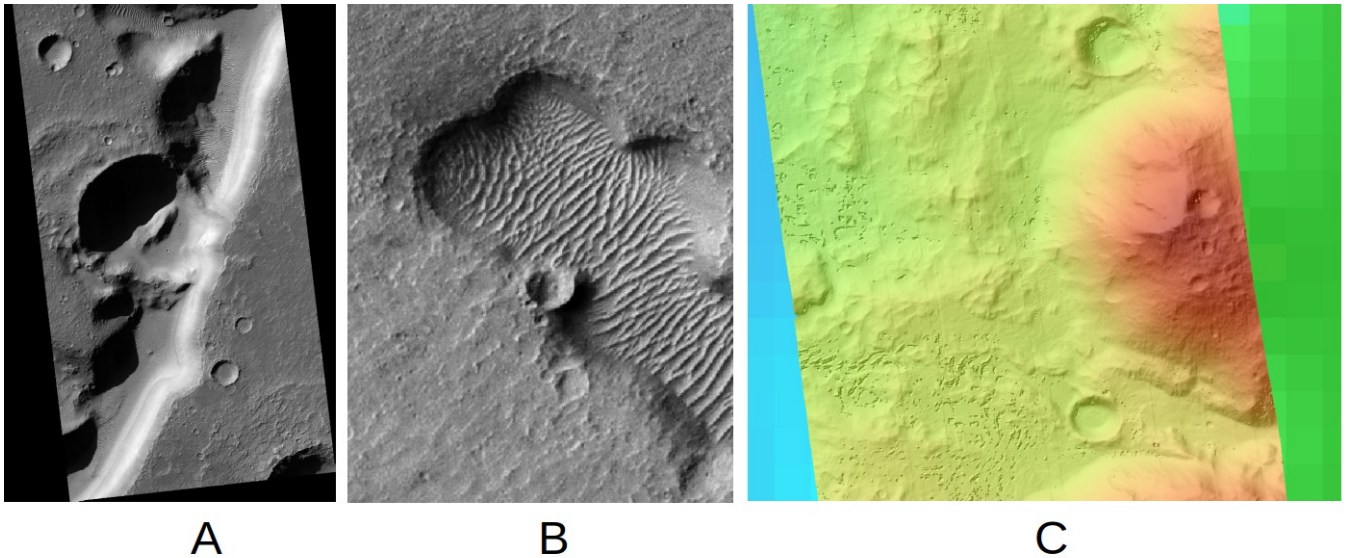
A 22. ábra az E szakasz HiRISE sztereopárokából készített domborzatmodelljét mutatja. Ennek alján több egymáshoz hasonló, kúpszerű geomorfológiai elem tűnik fel. Magasságuk 40-60 méter közötti, alapjuk kör alakú. A legtöbb csúcsán központi medence van, ami szintén kör alakú, mélysége néhány méter. A példaként az 18. ábrán bemutatott kúp magassága 58 méter, a központi medence mélysége 8 méter. Eredete igencsak kérdéses. Az egyik elmélet szerint a Nirgal medrébe meteorit csapódott be, aminek energiája kúp alakban ellenállóbbá tette az alatta lévő kőzeteket. A Nirgal nedves fázisában tovább zajlott az erózió, így a kráter körbeerodálódott (feltehetően a víz körülfolylta), a megfigyelhető kúp alakú becsapódási tanúhegyet létrehozva. Hasonló erodálódott krátereket látunk az A szakaszban (24. A, B ábra) és a Martynov-kráter északi falán is (24. C ábra). Egy másik lehetőség, hogy a Földön is megfigyelhető pingó. Ez azonban azt jelentené, hogy lokálisan nagyon nagy a vízjég-tartalom. Bár a jelenlegi ismereteink szerint a Nirgal szélességén elenyésző a felszínközeli jégtartalom, (a gullyk működése máig nem tisztázott), az a tény, hogy egy ősi folyó torkolatvidékén lévő 2 km mély medencében találhatóak, növeli az esélyét. A harmadik lehetőség, hogy a megfigyelt kúpok salakkúpok (scoria cone). A bolygó más területein találhatóak salakkúpok, melyek karakterisztikája (Vörös & Székely, 2022) hasonlít a Nirgal medrén megfigyeltekkel. A kúp alakú mikrostruktúrák tehát vagy eleve a mederfenéken képződtek „betakaródva”, majd a folyóvíz kipreparálta, kitakarta őket, vagy utólag jöttek létre.



22. ábra: A Nirgal Vallis elemzett szakaszának HiRISE modellje (vö. következő ábrával)



23. ábra: Érdekes alakú kiemelkedés a völgytalpon (magyarázat a szövegben)



24. ábra: A völgytalp utólagos hatás következtében létrejött módosulásai. A: a Nirgal Vallis A szakaszán, B: Nirgal Vallis F szakasz, C: Martynov-kráter északi kráterperemének külső oldala

Az E szakaszon figyelhetők meg a Nirgal leghosszabb másodlagos csatornáit. Ezek relatíve nagyon fiatal jelenségek, de abszolút koruk megadása nagy nehézségekbe ütközik, mert a kráterszámlálás módszere ilyen kis objektumok esetén nem alkalmazható.

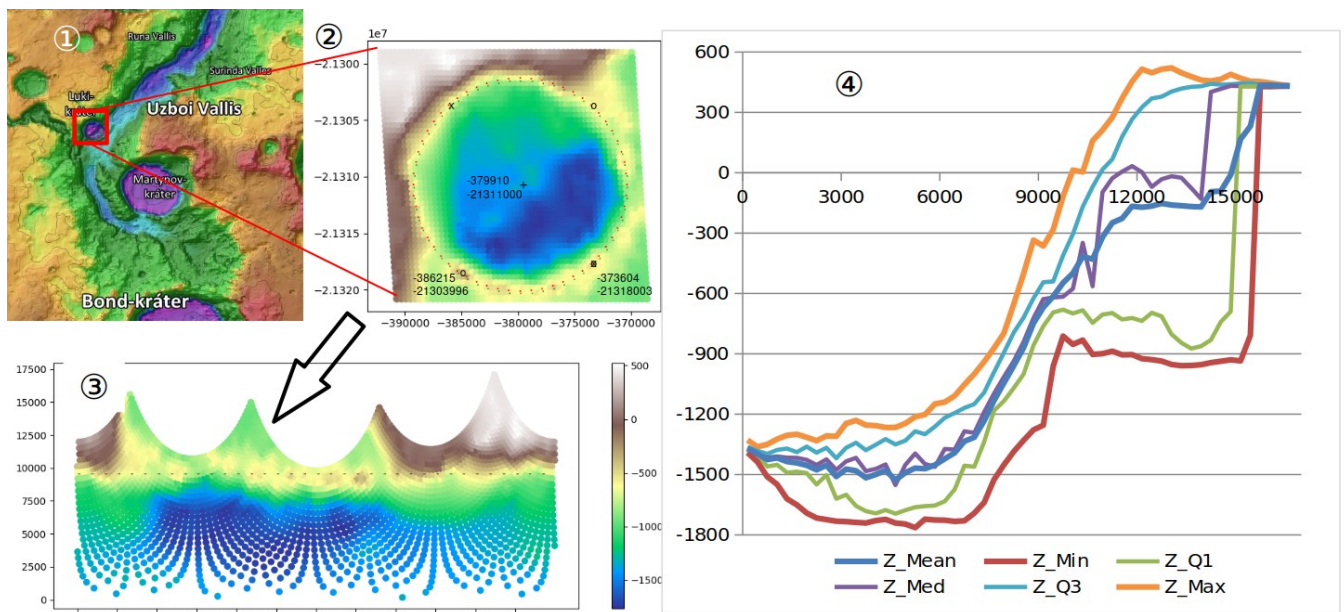
Az alvízi régió tektonikai bizonyítékai

Uzboi Vallis

Sok jel utal arra, hogy az Uzboi Vallis térnövekedéssel kialakult szerkezet. Az aktív vizes időszakai, beleértve az Argyre-kráter kialakító becsapódás energiája által megolvadt jég Uzboi-Ladon-Morava-folyórendszeren keresztüli északra történő lefolyásának hipotézisét (DOHM et al., 2015) és a Holden-kráter kialakulása utáni Uzboi-tavat (GRANT et al. 2011), valószínűleg posztdatálják a pull-apart medence kialakulását. A Nirgal Vallis kialakulása, vagyis egy aktív vizes időszak után és a Luki-kráter kialakulása után további tektonikusnak látszó mozgások történtek. Erre utal a Nirgal Vallis hordalékkúpjának alakja és a Luki-kráterben található elvetés.

Luki-kráter

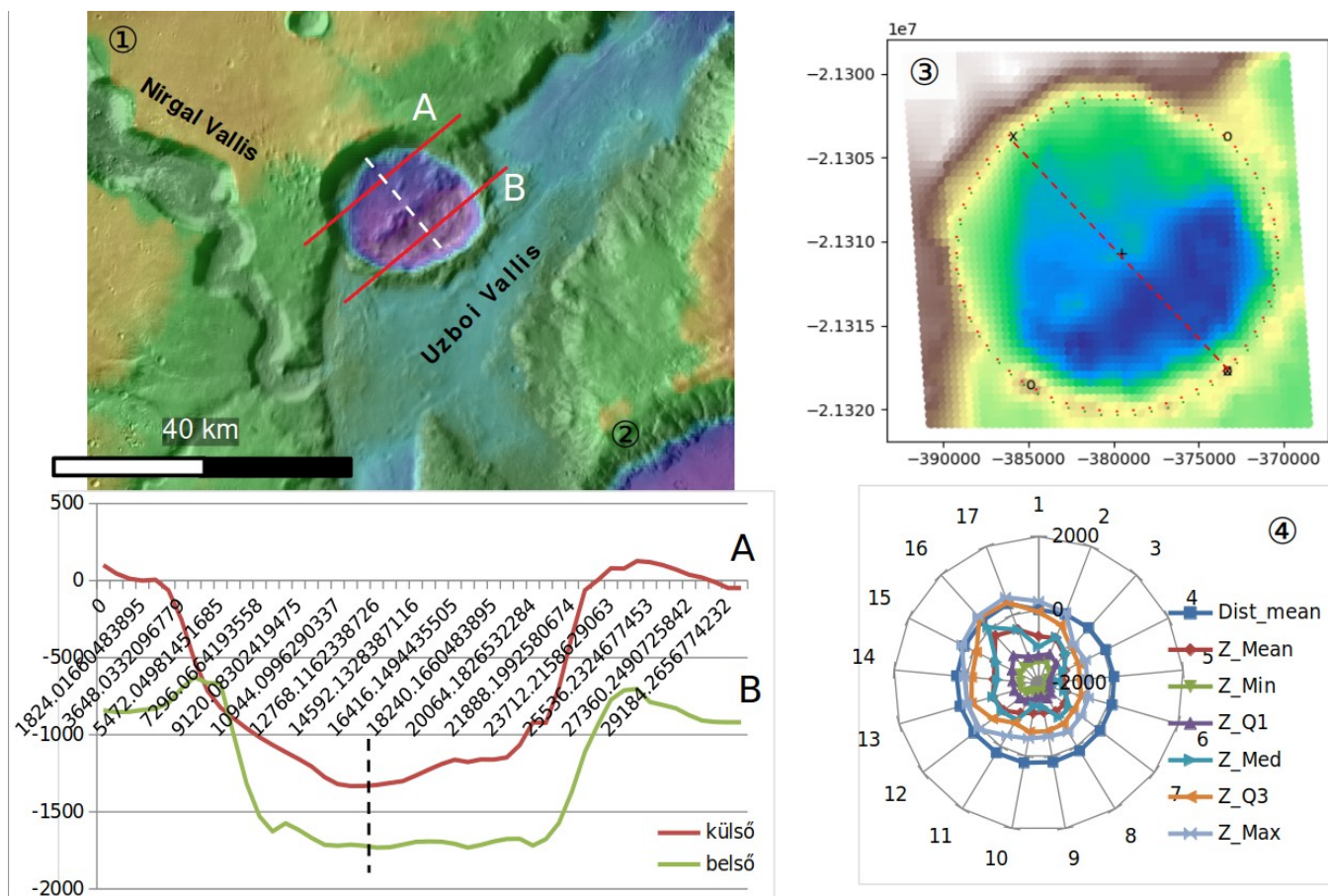
A 20 km átmérőjű Luki-kráter a Nirgal torkolatához közel fekszik. A kráter pereme 16, a középpontja megközelítőleg 26 km-re van, ezért külön figyelmet érdemel (25. ábra). További elemzése a keresztszelvényen és a hossz-szelvényen feltűnő topográfiai kettősség alapján indokolt. A kör alakú krátert polárkoordinátás megjelenítésben, vagyis téglalap alakba transzformálva, majd a sávszelvény-



25. ábra: A Luki-kráter elemzésének eredményei: (1) térkép (2) kör illesztése és középpont (3) polárkoordinátás megjelenítés (4) centrális sávszelvények. Figyeljük meg a tektonikai elmozdulásra utaló jeleket.

elemzést radiális (25. ábra) és sugár irányban (26. ábra (3) és (4)) is elvégezve az eredmények szintén kettősséget mutatnak. A Luki-kráter peremének délkeleti része nagyjából 450 m-rel alacsonyabban helyezkedik el az északnyugati felétől. Ennek egyik magyarázata, hogy a becsapódás a falat metszette, így a kialakult kráter egyik fele a platón, másik fele az Uzboi belsejében terül el. A Luki pereme az

Uzboi aljához viszonyítva 300 m magasra tornyosul (−600 m GMM-2B alatti magasság), így ha volt vízfelhalmozódás az Uzboiban, az a Lukit is elöntötte, amennyiben ezelőtt keletkezett.



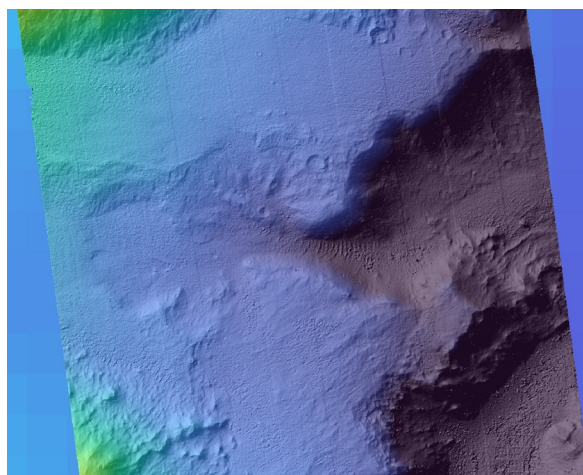
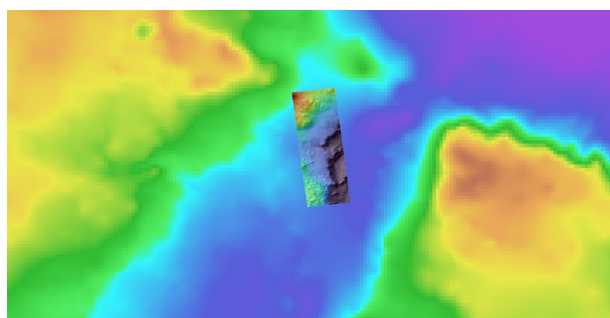
26. ábra: A Luki-kráter magassági aszimmetriáját bemutató eredmények: keresztmetszetek és polárkoordinátákban feltüntetett sávszelvények

Azonban a Luki aljának mindkét fele több száz (400 illetve 800) méterrel alacsonyabban van az Uzboi aljánál (26. ábra). A Luki-krátert kialakító becsapódás tehát posztdataálja az Uzboi fő aktív vizes időszakát. Ugyanis ha az elárasztás elérte volna, feltehetőleg fel is töltődött volna. Ezt azonban megcáfolja a több száz méteres szintkülönbség. A Luki pereme viszonylag élesnek, kevésbé módosítottnak tűnik. Hasonlóan az északnyugatihoz, ami biztosan a vízszint felett volt. Világos árnyalatú, masszív anyag van jelen a Luki alján, rétegződésre (ami a többszöri/tartós vízborítottságot igazolná) nincs jel. Az északnyugati, magasabban fekvő rész Wilson et al. (2017) szerint vagy egy feltételezett, a becsapódás előtt már meglévő szerkezet, vagy tömegvesztéssel keletkezett a kráter kialakulásakor. Ez magyarázná a kráter ÉNy-DK irányban ~1-1,5 km-rel elnyújtott, kissé aszimmetrikus formáját. A Luki-kráteren átívelő keresztmetszelvény mutatta magassági kettősség oka azonban az is lehet, hogy a völgy a falába történt becsapódás után tovább mélyült. Ezek alapján a Luki-krátert átszelő normálvető valószínűsíthető, ami tektonikus deformációra utal. A 26. ábra alapján a Luki aljának két fele, illetve az Uzboi Vallis alja és a plató magasságkülönbsége nagyjából megegyezik. Az Uzboi medrét

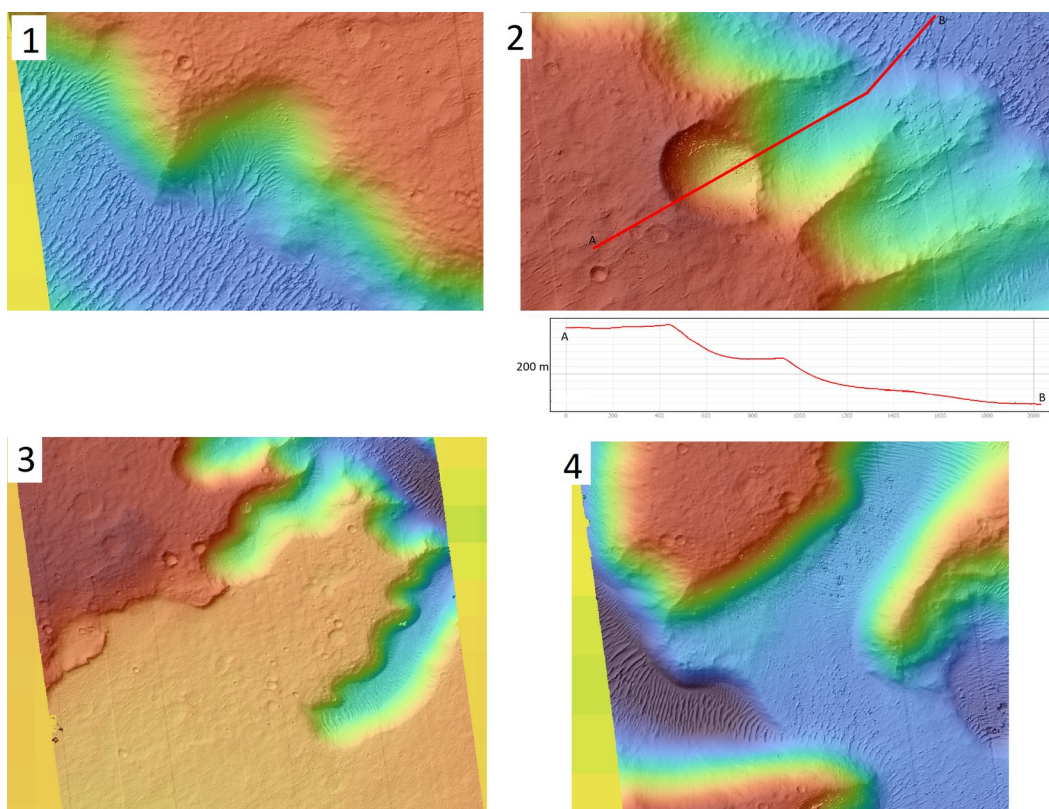
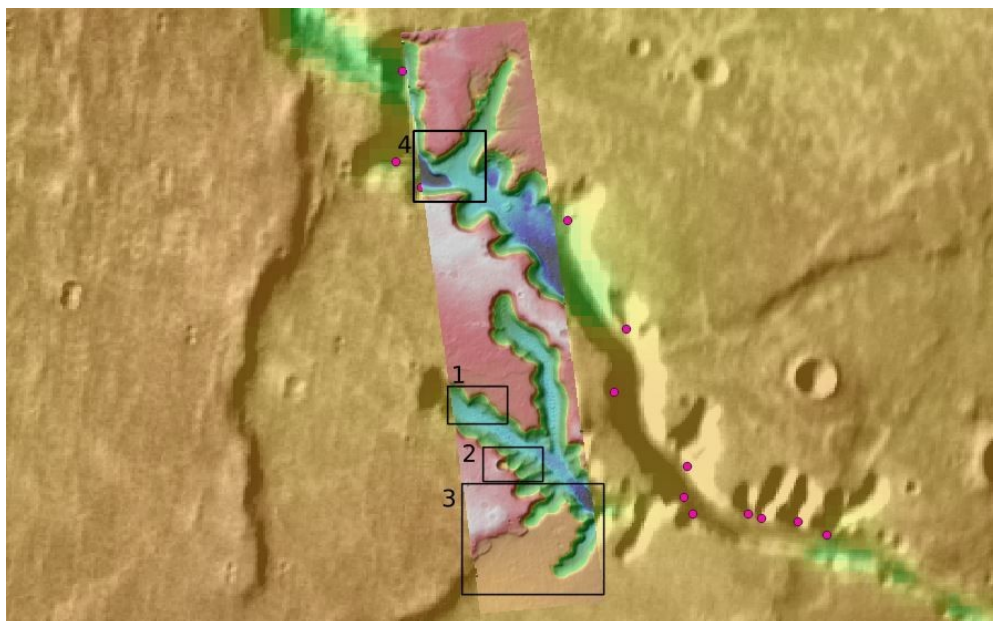
a Luki-kráter paleofelszínének feltételezhetjük. Mivel nincs üledékekkel telehordva, állíthatjuk, hogy posztdataálja az Uzboi felszínét. Ezt alátámasztja az is, hogy a perem Uzboi Vallis-ban elhelyezkedő része meglepően „éles”, fiatalnak tűnik. A tektonikai folyamat a Luki kialakulása után tovább folytatódott. Ennek következtében a kráter keleti fele kimélyült. A jelenséggel kapcsolatban van említés a tektonikára, azonban erről szóló kutatás nincs.

Holden-kráter

A Holden-kráter a folyó aktív szakaszában, de mindenképpen a völgy (Uzboi Vallis) kialakulása után keletkezett. A becsapódást követően a folyó víz átvágta a hirtelen útjába került kráterfalakat, így törve magának utat a Holdenen keresztül. PARKER et al. (2000) arra a következtetésre jutott, hogy a Holden-medence pereme katasztrófális eseményként vágódott át, amikor a perem által elgátolt, dél felől érkező víz áttörte a kráterfalat. Topográfiai megfontolások és spektroszkópiai adatok arra utalnak, hogy az Uzboi Vallis-ban a Holden-kráter kialakulása után felgyülemlett az Argyre irányából érkező víz és rövid élettartamú tó keletkezett (GRANT et al.. 2009), mely 350 m-es areoid feletti magasságban túlcsondult, és áttörte a Holden-kráter peremét. A víz elárasztotta a krátert. Az áttörés belső oldalán elterülő delták 25 km-re is elnyúlnak az áttöréstől, és méteres sziklákat tartalmaznak. Az Uzboi Vallis felszínén több száz méter hosszú, átlagosan 60 m széles hosszanti barázdák megfigyelhetők, ami nagy mennyiségű víz áramlásának jele (GRANT et al. 2011). A 27. ábra az Uzboi Vallis Holden-kráterbe történő belépését mutatja.



27. ábra: fent: A Holden-kráter HiRiSE domborzatmodellje (PSP_003710_1530 és PSP_003288_1530 alapján) az Uzboi Vallis északi részén. A kép jobb oldalán: Az Uzboi Vallis aljának eróziója egy másodlagos csatornába.
Balra a kivágat helye az Uzboi Vallisban.



28. ábra: Utólagos hatások nyomai HiRISE domborzatmodelleken. Északi tájolású DTM-ek. 1: diffrakció a homokfodrokon, 2: A platón lévő, félig leerodált kráter és magasságszelvénye, 3: egy mellékvölgy és egy wrinkle ridge határa, 4: A Nirgal fő ága (keletről) kevesebb hordalékot hozott, mint az északról becsatlakozó mellékág, így a leülepedett hordalék sajátos alakban őrződött meg.

A földi folyók bevágódásának oka általában vagy tektonikus mozgással, vagy a nagy vízhozammal magyarázható (hátravágódás). A Nirgal, egykori folyóvölgy bevágódó jellege vízszintcsökkenés vagy

erózióbázis-csökkenés eredménye (vagy e két hatás egyszerre érvényesült). Vélhetően azért nem látható töréspont (knick point) a mederben (azért van bevágódva), mert már végighaladt rajta. A Nirgal Vallis sávszelvényén (11. ábra) szembetűnő meredekedés a földi példáktól eltérő módon a knick point helyett jött létre, mert megszűnhetett az elegendő vízhozam. A meredekedés azt jelenti, hogy az erózió tovább zajlana, de vagy csak időnként volt elegendő vízhozam, vagy túl rövid ideig. Lehetséges, hogy ez a lejtésváltozás a földi knick pointok marsi megfelelője az eltérő vízháztartási és csapadékviszonyok miatt.

7. Önálló következtetések

A Nirgal Vallis marsi völgy különféle morfológiai elemzési eredményei alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le. A mellékvölgyek csak bizonyos részeken fejlődtek ki, a hosszához és a vízgyűjtő terület méretéhez képest nagyon kevés. Ez azzal magyarázható, hogy kevésbé erodibilis felszíni kőzetek esetén az alatta lévő kőzetbe könnyebben bele tud vágódni. Az energia erre fordítódik ahelyett, hogy szélesítené a völgyet vagy mellékágak keletkeznének. Tehát lényeges a plató anyaga. A földi Colorado-folyó esetén oldalirányban történik fejlődés.

A víz egykor vélhetően a forrásvidéktől a torkolatig lefolyt, azonban ma nem ez a helyzet. Ezt jelenleg túlnyomó részt a wrinkle ridgek utólagos mozgásának tulajdonítom.

Mint említettem, a völgy vizsgálata esetén nagyon kevés lehetőség van az időbeliség mérésére, hiszen a hosszú és keskeny terület nem alkalmas a kráterszámlálásra. Legfeljebb a relatív korok (pl. a Holden-kráter falának áttörése erózióbázis csökkenéshez vezet) beazonosítása lehetséges.

A torkolat közelében szinte biztosan tektonikai hatás érte a völgyet. Ez a mozgás egybevág a Luki-kráter és az Uzboi Vallis morfológiájának tektonikus interpretációjával.

Az Uzboi az aktív vizes időszak után tektonikus úton tovább módosult, jelenleg lefolyástalan. A Nirgal Vallis az Uzboi egyik mellékfolyója volt. Szakaszokra bontható, a földiekhez hasonló bevágódó folyóvölgy. A földi folyókhoz hasonlóan nem teljesen folyamatosan, de trendszerűen csökken a magassága. Erózióbázisa egy tektonikus völgy: az Uzboi Vallis. A wrinkle ridgek, melyeket átszel, a völgy aktív időszaka után (tovább) emelkedtek. A jelenlegi topográfia mellett ez is lefolyástalan szakaszokat hoz létre. Mindkét völgy medrének fenekén jelen vannak fiatalabb másodlagos csatornák, melyek a völgyek legutolsó nedves periódusa idején alakultak ki. Ezek mélysége legfeljebb néhány méter, hosszuk töredéke az eredeti völgyeknek.

8. Kitekintés

A későbbi kutatások megerősíthetik vagy megcáfolhatják az eddigi eredményeket, beleértve a tektonikus interpretációt. Ezért a vizsgálatokat folytatni szeretném. Ennek következő lépése az Uzboi Vallis déli és északi területeinek vizsgálata a tektonikai interpretációra való különös tekintettel. Számos HiRISE felvétel és már elkészített HiRISE domborzatmodell esik az Uzboi Vallis területére, melyek feldolgozása egy későbbi munka részét képezik. Ez nagy mértékben hozzá fog járulni a jelen munkában ismertetett tektonikus interpretáció valós mivoltához.

Cél a feltételezett térnövekedéssel, térszínsüllyedéssel járó eltolásos, megnyúlásos szerkezet további bizonyítékainak keresése.



29. ábra: A Nirgal Vallis egy lehetséges földi analógiája Etiópia területén
(8°44'00.4"É 39°32'14.0"K) forrás: Google Maps alapján

A marskutatás igen gyakran további analógiákat keres a egyes areomorfológiai elemekre. A Nirgal Vallis-hoz hasonló völgyet formájú völgyet a Földön is lehet találni. A 29. ábraán egy afrikai példa látható, a kép közepén egy, a Nirgal E szakaszához hasonló kiszélesedéssel. A további analógiák kutatása folytatódik.

9. Irodalomjegyzék

- AN YIN (2012): An episodic slab-rollback model for the origin of the Tharsis rise on Mars: Implications for initiation of local plate subduction and final unification of a kinematically linked global plate-tectonic network on Earth. *Lithosphere*, 4, (6): 553-593, doi: 10.1130/L195.1
- COSTARD, F., FORGET, F., MANGOLD, N., PEULVAST, J. P. (2002): Formation of Recent Martian Debris Flows by Melting of Near-Surface Ground Ice at High Obliquity, *Science*, 295, (5552), doi: 10.1126/science.1066698
- DOHM, J.M., HARE, T.M., ROBBINS, S.J., WILLIAMS, J.-P., SOARE, R.J., EL-MAARRY, M.R., CONWAY, S.J., BUCZKOWSKI, D.L., KARGEL, J.S., BANKS, M.E., FIRÉN, A.G., SCHULZE-MAKUCH, D., KOMATSU, G., MIYAMOTO, H., ANDERSON, R.C., DAVILA, A.F., MAHANEY, W.C., FINK, W., CLEAVES, H.J., YAN, J., HYNEK, B., MARUYAMA, S. (2015): Geological and hydrological histories of the Argyre province, Mars. *Icarus* 253:66-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2015.02.017>
- ESA (2019) River relic spies by Mars Express
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/River_relic_spied_by_Mars_Express (hozzáférés: 2020 november)
- GOLOMBEK, M. P., ANDERSON, F. S., AND ZUBER, M. T. (2001), Martian wrinkle ridge topography: Evidence for subsurface faults from MOLA, *J. Geophys. Res.*, 106(E10), 23811– 23821, doi:10.1029/2000JE001308.
- GRANT, J.A., IRWIN, R.P. & WILSON, S. (2009): Geologic mapping of Holden crater and the Uzboi-Ladon-Morava outflow system. Semantic Scholar Corpus ID: 133002381 Center for Earth and Planetary Studies, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution, 6th St. at Independence Ave. SW, Washington, DC 20560
- GRANT, J.A., IRWIN III, R.P., WILSON, S.A., BUCZKOWSKI, D., SIEBACH, K. (2011): A lake in Uzboi Vallis and implications for Late Noachian–Early Hesperian climate on Mars. *Icarus* 212:110–122. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.11.024>

- HERGARTEN, S. AND ROBL, J. AND STÜWE, K., (2014): Extracting topographic swath profiles across curved geomorphic features. *Earth Surface Dynamics*, 2, 1, 97–104, doi: 10.5194/esurf-2-97-2014 <https://esurf.copernicus.org/articles/2/97/2014/>
- N. MANGOLD, P. ALLEMAND, P.G. THOMAS (1998): Wrinkle ridges of Mars: structural analysis and evidence for shallow deformation controlled by ice-rich décollements. *Planetary and Space Science*, 46, 4, 345-356, [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(97\)00195-5](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(97)00195-5).
- PARKER TIMOTHY J., CLIFFORD S. M., & BANERDT W. B. (2000): Argyre Planitia and the Mars global hydrologic cycle. Lunar and Planetary Science XXXI konferencia, dokumentum ID: 20000080593 <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000080593>
- TELBISZ Tamás, KOVÁCS Gábor, SZÉKELY Balázs, & SZABÓ Judit (2013): Topographic swath profile analysis: a generalization and sensitivity evaluation of a digital terrain analysis tool. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(4) 485–513. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0110>
- Vörös, F., Székely, B. (2022): High-resolution DTM-based estimation of geomorphometric parameters of selected putative martian scoria cones, *Icarus*, Volume 377, 114923, ISSN 0019-1035, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114923>.
- WILSON, S. A., GRANT, J. A., HOWARD, A. D., & BUCZKOWSKI, D. L. (2018). The nature and origin of deposits in Uzboi Vallis on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, 1842–1862. <https://doi.org/10.1029/2017JE005508>

10. Függelék

A sztereopárok feldolgozásának menete a következő:

1. A megfelelő képpárok letöltése (összes EDR Products)
2. A telepítéskor előre definiált helyre mappa létrehozása (mars), abban almappát (result), illetve a mars-ba a kívánt paraméterek szerint megírt stereo.default fájlt bemásolni. Ez minden képpár elkészítésekor szükséges.
3. EDR fájlok bemásolása a mars mappába.
4. A terminál megnyitása a mars tárolómappájában: `conda activate isis (enter)`, `cd $HOME (enter)`, `cd anaconda3/envs/isis/data (enter)`, `ISISDATA=/home/andras/anaconda3/envs/isis/data (enter)`, `PATH="$${PATH}:/home/andras/tmp/stereopipeline/bin" (enter)`, `ISISROOT=/home/andras/anaconda3/envs/isis (enter)`, `cd $HOME (enter)`, `cd Desktop/mars (enter)`
1-4-et a terminál bezárása és újraindítása esetén mindig el kell végezni.
5. `hiedr2mosaic.py ESP_XXXX_XXXX_RED*IMG (enter)`
6. `hiedr2mosaic.py ESP_YYYY_YYYY_RED*IMG (enter)`
7. `cam2map4stereo.py [space] ESP_XXXXX_XXXX_RED.mos_hijitreged.norm.cub [space] ESP_YYYY_YYYY_RED.mos_hijitreged.norm.cub (enter)`
8. `stereo ESP_XXXX_XXXX_RED.map.cub ESP_YYYY_YYYY_RED.map.cub result/VALAMI (enter)` A result mappába ment a megadott néven [VALAMI]
Nem a teljes átfedett terület, hanem csak kisebb területet megjelenítőben való kijelöléséhez: `stereo_gui...` `ctrl+egérrel` kijelölni a területet mindkét képen (Legyen kicsit nagyobb, mint az objektum.), majd `run → run stereo`
9. `cd result (enter)` (A result mappába navigál.)
10. `point2dem VALAMI-PC.tif --errorimage --dem-hole-fill-len ZZZZ`
11. A VALAMI-DEM.tif megjelenítése megfelelő térinformatikai szoftverben (pl. Qgis, ArcGis).

X és Y a sztereopár két fájljának neveiben szereplő számok.

Z: a dem-hole-fill-len parancs paramétere, (pl. 5000). Megadja az esetleg jelen lévő érték nélküli képpontok interpolációjának mértékét. Lásd 7. ábra.

ID	Spacecraft	Instru- ment	type	név	*.ext.	latitude [°]	longitud e [°]	Helyi idő
1	MGS	MOLA	areoid	mega90n000eb	img	0	0	N/A
2	MGS	MOLA	DTM		tif	0	0	N/A
3	Mars Odyssey	THEMIS	R Day Mosaic	Mars_MO_THEMIS-IR-Day_mosaic_global_100m_v12	tif	0	0	N/A
4	MRO	HiRISE	DTM	DTEEC 002932 1445 003209 1445 A01	tif			
5	MRO	HiRISE	DTM	DTEEC 002932 1445 003209 1445 U02	tif			
6	MRO	HiRISE	DTM	DTEEC 008338 1525 010329 1525 U01	tif			
7	MRO	HiRISE	DTM	DTEEC 037400 1585 033998 1585 A01	tif			
8	MRO	HiRISE	DTM	DTEEC 042016 1495 042082 1495 A01	tif			
9	MRO	HiRISE	DTM	ESP 016487 1495-ESP 017120 1495-DEM	tif	-30.075	323.02	03:16:00 PM
10	MRO	HiRISE	DTM	ESP 020087 1515-ESP 019810 1515-DEM	tif	-28.28	320.335	03:51:00 PM
11	MRO	HiRISE	DTM	ESP 033603 1515-ESP 050930 1515-DEM	tif	-28.105	318.391	02:54:00 PM
12	MRO	HiRISE	DTM	ESP 033814 1525-ESP 034091 1525-DEM	tif	-27.188	313.736	05:00:00 PM
13	MRO	HiRISE	DTM	ESP 045814 1520-ESP 046592 1520-DEM 1000	tif	-27.636	317.562	03:20:00 PM
14	MRO	HiRISE	DTM	ESP 065330 1505 ESP 065752 1505-DEM	tif			
15	MRO	HiRISE	DTM	ESP 065330 1505 ESP 065752 1505-DEM 7-es fill	tif			
16	MRO	HiRISE	DTM	ESP011608 1525-ESP020878 1525-DEM	tif	-27.133	324.818	03:55:00 PM
17	MRO	HiRISE	DTM	ESP022645 1505 es ESP023067 1505-DEM	tif	-29.33	321.745	02:24:00 PM
18	MRO	HiRISE	DTM	ESP022645 1505 es ESP023067 1505-DEM 77-es fill	img	-28.33	322.745	02:24:00 PM
19	MRO	HiRISE	DTM	ESP-025744-1525 ESP 025177 1525-DEM	img	-27.174	314.837	02:54:00 PM
20	MRO	HiRISE	DTM	Luki+4768	img	-29.532	322.653	03:40:00 PM
21	MRO	HiRISE	DTM	Luki-DEM	img	-28.532	323.653	03:40:00 PM
22	MRO	HiRISE	DTM	Martynov del-DEM	img	-30.075	323.02	03:16:00 PM
24	Mars Express	HRSC	DTM	h0449 0009 dt4	img			
25	Mars Express	HRSC	DTM	h0511 0000 dt4	img			
26	Mars Express	HRSC	DTM	h0533 0000 dt4	img			
27	Mars Express	HRSC	DTM	h2526 0000 dt4	img			
28	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 016553 1495 MIRB	jp2	-29.983	322.36	03:03:00 PM
29	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 016553 1495 MRGB	jp2	-28.983	323.36	04:03:00 PM
30	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 016619 1515 MIRB	jp2	-28.287	320.157	03:04:00 PM
31	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 016764 1505 MIRB	jp2	-29.407	321.29	03:05:00 PM
32	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 017542 1515 MIRB	jp2	-28.736	320.72	03:20:00 PM
33	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 017608 1515 MIRB	jp2			
34	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 017687 1505 MIRB	jp2			
35	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 017753 1515 MIRB	jp2	-28.131	319.85	03:22:00 PM
36	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 017898 1505 MIRB	jp2			
37	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 018043 1500 MIRB	jp2	-29.9	322.4	
38	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 018597 1525 MIRB	jp2	-27.444	317.304	03:30:00 PM
39	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 018808 1525 MIRB	jp2	-27.16	316.566	03:32:00 PM
40	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 019810 1515 MIRB	jp2	-28.284	320.336	03:41:00 PM
41	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 020087 1515 MIRB	jp2	-28.28	320.335	03:51:00 PM
42	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 022645 1505 MIRB	jp2	-29.33	321.745	02:24:00 PM
43	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 023067 1505 MIRB	jp2	-29.311	321.744	02:21:00 PM
44	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 025045 1525 MIRB	jp2	-27.215	317.274	02:45:00 PM
45	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 025757 1505 MIRB	jp2	-29.038	320.907	03:07:00 PM
46	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 025968 1510 MIRB	jp2			
47	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 028724 1500 MRGB	jp2	-29.532	322.653	03:40:00 PM
48	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 029146 1500 MIRB	jp2	-28.501	322.089	03:44:00 PM
49	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 030847 1505 MIRB	jp2			
50	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 033603 1515 MIRB	jp2	-28.105	318.391	02:54:00 PM
51	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 034605 1515 MIRB	jp2	-28.2	320	
52	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 035304 1525 MIRB	jp2	-27.229	314.902	03:20:00 PM
53	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 035884 1505 MIRB	jp2	-29.035	320.901	03:27:00 PM
54	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 037994 1515 MIRB	jp2	-28.206	318.118	03:52:00 PM
55	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 038957 1515 MIRB	jp2	-28	320	03:36:00 PM
56	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 046592 1520 MIRB	jp2	-27.639	317.564	03:32:00 PM
57	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 050930 1515 MIRB	jp2	-28.11	318.389	02:25:00 PM
58	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 054556 1500 MIRB	jp2			
59	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 056574 1525 MIRB	jp2			
60	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 056996 1515 MIRB	jp2			
61	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 059396 1500 MIRB	jp2			
62	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 065330 1505 MIRB	jp2			
63	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 065752 1505 MIRB	jp2			
64	MRO	HiRISE	MIRB image	ESP 067401 1505 MIRB	jp2			
65	MRO	HiRISE	MIRB image	PSP 008470 1515 MIRB	jp2			
66	MRO	HiRISE	MIRB image	PSP 010039 1505 MIRB	jp2	-29.485	321.458	03:41:00 PM

