

# Morfometrične analize vršajev planeta Marsa – za uporabo na Zemlji

Tomaž Podobnikar\*, Balázs Székely\*\*

## Povzetek

Predstavljena je uporaba geomorfometričnih analiz (pri uporabi digitalnega modela reliefa – DMR) planeta Marsa. Osredotočili smo se na odkrivanje vršajev. Razvili smo metodi progresivno Boolovo prekrivanje in ISOcluster, in sicer v smislu posebne geomorfometrije, torej izključno za čim natančnejše odkrivanje vršajev na tem notranjem kamnitem planetu. Raziskava predstavi inovativne sekundarne topografske attribute, ki smo jih uporabili pri analizi, in sicer indeks večsmerne vidnosti (MVI) in relief zgoraj (RA), ki sta se izkazali kot zelo pomembni pri iskanju vršajev. Nalogo smo izvajali na relativno nekakovostnem DMR-ju ločljivosti 50 m, ki je bil izdelan iz posnetkov kamere HRSC na satelitu Mars Express istoimenske misije Evropske vesoljske agencije (ESA). Predstavljena metodologija ima ob nadaljnji dodelavi velik potencial za terestrične aplikacije, kot so ugotavljanje območij potencialno nevarnih vršajev, ki ogrožajo antropogeno krajino v gorskem svetu.

**Ključne besede:** zaznavanje vršajev, topografski atribut, klasifikacija površja, indeks večsmerne vidnosti, geomorfometrija, progresivno Boolovo prekrivanje slojev, digitalni model reliefa, Mars Express

**Key words:** talus slopes detection, topographic attribute, surface classification, multidirectional visibility index, geomorphometry, progressive Boolean overlay, digital terrain model, Mars Express

## Uvod

Zemeljsko površje lahko po eni strani nazorno ponazorimo s fotografijo, skico, karto, po drugi strani pa z besedilom, ali numeričnimi podatki, ki so lahko nadalje strukturirani v tabele. Poenostavljeno, oba pristopa – prostorsko grafično ponazoritev in opis lahko združimo v učinkovit geografski informacijski sistem (GIS), v katerem lahko informacije o zemeljskem površju 'preberemo' kar iz geokodiranih podatkov. Digitalni model reliefa (DMR) razumemo kot digitalni geokodiran zapis oblikovanosti zemeljskega površja. Nepretrgana in pogosto gladka ploskev vključuje nadmorske višine. Nadmorske višine digitalnega modela reliefa so lahko kot druge informacije GIS zapisane v mrežo pravilnih kvadratastih celic, ki pogojujejo prostorsko ločljivost, podobno kot zapis digitalnih fotografij. Pogosto površje prikazujemo manj natančno, in sicer kar skupaj z ovojnico površja vegetacije, npr. gozda, travnika ali pa ovojnico grajenega okolja, npr. stavb v mestu ali pa mostov. Tak model imenujemo digitalni model površja (DMP) (Kraus in Pfeifer, 1998; Podobnikar, 2009).

Eden pomembnejših načinov povečanja uporabe DMR-ja so prostorske analize v GIS-ih. Z njimi se povezujejo geomorfološke analize, pri čemer si lahko pomagamo s kvalitativnimi in kvantitativnimi metodami, med slednje spada geomorfometrija.

---

\* Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

\*\* Oddelek za geofiziko in vesoljske znanosti, Univerza Eötvös, Pázmány P. sétány 1/C, H-1117 Budimpešta, Madžarska

Geomorfologija je veda, ki preučuje izoblikovanost zemeljskega površja in njeno področje je geomorfometrija, ki obravnava izoblikovanost površja iz kvantitativnega vidika, s čimer meri geomorfološke pojave (MacMillan in Shary, 2009). Evans (1972) je razdelil geomorfometrijo na splošno, ki zvezno obravnava Zemljino površje, in posebno, ki obravnava diskretne površinske strukture. Čeprav je bilo veliko geomorfometričnih metod razvitih že pred stoletji, se je geomorfometrija kot veja znanosti začela razvijati šele s praktično izvedbo DMR-ja (Miller in Laflamme, 1958).

Z analizo fizičnega površja lahko pri izključni uporabi DMR-ja (ali lidarskega oblaka točk) nadalje sklepamo na lastnosti in pojave, ki nimajo neposredne zveze s površjem. Sklepamo lahko npr. na izbrane lastnosti geološke sestave, geofizikalnih procesov in še na marsikatero naravno (in na Zemlji tudi družbeno-ekonomske) značilnosti. To dejstvo še posebej pripomore pri preučevanju planetov, lun (naravnih satelitov) ali asteroidov, ki jih zaenkrat dejansko ne moremo preučevati in situ, ampak le z metodami daljinskega zaznavanja.

Raziskovalci se danes ukvarjajo z razvojem metod za obdelavo viskoločljivostnih lidarskih podatkov, ki neposredno uporabljajo oblak zajetih točk (in ne DMR), prav tako tudi z metodami za regionalne in globalne DMR-je slabše ločljivosti in kakovosti ipd. (glej npr. Podobnikar, 2005, Podobnikar in Vrečko, 2012).

### **Osnove (geo) morfometričnih analiz**

Pri geomorfometričnih analizah so pomembni naslednji elementi za pridobivanje implicitnih informacij o reliefu:

1. osnovni topografski atributi
2. sekundarni topografski atributi
3. metode klasifikacij površja
4. metode večkriterijskih odločitvenih modelov
5. metode geovizualizacij in vizualne analitike

Ad 1) Med osnovne topografske attribute štejemo naklon, ekspozicijo, ukrivljenost in še nekaj drugih. Skupna značilnost je, da jih izračunamo neposredno iz DMR-ja (Wilson in Gallant, 2000) po relativno enostavnih matematičnih enačbah.

Ad 2) Med sekundarne topografske attribute štejemo razne indekse, ki temeljijo na opisu variabilnosti fizičnega reliefa ali z reliefom povezanih procesov v okolju. Indeksi so izračunani empirično (Wilson in Gallant, 2000). Pogosto gre za različno zapletene algoritme. Njihovo poimenovanje je precej abstraktno, npr. topografski indeks vlažnosti, indeks večsmerne vidnosti (Podobnikar, 2012b).

Ad 3) V primeru klasifikacij površja gre za veliko število možnosti klasifikacij (npr. po načelih splošne in posebne geomorfometrije, pri uporabi različnih metod, po različnih kriterijih) reliefa pri uporabi DMR. Metode slonijo na uporabi topografskih atributov, ki igrajo vlogo različnih spremenljivk pri prostorskih analizah. Metode največkrat ločimo po načelih splošne in posebne geomorfometrije (Evans, 1972). Razvitih je veliko število metod za klasifikacijo celotnega površja ali identifikacijo in opis izbranih značilnosti površja na podlagi analiz oblik, tekstur, v več merilih, na podlagi analiz topografskih atributov relief, ipd. (Podobnikar, 2012a).

Ad 4) Metode večkriterijskih odločitvenih prostorskih modelov se nanašajo na kompleksne modele pri uporabi prostorskih analiz (Malczewski, 2006), kjer je npr. rezultat model vršajev.

Ad 5) Metode geovizualizacij lahko uspešno dopolnjujejo kvantitativne geomorfometrične metode. Vizualna analitika je znanost analitičnega sklepanja, ki uporablja vizualne interaktivne vmesnike. Vizualno analitiko lahko uporabljamo za vizualno prepoznavanje oblik reliefa. Mednje spada generična metoda indeksa večsmerne vidnosti (Podobnikar 2012b), ki je nepogrešljiva za izboljšavo in analizo DMR planeta Marsa, kamor se človek – za sedaj – še ni odpravil na terenske raziskave (Podobnikar in Székely, 2015).

Nadalje je možna uporaba različnih pristopov pri geomorfometričnih analizah glede na (glej npr. Podobnikar, 2005; Podobnikar 2009):

- konceptualni model DMR-ja, abstrakcijo, generalizacijo
- uporabo DMR-ja ali DMP-ja (digitalni model ploskve)
- strukturo DMR-ja – celična mreža, TIN, hibridna struktura oblak točk ipd.
- različno interpretacijo DMR-ja – žični model, celična mreža; uporabljene funkcije za opis DMR-ja oz. interpolacijske metode
- ločljivost in merilo podatkov, obseg območja
- kakovost DMR-ja (izjemno obširno področje), kakovost modela, ki opisuje DMR
- zgodovinski, sedanji ali predikcijo prihodnjega DMR
- aplikacijo oz. uporabo DMR-ja za splošne ali za različne posebne namene
- definicijo DMR-ja, v splošnem

### **Projekt Mars Express in podatki DMR-ja**

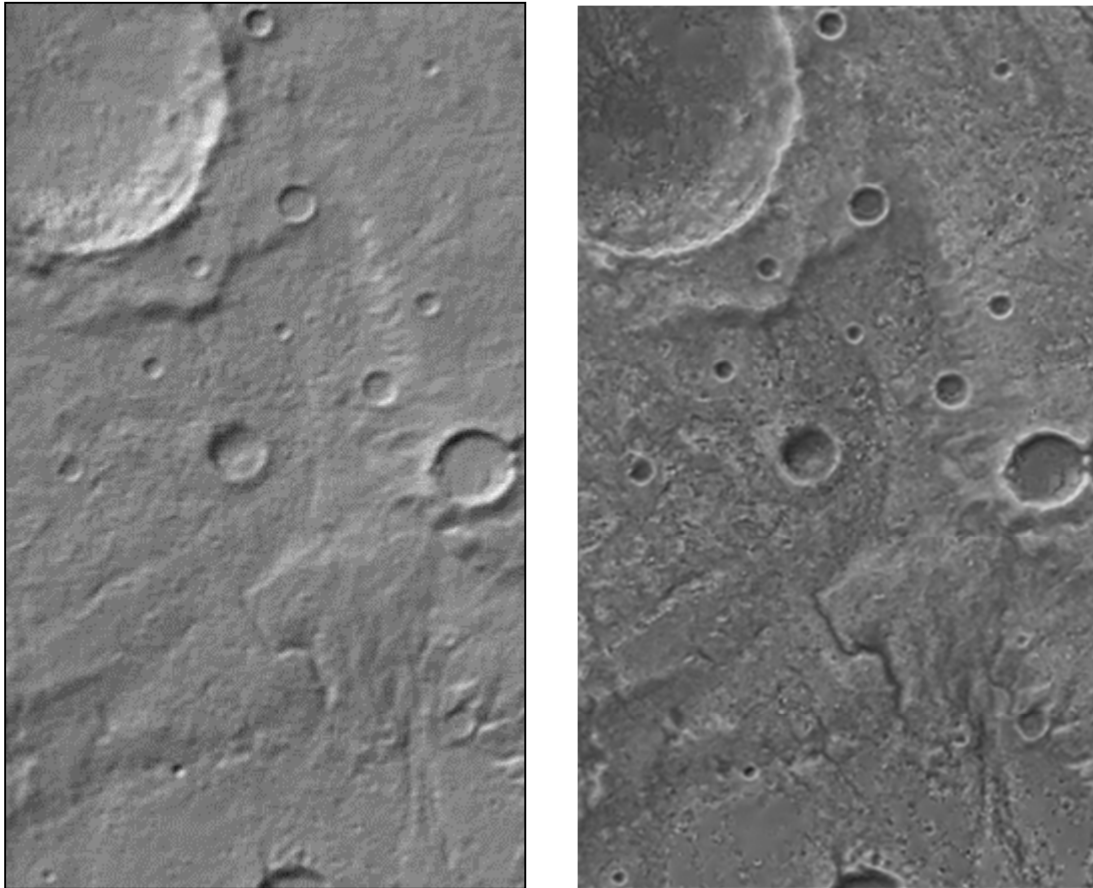
V članku analiziramo izbrane značilnosti, predvsem (areo)morfološke (Mars = Ares), ki jih povezujemo z (geo)morfološkimi (Zemlja = Gea). Misija oz. odprava Evropske vesoljske agencije (ESA) Mars Express je dobila ime po umetnem satelitu, ki so ga izstrelili z Zemlje 2. 6. 2003. Satelit je v orbiti Marsa od 25. 12. 2003. Naziv »express« je misija dobila zato, ker je bila cenejša od primerljivih, poleg tega pa je bila njena izvedba relativno hitra. Satelit ima maso 1120 kg in je opremljen z velikim številom instrumentov (Podobnikar in Székely, 2012).

Za izdelavo DMR-ja je najpomembnejši instrument »High Resolution Stereo Camera« (HRSC) (Jaumann et al., 2007). Gre za kamero dimenzij 515 x 300 x 260 mm, mase 20,4 kg, porabe 48,7 W, s 5 pankromatskimi in 4 barvnimi kanali (modri, zeleni, rdeči in NIR) t. i. »full colour«, s poljem vidnosti 11,9°, s senzorjem CDD 9 x 5272 pikselov (stereo kot  $\pm 18,9^\circ$ ), z ločljivostjo 10 m/piksel (maksimalno 2 m), s širino signala 52,2 km (vsi podatki so izračunani glede na orbito 250 km višine). Kamera vsebuje tudi »Super Resolution Channel« (SRC). Izdelali so jo skupaj na DLR, FU Berlin in ESA. Gre torej za projekt Evropske vesoljske agencije s 43 raziskovalnimi skupinami iz 10 držav (brez Slovenije).

Izdelan je bil DMR s prostorsko ločljivostjo 50 m in natančnostjo okoli 10 m (Heipke et al., 2007), ki je bil dodatno izboljševan (predvsem zaradi napak slikovnega ujemanja na geomorfološko neizraziti pokrajini, slabih kontrastov na večjih osvetljenih ali osenčenih površinah, ujemanja pasov in interpolacije ter s tem pojavljanja grobih napak, Slika 1). Problem je tudi različna ločljivost originalnih posnetkov, kar je posledica izrazito eliptične orbite satelita Mars Express. DMR je izdelan na osnovi stereoparov ter slikovnega ujemanja.

Pri vizualni interpretaciji DMR-ja je uporaben indeks večsmerne vidnosti, kot napredna generična metoda analitičnega senčenja reliefa, ki izpolnjuje osnovna topografska načela v kartografiji, poleg tega je uporabna za generalizacijo DMR-ja, klasifikacijo

geomorfoloških oblik in odkrivanja značilnosti ter za izboljšavo fotografij (Podobnikar, 2012b; Slika 1).



Slika 1 – Primerjava klasičnega analitičnega senčenja (levo), ter senčenja z indeksom večsmerne vidnosti (MVI; multidirectional visibility index). Uporabljen je DMR HRSC, ESA, Mars Express s prostorsko ločljivostjo 50 m. Prikazano je območje »Thaumasia mountain range«. Na modelu z indeksom večsmerne vidnosti je zaznati precej več geomorfoloških detajlov kot na klasičnem modelu.

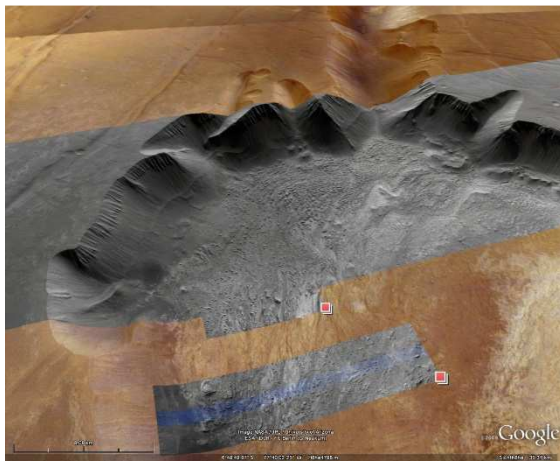
### **Metodologija geomorfometričnega iskanja vršajev Marsa**

Nestabilna pobočja dolin so pogosto pokrita z vršaji (z grušči ali s podžlebnimi melišči). Na Zemlji so vršaji značilnost gorskih območij (Podobnikar in Székely, 2015; Slika 2). Geomorfološka oblika različnih tipov vršajev je določena z materialom, ki ga sestavlja. Pri tem gre pogosto gre za slabo razvrščen material. Oblika vršajev na Marsu je pogojena glede na Zemlji različne okoljske pogoje: manjša gravitacija (pribl. 38 % zemeljske), danes pomanjkanje fluvialne erozije, več prostega materiala (pogosto vetrnih nanosov), in značilna velika območja pobočij – kar pomeni, da so vršaji pomembne morfološke značilnosti na Marsu. Na Zemlji so vršaji ponekod porasli in zato lahko nekoliko bolj strmi in s tem metastabilni.

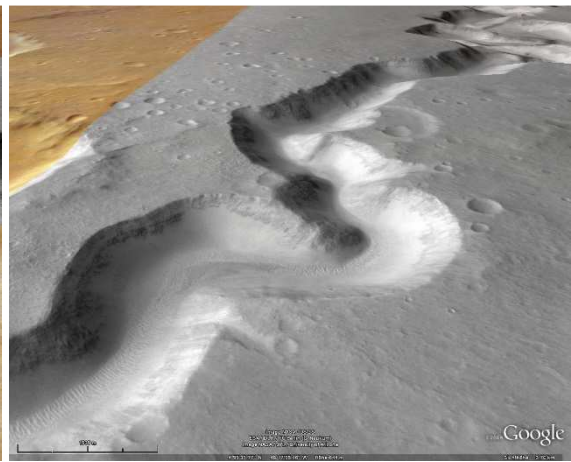


Slika 2 – Primer večjega aluvijalnega vršaja in več melišč z reko Hunzo pri kraju Passu, Pakistan (Foto: T. Podobnikar)

Cilj tega prispevka je predstaviti robustni metodi za odkrivanje in ločevanje vršajev na Marsu glede na druga pobočja naravnega okolja, ki jih ne štejemo med vršaje po načelih posebne geomorfometrije, saj razpoznavamo točno določene reliefne oblike (MacMillan in Shary, 2009; Obu in Podobnikar, 2013). Pri tem smo uporabili DMR Marsa za izbrani testni območji Nanedi Valles in Candor Chasma (Slika 3). Dodaten cilj tega prispevka je tudi razvoj metod sekundarnih topografskih atributov.



a)



b)

Slika 3 – Testni območji za identifikacijo vršajev: (a) Candor Chasma (6° J, 77° Z), (b) Nanedi Valles (7° S, 48° Z). Območja potencialnih vršajev so vidna kot gladke površine na pobočjih.

Algoritem odkrivanja vršajev je v grobem naslednji (Podobnikar in Székely, 2015):

- vizualna interpretacija površja z metodo indeksa večsmerne vidnosti (MVI; multidirectional visibility index)
- izdelava topografskih atributov (spremenljivk), kot so indeks večsmerne vidnosti (MVI) (Podobnikar, 2012b), relief zgoraj (RA; relief above) (Podobnikar in Székely, 2015) in standardni odklon naklona reliefa (Székely et al., 2002)
- analiza neodvisnosti in značilnosti spremenljivk
- izračun spremenljivk
- klasifikacija spremenljivk v binarne vrednosti
- klasifikacija površja z uporabo metod posebne geomorfometrije: progresivno Boolovo prekrivanje in ISOcluster
- stalna kontrola kakovosti in analize občutljivosti

Posebej navajamo inovativne sekundarne topografske attribute, podrobnejši opis je v Podobnikar in Székely (2015):

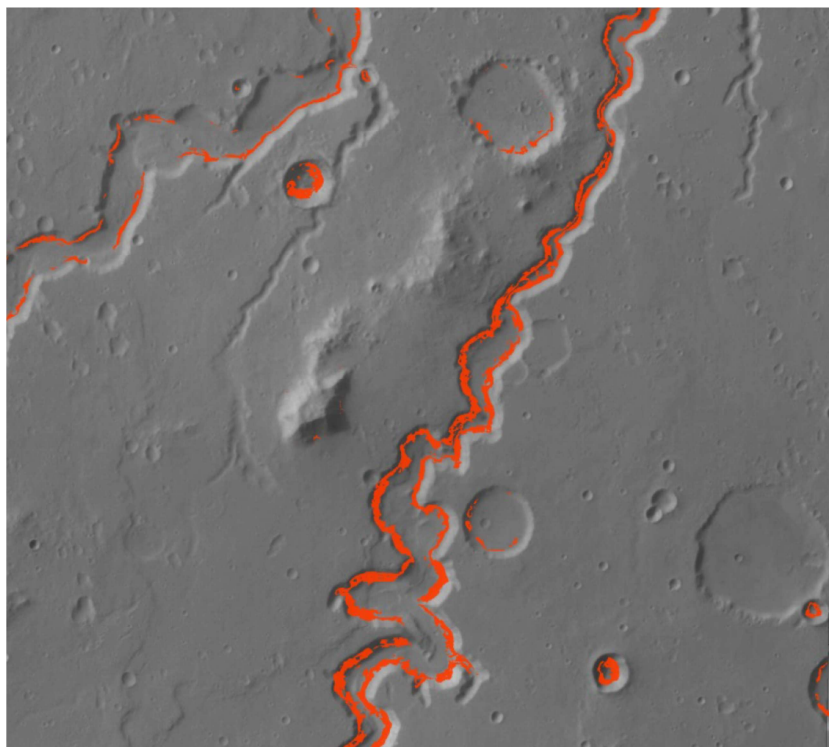
- relief zgoraj (RA)
- kvazi naklon ( $QS_{\theta}$ ), pri uporabi MVI (kvazi zato, ker je rezultat podoben naklonu reliefa)
- MVI za kvazi naklon (MVI-QS)
- MVI za relativni relief (MVI-RR)
- spodnji pogled  $L_{\theta}$ , pri uporabi MVI
- standardni odklon naklona reliefa

Razvili ali nadgradili smo metodi progresivno Boolovo prekrivanje (kot del algebre karte; Tomlin, 1990) in ISOcluster (Ball and Hall, 1965). Podrobnejši opis obeh metod je v Podobnikar in Székely (2015) v smislu posebne geomorfometrije za klasifikacijo površja, tu pa so podani osnovni parametri:

- Progresivno Boolovo prekrivanje uporablja spremenljivke z binarnimi vrednostmi za odkrivanje vzorcev v prostoru. Analiza značilnosti in neodvisnosti spremenljivk se je izkazala za koristno pri določanju in optimiziranju strategije pri analizi. Progresivna (korak za korakom) analiza se prične z grobo oceno (začetni približek) in nadaljuje z vedno bolj finimi, a načeloma manj pomembnimi spremenljivkami, ki izboljšujejo kakovost analize (Podobnikar, 2005), vse dokler spremembe niso v okviru določenega praga, ki ga sami postavimo.
- ISOcluster je standardna nenadzorovana klasifikacija površja, pri čemer nas zanimajo taki parametri klasifikacije pri uporabi takih spremenljivk, ki omogočajo karseda potencialno optimalno odkrivanje območij vršajev (Székely, 2001).

Rezultati izračunov na Sliki 4 dokazujejo, da so spremenljivke ključnega pomena za zanesljivo analizo, hkrati se rezultati dobro skladajo s predhodnimi terestričnimi analizami (Podobnikar in Székely, 2008). Nadalje rezultati kažejo na podobne lastnosti površja tako pri uporabi metode ISOcluster kot tudi za tehniko progresivnega Boolovega prekrivanja. Glede na oddaljenost Marsa, smo uporabili številne prilagojene tehnike za kontrolo kakovosti, kot je npr. vizualna ocena z že omenjeno metodo MVI.





Slika 4 – Rezultat iskanja vršajev za območje Nanedi Valles

### **Aplikacija metodologije na zemeljsko površje**

Metodološko je pomembna zmožnost primerjave značilnosti površja, ki jih poznamo na Zemlji, s tistimi, ki jih preučujemo na izbranem planetu. Ne glede na to, da so fizične oz. geomorfološke lastnosti planetov različne zaradi različnih procesov pri njihovem razvoju, lahko v praksi najdemo veliko relativno podobnih značilnosti, ki pa se zagotovo razlikujejo v nekaterih podrobnostih. morfološke in še posebej morfometrične analize planetov so torej raziskovalni izziv. Primer je preučevanje izbranih lastnosti Zemlje, s čimer bolje razumemo procese na posameznem planetu in obratno: razumevanje določenih značilnosti planetov lahko pomaga pri preučevanju pojavov na Zemlji (Podobnikar in Székely, 2008; Székely in Podobnikar, 2008).

V gorskem svetu so antropogene strukture in objekti ranljivi zaradi izjemnih geoloških, geomorfoloških, hidroloških ali vremenskih pojavov (Sodnik et al., 2013). Pri modeliranju možnih scenarijev naravnih nesreč potrebujemo poleg podatkov o ranljivih antropogenih strukturah tudi prostorske topografske podatke. DMR-ji na osnovi aero-laserskega skeniranja (ALS) so potencialno pomembni za pridobivanje natančnih in podrobnih podatkov o premikih gmot, eroziji in podobnih pojavih, z visoko natančnostjo. Metode samodejnega procesiranja podatkov ALS omogočajo pridobivanje različne produkta, na primer o topografiji, višini gozda, obliki stavb, daljnovodih. Pridobljeni prostorski podatki so lahko modelirani skupaj z informacijami za oceno potencialne škode na osnovi določenega tipa nesreče v funkcionalnem postopku objektnega modeliranja (Podobnikar et al. 2010).

## Sklep

V raziskavi smo se osredotočili na izbrane morfološke značilnosti planeta Marsa, in sicer na vršaje ter jih ob koncu v analitičnem smislu opredelili s tistimi na Zemlji. Uporabili smo sloj DMR-ja, izdelanega na osnovi satelitskih posnetkov kamere HRSC projekta Mars Express.

Predstavili smo dve uspešno aplicirani metodi za odkrivanje vršajev, kot metodi posebne geomorfometrije za klasifikacijo površja, in sicer progresivno Boolovo prekrivanje ter ISOcluster. Progresivno Boolovo prekrivanje se nanaša na relativno kompleksno modeliranje, pri katerem posamezne spremenljivke uporabimo za postopno empirično izgradnjo modela, kar je posebej pomembno za natančnejšo analizo oddaljenega planeta Marsa, pri uporabi relativno nekakovostnega DMR-ja.

Zelo pomembna tema raziskave je bila predstavitev sekundarnih topografskih atributov, ki smo jih uporabili pri analizi. Pri tem gre izpostaviti indeks večsmerne vidnosti (MVI) in relief zgoraj (RA), ki sta se izkazala kot zelo pomembna za izdelavo spremenljivk modela. Predstavljena metodologija je bila izdelana in dodelana na podlagi raziskav tako na Zemlji (Slovenija, Avstrija) kot tudi na več območjih Marsa in ima ob nadaljnji dodelavi velik potencial za nadaljnjo aplikacijo pri ugotavljanju območij potencialno nevarnih vršajev, ki ogrožajo antropogeno krajino v gorskem svetu Alp.

**Zahvala:** Raziskovalno nalogo je omogočila Avstrijska agencija za promocijo znanosti (FFG) v sestavu Programa avstrijskih vesoljskih aplikacij (ALR-OEWP-CO-413/07) in njihovih raziskovalnih projektov TMIS, TMIS+ in TMIS-morph (TMIS = Topographic Mars Information System) v okviru programa ASAP pod vodstvom prof. J. Janse, Raziskovalne skupine za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, Tehniška univerza na Dunaju. Podatke smo pridobili ob pomoči dr. G. Neukuma (Berlin) in ekipe Mars Express. Zaključni del raziskave je bil izdelan ob podpori prof. M. Mikoša ter programa Vodarstvo in geotehnika (P2-0180) Javne agencije za raziskovalno dejavnost (ARRS).

## Literatura

- Ball, G.H., Hall, D.J. (1965). *Isodata: a method of data analysis and pattern classification*. Stanford Research Institute, Menlo Park. Office of Naval Research. Information Sciences Branch.
- Evans, I. S. (1972). *General Geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics*. V R. V. Chorley (ur.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: British Geomorphological Research Group.
- Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J. R., Kirk, R. L., Mayer, H., Müller, J.-P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählisch, M., Neukum, G. in HRSC Co-Investigator Team (2007). *Evaluating planetary digital terrain models — The HRSC DTM test*. *Planetary and Space Science* 55, 2173–2191.
- Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Flohrer, J., van Gasselt, S., Giese, B., Gwinner, K., Hauber, E., Hoffmann, H., Köhler, U., Matz, K.-D., Mertens, V., Pischel, R., Roatsch, T., Reiss, D., Scholten, F., Stephan, K., Oberst, J., Saiger, P., Schwarz, G., Wählisch, M. (2007). *The High Resolution Stereo Camera (HRSC) experiment on Mars Express: instrument aspects from interplanetary cruise through nominal mission*. *Planetary and Space Science*, 55, 928–952.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998) *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 193–203.



- MacMillan, R. A., Shary, P. A. (2009). *Landforms and Landform Elements in Geomorphometry*. V T. Hengl, H. I. Reuter (ur.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*. Oxford: Elsevier.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, *IJGIS*, 20, 703–726.
- Miller, C. L. Laflamme, R. A. (1958). *The Digital Terrain Model-Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory.
- Obu, J., Podobnikar, T. (2013). Algorithm for karst depression recognition using digital terrain models. *Geod. vestn.*, 57, 260–270.
- Podobnikar, T. (2005). Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. *International journal of geographical information science*, 19(1), 69-89.
- Podobnikar, T. (2009). Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *S.A.P.I.EN.S. Special Issue 2*, 15–24.
- Podobnikar, T. (2012a). Detecting Mountain Peaks and Delineating Their Shapes Using Digital Elevation Models, Remote Sensing and Geographic Information Systems Using Autometric Methodological Procedures. *Remote Sens.* 4, 784–809.
- Podobnikar, T. (2012b). Multidirectional Visibility Index for Analytical Shading Enhancement. *The Cartogr. J.*, 49, 195–207.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2008). Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: Perko, D., Zorn, M., Razpotnik Visković, N., Čeh, M., Hladnik, D., Krevs, M., Podobnikar, T., Repe, B., Šumrada, R. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, (GIS v Sloveniji, 9)*. Ljubljana: Založba ZRC, 73-81.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2012). Geomorfometrične analize Marsa pri uporabi DMR-ja. 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 19–29.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2015). Towards the automated geomorphometric extraction of talus slopes in Martian landscapes. *Planet. Space Sci.*, 105, 148–158.
- Podobnikar, T., Székely, B., Hollaus, M., Roncat, A., Dorninger, P., Briese, C., Melzer, T., Pathe, C., Höfle, B., Pfeifer, N. (2010). Vsestranska uporaba aero-laserskega skeniranja za ugotavljanje nevarnosti zaradi naravnih nesreč na območju Alp", *Naravne nesreče v Sloveniji*, Založba ZRC, 125-137.
- Podobnikar, T., Vrečko, A. (2012). Digital Elevation Model from the Best Results of Different Filtering of a Lidar Point Cloud. *Trans. GIS*, 16, 603–617.
- Sodnik, J., Podobnikar, T., Petje, U., Mikoš, M. (2013). Topographic data and numerical debris-flow modeling, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice*. Vol. 1, *Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*. Berlin, Heidelberg: Springer, 573–578.
- Székely, B. (2001). On the surface of the Eastern Alps – a DEM study. *Tübinger Geowiss. Arb.*, 60, 1–124.
- Székely, B., Reinecker, J., Dunkl, I., Frisch, W., Kuhlemann, J. (2002). Neotectonic movements and their geomorphic response as reflected in surface parameters and stress patterns in the Eastern Alps. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 149–166.
- Székely, B., Podobnikar, T. (2008). An attempt for automatic detection and visualization of talus cones from digital elevation data. V: Konečný, M., Bandrova, T. (ur.), *Second International Conference on Cartography & GIS, Proceedings 2*, Borovec, Bolgarija, 151–159.
- Tomlin, C.D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 249 p.
- Wilson, J., Gallant, J. (2000). *Digital Terrain Analysis; Terrain Analysis: Principles and Applications*, V: Wilson, J., Gallant, J. (ur.), Wiley, Chapter 1.