

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Marta Pokupić

**Analiza točnosti globalnih digitalnih modela reljefa i  
geomorfometrijski modeli planinskih područja Republike  
Hrvatske**

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za geomatiku Geodetskog fakulteta u Zagrebu, Katedra za državnu izmjeru, pod mentorstvom prof. dr. sc. Tomislava Bašića i vodstvom dr. sc. Mateja Varge te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

## **Popis kratica**

ALOS – Advanced Land Observing Satellite

ASTER – The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AW3D30 – ALOS World 3D 30m

CryoSat – Cryosphere Satellite

DGU – Državna geodetska uprava

DEM – Digital Elevation Model

DMR – Digitalni model reljefa

EGM96 – Earth Gravitational Model 1996

EROS – Center for Earth Resources Observation and Science

Envisat – Environmental Satellite

GIS – Geographic Information System

GMTED2010 – Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010

GNU – General Public License

GPS – Global Positioning System

HRG2009 – Hrvatski referentni geoid 2009

HVRS71 – Hrvatski visinski referentni sustav 1971.5

ICESat – Ice, Cloud and land Elevation Satellite

InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar

Jason – Joint Altimetry Satellite Oceanography Network

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency

JODC – Japan Oceanographic Data Center

LP DAAC – The Land Processes Distributed Active Archive Center

MATLAB – Matrix Laboratory

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NGDC – National Geophysical Data Center

NIMA – National Imaginary and Mapping Agency

OSGeo – Open Source Geospatial Foundation

PRISM – Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping

QGIS – Quantum Geographic Information System

RESTEC – Remote Sensing Technology Center

RMSE – Root mean square error

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

T7D – Program za transformaciju koordinata (Transformacija, 7-parametarska, Distorzija)

WGS84 – World Geodetic System 1984

## Sadržaj:

1	Uvod.....	1
2	Globalni digitalni modeli reljefa .....	3
2.1.	Ulazni DMR-ovi.....	3
2.1.1.	SRTM DMR-ovi .....	3
2.1.2.	Ostali DMR-ovi.....	5
3	Analiza horizontalne i visinske točnosti digitalnih modela reljefa (DMR-ova) .....	7
3.1.	Referentni visinski podaci .....	7
3.2.	Usklađivanje visinskih sustava.....	8
3.2.1.	Metode interpolacije.....	9
3.3.	Horizontalna točnost DMR-a.....	10
4	Geomorfometrijski parametri .....	12
4.1.	Metodologija.....	13
4.1.1.	Nagib terena .....	13
4.1.2.	Smjer nagiba terena.....	14
4.2.	Računalni programi korišteni za računanje geomorfometrijskih modela.....	15
4.3.	Statističke varijable korištene za analizu parametara .....	16
5	Područja analize geomorfometrijskih parametara .....	18
6	Rezultati ocjene horizontalne i visinske točnosti DMR-ova.....	21
6.1.	Metode interpolacije .....	21
6.2.	Horizontalna pogreška digitalnih modela reljefa.....	21
6.3.	Vertikalna točnost DMR-a.....	23
7	Rezultati i analiza geomorfometrijskih parametara.....	25
7.1.	Analiza modela s obzirom na isti DMR, a različite programe .....	25
7.1.1.	Modeli nagiba.....	25
7.1.2.	Modeli smjera nagiba .....	29
7.2.	Analiza modela s obzirom na isti program, a različite DMR-ove .....	33
7.2.1.	Modeli nagiba.....	33
7.2.2.	Modeli smjera nagiba .....	36
7.3.	Modeli nagiba i smjera nagiba za planinarske staze.....	40
8	Zaključak.....	44
	Zahvala .....	46

Literatura .....	47
Popis URL-ova: .....	50
Popis slika .....	52
Popis tablica .....	55
Sažetak .....	57
Summary .....	58
Životopis.....	59
PRILOZI.....	60
PRILOG 1. ....	61
PRILOG 2. ....	64
PRILOG 3. ....	67
PRILOG 4. ....	70

# 1 Uvod

Znanstvena grana, koja se odnosi na kvantitativnu analizu terena, naziva se geomorfometrija. To je interdisciplinarna grana koja koristi različite matematičke i statističke alate, ali i alate obrade slike koje se mogu koristiti za kvantificiranje morfoloških, hidroloških, ekoloških i drugih karakteristika površine zemlje. Glavni cilj geomorfometrije je primjenom numeričke analize dobiti mjere i prostorne značajke digitalne topografije (Pike i dr. 2009). Moderna geomorfometrija pronalazi velik broj primjena u znanosti o Zemlji, preciznoj poljoprivredi, modeliranju tla i krajolika, građevinarstvu, prostornom planiranju, vojnim operacijama, ali i zabavi i rekreaciji (Hunter i Goodchild 1997; Pike i dr. 2009). Geomorfometrijski parametri, poput nagiba i smjera nagiba terena, mogu se neposredno izračunati iz digitalnih modela reljefa (DMR-ova) pomoću različitih računalnih programa.

Jedan od najvažnijih atributa DMR-a, prije njegova korištenja i ocjene prikladnosti za uporabu, je njegova visinska i horizontalna točnost. Prema Hunter i Goodchild (1997) modeli nagiba i smjera nagiba podložni su pogreškama koje su prisutne u DMR-ovima. Problem s dostupnim globalnim digitalnim modelima reljefa jest njihova nepoznata i prostorno varijabilna pouzdanost i točnost. U zadnjih nekoliko godina raste trend u publiciranju DMR-ova iz raznih satelitskih misija čija je točnost za prostor Republike Hrvatske nepoznata. Stoga se u ovome radu po prvi put za područje Republike Hrvatske ispituje vertikalna i horizontalna točnost globalnih DMR-ova SRTM1, SRTM15, EUDEM i AW3D30.

Nadalje, jedan od problema i dvojbi prilikom produkcije modela nagiba i smjera nagiba jest odabir metodologije i programa izrade. Trenutno je na raspolaganju najmanje deset različitih mogućnosti te je zbog toga potrebno analizirati njihove međusobne razlike. Za pretpostaviti je da će modeli izrađeni pomoću istih digitalnih modela reljefa, ali različitim softverima, biti različiti. Međutim, u sadašnjoj literaturi ne nalazi se usporedba i analiza međusobnih razlika te njihov utjecaj na izrađene modele. S obzirom na geomorfološke karakteristike terena, razlike između globalnih DMR-ova su najveće u planinskim i kompleksnim terenima. Iz tog razloga, u ovom su radu izrađeni i analizirani modeli geomorfometrijskih parametara, nagiba i smjera nagiba, za najviša planinska područja Republike Hrvatske.

Kako bi dobili najpouzdanije modele geomorfometrijskih parametara, za računanje modela je korišteno pet znanstvenih programa te devet globalnih DMR-ova različite rezolucije, od jednosekundnih do jednodominutnih. Da bi se utvrdilo postoje li razlike između modela

izračunatih različitim računalnim programom ili iz DMR-ova različite rezolucije, analiza modela biti će ostvarena na dvije razine:

1. Modeli izračunati iz istog DMR-a, a pomoću različitih računalnih programa
2. Modeli izračunati pomoću istog računalnog programa, a iz DMR-ova različitih rezolucija

Kao završni dio nakon analiza, odabran je najtočniji DMR i najpouzdaniji računalni program te su pomoću njih izrađeni modeli nagiba i smjera nagiba planinskih područja i pripadnih planinarskih staza kao i njihove vizualizacije.

## **2 Globalni digitalni modeli reljefa**

Digitalni model reljefa (DMR) je digitalni prikaz površine terena koji daje visine kao osnovni podatak preko pravokutne rešetke točaka (Hunter i Goodchild 1997; Wechsler 2003). Vjernost s kojom DMR model prikazuje stvarnu površinu ovisit će o razvedenosti i kompleksnosti površine te njegovoj rezoluciji. DMR-ovi visoke razlučivosti u prošlosti su bili dostupni samo za lokalno područje ili područje neke države, dok su globalni DMR-ovi visoke razlučivosti od 1 lučne sekunde postali slobodno dostupni tek u posljednja dva desetljeća. Svojom pojavom, globalni DMR-ovi su postali kvalitetni izvori informacija u geoznanostima (Toutin 2008), posebice publiciranjem modela nove generacije kao što je SRTM model koji je znatno poboljšan u odnosu na one globalne modele koji su prvi put pušteni sredinom 1990-ih.

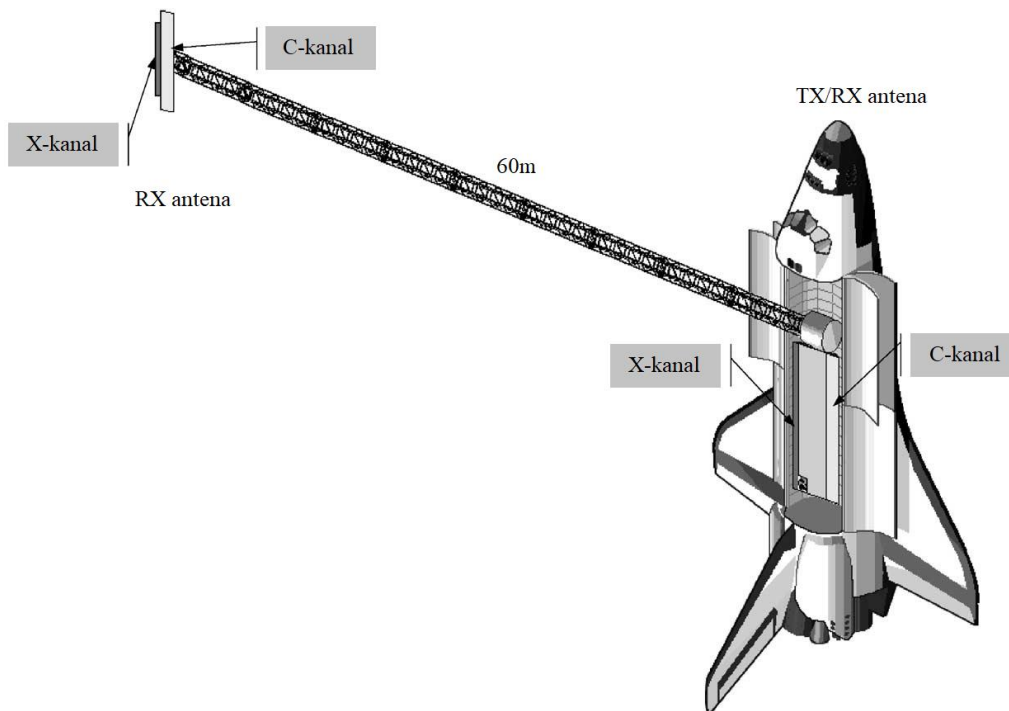
### **2.1. Ulazni DMR-ovi**

Korišteni su globalni DMR-ovi rezolucija od 1 lučne sekunde (SRTM1, EUDEM, AW3D30 i ASTER), 3 lučne sekunde (SRTM3), 15 lučnih sekundi (SRTM15), 30 lučnih sekundi (SRTM30+ i GTOPO30) te 1 lučne minute (ETOPO1). Način i vrijeme nastanka svakog DMR-a ukratko je opisan te je opširnije opisana SRTM misija koja po prvi put pruža globalni visoko kvalitetni DMR rezolucije od 1 lučne sekunde (Rabus i dr. 2003).

#### **2.1.1. SRTM DMR-ovi**

SRTM misija započela je u veljači 2000. godine kao zajednički projekt NASA-e (engl. National Aeronautics and Space Administration) NIMA-e (engl. National Imaginary and Mapping Agency), njemačke i talijanske svemirske agencije te je svojom pojavom pridonijela najznačajnijem dotadašnjem napretku kvalitete i detaljnosti globalnih DMR-ova. Letjelica Shuttle Endeavour letjela je na približno 233 km nadmorske visine i u roku od 11 dana (11. veljače – 22. veljače 2000.) prikupila podatke za područje između 60° sjeverne i 56° južne geografske širine. U mjerenjima je korištena radarska interferometrije (engl. InSAR- Interferometric Synthetic Aperture Radar) u kojoj se dvije radarske slike sintetskih otvora snime s pomoću dvostrukih antena. Jedna antena nalazi se na radaru te služi za odašiljanje i primanje signala, dok je druga antena pričvršćena na kraj 60 m dugog jarbola i služi samo za prijem signala (Passini i Jacobsen 2007). Razlike između slika antena omogućuju izračun visina na površini Zemlje. Antene su radile u C- i X- kanalu i istodobno osvjetljavale i zapisivale radarske signale (slika 1). Za otprilike 80% Zemljine površine po prvi put su prikupljeni interferometrijski radarski podaci razlučivosti 1 lučne sekunde (Rabus i dr. 2003; Farr i dr. 2007).





*Slika 1: SRTM svemirski segment. Prikazane su glavne komponente: X- i C-kanal antene, TX odašiljač i RX prijemnik (Rabus i dr. 2003)*

Proizvodi misije u obliku SRTM1 i SRTM3 se najčešće distribuiraju. To su izvorni podaci o visinama na Zemlji obrađeni iz C-kanala radarskih signala. Grublji modeli, SRTM15 i SRTM30+, dobiveni su kombinacijom podataka iz više izvora. Horizontalni datum DMR-ova je WGS84, a vertikalni datum EGM96.

- SRTM1, rezolucije 1 lučnu sekundu (što odgovara 30 m), bio je dostupan samo za Sjedinjene Američke Države sve do rujna 2014. godine kada je dostupan i globalni skup podataka iste rezolucije. SRTM1 još uvijek na nekim mjestima sadrži velike količine praznina kao što su planinska područja, područja gdje nisu zadovoljene specifikacije kvalitete te područja Bliskog Istoka i Sjeverne Afrike (Yue i dr. 2017)
- SRTM3, s prostornom razlučivosti od 3 lučne sekunde (90 m), odmah je bio slobodno distribuiran za 80% područja Zemlje (Nikolakopoulos i Chrysoulakis 2006; Yue i dr. 2017). Zbog poboljšanja kvalitete, SRTM3 je ažuriran nekoliko puta. LP DAAC (engl. The Land Processes Distributed Active Archive Center) objavio je u studenom 2013. godine poboljšanu verziju SRTM3 (rezolucija 3") koja je dopunjena visinama iz globalnih DMR-ova ASTER (engl. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) i GMTED2010 (engl. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010).

- SRTM30+ model rezolucije 30 lučnih sekundi (900 m) pokriva područje cijele Zemlje te uz visine reljefa sadrži i dubine mora i oceana. Dostupan je od kraja 2014. godine. Podaci o topografiji kopna dostupni iz SRTM misije, a nadopunjeni su podacima iz satelitskih misija ICESat CryoSat-2, Jason-1 i Envisat, posebice za polarna područja van dohvata SRTM misije (Becker i dr. 2009).
- SRTM15 model izrađen je iz modela SRTM30+ i podataka iz satelitskih misija ASTER i CryoSat-2 za područja Grenlanda i Antartike. Također je publiciran 2014. godine. Model obuhvaća područje cijele Zemlje zajedno s dubinama mora i oceana u rezoluciji od 15 lučnih sekundi (500 m).

### 2.1.2. Ostali DMR-ovi

- ASTER globalni DMR izrađen je stereokorelacijom 1,3 milijuna stereoskopskih slika koje su prikupljene u razdoblju od 7,5 godina (2000 – 2007). Stereoskopske slike su prikupljene pomoću ASTER višespektralnog optičkog senzora koji je lansiran na NASA-inoj svemirskoj letjelici Terra. Senzor ASTER pokriva 14 spektralnih područja (od vidljivog do infracrvenog). S razlučivošću od 1 lučne sekunde, pokrivenost globalnog DMR-a ASTER-a je između 83° sjeverne geografske širine i 83° južne geografske širine. Visine su mu referencirane na horizontalni datum WGS84, a s poljem ubrzanja sile teže su povezane preko vertikalnog datuma EGM96. Do danas su javno publicirane dvije inačice globalnog DMR-a ASTER. Globalna vertikalna točnost inačice 1 iznosi  $\pm 20$  m, a inačice 2 iznosi  $\pm 17$  m.
- AW3D30 (ALOS World 3D 30m) je novi globalni DMR s razlučivošću od 1 lučne sekunde. Podaci za AW3D30 prikupljeni su pomoću pankromatskog daljinskog senzora za stereosnimanje PRISM (engl. Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) na satelitu ALOS (engl. Advanced Land Observing Satellite). Misija je završila u ožujku 2016. godine od strane JAXA (engl. Japan Aerospace Exploration Agency) u suradnji s komercijalnim partnerima: NTT DATA korporacija i RESTEC iz Japana (engl. Remote Sensing Technology Center). Stvoren je na temelju DMR-a AW3D razlučivost 0,15 lučne sekunde (oko 5 m) i orto-ispravljene slike (razlučivosti oko 2,5 m). Upotrijebljeno je oko 3 milijuna prizora snimljenih pomoću PRISM senzora koji pokriva područje od 80° sjeverne geografske širine do 80° južne geografske širine. Horizontalni datum mu je WGS84, a vertikalni datum EGM96 (Tadono i dr. 2016).
- EUDEM je DMR koji obuhvaća područje Europe, publiciran u sklopu Copernicus programa, kojim upravlja Europska komisija te DG Enterprise i Industry. EUDEM je

dobiven ponderiranom kombinacijom poboljšanih ASTER podataka s SRTM podacima. Ideja je bila kombinirati prednosti oba DMR-a s dodatnim poboljšanjem pomoću novog hidrografskog skupa podataka i NEXTMap podacima. Objavljen je u listopadu 2013. godine s razlučivošću od 1 lučne sekunde (~30 m). WGS84 mu je horizontalni datum, a vertikalni datum EGM96. Dostupan je na web stranici Europske agencije za okoliš (EEA) ili Europske komisije (Józsa i dr. 2014).

- GTOPO30 je razlučivosti od 30 lučnih sekundi (~1 km) izrađen 1996. godine. Rezultat je EROS (engl. Center for Earth Resources Observation and Science) centra u SAD-u. GTOPO30 pokriva cijelo područje Zemlje (90°S – 90°N, 180°E – 180°W). Razvijen je za upotrebu na regionalnoj i kontinentalnoj razini. Kvaliteta visinskih podataka GTOPO30 modela znatno varira jer je napravljen iz ograničenih i heterogenih podataka, no unatoč tome korišten je u različitim znanstvenim poljima poput geomorfologije, hidrologije, klimatologije itd. Horizontalni datum mu je WGS84 te se odnosi na srednju razinu mora u visinskom smislu (Bašić i Bubble 2007).
- ETOPO1 je publiciran u kolovozu 2008. godine od strane NGDC (engl. National Geophysical Data Center) iz SAD-a. Izrađen je iz globalnih i regionalnih podataka o obalnim linijama, batimetrijskim, topografskim i integriranim batimetrijsko–topografskim podacima. Topografski prostorni podaci većinom su preuzeti iz modela GLOBE i SRTM30. Batimetrijski skupovi podataka su dobiveni od Japanskog oceanografskoga podatkovnog centra (JODC). ETOPO1 osigurava globalnu pokrivenost između 90°S i 90°J u razlučivosti od 1 lučne minute. Horizontalni datum mu je WGS84 dok se u visinskom smislu odnosi na srednju razinu mora. Vertikalna točnost ETOPO1 varira ovisno o različitim skupovima podataka koji su uzeti kao referentni.

### **3 Analiza horizontalne i visinske točnosti digitalnih modela reljefa (DMR-ova)**

Zbog široke upotrebe u geoznanstvenim aplikacijama, neophodno je napraviti ocjenu točnosti DMR-a jer DMR-ovi neizbježno podvrgavaju pogreškama koje se mogu razdvojiti uglavnom na dvije komponente - horizontalnu (pozicijsku) i vertikalnu (visine). Globalni DMR-ovi značajno odstupaju od stvarnosti i podložni su različitoj vrsti pogrešaka, prema mnogim autorima, zbog grubih pogrešaka u prikupljanju podataka, metodologije obrade podataka, nedostatne orijentacije stereoslika, georeferenciranja stereoslika, razmaka između rešetaka, nepoznate kombinacije pogrešaka, ali i geografski ovisno o karakteristikama topografije i kopnenom pokrovu (Rodriguez i dr. 2006; Mukherjee i dr. 2013). Često se koriste kao takvi bez procjene njihove točnosti i pouzdanosti i bez razmatranja pogrešaka koje mogu utjecati na rezultate (Wechsler 2003).

Prije izrade modela nagiba i smjera nagiba, potrebno je kvantificirati i usporediti: horizontalnu i vertikalnu točnost DMR-ova za područje cijele Republike Hrvatske u odnosu na referentne podatke te procijeniti razlike između njih.

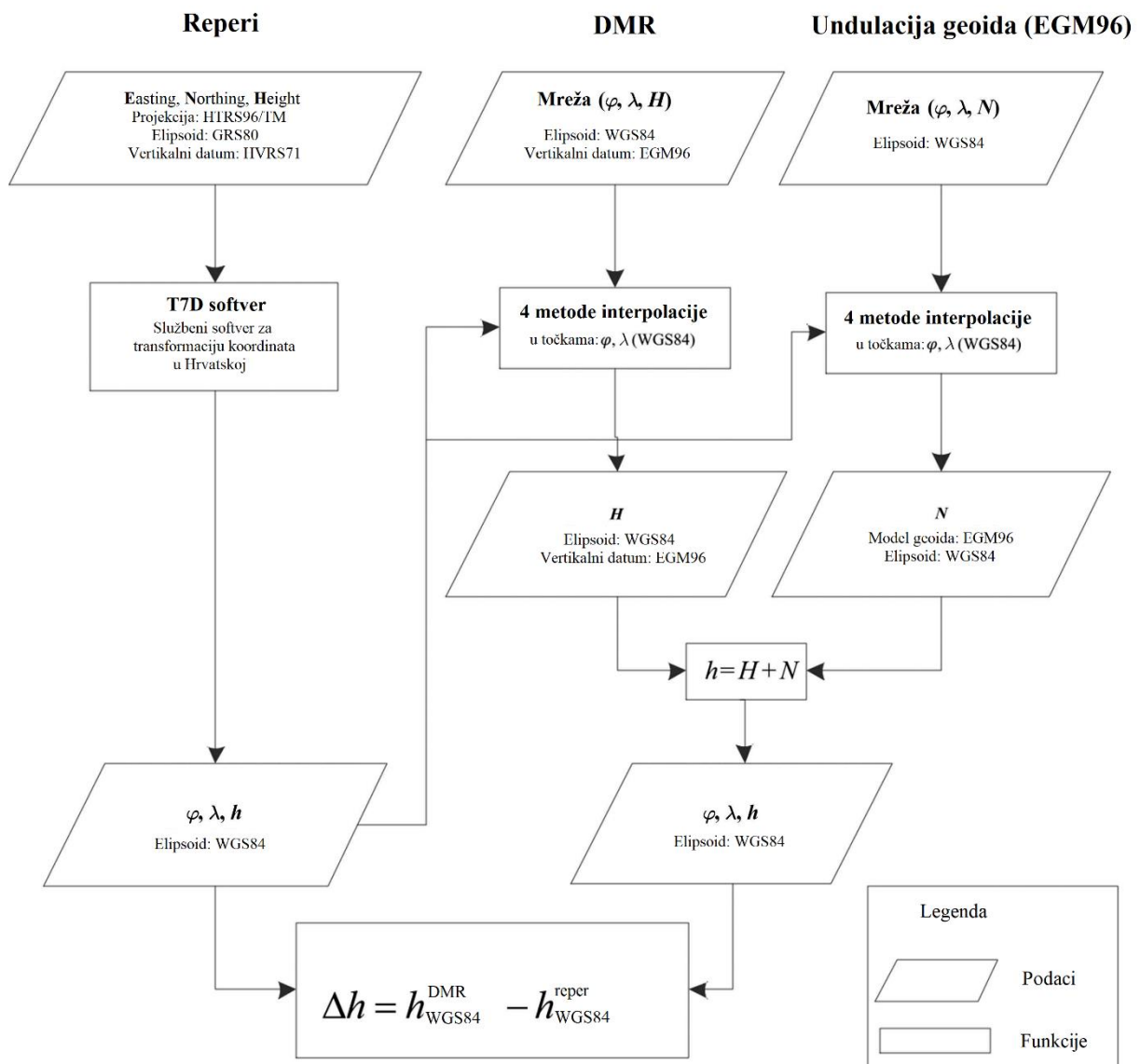
#### **3.1. Referentni visinski podaci**

Referentni podaci repera korištenih za horizontalnu i vertikalnu procjenu točnosti potječu iz državne nivelmanske mreže prvog reda hrvatskog visinskog referentnog sustava 1971.5 (HVR571). HVR571 visinskom sustavu srednja razina mora određena je na temelju pet mareografa za vremensku epohu 1971.5 (Feil i dr. 2003). Podaci sustava koriste se za razne poslove izmjere i znanstvena istraživanja, a o njima brine Državna geodetska uprava (DGU).

U analizi je korišteno 7725 repera danih u normalnom ortometrijskom sustavu visina, što je više nego što je minimalno potrebno, jer potrebno je 20 do 150 poznatih točaka da bi jamčilo pouzdane mjere točnosti (Aguilar, Agüera i Aguilar 2007). Pouzdana točnost referentnih podataka nije poznata, ali je predviđena horizontalna točnost na decimetarskoj razini i vertikalnu točnosti na centimetarskoj razini što je za red veličine točnije od očekivane točnosti analiziranih DMR-ova (Varga i Bašić 2013).

### 3.2. Usklađivanje visinskih sustava

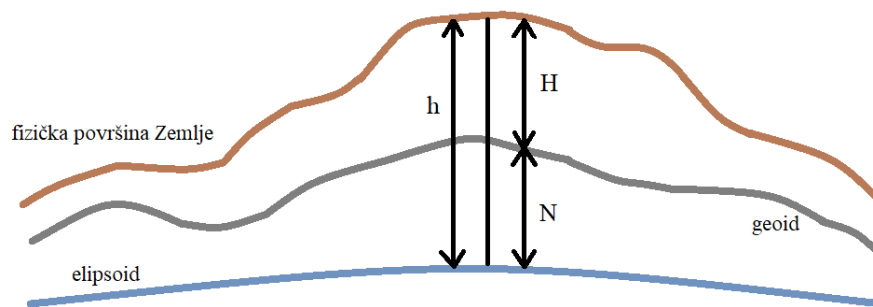
Cijeli postupak usklađivanja visinskih sustava prikazan je u obliku dijagrama na slici 2.



Slika 2: Prikaz usklađivanja vertikalnih datuma repera i DMR-ova te računanje razlike između njihovih visinskih vrijednosti ( $H$  – ortometrijska visina,  $h$  – elipsoidna visina,  $N$  – undulacija geoida)

Globalni DMR-ovi imaju različit visinski sustav u odnosu na referentni visinski datum te da bi se mogli visinski usporediti i uskladiti, DMR-ovi i referentne visine, pretvoreni su u elipsoidne visine na elipsoidu WGS84. Prvo su za svaki referentni reper, čije su visine u HVRS71 sustavu, izvedene visine DMR-ova pomoću četiri metode interpolacije iz svih susjednih ćelija u izvornoj prostornoj razlučivosti svakog DMR-a. Dobivene visine iz DMR-a su ortometrijske visine koje se odnose na globalni geopotencijalni model EGM96. Ortometrijska visina točke izračunata iz srednje razine mora može se razlikovati od elipsoidnih visina zbog varijacije između WGS84 elipsoida i geoida EGM96. EGM96 geoid je ekvipotencijalna ploha koja odgovara srednjoj

razini mora za epohu 1996.0 (Mukherjee i dr. 2013). Da bi interpolirane DMR ortometrijske visine transformirali u elipsoidne visine pomoću formule  $h=H+N$ , potrebne su geoidne undulacije (N) iz EGM96 (Lemoine i dr. 1998). Slika 3 prikazuje geoidnu undulaciju kao razliku u visini između geoida i elipsoida u točki promatranja. Elipsoidna visina (h) je visina iznad površine elipsoida, dok je ortometrijska visina (H) visina iznad površine geoida (Mukherjee i dr. 2013).



Slika 3: Odnos između elipsoidne visine, ortometrijske visine i geoidne undulacije

Koordinate repera pretvorene su u elipsoidne pomoću službenog nacionalnog softvera za transformaciju koordinata T7D i geoidnog modela HRG2009 (Bašić i Bjelotomić 2014). Konačno, razlike (koje se nazivaju i rezidualne vrijednosti) između DMR-ova i repera su izračunate oduzimanjem elipsoidnih visina repera od interpoliranih elipsoidnih visina iz DMR-ova. Te razlike (pogreške) predstavljaju točnost DMR-a i iskazuju se u obliku korijena srednje kvadratne pogreške (RMS pogreške):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)} \quad (1)$$

gdje je  $x_i$  vrijednost varijable, a  $n$  broj točaka u uzorku.

### 3.2.1. Metode interpolacije

U odnosu na vrijednosti ravninskih koordinata referentnih repera u HTRS96/TM projekciji, metode interpolacije u tim koordinatama DMR-a interpoliraju točkaste vrijednosti visina koje bi trebale biti u suglasnosti s visinama repera. Unutar ovog rada, korištene su i analizirane četiri metode interpolacije:

- **Najbliži susjed** je najjednostavnija metoda interpolacija koja odabire i preuzima vrijednost najbližeg piksela i ne uzima u obzir vrijednosti drugih susjednih piksela.

Algoritam interpolacije je vrlo jeftin za implementaciju i često se koristi (Prashanth i dr. 2009).

- **Prirodni susjed** je metoda interpolacije koja najprije izračunava prirodne susjede točke interesa. Prirodni susjedi su one točke koje su povezane sa susjednim Veronoi poligonima (poligoni dobiveni na temelju različitih podskupova ravnine). Vrijednost točke interesa se interpolira u odnosu na težinske udjele najbližih poligona, čije vrijednosti je metoda interpolacije iskoristila da bi stvorila poligon oko točke interesa. Zbog toga se interpolacija često zove "krađa područja". Interpolacija ima prednosti u odnosu na jednostavnije metode interpolacije jer pruža prilagodbu "istinitoj" vrijednosti (URL 1).
- **Bilinearna** interpolacija ili interpolacija prvog reda određuje vrijednost nepoznate točke  $P(x,y)$  na temelju težinskog prosjeka 4 najbliža točke (prostor  $2 \times 2$  piksela). Bilinearna interpolacija nije linearna, već je produkt dviju linearnih funkcija. Najprije se interpolira u smjeru  $x$ , a zatim u smjeru  $y$  ili obrnuto (Prashanth i dr. 2009; URL 2):

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 a_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

gdje su  $x^i$  i  $y^j$  koordinate susjednih piksela, a  $a_{ij}$  funkcija od  $P(i, j)$ .

- **Bikubična** interpolacija je sofisticiranija i proizvodi glađe rubove od bilinearne interpolacije. Vrijednost nepoznate točke dobiva se na temelju težinskog prosjeka 16 susjednih piksela (prostor  $4 \times 4$  piksela) na izvornoj slici. To je metoda koja se najčešće koristi u programima za uređivanje slika, upravljačkim programima pisača i mnogim digitalnim fotoaparatima (Prashanth i dr. 2009; URL 3):

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

### 3.3. Horizontalna točnost DMR-a

Jedan od glavnih problema je otkrivanje horizontalne (položajne, geolokacijske) pogreške geoprostornih podataka (Aguilar, Aguilar i Agüera 2007), jer one značajno utječu na vertikalnu točnost globalnih DMR-ova. Zbog toga je izvršeno georeferenciranje svih DMR-ova te su uspoređene RMS pogreške modela prije i poslije georeferenciranja. Nakon interpolacije vrijednosti repera iz DMR-ova, DMR-ovi su sustavno pomaknuti u svim kombinacijama u malim pomacima u smjeru sjever – jug (geografska širina) i istok – zapad (geografska dužina) te uspoređeni s visinama repera. Najniža RMS pogreška izračunata iz reziduala između pomaknutih modela i repera, ukazuje na najbolje uklapanje i pomake potrebne za ispravno

georeferenciranje. RMS pogreška takvog georeferenciranog modela uspoređuje se s RMS pogreškom originalnog modela te ako je njihova razlika manja od 0,3 metara onda se može smatrati da originalni DMR nema geolokacijsku pogrešku te da nema potrebe za georeferenciranjem:

1.  $RMS_{\text{original}} = h(\text{interpolirano}) - h(\text{kontrolni reper})$
2.  $RMS_{\text{georeferenciran}} = h(\text{interpolirano}) - h(\text{kontrolni reper})$  (4)
3.  $|RMS_{\text{original}} - RMS_{\text{georeferenciran}}| < 0,3 \text{ m}$

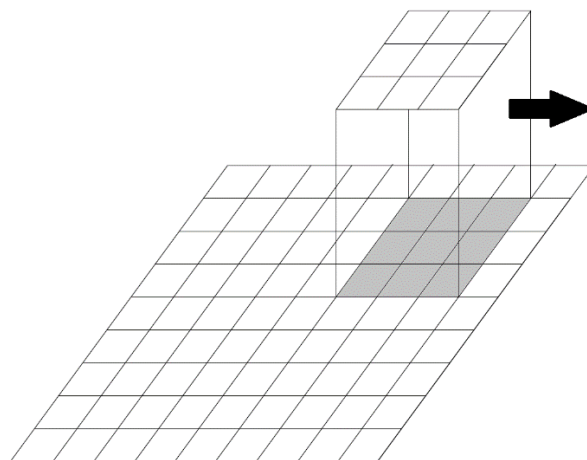
Kriterij  $< 0,3$  metara je izabran iskustveno. Autori poput Rodriguez i drugi (2005), Hirt i drugi (2010), Tachikawa i drugi (2011), Varga i Bašić (2013) i Mukherjee i drugi (2013) koristili su gotovo identičan postupak.



## 4 Geomorfometrijski parametri

DMR je prihvaćen kao model prikladan za analizu terena zbog svoje jednostavne forme pogodne za obradu s raznim računalnim jezicima (Wood 1996). Iako se svi geomorfometrijski parametri odnose na morfologiju zemljine površine, neki od njih mogu biti izračunati izravno iz DMR-a bez poznavanja područja i adekvatnog znanja o geomorfološkim karakteristikama. Takve parametre zovemo osnovni parametri površine zemlje. Iako imaju specifičnih primjena (od hidrologije do biologije), zovu se osnovni parametri jer se odnose na sirove podatke površine zemlje, bez obzira na formativne procese površine (Olaya 2009). Jednom kada imamo prethodno obrađeni i pripremljeni DMR, prva analiza koja se može na njemu izvesti je ona koja se odnosi na njegova geometrijska, statistička i topološka svojstva. Osnovni parametri mogu biti analizirani lokalno ili regionalno pomoću matematičke funkcije.

Nagib i smjer nagiba pripadaju geometrijskim lokalnim parametrima jer se temelje na analizi geometrijskih svojstava površine zemlje i imaju najjače matematičke temelje. Nagib i smjer nagiba mogu se izračunati iz zemljine površine, koja je predstavljena kao površina u matematičkom smislu, koristeći diferencijalnu geometriju. S obzirom na stopu promjene visina DMR-a u smjeru x i y, računanjem prvih parcijalnih derivacija površine dobivamo nagib i smjer nagiba (Wood 1996). Za izračunavanje vrijednosti ćelija rastera geomorfometrijskog parametra korišten je algoritam koji koristi 3x3 lokalni prozor analize (slika 4). Lokalni prozor pomoću vrijednosti 8 susjednih ćelija dobiva vrijednost središnje ćelije na temelju odgovarajuće funkcije. Konačni rezultat je novi raster, dimenzija istih kao i ulazni DMR. Iako se nagib i smjer nagiba mogu izračunati koristeći druge pristupe, metode koje se temelje na formalnom matematičkom pristupu dokazano daju najbolje rezultate (Olaya 2009).



Slika 4: Analiza DMR-a pomoću 3x3 lokalnog prozora

## 4.1. Metodologija

Ako dvodimenzionalnu površinu aproksimiramo pomoću kvadratne funkcije u obliku (Wood 1996):

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f. \quad (5)$$

Prve parcijalne derivacije površine će imati komponente u  $xy$  i tangentnoj ravnini te predstavljaju osnovni koncept u vektorskom računu koji nazivamo gradijent. Gradijent predstavlja polje vektora koje pokazuje u smjeru u kojem se odvija maksimalna varijacija u vrijednostima visina sadržanih u DMR-u. Izraz za gradijent (Wood 1996; Olaya 2009):

$$\nabla Z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

Dok su prve parcijalne derivacije po  $x$  i  $y$  (Wood 1996; Olaya 2009):

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2ax + cy + d \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 2by + cx + e. \quad (7)$$

Dva glavna geometrijska svojstva gradijenta su njegova duljina (modul) i njegov smjer vektora. U geomorfometrijskom smislu njegov modul je nagib, a smjer je smjer nagiba.

### 4.1.1. Nagib terena

Nagib terena je mjera strmine ili stupanj nagiba površine u tangentnoj ravnini. Obično se izražava kao postotak, stupanj ili omjer. Nagib odražava maksimalnu stopu promjene vrijednosti uzvisine i definira se kao (Wood 1996; Hunter i Goodchild 1997; Olaya 2009):

$$NAGIB = \arctg(|\nabla Z|) \quad (8)$$







koji označava kut između  $xy$  ravnine i ravnine tangencijalno na površinu. Iz gore navedenih jednadžbi slijedi da za dobivanje nagiba prvo treba izračunati derivate površine ravnine u smjeru  $x$  i  $y$  koordinate. Budući da želimo izračunati nagib na središnjoj točki prozora analize, postavljanjem lokalnog koordinatnog sustava s ishodištem smještenim u točki interesa, slijedi  $x=y=0$ . Zbog toga formule za prve parcijalne derivacije i nagib poprimaju oblik (Olaya 2009):

$$\frac{\partial z}{\partial x} = d \quad \frac{\partial z}{\partial y} = e \quad (9)$$

$$NAGIB = \arctg(\sqrt{d^2 + e^2}). \quad (10)$$

Klasifikacija nagiba na slikama modela nagiba prikazanih u poglavlju 7 su napravljene u skladu s geomorfološkom klasifikacijom nagiba Međunarodne geografske unije (IGU), prikazanom u tablici 1 **Pogreška! Izvor reference nije pronađen..** Geomorfološka klasifikacija padina temelji se na dominantnim morfološkim procesima koji se aktiviraju u odnosu na strmost, kao i na srodne oblike terena (Bashenina 1966). Skala boja namjerno je obojana različitim bojama, a ne jednom bojom gradirano, zbog lakšeg razlikovanja susjednih razreda skale.

Tablica 1: Geomorfološka klasifikacija nagiba

Nagib (°)	Karakteristike geomorfoloških oblika i procesa
 < 2	<b>Ravnica</b> Kretanja masa se ne zapažaju. Intenzitet spiranja minimalan.
 2 – 5	<b>Blago nagnut teren</b> Spiranje slabo izraženo. Spiranje tala i pojave kliženja mogu biti značajne.
 5 – 12	<b>Nagnuti teren</b> Pojačano spiranje i pojave kretanja masa. Do izražaja dolazi kliženje i tečenje materijala. Teren ugrožen padinskim procesima.
 12 – 32	<b>Značajni nagibi</b> Spiranje je intenzivno. Vrlo snažni padinski procesi. Teren jako ugrožen spiranjem i pojavom kretanja masa.
 32 – 55	<b>Vrlo strm teren</b> Dominira odnošenje materijala. Akumulacijski materijal se tek mjestimično zadržava (tanki pokrivač). Padine su stjenovite i pretežito ogoljene.
 > 55	<b>Strmci, litice (eskarpmi)</b> Dominira osipanje i urušavanje.

#### 4.1.2. Smjer nagiba terena

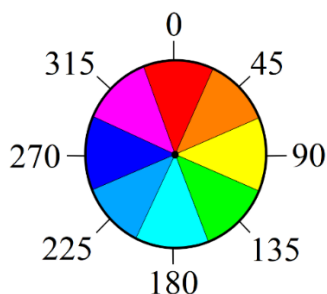
Smjer nagiba terena je smjer horizontalne projekcije linije najstrmijeg nagiba točke ili ćelije rastera (Hunter i Goodchild 1997). Kada se tekući materijal (poput vode) kreće nizbrdo pod utjecajem gravitacijske sile, slijedit će smjer određen parametrom smjera nagiba (Hengl i Reuter 2008). Ovaj parametar je osnova za algoritme računanja smjera protoka (Olaya 2009). Smjer nagiba dobiva se (Hunter i Goodchild 1997; Olaya 2009):

$$SMJER\ NAGIBA = 180^\circ - \arctg\left(\frac{q}{p}\right) + 90^\circ \cdot \frac{p}{|p|} \quad (11)$$

gdje je arctg funkcija u stupnjevima, a  $p$  i  $q$  su prve parcijalne derivacije površine:

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}. \quad (12)$$

Vrijednost smjera nagiba za svaku izračunatu točku predstavlja vrijednost koju bi kompas prikazao za površinu na tom mjestu (URL 4). Smjer nagiba je kružni parametar površine zemlje. Obično se mjeri od sjevera u stupnjevima od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  u smjeru kazaljke na satu. To znači da vrijednost  $x$  i  $x+360^\circ$  opisuju isti smjer. Na slici 5 prikazana je skala boja smjera nagiba koja je napravljena prema uzoru na postojeće izvore (URL 4; Burrough i McDonnell 1998).



Slika 5: Klasifikacija smjera nagiba

#### 4.2. Računalni programi korišteni za računanje geomorfometrijskih modela

Za računanje geomorfometrijskih parametara korišteno je pet programa od kojih su neki besplatno dostupni, a neki pod komercijalnom licencom. Cilj je pronaći različitosti u računanju parametara te ih analizirati.

- **QGIS** (ranije poznat i kao "Quantum GIS") je računalna aplikacija otvorenog koda Geografsko informacijskog sustava (GIS) licencirana pod engl. General Public License (GNU). QGIS je službeni projekt engl. Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Pokreće se na Linux-u, Unix-u, Mac OSX-u, Windows i Androidu. Podržava brojne formate i funkcije vektora, rastera i baza podataka te omogućuje vizualizaciju, upravljanje, uređivanje i analiziranje geopodataka (URL 5; URL 6). Za računanje geomorfometrijskih parametara pruža alat analiza terena, engl. Terrain analysis.
- **MATLAB**, skraćeno od engl. Matrix Laboratory, licencirani je program MathWorks korporacije koja koristi programski jezik visoke razine i računalno okruženje za

numeričko i matrično računanje te za vizualizaciju i programiranje koji omogućuje brži rad nego s tablicama ili tradicionalnim programskim jezicima. Brojni programski paketi su ograničeni u zadacima koje mogu obavljati, taj problem rješava MATLAB budući da je programibilan te pruža okruženje u kojem možemo obraditi znanstvene podatke koristeći "ugrađene" funkcije i grafičke knjižice koje omogućuju brz pristup metodama obrade i pregleda podataka (URL 7; Heslop 2012). Za računanje geomorfometrijskih modela koristi ugrađenu rutinu.

- **TopoToolbox** program, također MathWorks korporacije, pruža niz Matlab funkcija koje pružaju alate za analizu reljefa i smjerova protoka padalina i materijala iz DMR-ova. Najveća prednost mu je što pruža kvantitativne metode i korisne analitičke GIS alate u ne-GIS okruženju. Algoritam računanja mu se temelji na matričnoj algebri i tehnikama obrade slika. Pruža fleksibilan i korisniku prilagodljiv softver za istraživanja u hidrologiji, glaciologiji i geomorfologiji (Schwanghart i Kuhn 2010; URL 8).
- **Surfer** je moćan i licencirani program Golden Software korporacije za crtanje kontura i 3D kartiranje površina. Okrenut je prema korisniku te ga koriste brojne struke jer se prikazi generiraju brzo i lako te pruža brojne metode za tumačenje podataka. Koristi algoritme interpolacije kako bi iz nepravilno raspoređenih XYZ podataka stvorio mrežu jednako razmaknutih podataka (Golden Software 2014).
- **Global Mapper** je jednostavna i pristupačna GIS aplikacija za rad s kartama i prostornim podacima razvijena u Blue Marble Geographics-u. Aplikacija je podržana na Windows-u te omogućuje pristup preko 250 vrsta formata prostornih podataka. Pruža odgovarajuću razinu funkcionalnosti ovisno o iskustvu korisnika. Aplikacija sadrži napredne alate za analizu i obradu podataka te izravan pristup zajedničkim prostornim bazama podataka (URL 9).

### 4.3. Statističke varijable korištene za analizu parametara

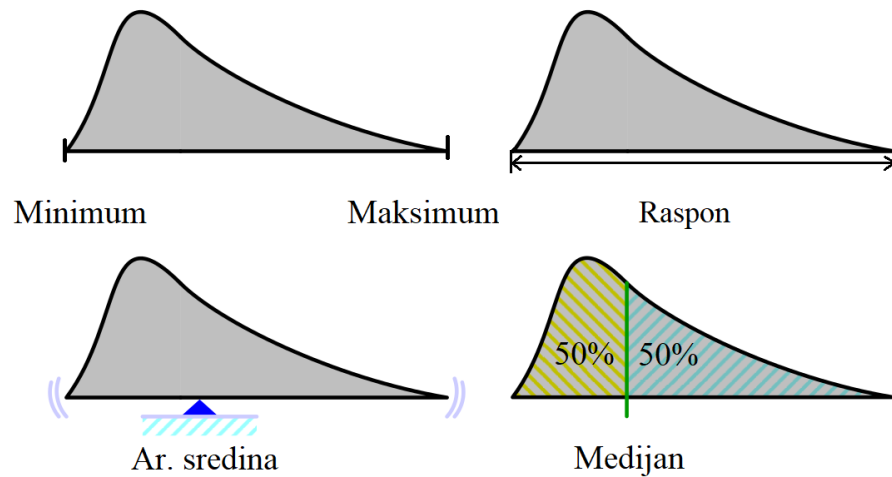
Razlike između geomorfometrijskih parametara, dobivenih različitim programom i različitim ulaznim DMR-om, uspoređene su i analizirane na temelju statističkih varijabli dobivenih iz rastera nagiba i smjera nagiba:

- Minimum – najmanja vrijednost skupa podataka
- Maksimum – najveća vrijednost skupa podataka
- Raspon – udaljenost između minimalne i maksimalne vrijednosti skupa podataka
- Aritmetička sredina – težinska sredina, vrijednost skupa podataka dobivena formulom (URL 10):

$$x_{Ar.sredina} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (13)$$

gdje je  $x_i$  vrijednost rastera, a  $n$  broj piksela.

- Medijan – vrijednost skupa podataka za koju vrijedi da je 50% podataka  $\geq$  ili  $\leq$  od te vrijednosti
- RMS pogreška/rezidual (korištena kod razlike rastera)



Slika 6: Minimum, maksimum, raspon, aritmetička sredina i medijan nepravilnog asimetričnog skupa podataka

Na slici 6 prikazan je položaj vrijednosti statističkih varijabli na nekom asimetričnom skupu podataka.

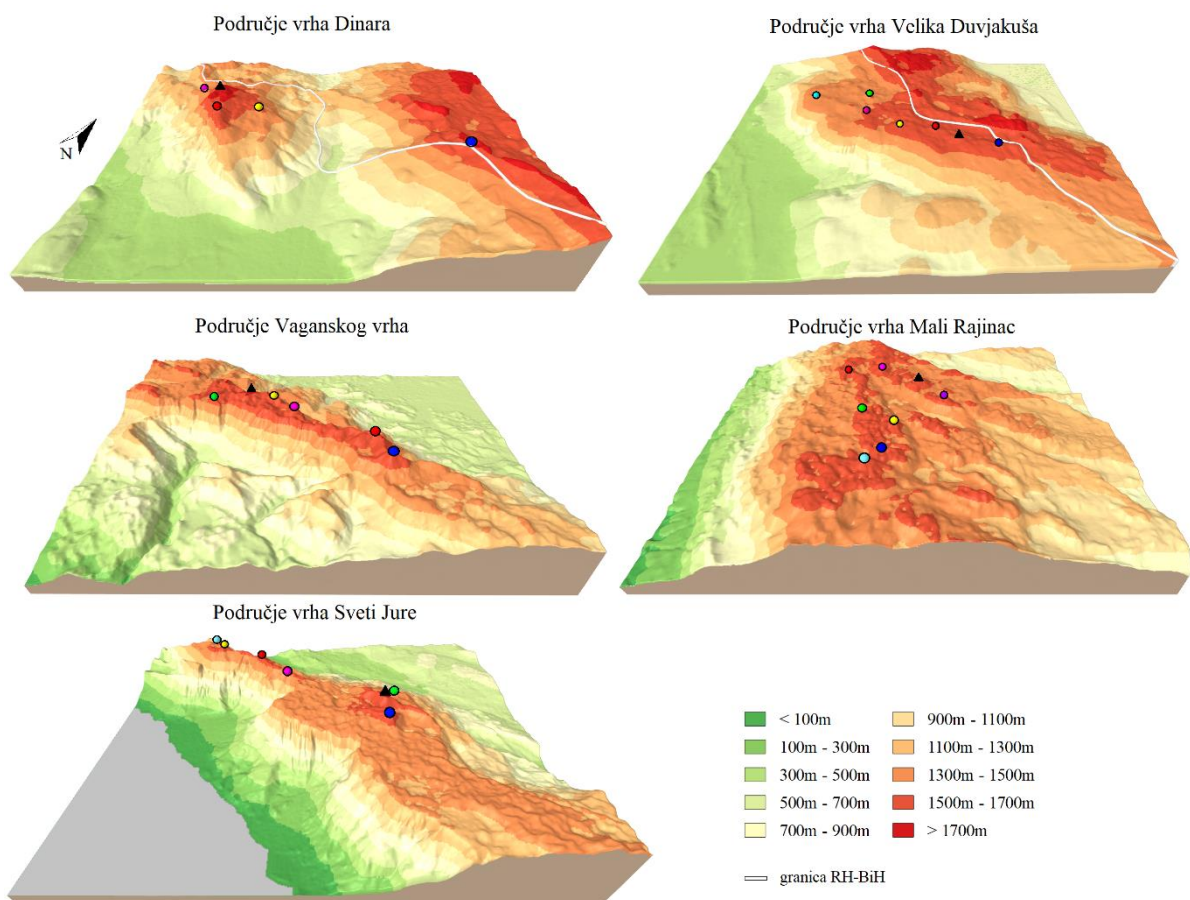
## 5 Područja analize geomorfometrijskih parametara

Najveće krško područje u Europi čine Dinaridi, tipično područje dubokog krša s oštrim krškim oblicima, svojom visinom i dužinom čine oštar zid prodoru mediteranskih utjecaja u unutrašnjost (Sijarić 1974). Izabrana područja analize nalaze se na tri najviše planine u hrvatskim Dinaridima: Dinari, Velebitu i Biokovu. Građene su pretežno od vapnenca i pružaju se u smjeru sjeverozapad-jugoistok te s ostalim nižim planinama čine zaleđe istočno jadranske obale u Hrvatskoj (URL 11; URL 12). Zbog svoje ljepote, položaja, jedinstvene povezanosti s Jadranskim morem, povijesnim ili nekim drugim obilježjima predstavljaju simbole Hrvatske. S ciljem promicanja ovog dijela Republike Hrvatske kao turističkog potencijala i populariziranja planinarenja (tj. aktivnog načina odmora, upoznavanja ljepota Hrvatske, uživanja u prekrasnim gorskim vidicima, kretanja na čistom gorskom zraku) izrađeni su modeli nagiba i smjera nagiba za pet najviših dijelova Hrvatske. Modeli su izrađeni s ciljem lakšeg razumijevanja topografskih ili nekih drugih planinarskih karata tj. kao dodatan alat planinarima i rekreativcima za snalaženje u prostoru i planiranju rute. Modeli nagiba i smjera nagiba izrađeni su i za planinarske staze koje su vektorizirane s obzirom na predloške na stranici planinarenje.hr (URL 13).

Tablica 2: Visine vrhova analiziranih područja s pripadnim simbolima s kojima su prikazani na slikama rezultata

Dinara		Velebit		Biokovo
▲ Dinara (Sinjal) 1831m	▲ Velika Duvjakuša 1708m	▲ Vaganski vrh 1757m	▲ Mali Rajinac 1699m	▲ Sveti Jure 1762m
● Jančiji vrh (JZ) 1768m	● Glavica (I) 1696m	● Sveto brdo 1751m	● Krajačev kuk (Z) 1677m	● Veliki Troglav 1658m
● Gorica (S) 1704m	● Torlakova glavica 1674m	● Babin vrh 1744m	● Veliki Zavižan 1676m	● Sveti Ilija 1642m
● Jančija glavica 1585m	● Jančarska glavica 1669m	● Šegestin 1715m	● Vratarski kuk 1676m	● Miletnjak 1619m
● Bukvin vrh 1530m	● Velika glavica 1579m	● Malovan 1706m	● Veliki Pivčevac 1676m	● Korenik 1556m
	● Orlovača 1546m	● Crljeni kuk 1661m	● Gromovača 1676m	● Seveljev brig 1549m
	● Antića glavica 1541m		● Goli vrh 1669m	● Jagodnik 1534m
			● Veliki Rajinac 1667m	

Pogledom na Popis najviših vrhova Hrvatske (URL 14) područja analize izabrana su na način da prikazuju mjesta na kojima su najzastupljeniji najviši vrhovi, dok je veličina zahvata u prostoru (veličina okvira prikaza) određena na način da obuhvaća većinu planinarskih staza u blizini vrhova. Tablica 2 prikazuje visine nekoliko vrhova (iznad 1500 m) svakog analiziranog područja. Slika 5 prikazuje područja analize i njihove pripadne vrhove koji su nabrojani u tablici 1 s pripadnim simbolima. Najviši vrh, kao predstavnik tog područja, posebno je naznačen trokutićem dok su ostali vrhovi kružićima. S obzirom na nazive najviših vrhova pojedinog područja, analizirano je područje vrha Dinara, vrha Velika Duvjakuša, Vaganskog vrha, vrha Mali Rajinac i vrha Sveti Jure.



Slika 7: 3D prikazi terena područja analize s naznačenim vrhovima

Statistika visina tih područja dobivena je iz SRTM1 modela i prikazana je u tablici 3. Prikazana statistika maksimalnih visina ukazuje na odstupanja u odnosu na podatke iz tablice 2 zbog RMS pogreške DMR-a. Rezultati medijana ukazuju kako na području vrha Mali Rajinac, vrha Velika Duvjakuša i vrha Dinara prevladavaju visine iznad 1100 m što se vidi i iz prikazanog na Slika 7. Na 3D prikazu područja Vaganskog vrha i vrha Biokovo dolazi do izražaja raznoliki reljef zbog naglih visinskih promjena.



Tablica 3: Statistika visina analiziranih područja iz SRTMI

Visina [m]	Dinara		Velebit		Biokovo
	Dinara (Sinjal)	Velika Duvjakuša	Vaganski vrh	Mali Rajinac	Sveti Jure
Minimum	368	337	29	1	0
Maksimum	1837	1896	1746	1681	1758
Ar. sredina	1077	1079	937	1109	648
Medijan	1120	1142	843	1188	623

Svako područje, određeno sa svojim rubnim koordinatama, prikazuje oko 200 km<sup>2</sup> (tablica 4). Koordinate su izražene u obliku geografske širine i duljine.

Tablica 4: Rubne koordinate okvira prikaza analiziranih područja

Dinara		Velebit		Biokovo
Područje vrha Dinara (Sinjal)	Područje vrha Velika Duvjakuša	Područje Vaganskog vrha	Područje vrha Mali Rajinac	Područje vrha Sveti Jure
43,9870° – 44,1068° N	43,8888° – 44,0138° N	44,3007° - 44,4151° N	44,7172° – 44,8416° N	43,2888° - 43,4087° N
16,3282° – 16,5303° E	16,4408° – 16,6432° E	15,4337° – 15,6356° E	14,8974° – 15,1076° E	16,9234° - 17,1215° E

Područje najvišeg hrvatskog vrha, vrha Dinara nalazi se na istoimenoj planini dugoj 84 km koja se proteže uz južnu granicu Hrvatske i Bosne i Hercegovine (URL 15). To područje sadrži i drugi najviši hrvatski vrh, Jančiji vrh (JZ) koji se nalazi na samoj granici. Zbog kriterija koji određuje koja se uzvisina može smatrati zasebnim vrhom, područje ne obiluje visokim zasebnim vrhovima. Oko 20 km jugoistočno niz planinu Dinaru nalazi se vrh Velika Duvjakuša čije područje obiluje visokim zasebnim vrhovima pa je tako označeno još šest vrhova. Sjeverozapadno od Dinare nalazi se Velebit koji je najduža planina u Dinarskom gorju te se proteže oko 140 km uz istočnu obalu Jadranskog mora (URL 16). Tradicionalno se dijeli na Sjeverni, Srednji i Južni Velebit. Na području Južnog Velebita nalazi se njegov najviši vrh, Vaganski vrh, koji je četvrti najviši vrh Hrvatske u čijoj blizini ima nekoliko vrhova viših od 1700 m. Na Sjevernom Velebitu označen je najveći broj zasebnih vrhova. Najviši vrh tog područja je Mali Rajinac koji je jedan od najpreglednijih vrhova te je zanimljivo napomenuti da nekoliko označenih vrhova na tom području pripada strogom rezervatu Hajdučki i Rožanski kukovi. Jugoistočno od Velebita i Dinare, uz obalu, nalazi se planina Biokovo čiji je najviši vrh, Sveti Jure, treći najviši vrh Hrvatske. Vršni greben Biokova je krška visoravan valovitog oblika s brojnim ponikvama (URL 17). Izdvojeno je još šest visokih vrhova koji su udaljeni tek tri do četiri kilometra od obale.

## 6 Rezultati ocjene horizontalne i visinske točnosti DMR-ova

### 6.1. Metode interpolacije

Rezultati tablice 5 pokazuju RMS pogreške pojedinog DMR-a u odnosu na vrijednosti referentnih repera nakon korištenja pojedine metode interpolacije. S obzirom na rezultate, uviđa se kako metoda interpolacije ne utječe znatno na iznos RMS-a kod DMR-ova visoke rezolucije kao što su AW3D30, EUDEM i SRTM1. Iznenađujuće je to kako metoda prirodnog susjeda s obzirom na svoju definiciju ne daje pouzdanije rezultate od metode najbližeg susjeda. Značajne razlike između bilinearne i bikubične metode kreću od SRTM15 pa prema grubljim DMR-ovima. Najveće razlike su kod ETOPO1 modela između najjednostavnije metode - najbliži susjed, za koju RMS iznosi 44,1 m te bikubične metode za koju RMS iznosi 28,1 m. Prema rezultatima, najbolje vrijednosti za gotovo sve DMR-ove daje bikubična metoda interpolacije što je za očekivati jer je najviše sofisticirana. Iz tog razloga je bikubična metoda uzeta kao konačna za interpoliranje vrijednosti referentnih repera.

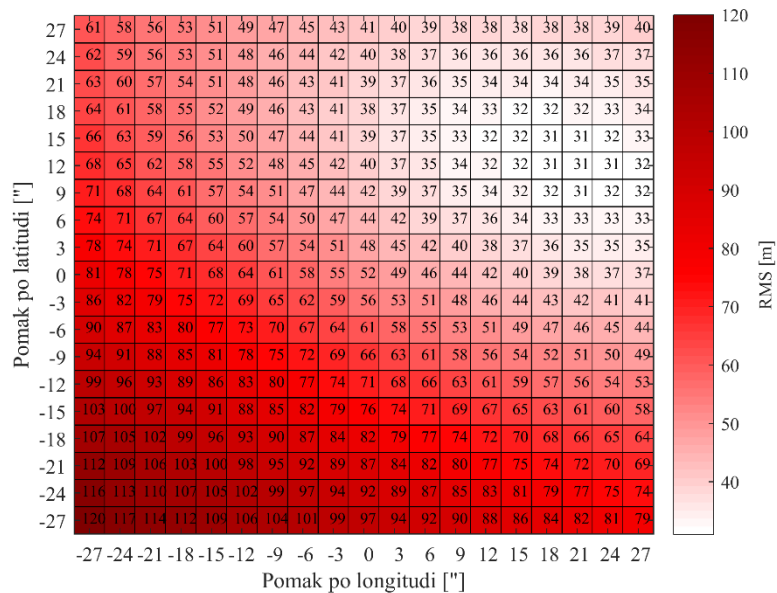
Tablica 5: RMS pogreške (m) DMR modela dobivene nakon primijene određene metode interpolacije

DMR	Metoda interpolacije			
	Najbliži susjed	Prirodni susjed	Bilinearna	Bikubična
SRTM1	4,8	4,8	4,6	4,6
EUDEM	5,2	5,2	5,0	5,0
AW3D30	5,8	5,8	5,7	5,7
SRTM3	7,4	7,4	6,4	6,1
ASTER	8,4	8,4	8,2	8,3
SRTM15	15,8	15,8	12,1	9,8
SRTM30	38,4	38,4	33,4	28,1
ETOPO1	44,1	44,1	35,1	30,0
GTOPO30	57,8	57,8	52,7	51,6

### 6.2. Horizontalna pogreška digitalnih modela reljefa

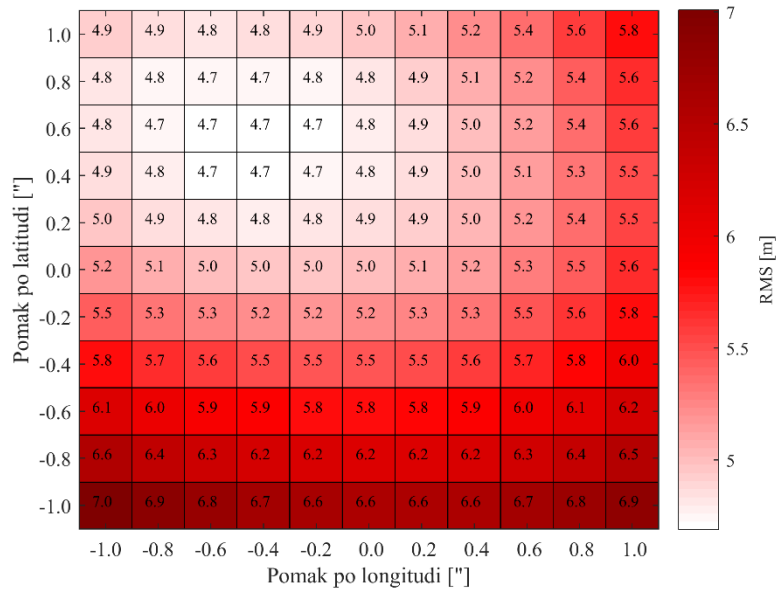
S obzirom na postavljeni kriterij, koji odlučuje o postojanju geolokacijske pogreške, tablica 6 pokazuje apsolutne horizontalne pomake (") globalnih DMR-ova te njihovu vertikalnu točnost prije i poslije georeferenciranja. Pozitivne vrijednosti pomaka za geografsku širinu ukazuju na pomak prema sjeveru, dok za geografsku dužinu pomak na istok. Zbog kriterija, modeli AW3D30, SRTM1, SRTM3 i SRTM15 nisu pomaknuti što ukazuje da su razlike između tih DMR-ova i referentnih podataka zanemarive te ne utječu značajno na daljnja računanja iz DMR-ova. Za ostale DMR-ove, pomak se kretao u smjeru geografske širine od -0,7 do +12,0

lučnih sekundi i u smjeru geografske dužine od -9,0 do +18 lučnih sekundi. Najveći pomak i najbolje poboljšanje vertikalne točnosti ima GTOPO30, gdje je njegov RMS nakon georeferenciranja smanjen sa 51,6 m na 31,0 m. Na slici 8 je vizualno prikazano kako se najbolji RMS (bijela boja) nalazi na pomaku za +12" sjeverno te +18" istočno. Iako poboljššan, zbog RMS pogreške od 31,0 m predstavlja najlošiji analizirani DMR.



Slika 8: Horizontalni pomaci i raspored RMS pogrešaka GTOPO30 modela

Značajno je i poboljšanje EUDEM modela, čija je vertikalna točnost poboljšana za 0,3 m (slika 9) te se time približio SRTM1 modelu čija je vertikalna točnost najbolja. Rezultati ukazuju na to da pomaknuta verzija DMR-ova ima znatno bolju suglasnost s vrijednostima referentnih repera od onih izvorno danih koji zbog pogreške geolokacije imaju degradiranu vertikalnu točnost (Rodriguez i dr. 2005; Hirt i dr. 2010; Tachikawa i dr. 2011).



Slika 9: Horizontalni pomaci i raspored RMS pogrešaka EUDEM modela

Tablica 6: Horizontalni pomaci globalnih DMR-ova s obzirom na referentne repere te vertikalna točnost prije i poslije georeferenciranja

DMR	Apsolutni pomak (")		RMS (m)	
	Geo. širina	Geo. dužina	Prije	Poslije
SRTM1	-	-	4,6	-
EUDEM	+0,6	-0,6	5,0	4,7
AW3D30	-	-	5,7	-
SRTM3	-	-	6,1	-
ASTER	-0,7	-0,5	8,3	7,7
SRTM15	-	-	9,8	-
SRTM30	+12,0	-9,0	28,1	18,2
ETOPO1	+6,0	+0,0	30,0	29,4
GTOPO30	+12,0	+18,0	51,6	31,0

### 6.3. Vertikalna točnost DMR-a

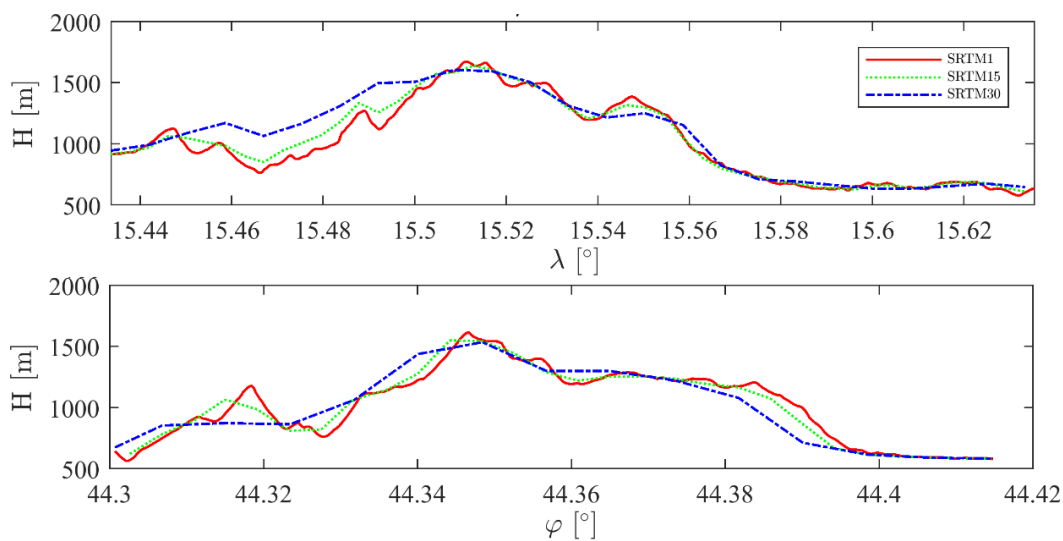
U tablici 7 sažeta je statistika visinskih razlika između referentnih repere i georeferenciranih DMR-ova. Za SRTM1 vertikalna točnost izražena kroz RMS pogrešku je znatno bolja od službene vrijednosti koja iznosi ~10 m (Mukul i dr. 2015). Za razliku od SRTM1, proklamirana točnost EUDEM modela (2.9 m RMS) je manja (GRAS 2014). SRTM3 verzija 3 ima vrlo blisku vrijednost s jednosekundnim AW3D30. Iako je ASTER jednosekundni DMR, ima veću RMS pogrešku od SRTM3 modela koji je rezolucije 3 lučne sekunde. Vrijednosti aritmetičke sredine SRTM1, EUDEM, AW3D30, SRTM3 i SRTM15 su vrlo blizu 0. Iako GTOPO30 ima veću

RMS pogrešku od ETOPO1, njegove ekstremne vrijednosti su znatno veće, odnosno manje. Vidljiva je korelacija između pada rezolucije i pada vertikalne točnosti.

Tablica 7: Statistika visinskih razlika između referentnih repere i DMR-ova

DMR	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ar. sredina (m)	RMS (m)
SRTM1	-36,6	68,8	-0,9	4,6
EUDEM	-28,0	32,9	0,0	4,7
AW3D30	-30,5	185,0	-0,9	5,7
SRTM3	-36,2	66,6	-0,7	6,1
ASTER	-55,0	58,0	-2,9	7,7
SRTM15	-62,4	92,0	-0,4	9,8
SRTM30	-121,0	160,0	2,6	18,2
ETOPO1	-174,0	271,0	7,2	29,4
GTOPO30	-96,0	418,0	5,2	31,0

Na slici 10 vidljiv je primjer razlika u detaljnosti između tri modela visina koji su izabrani kao predstavnici za 1", 15" i 30" rezoluciju. Modeli su uspoređeni za područje Vaganskog vrha po profilima s obzirom na visine koje se mijenjaju po longitudi ( $\lambda$ ) za konstantnu latitudu ( $\varphi$ ) koja odgovara sredini promatranog područja te po latitudi za konstantnu longitudu koja također odgovara sredini područja. Ako se zbog najviše vertikalne točnosti SRTM1 model uzme kao referentni onda se može pratiti kako modeli niže rezolucije odstupaju od referentnog. SRTM30 ispunjava očekivano te grubo prati oblik SRTM1 profila. SRTM15 za svoju nisku rezoluciju vrlo dobro prati SRTM1 model, posebice za područje vrijednosti  $15.1^\circ$ - $15.63^\circ$  longitude.



Slika 10: Histogrami usporedbe modela visina za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za lat=konst.) i po latitudi (za lon=konst.)

## 7 Rezultati i analiza geomorfometrijskih parametara

Modeli geomorfometrijskih parametara, nagib i smjer nagiba, izračunati su za svih pet područja iz analiziranih DMR-ova uz korištenje 5 različitih programa. Analiza je podijeljena u dva dijela:

- analiza geomorfometrijskih modela izračunatih iz istog DMR-a s obzirom na različiti program
- analiza modela izračunatih iz različitih DMR-ova korištenjem jednog programa.

Zbog opsežnosti podataka, za svaku analizu izdvojeni su samo neki reprezentativni primjeri. Na slikama analiziranih područja usporedno s prikazom modela geomorfometrijskih parametara prikazani su ili isječci s Digitalne ortofoto karte iz 2011. godine (DOF5) ili s Topografske karte mjerila 1:200000 (TK200) kako bi se lakše shvatili rezultati parametara te kako bi se imao orijentir u prostoru. Isječci su preuzeti s Geoportala Državne geodetske uprave (URL 18).

### 7.1. Analiza modela s obzirom na isti DMR, a različite programe

Kao prvi primjer izabrano je područje vrha Sveti Jure za koje su iz SRTM1 modela izračunati modeli nagiba i smjera nagiba korištenjem 5 različitih programa. Ne postoji referentni model nagiba s kojim bi se modeli različitih programa mogli usporediti te ocijeniti njihova točnost. SRTM1 model izabran je zbog najveće vertikalne točnosti u odnosu na druge testirane modele.

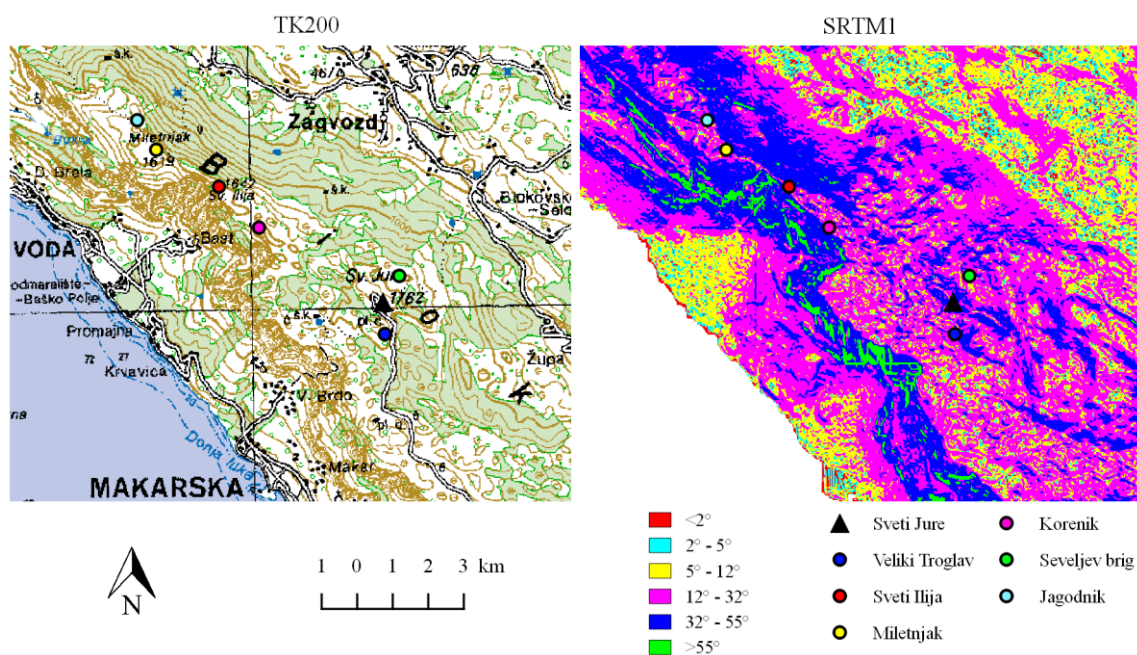
#### 7.1.1. Modeli nagiba

Svi programi potvrđuju kako maksimalni nagib premašuje najstrmiji nagib iz geomorfološke klasifikacije (55°) koji je izračunat TopoToolbox programom. Prema tablici 9 i geomorfološkoj klasifikaciji, vrijednosti medijana i aritmetičke sredine nalaze se u intervalu (12°-32°), što znači da na području prevladavaju značajni nagibi. Vrijednosti medijana govore i da u rasponu nagiba, njegova prava polovica se nalazi oko vrijednosti 20° što znači da su dominantniji nagibi manji od 20°.

Tablica 8: Statistika modela nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure korištenjem svih programa

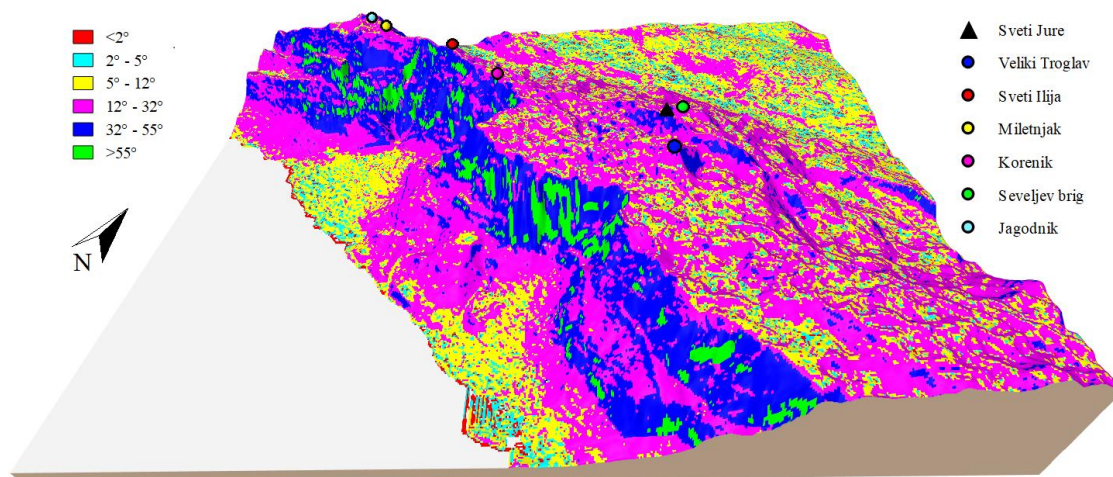
Program	Nagib (°)				
	Minimalni	Maksimalni	Raspon	Ar. sredina	Medijan
QGIS	0,4	78,3	77,9	22,7	20,9
MATLAB	0,9	76,7	75,8	19,7	17,9
TopoToolbox	1,8	81,2	79,4	23,2	21,7
Surfer	0,0	79,2	79,2	22,9	21,1
Global Mapper	0,0	76,7	76,7	19,6	17,7

Na slici 11 prikazan je model nagiba izračunat QGIS programom iz SRTM1 usporedno s isječkom iz TK200. Područje vrha Sveti Jure na planini Biokovo zanimljivo je za analizu zbog izrazito strmih nagiba s jugozapadne strane planine koji se dobro vide na isječku TK200 na kojima su slojnice vrlo guste. Guste slojnice predstavljaju veliku visinsku promjenu na kratkoj udaljenosti, tj. strm nagib. Model nagiba potvrđuje kako na tom dijelu gdje su slojnice najgušće prevladavaju nagibi  $32^{\circ}$ - $55^{\circ}$  i  $>55^{\circ}$  te kako oponašaju oblik slojnica.



Slika 11: TK200 isječak i model nagiba za područje vrha Sveti Jure iz SRTM1 uporabom QGIS programa

Slika 12 prikazuje 3D model visina područja vrha Sveti Jure preko kojega su preklapljene boje modela nagiba sa slike 11. 3D model prikazuje na kojoj lokaciji odgovara pojedini nagib s obzirom na legendu nagiba i legendu vrhova sa slike 11. Iz 3D modela je lakše za uočiti oblik planine sa svih strana, vrh grebena planine te smještaj vrhova s obzirom na greben.



Slika 12: 3D model visina područja vrha Sveti Jure iz SRTMI s prikazom lokacije razreda nagiba

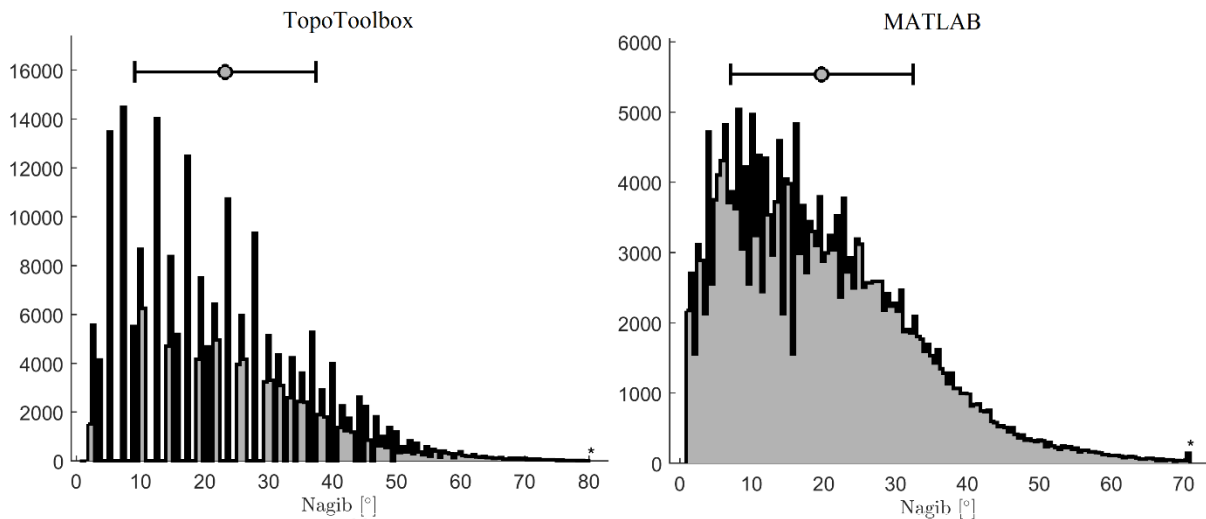
Razlike između vrijednosti nagiba dobivenih različitim programom prikazane su u tablici 10. Rezultati programa uspoređivani su u parovima te poredani s obzirom na veličinu njihove razlike izražene kroz RMS pogrešku (rezidual). Medijan i aritmetička sredina ukazuju na to kako razlike između modela najviše poprimaju male iznose, ali i prevagu negativnih iznosa razlike. Najmanja razlika obzirom na RMS rezidual je između Global Mapper-a i MATLAB programa dok je najveća između MATLAB-a i TopoToolbox-a programa. Model dobiven TopoToolbox programom nalazi se na posljednja četiri mjesta tablice 9 što ukazuje na to kako se najviše razlikuje od ostalih modela.

Tablica 9: Statistika razlika modela nagiba iz SRTMI za područje vrha Sveti Jure dobivenih različitim programima (poredani prema rastućim RMS rezidualima)

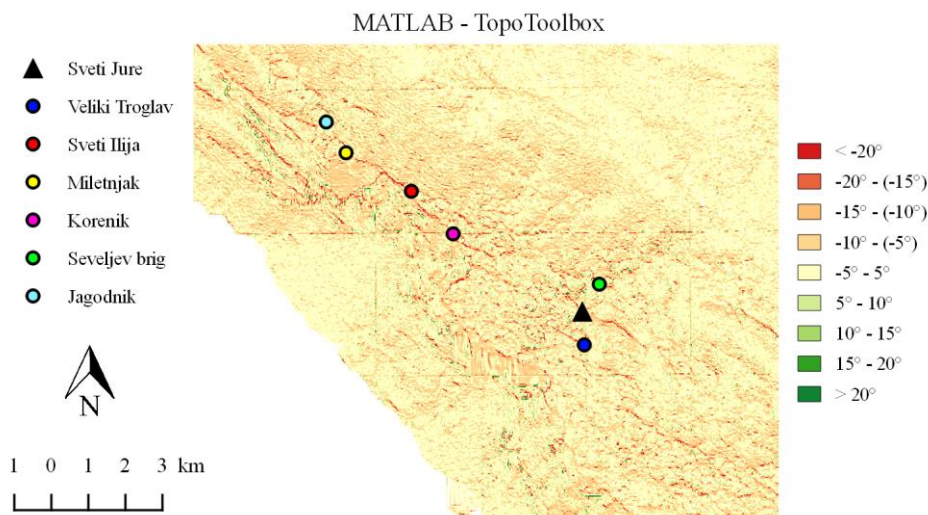
Program A	Program B	$\Delta \text{Nagib}_{\text{programA-programB}} (^{\circ})$					
		Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan	RMS
Global Mapper	MATLAB	-25,7	2,5	28,2	0,0	0,0	0,5
QGIS	Surfer	-19,9	25,6	45,5	-0,2	-0,2	1,3
Global Mapper	Surfer	-9,0	0,0	9,0	-3,2	-2,7	4,1
MATLAB	Surfer	-9,0	0,0	9,0	-3,2	-2,7	4,1
Global Mapper	QGIS	-25,9	14,1	40,0	-3,0	-2,6	4,1
MATLAB	QGIS	-25,9	14,1	40,0	-3,0	-2,6	4,1
QGIS	TopoToolbox	-40,4	63,8	104,2	-0,3	-0,3	5,1
TopoToolbox	Surfer	-63,7	49,8	113,5	0,1	0,0	5,3
Global Mapper	TopoToolbox	-52,1	57,0	109,1	-3,3	-2,8	6,5
MATLAB	TopoToolbox	-52,1	57,0	109,1	-3,3	-2,8	6,5



Slika 13 prikazuje histograme vrijednosti TopoToolbox i MATLAB modela. Ordinata prikazuje broj piksela za pojedinu vrijednost nagiba. Model TopoToolbox je vrlo razveden, tj. s prekidima te za neke nagibe uopće nema vrijednosti, dok nekim vrijednostima pripada velik broj piksela. Za razliku od TopoToolbox-a, na histogramu MATLAB modela vidimo kontinuiranost i postojanje svih nagiba, od minimalnog do maksimalnog.

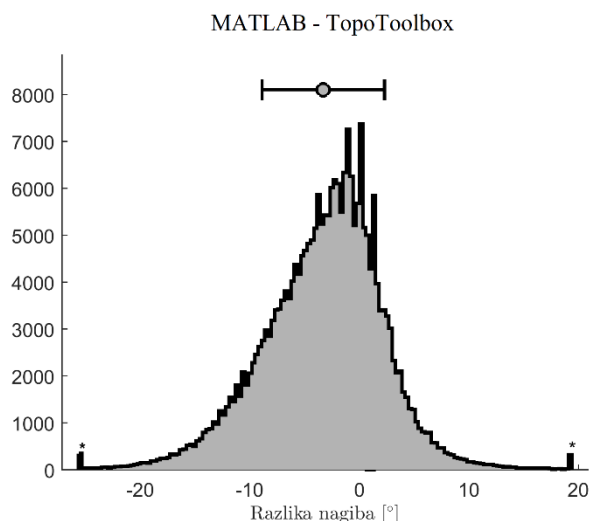


Slika 13: Histogrami raspodjele vrijednosti piksela prema nagibu za modele TopoToolbox i MATLAB programa



Slika 14: Razlike između modela nagiba TopoToolbox i MATLAB programa za područje vrha Sveti Jure

Na slikama 14 i 15 prikazana je razlika između MATLAB i TopoToolbox modela. Najviše vrijednosti pripada intervalu od  $-10^\circ$  do  $5^\circ$ . Ekstremne razlike nalaze se na vrhovima grebena te na mjestima gdje su nagibi veći od  $50^\circ$ .



Slika 15: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici nagiba između modela nagiba MATLAB i TopoToolbox programa za područje vrha Sveti Jure

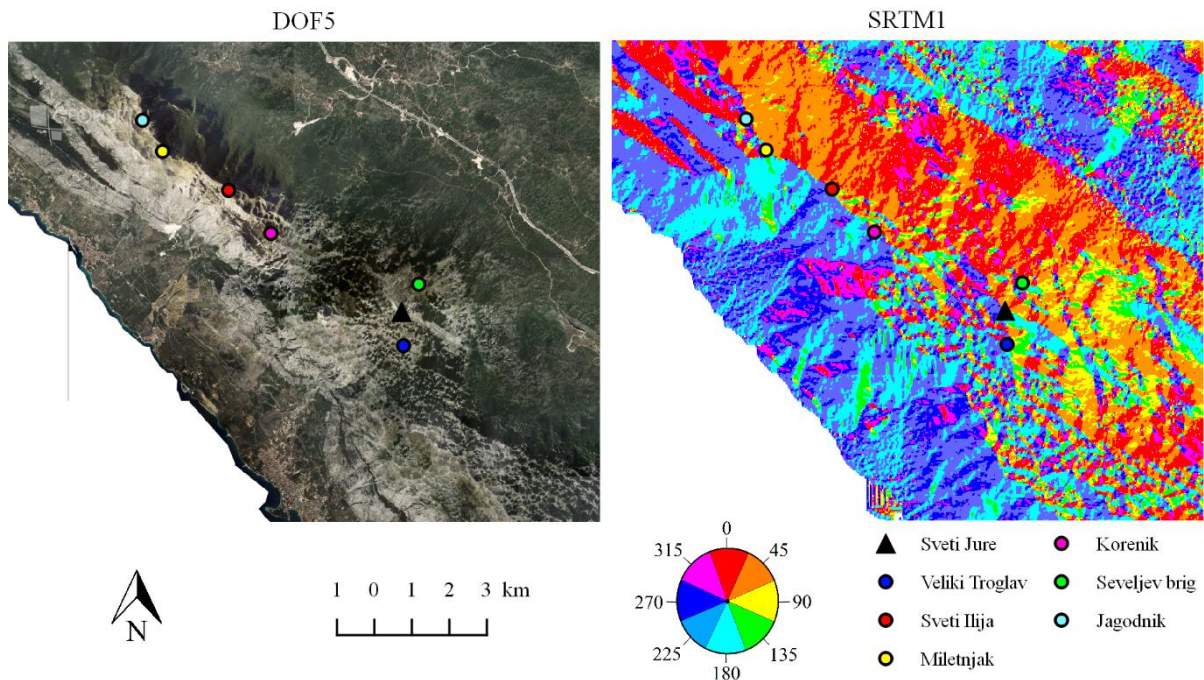
### 7.1.2. Modeli smjera nagiba

Rezultati za drugi geomorfometrijski parametar, smjer nagiba, prikazani su u tablici 11. S obzirom na definiciju ovog parametra, vrijednosti za maksimalni i minimalni smjer nagiba su logične. Vrijednosti raspona potvrđuju da za sve programe postoje gotovo svi smjerova nagiba ( $\sim 360^\circ$ ). No za smjer nagiba najviše ima smisla promatrati medijan vrijednosti jer u rasponu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  on označava pravu polovicu, a ne teorijsku od  $180^\circ$ . Medijan je manje osjetljiv na nepravilnu distribuciju od aritmetičke sredine. Ako se promatra i slika 15, vidljivo je kako prevladavaju smjerovi crveno-narančaste boje tj. u smjeru sjevera i sjeveroistoka te kontra smjerovi cijan i svijetloplave boje tj. u smjeru juga i jugozapada. Za QGIS, MATLAB i Surfer medijan vrijednost veća je od  $180^\circ$  što znači da su na tim modelima ipak dominantniji smjerovi nagiba veći od  $180^\circ$ .

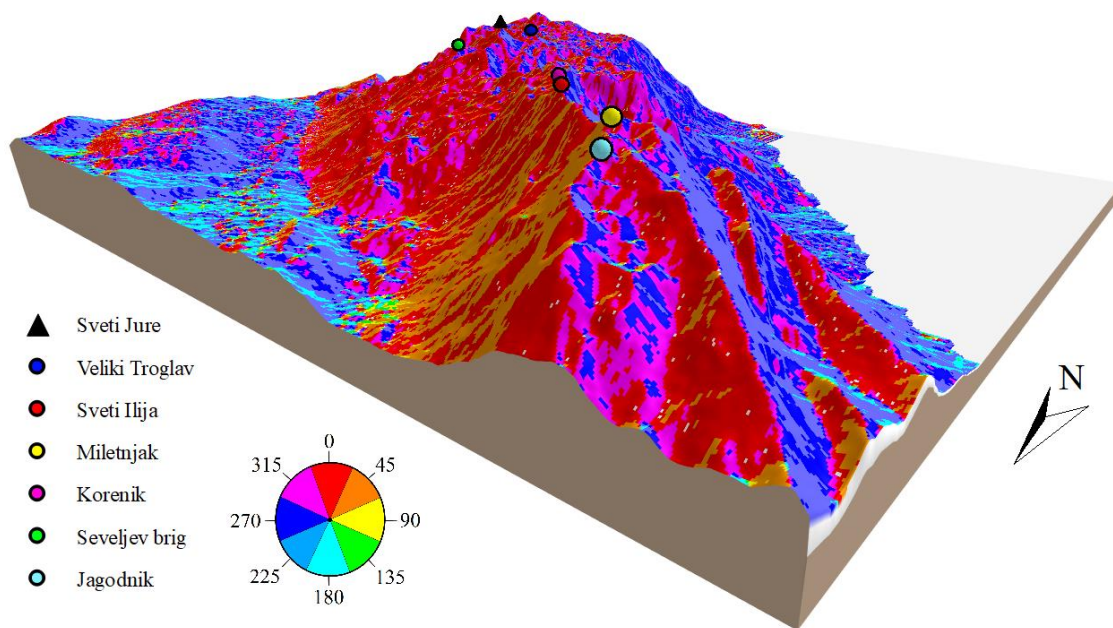
Tablica 10: Statistika modela smjera nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure korištenjem svih programa

Program	Smjer nagiba ( $^\circ$ )				
	Minimalni	Maksimalni	Raspon	Ar. sredina	Medijan
QGIS	0,2	359,8	359,6	169,8	193,9
MATLAB	0,6	358,1	357,5	172,7	197,9
TopoToolbox	0,0	360,0	360,0	155,6	163,4
Surfer	0,5	360,0	359,5	173,2	194,5
Global Mapper	0,0	359,0	359,0	153,1	158,0

Na slici 16 jasno je vidljiva granica između spomenutih kontra smjerova, a granicu upravo predstavlja greben vrha planine. Iz DOF5 isječka vidljivo je kako je južna i jugozapadna strana ogoljela stijena bez vegetacije, a sva mjesta okrenuta prema sjeveru i sjeveroistoku su pošumljena.



Slika 16: DOF5 isječak i model smjera nagiba za područje vrha Sveti Jure iz SRTM1



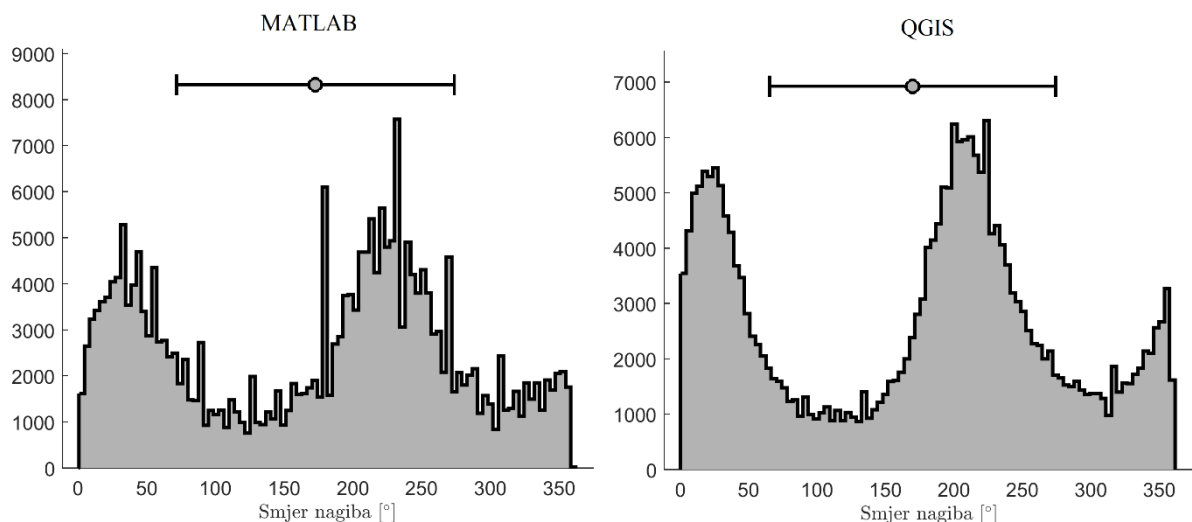
Slika 17: 3D model visina područja vrha Sveti Jure iz SRTM1 s prikazom lokacije razreda smjera nagiba

Na slici 17, isto kao i za model nagiba, na 3D modelu visina preklapljenе su boje modela smjera nagiba iz slike 16. Model je zarotiran s obzirom na smjer sjevera kako bi se vidjele obje kontra usmjerene strane planine koje dijeli greben. U tablici 12 prikazane su razlike između vrijednosti smjera nagiba dobivenih različitim programom. Najmanje razlike su između TopoToolbox i Surfer programa, a najveće između MATLAB i QGIS-a. Medijan i aritmetička sredina su malih iznosa za svaku razliku programa te variraju u predznaku. Za slučaj smjera nagiba, QGIS program se najviše razlikuje od ostalih. Za razliku od tablice 10 razlike nagiba, ovdje neke minimalne i maksimalne razlike poprimaju vrlo velike iznose na mjestima gdje na maloј površini dolazi do brojnih smjerova nagiba.

Tablica 11: Statistika razlika modela smjera nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure dobivenih različitim programima (poredani prema rastućim RMS rezidualima)

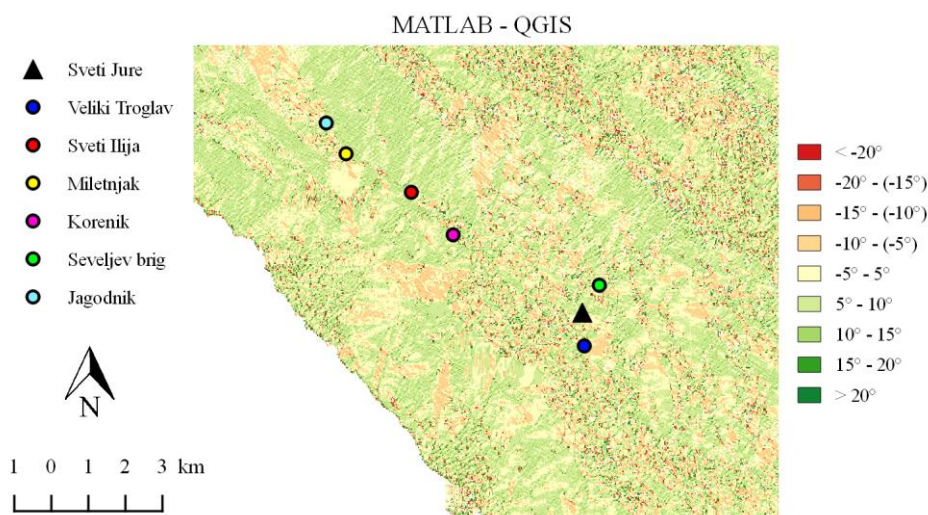
Program A	Program B	$\Delta$ Smjer nagiba <sub>programA-programB</sub> (°)					
		Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan	RMS
TopoToolbox	Surfer	-25,7	24,5	50,3	0,0	0,0	0,2
Global Mapper	TopoToolbox	-14,0	14,0	28,0	-0,4	-0,4	0,8
Global Mapper	Surfer	-180,7	35,8	216,4	-0,8	-0,6	5,3
MATLAB	TopoToolbox	-9,0	9,0	18,0	2,8	4,9	6,6
MATLAB	Surfer	-9,0	9,0	18,0	2,8	4,9	6,6
QGIS	TopoToolbox	-123,7	123,7	247,4	0,0	0,0	6,9
Global Mapper	MATLAB	-30,8	30,4	61,1	-3,3	-5,3	6,9
QGIS	Surfer	-171,9	175,9	347,8	-0,1	0,0	7,7
Global Mapper	QGIS	-166,0	167,7	333,7	-0,8	-0,5	8,7
MATLAB	QGIS	-123,7	116,6	240,3	2,8	4,4	9,7

Na slici 18 prikazani su histogrami raspodjele vrijednosti smjera nagiba dobivenih MATLAB i QGIS programom. Prema obliku, tj. raspodjeli vrijednosti su vrlo slični, no histogram QGIS modela je više uglačan. MATLAB histogram za neke vrijednosti ima iznenađan skok u broju piksela.

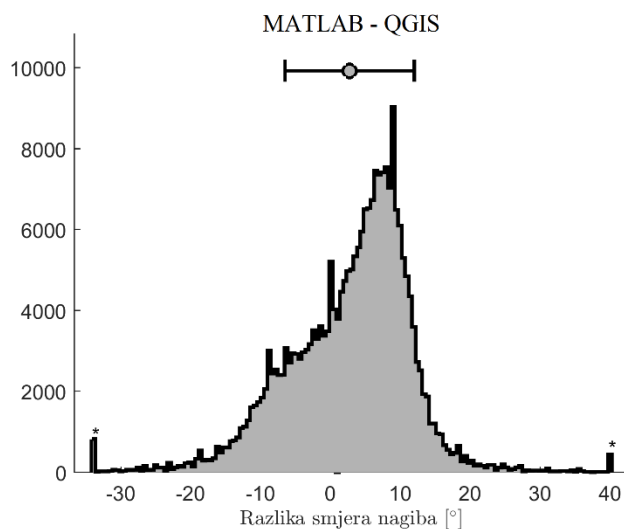


Slika 18: Histogrami raspodjele vrijednosti piksela prema smjeru nagiba za modele MATLAB i QGIS programa

Najveća razlika između programa, MATLAB-a i QGIS-a, vizualizirana je u obliku karte na slici 19 te histograma na slici 20. Histogram prikazuje kako je najveći broj piksela raspodijeljen u intervalu  $\langle -10^\circ, 10^\circ \rangle$ , dok one ekstremne razlike nemaju veliku frekvenciju pojavljivanja. Na histogramu se vidi kako dominiraju razlike pozitivnog predznaka, što potvrđuje i medijan vrijednost iza tablice 12. Karta prikazuje položaj vrijednosti razlika. Vrijednosti manje od  $-20^\circ$  te veće od  $20^\circ$  se javljaju na obali, u zaleđu planine te na planini gdje nema većih nagiba na većem području.



Slika 19: Razlike između modela smjera nagiba MATLAB i QGIS programa za područje vrha Sveti Jure



Slika 20: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici smjera nagiba između modela smjera nagiba MATLAB i QGIS programa za područje vrha Sveti Jure

## 7.2. Analiza modela s obzirom na isti program, a različite DMR-ove

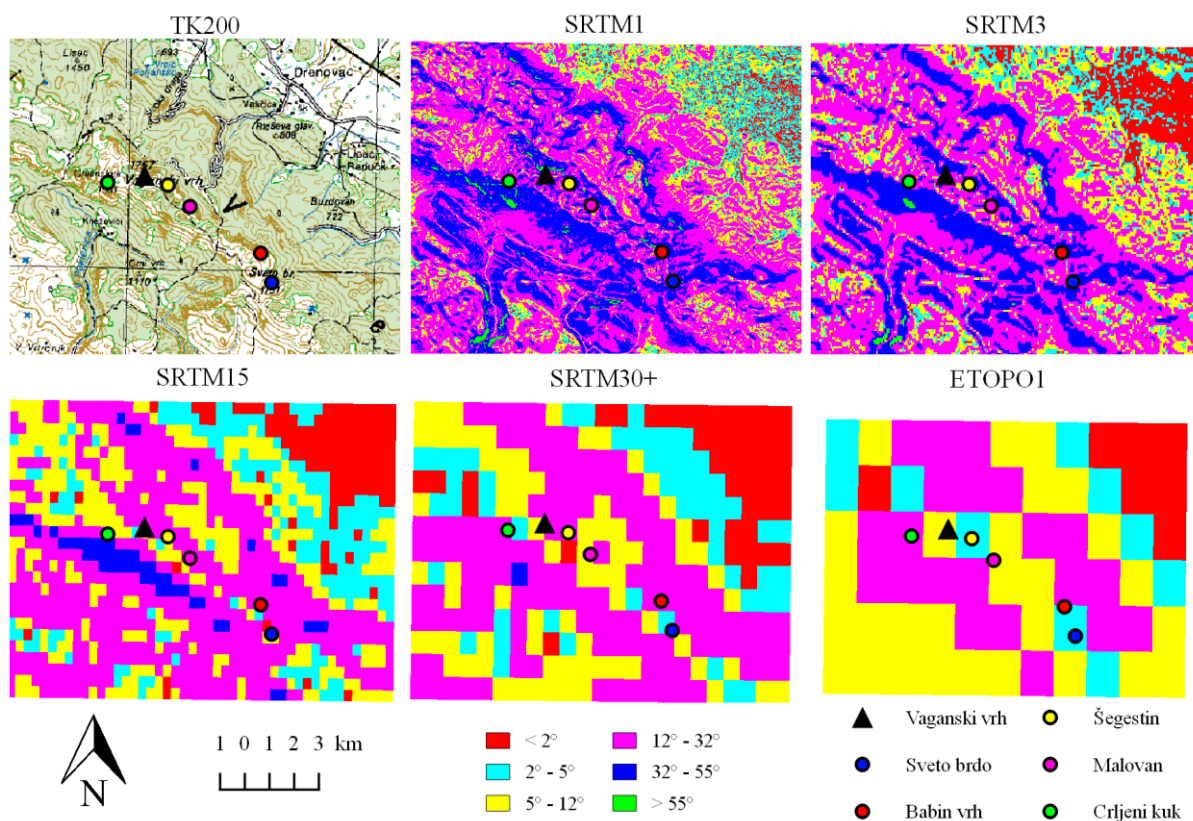
Za analizu modela geomorfometrijskih parametara s obzirom na različiti DMR izabrano je područje Vaganskog vrha.

### 7.2.1. Modeli nagiba

U tablici 13 prikazani su rezultati nagiba iz svih analiziranih DMR-ova koji su izračunati uporabom QGIS programa. DMR-ovi su poredani prema padajućoj vertikalnoj točnosti tj. rastućim RMS pogreškama. S obzirom na takav poredak može se promatrati kako se vrijednosti nagiba razlikuju u odnosu na SRTM1 model, koji se može smatrati referentnim jer je visinski najtočniji. Vrijednosti aritmetičke sredine do ASTER modela ukazuje da na promatranom području prevladavaju značajni nagibi ( $12^{\circ}$ - $32^{\circ}$ ). Jednosekundni DMR-ovi, EUDM i AW3D30, imaju vrlo slične vrijednosti nagiba sa SRTM1. Iako ASTER ima manju vertikalnu točnost od SRTM3, daje bliže rezultate sa SRTM1. Isti slučaj je i ako se promatraju vrijednosti ETOPO1 i GTOPO30. Na slici 21 prikazani su neki od modela nagiba kao predstavnici svoje rezolucije DMR-a. Modeli nagiba su uspoređeni s TK200 isječkom kako bi se s obzirom na njega uvidjela korelacija oblika njegovih najgušćih slojnica s razredima nagiba modela. Već kod SRTM15 gubi se dojam da razredi nagiba oponašaju oblik slojnica te se uviđa nepostojanje nagiba većih od  $55^{\circ}$ . S obzirom na rezultate prikazane u tablici 13, slika 21 samo potvrđuje kako su SRTM15, SRTM30+ i ETOPO1 vrlo grubi i ne previše korisni za detaljne analize.

Tablica 12: Statistika modela nagiba iz svih DMR-ova za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa (poredani prema rastućim RMS pogreškama DMR-ova)

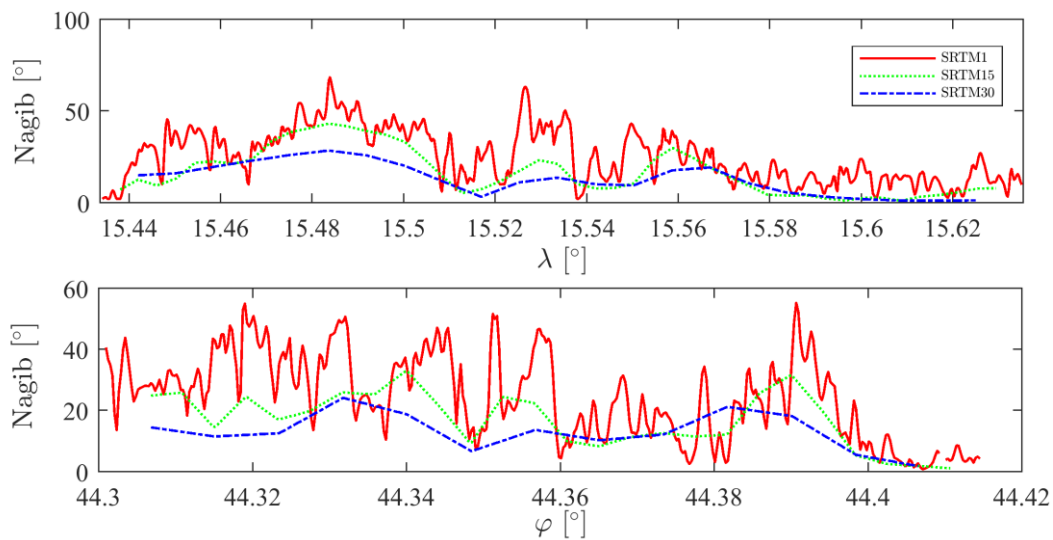
Globalni DMR	Nagib (°)					RMS DMR-a (m)
	Minimalni	Maksimalni	Raspon	Ar. sredina	Medijan	
SRTM1	0,5	79,6	79,1	21,8	21,3	4,6
EUDEM	0,5	78,3	77,8	20,2	18,9	4,7
AW3D30	0,5	76,6	76,1	23,0	22,9	5,7
SRTM3	0,2	69,5	69,3	19,7	18,7	6,1
ASTER	0,5	77,6	77,1	22,6	21,7	7,7
SRTM15	0,1	45,5	45,4	13,3	11,5	9,8
SRTM30+	0,3	32,4	32,1	10,7	10,0	18,2
ETOPO1	0,3	17,3	17,0	8,7	9,0	29,4
GTOPO30	0,2	33,7	33,5	10,7	10,3	31,0



Slika 21: TK200 isječak i modeli nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM3, SRTM15, SRTM30+ i ETOPO1

Kao još jedan primjer razlika DMR-ova, slika 22 prikazuje usporedbu SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ modela po profilima s obzirom na nagib po istom pravilu za longitudu ( $\lambda$ ) i latitudu ( $\varphi$ ) kao i na slici 10. Kod usporedbe prema nagibu dolazi do velikog izražaja visoka rezolucija

tj. detaljnost SRTM1 modela. SRTM15 pokušava pratiti oblik SRTM1 rezultata, dok je SRTM30 znatno grublji te su oba siromašni sa podacima koji se naglo izmjenjuju kod SRTM1.



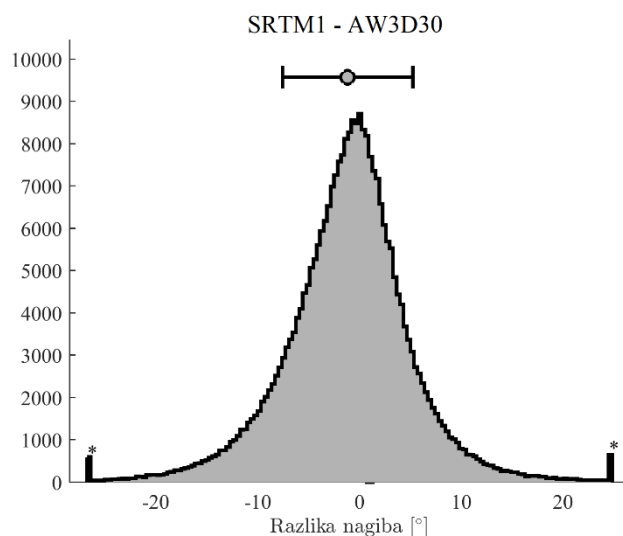
Slika 22: Histogrami usporedbe modela nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za lat=konst.) i po latitudi (za lon=konst.)

S obzirom na prethodne tablične i slikovne primjere kako 3", 15", 30" i 1' modeli odstupaju od 1" modela, ali i s obzirom na RMS pogrešku, statistika razlika biti će promatrana samo između tri 1" modela (SRTM1, EUDEM i AW3D30). Tablica 14 prikazuje kako najmanje razlika ima između SRTM1 i AW3D30 što je pomalo iznenađujuće, jer AW3D30 ima veću RMS pogrešku od EUDEM-a. Iako su svi DMR-ovi iz tablice 1", na nekim vrlo malim površinama zbog pogrešaka dolazi do značajnih razlika. Aritmetička sredina i medijan ipak potvrđuju kako je najviše razlika blisko vrijednosti nula. Raspodjela razlika između najsličnijih modela po nagibu prikazana je na slici 23.

Tablica 13: Statistika razlika modela nagiba iz SRTM1, AW3D30 i EUDEM za područje Vaganskog vrha dobivenih QGIS programom (poredani prema rastućim RMS rezidualima)

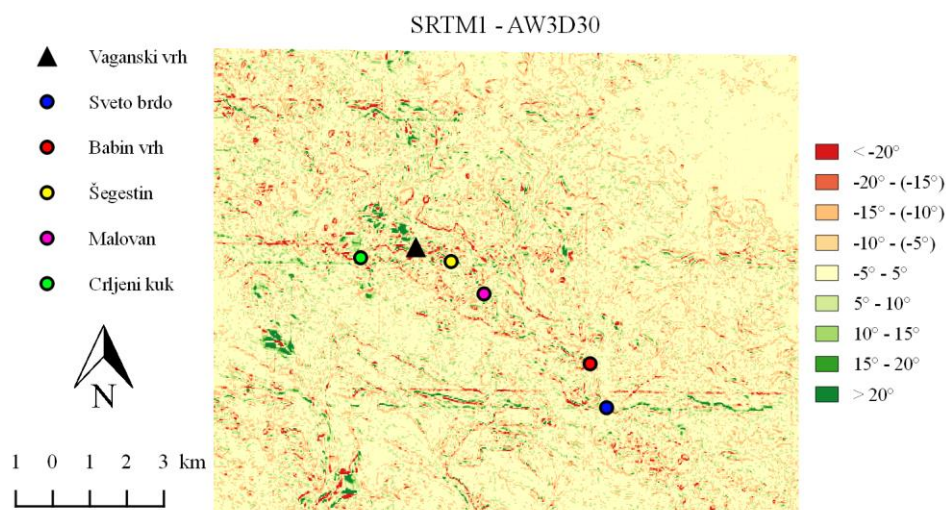
DMR A	DMR B	$\Delta \text{Nagib}_{DMR_A-DMR_B} (^{\circ})$					
		Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan	RMS
SRTM1	AW3D30	-57,2	54,3	111,4	-1,2	-0,9	6,5
SRTM1	EUDEM	-46,6	57,9	104,6	1,7	1,5	7,3
EUDEM	AW3D30	-56,7	63,7	120,5	2,9	2,2	8,8





Slika 23: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici nagiba između SRTM1 i AW3D30 modela korištenjem QGIS programa za područje Vaganskog vrha

Većina razlika raspodijeljena je u intervalu  $\langle -10^\circ, 10^\circ \rangle$ . Zastupljenost tog intervala potvrđuje i slika 24. Vidljiva su mjesta ekstremnih razlika, za koja vrijedi da su neka upravo mjesta gdje dolazi do promjene razreda nagiba.



Slika 24: Razlike između SRTM1 i AW3D30 modela nagiba za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa

### 7.2.2. Modeli smjera nagiba

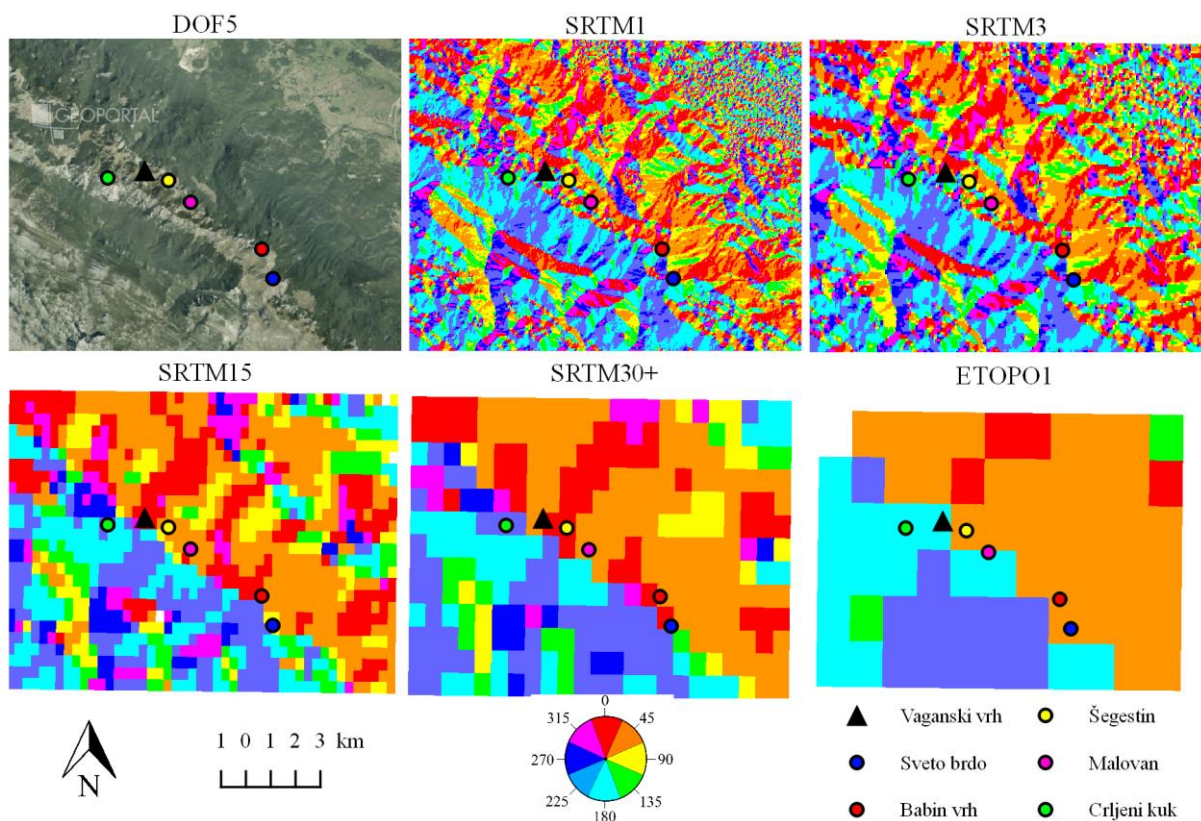
Istom analogijom kao i za modele nagiba, najprije je prikazana statistika pojedinog DMR-a za vrijednosti smjera nagiba u tablici 15 koji su izračunati uporabom QGIS programa. S obzirom na poredak DMR-ova prema rastućim RMS pogreškama, SRTM1 model se može ponovno smatrati referentnim. EUDEM, AW3D30 te ASTER imaju vrlo slične vrijednosti smjera nagiba sa SRTM1. Iako slika 25. prikazuje kako područjem dominiraju smjerovi nagiba prema

jugu/jugozapadu i sjeveroistoku, s obzirom na vrijednosti medijana, na ovom području ipak prevladavaju nagibi <180°. Kako rezolucija opada tako se i rezultati medijana i aritmetičke sredine počinju razlikovati no za primijetiti je kako SRTM30+, GTOPO30 te posebice ETOPO1 vrijednosti znatno odstupaju od ostalih.

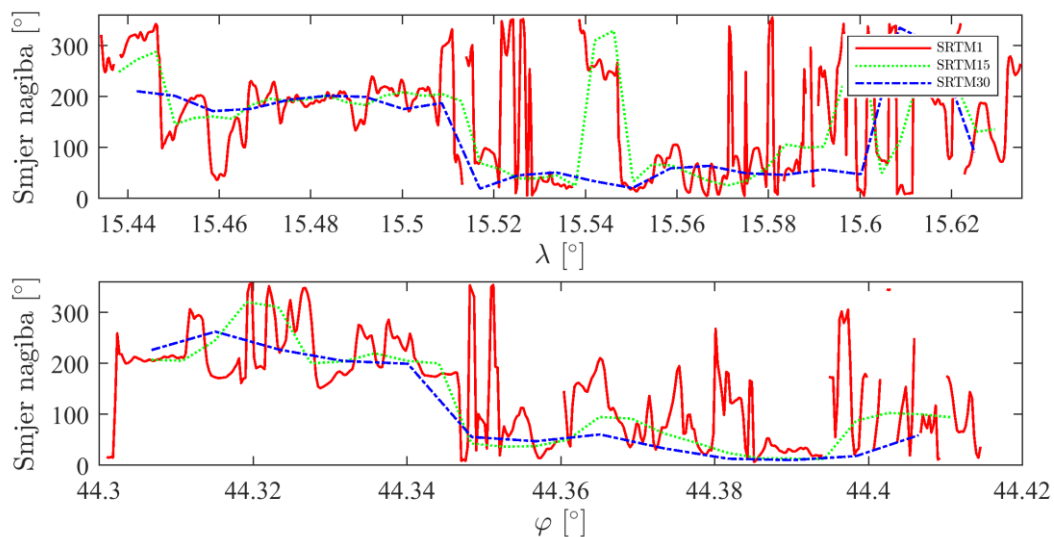
*Tablica 14: Statistika modela smjera nagiba iz svih DMR-ova za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa (poredani prema rastućim RMS pogreškama DMR-ova)*

Globalni DMR	Smjer nagiba (°)					RMS DMR-a (m)
	Minimalni	Maksimalni	Raspon	Ar. sredina	Medijan	
SRTM1	0,2	359,8	359,6	162,8	173,9	4,6
EUDEM	0,2	359,8	359,6	161,2	172,4	4,7
AW3D30	0,2	359,8	359,6	165,4	175,1	5,7
SRTM3	0,1	359,9	359,8	159,6	169,9	6,1
ASTER	0,2	359,8	359,6	165,6	176,4	7,7
SRTM15	0,3	359,8	359,5	142,4	135,5	9,8
SRTM30+	0,4	359,9	359,5	128,8	106,3	18,2
ETOP01	16,6	223,0	206,4	108,3	52,0	29,4
GTOPO30	0,2	358,0	357,8	125,8	95,8	31,0

Razlike između modela koje je dala tablica jasno se vide na slici 25. Za prikaz su izabrani modeli izračunati iz istih DMR-ova kao i za nagib, ali su uspoređeni s DOF5 isječkom. Na DOF5 isječku s obzirom na vegetaciju, голу stijenu i sjene može se predočiti kako teren izgleda u stvarnosti, gdje je vrh planine te kako su pojedini dijelovi usmjereni. SRTM1 i SRTM3 modeli jasno daju predodžbu terena jer zbog svoje detaljnosti stvaraju 3D iluziju prikaza terena. Već kod SRTM15 gubi se ta 3D iluzija. ETOPO1 dokazuje koliko je grub s obzirom na to da na njemu postoje velike površine istog smjera nagiba.



Slika 25: DOF5 isječak i modeli smjera nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM3, SRTM15, SRTM30+ i ETOPO1



Slika 26: Histogrami usporedbe modela smjera nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za lat=konst.) i po latitudi (za lon=konst.)

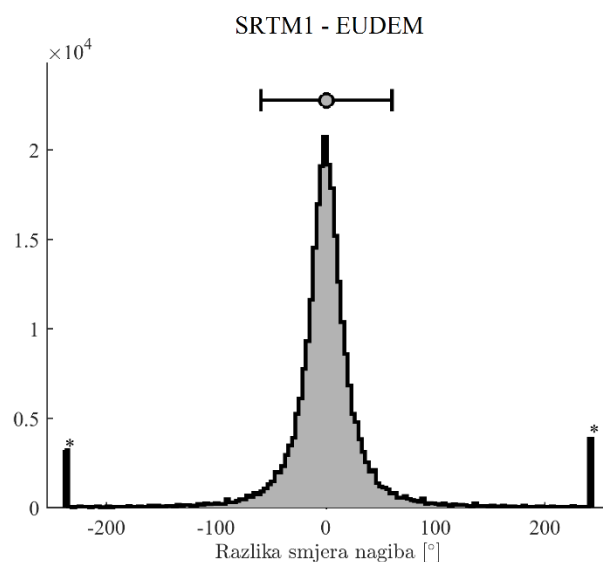
Kao još jedan primjer usporedbe razlika i za smjer nagiba su tri modela uspoređena po profilima, SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ (slika 26). Za neke piksele program nije izračunao

smjerove nagiba iz SRTM1 modela. Vidljiva je visoka rezolucija tj. detaljnost SRTM1 modela, dok je SRTM15 po vrijednostima bliži SRTM30+ koji je vrlo grub. Zanimljivo je za uočiti ponašanje SRTM1 modela po longitudi od 15.57° do 15.62°. Na tom dijelu dolazi do naglih promjena smjera nagiba, koje je zbog toga osjetljivo te na tom području dolazi do najvećih razlika u jednosekundnim modelima koji su svaki na svoj način interpretirali smjer nagiba. Tablica 16 prikazuje statistiku razlika između tri jednosekundna DMR-a. Aritmetička sredina i medijan ukazuju na to da je većina razlika bliska vrijednosti nula, tj. da se modeli ne razlikuju značajno. Velike iznose minimalnih i maksimalnih razlika ne treba interpretirati točno tako kako je izračunao program. Naime, na mjestu gdje je razlika između modela npr. 350° ne znači da su programi izračunali smjerove nagiba različitih za 350° već da je jedan izračunao 350°, drugi 0° (360°) te su zapravo različiti za 10°.

Tablica 15: Statistika razlika modela smjera nagiba iz SRTM1, AW3D30 i EUDEM za područje Vaganskog vrha dobivenih QGIS programom (poredani prema rastućim RMS rezidualima)

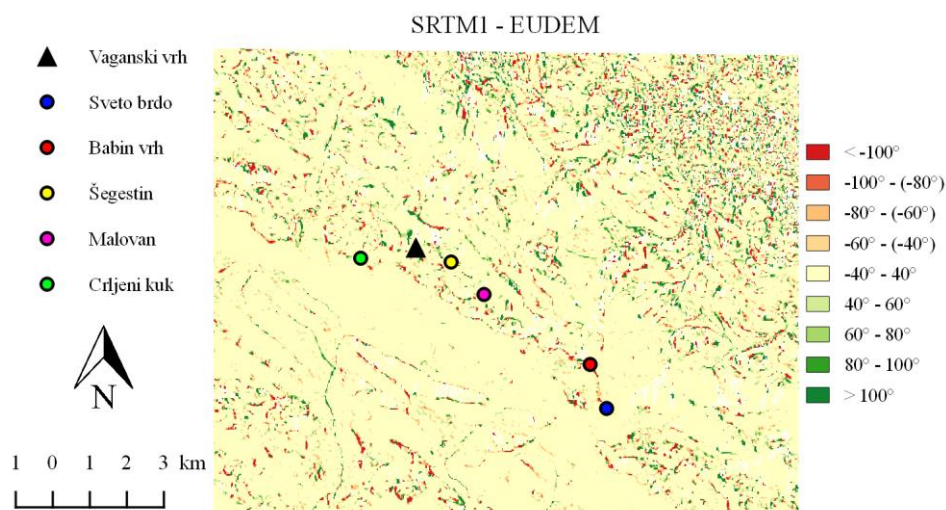
DMR A	DMR B	$\Delta$ Smjer nagiba <sub>DMR_A-DMR_B</sub> (°)					
		Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan	RMS
SRTM1	EUDEM	-332,0	332,0	664,0	1,0	0,0	59,8
SRTM1	AW3D30	-336,0	336,0	672,0	-1,1	-0,1	66,3
AW3D30	EUDEM	-359,5	359,1	718,5	3,7	0,5	94,6

Zbog takve interpretacije ekstremnih razlika, RMS iznosi pogrešaka između modela su veliki. Najmanje se razlikuju SRTM1 i EUDEM model čiji histogram raspodijele razlika prikazuje kako najveći broj piksela ima vrijednosti oko nule (slika 27). Gotovo sve vrijednosti nalaze se u intervalu <-100°, 100°>, ali se na ekstremnim razlikama vidi skok u broju piksela.



Slika 27: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici smjera nagiba između SRTM1 i EUDEM modela korištenjem QGIS programa za područje Vaganskog vrha

Slika 28 prikazuje razlike između modela te su posebno vidljiva mjesta na kojima je došlo do tih ekstremnih razlika. U lijevom dijelu slike prevladavaju mali iznosi razlika, dok su ekstremne razlike linijskih oblika na mjestima grebena. U desnom dijelu slike prevladavaju ekstremne razlike linijskog i točkastog oblika. Ovdje se vidi veza sa slikom 26, jer kako je rečeno, ovdje prevladavaju nagle promjene smjera nagiba.

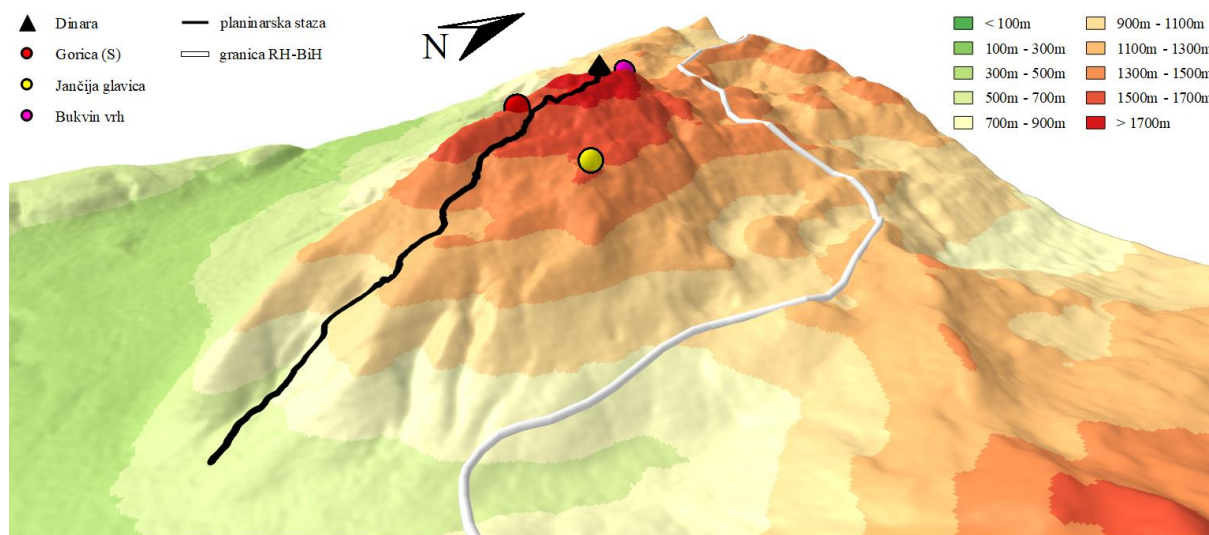


Slika 28: Razlike između SRTM1 i EUDEM modela smjera nagiba za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa

### 7.3. Modeli nagiba i smjera nagiba za planinarske staze

Nakon analize geomorfometrijskih parametara za pet planinskih područja, kao završni dio analize izrađeni su statistički i vizualni prikazi nagiba i smjera nagiba za planinarske staze tih područja. Za svako područje odabrana je po jedna staza, no u ovom poglavlju biti će analizirana

samo staza za područje vrha Dinara dok su rezultati planinarskih staza za ostala područja stavljeni kao prilog. Za računanje parametara staze izabran je QGIS program, a za DMR iz kojeg su izračunati izabran je SRTM1 zbog najviše vertikalne točnosti.



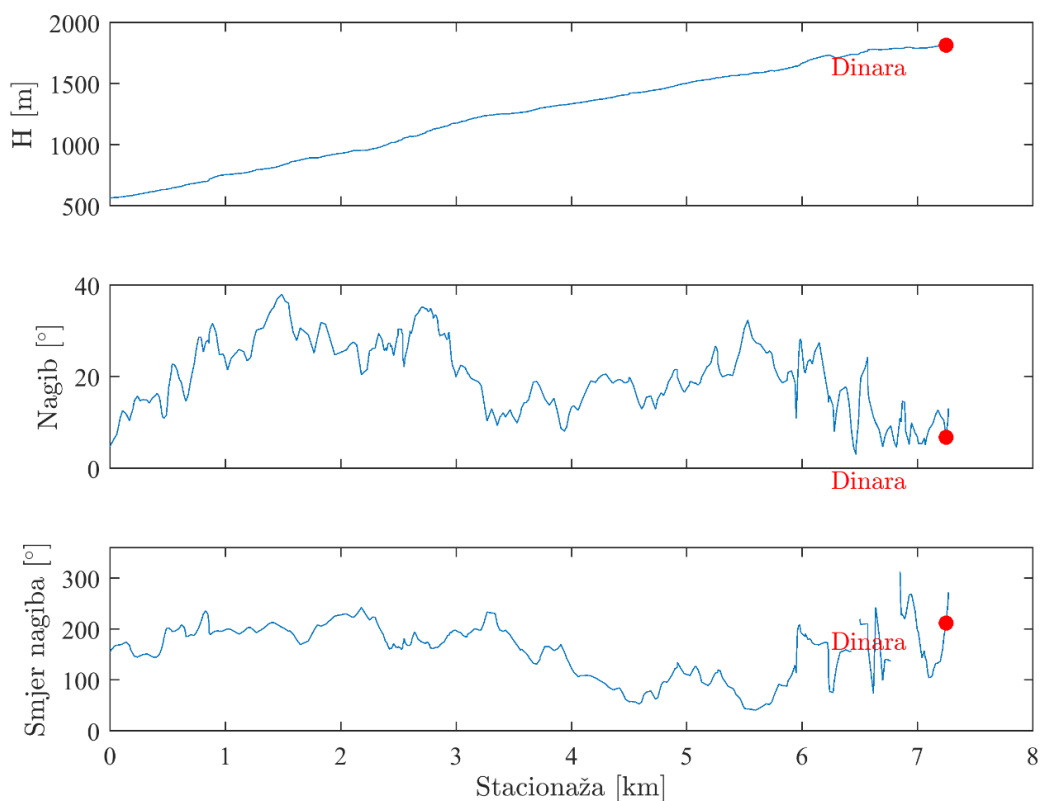
Slika 29: Položaj staze Glavaš-Dinara na 3D modelu područja vrha Dinara

Na slici 29 prikazana je staza Glavaš-Dinara kojoj je polazište u selu Glavaš na visini od 570 m nadmorske visine pa sve do vrha Dinara. Ukupna duljina staze je 7,7 km. Po zahtjevnosti planinarenja kategorizirana je kao jako teška te je u prosjeku potrebno 3-4 h da se prohoda (URL 19).

Tablica 16: Statistika visina, nagiba i smjera nagiba za planinarsku stazu Glavaš-Dinara iz SRTM1 uporabom QGIS programa

	Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan
Visine [m]	566	1817	1251	1246	1251
Nagib [°]	3	38	35	21	20
Smjer nagiba [°]	41	310	270	160	170

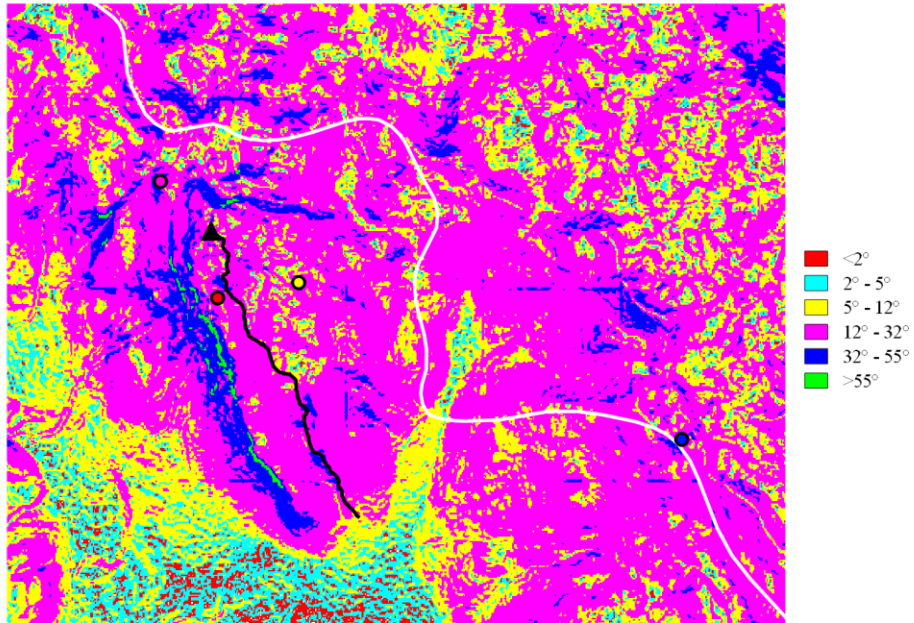
Statistika staze iz tablice 17 pokazuje kako maksimalna visina ne doseže pravu vrijednost vrha zbog RMS pogreške SRTM1. Na slici 30 prikazani su histogrami za promjenu visine, nagiba i smjera nagiba po stacionaži staze. Stacionaža je udaljenost neke točke na stazi od početka staze mjereno po njenoj osi. Vidljivo je kako visina terena pravilno raste te kako se kreću vrijednosti nagiba i smjera nagiba.



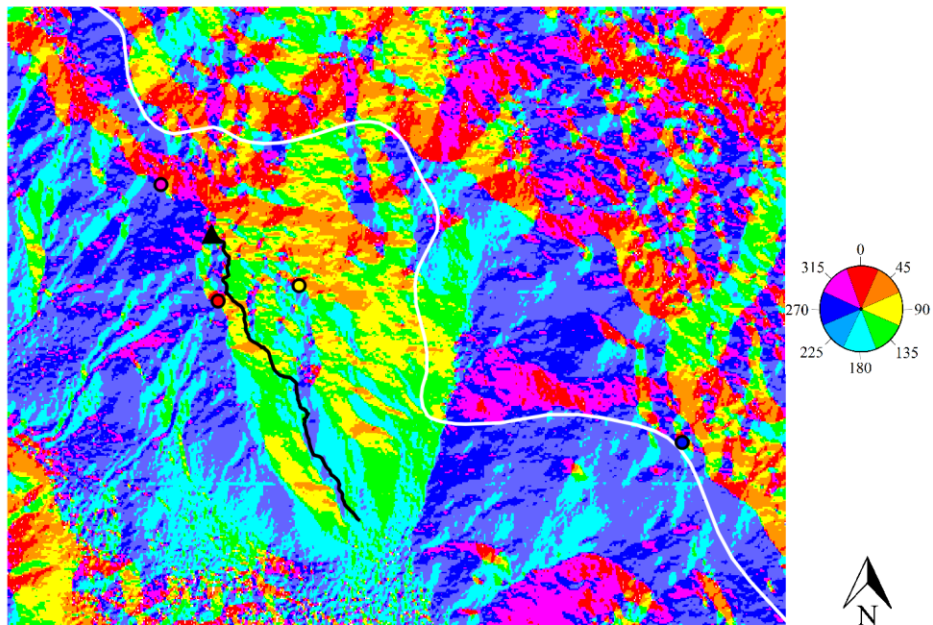
Slika 30: Histogrami visina, nagiba i smjera nagiba za stazu Glavaš-Dinara iz SRTMI korištenjem QGIS programa

Na slici 31 staza je preklapljena preko modela nagiba i smjera nagiba za područje vrha Dinara. Vidi se kako je staza smještena daleko od najstrmije strane planine Dinare (lijevo od staze). Ako se paralelno promatraju slika 30 i 31 tada se rezultati mogu lakše shvatiti. Vrijednost aritmetičke sredine ukazuje na to kako većina vrijednosti nagiba staze pripada razredu  $<12^\circ, 32^\circ>$  što slika 31 potvrđuje (ružičasta boja razreda). Medijan vrijednost vrlo je bliska s vrijednošću sredine raspona koja iznosi  $21^\circ$  što ukazuje na to da vlada ravnoteža između nagiba većih i manjih od sredine raspona. U prvoj polovici staze, na nekoliko mjesta, nagib prelazi preko vrijednosti  $>32^\circ$  što se vidi i na histogramu na slici 30 gdje dolazi i do maksimalnog nagiba koji iznosi  $38^\circ$ . Točno na sredini staze dolazi i do vrijednosti nagiba  $<12^\circ$ . Od 3. do 5. kilometra staza ima najslabiji uspon. U blizini samog vrha ne prevladavaju strmi nagibi. Istom analogijom, ako se promatraju vizualni prikazi za smjer nagiba, vidi se kako je prva polovica staze usmjerena prema jugu i jugozapadu (vrijednosti  $<150^\circ, 250^\circ>$ ). Na drugoj polovici staze vrijednosti variraju redom od smjera jugoistoka, istoka pa prema sjeveroistoku te kako se približava kraj staze ponovno dolazi do vrijednosti koje predstavljaju smjer juga i jugozapada te dolazi i do vrijednosti zapada i sjeverozapada.

Model nagiba



Model smjera nagiba



- ▲ Dinara      ● Jančija glavica      — planinarska staza
- Jančiji vrh (IZ)      ● Bukvin vrh
- Gorica (S)      — granica RH-BiH

1 0 1 2 3 km

Slika 31: Položaj staze Glavaš-Dinara na modelu nagiba i smjera nagiba za područje vrha Dinara



## 8 Zaključak

Dostupnost, raznovrsna primjena te osobito visoka kvaliteta podataka pojedinih DMR-ova dala je ideju za kreiranjem geomorfometrijskih parametara, nagiba i smjera nagiba, za najviša planinska područja Republike Hrvatske.

Prije samog kreiranja modela nagiba i smjera nagiba, ocijenjena je i poboljšana horizontalna i visinska točnost globalnih DMR-ova različite rezolucije koji kao originalni podaci odstupaju od stvarnosti i podložni su različitoj vrsti pogrešaka. U radu je opisan postupak primjene korekcija na modele koje bi svaki korisnik modela trebao primijeniti. Kako bi se dobila njihova točnost, DMR-ovi su uspoređeni s podacima referentnih repera te je za nekoliko najnovijih globalnih DMR-ova, u ovom radu, to učinjeno po prvi put za područje Republike Hrvatske. Vrijednosti DMR-ova, koje su korespondentne referentnim reperima, dobivene su interpoliranjem točkastih vrijednosti iz DMR-a pomoću četiri metode interpolacije. Analizom metoda interpolacije točkastih vrijednosti iz DMR-ova različite rezolucije dobiven je rezultat da najbolju suglasnost s referentnim podacima daje bikubična metoda. Georeferenciranjem DMR-ova ta je suglasnost s referentnim podacima poboljšana. Uz postavljeni kriterij georeferenciranja, SRTM1, AW3D30, SRTM3 i SRTM15 svojim pomicanjem nisu ostvarili bolju vertikalnu točnost, dok su se EUDEM, ASTER te grublji modeli popravili. Najveće poboljšanje je kod GTOPO30 gdje je RMS pala s 51,6 m na 31,0 m, no to je i dalje jako grub DMR koji je u analizama modela nagiba i smjera nagiba pokazao gotovo neprimjenjive rezultate. Po prvi put je za područje Republike Hrvatske dobivena točnost SRTM15 modela čija RMS pogreška iznosi 9,8 m, AW3D30 modela s RMS pogreškom od 5,7 m, EUDEM modela s RMS pogreškom od 4,7 m te SRTM1 modela. RMS pogreška SRTM1 modela, od samo 4,6 m, čini ga najtočnijim analiziranim DMR-om.

Iz ukupno devet ocijenjenih i poboljšanih DMR-ova različite rezolucije te pet računalnih programa, izrađeni su i analizirani modeli nagiba i smjera nagiba. Analiza modela ostvarena je na dvije razine. Prvo kao analiza modela koji su izračunati s različitim računalnim programima, a na temelju istog DMR-a, točnije SRTM1 modela koji je izabran jer je vertikalno najtočniji za područje Republike Hrvatske. Analizom na prvoj razini utvrđeno je da iako je korišten isti DMR postoje veće i manje razlike između pojedinih modela dobivenih različitim programima. Iako ne postoje referentni podaci o nagibu i smjeru nagiba, QGIS program izabran je kao najpouzdaniji zbog njegovog konstantnog unaprjeđivanja sustava i popularnosti za ovakvu vrstu analize geopodataka. Na drugoj razini analizirani su modeli koji su izračunati iz DMR-ova različite rezolucije, a s istim računalnim programom (QGIS). Kao referentni model nagiba

i smjera nagiba, s kojim su uspoređeni drugi modeli te procijenjena njihova valjanost, izabran je ponovno model dobiven iz SRTM1 zbog najveće točnosti. S obzirom na očekivano, utvrđuje se korelacija između rezolucije pojedinog DMR-a te odstupanja njegovog modela od SRTM1 modela. Srednje razlike između vrijednosti geomorfometrijskih modela jednosekundnih DMR-ova razlikuju se najviše 4°, dok padom rezolucije pada i detaljnost i bliskost vrijednosti modela s referentnim.

Na temelju provedenih analiza izrađeni su modeli i karte nagiba i smjera nagiba za najviša planinska područja Republike Hrvatske te pripadne planinarske staze iz SRTM1 modela te uporabom QGIS računalnog programa. Ideja je bila prikazati jednu od brojnih koristi i načina uporabe geomorfometrijskih modela, koji pronalaze primjenu u brojnim znanstvenim i civilnim djelatnostima te se mogu izraditi za bilo koje područje.

U radu su zbog opsežnosti analizirani i prikazani samo pojedini primjeri analiziranih područja i planinarskih staza dok su ostali rezultati stavljeni u prilog.

Svi rezultati besplatno su dostupni i na sljedećoj poveznici:

- [LINK: Modeli nagiba i smjera nagiba za planinska područja RH](#)

## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Bašiću na pruženoj prilici i na ukazanom povjerenju da sudjelujem na natječaju za dodjelu Rektorove nagrade.

Zahvaljujem se voditelju dr. sc. Mateju Vargi na vodstvu, uloženom trudu i susretljivosti. Također, zahvaljujem se na velikoj i bezuvjetnoj pomoći, ugodnom druženju tijekom izrade ovog rada te poticanju da uvijek treba težiti ka vlastitom usavršavanju.

## Literatura

- Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A. (2007):** A theoretical approach to modeling the accuracy assessment of digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(12), 1367-1379.
- Aguilar, F. J., Aguilar, M. A., Agüera, F. (2007):** Accuracy assessment of digital elevation models using a non-parametric approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(6), 667-686.
- Bashenina, N. V., Gellert, J., Joly, F., Klimaszewski, M., Scholz, E. (1966):** The unified key to the detailed Geomorphological Map. IGU, Commission on Applied Geomorphology. Krakow. Poland.
- Bašić, T., Bjelotomić, O. (2014):** HRG2009: New High Resolution Geoid Model for Croatia. In *Gravity, Geoid and Height Systems* (pp. 187-191). Springer, Cham.
- Bašić, T., Bubble, G. (2007):** Usporedba globalnog modela visina SRTM3 s postojećim digitalnim modelima reljefa na području Hrvatske. *Geodetski list*, 61(2), 93-111.
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Ladner, R. (2009):** Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy*, 32(4), 355-371.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998):** Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), 190 pp.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Seal, D. (2007):** The shuttle radar topography mission, *Reviews of geophysics*, 45(2).
- Feil, L., Rožić, N., Pavičić, S., Gucek, M. (2003):** Izrada dokumentacije neophodne za usvajanje službenog visinskog datuma Republike Hrvatske. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Golden Software (2014):** Surfer<sup>®</sup> 12 Full User's Guide.
- GRAS, D. (2014):** EU-DEM Statistical Validation Report. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- Hengl, T., Reuter, H.I. (2008):** Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, *Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 772 pp.
- Heslop, D. (2012):** An introduction to MATLAB for Geoscientists. Online edition.

- Hirt, C., Filmer, M. S., Featherstone, W. E. (2010):** Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(3), 337-347.
- Hunter, G. J., Goodchild, M. F. (1997):** Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis*, 29(1), 35-49.
- Józsa, E., Fábrián, S. Á., Kovács, M. (2014):** An evaluation of EU-DEM in comparison with ASTER GDEM, SRTM and contour-based DEMs over the Eastern Mecsek Mountains. *Hung. Geog. Bull*, 63, 401-423.
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Wang, Y. M. (1998):** The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96.
- mukuljee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., Mukhopadhyay, A. (2013):** Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217.
- Mukul, M., Srivastava, V., Mukul, M. (2015):** Analysis of the accuracy of shuttle radar topography mission (SRTM) height models using international global navigation satellite system service (IGS) network. *Journal of Earth System Science*, 124(6), 1343-1357.
- Nikolakopoulos, K. G., Chrysoulakis, N. (2006):** Updating the 1: 50.000 topographic maps using ASTER and SRTM DEM: the case of Athens, Greece. In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VI* (Vol. 6366, p. 636606). International Society for Optics and Photonics.
- Olaya, V. (2009):** Basic land-surface parameters. *Developments in Soil Science*, 33, 141-169.
- Passini, R., Jacobsen, K. (2007):** Accuracy analysis of SRTM height models. In ASPRS annual convention, Tampa.
- Pike, R. J., Evans, I. S., Hengl, T. (2009):** Geomorphometry: a brief guide. *Developments in Soil Science*, 33, 3-30.
- Prashanth, H. S., Shashidhara, H. L., KN, B. M. (2009):** Image scaling comparison using universal image quality index. In *Advances in Computing, Control, & Telecommunication Technologies*, 2009. ACT'09. International Conference on (pp. 859-863). IEEE.

- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R. (2003):** The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 57(4), 241-262.
- Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E. (2006):** A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249-260.
- Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., Chapin, E. C., Martin, J. M., Daffer, W., Hensley, S. (2005):** An assessment of the SRTM topographic products.
- Schwanghart, W., Kuhn, N. J. (2010):** TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 770-781.
- Sijaric, R. (1974):** Odlike entomofaune krškog područja Bosne i Hercegovine sa posebnim osvrtom na Rhopalocera. *Acta entomologica Jugoslavica*.
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Zhang, Z., Abrams, M. (2011):** ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results. NASA.
- Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H. (2016):** GENERATION OF THE 30 M-MESH GLOBAL DIGITAL SURFACE MODEL BY ALOS PRISM. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Toutin, T. (2008):** ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 29(7), 1855-1875.
- Varga, M., Bašić, T. (2013):** Quality Assessment and Comparison of Global Digital Elevation Models on the Territory of Republic of Croatia. *Kartografija i geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, 12(20), 4-17.
- Wechsler, S. P. (2003):** Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users. *URISA-WASHINGTON DC-*, 15(2), 57-64.
- Wood, J. (1996):** The geomorphological characterisation of digital elevation models.
- Yue, L., Shen, H., Zhang, L., Zheng, X., Zhang, F., Yuan, Q. (2017):** High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 20-34.

## Popis URL-ova:

**URL 1:** Wikipedia, Prirodni susjed interpolacija,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Natural\\_neighbor\\_interpolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_neighbor_interpolation), (23.03.2018.).

**URL 2:** Wikipedia, Bilinearna interpolacija,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear\\_interpolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation), (26.04.2018.).

**URL 3:** Wikipedia, Bikubična interpolacija,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic\\_interpolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic_interpolation), (26.04.2018.).

**URL 4:** ArcGIS, smjer nagiba <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>, (09.03.2018.).

**URL 5:** QGIS, <https://www.qgis.org/en/site/about/index.html>, (11.03.2018.).

**URL 6:** Wikipedia, QGIS, <https://hr.wikipedia.org/wiki/QGIS>, (11.03.2018.).

**URL 7:** Wikipedia, MATLAB, <https://hr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>, (11.03.2018.).

**URL 8:** Math works, Topo Toolbox,

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50124-topotoolbox>,  
(17.03.2018.).

**URL 9:** Blue Marble Geographics, Global Mapper,

<http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php>, (17.03.2018.).

**URL 10:** Wikipedia, Aritmetička sredina, [https://en.wikipedia.org/wiki/Arithmetic\\_mean](https://en.wikipedia.org/wiki/Arithmetic_mean),  
(27.04.2018.).

**URL 11:** Hrvatski planinarski savez, Dinara, <http://www.hps.hr/info/dinara/>, (20.02.2018.).

**URL 12:** Wikipedia, Dinaridi, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dinaridi>, (21.02.2018.).

**URL 13:** Planinarenje.hr, <http://planinarenje.hr/>, (19.04.2018.).

**URL 14:** Hrvatski planinarski savez, najviši vrhovi <http://www.hps.hr/info/najvisi-vrhovi/>,  
(20.02.2018.).

**URL 15:** Hrvatski planinarski savez, vrh Dinara, <http://www.hps.hr/info/hrvatski-vrhovi/dinara-vrh-dinara-sinjal/>, (20.02.2018.).

**URL 16:** Dinarsko gorje, Velebit, <https://www.dinarskogorje.com/b21-velebit-masiv.html>,  
(21.02.2018.).

**URL 17:** Dinarsko gorje, Biokovo, <https://www.dinarskogorje.com/biokovo.html>,  
(22.02.2018.).

**URL 18:** Geoportal, podaci i servisi <https://geoportal.dgu.hr/#/menu/podaci-i-servisi>,  
(18.02.2018.).

**URL 19:** Planinarenje.hr, Staza Glavaš-Dinara,  
<http://planinarenje.hr/kt/jgorja/#/p/hrvatsko/dalmatinska-zagora-dinara/dinara-sinjal/glavas-sinjal>, (13.04.2018.).



## Popis slika

Slika 1: SRTM svemirski segment. Prikazane su glavne komponente: X- i C-kanal antene, TX odašiljač i RX prijemnik (Rabus i dr. 2003) .....	4
Slika 2: Prikaz usklađivanja vertikalnih datuma repera i DMR-ova te računanje razlike između njihovih visinskih vrijednosti ( $H$ – ortometrijska visina, $h$ – elipsoidna visina, $N$ – undulacija geoida).....	8
Slika 3: Odnos između elipsoidne visine, ortometrijske visine i geoidne undulacije .....	9
Slika 4: Analiza DMR-a pomoću 3x3 lokalnog prozora.....	12
Slika 5: Klasifikacija smjera nagiba.....	15
Slika 6: Minimum, maksimum, raspon, aritmetička sredina i medijan nepravilnog asimetričnog skupa podataka .....	17
Slika 7: 3D prikazi terena područja analize s naznačenim vrhovima.....	19
Slika 8: Horizontalni pomaci i raspored RMS pogrešaka GTOPO30 modela.....	22
Slika 9: Horizontalni pomaci i raspored RMS pogrešaka EUDEM modela .....	23
Slika 10: Histogrami usporedbe modela visina za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za $lat=konst.$ ) i po latitudi (za $lon=konst.$ ) .....	24
Slika 11: TK200 isječak i model nagiba za područje vrha Sveti Jure iz SRTM1 uporabom QGIS programa.....	26
Slika 12: 3D model visina područja vrha Sveti Jure iz SRTM1 s prikazom lokacije razreda nagiba .....	27
Slika 13: Histogrami raspodjele vrijednosti piksela prema nagibu za modele TopoToolbox i MATLAB programa.....	28
Slika 14: Razlike između modela nagiba TopoToolbox i MATLAB programa za područje vrha Sveti Jure .....	28

Slika 15: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici nagiba između modela nagiba MATLAB i TopoToolbox programa za područje vrha Sveti Jure .....	29
Slika 16: DOF5 isječak i model smjera nagiba za područje vrha Sveti Jure iz SRTM1 .....	30
Slika 17: 3D model visina područja vrha Sveti Jure iz SRTM1 s prikazom lokacije razreda smjera nagiba.....	30
Slika 18: Histogrami raspodjele vrijednosti piksela prema smjeru nagiba za modele MATLAB i QGIS programa .....	32
Slika 19: Razlike između modela smjera nagiba MATLAB i QGIS programa za područje vrha Sveti Jure .....	32
Slika 20: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici smjera nagiba između modela smjera nagiba MATLAB i QGIS programa za područje vrha Sveti Jure .....	33
Slika 21: TK200 isječak i modeli nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM3, SRTM15, SRTM30+ i ETOPO1 .....	34
Slika 22: Histogrami usporedbe modela nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za lat=konst.) i po latitudi (za lon=konst.) .....	35
Slika 23: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici nagiba između SRTM1 i AW3D30 modela korištenjem QGIS programa za područje Vaganskog vrha .....	36
Slika 24: Razlike između SRTM1 i AW3D30 modela nagiba za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa .....	36
Slika 25: DOF5 isječak i modeli smjera nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM3, SRTM15, SRTM30+ i ETOPO1 .....	38
Slika 26: Histogrami usporedbe modela smjera nagiba za područje Vaganskog vrha iz SRTM1, SRTM15 i SRTM30+ po longitudi (za lat=konst.) i po latitudi (za lon=konst.) .....	38
Slika 27: Histogram raspodjele vrijednosti piksela prema razlici smjera nagiba između SRTM1 i EUDEM modela korištenjem QGIS programa za područje Vaganskog vrha.....	40

Slika 28: Razlike između SRTM1 i EUDEM modela smjera nagiba za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa .....	40
Slika 29: Položaj staze Glavaš-Dinara na 3D modelu područja vrha Dinara.....	41
Slika 30: Histogrami visina, nagiba i smjera nagiba za stazu Glavaš-Dinara iz SRTM1 korištenjem QGIS programa .....	42
Slika 31: Položaj staze Glavaš-Dinara na modelu nagiba i smjera nagiba za područje vrha Dinara .....	43

## Popis tablica

Tablica 1: Geomorfološka klasifikacija nagiba.....	14
Tablica 2: Visine vrhova analiziranih područja s pripadnim simbolima s kojima su prikazani na slikama rezultata.....	18
Tablica 3: Statistika visina analiziranih područja iz SRTM1 .....	20
Tablica 4: Rubne koordinate okvira prikaza analiziranih područja .....	20
Tablica 5: RMS pogreške (m) DMR modela dobivene nakon primijene određene metode interpolacije.....	21
Tablica 6: Horizontalni pomaci globalnih DMR-ova s obzirom na referentne repere te vertikalna točnost prije i poslije georeferenciranja .....	23
Tablica 7: Statistika visinskih razlika između referentnih repere i DMR-ova.....	24
Tablica 9: Statistika modela nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure korištenjem svih programa.....	26
Tablica 10: Statistika razlika modela nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure dobivenih različitim programima (poredani prema rastućim RMS rezidualima) .....	27
Tablica 11: Statistika modela smjera nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure korištenjem svih programa.....	29
Tablica 12: Statistika razlika modela smjera nagiba iz SRTM1 za područje vrha Sveti Jure dobivenih različitim programima (poredani prema rastućim RMS rezidualima) .....	31
Tablica 13: Statistika modela nagiba iz svih DMR-ova za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa (poredani prema rastućim RMS pogreškama DMR-ova).....	34
Tablica 14: Statistika razlika modela nagiba iz SRTM1, AW3D30 i EUDEM za područje Vaganskog vrha dobivenih QGIS programom (poredani prema rastućim RMS rezidualima) .....	35
Tablica 15: Statistika modela smjera nagiba iz svih DMR-ova za područje Vaganskog vrha korištenjem QGIS programa (poredani prema rastućim RMS pogreškama DMR-ova).....	37

Tablica 16: Statistika razlika modela smjera nagiba iz SRTM1, AW3D30 i EUDEM za područje Vaganskog vrha dobivenih QGIS programom (poredani prema rastućim RMS rezidualima) 39

Tablica 17: Statistika visina, nagiba i smjera nagiba za planinarsku stazu Glavaš-Dinara iz SRTM1 uporabom QGIS programa ..... 41

# **Analiza točnosti globalnih digitalnih modela reljefa i geomorfometrijski modeli planinskih područja Republike Hrvatske**

Marta Pokupić

## **Sažetak**

U radu su prezentirani rezultati horizontalne i visinske analize točnosti najnovijih globalnih digitalnih modela reljefa za područje Republike Hrvatske te modeli nagiba i smjera nagiba za geomorfološki najzahtjevnija područja- planinske vrhove Republike Hrvatske. Modeli nagiba i smjera nagiba izračunati su uporabom pet različitih računalnih programa i devet globalnih DMR-ova različitih rezolucija. U radu je dokumentirana teorijska osnova geomorfometrijskih parametara, DMR-ova, računalnih programa te raznih korištenih metoda. DMR-ovi su prije računanja geomorfometrijskih parametara bili procijenjeni te poboljšani u pogledu vertikalne i horizontalne točnosti u odnosu na podatke Hrvatskog visinskog referentnog sustava 1971.5 (HVR571). U ovom radu je po prvi put određena točnost SRTM1, SRTM15, EUDEM i AW3D30 modela za područje Republike Hrvatske, koja je izražena u obliku RMS pogreške. Nakon svih analiza, SRTM1 model s RMS pogreškom od samo 4,6 m predstavlja vjerodostojan prikaz površine terena tj. pouzdanu ulaznu vrijednost za dobivanje modela nagiba i smjera nagiba. Osim za analizirana područja, modeli su izrađeni i za pojedine planinarske staze jer ideja rada je prikazati jednu od brojnih primjena geomorfometrijskih parametara u rekreativne i zabavne svrhe poput planinarenja i istraživanja prirodnih ljepota Republike Hrvatske, koje su nedovoljno iskorišten turistički potencijal. Svi izrađeni modeli i njihove 2D i 3D vizualizacije javno su dostupni na web stranici:

- [VEZA: Modeli nagiba i smjera nagiba za planinska područja RH](#)

**Ključne riječi:** model nagiba, model smjera nagiba, DMR, RMS pogreška

# **Analysis of the Accuracy of Global Digital Elevation Models and Geomorphometric Models of Mountain Areas of the Republic of Croatia**

Marta Pokupić

## **Summary**

The paper presents the results of the horizontal and height analysis of the accuracy of the latest global digital elevation models for the area of the Republic of Croatia as well as the slope models and the slope direction (aspect) for the geomorphologically most demanding areas - the mountain areas of the Republic of Croatia. Slope and aspect models are calculated using five different computer programs and nine global DEMs with different resolutions. The paper provides a theoretical basis for geomorphometric parameters, DEMs, computer programs and various methods used. Prior to calculating geomorphometric parameters, DEMs were estimated and improved in terms of vertical and horizontal accuracy compared to the Croatian High Reference System 1971.5 (HVRS71). In this paper, for the first time, the accuracy of the SRTM1, SRTM15, EUDEM and AW3D30 models for the area of the Republic of Croatia was determined in the form of an RMS error. After analysis, the SRTM1 model with RMS error of just 4,6 m represents a credible representation of the surface area i.e. a reliable input value for obtaining the slope and aspect models. Except for the analyzed areas, the models were designed for some hiking trails as the idea of the work is to show one of the many applications of geomorphometric parameters for recreational and fun activities such as hiking and exploration of the natural beauties of the Republic of Croatia which are insufficiently utilized tourist potential. All created models and their 2D and 3D visualizations are publicly available on the website:

- [LINK: Slope and aspect models of mountain areas of the RH](#)

**Keywords:** slope model, slope direction model (aspect), DEM, RMS error

## **Životopis**

Marta Pokupić rođena je 9. kolovoza 1995. godine u Virovitici. Godine 2002. upisuje Osnovnu školu "August Cesarec" u Špišić Bukovici. Nakon završene osnovne škole, 2010. godine upisuje Opću gimnaziju "Petra Preradovića" u Virovitici. Na osnovu položene Državne mature, 2014. godine upisuje preddiplomski studij Geodezije i geoinformatike na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Preddiplomski studij uspješno završava 2017. godine stjecanjem akademskog naziva sveučilišna prvostupnica (baccalaura) inženjerka geodezije i geoinformatike. Godine 2017. upisuje diplomski studij Geodezije i geoinformatike, usmjerenje Geodezija na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Dobitnica je Nagrade fakulteta za postignut odličan uspjeh na studiranju na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za akademsku godinu 2014./2015., 2015./2016. te 2016./2017.



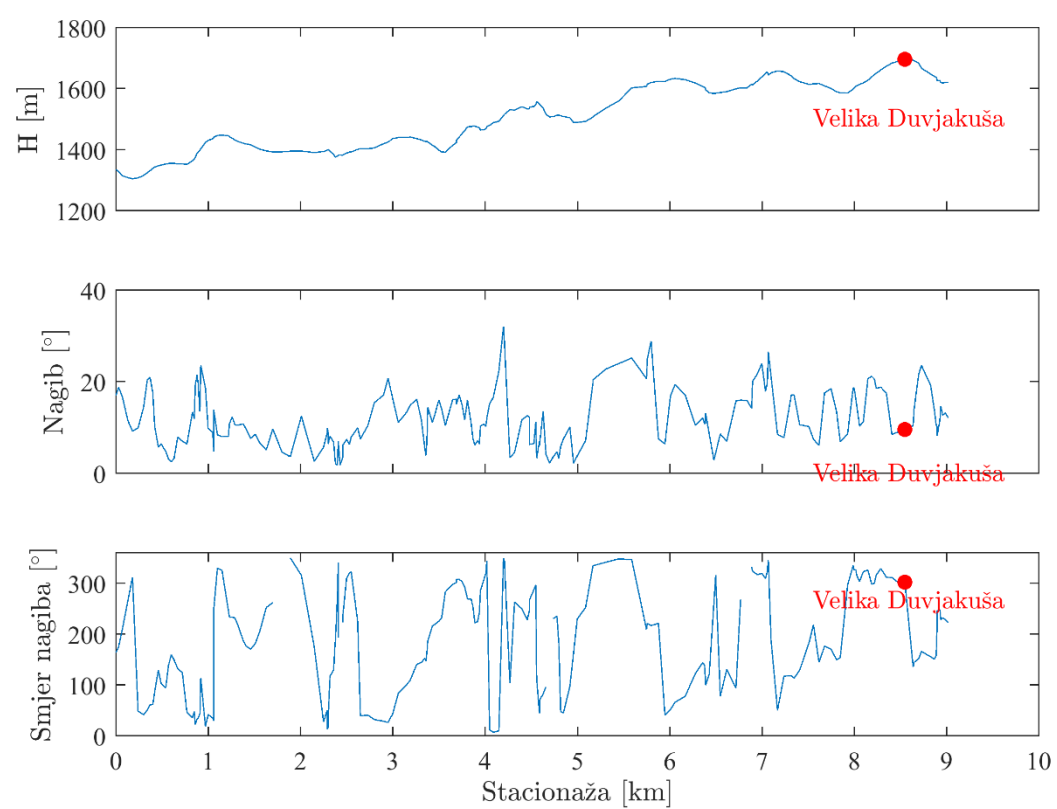
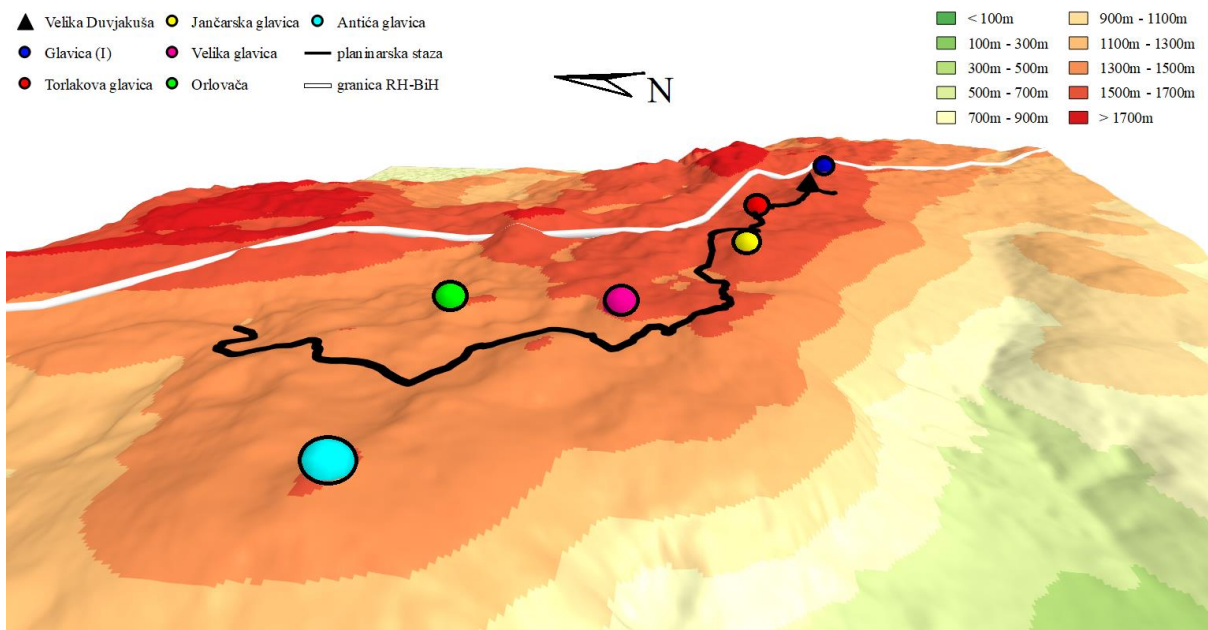
## **PRILOZI**

## **PRILOG 1.**

Područje vrha Velika Duvjakuša

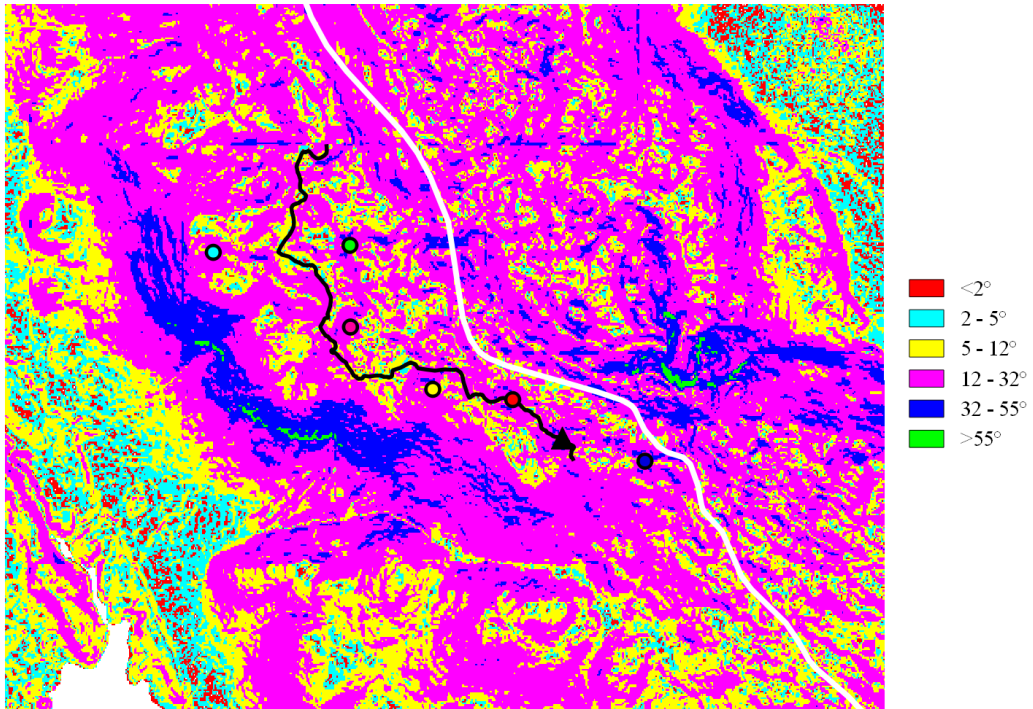
Staza PS Puma – Velika Duvjakuša – PS Josip Goreta – Čatrnja

3D vizualizacija položaja staze; modeli i tablica statistike visina, nagiba i smjera nagiba na stazi; položaj staze na modelima nagiba i smjera nagiba područja

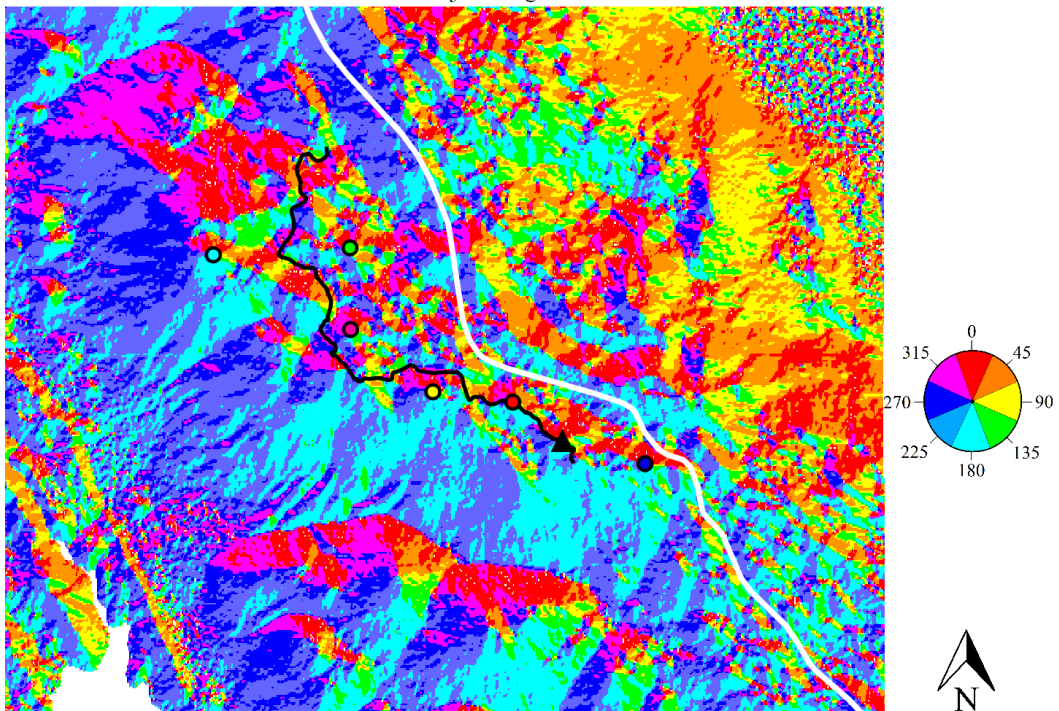


	Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan
Visine [m]	1305	1697	392	1499	1479
Nagib [°]	2	32	30	12	11
Smjer nagiba [°]	7	350	343	190	190

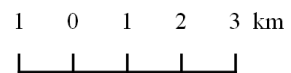
Model nagiba



Model smjera nagiba



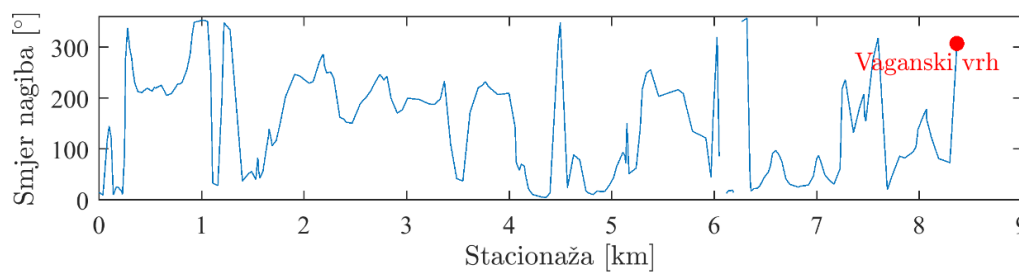
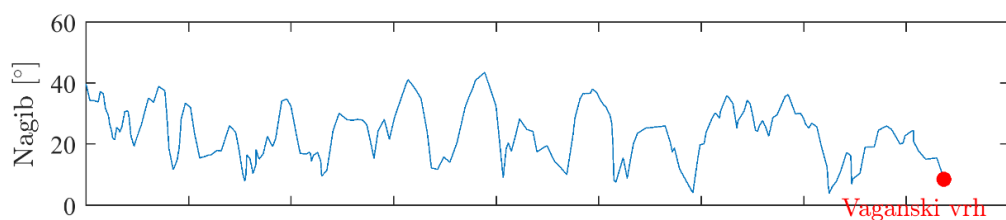
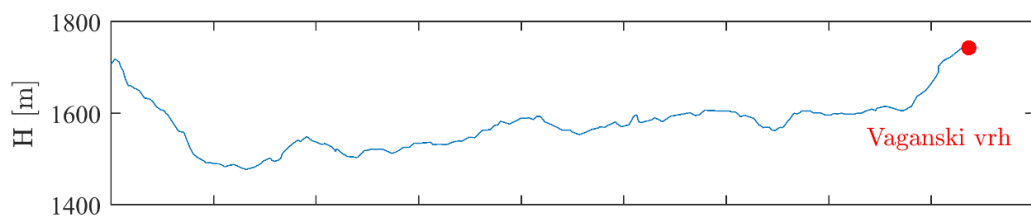
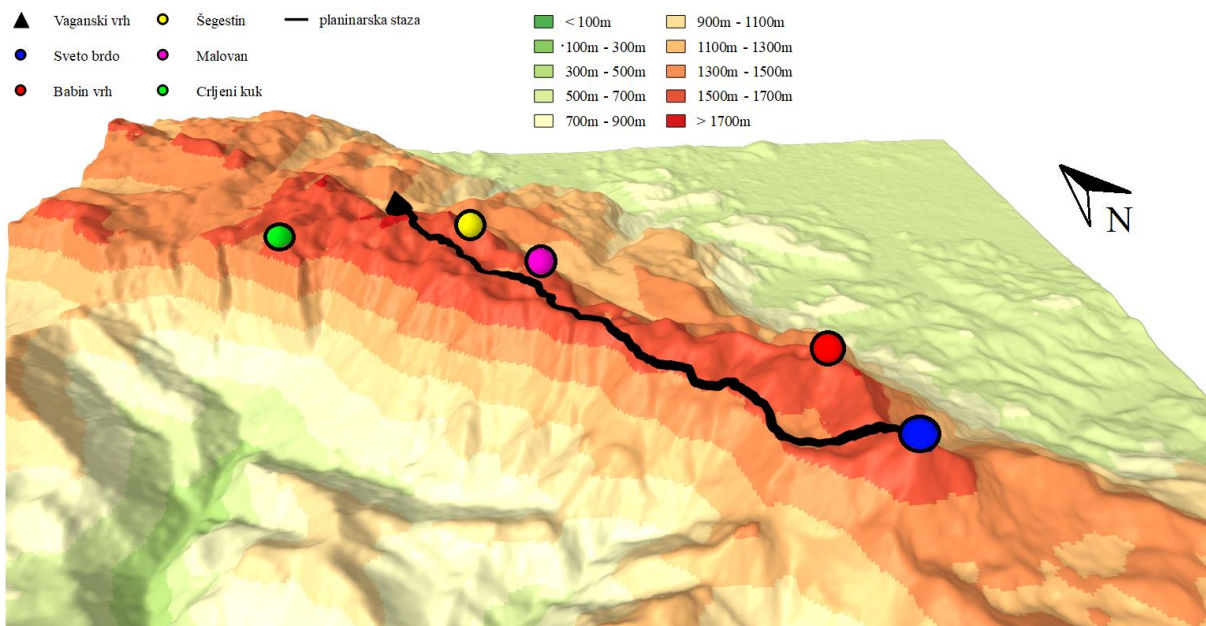
- ▲ Velika Duvjakuša    ● Jančarska glavica    ● Antića glavica
- Glavica (I)        ● Velika glavica        — planinarska staza
- Torlakova glavica    ● Orlovača        — granica RH-BiH



## **PRILOG 2.**

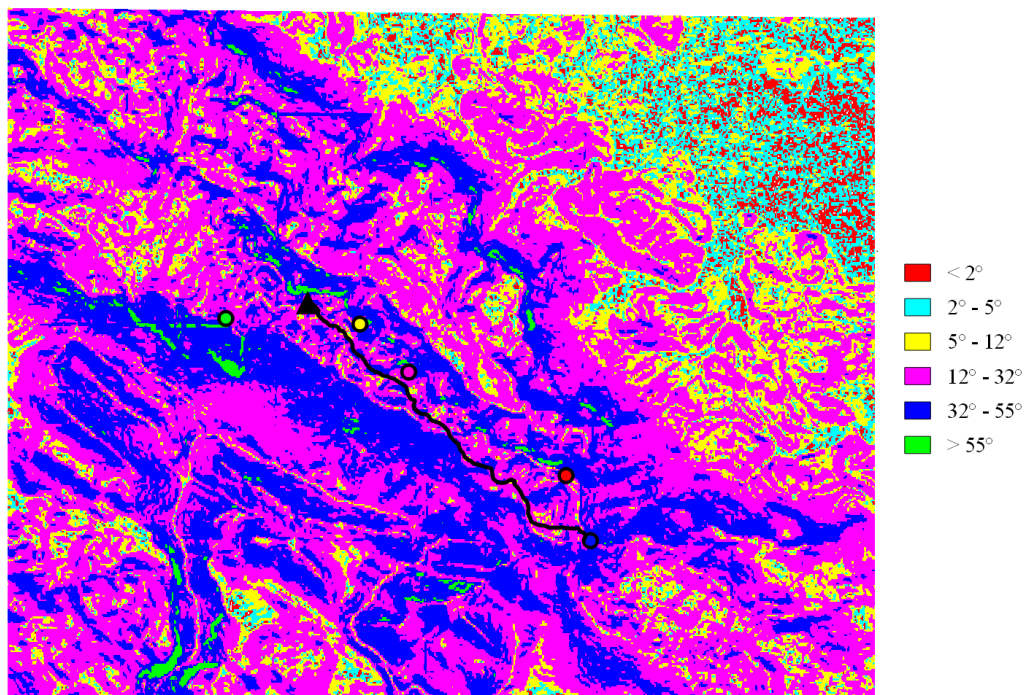
Područje Vaganskog vrha  
Staza Sveto Brdo – Vaganski vrh

3D vizualizacija položaja staze; modeli i tablica statistike visina, nagiba i smjera nagiba na stazi; položaj staze na modelima nagiba i smjera nagiba područja

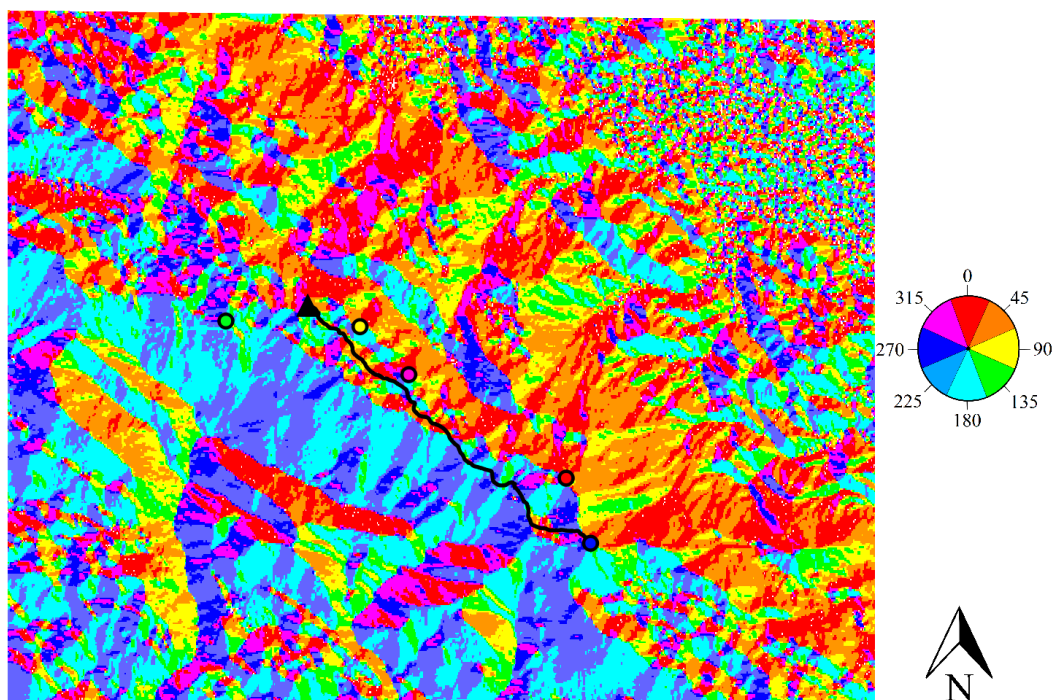


	Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan
Visine [m]	1477	1743	266	1575	1578
Nagib [°]	4	44	40	23	24
Smjer nagiba [°]	4	360	356	150	150

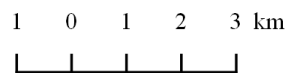
Model nagiba



Model smjera nagiba



- |                |               |                     |
|----------------|---------------|---------------------|
| ▲ Vaganski vrh | ● Šegestin    | — planinarska staza |
| ● Sveto brdo   | ● Malovan     |                     |
| ● Babin vrh    | ● Crljeni kuk |                     |



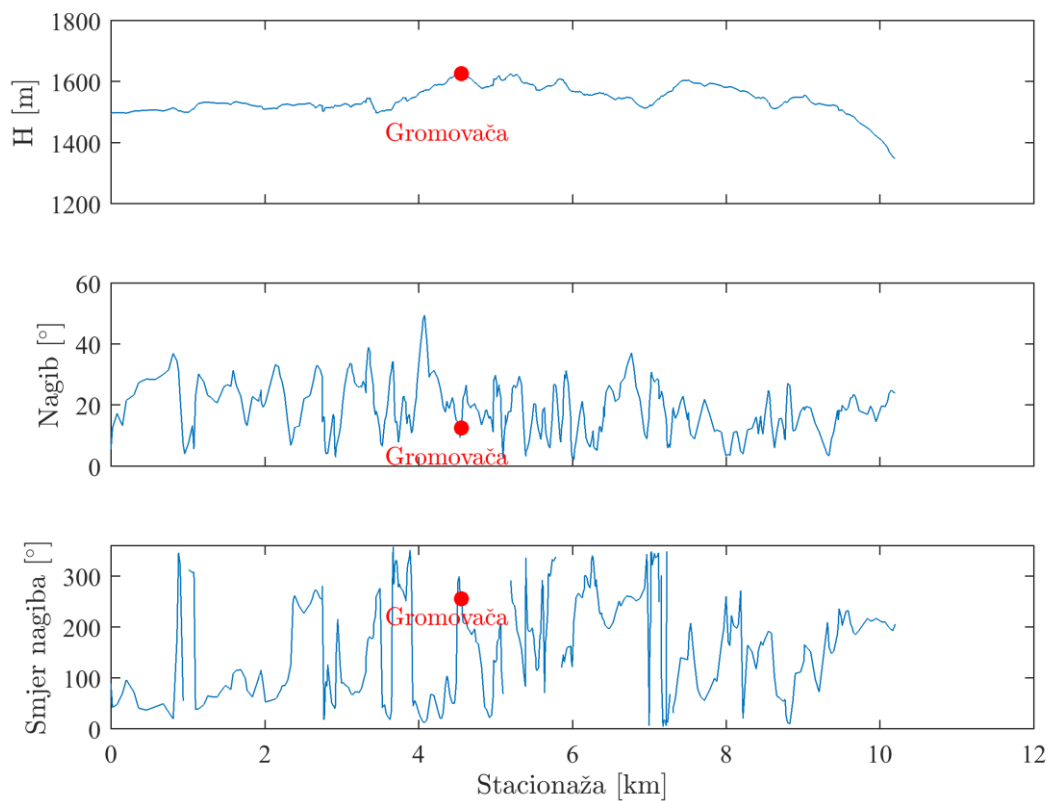
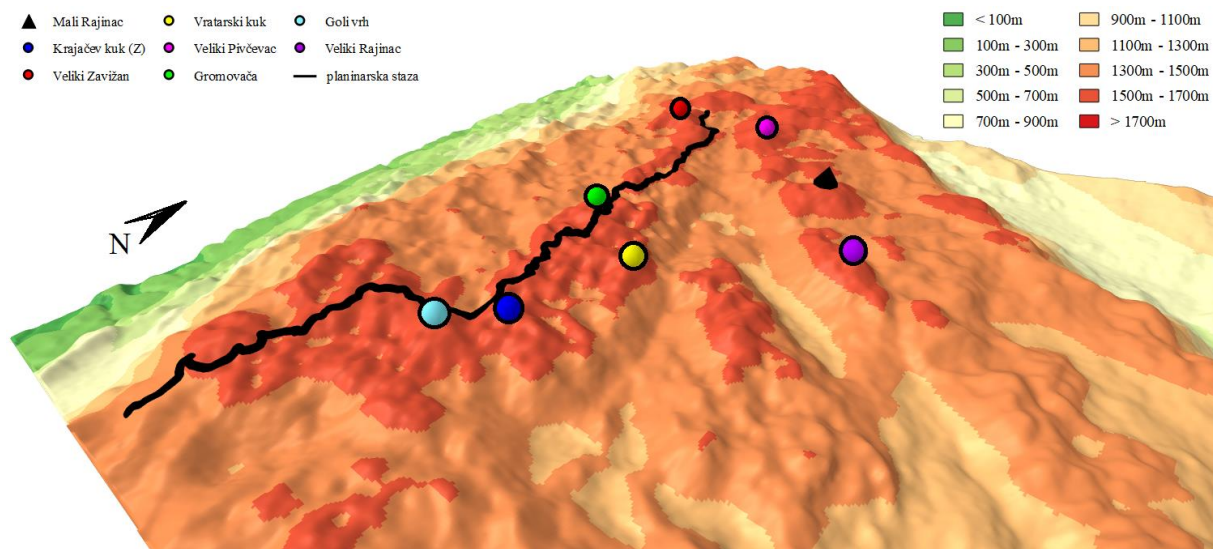
### **PRILOG 3.**

Područje vrha Mali Rajinac

Staza Botanički vrt – Gromovača – Crikvena – PD Alan

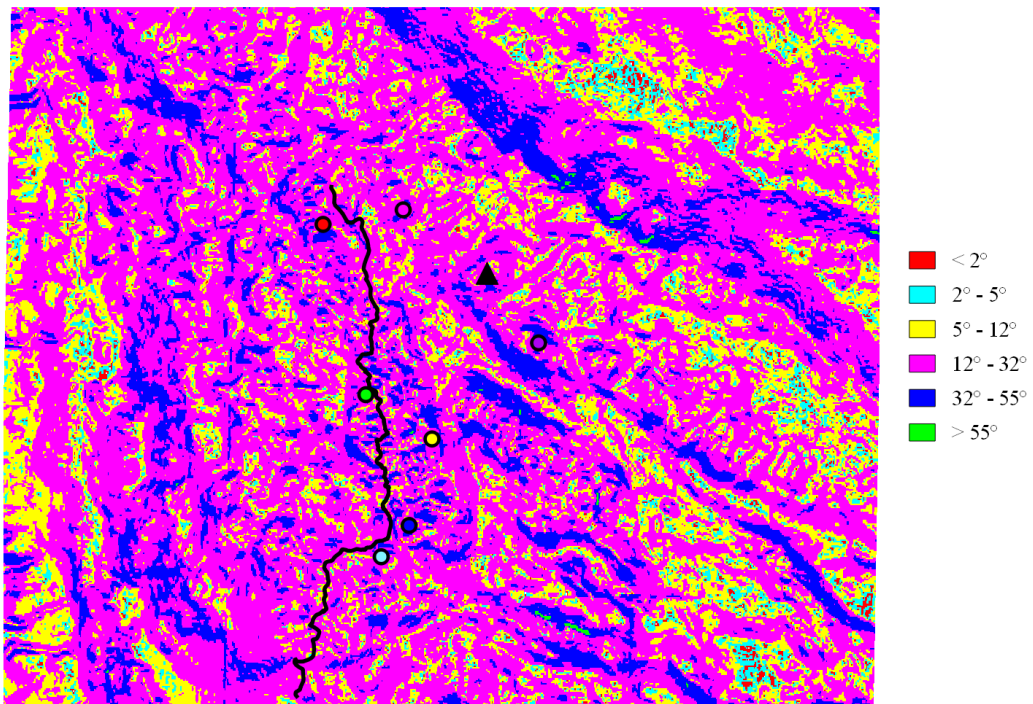
3D vizualizacija položaja staze; modeli i tablica statistike visina, nagiba i smjera nagiba na stazi; položaj staze na modelima nagiba i smjera nagiba područja



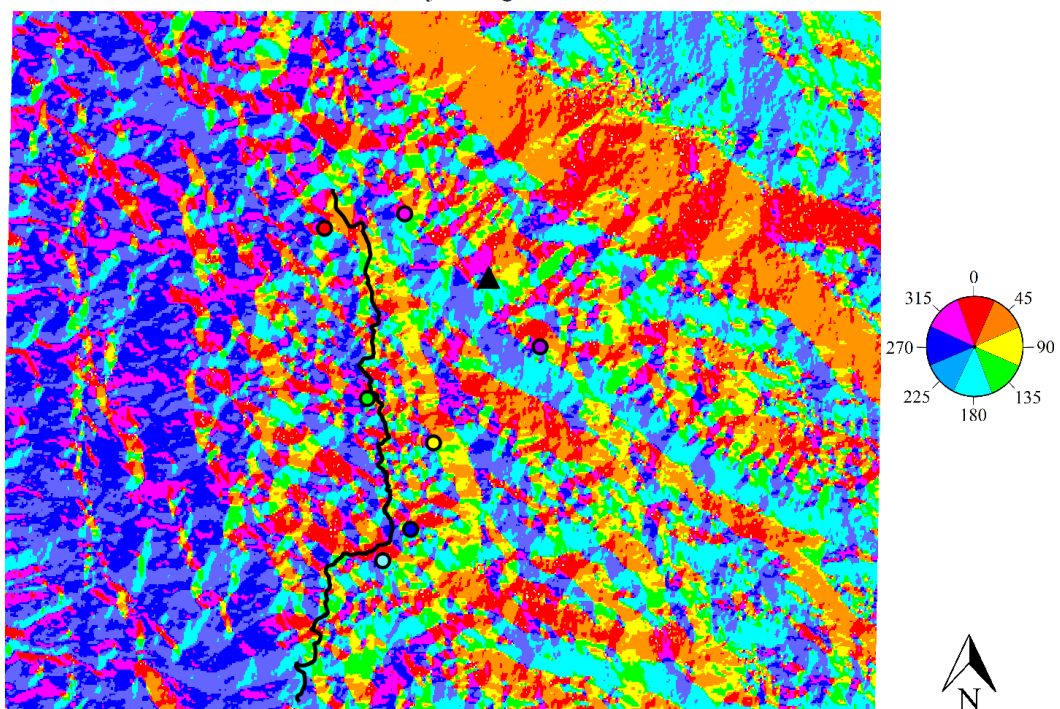


	Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan
Visine [m]	1348	1627	279	1551	1549
Nagib [°]	2	50	48	19	18
Smjer nagiba [°]	5	360	355	170	170

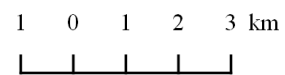
Model nagiba



Model smjera nagiba



- ▲ Mali Rajinac      ● Vratarski kuk      ○ Goli vrh
- Krajačev kuk (Z)      ● Veliki Pivčevac      ● Veliki Rajinac
- Veliki Zavižan      ● Gromovača      — planinarska staza

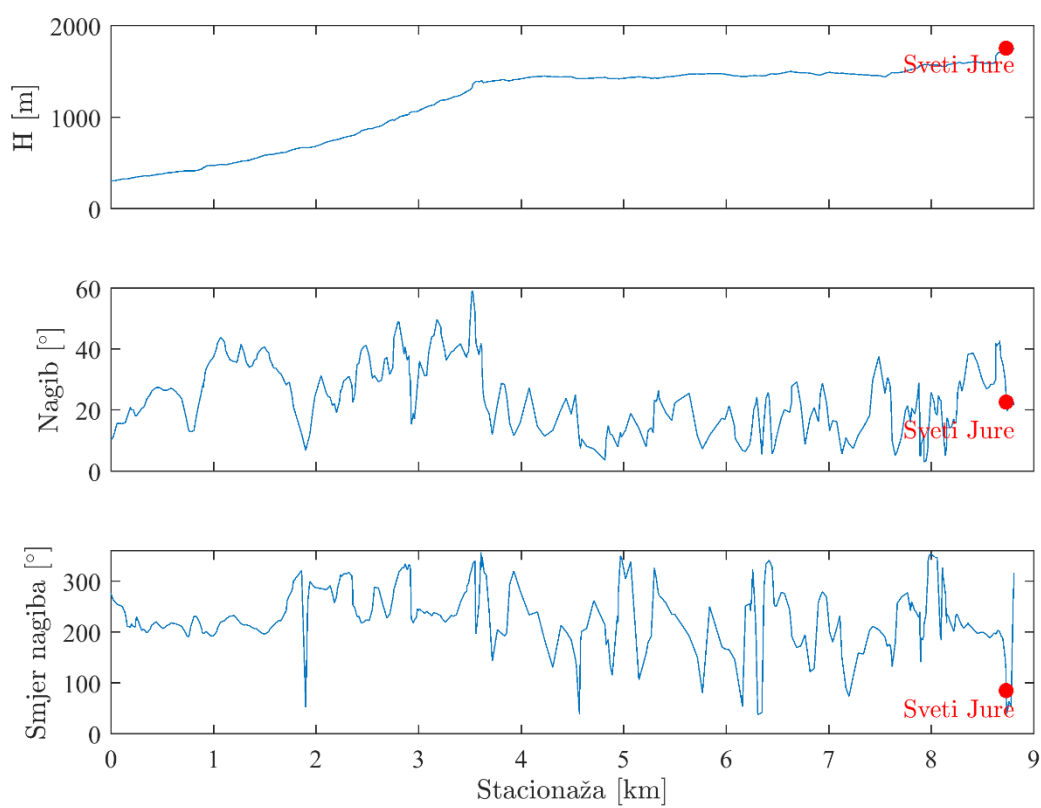
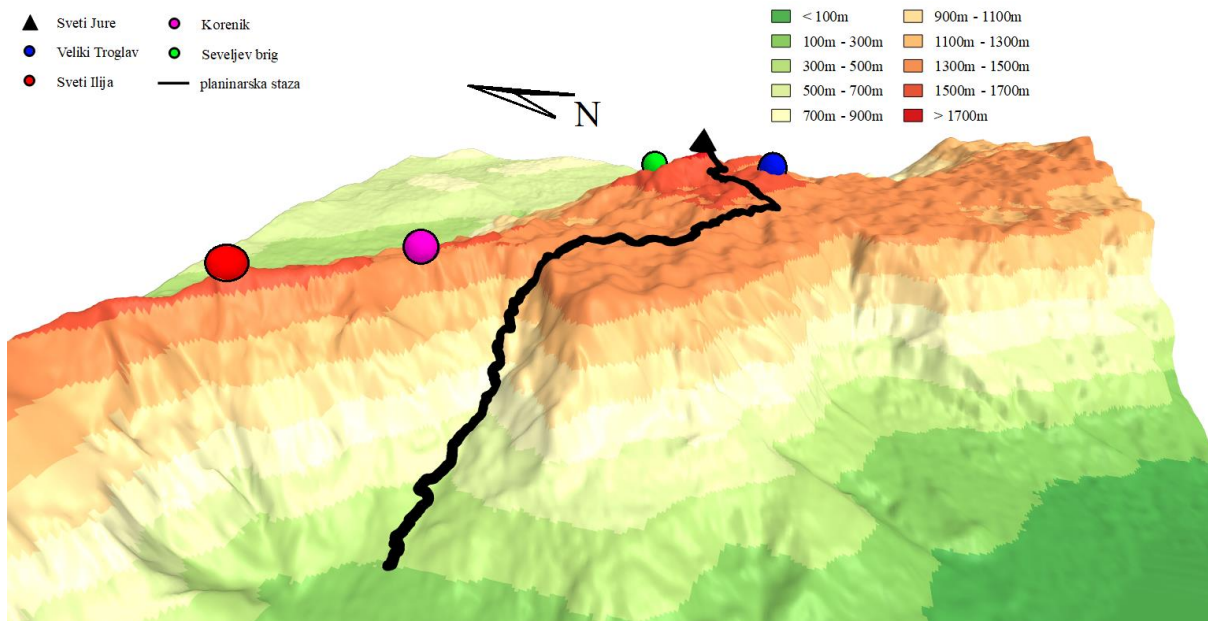


## **PRILOG 4.**

Područje vrha Sveti Jure

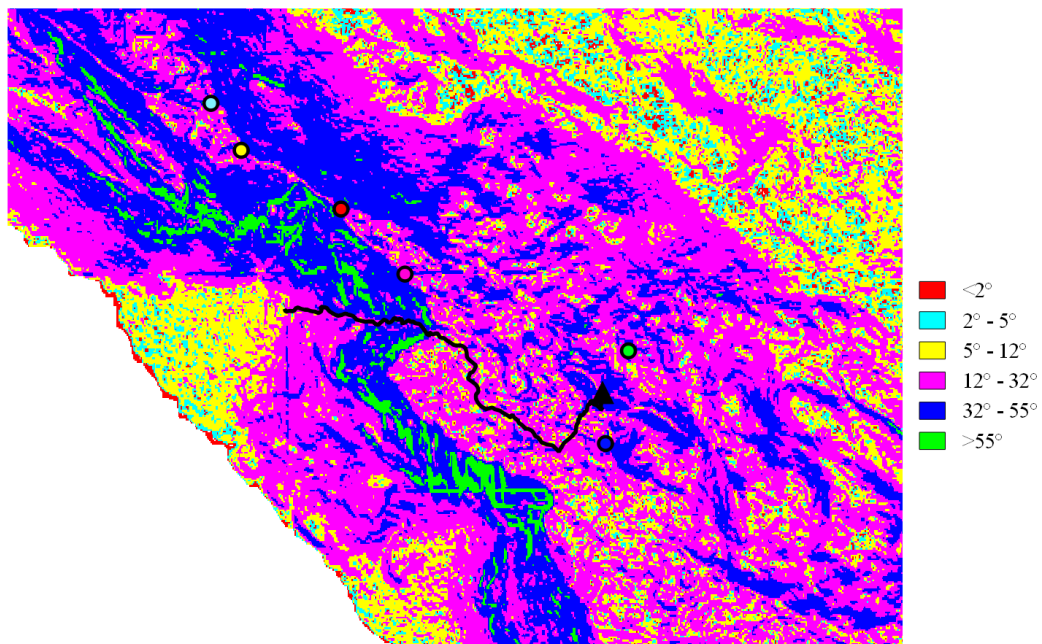
Staza Bast – Osičine – Motika – Lokva – Sveti Jure

3D vizualizacija položaja staze; modeli i tablica statistike visina, nagiba i smjera nagiba na stazi; položaj staze na modelima nagiba i smjera nagiba područja

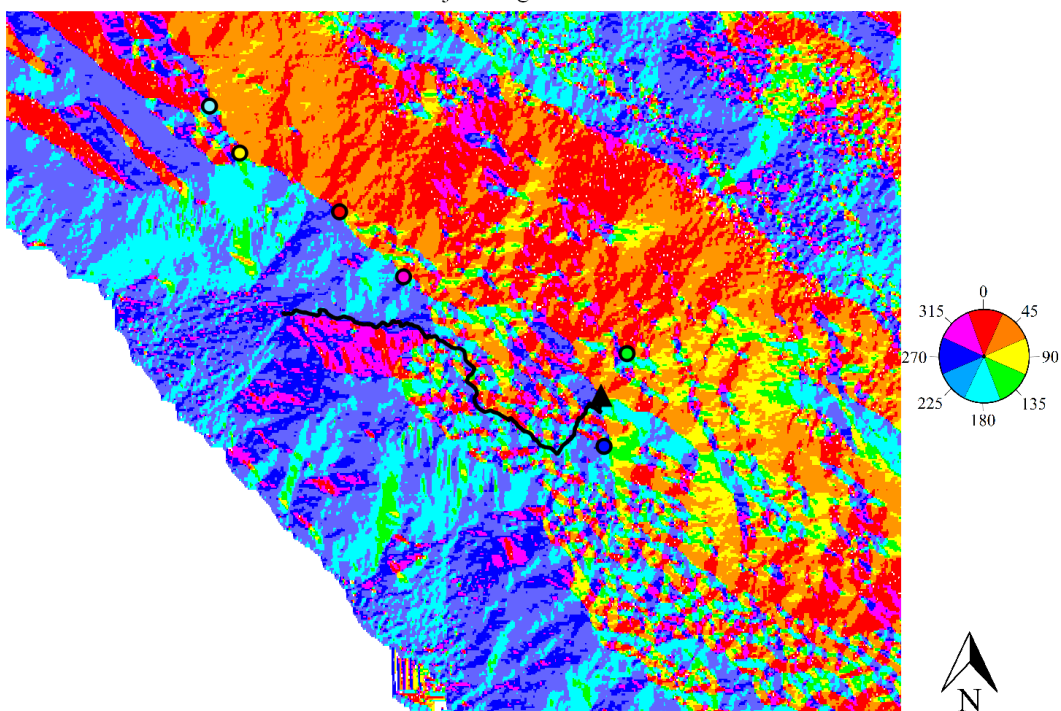


	Minimum	Maksimum	Raspon	Ar. sredina	Medijan
Visine [m]	303	1754	1451	1169	1422
Nagib [°]	3	59	56	24	24
Smjer nagiba [°]	38	360	322	230	220

Model nagiba



Model smjera nagiba



- |                  |                     |                 |
|------------------|---------------------|-----------------|
| ▲ Sveti Jure     | ● Sveti Ilija       | ● Seveljev brig |
| ● Veliki Troglav | ● Miletnjak         | ● Jagodnik      |
| ● Korenik        | — planinarska staza |                 |

