

UDK 551.43(497.5):528.422:551.462(262.3):621.396.969:629.783
Izvorni znanstveni članak

Usporedba globalnog modela visina SRTM3 s postojećim digitalnim modelima reljefa na području Hrvatske

Tomislav BAŠIĆ¹, Goran BUBLE² – Zagreb

SAŽETAK. U radu se daje pregled dostupnih digitalnih modela reljefa (DMR) na internetu te usporedba postojećeg DMR4x5 na području Hrvatske sa Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3) DMR-om. Digitalni modeli reljefa DMR4x5 (rezolucije 4" po latitudi i 5" po longitudi) i SRTM3x3 (3" rezolucija po latitudi i longitudi) uspoređeni su nadalje s visinama iz baze podataka trigonometara i s visinama repera II. nivelmana visoke točnosti (IINVT). Također, međusobno su uspoređeni podatci nekoliko izvora za dubine na području Jadranskog mora. Na kraju je opisana metodologija izrade konačnih datoteka DMR-a nastalih prikladnom kombinacijom SRTM3x3 i DMR4x5 podataka, globalnih Smith&Sandwell batimetrijskih podataka dobivenih iz satelitske altimetrije i dubina nastalih digitalizacijom batimetrijske karte Jadranskog mora, koje će biti korištene u budućim računanjima za potrebe fizikalne geodezije u nas.

Ključne riječi: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), digitalni bodel reljefa (DMR), batimetrija, Hrvatska, usporedba.

1. Uvod

Digitalni model reljefa–DMR (engl. Digital Elevation Model–DEM) predstavlja skup točaka na površini Zemlje čije su prostorne koordinate pogodne za računalnu obradu (Frančula, 2001). Digitalni model reljefa koristi se kao naziv za digitalne topografske i batimetrijske podatke vezane uz Zemljinu površinu, bez vegetacije i izgrađenih objekata pravilno raspoređene po koordinatnim osima. Sličan termin je digitalni model terena (engl. Digital Terrain Model–DTM), koji uključuje

¹ Prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Katedra za državnu izmjeru, Kačićeva 26, 10 000 Zagreb, e-mail: tomislav.basic@geof.hr

² Mag. geod. Goran Buble, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Katedra za državnu izmjeru, Kačićeva 26, 10 000 Zagreb, e-mail: gbuble@geof.hr.

vegetaciju, izgrađene objekte i prijelomne linije u svrhu bolje aproksimacije terena.

Poznavanje topografskih podataka visoke rezolucije vrlo je značajno za potrebe modeliranja Zemljina polja ubrzanja sile teže, s obzirom da su kratkovalne varijacije tog polja visoko korelirane s topografijom. Istodobno, zbog svoje nedovoljne kvalitete DMR je bio jedna od osnovnih prepreka k ostvarivanju boljih točnosti u modeliranju plohe geoida. Modeliranje se obično zasniva na tzv. remove-restore postupku, gdje se topografski podatci koriste za glačanje gravimetrijskih podataka (Bašić, 2001). Međutim, DMR je samo model Zemljine površine koji je podložan pogreškama koje utječu na modeliranje polja ubrzanja sile teže. Kao i kod ostalih ulaznih podataka u postupku modeliranja polja sile teže, potrebno je ocijeniti točnost podataka DMR-a na promatranom području. Točnost može biti procijenjena na temelju dostupnih točaka s poznatim vrijednostima položajnih koordinata i visina (trigonometri, GPS-točke, nivelmanski reperi). Točnost DMR-a često nije jedinstvena s obzirom na korištenje više izvora za njegovu izradu.

Područje promatrano tim ispitivanjem ograničeno je na šire područje Hrvatske, $40^{\circ}N < \varphi < 49^{\circ}N$ i $10^{\circ}E < \lambda < 23^{\circ}E$, za koje je svojstvena raznovrsna i složena topografija, razvedena obala i nedovoljno poznate dubine Jadranskog i Sredozemnog mora.

Poseban naglasak dan je Shuttle Radar Topography Mission SRTM3x3 DMR-u (rezolucije $3'' \times 3''$), značajnom zbog homogenosti na cijelom području od interesa, dostupnosti i visoke pouzdanosti podataka. Taj je DMR uspoređen s visinama postojećega DMR4x5 (rezolucije $4'' \times 5''$), visinama raspoloživih trigonometara i visinama repera II. nivelmana visoke točnosti.

2. Pregled raspoloživih digitalnih modela reljefa

Trenutačno je na internetu dostupno mnogo globalnih, ili gotovo globalnih, DMR-skupova podataka različitih svojstava. Pregled njihovih osnovnih karakteristika dan je u nastavku.

2.1 GTOPO30 DEM

GTOPO30 (US Geological Survey 1997) globalni je DMR s horizontalnom rezolucijom od $30'' \times 30''$ ($\sim 1 \times 1$ km) koji pokriva cijelo područje Zemlje (širine od $90^{\circ}S$ do $90^{\circ}N$ i dužine od $180^{\circ}W$ do $180^{\circ}E$). GTOPO30 razvijen je za upotrebu na regionalnoj i kontinentalnoj razini. Morska područja postavljena su na "no data" vrijednost -9999 . Zbog rasterskog načina zapisa datoteke visina, otoci manji od 1 km^2 nisu prikazani. Izvori podataka korišteni za izradu GTOPO30 DMR-a nalaze se u tablici 1.

Podrobne informacije o svojstvima GTOPO30 DMR-a, uključujući formate zapisa, izvore podataka, metodologiju nastanka, procjenu točnosti i korisničke upute, mogu se pronaći na URL1. Podatci GTOPO30 korišteni su za popunjavanje praznina prilikom stvaranja SRTM30 DMR-a u područjima sjevernije od $60^{\circ}N$ i južnije od $56^{\circ}S$.

Tablica 1. *Izvori podataka korišteni za izradu GTOPO30 DMR-a.*

Izvor podataka	%
Digital Terrain Elevation Data (DTED)	50,0
Digitalna karta svijeta	29,9
USGS 10 DEM	6,7
Vojna karta 1:1 000 000	1,1
International Map of the World 1:1 000 000	3,7
Topografska karta Peru 1:1 000 000	0,1
New Zealand DEM	0,2
Antarctic Digital Database	8,3

2.2 DTED0 DEM

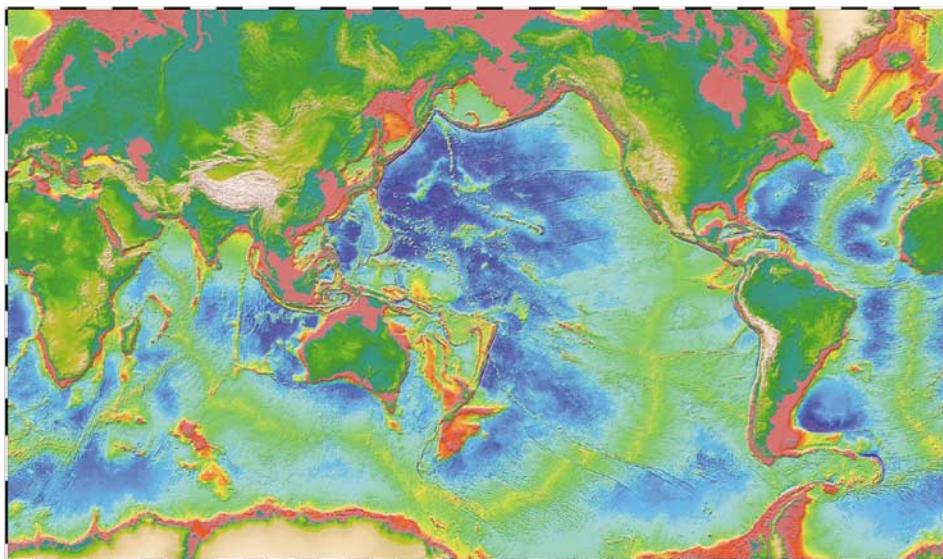
Digital Terrain Elevation Data (DTED) Level 0, rezolucije 30"x30" (~1x1 km), razvila je National Imagery and Mapping Agency (NIMA). Apsolutna i relativna točnost tog modela procijenjena je na 30 m odnosno 20 m. Iako postoji više stupnjeva kvalitete DTED-podataka, DTED0 jedini je javno dostupan te je stoga i predmet proučavanja ovog rada. Visine DTED0 određene su u odnosu na srednju razinu morske površine (Mean Sea Level – MSL) i datum WGS84.

2.3 ETOPO2/ETOP05 DEM

Digitalni model reljefa ETOPO5 objavila je 1988. godine US National Geophysical Data Centre (NOAA), a ima rezoluciju od 5' (~9 km). Novija verzija ETOPO2 objavljena je 2001. godine i ima rezoluciju od 2' (~3,6 km). Podatci ETOPO2 izrađeni su od više različitih skupova podataka: GLOBE DEM, Smith&Sandwell (1997) globalni batimetrijski podatci (vidi sliku 1), Digital Bathymetric Data Base (DBDB), International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) i Digital Bathymetric Data Base 5 (DBDB5). Visine ETOPO2/ETOP05 određene su u odnosu na srednju razinu morske površine (Mean Sea Level – MSL) i datum WGS84. Detaljne informacije o podacima ETOPO2 dostupne su na URL3. Globalni batimetrijski model Smith&Sandwell (Smith and Sandwell, 1997), nastao upotrebom satelitske altimetrije, predstavlja jedinstveni skup batimetrijskih podataka koji je pronašao primjenu u proučavanju Zemljinih litosfernih struktura, vulkana na oceanskom dnu, plimnih valova, u identifikaciji tektonskih elemenata na oceanskom dnu te oceanografiji i pomorskoj biologiji.

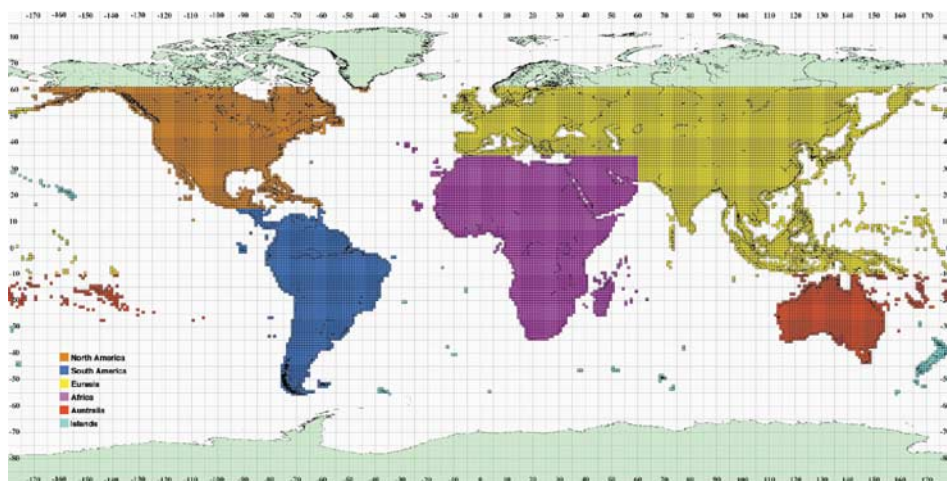
2.4 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) zajednički je projekt National Aeronautics and Space Administration – NASA, National Imagery and Mapping Agency – NIMA (od 2005. godine naziv promijenjen u NGS – National Geospatial Intelligence Agency), German Space Agency (DLR) i Italian Space Agency (ASI). Podatci SRTM-misije dostupni su javnosti od kraja 2003. godine i pokrivaju širine



Slika 1. Globalni batimetrijski model Smith&Sandwell u kombinaciji s GTOPO30.

na području između 60°N i 54°S (pokrivenost 80% Zemljine kopnene površine), vidi sliku 2 (JPL, 2004). Podatci SRTM-misije prikupljeni su u veljači 2000. godine u razdoblju od 11 dana, korištenjem metode radarske interferometrije. Izrađene su datoteke visina rezolucije $1''\times 1''$ (SRTM1), na žalost dostupne samo za područje SAD-a. Javnosti izvan područja SAD-a dostupni su samo podaci rezolucije $3''\times 3''$ (SRTM3), izrađeni osrednjavanjem SRTM1 datoteka, i podaci SRTM30 (rezolucije $30''\times 30''$), izrađeni osrednjavanjem SRTM3-datoteka. Za područje Hrvatske do-



Slika 2. Područje pokriveno podacima SRTM-misije podijeljeno po kontinentima.

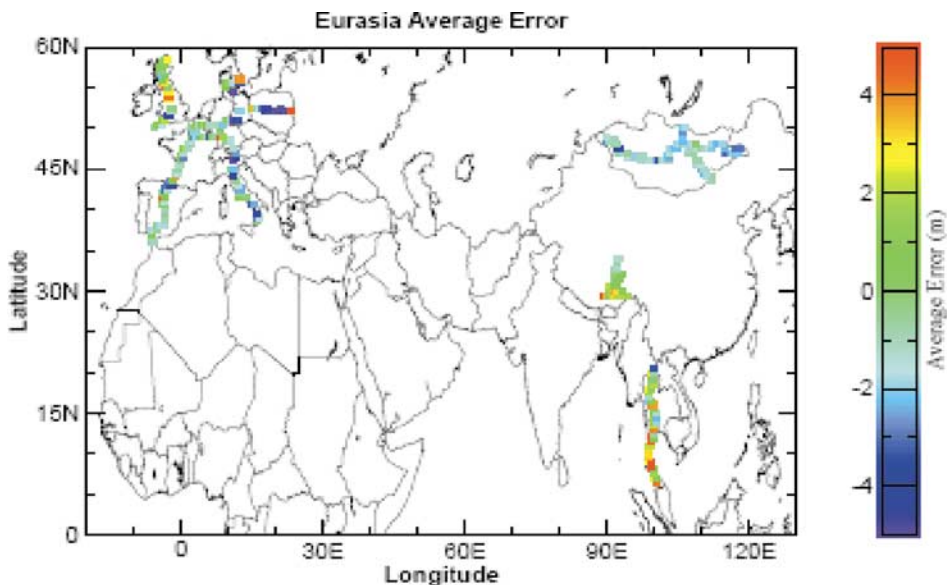
stupni su 3"x3" (~92m x 66m) podatci u datotekama koje pokrivaju područje 1°x1° (1201 redak x 1201 stupac). Također, dostupan je i SRTM30 DMR, izrađen kombinacijom osrednjenih SRTM3-podataka na rezoluciju 30"x30" i GTOPO30 podataka na području sjevernije od 60°N i južnije od 56°S.

Deklarirana apsolutna točnost SRTM3 podataka iznosi 16 m za visinsku i 20 m za horizontalnu komponentu (uz vjerojatnost 90%). Bitno je naglasiti da je stvarna točnost čak i bolja od garantirane. Tablica 2 prikazuje rezultate usporedbe SRTM3-visina s dostupnim kinematičkim GPS-mjerenjima koje je na 6 kontinenta obavila National Imagery and Mapping Agency (NIMA), a sadrže više od 9 400 000 mjerenja točnosti 50 cm (1σ) (Rodríguez et al., 2004). Slike 3 i 4 prikazuju razliku između SRTM3 i GPS-kinematičkih visina te prikaz slučajnih pogrešaka na području Euroazije.

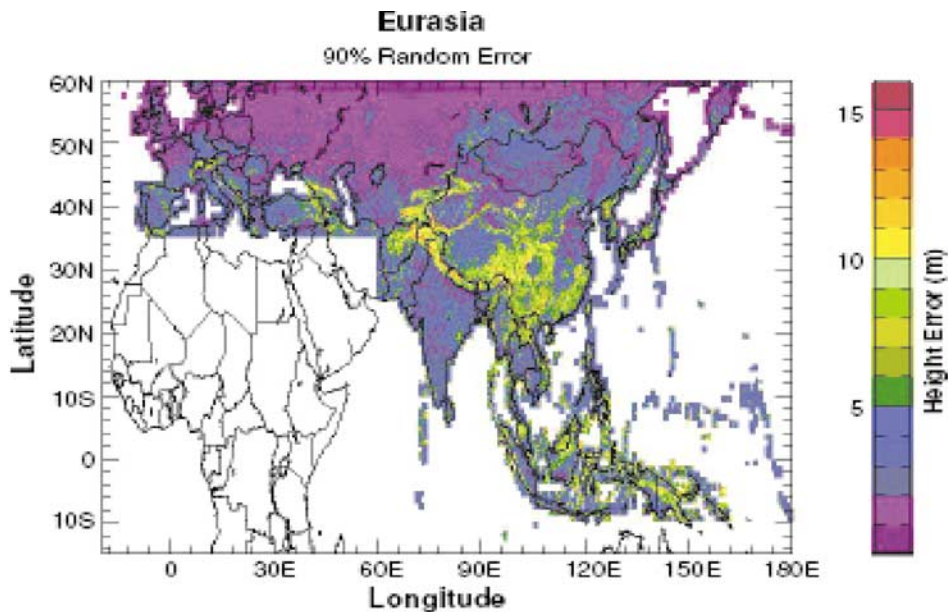
Tablica 2. Usporedba SRTM3-visina s kinematičkim GPS-mjerenjima (m).

	Euroazija
Apsolutna vertikalna pogreška	6,2
Relativna vertikalna pogreška	8,7

Visine su izražene u odnosu na geoid EGM96 i horizontalni datum WGS84. Podatci su podijeljeni po kontinentima i javno su dostupni u *.hgt binarnom formatu na URL2. Bitno je naglasiti da je SRTM tzv. first return system, što označuje jedan od nedostataka SRTM-visina jer sadrže i visine drveća i umjetno izgrađenih objekata. Jedan od većih nedostataka javno dostupnih SRTM-podataka su relativ-



Slika 3. Razlika SRTM-visina i GPS-kinematičkih visina.



Slika 4. Prikaz slučajnih pogrešaka na području Europe i Azije.

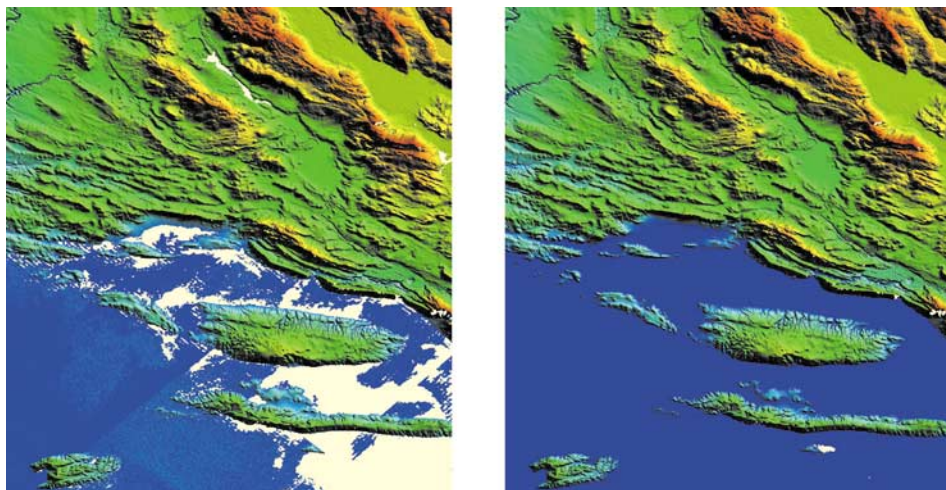
no brojna nedefinirana područja (područja bez podataka, slika 5), pogotovo na vodenim područjima te strmim planinskim područjima, nepovoljnim za odbijanje radarskog signala. Nadalje, SRTM-podatci ne sadrže batimetrijske podatke. Uza sve navedene nedostatke, podatci SRTM-misije predstavljaju velik napredak s obzirom na to da je to prvi globalni skup topografskih podataka izrađen u potpunosti



Slika 5. Područje slovenskih Alpa sa SRTM-nedefiniranim područjima.

jedinstvenom metodologijom i homogene točnosti, što s do sada dostupnim DMR-podacima nije bio slučaj. Također, sve provedene analize pokazuju da je riječ o najtočnijem DMR-u kreiranom do sada. Nedefinirana područja potrebno je na neki način popuniti drugim raspoloživim podacima uz primjenu metoda interpolacije.

Trenutačno su na URL2 dostupne dvije verzije *.hgt datoteka. Prva verzija (version 1) su datoteke nefiltriranih podataka, koje sadrže neuglašane vodene površine i grube pogreške (slika 6 lijevo). Visine određene preko morskih površina potrebno je uglašati i postaviti na nultu vrijednost. Najnovija verzija *.hgt podataka (version 2) daleko je superiornija jer su vodene površine postavljene na nultu vrijednost, obalna linija je jasno definirana, a grube su pogreške uklonjene (slika 6 desno). Međutim, u verziji 2 *.hgt datoteka još uvijek postoje nedefinirana područja kao na slici 5.



Slika 6. Prikaz verzije 1 (lijevo) i verzije 2 (desno) dostupnih *.hgt datoteka.

Interpolacija podataka u nedefiniranim područjima moguća je na dva načina:

- interpolacija visina samo na temelju SRTM3-podataka: to rješenje dati će dobre rezultate u ravninama, no sigurno ne zadovoljava potrebe interpolacije visina u planinskim područjima,
- interpolacija visina uz korištenje drugih podataka: to je preferirana metoda, za potrebu interpolacije SRTM3-visina korišten je skup podataka SRTM30+ izrađen osrednjavanjem SRTM3-podataka.

Za potrebe interpolacije visina na nedefiniranim područjima postoji nekoliko freeware programskih aplikacija, npr. SRTMFILL (URL4), BlackArt (URL5) i VTBuilder (URL6). Nedostatak je tih aplikacija nepostojanje korisničkih uputa i uvida u korištene metode interpolacije visina. Stoga je preferiran vlastiti program koji se koristi metodom interpolacije po najmanjim kvadratima uz nadopunu podataka iz drugih izvora u slučaju većih praznina.

Tablice 3 i 4 prikazuju osnovne karakteristike i bitne statističke pokazatelje za slobodno dostupne skupove podataka DMR-a koji pokrivaju šire područje Hrvatske.

Tablica 3. *Pregled dostupnih DMR-datoteka na internetu.*

DMR	Rezolucija	Područje pokrivanja
SRTM3	3" (~90 m)	60°N i 58°S, bez dubina
SRTM30+	30" (~1 km)	globalno, s dubinama
ETOPO2	2' (~3.6 km)	globalno, s dubinama
ETOPO5	5' (~9 km)	globalno, s dubinama
DTED0	30" (~1 km)	globalno, bez dubina
GTOPO30	30" (~1 km)	globalno, bez dubina

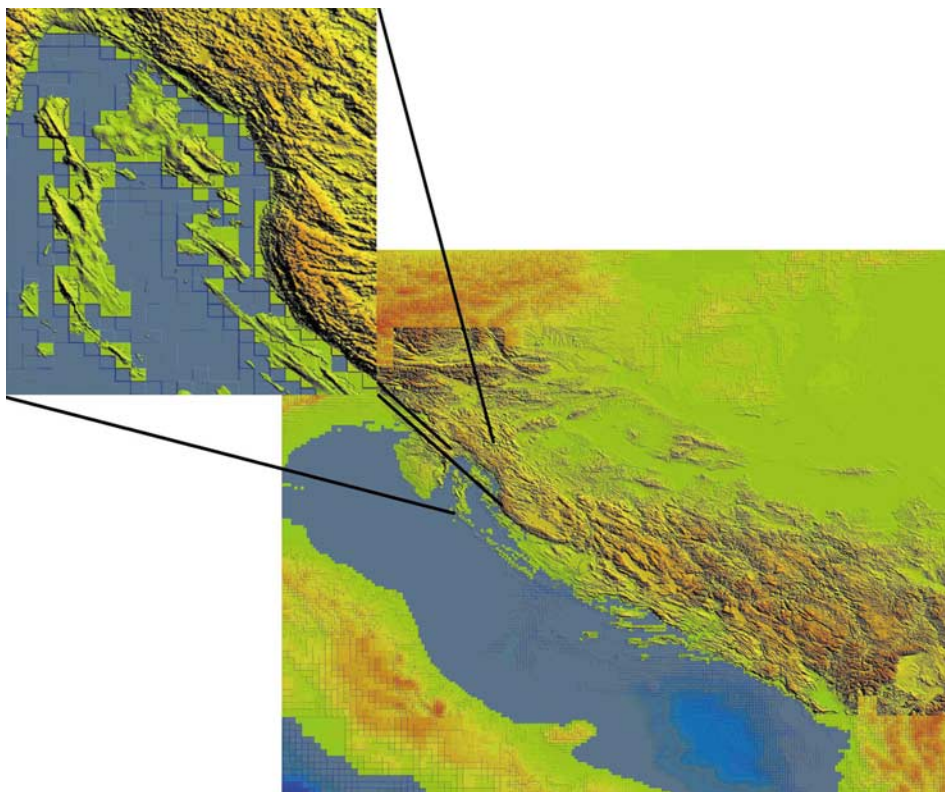
Tablica 4. *Statistički pokazatelji DMR-datoteka na širem području Hrvatske (m).*

DMR	Min.	Max.	Mean	SD
SRTM3	-43	2671	542	467
SRTM30+	-1205	2506	296	551
ETOPO2	-1203	2107	293	542
ETOPO5	-1298	1846	282	537
DTED0	0	2605	369	441
GTOPO30	1	2471	513	439

2.5 Karakteristike postojećeg DMR4x5

Za potrebe modeliranja polja sile teže na području Hrvatske korišten je DMR4x5, izrađen za kontinentalni dio bivše Jugoslavije digitalizacijom slojnice na topografskim kartama 1:25 000 za potrebe nekadašnje Savezne uprave za radiodifuziju 1983. Godine. Taj je DMR izrađen u rezoluciji 4"x5" (~120x110 m), i to na način da je svakom 4"x5" području (prozoru) pridodana najviša kota terena. Kontinentalna područja izvan prostora bivše države bila su nadopunjena visinama ETOPO5 DMR-a, dok je područje Jadranskog mora popunjeno batimetrijskim podacima 2,5'x2,5' (~4,6x3,3 km), preuzetima svojedobno u VGI Beograd (slika 7). Taj DMR korišten je na području Hrvatske prilikom računanja detaljnih modela geoida HRG98 (Bašić et al., 1999) i HRG2000 (Bašić, 2001).

Navedeni DMR4x5, osim svoje heterogene konstrukcije, sadržavao je i poneke grube pogreške, koje su vrlo vjerojatno degradirale točnost modela geoida u nekim lokalnim područjima. Obalna linija nije bila jasno definirana zbog blokova 2,5'x2,5' s pozitivnim vrijednostima visina koji su kvarili preciznu definiciju obalne linije (slika 7). Svi navedeni problemi morali su biti uklonjeni prije njegova preračunavanja na rezoluciju 3"x3", u svrhu kombinacije i usporedbe postojećih podataka s novim podacima SRTM-misije.



Slika 7. DMR_{4x5} korišten za potrebe računanja modela geoida HRG2000.

3. Međusobna usporedba raspoloživih DMR-a

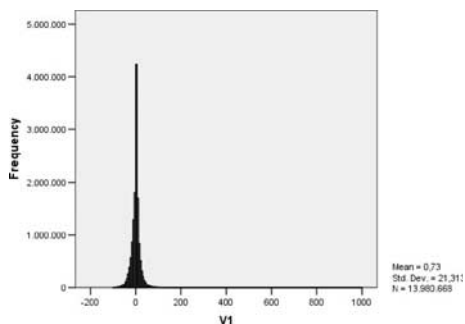
U nastavku slijedi usporedba visina raspoloživih DMR-a na kontinentalom dijelu Hrvatske odnosno dubina na području Jadranskog mora.

3.1 Usporedba postojećeg DMR_{4x5} s podacima SRTM_{3x3}

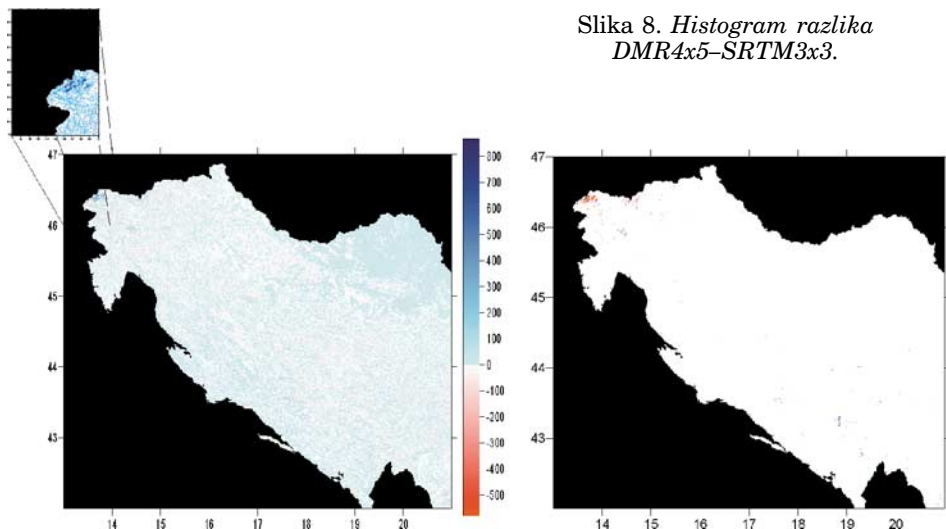
Osim što se u toj usporedbi uočavaju znatne razlike visina između tih dvaju DMR-a (tablica 5), gdje standardna devijacija iznosi 21,31 m, ističe se i srednja vrijednost razlike DMR_{4x5}–SRTM_{3x3} od 0,73 m, što izgleda logično s obzirom na činjenicu da je visina koja predstavlja 4"x5" prozor zapravo najviša kota terena. Napomenimo da su podaci SRTM_{3x3} definirani u odnosu na geoid EGM96 koji je na području Hrvatske viši od plohe službenoga geoida HRG2000 za 1,3 m (Hećimović i Bašić, 2003). Na slici 8 prikazan je histogram tih razlika, a na slici 9 razlike (lijevo) i položaj razlika većih od 100 m (desno). Najveće su razlike upravo ondje gdje su nedefinirana područja sa SRTM podacima (Alpe), što pokazuje da se interpolacija u tim područjima treba provesti vrlo pažljivo.

Tablica 5. Statistika razlika
DMR4x5–SRTM3x3 (m).

N	13 980 668
Mean	0,73
St.dev.	21,31
Min.	-99,00
Max.	996,00



Slika 8. Histogram razlika
DMR4x5–SRTM3x3.



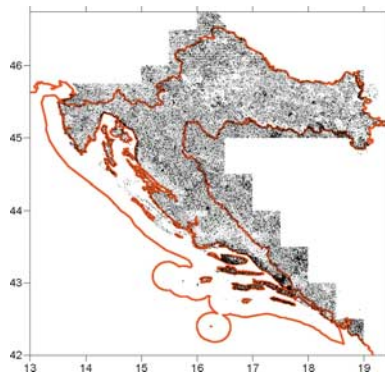
Slika 9. Razlike DMR4x5–SRTM3x3 u m (lijevo) i položaj razlika većih od 100 m (desno).

3.2 Usporedba DMR4x5 i SRTM3x3 s visinama trigonometara

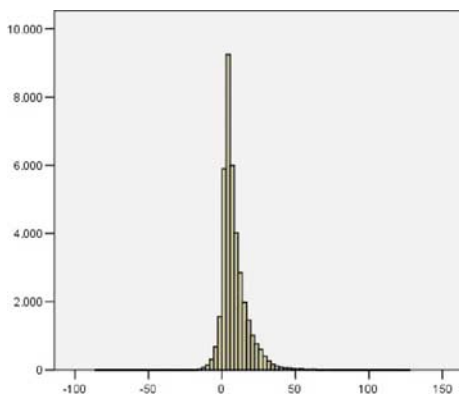
Za potrebe ispitavanja točnosti postojećeg DMR-a i SRTM-a korištena je najprije postojeća baza podataka koja sadrži 38 976 trigonometrijskih točaka s definiranim visinama, a dobivena je od Ministarstva obrane RH (tablica 6 i slika 10). Potrebno je naglasiti da su iz usporedbe izbačeni trigonometri na crkvenim tornjevima, dimnjacima i slično te da rezultati te usporedbe mogu ponegdje biti i problematični zbog nedovoljnog poznavanja točnosti same baze podataka i primijećenih brojnih grubih pogrešaka, nastalih ručnim unosom podataka. Uočene grube pogreške isključene su iz rezultata usporedbe, no moguće je da su neke ipak ostale skrivene. Usporedba je pokazala da su visine trigonometara općenito više od visina SRTM3x3 i DMR4x5 (vidi srednje vrijednosti razlika u tablici 6). Histogrami tih razlika mogu se vidjeti na slikama 11 i 12, dok su položaji razlika većih od 50 metara prikazani na slikama 13 i 14. Uočava se da je mnogo veći broj tih razlika između trigonometara i visina DMR4x5. Zbog nepouzdanosti pojedinih trigonometara, dobivene rezultate njihove usporedbe sa SRTM3x3 odnosno DMR4x5 datotekama treba uzeti s oprezom.

Tablica 6. *Usporedba DMR4x5 i SRTM3 visina s visinama trig. točaka (m).*

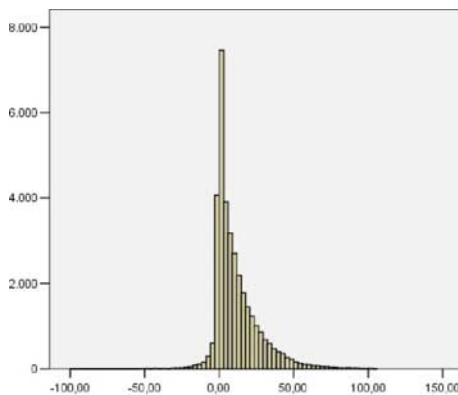
DMR	Trig. – SRTM3x3	Trig. - DMR4x5
N	38 976	38 976
Min.	-618,7	-629,8
Max.	845,5	852,2
Mean	8,3	11,5
St.dev.	15,3	19,9



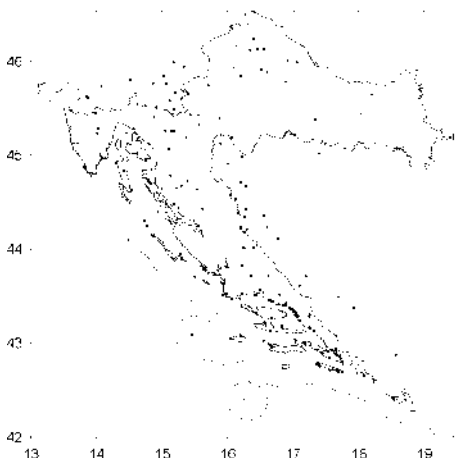
Slika 10. Položaj trigonometrijskih točaka korištenih za usporedbu (N=38 976).



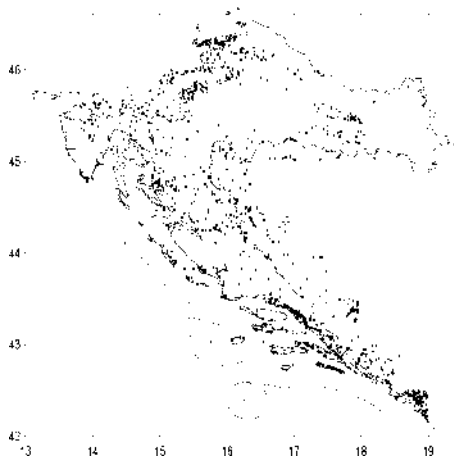
Slika 11. Histogram razlika TRIG-SRTM3x3.



Slika 12. Histogram razlika TRIG-DMR4x5.



Slika 13. Položaj razlika TRIG-SRTM3x3 većih od 50 m (N=189).



Slika 14. Položaj razlika TRIG-DMR4x5 većih od 50 m (N=1177).

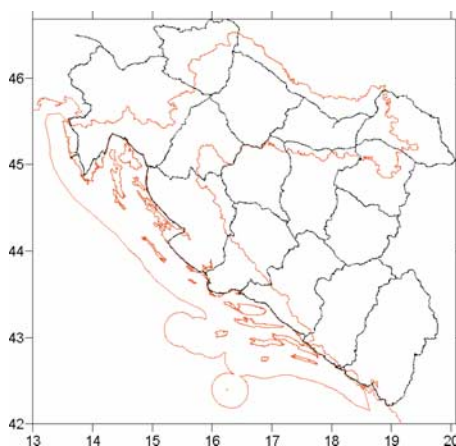
3.3 Usporedba DMR4x5 i SRTM3x3 s visinama repera IINVT-a

Datoteke DMR4x5 i SRTM3x3 dodatno su uspoređene s podatcima nivelmanskih mjerenja u II. nivelmanu visoke točnosti (IINVT), na reperima s definiranim približnim položajnim koordinatama određenima metodom digitalizacije (skidanja) s karata (slika 15). Tablica 7 sadrži glavne statističke pokazatelje te usporedbe, gdje se opet uočava nešto bolje slaganje podataka SRTM3x3 s reperima IINVT-a nego što je to slučaj s DMR4x5. Na slikama 16 i 17 vide se pripadni histogrami razlika, a na slikama 18 i 19 distribucija repera u kojima su razlike veće od 50 metara.

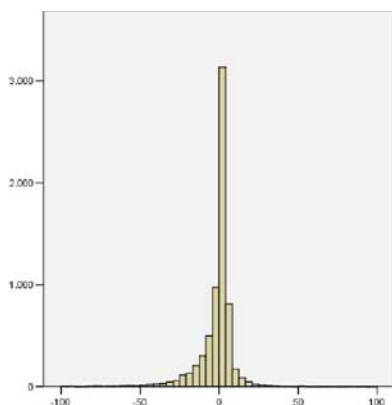
Analizom odstupanja uočeno je da se za obje datoteke visina ekstremna odstupanja prema IINVT-u od -912 m i -939 m (tablica 7) nalaze na istoj lokaciji, na strmim alpskim obroncima u Sloveniji. Budući da su položajne koordinate repera određene približno, te su ekstremne razlike najvjerojatnije posljedica toga. Za razliku od trigonometara, srednje vrijednosti razlika ovdje pokazuju da su visine II. nivelmana visoke točnosti niže u odnosu na visine SRTM3x3 i DMR4x5.

Tablica 7. Usporedba podataka IINVT s visinama DMR4x5 i SRTM3x3 (m).

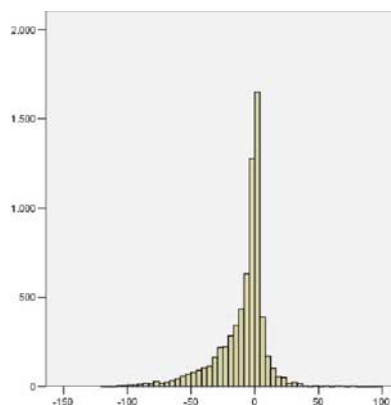
	IINVT-SRTM3x3	IINVT-DMR4x5
N	6 851	6 851
Min	-912,1	-939,1
Max	99,6	137,8
Mean	-3,0	-10,8
St.dev.	27,5	31,4



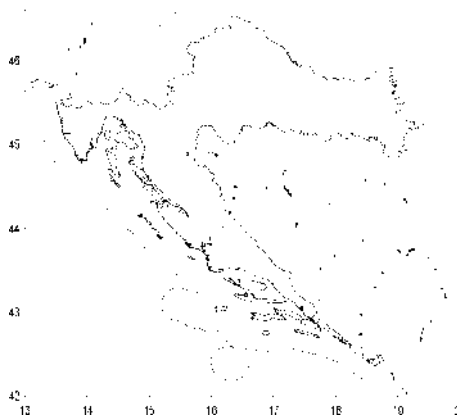
Slika 15. II. nivelman visoke točnosti (IINVT) (N=6851).



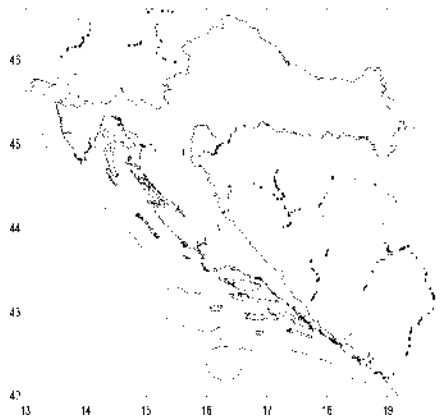
Slika 16. Histogram razlika IINVT-SRTM3x3.



Slika 17. Histogram razlika IINVT-DMR4x5.



Slika 18. Položaj razlika
IINVT-SRTM3x3 većih od 50 m
($N=116$).



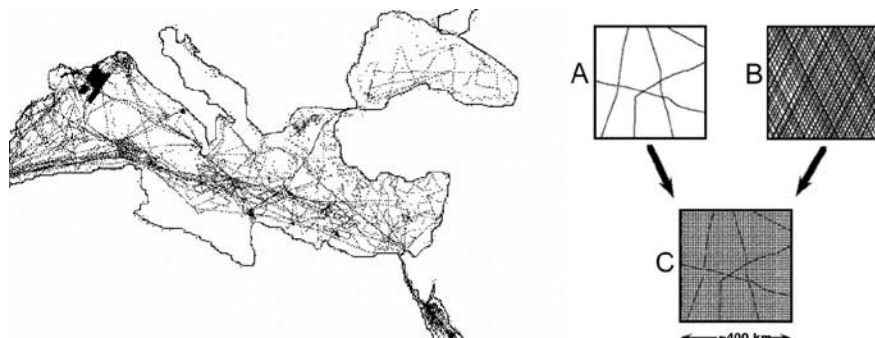
Slika 19. Položaj razlika
IINVT-DMR4x5 većih od 50 m
($N=405$).

3.4 Usporedba dostupnih batimetrijskih podataka

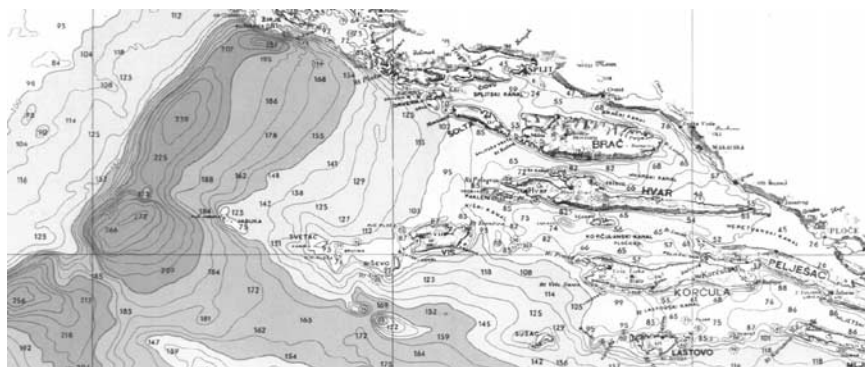
Za potrebe definiranja dubina na promatranom području dostupni su bili sljedeći podatci:

- Globalni batimetrijski podatci Smith&Sandwell (1997) ugrađeni u modele ETOPO2 i SRTM30+, izrađeni metodom satelitske altimetrije. Digitalna batimetrijska karta oceana rezolucije od 1 do 12 km izrađena je kombinacijom mjerenja batimetrijskih profila i Geosat/ERS1 podataka satelitske altimetrije. S obzirom na specificiranu točnost od 250 m, za područje Jadranskog mora nisu pouzdane. Poznato je da zbog nedovoljne pouzdanosti gravitacijskih efekata batimetrijski podatci određeni metodom satelitske altimetrije nisu pouzdani za plitka mora (< 250 m) (vidi URL3). U taj model ugrađeni su i dostupni podatci direktnih batimetrijskih mjerenja. Na žalost, u model dubina Jadranskog mora nisu uključena batimetrijska mjerenja, što je dodatni nedostatak tih dubina na području Jadranskog mora (vidi sliku 20).
- Dubine ugrađene u postojeći model DMR4x5 izrađene osrednjavanjem dubina na području 2.5'x2.5'. Nedostatak su tih dubina priobalna područja postavljena na pozitivne vrijednosti koja su kvarila definiciju obalne linije i dubine u priobalnom području (vidi sliku 7).
- Batimetrijski podatci dobiveni digitalizacijom slojnica hidrografske karte Jadranskog mora, mjerila 1:1 000 000 (Hrvatski hidrografski institut-HHI, 1992), vidi sliku 21. Batimetrijska karta izrađena je korištenjem podataka iz raznovrsnih izvora, pa su tako korištena čak i batimetrijska mjerenja s početka XX. stoljeća (usmena komunikacija).

Zbog nedovoljno detaljnog prikaza dubina u Jadranskom moru u Smith-Sandwellovu globalnom batimetrijskom modelu, na području $41^{\circ}N < \varphi < 46^{\circ}N$ i $12^{\circ}E < \lambda < 20^{\circ}E$, kao izvor dubina koristit će se dubine dobivene digitalizacijom slojnica batimetrijske karte. Dubine iz Smith-Sandwellova modela koristit će se samo za područja



Slika 20. Batimetrijska mjerenja uključena u Smith-Sandwellov globalni batimetrijski model na Sredozemlju i princip kombinacije batimetrijskih mjerenja (A) i dubina dobivenih satelitskom altimetrijom (B).

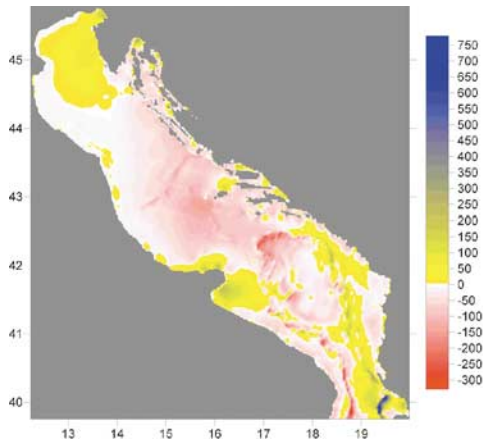


Slika 21. Isječak batimetrijske karte mjerila 1:1 000 000.

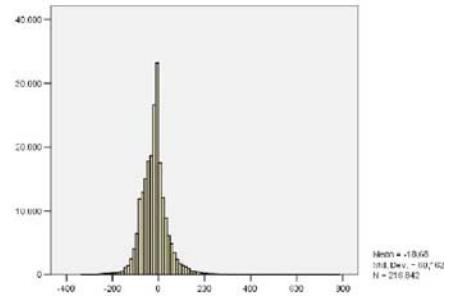
$\varphi < 41^\circ N$. Rezultati usporedbe batimetrijskih modela pokazuju znatne razlike, što pokazuju standardne devijacije od 60,2 do 79,4 m. Vidljivo je da su dubine 2,5'x2,5', koje su do sada korištene za prikaz dubina u DMR4x5, premalenog iznosa u odnosu na dubine dobivene digitalizacijom batimetrijske karte HHI-a i Smith-Sandwellovih dubina (tablica 8). Slike 22 do 27 prikazuju razlike između razmatranih batimetrijskih modela i pripadne histograme tih razlika.

Tablica 8. Statistički pokazatelji razlika dubina (m).

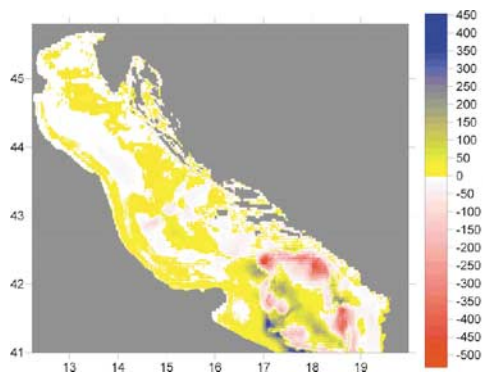
DMR	HHI-S&S	HHI-2,5'x2,5'	S&S-2,5'x2,5'
N	216 842	187 298	187 257
Min.	-328	-535	-485
Max.	779,0	453,0	420,0
Mean	-18,7	-7,2	15,6
St.dev.	60,2	65,1	79,4



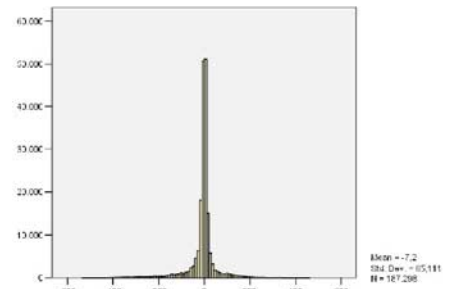
Slika 22. Razlike HHI–Smith&Sandwell.



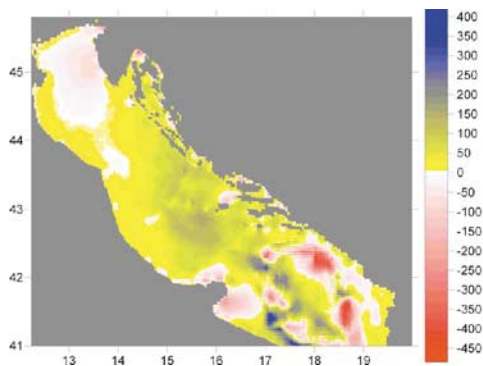
Slika 23. Histogram HHI–Smith&Sandwell.



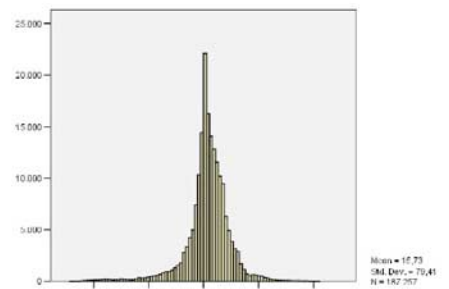
Slika 24. Razlike HHI–2,5x2,5.



Slika 25. Histogram HHI–2,5x2,5.



Slika 26. Razlike Smith&Sandwell–2,5x2,5.



Slika 27. Histogram S&S–2,5x2,5.

4. Izrada konačnih datoteka DMR-a za potrebe fizikalne geodezije

Nakon provedenih usporedbi i analize razlika između dostupnih DMR-a te nakon što je za sjeverni dio Hrvatske u međuvremenu ispitan utjecaj DMR4x5 i SRTM3x3 na računanje RTM (engl. Residual Terrain Modeling) fizikalnih parametara (Hećimović i Bašić, 2005), odlučeno je da se za potrebe budućeg modeliranja geoida na cjelokupnom području Hrvatske izrade dva skupa podataka koja sadrže slijedeće datoteke digitalnog modela reljefa:

Skup datoteka 1 (DMR1):

- Fini DMR na području $40^{\circ}\text{N} < \varphi < 49^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\text{E} < \lambda < 23^{\circ}\text{E}$, rezolucije $3'' \times 3''$, izrađen kombinacijom podataka SRTM3, dubina dobivenih digitalizacijom izobata na batimetrijskoj karti HHI-a i Smith-Sandwellovih dubina za područja $\varphi < 41^{\circ}\text{N}$ (slika 28).
- Datoteka grubog DMR-a na području $36^{\circ}\text{N} < \varphi < 53^{\circ}\text{N}$, $5^{\circ}\text{E} < \lambda < 28^{\circ}\text{E}$, rezolucije $5' \times 5'$, izrađena osrednjavanjem datoteke finog DMR-a rezolucije $3'' \times 3''$.
- Datoteka referentnog DMR-a rezolucije $20' \times 30'$, izrađena računanjem plohe srednjih visina iz datoteke grubog DMR-a.

Skup datoteka 2 (DMR2):

- Fini DMR na području $40^{\circ}\text{N} < \varphi < 49^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\text{E} < \lambda < 23^{\circ}\text{E}$, rezolucije $3'' \times 3''$, izrađen kombinacijom DMR4x5 datoteke preračunane na rezoluciju $3'' \times 3''$, podataka SRTM3 za područja izvan pokrivenosti $4'' \times 5''$ podacima, dubina dobivenih digitalizacijom izobata s batimetrijske karte HHI-a i Smith-Sandwellovih dubina za područja $\varphi < 41^{\circ}\text{N}$.
- Datoteka grubog DMR-a na području $36^{\circ}\text{N} < \varphi < 53^{\circ}\text{N}$, $5^{\circ}\text{E} < \lambda < 28^{\circ}\text{E}$, rezolucije $5' \times 5'$, izrađena osrednjavanjem datoteke finog DMR-a rezolucije $3'' \times 3''$.
- Datoteka referentnog DMR-a rezolucije $20' \times 30'$, izrađena računanjem plohe srednjih visina iz datoteke grubog DMR-a.

Navedeni skupovi podataka bit će korišteni za računanje utjecaja visokofrekventnog dijela topografije na fizikalne parametre Zemljina polja ubrzanja sile teže (rezidualno modeliranje topografije) te za potrebe interpolacije ubrzanja sile teže (kompletna topografska ili topoizostatska redukcija). Za ta se računanja najčešće koristi poznati TC (Terrain Correction) računalni program (Forsberg, 1984).

5. Zaključak

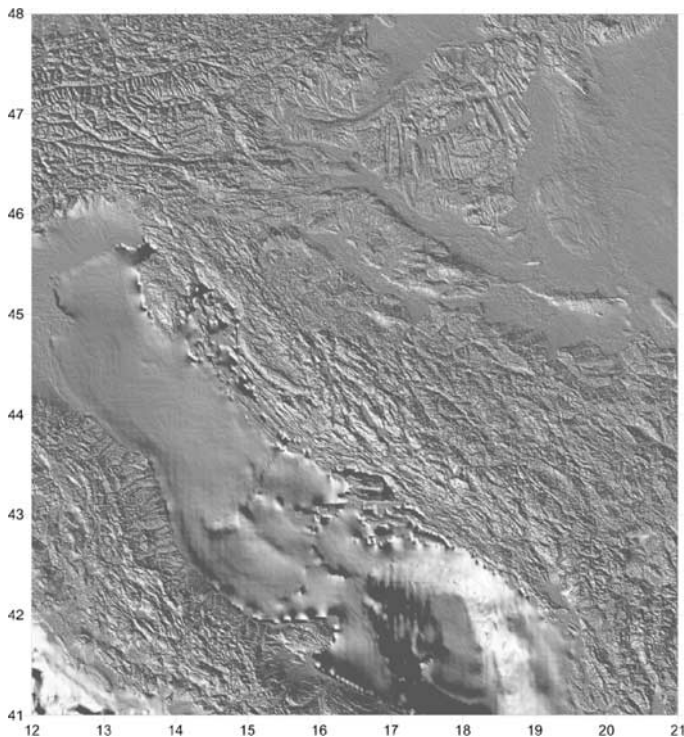
SRTM3x3 predstavlja veliki napredak na području izrade i dostupnosti digitalnih modela reljefa. SRTM3 je jedini globalni DMR s jedinstvenom metodologijom izrade i homogenom ocjenom točnosti. Podatci SRTM3x3 su uspoređeni s do sada korištenim podacima DMR4x5. Rezultati usporedbe pokazali su postojeće znatne grube pogreške u DMR4x5 podacima, koje su u okviru ovih istraživanja uklonjene. Podatci SRTM3x3 i DMR4x5 uspoređeni su s visinama 37 919 trigonometara

različitih redova i 7 440 repera II. nivelmana visoke točnosti. Uočljivo je da bolje slaganje s visinama trigonometara i repera pokazuju SRTM3x3 podatci.

Osnovni problem podataka SRTM3x3 su relativno brojna nedefinirana područja na morskim površinama i strmim planinskim obroncima. Postoje dvije mogućnosti za rješavanje tog problema, interpolacija visina samo na temelju podataka SRTM3x3 (ta će metoda dati zadovoljavajuće rezultate samo u ravničastim područjima), te interpolacija visina uz korištenje drugih izvora podataka (npr. upotreba GTOPO30 DMR-a).

Provedeno je i ispitivanje točnosti dostupnih modela dubina na području Jadranskog mora, na temelju čega je zaključeno da dubine dobivene digitalizacijom batimetrijske karte HHI-a u mjerilu 1:1 000 000 najbolje prezentiraju dubine u Jadranskom moru.

Iduća ispitivanja pokazati će koristi upotrebe nove datoteke SRTM3x3 pri modeliranju fizikalnih parametara. Nadalje, SRTM3x3 je u osnovi digitalni model terena, ne digitalni model reljefa, jer uključuje i visine izgrađenih objekata i vegetacije. Ta činjenica ipak ne bi trebala uzrokovati znatnije probleme pri modeliranju parametara Zemljina polja ubrzanja sile teže i redukcija ubrzanja sile teže, pogotovo ne u slučaju kada se koristi uobičajena tehnika modeliranja remove-restore (Bašić, 2001). Daljnji naponi u svezi primjene novih datoteka visina i dubina za potrebe fizikalne geodezije u Hrvatskoj tek predstoje.



Slika 28. Datoteka visina i dubina na širem području Hrvatske, rezolucije 3"x3".

Literatura

- Bašić, T.; Brkić, M.; Sünkel, H. (1999): A New, More Accurate Geoid for Croatia. EGS XXIII General Assembly, Nice, 20-24 April 1998, In: Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol. 24, No. 1, Solid Earth and Geodesy, Special Issue: Recent Advances in Precise Geoid Determination Methodology, I. N. Tziavos and M. Vermeer (Eds.), 67-72, Elsevier Science Ltd.
- Bašić, T. (2001): Detaljni model geoida Republike Hrvatske HRG2000. Izvješća Državne geodetske uprave o znanstveno-stručnim projektima iz 2000. godine, urednik I. Landek, 11–22, Zagreb.
- Forsberg, R. (1984): A Study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling, Ohio State University Report No. 355, Columbus, Ohio.
- Frančula, N. (2001): Digitalna kartografija, Interna skripta, Geodetski fakultet, Zagreb.
- Hećimović, Ž.; Bašić, T. (2003): Globalni geopotencijalni modeli na teritoriju Hrvatske. Geodetski list 57 (80), 2, 73–89, Zagreb.
- Hećimović, Ž.; Bašić, T. (2005): Modeling of Terrain Effect on Gravity Field Parameters in Croatia. IAG International Symposium Gravity, Geoid and Space Missions GGSM2004, Session 5: Topographic data bases and gravity modeling, Porto, Portugal, 30. 8.–3. 9. 2004., CD-Proceedings, paper 1–6, Porto 2005.
- JPL (2004): SRTM–The Mission to map the World, Jet propulsion Laboratory, California Institute of Technology, www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html.
- Rodríguez, C. S.; Morris, J. E.; Belz, E. C.; Chapin, J. M.; Martin, W.; Daffer, S.; Hensley, W. (2004): An Assessment of SRTM Topographic Product, Jet Propulsion Laboratory, D–31639.
- Smith, W. H. F.; Sandwell, D. S. (1997): Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, Science Vol. 277, 1956–1962.
- URL 1: USGS(2006). US Geological Survey, <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.asp>, (1. 3. 2006.).
- URL 2: USGS(2005). US Geological Survey, <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/>, (1. 3. 2006.).
- URL 3: ETOPO2 Global Topography, www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mkg04.html, (1. 3. 2006.).
- URL 4: SRTMfill Software, www.3dnature.com/srtmfill.html, (1. 3. 2006.).
- URL 5: Blackart Software, www.terrainmap.com/, (1. 3. 2006.).
- URL 6: VTBuilder Software, www.vterrain.org/Doc/VTBuilder/overview.html, (1. 3. 2006.).

Comparisson of SRTM3 Global Heights Model with Existing Digital Terrain Models on the Territory of Croatia

ABSTRACT. In this paper an overview of the available Digital Terrain Models (DTM) on internet and comparison of existing DTM4x5 on the territory of Croatia with the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3) DTM is given. DTM4x5 (resolution of 4 arc seconds in latitude direction and 5 arc seconds in longitude direction) and SRTM3x3 (3 arc seconds resolution in latitude and longitude direction) digital terrain models are compared further with the heights from the data base of trigonometric points as well as with the heights of the benchmarks of the Second Leveling of the High Precision. The comparison of data from several bathymetry sources for the Adriatic Sea area is made too. At the end the methodology of establishing the final DTM data files created through the adequate combination of SRTM3, DTM4x5, worldwide Smith&Sandwell bathymetry derived from satellite altimetry and depths obtained by digitizing the bathymetry map of Adriatic Sea, which will be used in future computations for the necessity of physical geodesy, is described.

Key words: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Digital Terrain Model (DTM), bathimetry, Croatia, comparison.

Prihvaćeno: 2007-06-01