

UDK 528.932:004.9:528.34:528.335:528.873
Pregledni znanstveni članak / Review

Utjecaj izbora metode uklanjanja depresija na digitalni model reljefa dobiven slikovnom korelacijom

Sanja ŠAMANOVIĆ, Damir MEDAK, Duška KUNŠTEK – Zagreb¹

SAŽETAK. Geoinformacijske analize na velikim područjima nameću potrebu za sve većom automatizacijom ne samo u obradi, već i prilikom prikupljanja podataka. Za potrebe istraživanja primjenjivana je metoda slikovne korelacije, koja automatizira i ubrzava postupak prikupljanja rastera visinskih točaka. Podaci su prikupljeni kombinacijom dviju osnovnih metoda usklađivanja, korelacijom zasnovanom na plošnim podacima i korelacijom zasnovanom na osobinama tekstura. Na tako nastalom digitalnom modelu reljefa (DMR), za potrebe hidroloških analiza, uklonjene su depresije. Depresije na DMR-u onemogućavaju simulaciju površinskog otjecanja, a mogu biti stvarne značajke terena ili su rezultat pogrešaka tijekom uzorkovanja. Uklanjanje depresija izvedeno je dvjema osnovnim metodama implementiranim u GIS programima, metodom otjecanja (carving or breaching) i metodom popunjavanja (filling). Metode su primijenjene na tri geomorfometrijski različita područja Republike Hrvatske: planinskom masivu Biokovo, brežuljkastom području planine Papuk i ravničarskom području općine Nijemci. Slikovna korelacija izvedena je u dvije rezolucije, 5x5 i 25x25 metara. Analiza podataka obuhvatila je geomorfometrijske i kvantitativne analize, te je za svako područje preporučena metoda uklanjanja depresija koja je manje izmijenila geomorfometriju DMR-a.

Ključne riječi: DMR, slikovna korelacija, korelacija plošnih podataka, korelacija osobina tekstura, uklanjanje depresija, metoda prokopavanja, metoda popunjavanja.

1. Uvod

DMR je skup položajno (i visinski) određenih točaka i geometrijskih elemenata (prijelomnica, linija oblika i površina isključenja) koji prikazuju površinu zemljišta i iz njih izračunat matematički model te plohe (Frančula i Lapaine 2008). U

¹ dr. sc. Sanja Šamanović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: ssamanovic@geof.hr;

prof. dr. sc. Damir Medak, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: dmedak@geof.hr;

doc. dr. sc. Duška Kunštek, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: kduska@grad.hr.

Republici Hrvatskoj u službenoj su upotrebi izvorni podaci DMR-a nastali fotogrametrijskom izmjerom te izvedeni digitalni model reljefa u formatu ASCII rezolucije 25x25 metara. Fotogrametrijske metode osnovne su metode izmjere za brzo i masovno prikupljanje geopodataka, pri čemu se upotrebljavaju aerofotogrametrijske snimke cikličnog i drugih snimanja, satelitske snimke, te radarska i laserska mjerenja. Fotogrametrija i daljinska istraživanja su umijeće, znanost i tehnologija dobivanja pouzdanih informacija iz nekontaktnih snimaka (fotografskih, senzorskih i drugih), o Zemlji, njezinu okruženju i drugim fizičkim objektima i procesima, pomoću snimanja, mjerenja, analiziranja i predočavanja (URL 1).

Velika istraživanja područja nametnula su potrebu za sve većom automatizacijom ne samo u obradi, već i prilikom prikupljanja podataka, pa je za potrebe istraživanja primjenjivana metoda slikovne korelacije, koja automatizira i ubrzava postupak prikupljanja rastera visinskih točaka. Slikovna korelacija je postupak određivanja slikovne pozicije nekog detalja na snimci, temeljem njegove podudarnosti sa slikovnim uzorkom uzetim s druge snimke ili unaprijed definiranim u računalnoj bazi (Gajski 2012).

Geomorfometrija je znanstvena grana koja kao osnovnu podlogu u svojim istraživanjima upotrebljava DMR, analizom kojega je omogućeno izdvajanje morfometrijskih parametara terena i površinskih značajki. Geomorfometrija je kvantitativna analiza reljefa Zemljine površine koja omogućava objektivnu usporedbu između oblika i sastavnih elemenata u reljefu (npr. usporedbe između kutova nagiba padina, parametara koji opisuju morfološke značajke slivova i dr.) (Tomljenović i Matoš 2012).

Algoritmi za izračun hidroloških oblika (slivovi, rijeke, vrulje, ...) ovise o strukturi DMR-a, a pri gotovo svim hidrološkim analizama prvi je korak analiza površinskog otjecanja, odnosno smjera kretanja vode do nižih točaka na terenu. Hidrološke metode koje kreiraju mrežu linija površinskog otjecanja i područja odvodnje na temelju simuliranja površinskog tijeka otjecanja zahtijevaju da se na DMR-u najprije uklone jame (pit, sink).

Jame se u DMR-u nazivaju depresije ili lokalni minimumi (Planchona i Darboux 2001), a javljaju se kada je piksel ili grupa piksela u potpunosti okružena susjednim pikselima više nadmorske visine. Uklanjanje depresija mijenja geomorfometriju digitalnog modela, što utječe na izračun parametara vezanih za reljef, pa je izbor metode uklanjanja depresija važan korak pri svim geomorfometrijskim analizama.

2. Metoda slikovne korelacije

Iz aerofotogrametrijskih snimaka metodom slikovne korelacije prikupljen je raster visinskih točaka u rezoluciji 5x5 i 25x25 metara. Korelacija je linearna transformacija koja u ravnini prevodi točke u pravce, a pravce u točke, dok u prostoru prevodi točke u ravnine, a ravnine u točke. U statistici: zavisnost dviju slučajnih varijabli ili skupova brojeva (Frančula i Lapaine 2008).

Proces automatskog traženja podudarnih slikovnih uzoraka na nekoliko snimaka naziva se usklađivanje snimaka (image matching). Osnovni pojmovi povezani s podudaranjem slika su izbor entiteta za usklađivanje (matching entity), koji

predstavlja jednostavan element za uspoređivanje s jednostavnim elementom na drugoj snimci, i mjera sličnosti koja predstavlja brojčanu mjeru kojom se vrednuje usklađivanje entiteta (Veverka i Potuchkova, 2012). Postoje dvije osnovne metode usklađivanja (Gajski 2012): korelacija zasnovana na plošnim podacima i korelacija zasnovana na osobinama tekstura. Prikupljanje podataka obavljeno je kombinacijom tih dviju metoda.

U korelaciji baziranoj na plošnim podacima (area based) entiteti za usklađivanje su tonske vrijednosti, pri čemu nije dovoljno usporediti samo jedan piksel, već razdiobu tonskih vrijednosti u pojedinim dijelovima slike s uzorkom uzetim iz druge slike ili računalne baze.

Korelacija plošnih podataka dijeli se na korelaciju pomoću koeficijenta korelacije i korelaciju metodom najmanjih kvadrata.

U korelaciji pomoću koeficijenta korelacije ciljanu površinu u traženoj površini utvrđujemo pomoću korelacijskog koeficijenta (mjera korelacije) (Gajski 2012):

$$r = \frac{\sigma_{TM}}{\sigma_T \sigma_M}, \quad (1)$$

gdje je:

σ_{TM} – kovarianca tonske vrijednosti, koja se računa prema izrazu:

$$\sigma_{TM} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\left(g_T(x_i, y_j) - \bar{g}_T \right) \left(g_M(x_i, y_j) - \bar{g}_M \right) \right]}{nm - 1}, \quad (2)$$

gdje su:

g_T, g_M – tonska vrijednost piksela u uzorku i piksela u području usporedbe

σ_T, σ_M – standardna devijacija tonske vrijednosti u obje površine

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(g_M(x_i, y_j) - \bar{g}_M \right)^2}{nm - 1}}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(g_T(x_i, y_j) - \bar{g}_T \right)^2}{nm - 1}}, \quad (3)$$

gdje je:

\bar{g}_M, \bar{g}_T – aritmetička sredina tonske vrijednosti ciljanih površina i tonske vrijednosti u odgovarajućim sekcijama traženih površina

$$\bar{g}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_M(x_i, y_j)}{nm}$$

$$\bar{g}_T = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_T(x_i, y_j)}{nm}, \quad (4)$$

gdje je:

n, m – broj redaka i stupaca.

Koeficijent korelacije u procesu usklađivanja snimaka računa se za svaku poziciju uzorka, a može poprimiti vrijednost

$$-1 \leq r \leq +1, \quad (5)$$

pri čemu je položaj s najvećom vrijednosti „ r “ traženi položaj.

Iako je brza i jednostavna metoda koja se lako implementira, metoda pomoću koeficijenta korelacije ne daje informaciju o točnosti pronađene pozicije najboljeg podudaranja, a promjenu svjetloće, kontrasta, mjerila i rotacije nije moguće uzeti u obzir. Najčešće se primjenjuje za približne korelacije u progresivnim postupcima.

Korelacija metodom najmanjih kvadrata LSM (Least-Squares Matching) koja uključuje ocjenu točnosti razvila se početkom osamdesetih godina 20. stoljeća, a bazirana je na minimiziranju razlika u sivoj tonskoj vrijednosti između uzoraka (g_T) i pretraživanih slikovnih prostora usporedbe (g_M) u procesu izjednačavanja gdje su određene geometrijske i radiometrijske korekcije prostora za pretraživanje. Uvjet za uspješnu korelaciju po metodi najmanjih kvadrata je točno određivanje površine (unutar par piksela) što se postiže pomoću koeficijenta korelacije.

Za transformaciju geometrijskih podataka najčešće se primjenjuje afina transformacija

$$\begin{aligned} x_M &= t_x + x_T a_1 + y_T a_2 \\ y_M &= t_y + x_T b_1 + y_T b_2 \end{aligned} \quad (6)$$

gdje su:

x_M, y_M – transformiran položaj piksela u području usporedbe

x_T, y_T – položaj piksela u uzorku.

Transformacija radiometrijskih podataka kompenzira razlike u svjetloći i kontrastu između tonskih vrijednosti uzorka i područja usporedbe

$$g_T = t_0 t_1 g_M, \quad (7)$$

gdje su:

t_0 – promjena svjetloće

t_1 – promjena kontrasta.

Sljedeći korak sastoji se u određivanju parametara transformacije geometrijskih i radiometrijskih podataka

$$f(t_0, t_1, t_x, t_y, a_1, a_2, b_1, b_2) = \sum [g_T(x, y) - T_R \{g_M(T_G(x, y))\}]^2 = \min, \quad (8)$$

gdje su:

T_R – transformacija radiometrijskih podataka

T_G – transformacija geometrijskih podataka.

Jednadžbe popravaka povezuju tonske vrijednosti i transformirane tonske vrijednosti područja pretraživanja, koje s jedne strane uključuju slučajne komponente, a s druge sustavne popravke

$$g_T(x_T, y_T) + v_T(x_T, y_T) = t_0 + t_1 g_M(t_x + a_1 x_T + a_2 y_T, t_y + b_1 y_T + b_2 x_T). \quad (9)$$

Rješenje po posrednim mjerenjima glasi:

$$v = Ax - l, \quad N = A^T P A, \quad n = A^T P l, \quad Q = N^{-1}, \quad x = Q n. \quad (10)$$

Srednja kvadratna pogreška i srednja kvadratna pogreška pojedinačnih nepoznanica x_k :

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{v^t p v}{n - u}} \sigma_x = \sigma_0 \sqrt{q_{xx}}, \quad (11)$$

gdje je:

q_{xx} – koeficijent težine.

Korelacija zasnovana na osobinama tekstura (feature based matching) temelji se na usklađivanju istaknutih obilježja objekata, poput točaka, rubova ili područja, a pretpostavlja izvršenu relativnu orijentaciju.

Metoda pokazuje najbolje rezultate na područjima velikih kontrasta gdje je jasno izražena tekstura, a sam postupak temelji se na izračunu interesnih parametara (ovise o sivim vrijednostima unutar vrednovanog prozora) za svaki prozor na snimci, te usporedbi vrijednosti s danim vrijednostima pragova. Kao interesne točke prihvaćaju se samo oni prozori kojih su vrijednosti parametara veće ili manje od danih pragova (Potůčková 2004).

Interesni operatori upotrebljavaju se za izbor područja s najboljim uvjetima za korelaciju ili za dobivanje velikog broja zanimljivih područja za izuzimanje objektnih površina. Gustoća se postiže automatski kao funkcija teksture (obično refleksija oblika površine). U području s homogenom gustoćom interesni operator nema kao rezultat točke (objektna površina jednostavnog je oblika), no ako objektna površina sadrži rubove tada se pojavljuju rubovi ili koraci gustoće u digitalnim snimkama.

Metoda se izvodi razmatranjem položajne točnosti interesnih točaka (Förstner operator) pri računanju korelacije metodom najmanjih kvadrata

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{q_{xx}} \sigma_y = \sigma_0 \sqrt{q_{yy}}, \quad (12)$$

gdje je:

σ_x, σ_y – standardno odstupanje nepoznanica.

Pritom su jednadžbe popravaka

$$g_T(x_T, y_T) + v_T(x_T, y_T) = g_M(t_x + x_T, t_y + y_T) \quad (13)$$

$$v_T(x_T, y_T) = \frac{\partial g_M}{\partial x} t_x + \frac{\partial g_M}{\partial y} t_y - \left[g_T(x_T, y_T) - \left(g_M(t_x^0 + x_T, t_y^0 + y_T) \right) \right]. \quad (14)$$

Matrica koeficijenta normalnih jednadžbi glasi:

$$N = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\partial g_M}{\partial x} \right)^2 & \sum \left(\frac{\partial g_M}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial g_M}{\partial y} \right) \\ \sum \left(\frac{\partial g_M}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial g_M}{\partial y} \right) & \sum \left(\frac{\partial g_M}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Matrica kofaktora je:

$$Q = N^{-1}, \quad (16)$$

pri čemu je $trQ \rightarrow \min$.

Postupak daje manju točnost (od 0,5 do 0,25 piksela) u odnosu na korelaciju plošnih podataka (0,10 piksela), ali je manje osjetljiv na šum i ostale smetnje, te pozdaniji pri većim perspektivnim razlikama.

3. Analiza površinskog otjecanja

Pri gotovo svim hidrološkim analizama prvi je korak analiza površinskog otjecanja. Algoritmi za određivanje smjera površinskog otjecanja upotrebljavaju se za definiranje kretanja vode do nižih točaka na terenu. Ovisno o tome koncentrira li algoritam svu vodu u sredinu piksela ili cijeli piksel ravnomjerno prekriva, razlikujemo jednosmjerne algoritme u koje spadaju D8, Rho8 i KRA (O'Callaghan i Mark 1984, Fairfield i Leymarie 1991, Lea 1992) i višesmjerne, D ∞ , FD8 i DEMON (Tarboton 1997, Wilson i dr. 2008, Goodchild 2013), algoritme površinskog otjecanja.

Bilo da je riječ o jednodimenzionalnim ili višedimenzionalnim modelima površinskog otjecanja, ključna je pretpostavka da svaki analizirani piksel ima bar jedan piksel u neposrednom susjedstvu, koji je niži od njega i prema kojem usmjerava svoje otjecanje. Ako na modelu postoje lokalni minimumi (depresije), tada ovaj uvjet nije ispunjen i dolazi do numeričkih problema pri računanju površinskog otjecanja, pa je prije simulacije površinskog otjecanja na modelu potrebno ukloniti depresije, što osigurava kontinuitet toka duž čitave površine.

Topografske depresije na modelu mogu biti stvarne, umjetne ili kombinirane. U geomorfologiji depresija je uleknina na Zemljinoj površini bez obzira na postanak, oblik i veličinu, dio je kopnene površine ili morskog dna koji se nalazi ispod razine

okolnog terena zbog tektonskih pomaka, spuštanja duž rasjednih crta, epirogenetskog svijanja ili nabiranja (Cvitanović 2002).

Umjetne depresije često su rezultat pogrešaka tijekom uzorkovanja (pogrešno klasificirani ulazni podaci) ili interpolacije, generalizacije, zaokruživanja interpolirane vrijednosti na nižu točnost, ujednačenja piksela unutar područja ili zaglađenja kao posljedice preuzorkovanja.

Bez obzira na način kreiranja DMR-a, depresije zauzimaju 5% njegove ukupne površine (Tarboton i dr. 1991), a promatrajući DMR teško je ustanoviti je li depresija stvarna ili umjetna. Iako se danas razvijaju tehnike koje omogućuju razlikovanje stvarnih od umjetnih depresija, jedina je sigurna metoda terensko istraživanje (Lindsay i Creed 2005), tako da se neselektirano uklanjanje depresija radi i dalje unutar svih GIS programa.

Postoje dvije osnovne metode uklanjanja depresija implementirane u GIS programe neovisno o geomorfometrijskim karakteristikama područja: metoda popunjavanja (filling) i metoda otjecanja (carving or breaching). Razlika u primjeni dviju metoda može se jasno interpretirati u dva ekstremna slučaja. U slučaju plitke, ali površinom velike depresije koju treba ukloniti, metoda popunjavanja će podići cijelu depresiju i time promijeniti veliki broj piksela, dok će metoda otjecanja promijeniti samo nekoliko piksela kako bi „prokopala kanal” iz depresije. U slučaju jednog piksela koji predstavlja vrlo duboku depresiju metoda popunjavanja promijenit će samo visinu tog piksela, dok će metoda otjecanja promijeniti cijeli niz piksela na putanji smjera otjecanja. Iz tih primjera vidljivo je da depresija mijenja geomorfometriju, pa je izbor metode uklanjanja depresija važan korak u hidrološkim analizama.

Metoda otjecanja rješava problem depresija stvaranjem linija koncentriranog otjecanja vode, odnosno snižava povišene piksele u DMR-u “prokopavanjem” kanala. Algoritmi kreiraju prolaz iz depresije pronalaženjem najnižega susjednog piksela, a u slučaju više piksela istih visina u obzir se uzima i najkraći put.

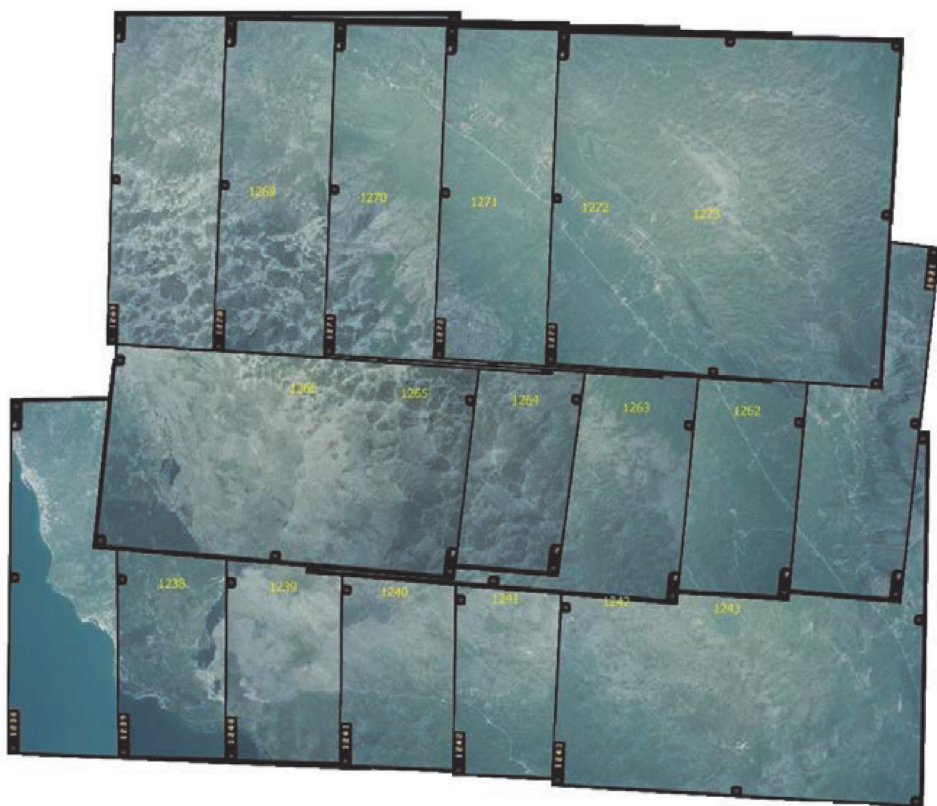
Jednostavnija je i češće korištena metoda popunjavanja depresija, temeljena na postupku kojim se podiže visina depresije dok razina ne dosegne visinu točke s koje je otjecanje moguće (Grimaldi i dr. 2007), odnosno popunjavanje raste do točke prelijevanja, a rezultat su pikseli vrijednost kojih je uvijek ista ili viša od DMR-a. Postupak se ponavlja dok sve depresije nisu popunjene, ili pravilnije rečeno, dok svim pikselima nisu pridružene linije otjecanja.

4. Područje istraživanja

Ulazni podaci za testiranje dviju metoda uklanjanja depresija su digitalni modeli (4800x3200 m) dobiveni metodom slikovne korelacije u rezoluciji 5x5 metara i 25x25 metara za tri geomorfometrijski različita područja Republike Hrvatske: planinski masiv Biokovo, planinu Papuk i ravničarsko područje istočne Hrvatske unutar općine Nijemci. Kako cijelo područje Republike Hrvatske nije snimljeno istovremeno (različiti projekti snimanja), podaci za različita područja imaju različite karakteristike.

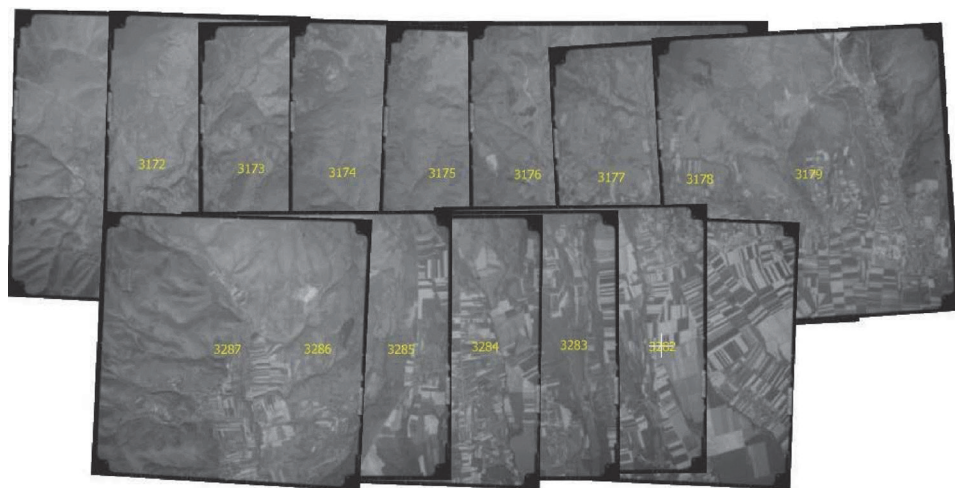
Za područje Biokova (slika 1) korišteno je ciklično snimanje „Dubrovnik i okolica“, izvedeno 2005. godine analognom kamerom ZEISS RMK TOP 15. Snimke su u

boji, a upotrijebljeno je 16 snimaka. Biokovo je obalni planinski masiv u Splitško-dalmatinskoj županiji. Priobalni pojas, podnožje središnjeg dijela Biokova, od mora uzdignuta do visine od 300 metara, blago je nagnuta plodna i zelena zaravan uz šljunčane plaže. Na taj „zeleni pojas“ nastavlja se glavni gorski hrbat. Taj stjenovit kompleks, izdignut do visine oko 1000 metara, odvaja Zagoru od primorja. Povrh stijena pruža se područje valovite visoravni, širine tri do četiri kilometra, koja se prema zaleđu blago i postupno spušta. Biokovo je vrlo složena podzemna hidrografska mreža (Magaš i dr. 1979), a obiluje prirodnim depresijama na kojima se zadržava voda zbog erozijom ili geološkom podlogom stvorenih uvjeta.



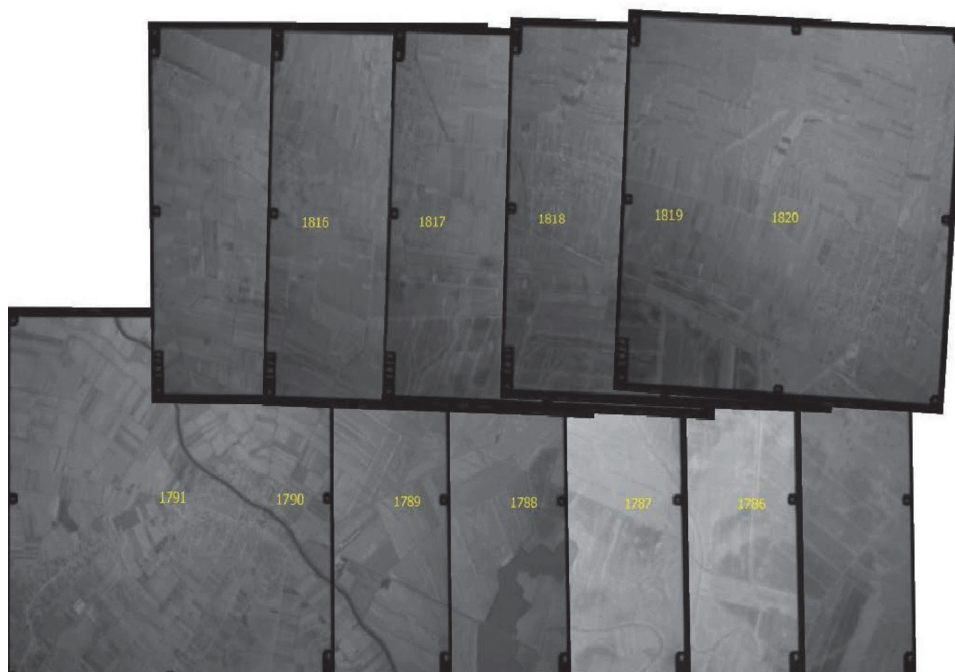
Slika 1. Aerofotogrametrijske snimke područja Biokova.

Za područje Papuka (slika 2) korišteno je ciklično snimanje „Zapadna Slavonija“, izvedeno 2001. godine analognom kamerom WILD RC20 15/4. Snimke su crno-bijele, a upotrijebljeno je 14 snimaka. Papuk je najduža slavonska planina smještena na sjevernoj i sjeverozapadnoj granici Požeške kotline. S jedne strane nailazimo na blago zaravnjene oblike, dok se s druge strane izdižu obronci strmih i teško pristupačnih planinskih masiva. Papuk je područje nestabilnih vodotoka koji se formiraju na strmim obroncima planina, dok glavni vodotoci u svojim dolinama meandriraju.



Slika 2. Aerofotogrametrijske snimke područja Papuka.

Za područje Nijemaca (slika 3) korišteno je ciklično snimanje „Istočna Slavonija“, izvedeno 2002. godine analognom kamerom ZEISS RMK TOP 15. Snimke su crno-bijele, a upotrijebljeno ih je 11. Prostor općine Nijemci u Vukovarsko-srijemskoj

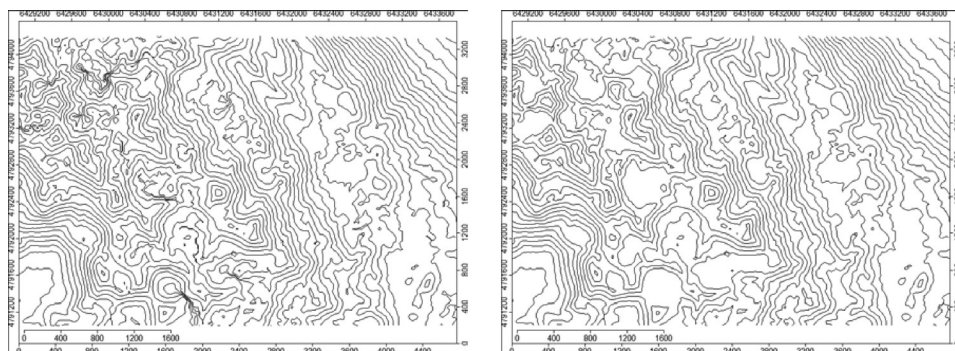


Slika 3. Aerofotogrametrijske snimke područja Nijemaca.

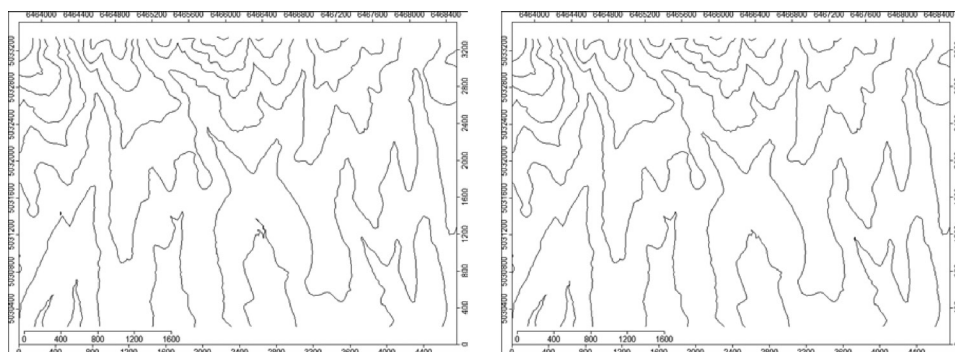
županiji karakterizira reljef malih visinskih razlika (do 32,5 m). Područje Nijemaca nalazi se u ravničarskom području, no zbog morfologije terena duž pružanja ravnjaka na sjevernom dijelu formirala se površinska i podzemna razvodnica (formiranje dvaju sliva), no kako razvodnica nije nepropusna, oba su sliva jedinstveni hidrološki sustav.

5. Rezultati geomorfometrijskih analiza

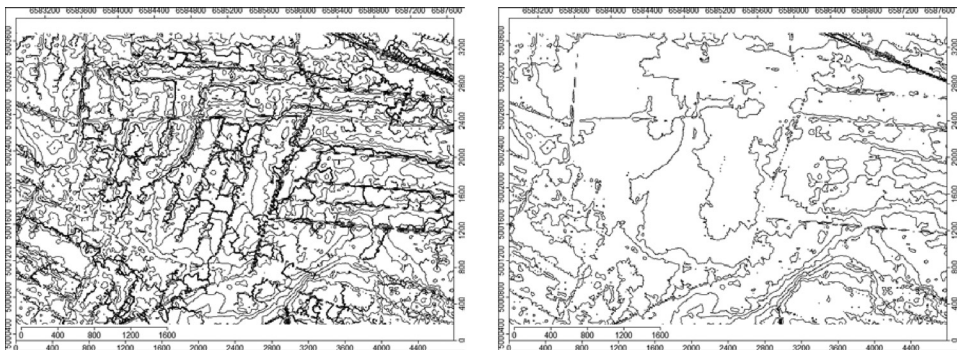
Na digitalnim modelima uklonjene su depresije metodom otjecanja (uporabom unaprijed kreiranog puta otjecanja) i metodom popunjavanja. Radi boljeg uočavanja razlika između podataka bez uklonjenih depresija i podataka s uklonjenim depresijama napravljeni su prikazi izohipsama (slike 4, 5 i 6) i preklopi prikaza prije i nakon uklanjanja depresija dvjema metodama na izdvojenim dijelovima (slike 7 i 8).



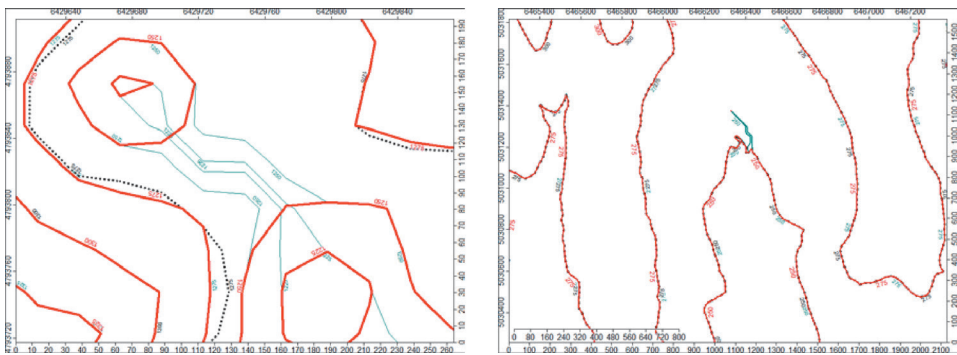
Slika 4. DMR25 Biokovo s uklonjenim depresijama metodom otjecanja (lijevo) i popunjavanja (desno).



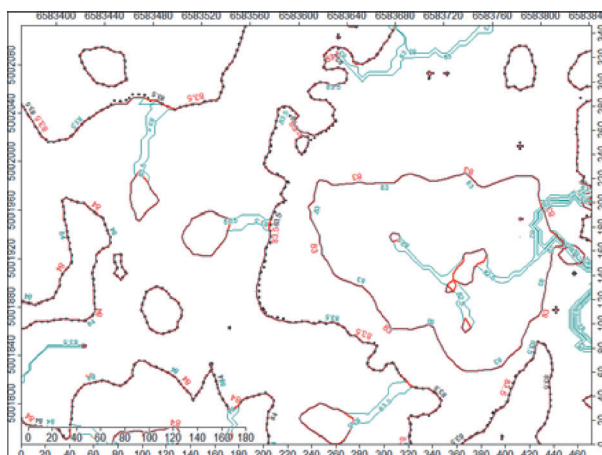
Slika 5. DMR25 Papuk s uklonjenim depresijama metodom otjecanja (lijevo) i popunjavanja (desno).



Slika 6. DMR5 Nijemci s uklonjenim depresijama metodom otjecanja (lijevo) i popunjavanja (desno).



Slika 7. DMR25 Biokovo (lijevo) i DMR25 Papuk (desno), (crvena – bez uklonjenih depresija, isprekidana – popunjavanje, plava – otjecanje).



Slika 8. DMR5 Nijemci (crvena – bez uklonjenih depresija, isprekidana – popunjavanje, plava – otjecanje).

Biokovo je iznimno razveden i strm teren s mnoštvom topoloških depresija (škrapa, vrtača, jama). Nakon uklanjanja depresija metodom otjecanja (slika 4 lijevo) formiraju se kanali otjecanja, a visine izohipsa (slika 7 lijevo) su zadržane. Metodom popunjavanja (slika 4 desno) depresije su zapunjene do točke prelijevanja i kreiraju ravnu plohu (slika 7 lijevo).

Područje Papuka blago je nagnut teren, gotovo bez depresija na kojem obje metode daju gotovo identične rezultate (slika 5). Iako su uklanjanjem depresija metodom otjecanja stvoreni uski drenažni prolazi, visine izohipsa (slika 7 desno) zadržane su za obje metode, pa je takvom analizom teško definirati prihvatljiviju metodu.

Područje Nijemaca ravničarski je teren s manjim brojem depresija, ali velikim brojem melioracijskih kanala. Kako program ne razlikuje depresije od kanala, oba modula uklanjanja depresija u izračun su uzela i kanale. Za razliku od područja Biokova i Papuka, pri analizi područja Nijemaca korištena je rezolucija 5x5 metara s obzirom na to da je ukupna visinska razlika 32,5 metra. Metoda popunjavanja iznimno mijenja teren popunjavajući sve kanale, dok metoda otjecanja popunjava samo manje depresije unutar kanala za odvodnju vode (slike 6 i 8).

U sljedećem koraku napravljen je izračun broja promijenjenih piksela nakon primjene svake metode uklanjanja depresija (tablica 1) i izračuni promjena volumena (tablica 2), u odnosu na model na kojem nisu uklonjene depresije.

Tablica 1. Broj promijenjenih i nepromijenjenih piksela modela nakon uklanjanja depresija.

Područje/ rezolucija	Metoda otjecanja		Metoda popunjavanja	
	broj piksela		broj piksela	
	promijenjeni	nepromijenjeni	promijenjeni	nepromijenjeni
Biokovo DMR5	6364	608036	69220	545180
Biokovo DMR25	721	23855	2431	22145
Papuk DMR5	4447	609953	5554	608846
Papuk DMR25	174	24402	159	24417
Nijemci DMR5	45821	590096	223181	391219
Nijemci DMR25	2696	23709	7683	16893

Za područje Biokova vidimo da je ukupan broj promijenjenih piksela, kao i ukupan promijenjeni volumen, znatno manji pri uklanjanju depresija primjenom metode otjecanja. Za područje Papuka razlike u izračunu broja promijenjenih piksela primjenom dviju metoda nisu velike, što je uvjetovano malim brojem depresija. Rezultati izračuna broja promijenjenih piksela ne pokazuju dosljednost:

Tablica 2. Ukupan promijenjeni volumen nakon uklanjanja depresija metodom prokopavanja i metodom popunjavanja u m³.

Područje	Otjecanje	Popunjavanje
Biokovo DMR5	-1 104 716,35	15 672 532,44
Biokovo DMR25	-3 956 100,96	14 152 702,56
Papuk DMR5	-371 697,21	45 538,36
Papuk DMR25	-493 793,25	56 454,69
Nijemci DMR5	-61 584,90	1 123 979,88
Nijemci DMR25	-74 862,48	967 836,69

za DMR5 manje piksela mijenja svoju visinu primjenom metode otjecanja, dok je za DMR25 obrnut slučaj, no unatoč tim rezultatima razlike su premale za definiranje prihvatljivije metode. Tek izračun ukupnog promijenjenog volumena daje preporuku za izbor metode. Ukupan promijenjeni volumen nastao metodom popunjavanja znatno je manji od promijenjenog volumena nastalog metodom otjecanja.

Za područje Nijemaca i jedna i druga metoda mijenjaju model na velikom broju piksela, posebno za rezoluciju 25x25 metara, koja na visinsku razliku od nešto više od 32 metra većinu karakterističnih geomorfometrijskih oblika zanemaruje. Ukupan izračunati promijenjeni volumen znatno je veći kod primjene metode popunjavanja.

6. Zaključak

Metoda slikovne korelacije automatiziran je postupak, pri kojem program sam bez sudjelovanja operatera prepoznaje istovjetne detalje na snimkama. Takav postupak umnogome ubrzava postupak prikupljanja rastera visinskih točaka, posebno ako je riječ o velikim područjima. Problem koji se pritom može javiti otežano je prepoznavanje istovjetnog detalja na dvjema snimkama izazvano lošom perspektivom stereomodela (Biokovo) ili pokrivenost područja sličnim detaljima (Papuk – šuma). Unutar postavki programa za slikovnu korelaciju dopuštena je mogućnost sudjelovanja operatera u korelaciji (usporeva izvršenje programa), što mu omogućuje da pojedinu „nesigurnu“ korelaciju ispravi manualnim postavljanjem na iste detalje.

Za tri izabrana test područja (Biokovo, Papuk i Nijemci), rezolucije 5x5 i 25x25 metara, usklađene su veličine područja istraživanja na 4800x3200 metara što je omogućilo lakšu usporedbu rezultata.

Područje Biokova prekriveno je velikim brojem stvarnih i umjetnih depresija, a geomorfometrijske i kvantitativne analize pokazuju da je metoda uklanjanja depresija otjecanjem manje promijenila geomorfometriju.

Za područje Papuka s malim brojem prirodnih depresija rezultati geomorfometrijskih analiza kao i izračun promijenjenog broja piksela ne mogu jednoznačno definirati prihvatljiviju metodu uklanjanja depresija. Tek izračun ukupnog promijenjenog volumena daje prednost metodi popunjavanja.

Za područje Nijemaca obje metode znatno mijenjaju konfiguraciju terena. Rezultati geomorfometrijskih analiza te izračun ukupno promijenjenih piksela i volumena pokazuju da metoda otjecanja bolje rješava depresije na ravničarskom području ispresijecanom velikim brojem melioracijskih kanala.

Na osnovi provedenih analiza kao preporučene metode možemo izabrati metodu otjecanja za područje Biokova i metodu popunjavanja za područje Papuka. Za područje Nijemaca na osnovi provedenih analiza preporuča se metoda otjecanja iako obje metode znatno mijenjaju teren.

Kako je uklanjanje depresija na digitalnom modelu visina preduvjet za geomorfometrijske analize izbor optimalne metode uklanjanja depresija povećava kvaliteta hidroloških analiza dobivenih iz digitalnog modela reljefa.

Literatura

- Cvitanović, A. (2002): Geografski rječnik, Hrvatsko geografsko društvo Zadar, Filozofski fakultet, Matica hrvatska, Zadiz d.o.o., Zadar.
- Fairfield, J., Leymarie, P (1991): Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, 709–717.
- Frančula, N., Lapaine, M. (2008): Geodetsko-geoinformatički rječnik, Republika Hrvatska, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Gajski, D. (2012): Slikovne korelacije u digitalnoj fotogrametriji, interna skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Goodchild, M. F. (2013): *Geospatial analysis*, 4th Edition, University College London, UC Santa Barbara.
- Grimaldi, S., Nardi, F., DiBenedetto, F., Istanbuluoglu, E., Bras, R. L. (2007): A Physically – based method for removing pits in digital elevation models, *Advances in Water Resources*, Vol. 30, Issue 10, 2151–2158.
- Lea, N. J. (1992): An aspect-driven kinematic routing algorithm, in: Parson, A. J., Abrahams, A. D.: *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, London, 147–175.
- Lindsay, J. B., Creed, I. F. (2005): Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minim impact approach, *Hydrological Processes*, 19, 3113–3126.
- Magaš, N., Marinčić, S., Benček, Đ. (1979): Tumač za list Ploče, K 33-35 SFRJ, Osnovna geološka karta 1 : 1 000 000, Geološki zavod, Zagreb, 1972, Savezni geološki zavod, Beograd.
- O’Callaghan, J. F., Mark, D. M. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 28, 323–344.
- Planchona, O., Darboux, F. (2001): A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, *Catena*, 46, 159–176.

- Potůčková, M. (2004): Image matching and its applications in photogrammetry, *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie*.
- Tarboton, D. G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water resources research*, Vol. 33, No. 2, 309–319.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodriguez-Iturbe, I. (1991): On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Process*, Vol. 5, No. 1, 81–100.
- Tomljenović, B., Matoš, B. (2012): *Strukturna geomorfologija*, interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Wilson, J. P., Aggett, G., Yongxin, D., Lam, C. S. (2008): Water in the Landscape: A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms, in: Zhou, Q., Lees, B., Tang, G.: *Advances in Digital Terrain Analysis*, 213–236.

Mrežne adrese

URL 1: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing,
<http://www.isprs.org/documents/pdf/statutes08.pdf>, (24. 1. 2013.).

URL 2: KM.RU,
<http://www.km.ru/referats/332229-sopostavlenie-izobrazhenii>, (14. 12. 2016.).

Influence of the Choice of Pit Removal Method on Digital Elevation Model Obtained by Image Correlation

ABSTRACT. Geoinformatic analysis on large areas imposes the need for increasing automatization not only in processing, but also in data collecting. Research requisite was the method of image correlation, which automates and accelerates the process of collecting the raster elevation dataset. Data was collected by the combination of two basic methodologies, area based and feature based matching methods. In the resulted Digital Elevation Model (DEM) the depressions were removed. Depressions in the DEM prevent the simulation of the surface runoff and can be either the actual terrain features or the result caused by sampling error. Depression removal was performed by two basic methods implemented in GIS software, the carving or branching method and the filling method. Both methods were used on three geomorphometrically different areas of Croatia: the mountain range Biokovo, the mountain Papuk and lowlands in the municipality Nijemci. Image correlation was done in two resolutions, 5x5 and 25x25 meters. Data analysis included the geomorphometrical and the quantitative analysis, and for each area, the method for depression removal was recommended as the method that changes the least the geomorphometry of the DEM.

Keywords: DEM, image correlation, area based correlation, feature based matching correlation, depression removal, carving or branching method, filling method.

Primljeno / Received: 2016-12-02

Prihvaćeno / Accepted: 2016-12-14