

Primjena GIS metoda u analizi geomorfometrijskih značajki Duvanjskog polja

Denis Radoš, Sanja Lozić, Ante Šiljeg: Prirodoslovno-matematički fakultet, Odjel za geografiju, Sveučilište u Zadru, Hrvatska

Sažetak

U radu su analizirana geomorfometrijska obilježja Duvanjskog polja i njegovog planinskog ruba. Analiza se temelji na obradi digitalnog modela reljefa (DMR) uz pomoć GIS tehnologije. DMR je izrađen metodom digitalizacije izohipsa s topografske karte mjerila 1:25000. Primjenom različitih GIS metoda dobivene su rasterske i vektorske vrijednosti za sljedeće parametre: nagibi, ekspozicije, hipsometrijska obilježja i zakrivljenosti terena. Oni su vrednovani na način da im je utvrđena geografska distribucija, učestalost i dominacija u istraživanom području, točnije njihova kvantitativna obilježja. Dobiveni rezultati daju cjelovit pregled geomorfometrijskih obilježja Duvanjskog polja, po svakom parametru pojedinačno.

Ključne riječi: *geografski informacijski sustavi (GIS), geomorfometrija, Duvanjsko polje, digitalni model reljefa (DMR)*

The Application of GIS Methods in analysis of Geomorphometric Features of Duvanjsko Polje

Abstract

In this paper geomorphometric characteristics of Duvanjsko polje and its mountain border were analyzed. The analysis is based on processing the digital terrain model (DTM) by means of GIS technology. DTM was created by digitizing the contours from topographical map in 1:25000 scale. Raster and vector values for several parameters (slope inclination and aspect, hipsometric features and terrain curvature) were obtained by various GIS methods. They were evaluated by means of determining their geographical distribution, frequency and domination in investigated area (more precisely, their quantitative characteristics). Results of this research are supposed to provide more complete overview of geomorphometric features of Duvanjsko polje by each parameter individually.

Keywords: *Geographic information system (GIS), geomorphometry, Duvanjsko polje, digital terrain model (DTM)*

Uvod

Objekt ovog rada su padine uzvišenja šireg područja Duvanjskog polja. Padine se mogu definirati kao reljefne plohe određene geografskim položajem, nagibom u odnosu na horizontalnu površinu, izloženošću (ekspozicijom) u odnosu na strane svijeta, te stupnjem zakrivljenosti (profilne i planarne). Recentni oblik padina posljedica je utjecaja niza prirodnih i društvenih faktora tijekom geneze i evolucije reljefa. Mjerenjem i analizom pojedinih parametara padina moguće je uz pomoć kvantitativnih

geomorfoloških parametara analizirati povezanost geomorfoloških značajki s geološkom građom i sastavom, ali, indirektno, i s ostalim prirodno-geografskim čimbenicima (npr. klima, pedologija, vegetacija itd.). Numerički iskazani podaci morfometrijskih parametara, promatrani u lokalnom okviru, ukazuju na posljedice djelovanja egzogenih geomorfoloških procesa, dok u regionalnom okviru ukazuju na djelovanje endogenih (u prvom redu neotektonskih) morfostrukturnih procesa.

Ciljevi ovog istraživanja su:

- a. analiza morfometrijskih pokazatelja reljefa,
- b. analiza odnosa između morfometrijskih pokazatelja i geoloških značajki, i
- c. sinteza svih analiziranih pokazatelja da bi se dobio detaljniji uvid u morfometrijske i morfostrukturne značajke područja i omogućila procjena njihovog utjecaja na opseg i intenzitet dominantnih geomorfoloških procesa. Pri tome, posebna pažnja posvećena je detaljnoj geomorfometrijskoj analizi makromorfostrukture šireg područja Duvanjskog polja u GIS okružju temeljem digitalnog modela reljefa (DMR).

Istraživano područje

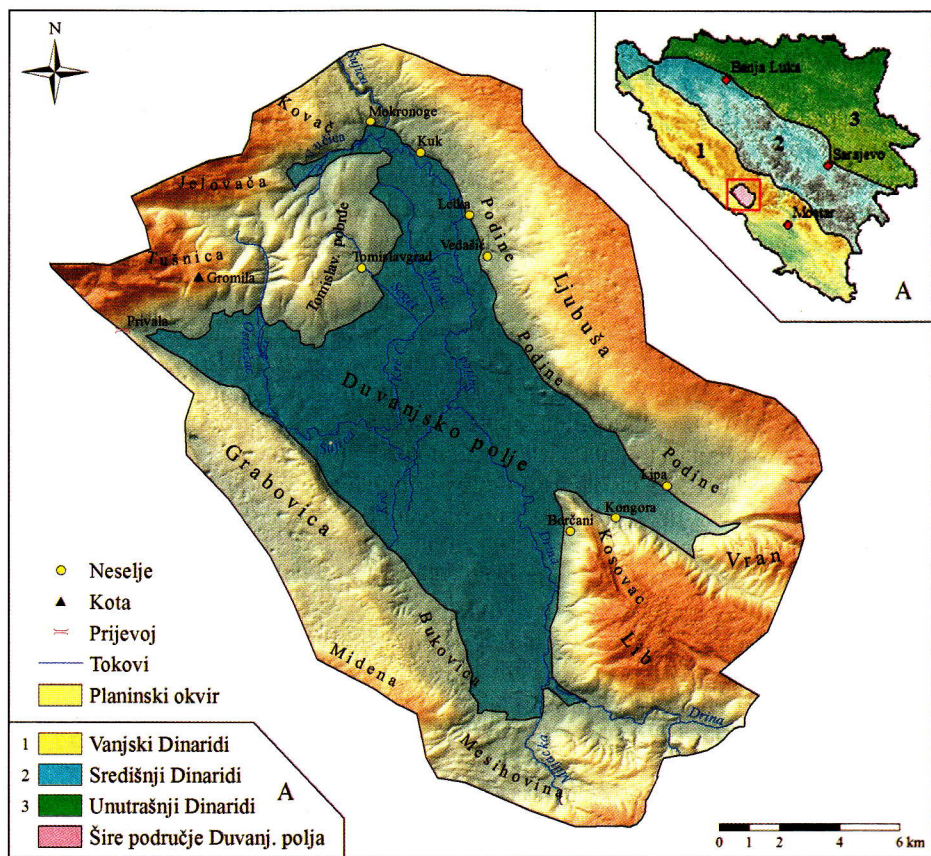
Do sada je, kako navode Čičić (2002) i Lepirica (2009), izvršeno više regionalizacija Bosne i Hercegovine prema različitim kriterijima. Područje Bosne i Hercegovine može se podijeliti na tri geotektonska pojasa: Vanjske Dinaride, Središnje Dinaride i Unutarnje Dinaride. Takva geotektonska podjela Dinarida BiH zasnovana je prvenstveno na geografskom položaju i razlikama u litofacijalnim i tektonskim odlikama izdvojenih zona, zatim na sličnim globalnim uvjetima geološke evolucije i orogeneze, te specifičnostima u njihovom geotektonskom sklopu (Čičić, 2002).

Prema ovoj podjeli Duvanjsko polje s okolnim područjem dio je Vanjskih Dinarida, a u neposrednoj okolici polja, između planina Ljubuše i Raduše prolazi granica između Vanjskih i Unutarnjih Dinarida. Iako se kod određivanja tektonskih jedinica primjenjuju različiti kriteriji, pa iz tog razloga različiti autori drugačije dijele neko područje na tektonske jedinice, ono što je neosporno kod Duvanjskog polja je da se ono u cijelosti nalazi u području Vanjskih Dinarida, odnosno u zoni „Visokoga krša“ (Sl. 1).

Geološko-morfološka građa užeg područja Duvanjskog polja prilično je jednostavna. Polje je građeno od naslaga miocenske starosti (De Leeuw et al., 2011) koje su uz rubne dijelove (npr. JI dio polja oko Kongore) ili uz riječne tokove prekrivene kvartarnim nanosima. Rubni planinski okvir je složenije građe: prevladavaju vapnenci i dolomiti jure i krede, s mjestimično prisutnim manjim područjima tercijarnih naslaga Tušnice na S, Ljubuše i Vrana na SI, Grabovičke zaravni i Midene planine na JZ, Liba na JI te Mesihovine na J (Sl. 1).

JZ granica polja, uz Grabovičku zaravan, proteže se gotovo pravocrtno; uzduž nje na SZ dijelu spuštaju se prema SI slojevi vapnenca zaravni, u središnjem dijelu strmo dok se duž JZ dijela slojevi pružaju terasasto. Iz ovoga, te iz pravocrtnog protezanja rubnog dijela lako se da zaključiti kako je rub polja nastao tektonski (slijeganjem); noviji procesi erozije neznatno su ga promijenili (Roglić, 1940).

Slične su okolnosti (s obzirom na postanak) i uzduž SI ruba polja. I ovdje se susreću na topografski jasno izraženoj granici slatkovodni slojevi i tanki površinski sloj polja s krednim vapnencima Ljubuše. Samo oko Mokronoga vapnenac je pokriven mlađim naslagama; isto tako u središnjem dijelu, u području potoka Sazlivoda kraj Vedašića, pojavljuju se dolomiti utisnuti u vapnence.

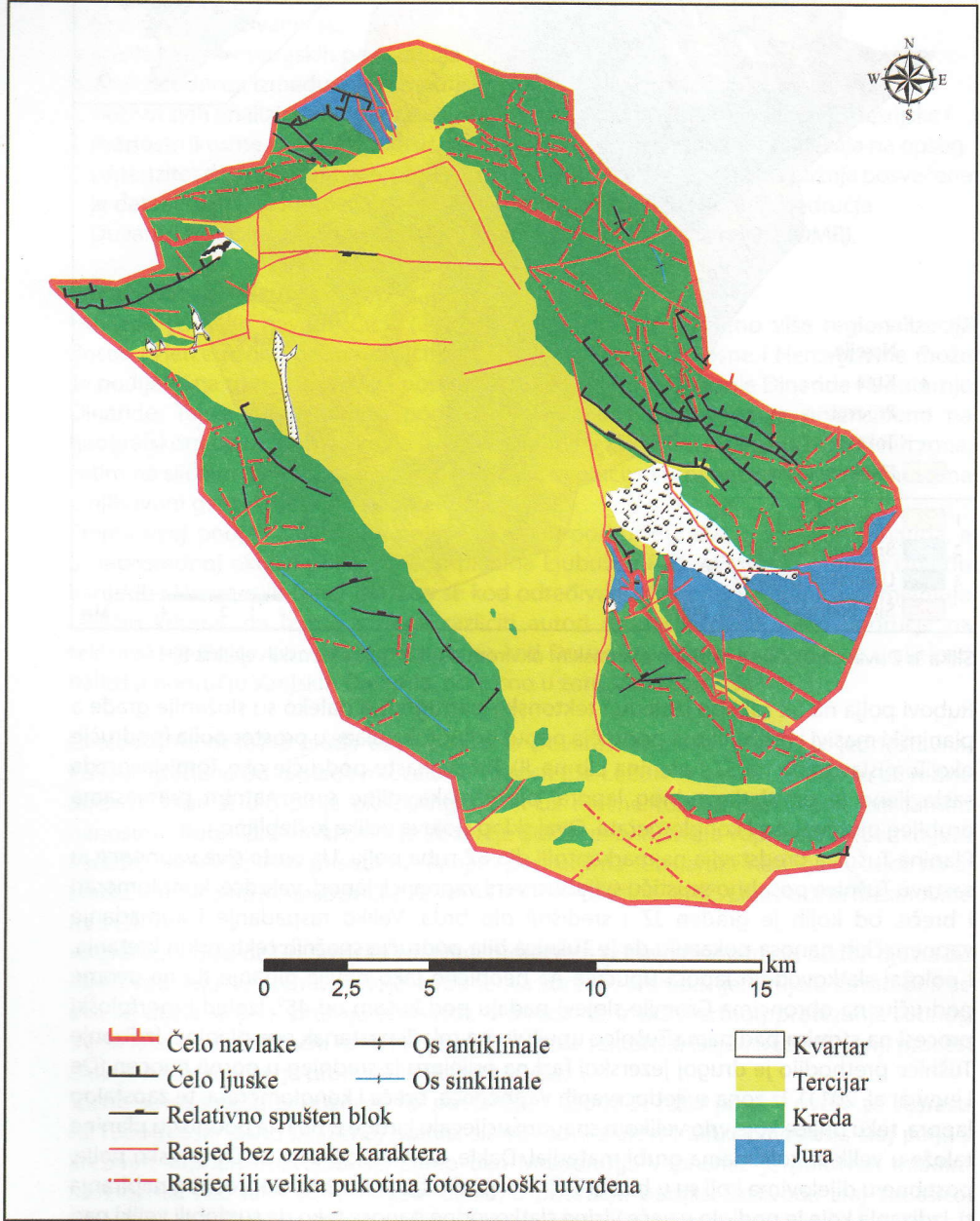


Slika 1: Duvanjsko polje s okolnim planinskim okvirom unutar geotektonskih cjelina BiH.

Rubovi polja na SZ i JI i po izgledu i tektonsko-petrografski daleko su složenije građe a planinski masivi i brežuljkasta područja poput poluotoka ulaze u prostor polja (područje oko Tomislavgrada na SZ i planina Lib na JI). Brežuljkasto područje oko Tomislavgrada sastavljeno je od slatkovodnog lapora, pješčenjaka, gline s neznatnim primjesama grubljeg pješčenjaka i konglomerata. Ovaj sklop slojeva velike je debljine.

Planina Tušnica predstavlja najmarkantniji dio SZ ruba polja. Uz tvrde sive vapnence, u sastavu Tušnice posebno se ističu svijetlocrveni vapnenci, lapori, valutice, konglomerati i breče, od kojih je građen JZ i središnji dio brda. Veliko raspadanje i komadanje vapnenačkih nanosa pokazuju da je Tušnica bila područje snažnih tektonskih kretanja. I položaj slatkovodnih lapora upućuje na neobično jako novije gibanje tla na ovome području: na obroncima Gromile slojevi padaju pod kutom od 45° . Izgled i morfološki procesi na strmim padinama Tušnice upućuju na mlađi nastanak ove planine. Izdizanje Tušnice prethodilo je drugoj jezerskoj fazi na prijelazu iz srednjeg u gornji miocen (De Leuw et al, 2011). Iz zona svijetlocrvenih vapnenaca, breča i konglomerata, te zaostalog lapora, teku bujice koje vrlo velikom snagom usijecaju jaruge u tlo i na podnožju planine talože u velikim količinama grubi materijal. Dakle, SZ dio područja uz Duvanjsko polje, posebno u dijelovima koji su u blizini Tušnice, područje je novoga poprečnog nabiranja tj. izdizanja koje je podiglo u veće visine slatkovodne nanose tako da su dobili veliki pad prema dolini polja (Roglič, 1940) (Sl. 2).

Jl rub polja mnogo je jednostavnije građe nego SZ. Planina Lib poput poluotoka prodire u nizinu polja. Prema podacima OGK, sastavljena je od krednih i jurskih vapnenaca. Od posebne su važnosti zone lapora koje se nalaze na vršnim dijelovima SI padine, uz rasjednu liniju, iz kojih izviru vrela koja selu Kongori daju vodu (Roglić, 1940) (Sl. 2). Ukupna površina istraživanog područja iznosi 365,7 km², od čega 239,4 km² otpada na padine, odnosno područja s nagibom >2°, na što je dan poseban osvrt.



Slika 2: Geološka karta istraživanog područja (prema OGK, listovi Livno, Imotski).

Metodologija

Proces obrade podataka temeljio se na analizi digitalnog modela reljefa, koji je za potrebe ovog rada izrađen metodom automatske vektorizacije izohipsa s topografskih karata. Korišteno je 9 listova TK 25 Vojnogeografskog instituta iz Beograda, od kojih su neki vektorizirani u potpunosti, a drugi djelomično, ovisno o obliku istraživanog područja. Dobiven je DMR rasterske GRID strukture, veličine piksela 25 metara. On se nalazi unutar četverokuta dimenzija 26 km istok – zapad i 26 km sjever jug. S obzirom na to da modeliranjem prostora dolazi do pogrešaka, moguće su manje greške u izlaznim rezultatima, budući da dobiveni podatci nisu uspoređivani s drugim digitalnim modelima reljefa. Obično se uzima da je visinska točnost jednaka 1/4 ili 1/5 ekvidistancije pa bi visinska točnost dobivenog DMR-a bila oko 2 m.

Za geomorfometrijsku analizu istraživanog područja pomoću GIS alata bio je neophodan digitalni model reljefa. Razlozi izrade DMR-a šireg područja Duvanjskog polja bili su nedostupnost besplatnog detaljnijeg DMR-a, bolja kvaliteta u odnosu na dostupne DMR¹ i precizniji izlazni podatci. Općenito, model je objekt ili koncept koji se koristi za predstavljanje neke pojave u prostoru. To je umanjena stvarnost pretvorena u razumljiv oblik (Meyer, 1985.; preuzeto iz Li, Zhu, Gold, 2005). Za prostorne analize koriste se različiti digitalni visinski modeli Zemljine površine (DEM).

Proces izrade digitalnog modela reljefa uključivao je sljedeće korake:

1. skeniranje analognih topografskih karata - pretvaranje karata u digitalni oblik bez prostorne reference
2. georeferenciranje i transformaciju – referentne točke uzete su s topografskih karata čime su karte smještene u geografski prostor. S obzirom da se radilo o skeniranim kartama korištena je afina transformacija polinoma prvog reda.
3. vektorizaciju izohipsi i dodavanje atributa (podataka o visinama s topografskih karata) - automatska vektorizacija izohipsi uključivala je odstranjivanje šumova, skeletiranje (stanjivanje), poboljšanje čvorova, praćenje linija, spajanje segmenata i topološku rekonstrukciju.
4. izradu TIN-a – vektorskog modela reljefa, koji se sastoji od točaka, linija i trokuta, te služi kao osnova izrade rasterskog modela reljefa. Na osnovi lomnih točaka (sastavni dio izohipse) napravljena je triangulacijska nepravilna mreža.
5. izradu DMR-a - rasterskog modela reljefa. Digitalni model reljefa temeljni je akronim koji se danas koristi u literaturi koja se tiče GIS-a, daljinskih istraživanja i srodnih područja. Digitalni model reljefa predstavlja digitalni prikaz Zemljine površine, no bez vegetacije ili produkata ljudskog djelovanja na Zemljinoj površini. Dakle DMR prikazuje samo „temeljnu“ ili „golu“ površinu Zemlje, odnosno reljef. Stoga je i logičan njegov naziv.

Korištenje GIS alata u analizi DMR-a omogućilo je stvaranje novih podataka i njihovu analizu, a izlazni podatci su u konačnici precizniji.

¹ SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) – digitalni visinski model kojeg je proizvela NASA. Predstavlja prekretnicu u dostupnosti visinskih podataka za većinu dijelova svijeta. Jedan list SRTM-a obuhvaća prostor 5X5 stupnjeva na Zemljinoj površini. SRTM 90m ima rezoluciju 90 metara na ekvatoru i visinsku grešku do 16 metara. Dostupan je na stranicama CGIAR-CSI (Consultative Group on International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information) (URL A)

Analiza geomorfometrijskih parametara Analiza nagiba

Veliki dijelovi Zemljine površine sastoje se od različitih vrsta padina čiji je nastanak posljedica djelovanja endogenih i egzogenih procesa. U ovom istraživanju analizirani su nagibi šireg područja Duvanjskog polja odnosno okolnih rubnih dijelova planinskog okvira. Primijenjen je sveobuhvatniji pristup, tj. pažnja nije usmjerena na morfometrijsku analizu mikroreljefnih oblika nego na analizu makrogeomorfoloških odnosa unutar cjelokupnog reljefa u granicama promatranog područja. Analiza prostornog rasporeda i obuhvata pojedinih kategorija nagiba padina važna je jer su oni značajan indikator opsega i intenziteta morfostrukturnih, denudacijskih i akumulacijskih procesa koji su tijekom paleogeomorfološkog razdoblja utjecali na morfogenezu padina, ali i kao indikator recentnih i budućih utjecaja tih procesa na značajke i međusobe odnose denudacije i akumulacije (Tabl. 1).

Za izračunavanje nagiba korištene su metode i algoritmi integrirani u program *ArcInfo*. Princip računanja nagiba je takav da softver za svaki piksel izračunava maksimalnu stopu promjene vrijednosti od tog piksela prema susjednim pikselima koji ga okružuju. U konceptualnom smislu, funkcija nagiba uklapa plohu i z-vrijednosti unutar područja od 3x3 piksela koje okružuje središnji piksel, a vrijednost nagiba ove plohe izračunava se pomoću tehnike prosječnog maksimuma (Burrough & McDonell, 1998). Mreža koju čine ćelije jednakih dimenzija, poravnana je uzduž geografskih osi x (zapad-istok) i y (sjever-jug).

Tablica 1. Geomorfološka klasifikacija nagiba²

Nagib (°)	Karakteristike geomorfoloških oblika i procesa
< 2	Ravnica. Kretanja masa se ne zapažaju. Intenzitet spiranja minimalan
2-5	Blago nagnut teren. Spiranje slabo izraženo. Erozija tla i pojave klizanja mogu biti značajne.
5-12	Nagnuti tereni. Pojačano spiranje i pojave kretanja masa. Do izražaja dolazi klizanje i tečenje materijala. Teren ugrožen erozijom.
12-32	Značajni nagibi. Spiranje je intenzivno. Veoma snažna erozija. Teren jako ugrožen erozijom i pojavom kretanja masa.
32-55	Vrlo strm teren. Dominira odnošenje materijala. Akumulacijski materijal se tek mjestimično zadržava (tanki pokrivač). Padine su stjenovite i pretežito ogoljene.
> 55	Strmci, litice (eskarpmi). Dominira osipanje i urušavanje

² Geomorfološka klasifikacija nagiba padina, temeljena na dominantnim morfološkim procesima koji se aktiviraju ovisno o veličini nagiba, kao i odgovarajućim reljefnim oblicima, prihvaćena je od IGU (International Geographical Union, 1968)

Nagibi manji od 2° karakteristični su za najveći dio Duvanjskog polja zbog čega imaju i najveći prostorni obuhvat (s 35,4% udjela, Tabl. 2), međutim, manja područja takvog nagiba pojavljuju se i na okolnim planinama. Prije svega karakteristična su za korozivsku terasu Podine od Mokronoga do Lipe a javljaju se i na dijelovima zaravni planine Ljubuše (Sl. 3) te na Grabovičkoj zaravni (Sl. 6).

Tablica 2. Klase i prostorni obuhvat nagiba

Nagib (°)	Površina (m ²)	Udio (%)
< 2	128929043,0	35,248
2-5	48646472,0	13,300
5-12	97027222,0	26,527
12-32	87352669,0	23,882
32-55	3807938,0	1,041
>55	10729,0	0,003
Ukupno	365774073,0	100,000



Slika 3: Korozivska terasa „Podine“ i Ljubuša (desno),
 IZVOR: GoogleEarth 2011.

Druga kategorija nagiba ($2-5^\circ$) u pravilu se javlja na kontaktnim dijelovima polja i okolnog područja, gdje postoji blagi prijelaz iz zaravnjenog dijela polja u strmiji planinski okvir, prekriven naslagama koluvijalnog i deluvijalnog porijekla. Na rubovima polja ova kategorija nagiba najrasprostranjenija je sjeverno od Tomislavgrada, gdje polje postupno prelazi u brežuljkasto područje (Sl. 4), te na području sela Bukovice gdje se polje uzdiže prema Midenoj planini. Također, velika područja planine Ljubuše i Grabovičke zaravni pripadaju ovoj kategoriji. Na Ljubuši se ovi nagibi javljaju na područjima uvala, koje su u prošlosti bile sezonski naseljene i agrarno vrednovane u ljetnom dijelu godine (Sl. 3). Unutar ove kategorije nagiba nalaze se blago položene SZ padine kredne starosti na području kontakta Ljubuše i krajnjeg zapadnog dijela Vrana (Sl. 9), prijelazno područje od JI dijela polja prema planini Vran te niži dijelovi padina Lib planine u kontaktnom području s poljem (Sl. 7).



Slika 4: Tomislavgradsko pobrđe, IZVOR: GoogleEarth 2011.

Nagibi od 5 do 12°, nakon kategorije < 2°, zauzimaju najveću površinu (Tabl. 2). Može se reći da su gotovo ravnomjerno raspoređeni duž čitavog planinskog oboda polja, osim viših dijelova padina Tušnice, Jelovače (Sl. 5) i planine Lib (Sl. 7), koje su, zbog izraženog djelovanja neotektonskih pokreta strmije i najvećim dijelom nagiba od 12-32°, 32-55° i >55°.



Slika 5: Tušnica i Jelovača; dominiraju nagibi od 12-320, IZVOR: GoogleEarth 2011.

Osim spomenutih područja Tušnice, Jelovače i Liba, nagibi od 12-32° prisutni su i na relativno velikim površinama viših područja padinskih strana uz grebene ostalih uzvišenja, na nižim dijelovima padina na kojima je izraženo intenzivno djelovanje rasjedne tektonike, uz bočne strane dubljih jaruga i ponikava te na područjima naglog prijelaza iz zaravnjenog u obodni planinski dio polja. Ova kategorija nagiba javlja se i duž gotovo cijelog zapadnog ruba polja, od prijevoja Privala do sela Bukovice, gdje prelazi u tektonski i reljefno razdrobljeno valovito područje zaravni u zaleđu Bukovice, koje se od zapada stepenasto spušta prema istoku i nestaje uz rub polja (Sl. 6).



Slika 6: Strmi zapadni rub polja od prijevoja Privala do sela Bukovice, gdje prelazi u tektonski i reljefno razdobljeno valovito područje zaravni u zaleđu Bukovice; Grabovička zaravan (lijevo), IZVOR: GoogleEarth 2011.

Granica sjeveroistočnog dijela polja i planine Ljubuše također je dobro definirana ovom kategorijom nagiba, osobito od sela Kuka do Letke, gdje ovaj strmi rub korozivske zaravni lokalno stanovništvo naziva „Greda“ (Sl. 3). Na kanjonskim stranama Šujice izmjenjuju se nagibi od $12-32^{\circ}$ i $32-55^{\circ}$.

Što se najviših vrijednosti nagiba tiče, nagibi od $32-55^{\circ}$ prevladavaju uglavnom na višim dijelovima padina uz grebene planinskih uzvišenja (izuzetak su južno eksponirane padine Tušnice gdje je ova kategorija zastupljena uglavnom na nižim dijelovima padina) te uz kanjonske strane Šujice. Prilikom terenskog izlaska uočeni su nagibi najviše kategorije ($>55^{\circ}$) na litici na Lib planini iznad Borčana (Sl. 8), te mjestimično na vrlo strmim stranama ponikava i japaga na području Grabovičke zaravni (Sl. 6).



Slika 7: Nagibi kategorije >550 na strmoj padini zapadnog dijela planine Lib, iznad Borčana, IZVOR: GoogleEarth 2011.

Tablica 2. Klase i prostorni obuhvat nagiba

Nagib (°)	Površina (m ²)	Udio (%)
<2	128929043,0	35,248
2-5	48646472,0	13,300
5-12	97027222,0	26,527
12-32	87352669,0	23,882
32-55	3807938,0	1,041
>55	10729,0	0,003
Ukupno	365774073,0	100,000

Analiza ekspozicija

Ekspozicija se može shvatiti kao orijentacija padine s obzirom na strane svijeta. Pri tome se kut određuje najčešće od pravca sjevera u smjeru kazaljke na satu. U konceptualnom smislu, funkcija ekspozicije odnosi se na izračun vrijednosti ekspozicije središnjeg piksela u odnosu na osam susjednih (mreža piksela 3X3). Smjer prema kojem je ploha okrenuta predstavlja ekspoziciju za središnji piksel (Burrough & McDonell, 1998). Utjecaj ekspozicije na geomorfološke značajke očituje se u tome što različito eksponirane padine primaju različitu količinu kratkovalnog zračenja, što utječe na karakteristike klimatskih elemenata kao egzogenih geomorfoloških agensa.

Na istraživanom području, ekspozicije indirektno utječu na promjene vezane uz eroziju, koroziju i sedimentaciju padinskih trošina, ali i hidrološke procese na padinama. Primjerice, povećano kratkovalno zračenje na padinama eksponiranim prema južnom kvadrantu (JZ, J i JI) posredno utječe na povećanje evapotranspiracije, što u sušnijem dijelu godine rezultira bržom nestašicom vode (osobito na mjestima gdje je u podlozi vapnenac) a posljedica je smanjenje obuhvata i broja biljnih vrsta na padinama, odnosno rjeđa vegetacija. I obratno, rjeđa vegetacija omogućuje brže isušivanje tla, veće površinsko otjecanje, i na taj način pogoduje procesu spiranja. Na sjevernim osojnim padinama, vlaga u tlu zadržava se duže vrijeme nakon oborina, što pogoduje razvoju vegetacije i omogućava povoljnije uvjete za stvaranje i očuvanje tla. Dugoročno, spiranje tla, uz ostale denudacijske procese, može uzrokovati povećanje nagiba padine (Kirkby, 2004), kao što se može vidjeti na primjeru zapadno eksponirane padine na planini Lib iznad Borčana uz JZ dio Duvanjskog polja (Sl. 8).



Slika 8: Zapadno eksponirana padina na Lib planini iznad Borčana. Povećanje nagiba uslijed dugotrajnih procesa spiranja, osipanja i urušavanja, pospješenih litološkim sastavom i izraženijom dnevnom i sezonskom temperaturnom amplitudom.

Najveću rasprostranjenost na promatranom području, s 20,7%, imaju jugozapadno eksponirane padine ili dijelovi padina (Tabl. 3), što je u skladu s generalnim dinarskim smjerom pružanja reljefnih morfostruktura. U širem kontekstu, prema kriteriju opće



Slika 9: Južne i jugozapadne padine Vrana nasuprotne SI i I padinama Liba, IZVOR: GoogleEarth 2011.

pogodnosti³, padine južnog kvadranta s toplom i vrlo toplom orijentacijom (JI, J i JZ) u ukupnoj površini sudjeluju s čak 46,3%. Radi se o područjima većeg dijela Ljubuše (Sl. 3), južnim i jugozapadnim padinama Vrana nasuprotnim SI i I padinama Liba (Sl. 9), JZ i J padinama Liba (Sl. 7), Mesihovine (Sl. 10), velikog dijela Grabovičke zaravni (Sl. 6) te južnim padinama Tušnice i Jelovače (Sl. 5).

S nešto manjim udjelom (31,9%, Tab.3) zastupljene su padine s umjereno hladnim i hladnim ekspozicijama (NW, N i NE). Radi se o područjima krajnje sjeveroistočne izdužene padine Grabovičke zaravni (Sl. 6), koja se većim dijelom strmo spušta prema Duvanjskom polju. Također, velika površina ovih ekspozicija prisutna je na padini Vrana nasuprotnoj Ljubuši (Sl. 9), padinama Mesihovine nasuprotnim Libu (Sl. 10) te mjestimično na dijelovima Tomislavgradskog pobrđa (Sl. 4), Tušnice (Sl. 5) i središnjeg dijela Ljubuše (Sl. 3).

³ Opća pogodnost ekspozicija: N = hladna ekspozicija; NE i NW = umjereno hladne ekspozicije; E i W = neutralne ekspozicije; SE i SW = tople ekspozicije; S = vrlo topla ekspozicija



Slika 10: Mesihovina. NW, N i NE ekspozicije na padinama nasuprot Libu (desno gore), IZVOR: GoogleEarth 2011.

Neutralne ekspozicije (W i E) u istraživanom području imaju udio od 21,8% (Tab. 3), zbog mjestimičnih promjena dinarskog smjera pružanja morfostruktura u smjer S – J, uzrokovanih izvijanjem tektonskih struktura. To se osobito odnosi na zapadnu padinu Liba (Sl. 7 i 8) i istočne padine Tomislavgradskog pobrđa (Sl. 4).

Tablica 3. Klase i prostorni obuhvat ekspozicija

Ekspozicija padina	Površina (m ²)	Udio (%)
N	24545650,6	10,4
NE	28689996,3	12,1
E	20449568,8	8,6
SE	23498550,1	9,9
S	37080490,4	15,7
SW	48967419,2	20,7
W	31326727,5	13,2
NW	22260077,2	9,4
Ukupno padine >2°	236818480,1	

Analiza zakrivljenosti padina

Analize zakrivljenosti padina ukazuju na karakter i intenzitet procesa koji djeluju na promjene u izgledu padina (ili njihovih dijelova). Ovakve analize, pogotovo specifične analize profilne i planarne zakrivljenosti, ističu područja na kojima dolazi do relativno brzih promjena nagiba padina, a na nekim dijelovima i snižavanja terena. U geomorfološkim istraživanjima, ove analize mogu se primijeniti za izračunavanje i procjenu trendova endogenih (izdizanje ili spuštanje struktura) i egzogenih geomorfoloških procesa, npr. otjecanja (pomoću planarne zakrivljenosti) ili identificiranja otpornijih stijenskih kompleksa (pomoću profilne zakrivljenosti) (Kennelly, 2009).

Matematički gledano, zakrivljenost se definira kao odstupanje geometrijskog objekta od ravnine. Ona je inverzna radijusu kružnice, odnosno izražava se formulom $k=1/R$. S porastom radijusa kružnice, smanjuje se zakrivljenost i obratno. Zakrivljenost predstavlja koeficijent odstupanja krivulje od pravca čija je zakrivljenost nula. Za točku u trodimenzionalnom prostoru moguće je izvesti beskonačan broj zakrivljenosti (OHLMACHER, 2007). Korištenjem metode 3×3 kvadrata, zakrivljenost se računa kao druga derivacija visinskih vrijednosti DMR-a, prema formuli $Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$. Postoji više vrsta zakrivljenosti, a u ovom radu se razmatraju profilna i planarna (Moore Et Al., 1993; Ayalew and Yamagishi, 2004).

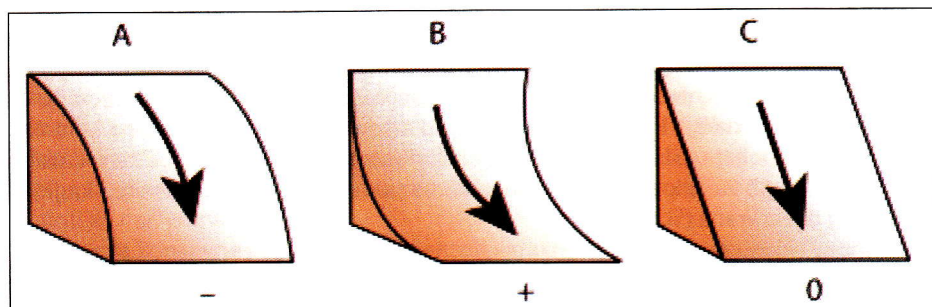
Analizom DMR-a dobiva se numerički niz vrijednosti zakrivljenosti iz kojeg je moguće izdvojiti 3 tipa padina: konkavne, konveksne i pravocrtne. Veliki problem predstavljao je odabir metode za određivanje tipa zakrivljenosti padine. U idealiziranim uvjetima, pravocrtne padine su one koje imaju vrijednost zakrivljenosti nula.

Dikau (1989) zakrivljenost padina radijusa većeg od 600 m ($k > 0,001666$) na modelu rezolucije 20 m, smatra zanemarivom i takve padine ubraja u pravocrtne. Analogno tomu, za korišteni model rezolucije 25 m, pravocrtnim padinama smatraju se padine radijusa većeg od 750 metara.

Grafične vrijednosti u ovom radu određene su na sljedeći način:

1. granična vrijednost: vrijednost zakrivljenosti 0 – 0,001333
2. granična vrijednost: vrijednost zakrivljenosti 0 + 0,001333
3. granična vrijednost: maksimalna vrijednost niza

Profilna zakrivljenost odnosi se na zakrivljenost padina (ili njihovih dijelova) duž linija okomitih na izohipse a njome se određuje stopa promjene nagiba za svaki piksel. Negativna vrijednost ukazuje na konveksni uzdužni profil padine a pozitivna na konkavni, dok vrijednost nula označava linearnu (pravocrtnu) padinu. Profilna zakrivljenost utječe na brzinu otjecanja vode, odnosno na brzinu kretanja detritusa niz padinu.



Slika 11: Profilna zakrivljenost (URL 1).

Tablica 4. Tipovi i prostorni obuhvat profilne zakrivljenosti

Padine	Površina (m ²)	Udio (%)
Konveksne	119069847,7	49,743
Pravocrtne	5805687,4	2,425
Konkavne	114492620,8	47,831
Ukupno	239368155,9	100,000

Iz podataka o strukturi profilne zakrivljenosti (Tab. 4) proizlazi da nema velike razlike u udjelu konveksnih i konkavnih padina (konveksne su nešto dominantnije, s 49,74% a udio konkavnih iznosi 47,83%) , dok su pravocrtne padine zastupljene s vrlo malim udjelom (od svega 2,4%). To upućuje na približnu ujednačenost smjerova tektonskih gibanja, tj. izdizanja i spuštanja.

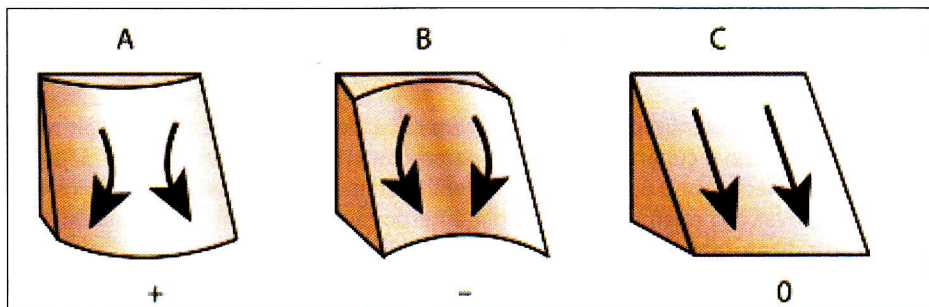
Konveksne padine prevladavaju na višim dijelovima uzvišenja, tj. vršnim dijelovima uz grebene (Tomislavgradsko tercijarno pobrđe, Tušnica, Lib, zapadni dio Vran-planine, Mesihovina; Sl. 4, 5, 9, 10) u vršnom dijelu strmog odsjeka na sjeveroistočnom rubu zaravni Grabovice uz jugozapadni dio Duvanjskog polja (Sl. 6), kao i na cijeloj Grabovičkoj zaravni. U slučaju Tušnice, korelacija s geološkim podacima potvrđuje djelovanje neotektonskih pokreta pozitivnog predznaka: položaj slatkovodnih lapora na većimvisinama upućuje na neobično jako novije gibanje tla. Uz to, morfološki procesi i oblici strmih padina Tušnice upućuju na novija neotektonska zbivanja (Sl. 5). Također, velika područja s konveksnim padinama prisutna su na JI dijelu planine Ljubuše, prateći skretanje tektonskih struktura iz smjera SZ-JI u Z-I (Sl. 3). Osobito markantna područja konveksnih padina nalaze se uz viši dio linearno izdužene „grede“ duž cijelog SI dijela Duvanjskog (Sl. 3) te uz više dijelove kanjonskih strana Šujice na sjevernom dijelu područja.

Za razliku od konveksnih, konkavne padine dominiraju na nižim dijelovima padina, uz rasjedne linije na cijelom području, te uz niže dijelove strana jaruga gore spomenutih planinskih masiva. Područja jaruga, uz rasjedne linije, predstavljaju i najmarkantnija područja na kojima prevladavaju konkavne padine. To se lijepo može uočiti npr. na nižim dijelovima uz kanjon Šuice, uz rasjednu liniju koja razdvaja Tušnicu i Jelovaču (Sl. 5), uz rasjed između sjevernih dijelova zapadnih padina Vran planine i Ljubuše (Sl. 2), uz rasjed koji se lučno proteže cijelim središnjim područjem Liba u smjeru SZ-JI (Sl. 2 i 7) itd. Značajan indikator recentnog spuštanja Duvanjskog polja u odnosu na planinski okvir predstavlja izduženo područje konkavnih padina na nižim dijelovima tzv „grede“, duž cijelog SI dijela Duvanjskog polja (na kontaktu zaravni Podine i polja, Sl. 3).

Profilne pravocrtne (ravnotežne) padine najzastupljenije su na području mladog tercijarnog Tomislavgradskog pobrđa, i to na dijelovima bližim Duvanjskom polju, na svim hipsometrijskim nivoima, tj. ne pokazuju pravilnost u vertikalnom rasporedu (Sl. 4). Također se mogu naći u krajnjem JI tercijarnom dijelu Grabovičke zaravni na kontaktu s Duvanjskim poljem (Sl. 6), na nižim dijelovima zapadnih padina Liba te na blago položenim (nagib 2-5°) krednim SZ padinama na području kontakta Ljubuše i krajnjeg zapadnog dijela Vrana (Sl. 9).

Planarna zakrivljenost odnosi se na zakrivljenost padine u sekanti izohipse okomitoj na smjer najvećeg nagiba. Pozitivna vrijednost ukazuje na konveksni oblik padine a negativna na konkavni, dok nulta vrijednost ukazuje na linearnu (pravocrtnu) padinu.

Ukoliko je zadani smjer okomit na smjer najvećeg nagiba (horizontalna sekanta izohipse), tada se modelom zakrivljenosti padina mogu procjenjivati divergencija (konveksne, izbočene padine) odnosno konvergencija (konkavne, udubljene padine) hipotetskog otjecanja (a time i lokalne ocjeditosti ili vlažnosti tla na padini) (Antonić, 1996). Konvergentno otjecanje povezano je s procesima akumulacije vode, tla ili detritusa a divergentno otjecanje uz derazijske procese spiranja, jaruženja i bujičenja.



Slika 12: Planarna zakrivljenost (URL 1).

Tablica 5. Tipovi i prostorni obuhvat planarne zakrivljenosti

Padine	Površina (m ²)	Udio (%)
Konveksne	124396072,4	51,969
Pravocrtne	9761153,2	4,078
Konkavne	105211330,5	43,954
Ukupno:	239368155,9	100,000

Iz podataka o strukturi planarne zakrivljenosti (Tab. 5) uočljiva je dominacija konveksnih (51,97%) u odnosu na konkavne padine (43,95%). Pravocrtne padine imaju mali udio, od svega 4,08% (iako dvostruko veći u odnosu na profilnu zakrivljenost). To znači da je na razini cijelog područja prisutna dominacija divergentnog u odnosu na konvergentno otjecanje površinske vode tj. denudacijskih procesa u odnosu na akumulacijske.

Divergentno otjecanje osobito je izraženo na višim dijelovima padina u blizini planinskih grebena, u većoj ili manjoj mjeri ispresjecanim jarugama. Prostranije zone planarne konveksne zakrivljenosti osobito su istaknute na području Tomislavgradskog mladog tercijarnog pobrđa i južnih padina Tušnice (Sl. 4 i 5), što se može dovesti u vezu s njihovim litološkim sastavom. Naime, radi se o konglomeratima, pješčenjacima i laporima, laporima s konglomeratima i i laporovitim vapnencima paleogenske i neogenske starosti, podložnijim erozijskim procesima. Također, prostranije zone ovog tipa planarne zakrivljenosti nalaze se na području zapadnog dijela i krajnjih SI padina Lib planine (Sl. 7), uz više dijelove padina krajnjeg SI dijela Grabovičke zaravni okrenutih prema Duvanjskom polju (na kojima prevladava kategorija nagiba od 32-55°, Sl. 6), te na području Vran planine (Sl. 9).

Dominacija konkavne planarne zakrivljenosti karakteristična je za područje vapnenačke zaravni između centralnog grebena Liba i njegove SI padine (Sl. 7) te za područje vapnenačke zaravni u istočnom dijelu Ljubuše, udaljenijem od Duvanjskog polja (Sl. 3). Razlog tome je velika gustoća ponikava i mala zastupljenost uvala na tim područjima

(za razliku od npr. Grabovičke zaravni, gdje se, uz ponikve, nalazi i veći broj prostranijih uvala), što za posljedicu ima manje površine konveksnih međuprostora divergentnog otjecanja između ponikava.

Planarne pravocrtne padine imaju sličan prostorni raspored kao i profilne, tj. nalaze se na području mladog tercijarnog Tomislavgradskog pobrđa, i to na dijelovima bližim Duvanjskom polju (Sl. 4), na krajnjem JI tercijarnom dijelu Grabovičke zaravni na kontaktu s Duvanjskim poljem (Sl. 6), na nižim dijelovima zapadnih padina Liba (Sl. 7) te na sjevernim padinama zapadnog dijela Vran planine, uz kontakt s Ljubušom (Sl. 9).

Diskusija i zaključak

Geomorfometrijski pristup primijenjen u ovom radu uključio je korištenje različitih GIS metoda za precizno računanje numeričkih parametara reljefa istraživanog područja, što je omogućilo međusobnu usporedbu navedenih parametara, uz korelaciju s geološkom kartom. Cilj ovakvog pristupa je egzaktnija interpretacija morfometrijskih parametara reljefa kao indikatora značajki endogenih i egzogenih procesa na istraživanom području. Na istraživanom području dominiraju nagibi padina manji od 2° kao posljedica dominacije pretežito zaravnjenog reljefa Duvanjskog polja na istraživanom području. Manja izolirana područja ove kategorije javljaju se unutar rubnog planinskog okvira polja, na korozivskim terasama, zaravnima, vršnim dijelovima planinskih grebena i ponikvama. Značajan je i udio kategorija nagiba od $5-12^{\circ}$ i $12-32^{\circ}$, koje se javljaju uglavnom na padinama rubnog planinskog okvira (osobito uz kontaktni dio s poljem) ali i padinama planinskih dijelova udaljenijim od polja. S porastom visine dolazi do sve većeg udjela kategorija $12-32^{\circ}$ i $>55^{\circ}$. Mjestimično, uz dominantne aktivne rasjedne linije, kategorija nagiba $>55^{\circ}$ zapaža se i na dijelovima padinskih strana uz kanjonska suženja (kanjon Šujice i područje JI od Kongore), bočne strane ponikava, uvala ili japaga (područje Grabovičke zaravni).

Dominacija padina ekspaniranih prema južnom kvadrantu (JZ, J i JI), osobito na višim hipsometrijskim nivoima, zbog većih dnevnih i sezonskih temperaturnih amplituda utječe na intenziviranje egzogeomorfoloških procesa (spiranje, jaruženje, osipanje i urušavanje). Osim toga, dugotrajnije kratkovalno sunčevo zračenje na padinama ekspaniranima prema južnom kvadrantu posredno utječe i na povećanje evapotranspiracije, što u sušnijem dijelu godine rezultira bržom nestašicom vode.

Značajke profile zakrivljenosti padina s nešto većim udjelom konveksnih u odnosu na konkavne padine ukazuju na nešto izraženiju komponentu izdizanja terena. S obzirom da razlike nisu velike, može se zaključiti da je unutar područja od velikog značaja i spuštanje pojedinih tektonskih struktura. Iz navedenog proizlazi da su, generalno promatrajući, smjerovi neotektonskih procesa približno ujednačeni i vrlo složeni te ih je potrebno detaljnije analizirati na razini manjih orografskih ili strukturnih jedinica.

Što se tiče značajki planarne zakrivljenosti, još je izraženija dominacija konveksnih u odnosu na konkavne padine, što upućuje na intenzivno djelovanje egzogenih morfoloških destruktivnih procesa ali i akumulacijskih, s obzirom da je i udjel konkavnih padina relativno visok. Površine s velikim udjelom planarne konveksne zakrivljenosti najizraženije su na području Tomislavgradskog tercijarnog pobrđa, Tušnice i Vran planine iz čega se može zaključiti da je na navedenim područjima najizraženije djelovanje egzogenih destruktivnih procesa. Tome pridonosi i veliki udio dolomita (Tušnica i Vran) ili lapora s konglomeratima (Tomislavgradsko pobrđe) u litološkom sastavu kao i mjestimično veći nagibi (Tušnica, Vran) ili ekspozicije južnog kvadranta. Slično značajkama profile zakrivljenosti, i kod planarne je prisutna velika složenost unutar cijelog istraživanog područja te je potrebna detaljnija analiza na razini manjih orografskih ili strukturnih jedinica.

S obzirom da su svi morfometrijski parametri, kao reprezentanti utjecaja endogenih i/ili egzogenih morfoloških procesa, dovedeni u međusobnu vezu, moguće je izdvojiti područja različitih značajki endogenih i egzogenih morfoloških procesa a korelacija s geološkom kartom omogućuje dodatnu verifikaciju utvrđenih činjenica vezanih uz značajke navedenih procesa. Na taj način moguća je generalna procjena recentnog stanja dinamičke stabilnosti reljefa, što je od praktične važnosti gotovo za sve aspekte ljudske djelatnosti na istraživanom području.

Literatura i izvori

Antonić, O. (1996): Modeli utjecaja topoklime na vegetaciju krša. Disertacija. Biološki odsjek PMF-a, Sveučilište u Zagrebu, 125 str.

Ayalew, L., Yamagishi, H., (2004): Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. *Geomorphology*, 57 (2004), pp. 95–116.

Burrough, P. A., Mcdonell, R.A. (1998): Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York

Čičić, S. (2002): Geološki sastav i tektonika BiH, Earth science institute, Sarajevo

De Leeuw, A., Mandić, O., Krijgsman, W., Kuiper, K., Hrvatović, H. (2011): A chronostratigraphy for the Dinaride Lake System deposits of the Livno-Tomislavgrad Basin: the rise and fall of along-lived lacustrine environment, *Stratigraphy*, vol. 8, no. 1., pp. 29-43

Dikau, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology, J. Raper, Editor, Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems, Taylor and Francis, Chichester (1989), pp. 51–77.

Kennelly, P. J.(2009): Hill-Shading Techniques to Enhance Terrain Maps, 24th International Cartographic Conference, Santiago de Chile

Kirkby, M. (2004): Aspect and Geomorphology, *Encyclopedia of Geomorphology*, Voume 1., Routledge, London, 34-36

Lepirica, A. (2009): Reljef geomorfoloških regija Bosne i Hercegovine, Zbornik radova PMF-a, svezak geografija, God. 6, br. 6, Tuzla, 7-52

Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. (2005): Digital Terrain Modeling, CRC Press, London Manual for detailed geomorphological mapping (1972). Demek, J. (Ed), IGU Commission on Geomorphologic Survey and Mapping, Academia, Prague, 320 pp.

Moore, I.D., Lewis, A., Gallant J.C. (1993): Terrain attributes: estimation methods and scale effects. In: A.J. Jakeman, M.B. Beck, and M.J. McAleer (eds.), *Modeling Change in Environmental Systems*, New York: John Wiley and Sons, pp.189-214.

Ohlmacher, G. C. (2007): Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides, *Engineering Geology*, vol.91, Issues 2-4, pages: 117-134
Roglić, J. (1940): Geomorphologische studie uber das Duvanjsko polje (polje von Duvno) in Bosnien, *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft, Wien*.