

# Primjena digitalnog modela reljefa u analizi prostora

---

Šantić, Gabrijelela

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:551761>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**ŠUMARSKI ODSJEK**  
**SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ**  
**ZAVOD ZA IZMJERU, DALJINSKA ISTRAŽIVANJA I UREĐIVANJE**  
**ŠUMA**

**GABRIJELA ŠANTIĆ**

**PRIMJENA DIGITALNOG MODELA RELJEFA U ANALIZI**  
**PROSTORA**

**DIPLOMSKI RAD**

**ZAGREB, 2023.**

**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU  
ŠUMARSKI ODSJEK**

**PRIMJENA DIGITALNOG MODELA RELJEFA U ANALIZI  
PROSTORA**

**DIPLOMSKI RAD**

Diplomski studij: Urbano šumarstvo, zaštita prirode i okoliša

Predmet: Analiza i valorizacija prostora

Ispitno povjerenstvo: 1. prof. dr. sc. Ante Seletković

2. izv. prof. dr. sc. Mario Ančić

3. doc.dr.sc. Jelena Kolić

4. izv. prof. dr. sc. Ernest Goršić (zamjenski član)

Student: Gabrijela Šantić

JMBAG: 0068232265

Datum odobrenja teme: 05.05.2023.

Datum predaje rada: 25.09.2023.

Datum obrane rada: 27.09.2023.

**Zagreb, rujan, 2023.**

**FACULTY OF FORESTRY AND WOOD TECHNOLOGY**  
**UNIVERSITY IN ZAGREB**  
**DEPARTMENT OF FORESTRY**

**APPLICATION OF DIGITAL RELIEF MODEL IN SPACE**  
**ANALYSIS**

**MASTER'S THESIS**

Graduate study: Urban forestry, nature and environmental protection

Subject: Analysis and valorization of space

Exam committee: 1. Regular professor Ante Seletković, Ph.D.

2. Associate professor Mario Ančić, Ph.D.

3. Assistent professor Jelena Kolić, Ph.D.

4. Associate professor Ernest Goršić, Ph.D. (substitute)

Student: Gabrijela Šantić

JMBAG: 0068232265

Date of topic approval: 05.05.2023.

Date of submission of work: 25.09.2023.

Date of defense of work: 27.09.2023.

**Zagreb, September, 2023.**

## DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Primjena digitalnog modela reljefa u analizi prostora
Title:	Application of digital relief model in space analysis
Autor:	Gabrijela Šantić
Adresa autora:	Donja Rovna 1, Busovača
Mjesto izrade:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrste objava:	Diplomski rad
Mentor:	prof. dr. sc. Ante Seletković
Izradi rada pomogao:	prof. dr. sc. Ante Seletković
Godina objave:	2023.
Obujam:	poglavlja: 6, stranica: 53, slika: 37, tablica: 3, navoda literature: 112
Ključne riječi:	digitalni model reljefa, vektor, raster, prostorni podatci, analiza podataka, primjena digitalnog modela
Key words:	digital relief model, vector, raster, spatial data, data analysis, application of digital model
Sažetak:	Digitalni model reljefa je, najjednostavnije rečeno, statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa (u vektorskom ili rasterskom obliku) s nizom poznatih x, y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Millner i Laflamme, 1958). Različiti su izvori podataka za izradu digitalnog modela reljefa: od terenske izmjere, digitalizacije izohipsi, daljinska istraživanja. Digitalni model reljefa predstavlja kvalitetnu podlogu pri analizi prostora, a u ovom diplomskom radu su prikazane: metode izrade DMR-a, načini prikupljanja podataka za izradu DMR-a, derivati iz DMR-a (nagib terena, izloženost, ...) pomoću kojih je moguće provoditi različite prostorne analize u GIS-u.
Summary:	A digital relief model is, in the simplest terms, a statistical representation of continuous relief surfaces (in vector or raster form) with a series of known x, y and z coordinates within an arbitrarily chosen coordinate system (Millner and Laflamme, 1958). There are various sources of data for the creation of a digital relief model: from field surveying, digitalization of isohypsis, remote surveys. The digital relief model represents a high-quality basis for the analysis of space, and in this thesis the following are presented: methods of creating DMR, ways of collecting data for creating DMR, derivatives from DMR (terrain slope, exposure, ...) with which it is possible to carry out different spatial analyzes in GIS.

	<b>IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI</b>	<b>OB FŠDT 05 07</b>
		Revizija: 2
		Datum: 27.09.2023.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagrebu, 27.09.2023. godine

---

*vlastoručni potpis*

Gabrijela Šantić

## *ZAHVALA*

*Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Anti Seletkoviću na pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

*Hvala svim mojim prijateljima, kolegama i svima koji su na neki način obilježili ovo razdoblje života!*

*Neizmjerne zahvale idu mojoj obitelji bez kojih danas ne bih bila tu gdje jesam i što jesam.*

*I hvala dragom Bogu, on je moja snaga!*

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	1
<b>SUMMARY</b> .....	2
<b>1. UVOD</b> .....	3
<b>2. DIGITALNI MODEL RELJEFA (DMR)</b> .....	4
<b>2.1. Izvori podataka za DMR</b> .....	4
2.1.1. Terenska izmjera .....	5
2.1.2. Fotogrametrijsko prikupljanje podataka.....	6
2.1.3. Lasersko snimanje (skeniranje) - LiDAR.....	7
2.1.4. Radarsko prikupljanje podataka .....	8
2.1.5. Metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata .....	9
<b>2.2. Metode izrade DMR-a</b> .....	9
2.2.1. Struktura digitalnog modela reljefa.....	10
2.2.1.1. TIN - nepravilna mreža trokuta .....	10
2.2.1.2. GRID – pravilna mreža .....	12
2.2.1.3. HIBRDNO uređenje podataka .....	13
<b>2.3. Digitalne analize reljefa</b> .....	14
2.3.1. Geomorfološki parametri .....	16
2.3.1.1. Morfometrijski parametri .....	17
2.3.1.1.1. Vertikalna raščlanjenost .....	17
2.3.1.1.2. Nagib terena .....	18
2.3.1.1.3. Izloženost terena.....	21
<b>3. CILJ RADA</b> .....	23
<b>4. PRIMJENA DMR-a PRI ANALIZI PROSTORA</b> .....	24
<b>4.1. Primjena DMR-a pri analizi prostora na području Republike Hrvatske</b> .....	24
4.1.1. Jarunsko jezero .....	24
4.1.2. Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero i "Crno jezero" u Lici .....	29
4.1.3. Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja .....	31
4.1.4. Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara .....	33
<b>4.2. Primjena DMR-a pri analizi prostora u svijetu</b> .....	37
4.2.1. Prostorna morfometrijska analiza digitalnog modela visina u istraživanju krajolika .....	37



4.2.2. Poboljšavanje uvida pomoću digitalnog modela površine i digitalnog modela terena .....	38
4.2.3. Digitalni modeli terena u gusto naseljenim urbanim područjima .....	41
4.2.4. Monitoring urbanih šuma korištenjem 3D prostornih indeksa na temelju LiDAR oblaka točaka i pixel pristupa .....	43
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>46</b>
<b>6. LITERATURA</b> .....	<b>47</b>

## SAŽETAK

Digitalni model reljefa je, najjednostavnije rečeno, statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa (u vektorskom ili rasterskom obliku) s nizom poznatih x, y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Millner i Laflamme, 1958). Različiti su izvori podataka za izradu digitalnog modela reljefa: od terenske izmjere, digitalizacije izohipsi, daljinska istraživanja. Digitalni model reljefa predstavlja kvalitetnu podlogu pri analizi prostora, a u ovom diplomskom radu su prikazane: metode izrade DMR-a, načini prikupljanja podataka za izradu DMR-a, derivati iz DMR-a (nagib terena, izloženost, ...) pomoću kojih je moguće provoditi različite prostorne analize u GIS-u.

## **SUMMARY**

A digital relief model is, in the simplest terms, a statistical representation of continuous relief surfaces (in vector or raster form) with a series of known x, y and z coordinates within an arbitrarily chosen coordinate system (Millner and Laflamme, 1958). There are various sources of data for the creation of a digital relief model: from field surveying, digitalization of isohypsis, remote surveys. The digital relief model represents a high-quality basis for the analysis of space, and in this thesis the following are presented: methods of creating DMR, ways of collecting data for creating DMR, derivatives from DMR (terrain slope, exposure, ...) with which it is possible to carry out different spatial analyzes in GIS.

# 1. UVOD

Zemljina površina ima izuzetno kompleksne reljefne oblike zbog čega ih znanstvenici proučavaju izradom i analizom digitalnog modela reljefa (DMR ili DTM, *digital terrain model*) (Dikau i dr., 1995; Bishop i Shroder, 2000; Millaresis i Argialas, 2000; Wilson i Gallant, 2000; Tucker i dr., 2001; Shary i dr. 2002; Chaplot i dr., 2006; Wilson, 2011). Model u geoinformatici predstavlja apstrakciju realnog svijeta (Frančula, N., Lapaine, M. (2008): Geodetsko-geoinformatički riječnik, Državna geodetska Uprava, Zagreb.), odnosno pojednostavljenu stvarnost pretvorenu u oblik koji možemo razumjeti (Meyer, 1985; Wu i Marceau, 2002). Može ga se definirati i kao matematički ili grafički prikaz stvarnosti (Frančula i Lapaine 2008) te kao prikaz neke pojave ili fenomena u njoj (Schneider 2001). Postoji širok spektar primjene modela kao što su istraživanja, predviđanja, procjene rizika, donošenje odluka u upravljanju okolišem itd. (Schloeder i dr., 2001; Hijmans i dr. 2005; Dobesch i dr., 2007; Li i Heap, 2008). Ovisno o primjeni, model treba biti napravljen tako da zadovolji kriterije određene znanstvene discipline (geomorfologija, hidrologija, klimatologija, krajobrazna ekologija, geologija, kartografija itd.) za koju je namijenjen jer različite discipline zahtijevaju i različite razine točnosti. Razvojem računalne tehnologije razvile su se i mnogobrojne tehnike izrade i analize digitalnog modela reljefa (Pike, 1995; Pike, 2000).

Digitalni modeli terena ili DTM-ovi imaju različite definicije ovisno o tome gdje se nalazite u svijetu. Bez obzira na definiciju, DTM je u biti trodimenzionalni, digitalni prikaz površine koji se sastoji od X, Y i Z koordinata. (UP42 Company - Nikita M. i Elizabeth D. (2021.): Everything you need to know about Digital Elevation Models (DEMs), Digital Surface Models (DSMs), and Digital Terrain Models (DTMs). Obzirom da u terminologiji ne postoji suglasnost oko nazivlja ovog modela, ovisno o disciplini za koju je izrađen ili o državi u kojoj se nalazimo koriste se sljedeći nazivi: 1) digitalni model terena (reljefa) (*digital terrain model*), 2) digitalni elevacijski model (*digital elevation model*), 3) digitalni model visina (*digital height model*), 4) digitalni osnovni model (*digital ground model*), 5) digitalni model visina reljefa (*digital terrain elevation model*) i 6) digitalni model površina (*digital surface model*) (Šiljeg A., 2013: Digitalni model reljefa u analizi geomorfometrijskih parametara – primjer PP Vransko jezero). U Republici Hrvatskoj upotrebljava se termin digitalni model reljefa – DMR (Krtalić, A. i dr.: Digitalni trodimenzionalni prikazi scene i satelitska stereofotogrametrija, Geod. list 2019, 2, 147–164).

Najjednostavnije rečeno, digitalni model reljefa predstavlja statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa u vektorskom ili rasterskom obliku s nizom poznatih x, y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Miller i Laflamme, 1958).

## 2. DIGITALNI MODEL RELJEFA (DMR)

Reljef, skup oblika Zemljine površine, ravnina i neravnina, uzvišenja i udubljenja (Peterca i dr., 1974), predstavlja jedan od najvažnijih geografskih elemenata. Osim što terenu daje osnovni izgled, reljef utječe na klimu, vegetaciju, raspored stanovništva na Zemlji kao i na ostale mnogobrojne geografske čimbenike (Pernar, 1996).

Numerički definiran reljef, nizom točaka od tri koordinate (X, Y, Z), predstavlja digitalni model reljefa ili DMR (Brukner i dr. 1992). Brojne su definicije digitalnog modela reljefa proizašle iz činjenica na kojima se sam model temelji. Digitalni model reljefa prikazuje skup točaka određenog dijela Zemljine površine, a čije su koordinate uređene i spremljene za računalnu obradu (Kušan, 1995.). Hunter i Goodchild 1997; Wechsler 2003. definiraju DMR kao digitalni prikaz površine terena koji pomoću pravokutne rešetke točaka daje visine kao osnovni podatak.

U Rana (2004.) ističe se kako svaka tvar na Zemlji ima svoju površinu. Ta konstatacija navodi na razmišljanje koji je zapravo ispravan termin za jednoznačno definiranje Zemljine površine te jesu li vegetacija i drugi umjetni objekti također površina ili pak samo objekti na Zemljinoj površini. Djelomični odgovor na ova pitanja može se iščitati iz stava da je digitalni model reljefa model koji predstavlja Zemljinu površinu, obuhvaćajući sve objekte na njoj (Oštir i Mulasahić, 2014).

Obzirom na sve navedene nedostatke definiranja DMR-a, u korist što boljeg razumijevanja pojmova kojima bi se raščlanila podjela rezultata u digitalnom modeliranju Zemlje, u ovom radu potrebno je upoznati se s ulaznim podacima i načinima prikupljanja istih te sa izradom koja direktno utječe na kvalitetu konačnih digitalnih modela (Lemaire 2008).

### 2.1. Izvori podataka za DMR

Osnovno pravilo kod prikupljanja podataka za DMR je da se izmjerom prikupe karakteristične točke reljefa kao temelj za izradu modela koji će aproksimirati stvarnu površinu. Metodu prikupljanja podataka određuje tip reljefa. Četiri su kriterija pomoću kojih se mogu usporediti metode prikupljanja podataka: 1) cijena, 2) točnost, 3) gustoća uzoraka i 4) zahtjevnost obrade prikupljenih podataka. Najsporija i najskuplja metoda prikupljanja podataka, ali i tradicionalna i točna metoda jest terensko istraživanje ili poluautomatska digitalizacija (Hengel i dr., 2003). Točnost s kojom DMR model prikazuje stvarnu površinu ovisi o razvedenosti i kompleksnosti površine te njegovoj rezoluciji (Pokupić, M., 2018: Analiza točnosti globalnih digitalnih modela reljefa i geomorfometrijski modeli planinskih područja Republike Hrvatske).

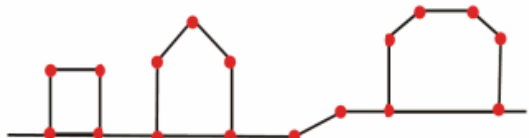
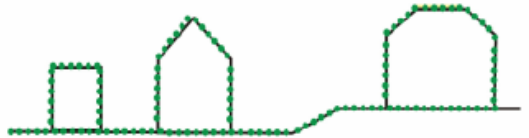
Pet je metoda prikupljanja podataka za izradu digitalnog modela reljefa, a to su (Šiljeg, A., 2013; Geodetski list, 2019):

- terenska izmjera za prikupljanje položajnih i visinskih podataka (tahimetrija, GNSS),
- fotogrametrijsko prikupljanje podataka (terestričko, zračno, satelitsko)
- lasersko snimanje (skeniranje), odnosno prikupljanje i obrada LiDAR podataka
- radarsko prikupljanje podataka (zračne, satelitske) i
- metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata (izohipse, kote).

### 2.1.1. Terenska izmjera

Direktna izmjera na terenu smatra se najtočnijom metodom prikupljanja podataka (Sučić, Z., 2014). Vrijeme potrebno za prikupljanje podataka na terenu i njihova točnost ovisi o geodetskim instrumentima koji se koriste pri samom postupku - GPS, totalna satnica teodolit, tahimeter, nivelir i terestričko lasersko snimanje (Karamustafić, 2007; Lasić, 2007).

Terestričko lasersko skeniranje je relativno nova tehnologija izmjere terena koja se pojavila devedesetih godina prošloga stoljeća. Ova se metoda, uz tradicionalne metode u geodeziji, koristi i za dobivanje određenih točaka u trodimenzionalnom prostoru (Lasić, 2007; Mechelke i dr., 2007). Temelji se na odašiljanju niza laserskih impulsa koji mjere udaljenosti, te horizontalne i vertikalne kutove pojedinih točaka u prostoru. Obrada podataka dobivenih laserskim snimanjem znatno je zahtjevnija, dugotrajnija i kompleksnija od obrade klasičnih terenskih mjerenja bez obzira na to što je proces u potpunosti automatiziran (Golek i dr., 2012). Postoji više tipova laserskih skenera. Oni se razlikuju po preciznosti izmjere, vremenu potrebnom za prikupljanje podataka, intenzitetu povratnog signala koji se odbija od različite materijale objekata snimanja te po mogućnosti modeliranja jednostavnih ili složenih geometrijskih oblika objekata (Adami i dr., 2007). Obzirom na osobine koje ju karakteriziraju, ove metoda se koristi većinom samo na manjim područjima, primjerice za neke lokalne projekte.

Klasična mjerna stanica	Terestrički laserski skener
<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ mjerenje karakterističnih točaka</li> <li>✚ mnogo truda za malo točaka</li> <li>✚ uloženi trud po točki je velik</li> <li>✚ geometrija snimljenih točaka je deskriptivna</li> <li>✚ točke snimanja odabiru se na terenu (iskustvo)</li> <li>✚ odabir snimljenih točaka određuje kvalitetu snimka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ pojedinačna mjerenja</li> <li>✚ ne mjere se karakteristične točke</li> <li>✚ nekontroliran odabir točaka</li> <li>✚ snimka nema geometrijskog značenja (simbolika)</li> <li>✚ uloženi trud po točki je mali</li> <li>✚ odabir snimljenih točaka u uredu (<i>postprocessing</i>)</li> <li>✚ kvaliteta je opisnog karaktera – ovisi o snimljenim elementima</li> </ul>
	

Slika 1 Usporedba klasične mjerne stanice s TLS-a (Izvor: Miler i dr., 2007)

## 2.1.2. Fotogrametrijsko prikupljanje podataka

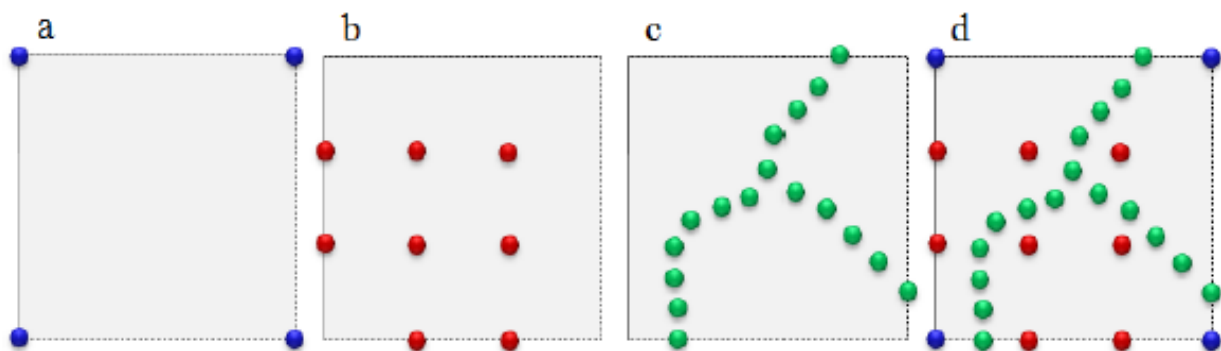
Znanstvena disciplina koja se bavi prikupljanjem pouzdanih kvantitativnih informacija o objektima koji se nalaze na Zemlji snimanjem, označavanjem i mjerenjem terena te analizom i interpretacijom fotografskih snimaka kao i prikaza elektromagnetskog zračenja dobivenih pomoću senzorskih sustava naziva se fotogrametrija (Govorčin i dr., 2012; Mitrović i dr., 2012).

Glavni zadatak ove discipline je dobivanje x, y i z koordinata pomoću stereorestitucije uz pomoć ručnog ili analitičkog stereoplota. Stereorestitucija je postupak prikupljanja podataka o visinama iz parova snimaka koji su prethodno orijentirani, a što zapravo i jest rješavanje temeljnog zadatka fotogrametrije (Mitrović i dr., 2012). Ovisno o položaju kamere u prostoru, fotogrametrija se dijeli na:

1. terestičku
2. aero i
3. orbitalnu.

Aerofotogrametrija ima najširu primjenu obzirom da zahtjeva minimalni terenski rad pri čemu obuhvaća velika područja izmjere. Temelji se na postavljanju kamere na posebnim postoljima iznad otvora na zrakoplovu. Karakterizira ju velika gustoća prikupljanja podataka koja se prilagođava određenom projektu kao i morfološkim osobinama terena. Pogodna je za mjerenja u nepristupačnim i opasnim mjestima (Huggel i dr., 2003; 2008). Neophodan uvjet za dobre rezultate je dobra optička vidljivost terena sa snimališta, a problem predstavlja vegetacija. Za razliku od satelitskih snimaka čija se točnost visinskih podataka kreće od 10 do 20 metara, aerosnimci daju točnost visinskih podataka od 10 centimetara do 1 metra (Huggel i dr., 2003; 2008).

Prilikom obrade i prikupljanja podataka raspored točaka može biti pravilan ili nepravilan.



Slika 2 Metode uzorkovanja visinskih podataka a) regular sampling, b) progressive sampling, c) selective sampling, d) composite sampling. (Izvor: Šiljeg, A., 2013.)

*Regular sampling*, odnosno pravilan raspored točaka ima mnogo prednosti no problem predstavlja određivanje optimalnog razmaka između visinskih točaka. Podešavanjem razmaka prema reljefu s izrazitijim visinskim promjenama, na zaravnjenom tipu reljefa postojat će više točaka nego je potrebno (Weibel i Heller, 1991). Navedeni nedostatak donekle se može nadomjestiti promjenjivom gustoćom točaka ili *progressive sampling* (Makarović, 1977; Frančula, 2004), ali nedovoljno za vjerni opis reljefa te se stoga dodaju karakteristične točke i linije – *selective sampling* (Frančula, 2004). Iz svega navedenog može se zaključiti kako se najbolji rezultati dobivaju kombinacijom pravilne i nepravilne, odnosno trokutne mreže ili *composite sampling* (Frančula, 2004).

Prikupljene točke koje najvjernije prikazuju morfološke osobine terena su točke na linijama loma terena i naglih promjena nagiba, vrhovi, sedla, udoline, točke duž linija najvećih zakrivljenosti, točke raspoređene u pravilnom rasteru te ostale proizvoljno raspoređene točke.

### 2.1.3. Lasersko snimanje (skeniranje) - LiDAR

Lasersko snimanje, tehnologija poznatija pod nazivom LiDAR (*Light Detection and Ranging*), automatizirana je i efikasna metoda prikupljanja podataka koja se popularizirala u posljednjih desetak godina (Wehr i Lohr, 1999; Gajski, 2007; Sangam, 2012). Ova metoda ima široku primjenu u različitim granama znanosti - geodezija, arheologija, geologija, biologija i dr. (Sangam, 2012). Postoje dvije vrste laserskog snimanja, aero, koja se znatno više upotrebljava i terestričko lasersko snimanje (Miler i dr., 2007; Holopainen i dr., 2010).

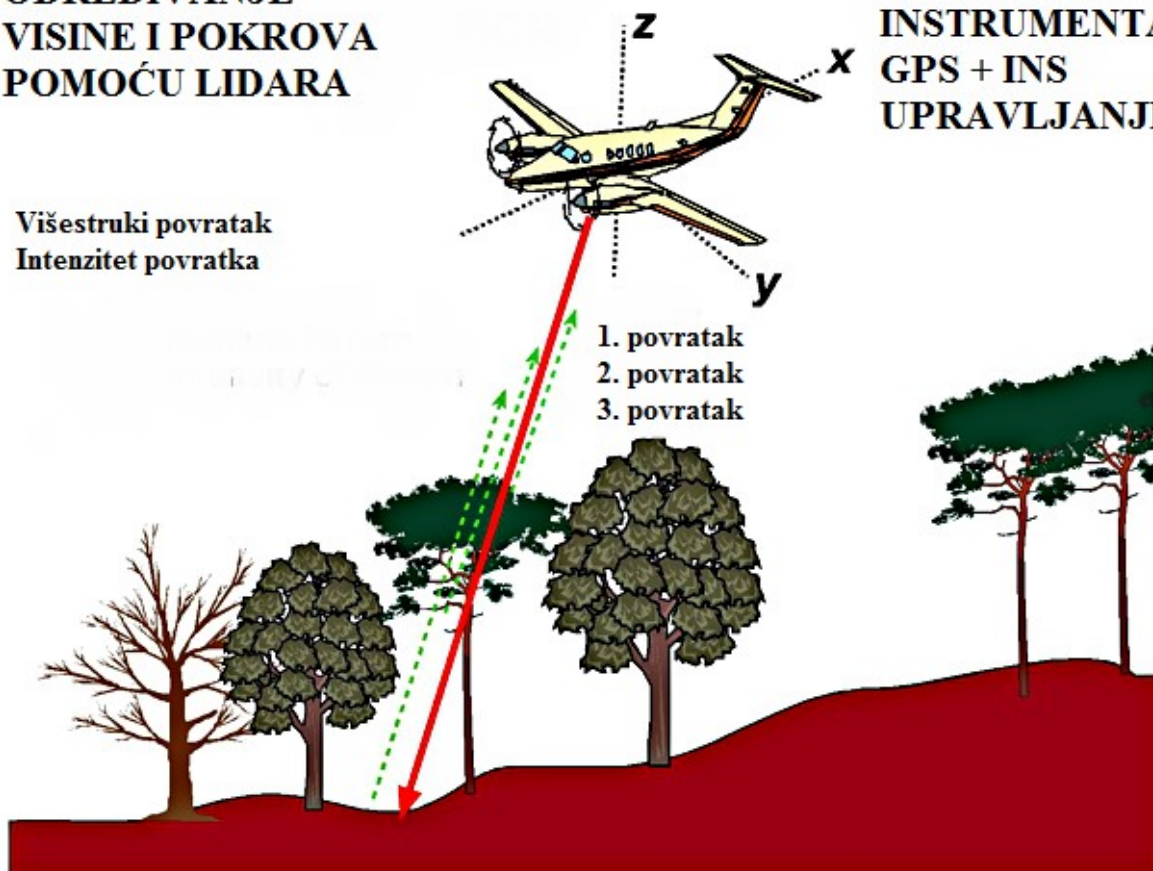
Vrijeme koje je potrebno da laserski impuls stigne do objekta i reflektira se nazad čini osnovu za određivanje udaljenosti senzora od mjerne točke (Gajski, 2007). Brzina prikupljenih točaka, od 10000 do 100000 u sekundi i njihova velika gustoća, glavne su karakteristike ove metode (Reutebuch i dr., 2005). Obzirom na veliku količinu podataka dobivenu laserskim snimanjem potrebno je provesti grupiranje podataka prema geometrijskim karakteristikama objekata na koje se odnose. Grupiranje olakšava klasifikaciju pomoću koje se korisne informacije razvrstavaju u razrede (klase) i filtriranje čiji je zadatak izdvajanje korisnih informacija (Gajski, 2007). Količina podataka, odnosno njihovo prorjeđivanje predstavlja najveći problem ove metode jer nadilazi kapacitet uobičajene hardverske i softverske opreme (Basa i Juraj, 2011). GPS oprema, frekvencija i visina letenja diktiraju centimetarsku točnost izmjerenih podataka (Kujundžić, 2007).



## ODREĐIVANJE VISINE I POKROVA POMOĆU LIDARA

## POLOŽAJ INSTRUMENTA GPS + INS UPRAVLJANJE

Višestruki povratak  
Intenzitet povratka



Slika 3 Gore lijevo: Puls svjetlosti emitiran iz letjelice tijekom LIDAR prikupljanja vraća različite informacije o površini na koju nailazi. Izvor: USDA Služba za očuvanje prirodnih resursa. Gore desno: povratno raspršenje pulsa koje se osjeti u zrakoplovu po vratnog ranga i na kraju pomaže u stvaranju terena s golom zemljom i površina za prvi povratak. (Izvor: Gatzolis & Anderson (2008)).

### 2.1.4. Radarsko prikupljanje podataka

Radarsko prikupljanje podataka metoda je koja koristi najmanje dvije ili više sintetičkih antena za generiranje visina. Razlika između emitirane i povratne elektromagnetske energije od satelita ili aviona do određenog objekta na Zemljinoj površini rezultira visinskim vrijednostima. Ovo je jedinstvena metoda prikupljanja podataka, obzirom da joj se točnost mjeri u milimetrima (Richards, 2007). Važna uloga i široka primjena očituje se u proučavanju tektonskih procesa, glaciologiji, praćenju slijeganja zemljišta, potresa, vulkanskoj aktivnosti itd. (Berens, 2006).

### 2.1.5. Metoda vektorizacije s postojećih topografskih karata

Od svih prethodno navedenih metoda, ova metoda ima najmanju točnost. Karakterizira ju dugotrajan proces skeniranja analognih karata, georeferenciranje, vektorizacija izohipsi te pridruživanje visina.

Metoda prikupljanja	Točnost	Brzina	Cijena	Veličina područja primjene
<b>Vektorizacija</b>				
ručna automatska	niska (m) niska (m)	sporo brzo	visoka niska	sve veličine
<b>Terenska mjerenja</b>				
tahimetrija GNSS	visoka (cm) relativno visoka (cm/m)	vrlo sporo sporo	vrlo visoka relativno visoka	mala
<b>Fotogrametrijska</b>				
zračna satelitska	srednja do visoka (cm/m) niska do srednja (m)	brzo vrlo brzo	relativno niska niska	srednja/velika velika
<b>Radarske</b>				
	niska do vrlo niska (m/10 m)	vrlo brzo	niska	velika
<b>LiDAR</b>				
	visoka (cm)	brzo	visoka	srednja/velika

Slika 4 Usporedba različitih metoda prikupljanja podataka za digitalno modeliranje terena (Li i dr. 2005).

### 2.2. Metode izrade DMR-a

Izrada i korištenje digitalnog modela reljefa zahtjeva upotrebu specijaliziranih računalnih programa. Takvi programi sadrže tri osnovna dijela, a to su (Murai i dr., 1992):

- unos podataka - terenska izmjera, stereo snimke i digitalizirani zemljovid
- obradu i analizu podataka (izrada DMR-a, povezivanje DMR-a i baze podataka, analiza modela) i
- prikaz podataka (3D oblik - ptičja perspektiva, animacija izrađenih 3D prikaza).

Izrada DMR-a objedinjuje niz međusobno povezanih postupaka kao što su prikupljanje podataka, upravljanje, interpretacija, vizualizacija i primjena. Temeljni podatci za izradu DMR-a su vrijednosti visina koje se dobiju na jedan od prethodno navedenih načina, odnosno metoda. Točnost digitalnog modela reljefa ovisi o količini i izboru točaka na

osnovu kojih je izrađen, nadalje o načinu izbora točaka za interpolaciju te o metodi izjednačenja (Jergović, 1994).

Metoda prikupljanja podataka određuje se na način da se izmjerom prikupe reprezentativne točke terena koje će izgraditi površinski model aproksimirajući stvarnu površinu. Ovisno o tipu reljefa - ravničarski, brežuljkasti ili brdoviti, teren će diktirati metodu prikupljanja.

Upravljanje podacima za izradu digitalnog modela reljefa obuhvaća uređivanje, filtriranje, spajanje i udruživanje DMR-ova, te pretvaranje iz jedne strukture u drugu (GRID→TIN). Ovaj postupak je neophodan, obzirom da služi za ispravljanje grešaka i aktualizaciju DMR-a.

Postoje tri načina uređenja podataka:

- nepravilna mreža trokuta – TIN (*Triangular Irregular Network*)
- pravilna mreža trokuta – GRID
- istovremeno korištenje pravilne i nepravilne mreže – hibridno.

### 2.2.1. Struktura digitalnog modela reljefa

Nakon definiranja topoloških odnosa te odabira metode interpolacije kojom će se na temelju izmjerenih vrijednosti što vjernije aproksimirati teren potrebno je odabrati strukturu rezultirajućeg modela koji će se kreirati na osnovu prikupljenog skupa podataka.

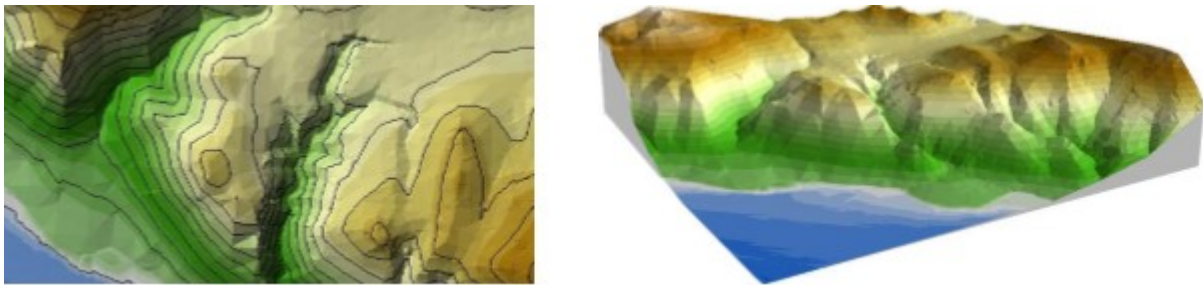
Strukture digitalnih modela najčešće su podijeljene na dvije, prethodno navedene skupine – TIN i GRID, a često se koristi i njihova kombinacija pa se takvo uređenje podataka naziva HIBRIDNO.

#### 2.2.1.1. TIN - nepravilna mreža trokuta

Vektorski model podataka predstavlja pojednostavljeni prikaz reljefa pomoću točaka, linija i poligona. Neke od prednosti vektorskih oblika podataka su precizniji prikaz određenih reljefnih objekata, geometrijska preciznost, mogućnost primjene mrežne topologije, manji obujam podataka, brži pristup podacima te primjenjivost za prikaz prostorno diskretiziranih objekata i dr., a glavne nedostatke metode čine neizgladene površine i loša ekstrapolacija (Šiljeg, A., 2013).

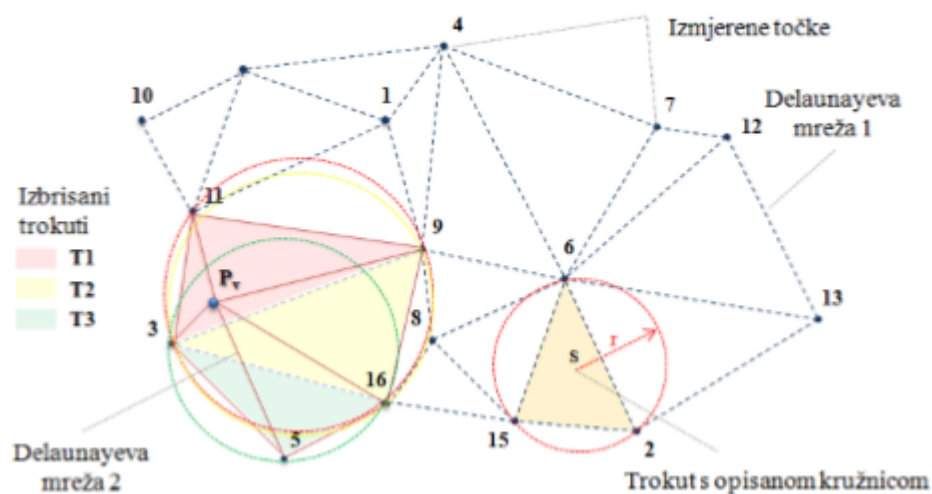
TIN struktura digitalnog modela (vektorska) predstavlja mrežu koja se sastoji od niza trokutastih ravnina koje su dobivene spajanjem susjednih točaka. Najčešća metoda za dobivanje ovakvih trokutastih ravnina jest Delaunayeva triangulacija - metoda koja se temelji na pravilu da kružnica prolazi kroz tri vrha Delaunayeva trokuta, a da pritom ne uključuje niti jednu drugu točku (Weibel i Heller, 1991). Svi uzorci točaka su povezani nizom trokuta (Watson, 1992), a svaki trokut (ABC) za koji vrijedi pravilo da se svi uzorci točaka, osim A, B i C, nalaze izvan opisane kružnice trokuta ABC (slika 5), čini ravninu omeđenu trima linijama i točkama (Gjuranić, 2007). TIN podrazumijeva eksplicitno definiranje topologije točnije

upotrebu bridova i čvorova za utvrđivanje prostornih odnosa između pojedinih trokuta u mreži (Geodetski list, 2019).



Slika 5 Prikaz reljefa korištenjem TIN metode (Šiljeg, A., 2013)

Obzirom da u izradu ovakvog tipa modela ulaze svi podaci on se vrlo lako može prilagoditi kompleksnosti reljefa. Na područjima gdje je mnogo visinskih promjena prilagođava se s više točaka i manje točaka na području ravničarskog tipa terena. Svakoj točki potrebno je poznavati (x, y) koordinate i njihove visine (h), čime se povećava količina podataka koju moramo pohraniti u računalo. TIN je metoda široke primjene, međutim većina autora naglašava brojne nedostatke, osobito kada je razmak između izmjerenih točaka velik (Franke, 1982; Burrough i McDonnell, 1998; Mitas i Mitasova, 1999). Velika količina podataka također čini jednu od mana ovog modela. Prikaz ovog modela temelji se na točkama koje su međusobno povezane linijama tvoreći tako trokute. Svaki trokut predstavlja ravninu određenog nagiba. Površina je kontinuirana obzirom da je svaka trokutna površina definirana koordinatama i visinama točaka na vrhovima (Sučić, Z., 2014). Razvojem tehnologija za prikupljanje visinskih podataka velike gustoće (aero i terestričke laserske tehnologije) TIN metoda pokazuje se kao optimalna (Ali, 2004).



Slika 6 Princip Delaunayeve triangulacije (Izvor: Šiljeg, A., 2013)

### 2.2.1.2. GRID – pravilna mreža

Rasterski model podataka pojednostavljeni je prikaz reljefa pomoću piksela. Određen je prostornom rezolucijom i veličinom rastera (broj redaka i stupaca). Piksela, element mreže, predstavlja osnovni prostorni entitet u rasterski orijentiranom GIS-u (Hengel, 2006). Svaki piksel definiran je retkom i stupcem unutar mreže (GRID-a) određene veličine. Iako u praksi ne postoji razlika između njih, geoinformatičari definiraju piksel kao pojam vezan za tehnologiju, a element ćelije (GRID) vežu uz pojam model (Hengel, 2006). Često se uz ove pojmove u literaturi kao istoznačnica koristi pojam prostorna rezolucija (Tankagi, 1996; Takagi i dr., 2002; Bamber i dr., 2009).

GRID predstavlja pravokutnu (pravilnu) mrežu četverokuta, gdje je poznavanje položajnih koordinata (y, x) potrebno znati samo za početne točke, dok je za ostale točke dovoljno poznavati samo visine (h ili z) (Sučić, Z., 2014). Veličina z može predstavljati nadmorsku visinu neke točke, ali također može i pobliže označavati neku značajku u toj točki, primjerice vegetacijsku, pedološku ili ekološku. Tako uređeni podaci imaju jednostavnu topologiju pa je njihovo prikazivanje je vrlo jednostavno. Navedene osobine omogućavaju obradu vrlo velikih digitalnih modela reljefa (Pernar, R., 1996).

Obzirom na svoju jednostavnost, GRID je najkorištenija struktura tijekom nekoliko prošlih desetljeća (Wilson i Gallant, 2000). Karakterizira ju mogućnost optimalnijeg modeliranja kao i rad s ploham, odnosno kontinuiranim objektima. Upravo zbog navedenih osobina, većina digitalnih modela reljefa temelji se na rasterskim oblicima podataka.

Nedostatci ove metode ogledaju se u (Zevenbergen i Thorne 1987; Moore i dr., 1991, Weibel i Heller, 1991; Willson i Gallant, 2000):

- podatkovnoj veličini mreže koja je bez obzira na razvoj tehnologije u smjeru komprimiranja i brzine geoprocesiranja podataka, često zahtjevna za pohranu
- računalnoj učinkovitosti u smislu vremenskog trajanja procesa geoprocesiranja nekih od reljefnih parametara te
- kvaliteti izlaznih podataka jer se mrežom teško mogu prikazati nagle promjene visine i često se zanemaruju važni detalji reljefa.

Različiti dijelove Zemlje u današnje vrijeme imaju dostupne digitalne modele reljefa različite veličine pravilne mreže (piksela): 500, 100, 30, 10, 1 metar (Šiljeg, A., 2013).

Struktura podataka	Prednosti	Mane
GRID	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednostavna integracija s rasterskim bazama podataka</li> <li>• prirodni izgled elemenata reljefa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• neučinkovito uzimanje uzoraka mjerenja (točaka) ovisno o promjeni kompleksnosti terena (redundancija podataka)</li> <li>• nemogućnost upotrebe mreže različitih veličina kako bi se točnije prikazao kompleksniji teren</li> <li>• rijetko se unutar uzorka mjerenja nalazi najviša ili najniža točka terena (izgube se unutar ćelija pravilne mreže)</li> </ul>
TIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• prikaz reljefa u različitim rezolucijama (razina detalja)</li> <li>• može uključivati najvišu/najnižu točku terena neovisno o gustoći uzoraka mjerenja</li> <li>• dopušta gušće uzimanje uzoraka mjerenja na određenim segmentima ovisno o kompleksnosti terena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• često zahtijeva vizualni pregled i kontrolu mreže te njeno uređivanje</li> <li>• zahtijeva više vremena za obradu i upotrebu (kompleksna struktura)</li> <li>• veći memorijski zahtjevi</li> </ul>

Slika 7 Prednosti i mane GRID i TIN strukture digitalnog modela (Izvor: El-Sheimy i dr. 2005).

### 2.2.1.3. HIBRDNO uređenje podataka

Hibridno ili kombinirano uređenje podataka sastoji se od pravilne mreže trokuta, nedovoljne za vjeran prikaz terena kojoj radi upotpunjavanja dodaju dodatne karakteristične točke i linije na područjima složenih geomorfoloških oblika. Pri tom postupku obrade podataka koriste se prednosti TIN-a, koje se očituju u boljem uklapanju mreže u složene geomorfološke značajke, a zadržavaju prednosti GRID-a, pri obradi i analizi velikog broja podataka, kao i izmjeni i dopuni podataka (Pernar, R., 1996).



Slika 8 Osnovne strukture za predstavljanje površina u digitalnom obliku (Izvor: Šiljeg, A., 2013)

Ne postoji idealna metoda prikupljanja podataka s kojom se može prikazati kompleksnost Zemljine površine pa stoga ne postoji niti idealni digitalni model reljefa. Uvijek postoje problemi s odabirom metode prikupljanja točaka i metode interpolacije površina između tih točaka. Kvaliteta DMR-a obično se izražava mjerom horizontalne i vertikalne točnosti (Li i dr. 2005). Pogreške, koje mogu biti slučajne, sustavne ili grube, dijele na pogreške nastale

odabirom strukture digitalnog modela, aproksimacijom prostora, te interpolacijom i filtriranjem digitalnog modela, obradom i upotrebom različitih skupova podataka, metodama za računanje primarnih i sekundarnih parametara reljefa te parametrima za određivanje smjera vodenih tokova. Primarni parametri reljefa uključuju nagib, ekspoziciju, zakrivljenost, vidljivost i dr., a sekundarni raspodjelu tla, solarnu energiju i temperaturu površine (Wilson 2018). Kvaliteta fotogrametrijskih digitalnih modela ovisi o prostornoj rezoluciji ulaznih snimki koja posredno utječe na generalizaciju objekata na Zemljinoj površini.

Razumijevanjem nastanka i utjecaja navedenih pogrešaka omogućuje nam kontrolu kvalitete i bolju interpretaciju dobivenih rezultata (Li i dr. 2005).

Interpolacija je postupak kojim se računaju nove vrijednosti koje se nalaze između dviju ili više već poznatih vrijednosti (Malvić, 2008). Jedna od ključnih sastavnica obrade i analize podataka u GIS-u, a predmet je proučavanja statistike i geostatistike (Yang, 2009). Ona predstavlja proces determinističke ili geostatističke procjene vrijednosti neuzorkovanih područja na temelju skupa izmjerenih vrijednosti s poznatim koordinatama, kako bi se dobile kontinuirane površine s nizom vrijednosti (Šiljeg, A., 2013). Iznos interpolacije nikada ne prelazi interval određen točkama između kojih se računa, a dobivene vrijednosti svrstavaju se u područje mogućega (Malvić, 2008).

Pojam koji se često veže uz interpolaciju, a odnosi na predviđanje vrijednosti određene varijable na mjestima izvan područja obuhvaćenog izmjerom, naziva se ekstrapolacija (Burrough i McDonnell, 1998). Rezultati ove metode nisu sigurni te se svrstavaju u područje pretpostavljenoga.

Većina interpolacijskih metoda temelji se na prvom zakonu geografije (Toblerovom pravilu, 1970): sve je povezano sa svime, međutim točke koje su bliže jedna drugoj su povezanije.

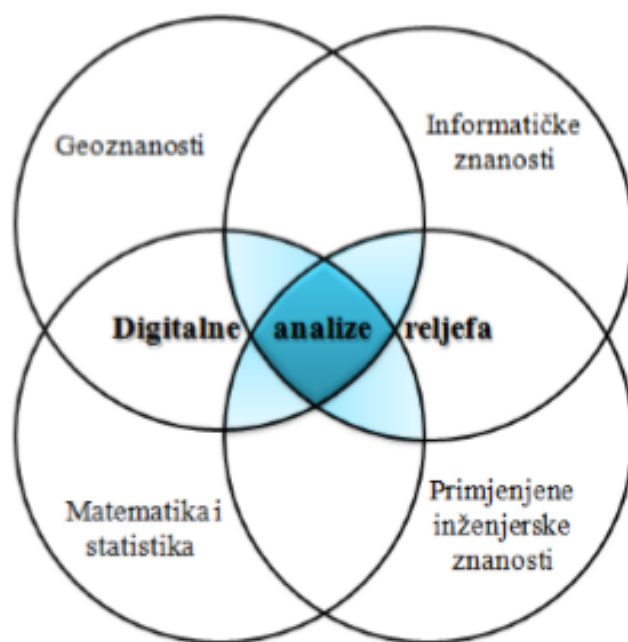
Postoji više načina klasifikacije interpolacijskih metoda, a najčešća podjela je na lokalne i globalne, geostatističke i determinističke, točne i približne metode (Šiljeg, A., 2013).

### 2.3. Digitalne analize reljefa

Digitalna geomorfometrija<sup>1</sup>, proces je poznatiji pod nazivom kvantitativna analiza refelja (Pike, 1995; Pike, 2000), a predstavlja digitalnu analizu reljefa (Wilson i Gallant, 2000; Hengel, 2003) (*digital terrain analysis – DTA*) ili digitalno modeliranje reljefa (Moore i dr., 1991; Weibel i Heller, 1993; Li i dr., 2005) (*digital terrain modeling – DTM*). Ovaj proces kombinira elemente iz nekoliko znanstvenih područja kao što su geoznanosti, primijenjene inženjerske znanosti, matematika i statistika te informatičke znanosti (Pike, 1995) (Slika 9).

---

<sup>1</sup> Iako su početci razvoja geomorfometrije, kao znanstvene discipline, vezani za 19. stoljeće i rad Alexandera von Humbolta i Carla Rittera (Pike, 2002), rapidni razvoj discipline dogodio se u posljednjih 35 godina zahvaljujući napretku računalne tehnologije i masovne proizvodnje DMR (Pike, 1995; Pike 2000).



*Slika 9 Položaj DAR-a u drugim znanostima (Izvor: Pike, 1995)*

Digitalno modeliranje reljefa prema Li i dr. (2005) predstavlja postupak koji uključuje izradu i analizu digitalnog modela reljefa čija je osnova proces matematičkog modeliranja. Takvo modeliranje karakteriziraju točke koje predstavljaju uzorke reljefa koje služe za modeliranje i imaju specifičnu točnost, gustoću i raspodjelu (Šiljeg, A., 2013).

Kvantitativni podaci o reljefu – visine, nagib, izloženost i dr. dobivaju se interpolacijskim i analitičkim metodama.

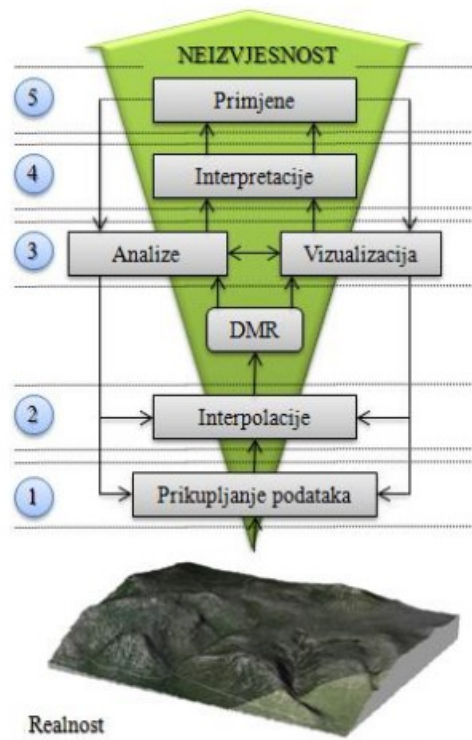
Digitalno modeliranje reljefa može se podijeliti na pet faza, a to su: prikupljanje podataka, interpolacija, analiza i vizualizacija, interpretacija i na kraju primjena. Proces prikupljanja podataka uključuje prikupljanje visinskih podataka pomoću različitih metoda i tehnika kao i manipulaciju podacima u obliku ispravljanja, filtriranja i spajanja. Faza interpolacije uključuje odabir najprikladnije metode za ovaj postupak, kao i njezinu primjenu, te odabir ispravne prostorne rezolucije. Korištenje skupa metoda i tehnika za izvođenje morfometrijskih parametara iz izrađenog DMR-a karakterizira fazu analize i vizualizacije, a izdvajanje upotrebljivih informacija o odabranim morfometrijskim parametarima upotrebom različitih metoda fazu interpretacije. Na kraju postupka digitalnog modeliranja dolazi i sama primjena koja uključuje razvoj odgovarajućih aplikacija za specifične svrhe (Šiljeg, A., 2013).

Obzirom na činjenicu da većina znanstvenika koristi gotove modele za koje nisu potrebne prva i druga faza digitalnog modeliranja reljefa, iz praktičnih razloga uvodi se novi pojam – digitalna analiza reljefa (Hengel i dr., 2003).



Digitalna analiza reljefa obuhvaća skup metoda i tehnika koje se koriste za izvođenje morfometrijskih parametara ili varijabli (Shary i dr., 2002), topografskih atributa (Wilson i Gallant, 2000) ili općenitih informacija o terenu na temelju DMR-a. Digitalni model reljefa koristi se za vizualnu i matematičku analizu topografije, krajobraza, reljefnih oblika i hidrografske mreže, kao i za modeliranje površinskih procesa (Dikau i dr., 1995; Giles, 1998; Bishop i Shroder 2000; Millaresis i Argialas, 2000; Tucker i dr., 2001). Postoji nekoliko važnih čimbenika koji utječu na izlazne rezultate analize reljefa, a to su (Florinsky, 1998; Thompson i dr., 2001):

- vertikalna raščlanjenost reljefa
- gustoća uzoraka
- veličina piksela
- metode interpolacije
- vertikalna rezolucija i
- algoritmi digitalne analize reljefa.



Slika 10 Faze digitalnog modeliranja reljefa  
(Izvor: Weibel i Heller, 1991; Hutchinson i Gallant, 2000; Oksanen, 2006)

### 2.3.1. Geomorfološki parametri

Grupiranje digitalnih geomorfoloških parametara najčešće se prikazuje kao podjela na primarne i sekundarne ili lokalne i globalne (Wilson i Galant, 2000; Shary i dr., 2002; Olaya,

2009). Osim navedene podjele, parametri se mogu grupirati i u sljedeće tri skupine (Hengel i dr., 2003):

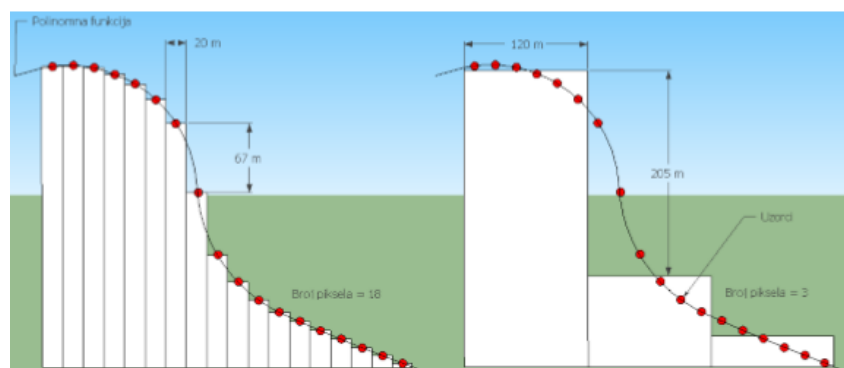
- morfometrijski
- klimatološki i
- hidrološki.

Morfometrijski ili primarni parametri definiraju morfologiju terena, odnosno nagib, ekspoziciju, hipsometriju i zakrivljenost padina. Hidrološki parametri upućuju na potencijalni rizik od denudacijskih i erozijskih procesa, a klimatološki parametri predstavljaju varijable na koje utječe faktor reljefa, npr. difuzna, direktna i ukupna radijacija. Klimatološki su parametri najzahtjevniji za izradu jer najčešće nastaju kombinacijom više parametara (Šiljeg, A., 2013).

### 2.3.1.1. Morfometrijski parametri

#### 2.3.1.1.1. Vertikalna raščlanjenost

Vertikalna raščlanjenost morfometrijski je parametar reljefa koji predstavlja visinsku razliku između najniže i najviše točke unutar nekog promatranog područja (Lozić, 1995). Predstavlja važan geomorfološki čimbenik neophodan za razumijevanje strukturnih i funkcionalnih značajki okoliša i upravljanje istim (Nellemann i Fry, 1995). Obzirom da utječe na heterogenost i raznolikost unutar različitih staništa ili ekosustava na maloj udaljenosti, važan je čimbenik u različitim znanstvenim disciplinama (Hoechstetter i dr., 2008) i jedan od najvažnijih ekoloških čimbenika u upravljanju ekosustavima s različitih aspekata (Nellemann i Fry, 1995). Koristi se u modeliranju lavina (Margreth i Funk, 1999), odrona stijena (Dorren i Heuvelink, 2004) i poplava (Govers i dr., 2000). Opsežnost analiziranja ovog parametra može se provesti na tri razine: (Halaus i Hofle, 2010; 2011): mikro (centimetarska preciznost), mezo (metarska) i makro (kilometarska) razini. Ne postoji univerzalna metoda ili algoritam za izračun vertikalne raščlanjenosti. Ona ovisi o prostornoj rezoluciji i korištenoj pokretnoj mreži (Šiljeg, A., 2013).



Slika 11 Utjecaj prostorne rezolucije na izlazne rezultate indeksa vertikalne raščlanjenosti (Izvor: Šiljeg, A., 2013)

Tablica 1 Tipovi i prostorni obuhvat indeksa vertikalne raščlanjenosti (Izvor: Šiljeg, A., 2013)

	1*1 km <sup>2</sup> (Riley)	20*20 m <sup>2</sup> (Riley)	20*20 m <sup>2</sup> (Jenks)
Zaravnjeno	0-80	0-1,6	0-5,5
Gotovo zaravnjeno	81-116	1,601-2,32	5,501-17,5
Blago raščlanjeno	117-161	2,321-3,22	17,501-32
Srednje raščlanjeno	162-239	3,221-4,78	32,01-49
Prilično raščlanjen	240-497	4,781-9,94	49,01-67,5
Jako raščlanjeno	498-958	9,941-19,16	67,501-86,5
Izrazito jako raščlanjeno	959-4367	19,161-127,48	86,501-127,5

### 2.3.1.1.2. Nagib terena

Najvažniji morfometrijski parametar za analiziranje i opisivanje reljefa je nagib. Njegova analiza ima široku primjenu u hidrološkom modeliranju (Band, 1986; Moore i dr., 1991; Jenson, 1991; Tarboton, 1997; Yang i dr., 2002), analizama odrona i klizišta (Duan i Grant, 2000), studijama denudacije i erozije (Dietrich i dr., 1993; Desmet i Govers, 1996a; Mitasova i dr., 1996; Biesemans i dr., 2000) kao i u planiranju korištenja zemljišta (Desmet, Govers, 1996b; Stephen i Irvin, 2000).

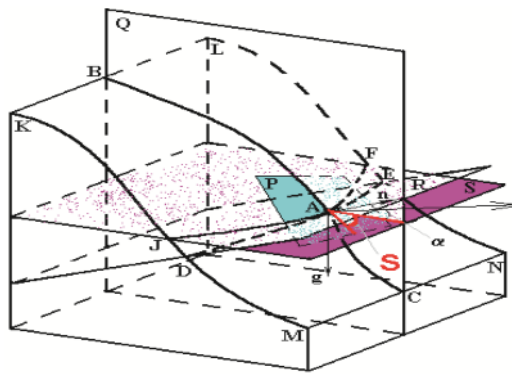
Tablica 2 Geomorfološka klasifikacija nagiba<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> 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.)

DMR za računanje nagiba temelji se na rasterskoj strukturi podataka. Različiti su modeli i algoritmi za računanje nagiba pomoću visinskih podataka, a njihova točnost provjerena je primjenom različitih metoda (Hodgson, 1995; Florinsky, 1998; Jones, 1998; Zhou i Liu, 2004). GIS softveri za izračun nagiba imaju integrirane različite algoritme. Neki od njih su SAGA, ArcGIS, QGIS, GRASS (Šiljeg, A., 2013).

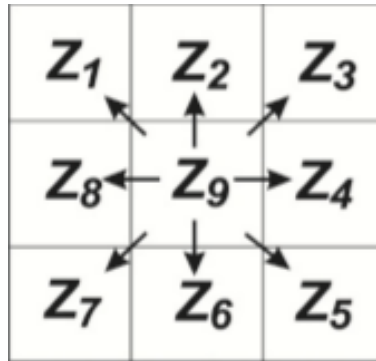
Nagib se može definirati gradijentom, odnosno vektorom koji pokazuje smjer najvećeg rasta skalarne funkcije  $z = f(x, y)$ , kao i intenzitetom promjene visine u smjeru najvećeg nagiba. Nagib terena u točki definiran je kao kut mjeran u okomitoj ravnini koja dodiruje tangencijalnu ravninu na površinu terena u danoj točki s horizontalnom ravninom u istoj točki (Slika 12) (Borisov M. i dr.: „Vizualizacija 3D modela geopodataka i njihova primena“).



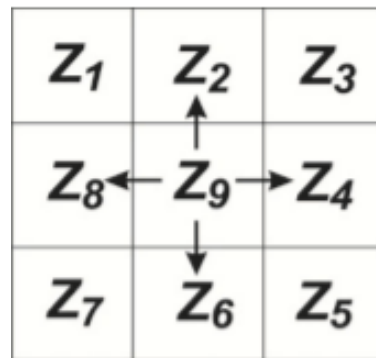
Slika 12 Računanje kuta nagiba (Izvor: Borisov M. i dr.)

Obzirom da je Zemljina površina pretežito oblikovana padinama i strminama kutovi nagiba predstavljaju i utječu na gravitacijske sile koje pokreću mnoge geomorfološke procese. Nagib terena, između ostaloga, ovisi o brzini otjecanja površinskih voda, zasićenosti tla vlagom, intenzitetu geomorfoloških procesa i sl. Pri izračunu nagiba terena treba imati na umu sljedeće činjenice: veća rezolucija DMR-a rezultira većom točnošću izračunatih nagiba terena, srednja vrijednost i disperzija izračunatih nagiba opadaju s povećanjem udaljenosti (dimenzija mrežnih ćelija) DMR-a, utjecaj rezolucije DMR-a očitiji je duž karakterističnih reljefa (doline, grebeni) te utjecaj nesigurnosti DMR-a puno je veći na točnost izračunatih nagiba nego na točnost interpoliranih visina.

Kod TIN-a kut nagiba predstavlja maksimalnu količinu promjene nagiba duž svakog trokuta, a kod GRID-a postoji nekoliko načina za izračunavanje kuta nagiba na temelju svake GRID ćelije i njenih osam susjednih ćelija. Kod određivanja nagiba pomoću GRID-a ulaz predstavlja ulazni raster površine terena, a kao rezultat dobivamo raster koji sadrži izračun nagiba svake ćelije ulaznog rastera. Prilikom izračunavanja kuta nagiba pomoću TIN-a, izračunava se nagib preko svakog trokuta, a kao izlaz se također dobiva raster. Manja vrijednost izračunatog nagiba, bilo da je TIN ili GRID, označava ravniji teren, a veća vrijednost nagiba označava strmiji teren. Ako je DMR oblikovan u obliku mreže (GRID), postoji nekoliko načina za izračunavanje kuta nagiba – metoda kraljice, metoda topa i metoda maksimalnog gradijenta (Borisov M. i dr.: „Vizualizacija 3D modela geopodataka i njihova primena“).

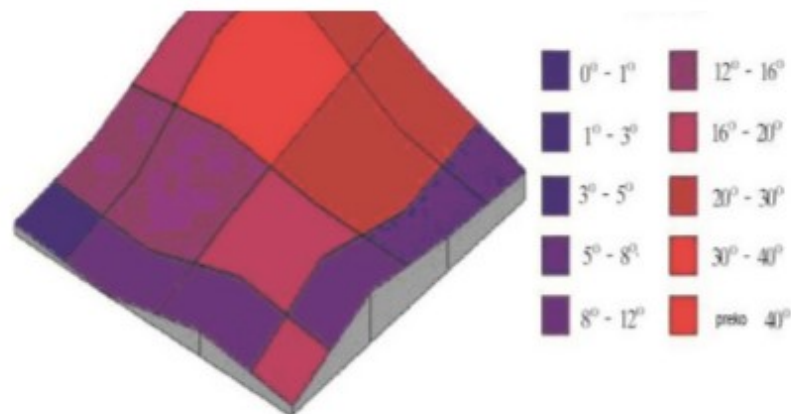


Slika 13 Metoda kraljice (Izvor: Borisov M. i dr.)



Slika 14 Metoda topa (Izvor: Borisov M. i dr.)

Kut nagiba terena od velike je važnosti u određivanju predispozicije određenog područja za razvoj različitih procesa u prirodnom okolišu, a posebno je važan za provedbu ljudskih aktivnosti. Nagib terena se također može izraziti u stupnjevima (Slika 15). Radi lakše analize i sagledavanja potencijalnih mogućnosti razvoja geoprostora, napravljena je opća klasifikacija terena ovisno o veličini nagiba padine. Razvoj znanosti i tehnologije omogućio je obavljanje određenih ljudskih djelatnosti u daleko nepovoljnijim reljefnim uvjetima. Međutim, nagib terena ostaje neizbježan prirodni element koji ima veliki utjecaj na razvoj poljoprivrede, turizma, naseljavanje pojedinih područja i dr. (Borisov M. i dr.: „Vizualizacija 3D modela geopodataka i njihova primena“).



Slika 15 Nagib terena izražen u (°) (Izvor: Borisov M. i dr.)

Tablica 3 Opća klasifikacija terena ovisno o veličini kuta nagiba terena (Izvor: Borisov M. i dr.)

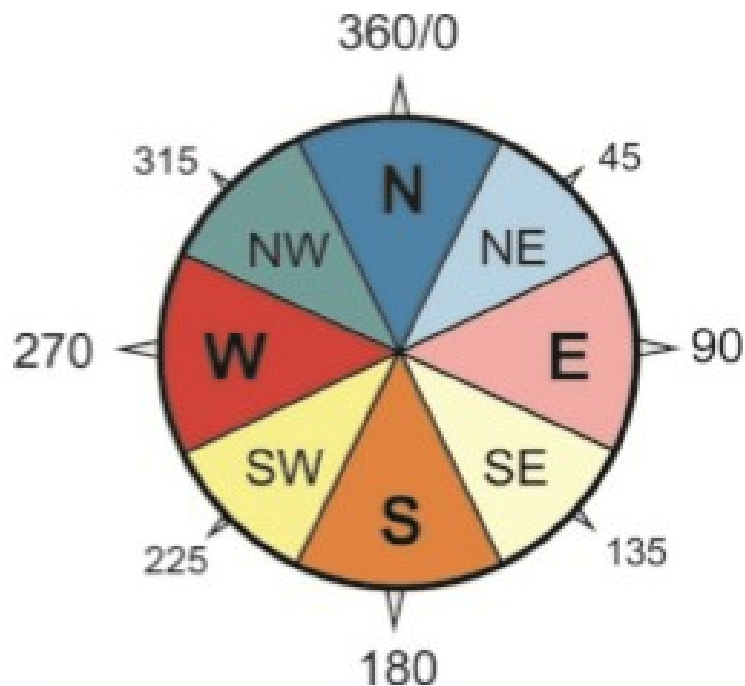
Kut nagiba (°)	Vrsta terena ovisno o kutu nagiba
do 1°	Ravan teren
1° – 3°	Vrlo blago nagnut teren
3° – 5°	Blago nagnut teren
5° – 8°	Prilično nagnut teren
8° – 12°	Iskošen teren
12° – 16°	Vrlo iskošen teren
16° – 20°	Umjereno strm teren
20° – 30°	Srednje strm teren
30° – 40°	Jako strm teren
preko 40°	

### 2.3.1.1.3. Izloženost terena

Izloženost, odnosno ekspozicija (eng. *aspect*) terena, najčešće je korištena varijabla u morfometrijskim analizama. Ona predstavlja orijentaciju linije najvećeg nagiba za promatranu točku, odnosno orijentaciju padine s obzirom na strane svijeta. Definira se kao orijentacijski kut (azimut) pravca najvećeg nagiba terena pri čemu se kut određuje najčešće od pravca sjevera u smjeru kazaljke na satu.

Ovaj topografski parametar posebno je važan u hidrologiji, inženjerstvu zaštite okoliša i agronomiji. Određuje smjer otjecanja površinskih voda i vrlo je važan pri izradi modela insolacije terena. Također utječe na sadržaj vlage u tlu, isparavanje, kao i na zastupljenost biljnih vrsta. Danas je ekspozicija terena vrlo važan prirodni čimbenik, čije proučavanje u novije vrijeme dobiva sve više na značaju kada govorimo o ocjeni morfometrijskih karakteristika terena.

Naime, ekspozicija terena predstavlja orijentaciju nagiba terena u odnosu na strane svijeta. Izloženost u DMR-u izračunava se za svaki trokut u TIN-u ili za svaku ćeliju mreže u slučaju GRID-a. Ekspozicija terena može imati vrijednosti od 0° (smjer sjever) – 360° (opet smjer sjever), što se može vidjeti na slici 16. Vrijednost svake ćelije ekspozicije GRID-a označava orijentaciju površine terena ovisno o kutu nagiba. Ako je teren ravan, to znači da nije izložen i njegova vrijednost se uzima kao (-1) (Šiljeg, A., 2013; Borisov M. i dr.).



*Slika 16 Predložak za određivanje izloženosti terena (Borisov M. i dr.)*

Značaj izloženosti terena očituje se u raznim djelatnostima. Primjerice, pri izradi skijaških staza potrebno je odrediti sjeverne strane padine s optimalnim nagibima. Izračun količine sunčeve energije na lokacijama gdje se način i organizacija života temelje na količini sunčeve energije kao i pronalaženje južno orijentiranih planina gdje, uslijed otapanja snijega, postoji mogućnost od bujica koje bi ugrozile naselja i njihovo stanovništvo također se temelje na poznavanju izloženosti terena (Borisov, M. i dr.).

### **3. CILJ RADA**

Digitalni model reljefa je najjednostavnije rečeno statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa ( u vektorskom ili rasterskom obliku) s nizom poznatih  $x,y,z$  koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Millner i Laflamme, 1958). Digitalni model reljefa predstavlja kvalitetnu podlogu pri analizi i vrednovanju prostora.

U ovom diplomskom radu dan je prikaz neke od primjena digitalnog modela reljefa pri analizi i valorizaciji prostora u Svijetu i Hrvatskoj.



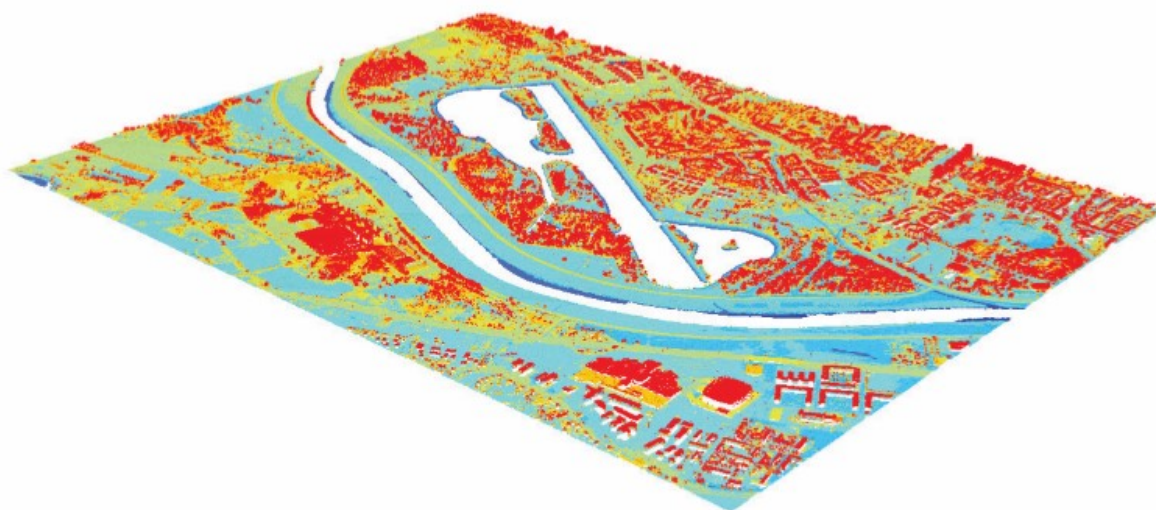
## 4. PRIMJENA DMR-a PRI ANALIZI PROSTORA

### 4.1. Primjena DMR-a pri analizi prostora na području Republike Hrvatske

#### 4.1.1. Jarunsko jezero

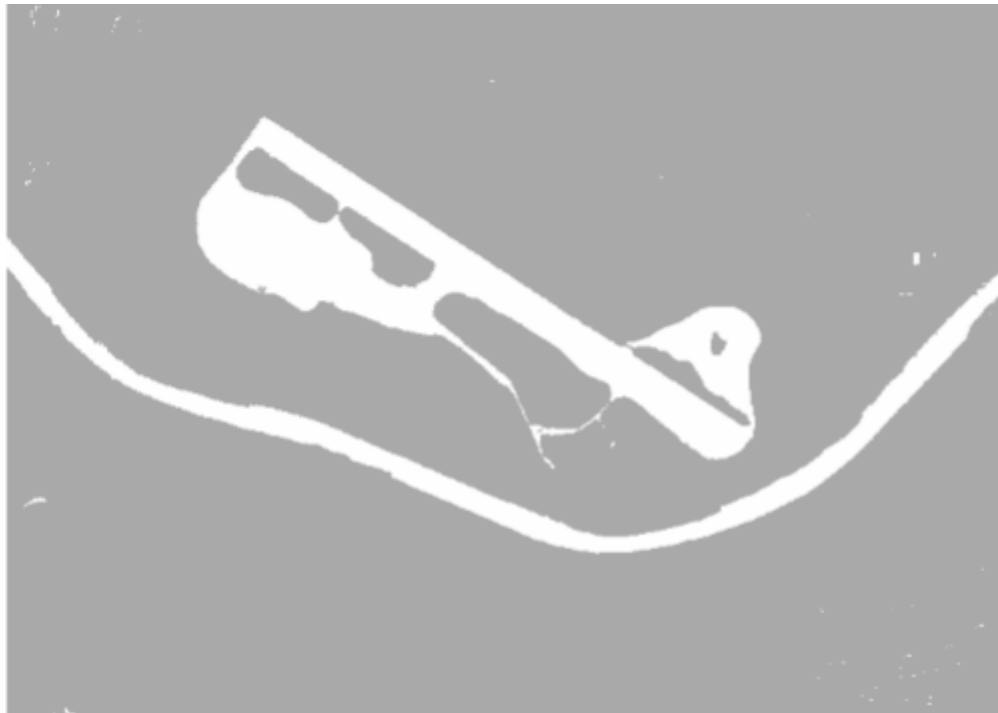
Ivšić, L. i dr. u stručnom članku: „Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka“ predstavljaju rezultate klasifikacije LiDAR podataka koji su prikupljeni na području Jarunskog jezera 2012. godine pri čemu su nastale četiri klase: tlo (*ground*), niska i srednja vegetacija (*low and medium vegetation*), visoka vegetacija (*high vegetation*) i zgrade (*buildings*). Svaka klasa nastala je upotrebom automatske obrade na temelju geometrijskih osobina LiDAR podataka, nakon čega je izvršena reklasifikacija ili popravak točaka. Za postupak klasifikacije korištena su dva softvera čiji su rezultati naknadno analizirani i uspoređeni kako bi se utvrdio optimalni pristup.

Podatci za ovaj članak prikupljeni su 2012. godine. Snimanjem je tada obuhvaćen veći dio područja grada Zagreba i okolice, a za ovaj rad izdvojeno je usko područje jezera Jarun prikazano crvenom bojom na slici 17. Snimanje je provedeno Leica ALS-50 II LiDAR senzorom, a za izvoz prikupljenih podataka i njihovu daljnju obradu korišten ALS Post Processor. Područje obuhvaćeno ovim radom sadrži preko 9 milijuna točaka čija je gustoća 1,49 točaka / m<sup>2</sup>.



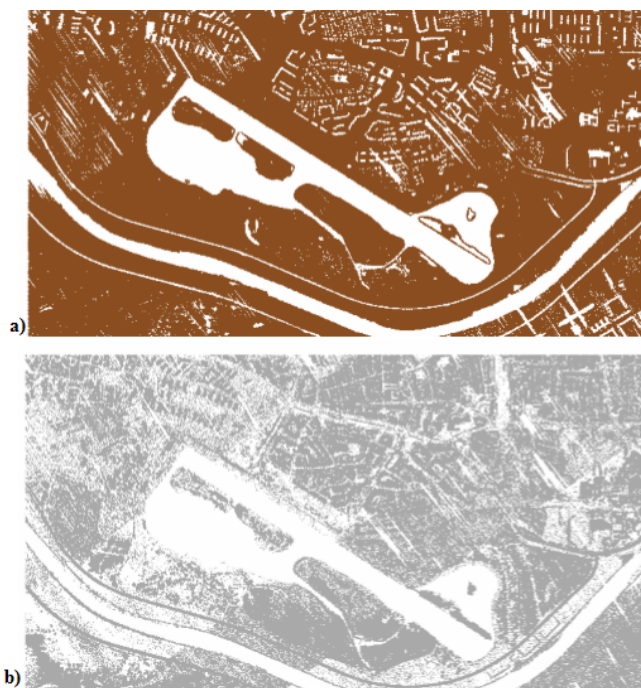
Slika 17 Jezero Jarun (izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")

Postupak klasifikacije razlikuje u detaljima ovisno o kojem se softveru radi. Bez obzira na razlike okvirno se može podijeliti u tri osnovna koraka: automatska klasifikacija točaka tla kojom se stvaraju dvije osnovne klase: tlo (engl. *ground*) i ostale točke (engl. *unclassified*), reklasifikacija točaka unutar nastalih klasa i klasifikacija zgrada, niske i visoke vegetacije. Kvaliteta automatske klasifikacije ovisi o ulaznim parametrima koji se određuju na temelju informacija o području od interesa (nagibi, minimalne i maksimalne visine terena i dr.) te o kompaktnosti algoritma koji softver koristi. Ulazni, odnosno neklasificirani podaci prikazani su na slici 18, a rezultati automatske klasifikacije točaka tla obaju softvera na slici 19 i slici 20.



*Slika 18 Ulazni, neklasificirani podaci (Izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")*

Na slikama 19 i 20 pod a) može se primijetiti kako su razlike algoritma LAsToolsa i Global Mappera izrazito male. Global Mapper neklasificirane točke (engl. *unclassified*) tretira kao iste pri tom ne uzimajući u obzir njihovu visinu, intenzitet i broj povrata prilikom automatskog procesa stvaranja klase dok LAsTools unutar te iste klase stvara razliku i točke unutar same klase grupira s obzirom na njihove karakteristike. Provođenjem ovakve klasifikacije znatno se olakšava daljnja obrada podataka. Oslanjanjem na dane intervale i vizualnim pregledavanjem, moguće je ručno stvoriti ostale klase i to puno brže (niska i srednja vegetacija, visoka vegetacija i zgrade).

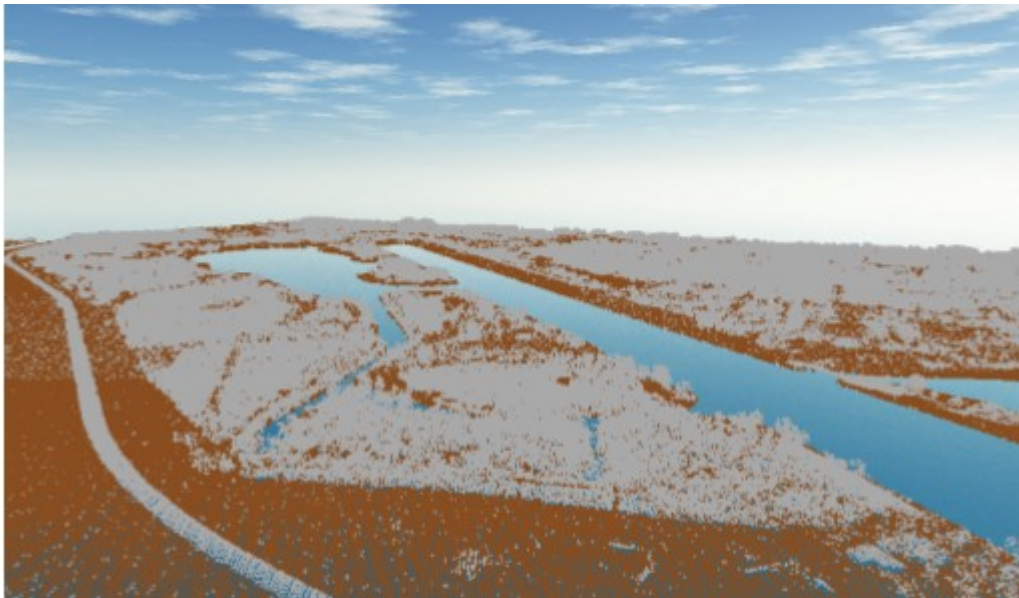


Slika 19 Prikaz klasa dobivenih automatskom klasifikacijom u Global Mapper-u: a) prikaz klase koju čine točke tla; b) prikaz klase neklasificiranih točaka (izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")



Slika 20 Prikaz klasa dobivenih automatskom klasifikacijom LAStools-om: a) prikaz klase koju čine točke tla; b) prikaz klase koju čine sve ostale točke (izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")

Klasifikacija je postupak koji zahtjeva podešavanje parametara ovisno o karakteristikama područja istraživanja u svrhu dobivanja što kvalitetnijih rezultata. Ako je dio područja od interesa znatno drugačiji od ostatka, recimo da ga karakterizira veći nagib, poželjno je izdvojiti ga i zasebno klasificirati s njemu pripadajućim parametrima. Global Mapper omogućava preklapanje oblaka točaka s DOF-om te „bojanje točaka“ koje predstavlja pridodavanje RGB atributa pojedinim točkama. Postupak reklasifikacije točaka terena i ostalih točaka iznad terena provodi se dok se ne dobiju željeni rezultati. Ovaj je korak ključan jer uvjetuje kvalitetu generiranja digitalnih modela terena (engl. Digital Terrain Model - DTM).



*Slika 21 3D prikaz u Global Mapper-u iz kojeg se odmah na lijevom (donjem) dijelu slike može vidjeti kako su točke staze izdvojene od točaka terena (Izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")*

Klasifikacija zgrada i visoke vegetacije temelji se na pretpostavci da se posljednji povrat signala reflektirao od terena i krova zgrade. Uzimajući u obzir da su točke terena već klasificirane, sve preostale točke s tim atributom moguće je automatski smjestiti u klasu zgrade. Nadalje, pretpostavlja se da će vegetacija imati više povrata jer će se signal najprije odbiti od krošnje drveta, pa od grane, pa tek onda od tla. Rezultat stvaranja klase zgrade vidljiv je na slici 22, a čine ju točke koje su posljednje, odnosno prve, reflektirale (od krovove). Obzirom da su u ovu kao i u svaku klasu dospjele neželjene točke potrebno ju je reklasificirati kako bi ih izbacili. Klasa visoke vegetacije sadrži točke koje karakterizira više povrata i na temelju toga je moguće izdvojiti samo te točke i svrstati ih u klasu visoke vegetacije (Slika 23).



Slika 22 Prikaz klase zgrade (Izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")



Slika 23 Klasa vegetacija (Izvor: Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka")

Iz svega navedenog može se zaključiti kako je LiDAR tehnologija uz fotogrametriju, najučinkovitija metoda kada je potrebno prikupiti veliku količinu podataka na velikom području koji će poslužiti za različite studije. Podatci dobiveni ovom metodom koriste u agrikulturi, topografiji, šumarstvu, turizmu, planiranju gradova, izgradnji parkova i dr. Nezaobilazan dio procesa obrade podataka predstavlja klasifikacija koja nije univerzalan postupak jer je direktno uvjetovana karakteristikama interesnog i promatranog područja. Uzimajući to u obzir klasifikacija se provodi postepeno, najprije automatski te potom ručno, vizualnim pregledavanjem područja i reklasifikacijom točaka. Vrijeme klasificiranja pojedine klase ovisi o primjeni. Radi li se o velikom području potrebno ga je podijeliti na veći broj manjih područja i svako klasificirati zasebno.

Na temelju ove studije može se klasificirati cijelo područje grada Zagreba radi izrade kvalitetne i detaljne podloge za izradu 3D modela grada, praćenja geomorfoloških promjena, erozija na području jezera Jarun i generalnog praćenja razvoja vegetacije (Ivšić, L. i dr.: "Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka").

#### 4.1.2. Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero" i "Crno jezero" u Lici

Medak, J. i dr. kroz znanstveni članak „Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero" i "Crno jezero" u Lici“ obradili su florni sastav šuma tog područja te genetsko porijeklo i povijest tih šuma, između ostalog, pomoću digitalnog modela reljefa.

U predjelima šuma "Premužno jezero" i "Crno jezero", na planinskom masivu sjevernog Velebita u Gospodarskoj jedinici "Crno jezero-Markovačke rudine", a na području Šumarije Otočac u Lici, nalaze se šume hrasta lužnjaka. Nazivi predjela preuzeti su iz topografske karte mjerila 1 : 25 000, a u Gospodarskoj osnovi koriste se nazivi "Mala Kosa" i "Sarapine Drage". Lokaliteti su odvojeni, površine 5,10 ha u Crnom jezeru (Mala Kosa) i 14,77 ha u Premužnom jezeru (Sarapine Drage) te prikazani na topografskoj karti mjerila 1:25 000 (Slika 24). Najniže položaje oba predjela zauzimaju pašnjaci, nekada oranice, a na višim položajima nalaze se šume hrasta lužnjaka iznad kojih su šume bukve i jele. Specifičnost položaja lužnjakovih šuma je u tome što se nalaze na tlama između kamenih (vapnenih blokova). Na njih se nastavljaju jelove šume, koje u blizini ovih lokaliteta pridolaze na najnižoj nadmorskoj visini u Lici (oko 480 m).



Slika 24 Topografska karta dijela Like u kojem se nalaze šumski predjeli "Crno jezero" i "Premužno jezero" (Preslika karte mjerila 1 : 25 000) (Izvor: Medak, J. i dr. „Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero" i "Crno jezero" u Lici“)

U vrijeme visokog vodostaja rijeke Like javlja se poplavna voda, najčešće oko 3 m iznad najnižih položaja terena, koja u pravilu zahvaća i lužnjakove šume. Zbog zanimljivosti ove

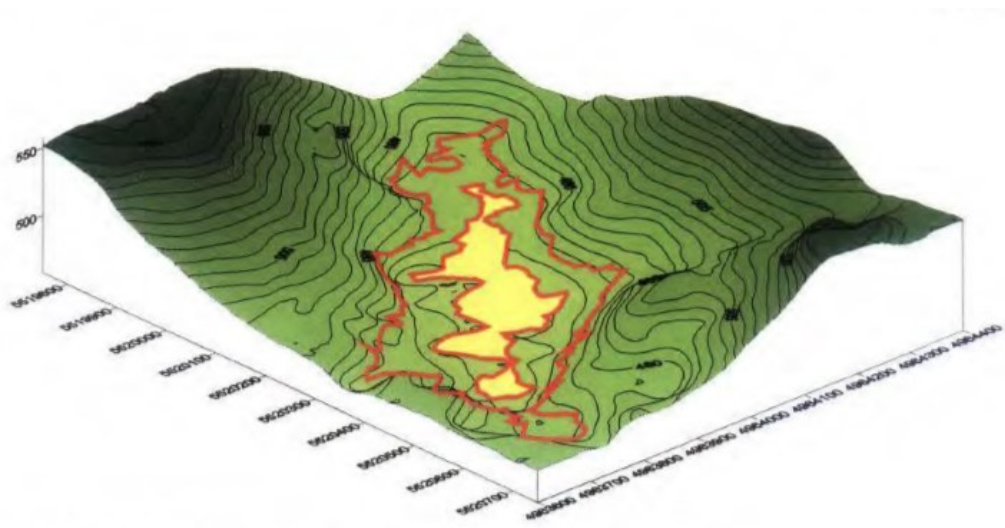
vegetacijske pojave, istraživači Šumarskog instituta Jastrebarsko proveli su 1999. i 2000. godine istraživanja povijesti nastanka tih šuma, analizu reljefnih oblika, hidroloških prilika, utvrđivanje genetskog porijekla hrasta lužnjaka te analizu flornog sastava.

Metoda Braun - Blauquet (Vukelić i Rauš 1998) i druga ranija istraživanja (Pelcer 1972, Rauš i drugi 1992, 1998) poslužila su za analizu flornog sastava šumske zajednice hrasta lužnjaka i zajednice u njenom okruženju.

Digitalizacijom topografskih karata mjerila 1 : 25.000 te mjerenjem graničnih i profilnih točaka metodom globalnog satelitskog pozicioniranja (GPS) izrađen je digitalni model reljefa Premužnoga jezera. Granica lužnjakove šume i livade vektorizirana je digitalizacijom staroga stanja na karti za dobivanje digitalnog modela reljefa istraživanog područja koje je sadržano na dva lista topografske karte. Takav prikaz karte nakon skeniranja zahtjeva spajanje datoteka.

Za digitalizaciju i obradu grafičkog prikaza upotrebljavan je programski paket Surfer. Svakom vrhu kilometarskog kvadrata skenirane topografske karte dodijeljena je jedinična vrijednost koordinata, a nakon toga je naredbom „*digitize*“ izvršena digitalizacija svake slojnice. U datoteke je spremljena pripadajuća visina kao treća koordinata. Za vrijeme izrade svaka datoteka iscrtavana je na podlozi kako bi se prekontrolirala točnost digitalizacije te izbjegla ponovna digitalizacija iste slojnice. Na kraju su sve datoteke spojene u jednu datoteku s tri broja u svakom retku: prva dva broja predstavljaju ravninske koordinate u Gauss-Kruegerovoj projekciji (apscisa y i ordinata x) te nadmorska visina (H). Koordinate se odnose na lokalni Besselov elipsoid, a visine na približnu srednju razinu mora. Dobivena datoteka poslužila je kao ulazni podatak za izradu digitalnog modela reljefa koji je izrađen u obliku pravilnog rastera, odnosno pravilne pravokutne mreže. Vrijednost visina u točkama rastera dobivene su interpolacijom između točaka digitaliziranih slojnica.

Na terenu je izvršeno određivanje koordinata točaka GPS-prijamnikom GeoExplorer tvrtke Trimble. Izmjerena je granica lužnjakove šume s livadom, lužnjakove šume s jelovom šumom te kontrolni visinski profili terena. Izmjereno je ukupno oko 900 točaka. Korištenjem GPS metode dobivaju se trodimenzionalne koordinate u globalnom geodetskom sustavu WGS84, dok se visine odnose na plohu globalnog elipsoida WGS84. Koordinate dobivene digitalizacijom topografske karte i koordinate dobivene GPS mjerenjima ne odnose se na isti sustav. Zbog toga je potrebno izvršiti odgovarajuće transformacije koordinata, tj. uklopiti GPS-koordinate u model topografske karte. Najuočljivija razlika između koordinata s topografske karte (Basselov elipsoid) i GPS-om dobivenih koordinata (WGS84 elipsoid) je u visinskoj komponenti koja se za predmetno područje razlikuje za više od 40 m.



Slika 25 Digitalni trodimenzionalni model reljefa šumskog predjela "Premužno jezero" (Izvor: Medak, J. i dr. „Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero i "Crno jezero" u Lici“)

Digitalni model reljefa "Premužnog jezera" je prikazan trodimenzionalno, odnosno u pogledu odozgo i sa strane na slici 25. Na najnižim položajima je livada, na višim položajima su šume hrasta lužnjaka (između crvenih crta) i na još višim su mezofitne šume jele i termofitne šume crnoga graba (Medak, J. i dr.: „Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero i "Crno jezero" u Lici“).

#### 4.1.3. Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja

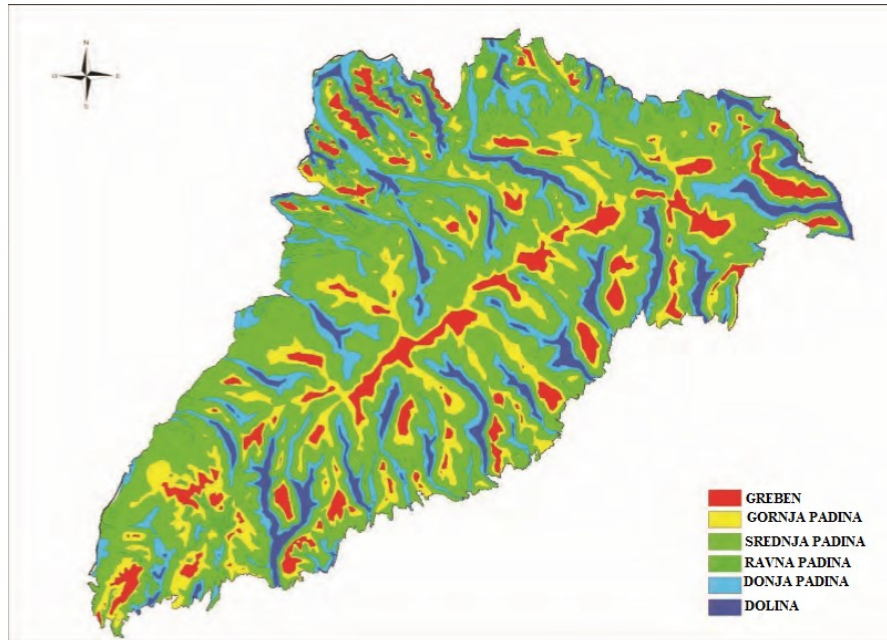
Malić-Limari, S. i dr. u članku „Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja“ ističu da je primjena GIS-a u upravljanju zaštitom prirode opravdana i vrlo učinkovita te omogućuje generiranje i prikupljanje multidisciplinarnih podataka kao i projekcije prostornog modela dobivenog korištenjem tih podataka, pomaže u brzom donošenju odluka te štedi vrijeme i resurse.

Obrada i analiza prostornih podataka za ovaj istraživački rad rađena je u okviru GIS-a. Digitalni elevacijski model prostorne rezolucije 50 metara dobiven je od Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, kao i prostorna distribucija vaskularnih biljaka kartirana na temelju mreže MTB 1/64 (Nikolić i dr. 1998.), te karte vegetacije u mjerilu 1:50000. Karta staništa u mjerilu 1:25000 dobivena je od Parka prirode, a jedna u mjerilu 1:100000 od Državnog zavoda za zaštitu prirode. Svi slojevi karte prostorno su usklađeni koristeći istu osnovnu prostornu jedinicu. Korištena mreža temelji se na srednjoeuropskoj MTB mreži koja je predložena za kartiranje hrvatske flore (Nikolić i sur., 1998).

Digitalni model visina korišten je za izračun vrlo raznolikog reljefa Parka prirode u kasnijim analizama. Oblici reljefa su klasificirani u šest kategorija – dolina, donja padina, ravna



padina, srednja padina, gornja padina i greben (Slika 26). Indeks topografske pozicije (TPI), neophodan za izračun kategorija oblika reljefa, izračunat je korištenjem susjedstva od 1000 metara.



*Slika 26 Karta reljefnih morfoloških cjelina izračunata na temelju 50-metarskog digitalnog modela terena (Izvor: Malić-Limari, S. i dr. „Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja“)*

Svi gornji izračuni napravljeni su korištenjem programa Topographic Position Index za ArcView 3.1 od Jennessa (2006). Sloj izračunatog reljefa preklapan je s drugim tematskim kartama od interesa za analizu preferiranih područja za posjetitelje Parka prirode kao što su livade, rekreacijska mjesta, smještaji za planinare, stari rudnik i dr. Dobiveni rezultati dodatno su analizirani deskriptivnom statistikom, dok su interakcije testirane linearnom regresijom.

Nizom operacija prostornog preklapanja upotrebom GIS-a identificirana su područja sličnih reljefnih i vegetacijskih značajki, poput onih na najposjećenijim dijelovima Parka, sa ciljem planiranja potencijalnog razvoja ponude i u tim dijelovima Parka, što bi moglo dovesti do rasterećenja trenutno najposjećenijih područja. Uporaba GIS-a pokazala se opravdanom i učinkovitom u ove svrhe, te je pokazala funkcionalnost u prikupljanju, kao i generiranju multidisciplinarnih podataka, kao i izradi prostornih modela, doprinoseći brzom donošenju odluka, uz uštedu vremena i sredstava (Malić-Limari, S. i dr.: limari, „Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja“).

#### 4.1.4. Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara

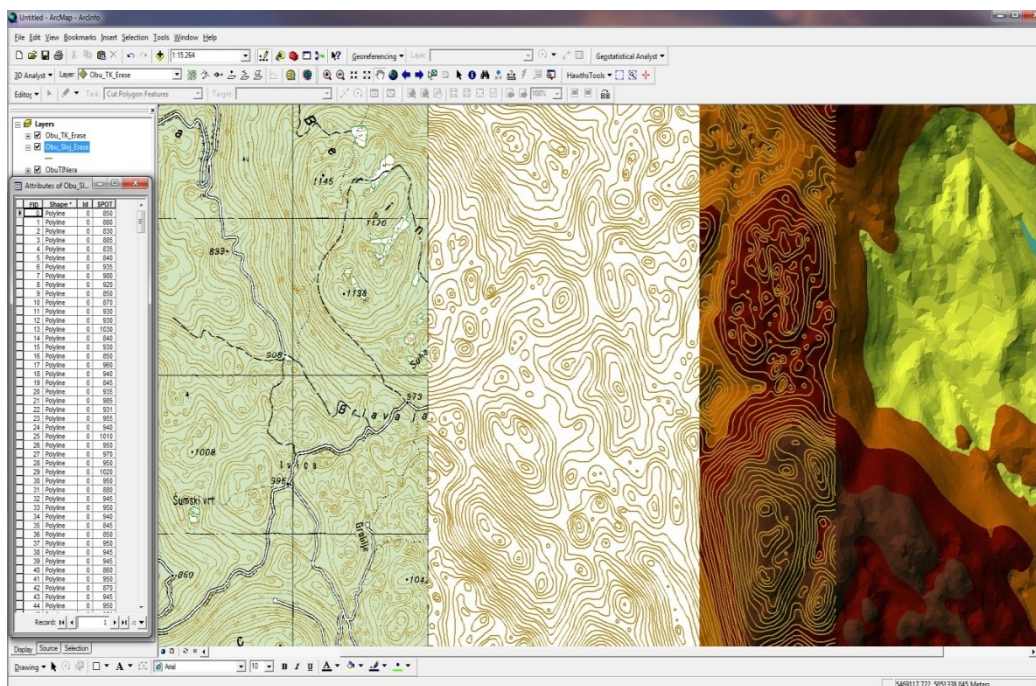
Zvonimir Sučić u svom radu „Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara“ ukazuje na značaj digitalnog modela reljefa (DMR-a) pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom. Obzirom da su sastojine na nekim područjima bile potpuno uništene neophodno je bilo provesti brzu sanaciju kako bi se zaštitilo tlo, plitkog i skeletnog materijala, na velikim nagibima kako ne bi došlo do erozije.



*Slika 27 Područje istraživanja - Gorski Kotar (Izvor: Sučić, Z.: „Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara“)*

Za postizanje cilja bilo je potrebno izraditi digitalni model reljefa za istraživano područje te na temelju njega kreirati nove slojeve (nagibi, ekspozicije, itd.), uklopiti sve izrađene slojeve u jedinstveni GIS - model područja istraživanja, te provesti različite prostorne analize čiji će rezultati biti osnova za provođenje mjera sanacije. Istraživanje za potrebe izrade ovoga rada provedeno je na području Gorskoga kotara, uprava šuma Delnice. Prikupljeni podaci poslužili su za izradu tematskih karata na kojima je prikazan prostorni raspored utvrđenih šteta nastalih od ledoloma.

Za izradu DMR-a korišten je programski paket ArcGIS 9.3. U programu ArcMap je izvršena obrada podataka, a u ArcScene izrađen je 3D model reljefa. Prilikom izrade DMR-a prvo je bilo potrebno provesti skeniranje, odnosno pretvaranje analognih karata u digitalni oblik. Za područje istraživanja skenirane su topografske karte mjerila 1: 25 000 (TK25), koje su nakon toga georeferencirane nakon čega je provedena vektorizacija. Proces pridruživanja koordinata se obavlja softverski, tj. uz sliku (TIF, JPG) postoje datoteke tzv. „world file“ (tfw, jgw) u kojima je zapisan položaj slike u prostoru, a program prilikom učitavanja slike koristi te podatke za njeno smještanje u koordinatni sustav.



Slika 28 Izrada DMR-a istraživanog područja vektoriziranjem slojnica (Izvor: Pernar, R. i dr., 2020: „Važnost daljinskih istraživanja pri procjeni šteta na šumskim sastojinama uzrokovanih velikim prirodnim nepogodama“)

Iz DMR-a raster GIS-modeliranjem dobiveni su slojevi nagiba i izloženosti. Budući da DMR, odnosno nagib terena ima značajnu ulogu za izvođenje različitih radova u šumarstvu, kao npr. u području pridobivanja drva, što je posebno aktualno pri sanaciji šteta od ledoloma, pristupilo se izradi novih slojeva. Kako je na istraživanom području vrlo velika varijabilnost nagiba, koji se pri terenskim izmjerama izražava u kategorijama različitih raspona (npr. 15 - 45 %), nije dovoljno uzimati u obzir prosječni nagib na nekoj površini. Generiranjem novog sloja nagiba iz DMR-a dobiti će se varijabilnost nagiba po prostornim jedinicama gospodarske podjele. Također će se za iste prostorne jedinice dobiti i sloj izloženosti terena.

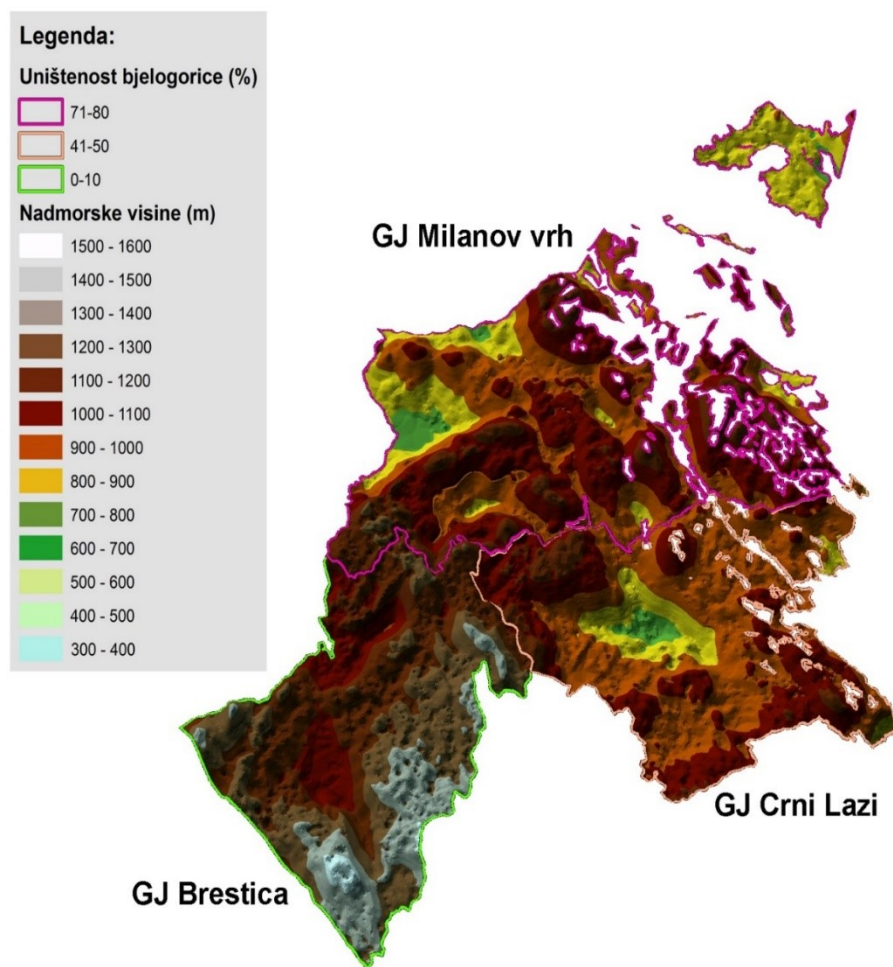
Uklapanjem svih izrađenih tematskih slojeva s već postojećima unutar GIS modela istraživanog područja omogućene su različite prostorne analize, kako vektorskih tako i rasterskih sadržaja. Uvođenje DMR-a kao jednog od slojeva u GIS-u značajno poboljšava mogućnost prostornih analiza stanišnih čimbenika i predstavlja okosnicu u procjeni i razlučivanju utjecaja različitih stanišnih parametara na pojavu šumskih šteta. Preklapanjem tematskih slojeva koji prikazuju prostorne rasporede oštećenja, odnosno uništenja šumskih sastojina (vektorski model) sa rasterskim modelom reljefa, nagiba i izloženosti, dobiti će se novi slojevi koji će omogućiti proučavanje međusobnih odnosa čimbenika reljefa i nastalih šteta.

Rezultat provedenih istraživanja za gospodarsku jedinicu na temelju procijenjenog udjela oštećenja odnosno uništenja površine temelj je za izradu tematskih slojeva prostornog rasporeda utvrđenih šteta nastalih od ledoloma. Također je za područje istraživanja (3 gospodarske jedinice u UŠP Delnice) izrađen DMR (Slika 29), koji je zajedno sa vektorskim slojevima uklopljen u postojeći GIS model.



*Slika 29 Digitalni model reljefa istraživanog područja (tri gospodarske jedinice) – 3D prikaz slojnicama (Izvor: Pernar, R. i dr., 2020: „Važnost daljinskih istraživanja pri procjeni šteta na šumskim sastojinama uzrokovanih velikim prirodnim nepogodama“)*

Provođenje prostornih analiza koje za cilj imaju razlučivanje utjecaja stanišnih parametara na šumske štete omogućeno je uvođenjem izrađenog DMR-a kao jednog od slojeva u GIS-u. Tematske karte prostornog rasporeda uništenosti sastojina preklopljene su preko digitalnog modela reljefa radi utvrđivanja utjecaja reljefa na nastale štete. Na temelju provedenih prostornih analiza vektorskih i rasterskih sadržaja u GIS-u dobiveni su rezultati u obliku novih tematskih slojeva koji su omogućili proučavanje međusobnih odnosa čimbenika reljefa i nastalih šteta.



*Slika 30 Digitalni model reljefa istraživanog područja (tri gospodarske jedinice) sa preklopljenim vektorskim sadržajem prostornog rasporeda uništenosti bjelogorice (Izvor: Pernar, R. i dr., 2020: „Važnost daljinskih istraživanja pri procjeni šteta na šumskim sastojinama uzrokovanih velikim prirodnim nepogodama“)*

Nadmorske visine na istraživanom području kreću se u granicama od 600 do 1400 m. Dobivenim slojevima prikazana je prostorna varijabilnost reljefa na istraživanom području koja je važna s gledišta proučavanja međusobnih odnosa čimbenika reljefa i nastalih šteta jer su na taj način prikupljeni podaci geometrijski točno smješteni u prostoru s obzirom na položaj i visinu. Budući da su na temelju DMR-a izrađeni novi slojevi nagib i izloženost dobiven je uvid u varijabilnost nagiba i izloženosti terena po prostornim jedinicama gospodarske podjele. Time je omogućeno provođenje analize prostornog rasporeda uništenosti sastojina i izrađenih slojeva.

Uvođenje DMR-a kao jednog od slojeva u GIS-u omogućilo je provođenje prostornih analiza s ciljem utvrđivanja utjecaja različitih stanišnih parametara na pojavu šumskih šteta. Nadalje, utvrđena je prostorna varijabilnost reljefa na istraživanom području, koja je važna s gledišta proučavanja međusobnih odnosa čimbenika reljefa i nastalih šteta jer su na taj način prikupljeni podaci geometrijski točno smješteni u prostoru s obzirom na položaj i visinu.

Postignutim rezultatima dana je inventarizacija, odnosno trenutno stanje šuma. Osim navedenog ukazano je i na značaj DMR-a pri provođenju prostornih analiza u utvrđivanju šteta od elementarnih nepogoda i stanišnih čimbenika, te na pravce budućih multidisciplinarnih

istraživanja (Sučić, Z.: „Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara“).

## **4.2. Primjena DMR-a pri analizi prostora u svijetu**

### **4.2.1. Prostorna morfometrijska analiza digitalnog modela visina u istraživanju krajolika**

Bilous, L. F. i dr. u svom radu „Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research“ sintetizirali su podatke o „crtežu“ krajolika koji je djelomično određen djelovanjem erozijskih procesa. Obzirom na navedeno, razinu GIS analize definirali su kao lokalnu. DEM za navedenu lokalnu prostornu strukturno-morfometrijsku analizu izradili su metodom digitalizacije postojećih tiskanih topografskih karata. Kao rezultat digitalizacije topografskih karata mjerila 1: 50000 i 1: 25000 nastao je ArcGIS Topo to Raster interpolacijski sustav podataka. Identificiranje i rješavanje problema nedostatka izvornih podataka važno je u DEM modeliranju. Usklađena područja terena kao što su terase, riječne doline, nizine, vododijelnice i visoravni obično karakterizira nedostatak osnovnih podataka. Zanemarivanje ovog problema razlog je postojanja GRID ćelija u DEM-u, koje nemaju visinske vrijednosti, pa stoga ne sudjeluju u prostornoj analizi. Za rješavanje navedenog problema potrebno je primijeniti metodu Topo to Raster, izraditi preliminarni DEM i za njega izraditi prostorni model odstupanja, pretvoriti ga u vektorski format i odabrati poligone karakterizirane nagibom manjim od 0°. Ove poligone karakterizira nedovoljna količina podataka te je stoga potrebna njihova izmjena. Temeljna priprema sustava ArcGIS Topo to Raster interpolacijskih podataka ključni je preduvjet za izradu pouzdanog DEM-a. Radi dopune baze podataka s ciljem rješavanja gustoće podataka napravljena su tri ponavljanja. Kao rezultat nastao je vrlo precizan i reprezentativan DEM (Slika 31). S geomorfološkog gledišta, teren istraživanog područja potpuno pripada fluvijalerozijskom tipu površine nastalom u vlažnim klimatskim uvjetima, koji ima važnu ulogu u teritorijalnoj diferencijaciji erozijskih procesa i, sukladno tome, krajolika.



Slika 31 Dio DEM-a (Izvor: Bilous, L. F. i dr.: „Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research“)

Proučavanje morfologije terena temelji se na utvrđivanju morfometrijskih parametara svake cjeline terena unutar područja istraživanja. Morfometrija je matematička analiza konfiguracije zemljine površine, oblika i reljefa. Morfometrijske značajke terena određuju značajke organizacije pojedinih regija krajolika. Prostorna strukturno-morfometrijska analiza DEM-a može se promatrati kao metodologija informacijskog popisa krajolika i njegovog geokološkog stanja. Jedna od metoda za proučavanje morfometrije je izdvajanje morfometrijskih varijabli iz DTM-a, konstruiranje i interpretacija odgovarajućih površina, kao što su vododijelnice i erozijske baze (Bilous, L. F. i dr.: „Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research“).

#### 4.2.2. Poboljšavanje uvida pomoću digitalnog modela površine i digitalnog modela terena

Njambi, R. 2022. godine objavljuje članak pod nazivom „How digital surface models and digital terrain models elevate your insights“ u kojemu jasno naglašava važnost digitalnog modeliranja terena kroz različite primjere te ističe brzinu napretka tehnologije koja omogućava geoprostorne uvide brzinama koje su prije bile nezamislive.

Trodimenzionalni modeli Zemljine površine mogu se brzo izraditi, dijeliti i kombinirati s drugim proizvodima kako bi se dobili odgovori na različita pitanja. Obzirom na široku primjenu digitalnih modela u ovom se članku govori o nekim primjenama kako bi se vjernije

prikazala njihova važnost. Digitalni modeli olakšavaju usporedbu visina između pojedinih značajki te doprinose lakšem praćenju promjena između različitih prikupljanja podataka. Osim toga pomažu pri procjeni visina zgrada, kartiranju urbanih sredina, procjeni visine stabala kao i količine biomase.

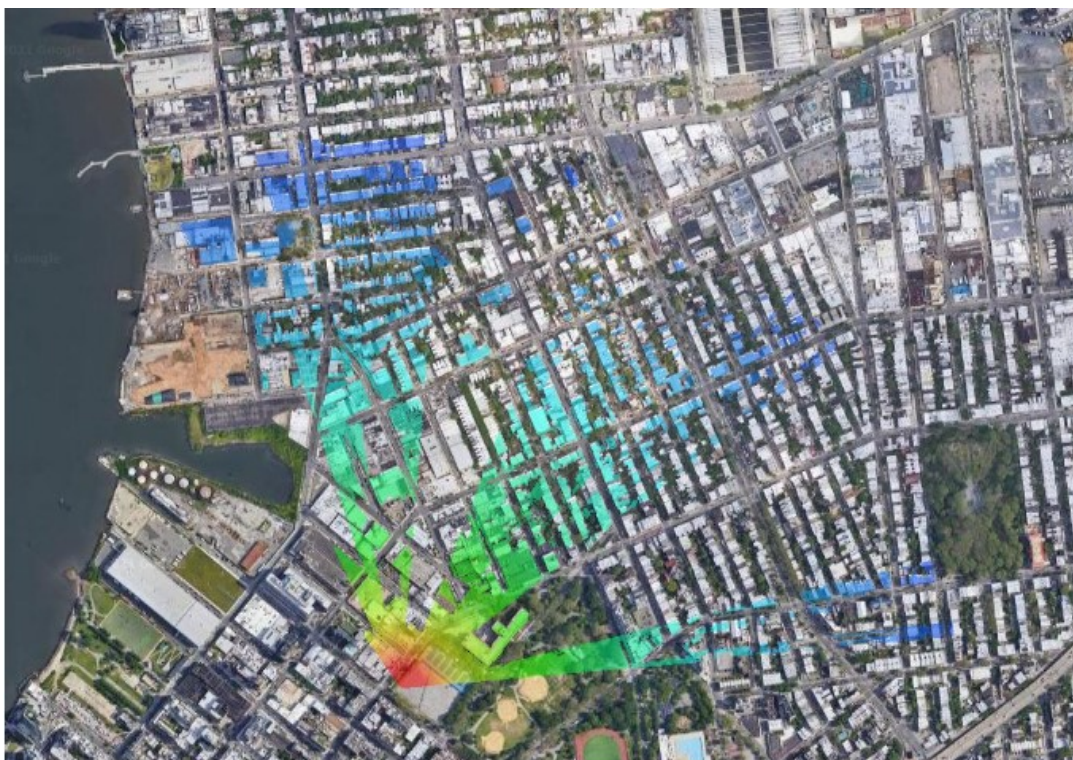
Urbano planiranje zahtjeva određivanje prikladnih lokacija za nove projekte kao i procjenu njihovog utjecaja na krajolik. Veliku ulogu u urbanim sredinama ima procjena vizualnog utjecaja, čiji je cilj osigurati ravnotežu između razvoja infrastrukture, pogleda na prirodne krajolike, povijesnih znamenitosti, zelenih i vodenih površina, planina te ostalih elemenata. Digitalni površinski modeli (DSM) omogućavaju procjenu visine vegetacije i zgrada te čine osnovu za određivanje opsega vidljivosti. Osim za planiranje infrastrukture digitalni modeli mogu se upotrebljavati i za procjenu pristupa pogledu i sunčevoj svjetlosti (Kyoto, Japan).

Dronovi u posljednje vrijeme postali uobičajena metoda za prikupljanje 3D podataka. U većini zemalja, dron uvijek mora biti vidljiv pilotu. Planiranje leta drona pomoću digitalnog modela očituje se u analizi vidljivosti te određivanju optimalne kombinacije lokacije pilota i visine leta kako bi se pokrila što veća površina uz održavanje linije vidljivosti. Osim navedenog, važnost digitalnog modela pri letu drona predstavlja u prethodno učitavanje preciznog modela koji će osigurati dronu siguran let, odnosno izbjegavanje sudara sa zgradama, drvećem ili sličnim preprekama.

Analiza vidljivosti u radiokomunikacijama dolazi do izražaja pri planiranju lokacija za tornjeve mobilne telefonije obzirom da je za uspostavljanje optimalne mrežne pokrivenosti potrebno osigurati nesmetan pogled na susjedne tornjeve. Ovdje digitalni modeli pružaju uvid u vrstu i visinu prepreke. Obzirom na aktualnost 5G mreža, treba naglasiti kako su visoko precizni digitalni modeli ključni za njihovo planiranje jer su valovi ove mreže izrazito osjetljivi na smetnje uzrokovane prirodnim ili umjetnim objektima. Vidljivost radijske frekvencije s odašiljača prikazana je na Slici 32. Boje predstavljaju snagu signala pri čemu je crvena visoka, a plava niska.

Pri analizi vidnog polja treba uzeti u obzir ograničenje ljudskog vida, nadmorsku visinu promatrača (ljudi ili predmeta) iznad terena te razlučivost i točnost korištenog 3D modela.





*Slika 32 Vidljivost radijske frekvencije s odašiljača (Izvor: Njambi, R., 2022: „nDSMs: How digital surface models and digital terrain models elevate your insights“)*

U šumarstvu se 3D modeli najčešće dobivaju pomoću LiDARA obzirom da pruža podatke o gustom 3D oblaku točaka i ima mogućnost prodiranja u vegetaciju. Modeli visine krošnje pomažu u određivanju visine pojedinačnih stabala, mapiranju šumske pokrivenosti, klasificiranju struktura drveća, procjeni nadzemne biomase te otkrivanju promjena stanja krošnje. U poljoprivredi digitalni modeli omogućuju praćenje varijabilnosti visine usjeva, što može dati informacije o primjeni sjemena, gnojiva, vode, pesticida i herbicida. Generiranje vizualnih karata koje prikazuju visinu usjeva u različitim fazama razvoja moglo bi omogućiti otkrivanje usjeva čiji je rast zaostao što bi bilo teško primijetiti procjenama na tlu.

Digitalni modeli mogu se također koristiti i za procjenu rizika od nastanka šumskih požara. Budući da požar gori brže uz padinu, kombiniranje karata nagiba i digitalnih modela može pomoći u modeliranju smjera širenja požara pružajući pri tome mogućnost bržeg reagiranja u sprječavanju katastrofe.

Za učinkovito upravljanje zemljištem i praćenje promjena na istom pomažu nam karte pokrova zemljišta. Njihova primjena je široka, od upravljanja vodnim resursima, urbanog planiranja, upravljanja okolišem do očuvanja divljih životinja. Za izradu karte pokrivenosti zemljišta bitan čimbenik su satelitske slike u različitim prostornim, vremenskim i spektralnim rezolucijama.

Klimatske promjene donose sa sobom sve veće rizike od poplava, bilo da su uzrokovane porastom razine mora, tsunamijem ili izlivanjem rijeka, one mogu imati razorne socioekonomske učinke na zajednicu. Obzirom na navedeno, bitno je istaknuti važnost 3D

modela u sprječavanju poplava. Digitalni modeli visoke rezolucije ključni su za procjenu i predviđanje dubine i opsega poplava, identifikaciju zahvaćenog područja, planiranje reakcija u hitnim slučajevima kao i u razvoju preventivnih mjera. U kombinaciji s podacima o stanovništvu, pomoću digitalnih modela može se predvidjeti broj ljudi koji se nalaze u opasnosti.



Slika 33 Karta koja crvenom bojom prikazuje zgrade pogođene poplavama (Izvor: <https://up42.com/blog/data-stories/openstreetmap-flood-mapping> )

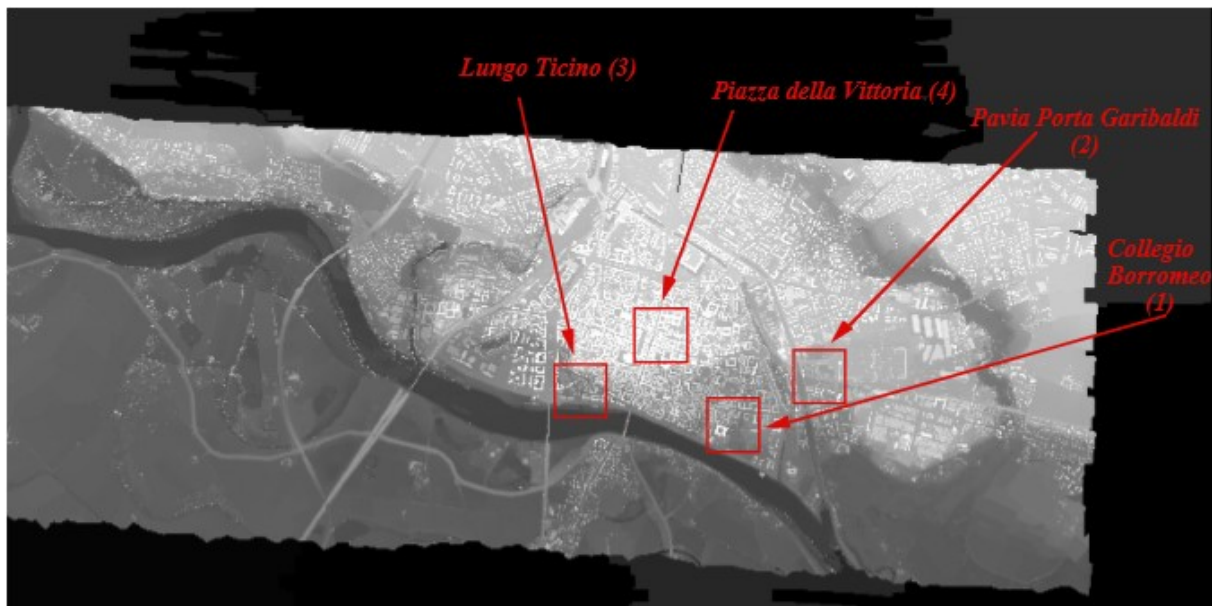
#### 4.2.3. Digitalni modeli terena u gusto naseljenim urbanim područjima

Dell'Acqua, F. i dr. sa sveučilišta Pavia u Italiji, zavoda za elektroniku, u svom radu „Digital terrain models in dense urban areas“ razmotrili su problem ekstrakcije DTM-a u gusto naseljenim urbanim područjima. U tu svrhu bili su im potrebni vrijedni i pouzdani podaci na malim otvorenim površinama među zgradama i prikladan algoritam za rekonstrukciju terena. Prvo su usporedili LIDAR i aerofotogrametriju vrjednujući relativnu točnost trodimenzionalne rekonstruirane površine na malim otvorenim površinama u središtu grada. Nakon toga uslijedila je karakterizacija DTM-a cijeloga grada koristeći pristup filtriranja i otkrivanja zgrada.

Rad se temelji na činjenici da su povijesna središta u europskim gradovima prepuna zgrada koje su grupirane u male ili velike blokove, a između kojih se nalaze vrlo uske ceste. Ovakvo stanje predstavlja veliki izazov za izradu digitalnih modela obzirom da je veliki broj točaka koncentriran u određenim područjima dok je za neka područja potrebno tehnikama interpolacije i zamjene s iznimnom preciznošću dobiti točke koje će biti osnova za okolna

područja. Obično se te točke mogu pronaći pomoću automatskih ili poluautomatskih fotogrametrijskih alata, a od nedavno i pomoću LIDAR sustava.

Za ovaj rad prikupljen je LIDAR skup podataka o gradu Pavia i njegovoj neposrednoj okolini sredinom studenog 1999. sa senzorom Toposys, kojeg proizvodi i njime upravlja njemačka tvrtka Toposys, instaliranim u zrakoplovu talijanske tvrtke pod nazivom CGR, Compagnia Generale Ripresearee. Izdvojena su četiri testna područja, od kojih svako pokriva kvadrat veličine 400 x 400 piksela (što odgovara 160000 m<sup>2</sup>), prikazano na slici 34 . U testnim područjima (1) i (2) referentni podaci dobiveni su GPS tehnikama i pripadaju topološki ravnim strukturama, poput teniskih ili košarkaških terena.

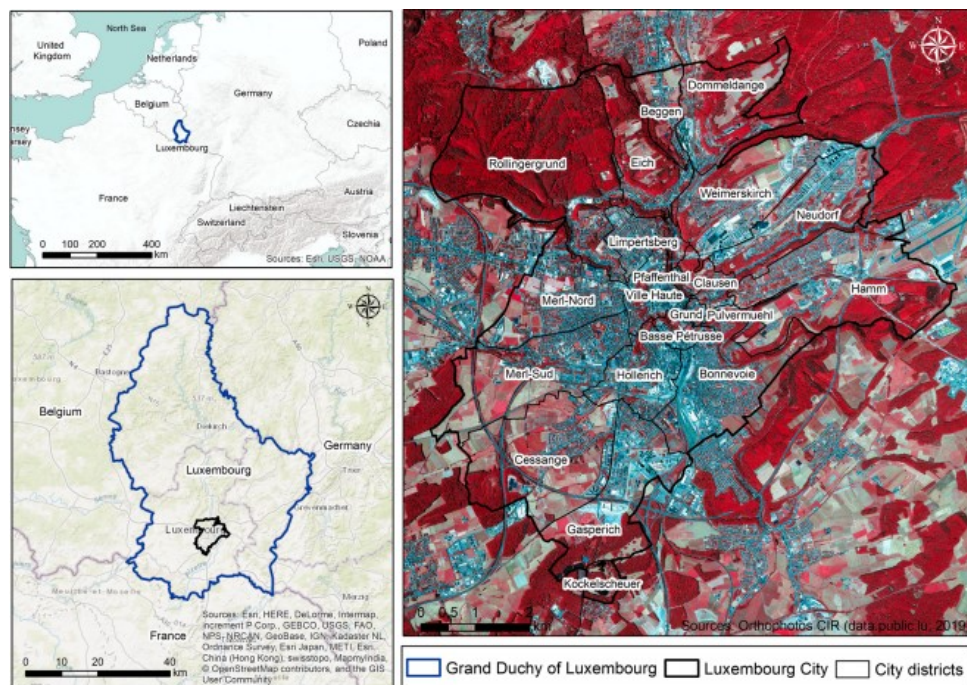


*Slika 34 Dvodimenzionalni prikaz LIDAR skupa podataka nad gradom Pavia, sjeverna Italija. Kvadrati predstavljaju četiri ispitna područja korištena za uvježbavanje algoritama za ekstrakciju DTM-a u ovom istraživanju (Izvor: Dell'Acqua, F. i dr.: „Digital terrain models in dense urban areas“)*

Nakon odrađenih ispitivanja, korištenjem dvije tehnike filtriranja, ispostavilo se, kao što se i očekivalo, da najbolja širina filtra ovisi o karakteristikama terena i izgrađene strukture. Nakon testnih ispitivanja na odabranim područjima koja uključuju sve moguće kombinacije dokazano je kako je moguće dobiti visoko precizne DTM-ove popunjavanjem izgrađenih područja s okolnim terenom bez značajnog utjecaja na otvorene površine (Dell'Acqua, F. i dr.: „Digital terrain models in dense urban areas“).

#### 4.2.4. Monitoring urbanih šuma korištenjem 3D prostornih indeksa na temelju LiDAR oblaka točaka i pixel pristupa

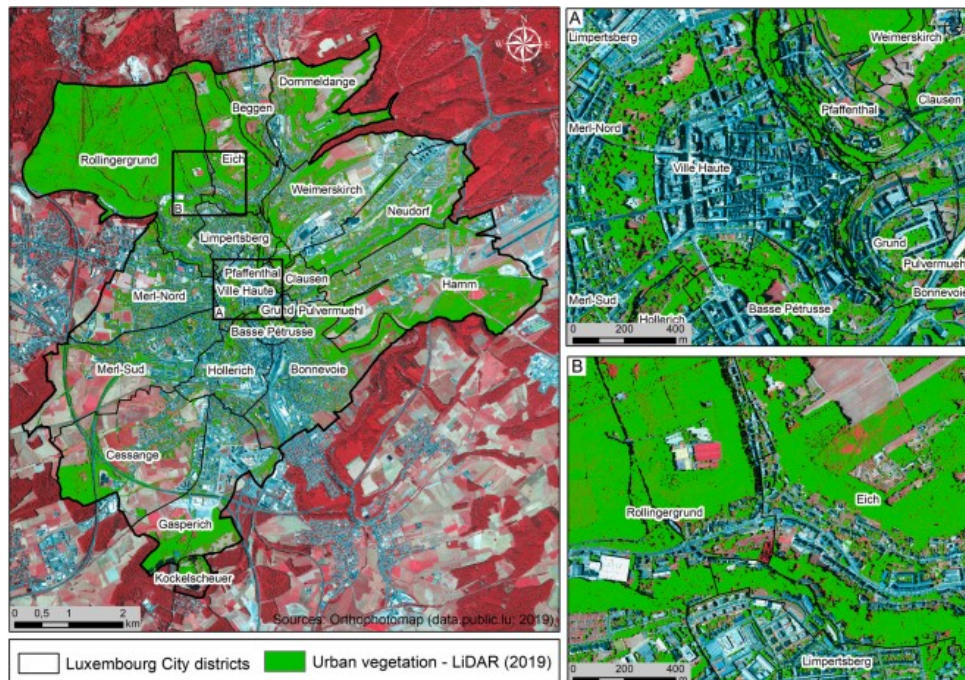
Zięba-Kulawik, K. i dr. u svom radu „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“ ističu kako se moderni gradovi sve više suočavaju s velikim izazovima u odgovaranju na potrebe različitim skupinama stanovništva. Navode kako urbane prostore treba oblikovati na način da budu što ugodniji za život određenog stanovništva te da posebnu pozornost treba posvetiti urbanoj vegetaciji koja predstavlja bitnu komponentu kvalitete života. Često su se u prošlosti istraživanja temeljila na dvodimenzionalnom mapiranju urbane vegetacije upotrebom slika iz daljinskog istraživanja i indikatora vegetacije, pri čemu je zelenilo bilo ravnomjerno raspoređeno bez obzira na volumen. Kako je vegetacija u stvarnosti trodimenzionalna, slojevi se često preklapaju.



Slika 35 Položaj područja istraživanja a) Gore lijevo: položaj na karti Europe, dolje lijevo: granice Luksemburga. (b) Ortofoto karta iz zraka (CIR) grada Luksemburga s administrativnim granicama (Izvor: Zięba-Kulawik, K. i dr.: „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“)

Jedan od glavnih izazova urbanih šuma posljednjih godina je procjena obujma vegetacije, pri čemu se sve više koristi ALS LiDAR tehnologija sve koja je precizna u većem mjerilu, a uz nižu cijenu koristi se mjerenje na zemlji kao što je terestričko lasersko skeniranje (TLS) ili terenska istraživanja. Cilj studije ovog rada je istražiti prostorni odnos između volumena vegetacije i zgrada u gradu Luksemburgu koji se ubrzano razvija. U rastućim središtima kao što je Luksemburg, praćenje dostupnosti i vrste zelenila, zajedno s omjerom izgrađenosti i vegetacije, vrlo je važno kako bi se održala trajna ravnoteža. Brzi razvoj gradova

postavlja ključno pitanje o tome kako izgrađena područja utječu na promjenu obujma vegetacije u urbanim područjima. Procjena obujma krošanja drveća na razini grada izazov je u tradicionalnoj inventuri urbanih šuma zbog raznolikih struktura.



Slika 36 Karta urbane vegetacije ( $H > 1,0\text{ m}$ ) u gradu Luksemburgu na temelju ALS LiDAR-a (2019.): (a) četvrt Ville Haute – središte grada; (b) Rollingergrund i Eich – sjeverni okruzi. (Izvor: Zięba-Kulawik, K. i dr.: „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“)

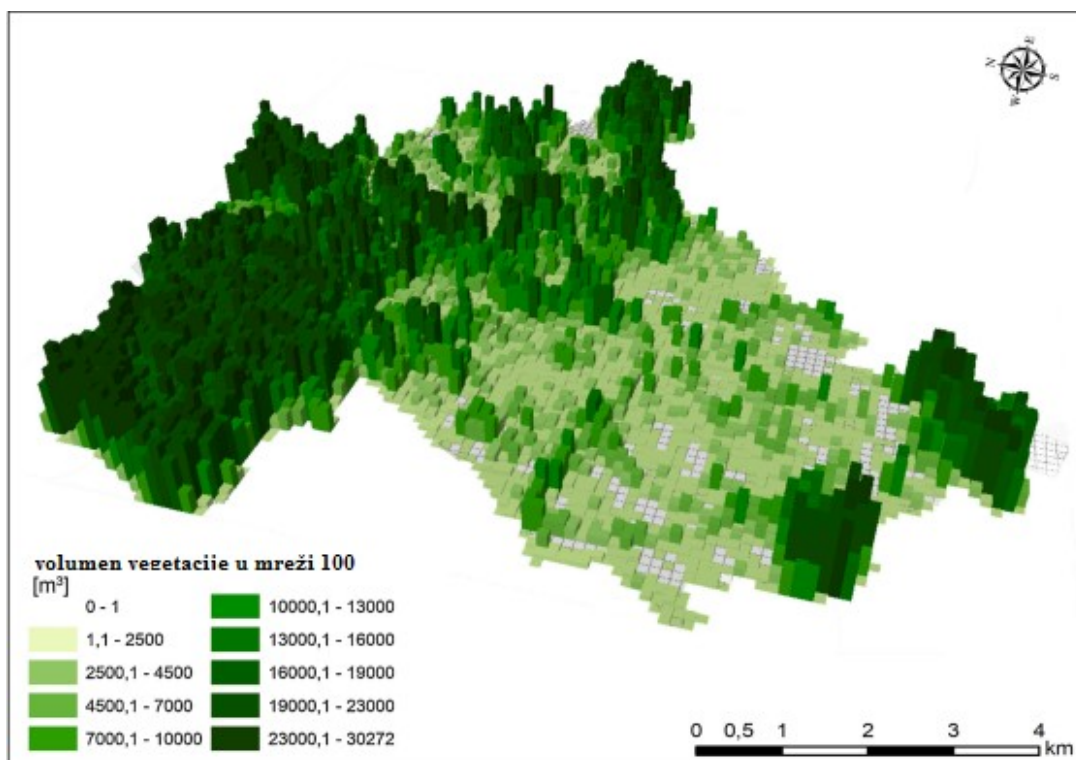
Nove tehnologije omogućuju bolji pristup određivanju obujma krošanja urbanog drveća nego prilagođavanjem oblika krošanja drveća pravilnim geometrijskim tijelima i korištenjem izračuna temeljenih na volumetrijskim formulama. Prednost pristupa temeljenog na pikselima je mogućnost analize nepravilnih krošanja urbanog drveća na razini grada ili šire. Proces pikselizacije pretvara oblake točaka u skup 3D objekata (piksela) koji najbolje opisuju strukturu. Zbroj piksela opisanih u klasi vegetacije daje informacije o njenom volumenu.

Volumen vegetacije izračunat je korištenjem oblaka točaka laserskog snimanja iz zraka (ALS LiDAR) obrađenih u pikselima, a volumen zgrada na temelju rezultata 3D ALS LiDAR modeliranja oblaka točaka. Otkriveno je kako su 2019. godine urbane šume pokrivale 1689 ha grada Luksemburga, što čini 33 % površine administrativnog područja. GIS analize pokazale su da je ukupni volumen vegetacije ( $> 1,0\text{ m}$  iznad zemlje) iznosio oko 40 milijuna  $\text{m}^3$ , što odgovara 328  $\text{m}^3$  zelenila po stanovniku (Slika 36).  $V3DI^3$  je proizveo vrijednost od 0,77  $\text{m}^3/\text{m}^2$ . Ukupni indeks  $VV2BV(\%)$  izračunat za Luksemburg iznosio je 41,6 %. Samo pet okruga

<sup>3</sup> Vegetation 3D Density Index

Luksemburga imalo je visoku vrijednost indeksa VV2BV<sup>4</sup>, koji označava područja s visokom razinom zelene infrastrukture koja doprinosi zdravlju i boljoj kvaliteti života.

Srednja vrijednost indeksa VV2BV (%) za cijeli grad pokazuje da omjer vegetacije i zgrada na mnogim mjestima nije dobro uravnotežen. Četvrti s niskim indeksom nalaze se u središtu grada, kao i stambena i uredska područja. U tim područjima treba razmišljati o razvoju zelene infrastrukture.



Slika 37 3D karta prostorne distribucije volumena vegetacije ((Izvor: Zięba-Kulawik, K. i dr.: „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“).

Rezultati ove studije pokazuju novi način vizualizacije i prezentacije 3D podataka za buduće planiranje urbane zelene infrastrukture. 3D modeli omogućuju nam identificiranje područja s nedostatkom zelenog volumena ili neravnomjernim omjerom izgrađenih površina i zelenila, koja zahtijevaju trenutnu pozornost. Primijenjeni pristup daje ideju o mogućnostima poboljšanja urbanih sredina i ukazuje na nedostatke zelenila u mjestima ili čak cijelim gradovima kako bi se olakšao prijelaz na održivije, klimatski neutralnije i pametne gradove do 2030. u okviru Europskog klimatskog pakta (2020.) (Zięba-Kulawik, K. i dr.: „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“).

<sup>4</sup> Vegetation Volume to Building Volume Index

## 5. ZAKLJUČAK

Zemljina površina ima izuzetno kompleksne reljefne oblike zbog čega ih znanstvenici proučavaju izradom i analizom digitalnog modela reljefa (DMR ili DTM, digital terrain model)

Digitalni model reljefa predstavlja statistički prikaz kontinuiranih površina reljefa u vektorskom ili rasterskom obliku s nizom poznatih x, y i z koordinata unutar proizvoljno odabranog koordinatnog sustava (Miller i Laflamme, 1958).

Ovisno o primjeni, model treba biti napravljen tako da zadovolji kriterije određene znanstvene discipline (geomorfologija, hidrologija, klimatologija, krajobrazna ekologija, geologija, kartografija itd.) za koju je namijenjen jer različite discipline zahtijevaju i različite razine točnosti.

U ovom diplomskom radu dan je prikaz neke od primjena digitalnog modela reljefa pri analizi i valorizaciji prostora u Svijetu i Hrvatskoj.

Digitalni model reljefa predstavlja kvalitetnu podlogu pri analizi i vrednovanju prostora, te olakšava odluke pri planiranju i gospodarenju.

## 6. LITERATURA

1. Adami, A., Guerra, F., Vernier, P., 2007: Laser Scanner and Architectural Accuracy Test, CIPA Symposium 21, 1-6 October 2007, Athena, Greece
2. Ali, T. A., 2004: On the selection of an interpolation method for creating a terrain model (TM) from LIDAR data, u: American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference 2004: Proceedings, Nashville TN, U.S.A.
3. Bamber, J. L., Gomez-Dans, J. L., Griggs, J. A., 2009: A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data—Part 1: Data and methods, *The Cryosphere* 3, 101-111.
4. Band, L. E., 1986: Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resources Research* 22 (1), 15-24
5. Basa, L., Juraj, I., 2011: Oblak točaka i AutoCAD Civil 3D 2011, *Ekscentar* 14, 34-39.
6. Berens, P., 2006: Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR), u: *Advanced Radar Signal and Data Processing*
7. Biesemans, J., Meirvenne, M. V., Gabriels, D., 2000: Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict longterm average offsite sediment accumulation, *Journal of Soil and Water Conservation* 55 (1), 35-42.
8. Bilous, L. F., Shyshchenko, P., Samoilenko, V. i Havrylenko, O., 2020: „ Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research“
9. Bishop, M. P., Shroder, J. F., 2000: Remote sensing and geomorphometric assessment of topographic complexity and erosion dynamics in the Nanga Parbat massif, u: *Tectonics of the Nanga Parbat Syntaxis and the Western Himalaya* (ur. Khan, M. A. i dr.), Geological Society London, London, 181-199.
10. Borisov, M., Petrović, M.V., Vulić, M.: *Vizualizacija 3D modela geopodataka i njihova primena*
11. Brukner, M., Oluić, M., Tomanić, S., 1992: *Geografski i zemljišni informacijski sustav Republike Hrvatske – Metodološka studija*. INA – Industrija nafte, INFO, Zagreb, 143 str.
12. Burrough, P. A., McDonnell, R. A., 1998: *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, New York.
13. Chaplot, V., Darboux, F., Bourenane, H., Leguédou, S., Silvera, N., Phachomphon, K., 2006: Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density, *Geomorphology* 77 (1-2), 126-141.
14. Dell'Acqua, F., Gamba, P. i Mainardi, A.: „Digital terrain models in dense urban areas“
15. Desmet, P. J. J., Govers, G., 1996a: Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies, *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (3), 311-331



16. Desmet, P. J. J., Govers, G., 1996b: A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5), 427-433.
17. Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., McKean, J., 1993: Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model, *Journal of Geology* 101 (2), 259-278.
18. Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R. K., Pike, R. J., 1995: Morphometric landform analysis of New Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Suppl.-Bd.* 101, 109-126.
19. Dobesch, H., Dumolard, P., Dyras, I., 2007: Spatial interpolation for climate data: The use of GIS in climatology and meteorology, ISTE Ltd., London.
20. Dorren, L. K. A., Heuvelink, G. B. M., 2004: Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model, *International Journal of Geographical Information Science* 18 (6), 595-609.
21. Duan, J., Grant, G. E. 2000: Shallow landslide delineation for steep forest watersheds based on topographic attributes and probability analysis, in: *Terrain Analysis: Principles and Application* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley & Sons Press: New York, New York, 311-330
22. Florinsky, I. V., 1998: Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid, *International Journal of Geographical Information Science* 12 (8), 829-852.
23. Florinsky, I. V., 1998a: Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid, *International Journal of Geographical Information Science* 12 (8), 829-852.
24. Florinsky, I. V., 1998b: Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science* 12 (1), 4761.
25. Frančula, N., 2004: Digitalna kartografija, 3. prošireno izdanje, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
26. Frančula, N., Lapaine, M. (2008): Geodetsko-geoinformatički riječnik, Državna geodetska Uprava, Zagreb
27. Franke, R., 1982: Scattered data interpolation: tests of some methods, *Mathematics of Computation* 38 (158), 181-200
28. Gajski, D., 2007: Osnove laserskog skeniranja iz zraka, *Ekscentar* 10, 16-22.
29. Giles, P. T., 1998: Geomorphological signatures: classification of aggregated slope unit objects from digital elevation and remote sensing data, *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (7), 581-594.
30. Gjuranić, Ž., 2008: Modeliranje terena pomoću Delaunayjeve triangulacije, *KoG* 11 (11), 49-52.
31. Golek, D., Dobrinić, D., Kordić, B., 2012: Usporedba terestričkih laserskih skenera, *Ekscentar* 15, 54-61
32. Govers, G., Takken, I., Helming, K., 2000: Soil roughness and overland flow, *Agronomie* 20 (2), 131-146.
33. Govorčin, M., Kovačić, F., Žižić, I., 2012: Bespilotne letjelice SenseFly Swinglet CAM, *Ekscentar* 15, 62-68.

34. Hengl, T. 2006: Finding the right pixel size, *Computer and Geosciences* 32 (9), 1283-1298
35. Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D. P., 2003: Digital terrain analysis in ILWIS: lecture notes and user guide, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands.
36. Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D. P., 2003: Digital terrain analysis in ILWIS: lecture notes and user guide, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands.
37. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., Jarvis, A., 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology* 25 (15), 1965-1978.
38. Hodgson, M. E., 1995: What cell size does the computed slope/aspect angle represent?, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61 (2), 513-517.
39. Hoehstetter, S., Walz, U., Dang, L. H., Thinh, N. X., 2008: Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure - a proposal to modify the existing set of landscape metrics, *Landscape Online* 1, 1-14.
40. Hollaus, M., Höfle, B., 2010: Terrain roughness parameters from full-waveform airborne lidar data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (7), 287-292.
41. Holopainen, M.; Haapanen, R.; Karjalainen, M.; Vastaranta, M.; Hyypä, J.; Yu, X., Tuominen, S.; Hyypä, H., 2000: Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerrSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables, *Remote Sens.* 2, 432-445.
42. Horvat, S., Železnjak, Ž., Lapaine, M., 2003: Vojni topografsko-kartografski sustav Republike Hrvatske, *Kartografija i Geoinformacije* 2, 75-85.
43. Huggel, C., Kaab, A., Haeberli, W., Krummenacher, B., 2003: Regional-scale GISmodels for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 647-662.
44. Huggel, C., Schneider, D., Miranda, P.J., Delgado Granados, H., Kaab, A., 2008: Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170, 99-110.
45. Hunter, G. J., Goodchild, M. F. (1997): Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis*, 29(1), 35-49.
46. Ivšić L., Pribičević B., Đapo A., Kordić B., Babić L. Govorčin M.: „Klasifikacija LiDAR podataka na području urbanog jezera Jarun i analiza kvalitete podataka“
47. Jenson, S. K., 1991: Application of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models, *Hydrol. Process.* 5 (1), 31-44.
48. Jergović, S., 1994: Određivanje načina interpolacije i optimalne veličine mreže pri izradi digitalnog modela terena. *Meh. šumar.*, 19 (3): 199- 204.
49. Jones, K. H., 1998: A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers and Geosciences* 24 (4), 315-323.

50. Karamustafić, A., 2007: Razvoj i stanje terestričkog geodetskog instrumentarija, Diplomski rad, Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet, Odsjek za geodeziju, Sarajevo.
51. Krtalić, A, Dubravko G., Mladen M.: Digitalni trodimenzionalni prikazi scene i satelitska stereofotogrametrija, Geod. list 2019, 2, 147–164
52. Kujundžić, D., 2007: Zračni laserski skeneri LEICA ALS50-II i Corridor Mapper, Ekscentar 10, 31-34.
53. Kušan, V., 1995: Digitalni model reljefa i njegova primjena, Meh. šumar. 20 (2), 77-84.
54. Lasić, Z., 2007: Interna skripta kolegija Geodetski instrumenti, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
55. Lemaire, C. (2008): Aspects of the DSM Production with High Resolution Images, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B4, Beijing.
56. Li, J., Heap, A. D., 2008: A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists, Geoscience Australia, Record 2008/23, Canberra.
57. Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2005: Digital Terrain Modeling, CRC Press, London.
58. Makarović, B., 1977: Composite sampling for digital terrain models, ITC Journal 3, 406433.
59. Malić-Limari, S., Tišma, S., Pisarović, A. i Jelaska, D. S.: „Prostorna analiza zemljišnog pokrova i reljefa Parka prirode Medvednica – doprinos optimizaciji pritiska posjetitelja“
60. Malvić, T., 2008: Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.
61. Margreth, S., Funk, M., 1999: Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches - two case studies from the Swiss and Italian Alps, Cold Regions Science and Technology 30 (1-3), 159-173.
62. Mechelke, K., Kersten, T. P., Lindstaedt, M., 2007: Comparative Investigations into the Accuracy Behavior of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems
63. Medak, J., Slade, D., Vukelić, M. i Medvedović, J.: „Šume hrasta lužnjaka u predjelima "Premužno jezero i "Crno jezero" u Lici“
64. Meyer, W., 1995: Concepts of Mathematical Modelling, McGraw-Hill Book Company, New York
65. Miler M., Đapo A., Kordić B., Medved I., 2007: Terestrički laserski skeneri, Ekscentar 10, 35-38.
66. Millaresis, G. C., Argialas, D. P., 2000: Extraction and delineation of alluvial fans from digital elevation models and Landsat Thematic Mapper images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66 (9), 1093-1101.
67. Miller, C., Laflamme, R., 1958: The digital terrain model — theory and applications, Photogrammetric Engineering 24, 433-442.
68. Mirko B. (2018.): Utjecaj korisničko-definiranih parametara na točnost digitalnog modela reljefa
69. Mitas, L., Mitasova, H., 1999: Spatial Interpolation, u: Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications (Second edition) (ur.

- Longley, P.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W.), Wiley, Chichester 481-492.
70. Mitasova, H. L., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. R., 1996: Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS, *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (5), 629-641.
  71. Mitrović, M., Cvijetinović, Ž., Mihajlović, D., 2012: Razvoj digitalne fotogrametrijske stanice
  72. Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R., 1991: Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes* 5, 3-30.
  73. Murai, S., Xi, M., Viseshsin, S., Tagaki, M., Honda, Y., Ochi, S., Tokunda, M., 1992: Recent advances in 3D applications of remote sensing and GIS in Japan, *ITC Journal*, No. 1: 55- 58.
  74. Nellemann, C., Fry, G., 1995: Quantitative analysis of terrain ruggedness in reindeer winter grounds, *Arctic* 48 (2), 172-176.
  75. Olaya, V., 2009: Basic land surface parameters, u: *Geomorphometry – Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science* (ur. Hengl, T., Reuter, H. I.)
  76. Oštir, K., Mulahusić, A. (2014): Daljinska istraživanja, Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo
  77. Pernar R. (1996.): "Primjena rezultata interpretacije aerosnimaka i geografskog informacijskog sustava za planiranje u šumarstvu"
  78. Pernar, R., Ančić, M., Seletković, A., Kolić, J., 2020: Važnost daljinskih istraživanja pri procjeni šteta na šumskim sastojinama uzrokovanih velikim prirodnim nepogodama // *Gospodarenje šumama u uvjetima klimatskih promjena i prirodnih nepogoda* / Anić, I. (ur.),143-160.
  79. Peterca, M., Radošević, N., Milosavljević S., Racetin, F., 1974: Kartografija, Vojnogeografski institut, Beograd, 745 str.
  80. Pike, R. J., 1995: Geomorphometry - progress, practice and prospect, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 101, 221-238.
  81. Pike, R. J., 2000: Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis, *Progress in Physical Geography* 24 (1), 1-20.
  82. Pokupić, M., 2018: Analiza točnosti globalnih digitalnih modela reljefa i geomorfometrijski modeli planinskih područja Republike Hrvatske
  83. Rana, S. (Ed.) (2004): *Topological Data Structures for Surfaces: An Introduction for Geographical Information Science*, Wiley, New York, 214.
  84. Reutebuch, S., Andersen, H. E., McGaughey, R., 2005: LIDAR: An emerging tool for multiple resource inventory, *Journal of Forestry* 103 (6), 286-292.
  85. Richards, M. A., 2007: A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing, *IEEE A&E Systems Magazine* 22 (9), 5-29
  86. Sangam, S., 2012: Light Detection and Ranging
  87. Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E., Jacobs, M. J., 2001: Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data, *Soil Science Society of American Journal* 65 (2), 470-479.

88. Schneider, B. (2001): Phenomenon-based Specification of the Digital Representation of Terrain Surfaces, *Transactions in GIS*, 5(1), 39–52.
89. Shary, P. A., Sharaya, L. S., Mitusov, A. V., 2002: Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma* 107 (2), 1-32.
90. Stephen, J. V., Irvin, B. J., 2000: Automated landform classification methods for soillandscape studies, u: *Terrain Analysis: Principles and Application* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley & Sons Press: New York, New York, 267-294.
91. Sučić Z. (2014.): Značaj digitalnog modela reljefa pri utvrđivanju šumskih šteta uzrokovanih ledolomom na području Gorskoga kotara
92. Šiljeg, A. (2013.): Digitalni model reljefa u analizi geomorfometrijskih parametara – primjer PP Vransko jezero, disertacija, PMF – Geografski odsjek, Sveučilište u Zagrebu.
93. Takagi, M., Asano, H., Kikuchi, Y., 2002: Optimum Spatial Resolution of Digital Elevation Model for Topographical Analysis, u: *International Symposium on Geospatial Theory*, Ottawa
94. Tankagi, M., 1996: Accuracy of Digital Elevation Model According to Spatial Resolution
95. Tarboton, D. G., 1997: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resource Reserch* 33 (2), 309-319.
96. Thompson, J. A., Bell, J. C., Butler, C. A., 2001: Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling, *Geoderma* 100 (1-2), 67-89.
97. Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, R. L. 2001: Statistical analysis of drainage density from digital terrain data, *Geomorphology* 36 (3-4), 187-202
98. UP42 Company - Nikita M. i Elizabeth D. (2021.): Everything you need to know about Digital Elevation Models (DEMs), Digital Surface Models (DSMs), and Digital Terrain Models (DTMs) <https://up42.com/blog/everything-you-need-to-know-about-digital-elevation-models-dem-digital> (Pristupljeno 2.9.2023.)
99. UP42 Company - Rose Njambi, 2022: „nDSMs: How digital surface models and digital terrain models elevate your insights“ <https://up42.com/blog/ndsms-how-digital-surface-models-and-digital-terrain-models-elevate-your> (Pristupljeno 19.9.2023.)
100. Watson, D. F., 1992: *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*, Pergamon Press, Oxford, UK
101. Wechsler, S. P. (2003): Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users. *URISA-WASHINGTON DC-*, 15(2), 57-64
102. Wehr, A., Lohr, U., 1999: Airborne laser scanning an introduction and overview, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54, 68-82.
103. Weibel, R., Heller, M., 1991: Digital terrain modelling, u: *Geographical Information Systems: Principles and Applications*
104. Wilson, J. P. (2018): *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling*, John Wiley & Sons Ltd.
105. Wilson, J. P., Gallant, J. C. 2000: Digital terrain analysis, u: *Terrain analysis: principles and applications* (ur. Wilson, J. P., Gallant, J. C.), John Wiley and Sons: New York, New York, 1-27.

106. Wilson, J., 2011: Digital terrain modeling, *Geomorphology* 137 (1), 269-297.
107. Wu, J., Marceau, D., 2002: Modeling complex ecological systems: an introduction, *Ecological Modelling* 153, 1-6.
108. Yang, X., 2009: Spatial Interpolation, u: *Handbook of Research on Geoinformatics* (ur.. Karimi, H. A.), Information Science Reference, Hershey - New York, 129-137.
109. Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., 1987: Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 47-56.
110. Zhou, Q., Liu, X., 2004b: Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties, *Computers and Geosciences* 30 (4), 369-378.
111. Zhou, Q., Liu, X., 2004a: Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (8), 957-962.
112. Zięba-Kulawik, K., Skoczylas, K., Węzyk, P., Teller, J., Mustafa, A. i Omrani, H.: „Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach“