

# Pregled metoda i tehnika klasifikacija multispektralnih snimaka

---

**Puljić, Mateo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:775040>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-17**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**Mateo Puljić**

**Pregled metoda i tehnika klasifikacija multispektralnih  
snimaka**

**Diplomski rad**

**Zagreb  
2022.**



**Mateo Puljić**

**Pregled metoda i tehnika klasifikacija multispektralnih  
snimaka**

**Diplomski rad**

predan na ocjenu Geografskom odsjeku

Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

radi stjecanja akademskog zvanja

magistra geografije

**Zagreb**

**2022.**

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija *Geografija*; smjer: *istraživački (Geografski informacijski sustavi)* na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Luke Valožića

Sveučilište u Zagrebu  
 Prirodoslovno-matematički fakultet  
 Geografski odsjek

Diplomski rad

## Pregled metoda i tehnika klasifikacija multispektralnih snimaka

Mateo Puljić

**Izvadak:** Klasifikacija snimaka s daljinskog mjerenja ključna je karika pri obradi. Klasifikacijom se snimci daljinskog mjerenja pretvaraju u klasificirane značajke koje računala s dubokim aplikacijama mogu razumjeti i obraditi. Međutim, tradicionalne metode klasifikacije snimaka daljinskim mjerenjima ne zadovoljavaju stvarne zahtjeve. Posljednjih godina, brzi razvoj teorije i računala pružio je tehnički pristup za rješavanje klasifikacije snimaka. U posljednjih pedeset godina razvijene su različite tehnike prepoznavanja uzoraka za klasifikaciju terena i zemljine površine pomoću multispektralnih slika. Svrha ovog rada je pregledati i ocijeniti dostupne metode i tehnike za obradu i klasifikaciju objekata (prostornih fenomena) zabilježenih na multispektralnim snimcima prikupljenim daljinskim istraživanjima kroz pregled dosadašnjih istraživanja na ovu temu.

46 stranica, 7 grafičkih priloga, 8 tablica, 21 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: *multispektralni snimci, klasifikacija, metode, zemljišni pokrov*

Voditelj: doc. dr. sc. Luka Valožić

Povjerenstvo: doc. dr. sc. Luka Valožić  
 doc. dr. sc. Mladen Maradin  
 prof. dr. sc. Zoran Stiperski

Tema prihvaćena: 11. 2. 2021.

Rad prihvaćen: 7. 4. 2022.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geography

Master Thesis

**A review of multispectral image classification methods and techniques**

Mateo Puljić

**Abstract:** Classification of remote sensing images is a key link in processing. By classification, remote sensing images are transformed into classified features that computers with deep applications can understand and process. However, traditional methods of classifying images by remote measurements do not meet the actual requirements. In recent years, the rapid development of theory and computers has provided a technical approach to solving the classification of images. In the last fifty years, various pattern recognition techniques have been developed to classify terrain and land surface using multi-spectral images. The purpose of this paper is to review and evaluate the available methods and techniques for processing and classification of objects (spatial phenomena) recorded on multispectral images collected by remote sensing through a review of previous research on this topic.

46 pages, 7 figures, 8 tables, 21 references; original in Croatian

Keywords: *multispectral images, classification, methods, land cover*

Supervisor: Luka Valožić, PhD, Assistant Professor

Reviewers: Luka Valožić, PhD, Assistant Professor  
Mladen Maradin, PhD, Assistant Professor  
Zoran Stiperski, PhD, Full Professor

Thesis title accepted: 11/02/2021

Thesis accepted: 07/04/2022

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia.

## *Zahvala*

*Moja najveća hvala ide dragom Bogu jer blagoslivlja put kojim idem. U Njega sam se uzdao i On me usmjerio i pomogao.*

*Hvala mami Vidi i tati Pavi, na neizmjernoj ljubavi i žrtvi koju su pretrpjeli kako bi mi omogućili školovanje i usmjerili me na pravi put.*

*Hvala bratu Marku i Ivanu, sestri Maji i njihovim obiteljima na podršci koju su mi pružili tijekom školovanja.*

*Hvala stričevima Vinku i Ivanu na svakom darovanom savjetu i pruženoj podršci tijekom mog školovanja.*

*Hvala djevojci Mariji na strpljivosti tijekom mog odlaska u Zagreb, vjeri i podršci koju mi je pružila kroz svo vrijeme studija.*

*Hvala svim mojim prijateljima i kolegama na pruženoj pomoći i podršci, pogotovo veliko hvala prijatelju i kolegi Mateju Antoloviću na nesebičnom pomaganju.*

*Hvala mentoru doc.dr.sc. Luki Valožiću na pruženoj pomoći prilikom pisanja diplomskog rada.*

*-Ne mogu vam dovoljno zahvalit za vašu pomoć. Vi ste ništa manje nego blagoslov od Boga*



## SADRŽAJ:

|   |    |
|---|----|
| UVOD.....   | 1  |
| 1. POVIJESNI RAZVOJ SUSTAVA KLASIFIKACIJE MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA .....          | 2  |
| 2. KLASIFIKACIJSKI SUSTAV SA TEHNOLOGIJOM DALJINSKOG MJERENJA                     | 5  |
| 2.1. Daljinska istraživanja.....  | 6  |
| 2.2. Sateliti za promatranje kopnenih površina.....                               | 8  |
| 2.3. Metode klasifikacije zemljišnog pokrivača snimljenih putem Landsata .....    | 11 |
| 2.3.1. Vizualni pristup .....   | 12 |
| 2.3.2. Digitalni brojevi.....   | 12 |
| 2.3.3. Principi klasifikacije Landsat digitalnih omotača zemljišta .....          | 13 |
| 2.4. RapidEye.....  | 14 |
| 2.5. Pasivni i aktivni senzori.....   | 17 |
| 2.5.1. Pasivni senzori.....   | 17 |
| 2.5.2. Aktivni senzori .....  | 18 |
| 2.5.3. Izbor podataka s daljinskog očitavanja.....                                | 18 |
| 2.6. Izbor sustava klasifikacije i uzorci obuke.....                              | 20 |
| 3. OPĆI POSTUPCI KLASIFIKACIJE SNIMAKA .....                                      | 21 |
| 3.1. Klasifikacija snimaka.....   | 22 |
| 3.2. Metode klasifikacije slika .....   | 23 |
| 3.3. Kriterij klasifikacije .....   | 25 |
| 3.4. Nenadzirana i nadzirana klasifikacija .....                                  | 27 |
| 3.5. Objektno-orijentirana analiza slika .....                                    | 28 |
| 3.6. Obrada nakon klasifikacije .....   | 32 |
| 4. ZNAČAJ MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA ZA GEOGRAFIJU .....                            | 33 |
| 5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA SUSTAVA KLASIFIKACIJE.....                    | 35 |
| 5.1. Pojavnost metoda i algoritama klasifikacije slika u daljinskom mjerenju..... | 36 |

|  |      |
|--|------|
| 5.1.1. Problem i predmet istraživanja..... | 37   |
| 5.1.2. Cilj istraživanja.....              | 37   |
| 5.1.3. Analiza korpusa .....               | 37   |
| 5.1.3.1. Metode klasifikacija .....        | 37   |
| 5.1.3.2. Algoritmi klasifikacija.....      | 39   |
| 6. REZULTATI .....                         | 40   |
| ZAKLJUČAK.....                             | 43   |
| LITERATURA.....                            | 44   |
| PRILOZI.....                               | VIII |

## UVOD

Klasifikacija multispektralnih snimaka je složen proces na koji mogu utjecati mnogi faktori. Znanstvenici i praktičari uložili su velike napore u razvoj naprednih pristupa i tehnika klasifikacije za poboljšanje točnosti, međutim klasificiranje podataka s daljinskog istraživanja u tematsku kartu ostaje izazov jer mnogi faktori, poput složenosti krajolika u istraživanom području, odabranih podataka s daljinskog mjerenja, te pristupa obrade slika i klasifikacije, mogu utjecati na uspjeh klasifikacije.

Cilj ovog rada je pružanje sažetka glavnih naprednih metoda i tehnika klasifikacije koji se koriste za poboljšanje točnosti klasifikacije, te razmatranje važnih pitanja koja utječu na multispektralne sustave daljinskih istraživanja s osvrtom na klasifikaciju zemljišnog pokrova.

Ovaj rad ispituje trenutnu praksu, metode i tehnike za obradu i klasifikaciju objekata na multispektralnim snimcima dobivenih putem daljinskih istraživanja. Naglasak je stavljen na sažimanje glavnih naprednih pristupa klasifikacije i tehnika koje se koriste za poboljšanje točnosti klasifikacije. Osim toga, raspravlja se o nekim važnim pitanjima koja utječu na performanse klasifikacije. Ovaj pregled literature i dosadašnjih istraživanja sugerira da je osmišljavanje odgovarajućeg postupka obrade snimka preduvjet za uspješnu klasifikaciju podataka sa daljinskog očitavanja u tematsku kartu. Učinkovita upotreba više značajki daljinski mjerljivih podataka i odabir odgovarajuće klasifikacijske metode posebno su značajni za poboljšanje točnosti klasifikacije. Neparаметarski klasifikatori, poput neuronske mreže, klasifikatora stabla odlučivanja i klasifikacije zasnovane na znanju, postaju sve važniji pristupi za klasifikaciju podataka s više izvora. Integracija daljinskog detektiranja, geografskih informacijskih sustava (GIS) i ekspertnog sustava pojavljuje se kao nova granica istraživanja. Međutim, potrebno je više istraživanja kako bi se identificirale i smanjile nesigurnosti u procesu obrade slika radi poboljšanja točnosti klasifikacije.

# 1. POVIJESNI RAZVOJ SUSTAVA KLASIFIKACIJE MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA

Općenito, daljinsko mjerenje nudi pokrivenost, kartiranje i klasifikaciju karakteristika površinskog zemljišta, kao što su vegetacija, tlo, vode i šume. Glavna primjena podataka daljinskog mjerenja je stvaranje klasifikacijske karte identificiranih ili značajnih obilježja ili klasa tipova zemljišnog pokrivača pa prema tome, osnovni proizvod je tematska karta s temama poput korištenja zemljišta, geologije i tipova vegetacije. Istraživanja o daljinskom mjerenju zasnovanom na klasifikaciji slika odavno su privukla interes zajednice daljinskog mjerenja budući da se većina okolišnih i društveno - ekonomskih aplikacija temelji na rezultatima klasifikacije.

Klasifikacija kopnenog pokrova Landsat snimaka jedna je od najvažnijih aplikacija razvijenih od satelita za promatranje Zemlje. Posljednja četiri desetljeća obilježene su različitim razvojem metode klasifikacije zemljišnog pokrivača na Landsat snimcima.

Metode klasifikacije zemljišnog pokrivača rasle zajedno s lansiranjem nove serije Landsat senzora i napretkom u računarstvu. Većina metoda klasifikacije inicijalno je razvijena 1970 -ih i 1980 -ih; međutim, u posljednjem desetljeću došlo je do velikog napretka u specifičnim klasifikatorima i algoritmima. Program Landsat, koji je nastao suradnjom američke svemirske agencije (NASA) i američke geološke službe (USGS), sastoji se od niza satelitskih misija (Landsat 1 – Landsat 9) koje su se kontinuirano unaprjeđivale te su jedan od najvažnijih izvora globalnih podataka. Prve metode klasifikacije zemljišnog pokrivača koje su primijenjene na snimke Landsat-a bile su analize ranih 1970-ih, nakon čega su uslijedile nerazgledane i nadzirane metode klasifikacije zasnovane na pikselima koje koriste klasifikatore najveće vjerojatnosti, K-means i Iterativnu samoorganizirajuću tehniku analize podataka (ISODAT) (Phiri i dr., 2017).

Od samih početaka, potrebe SAD-a za širokim pregledom nacionalnih obrazaca korištenja zemljišta i zemljišnog pokrivača te trendova i ekoloških vrijednosti dovele su do formiranja Međuresornog upravnog odbora za informacije i klasifikaciju korištenja zemljišta početkom 1971. godine. Dva sustava klasifikacije namjene zemljišta koje je James R. Anderson prvotno predložio za konferencijsku upotrebu osmišljena su tako da se oslanjaju na daljinsko mjerenje. Neke od kategorizacija neplodnog zemljišta i pašnjaka koje su istraživači usvojili su u ovom sustavu klasifikacije korištenja zemljišta i zemljišnog pokrivača.

Sustav klasifikacije za Inventar korištenja zemljišta i prirodnih resursa države New York, razvijen uglavnom u Centru za aerofotografske studije na Sveučilištu Cornell, bio je dizajniran za upotrebu sa snimanjem iz zraka u mjerilu 1: 24.000, i iako je specijalno osmišljen za državu New York. Kako bi iskoristili iskustvo iz New Yorka, Ernest E. Hardy i John T. Roach pozvani su na suradnju u pripremi konačnog okvira predložene klasifikacije. Definicije kategorija korištenja zemljišta koje se koriste u New Yorku pažljivo su pregledane i izmijenjene kako bi bile primjenjive na cijelu državu.

Sheme klasifikacije namjene zemljišta obično se odnose i na korištenje zemljišta i na zemljišni pokrov. Glavni sustav klasifikacije korištenja zemljišta koji je razvio Geološki zavod Sjedinjenih Država (USGS) ima više nivoa klasifikacije (Anderson i dr., 1976).

Kategorije unutar ovih nivoa su raspoređene u ugniježđenoj hijerarhiji. Najopćenitija ili zbirna klasifikacija (nivo I) uključuje široke kategorije korištenja zemljišta, poput „poljoprivrede“ ili „urbanog i izgrađenog“ zemljišta. Ovaj nivo klasifikacije se obično koristi za regionalne i druge velike primjene. Unutar svake klase I nivoa postoji niz detaljnijih (nivo II) klasa korištenja i zemljišnog pokrova. Na primjer, klasa „urbano i izgrađeno“ uključuje „stambene“, „komercijalne“ i „industrijske“ podklase. Unutar svake klase II nivoa, mogu se definirati i kartirati još detaljnije klase (nivoi III i IV). Odnosno, svaka lokacija unutar kartiranog područja može se klasificirati u jednu i samo jednu klasu unutar svakog nivoa. Ova četiri nivoa klasifikacije zajedno čine hijerarhijski sustav za opisivanje, praćenje i predviđanje korištenja zemljišta i promjena u površinskom pokrivaču. Ovaj standardizirani, višestupanjski klasifikacijski sustav omogućava prostorno eksplicitne usporedbe inventara namjene zemljišta provedenih tijekom vremena (Phiri i dr., 2017).

Nakon 1980. druge metode, poput sub-piksela, temeljene na znanju, kontekstualno zasnovane, objektno-analize slike (OBIA) i hibridni pristupi postale su uobičajene u klasifikaciji zemljišnog pokrova. Postizanje najboljih rezultata klasifikacije s Landsat slikama zahtijeva posebnu pozornost na specifikacije svake metode klasifikacije, kao što je odabir odgovarajućih uzoraka za obuku, odabir odgovarajuće ljestvice segmentacije za OBIA, kalibriranje prije obrade, odabir pravog klasifikatora i upotreba odgovarajućih Landsat slika. Sve ove metode klasifikacije primijenjene na Landsat slikama imaju dobre i loše strane. Većina studija je izvijestila o superiornom učinku OBIA -e na različitim krajolicima, poput poljoprivrednih površina, šuma, gradskih naselja i močvara; međutim, OBIA ima izazove poput odabira optimalne skale segmentacije, što može rezultirati

prekomjernom ili premalom segmentacijom, te niskom prostornom rezolucijom Landsat slika. Druge metode klasifikacije imaju potencijal proizvesti točne rezultate klasifikacije ako se poštuju odgovarajuće procedure. Potrebno je više istraživanja o primjeni hibridnih klasifikatora jer se smatraju složenijim metodama za klasifikaciju zemljišnog pokrivača (Anderson i dr., 1976).

Ono što je značajno doprinijelo razvoju metoda tumačenja slika jeste poboljšanje računalnog softvera i hardvera kroz razvoj tehnika prepoznavanja uzoraka. Uvođenje numeričkih algoritama za prepoznavanje uzoraka bio je veliki napredak u klasifikaciji zemljišnog pokrivača i osnova je modernih metoda klasifikacije.

Od lansiranja prvog satelita, Landsat 1, 1972. godine, program Landsat lansirao je sedam drugih satelita, šest od njih je uspješno lansirano, sa ciljevima održavanja kontinuiteta misije praćenja Zemlje i razvoja poboljšanja senzora. Program Landsat nudi četiri vrste slika:

1. Multispektralni skener (MSS) kompanije Landsat 1, 2 i 3;
2. Tematske karte (TM) proizvođača Landsat 4 i 5, koji su također pružali MSS slike;
3. Poboljšane tematske karte (ETM+) kompanije Landsat 7;
4. Operativni uređaj za snimanje zemljišta (OLI) koje pruža Landsat 8 i 9 (Wulder i dr., 2016).

Landsat MSS, TM, ETM+ i OLI korišteni su u klasifikaciji zemljišnog pokrivača različitim metodama klasifikacije zemljišnog pokrivača. Kako bi se održao kontinuitet u pružanju Landsat podataka, Landsat 9 će biti pokrenut 2023. godine s poboljšanim kvalitetama.

Ono što je očito jeste da je u posljednja četiri desetljeća došlo do razvoja klasifikacije zemljišnog pokrivača, poput rezolucije, znanja, objekata i mnogih drugih algoritama klasifikacije.

Nadalje, promjena Landsat politike pristupa podacima iz komercijalnog u slobodan pristup 2008. godine i pojava računalnih mogućnosti visokih performansi dovele su do šire primjene ovih metoda klasifikacije daljinskog mjerenja na Landsat slike.

## 2. KLASIFIKACIJSKI SUSTAV SA TEHNOLOGIJOM DALJINSKOG MJERENJA

Istražujući dostupnu literaturu, može se reći da ne postoji jedna idealna klasifikacija korištenja zemljišta i zemljišnog pokrova, a malo je vjerojatno da bi se ona ikada mogla razviti. Odnosno, u procesu klasifikacije postoje različite perspektive, a sam proces teži subjektivnosti, čak i kada se koristi objektivni numerički pristup jer se načini korištenja zemljišta i pokrivenosti zemljišta mijenjaju u skladu sa zahtjevima za prirodnim resursima.

Svaka klasifikacija je napravljena tako da odgovara potrebama korisnika, a mali broj korisnika će biti zadovoljan inventarom koji ne zadovoljava većinu njihovih potreba.

Uređaji za oblikovanje slike na daljinsko upravljanje ne bilježe aktivnosti direktno. Daljinski senzor dobiva odgovor koji se temelji na mnogim karakteristikama površine zemlje, uključujući prirodni ili umjetni pokrov. Tumač koristi uzorke, tonove, teksture, oblike i asocijacije lokacija kako bi izveo informacije o aktivnostima korištenja zemljišta iz onoga što je u osnovi informacija o zemljišnom pokrovu. Neke aktivnosti čovjeka, međutim, ne mogu biti izravno povezane s vrstom zemljišnog pokrova. Opsežne rekreacijske aktivnosti koje pokrivaju velike površine zemljišta nisu posebno podložne tumačenju iz podataka udaljenih senzora. Na primjer, lov je vrlo česta i sveprisutna rekreacijska upotreba zemljišta, ali lov se obično događa na zemljištu koje bi bilo klasificirano kao neka vrsta šume, pašnjaka ili poljoprivrednog zemljišta bilo tijekom snimanja tla ili tumačenja slike (Anderson i dr., 1976).

Iz ovih razloga, vrste korištenja zemljišta i zemljišnog pokrova koji se mogu identificirati prvenstveno iz podataka udaljenih senzora koriste se kao osnova za organizaciju ovog sustava klasifikacije. Korisnici koji zahtijevaju detaljnije informacije o korištenju zemljišta možda će morati upotrijebiti dodatne podatke. Jer može se reći da se u gotovo bilo kojem procesu klasifikacije rijetko mogu pronaći jasno definirane klase koje bi neko želio.

Sustav klasifikacije mora omogućiti uključivanje svih dijelova proučavanog područja, a trebao bi osigurati i referentnu jedinicu za svaku vrstu korištenja zemljišta i vrstu pokrivača. Problem popisa i klasifikacije višestruke upotrebe koji se javlja na jednoj parceli zemljišta neće se lako riješiti. Istovremeno se može dogoditi višestruka upotreba, kao na primjer poljoprivredno zemljište ili šumsko zemljište koje se koristi za rekreativne aktivnosti poput lova ili kampiranja. Do upotrebe može doći i naizmjenično, poput velikog rezervoara koji

osigurava kontrolu poplava tijekom proljetnog otjecanja i generiranje energije tijekom perioda najveće zimske potražnje. Isti rezervoar može imati dovoljnu dubinu vode da se može ploviti komercijalnim transportom tijekom cijele godine, a može dodatno pružiti ljetne mogućnosti za rekreaciju (Anderson i dr., 1976).

Kao što vidimo, koncepti koji se odnose na pokrivanje i aktivnosti korištenja zemljišta usko su povezani i u mnogim slučajevima su korišteni naizmjenično. Svrhe u koje se zemljišta koriste obično imaju povezane vrste pokrivača, bilo da su to šumske, poljoprivredne, stambene ili industrijske. Očigledno je da se sve ove aktivnosti ne bi mogle vidjeti na jednoj fotografiji iz zraka.

## 2.1. Daljinska istraživanja

Daljinska su istraživanja (engl. remote sensing) niz naprednih metodoloških i tehničkih rješenja za prikupljanje informacija s površine Zemlje, iz atmosfere i oceana. Temelje se na postupcima transformacije elektromagnetskog zračenja u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra u smislene oblike i pojave. S obzirom na izvore elektromagnetskog zračenja, metode daljinskih istraživanja dijele se na aktivne i pasivne, od kojih se prve temelje na detekciji energije koja se pojavljuje od prirode, kao što je reflektirajuće Sunčevo zračenje s površine Zemlje. Aktivne metode koriste se vlastitim izvorom elektromagnetskog zračenja čiji se odbljesak od Zemljine površine povratno detektira i analizira. U prvu skupinu pripadaju tzv. optički multispektralni i hiperspektralni senzori koji detektiraju refleksiju u različitim valnim duljinama, a u drugu skupinu radarski senzori odnosno SAR (engl. synthetic aperture radar). S obzirom na sustave odnosno letjelice na kojima se nalaze instrumenti za detekciju, opažanja dijelimo na satelitska, opažanja iz zrakoplova odnosno aerofoto te u današnje vrijeme sve učestalija opažanja pomoću bespilotnih letjelica (Pilaš i dr., 2019).

Daljinsko snimanje je proces otkrivanja i praćenja fizičkih karakteristika područja mjerenjem njegovog reflektiranog i emitiranog zračenja na udaljenosti (obično sa satelita ili aviona). Daljinski senzori prikupljaju podatke otkrivajući energiju koja se reflektira od Zemlje. Ovi senzori mogu biti na satelitima ili montirani na avionima. Daljinski senzori mogu biti pasivni ili aktivni. Pasivni senzori reagiraju na vanjske podražaje. Oni bilježe prirodnu energiju koja se reflektira ili emitira sa Zemljine površine. Najčešći izvor zračenja koju detektiraju pasivni senzori je reflektirana sunčeva svjetlost. Nasuprot tome, aktivni senzori koriste interne stimulanse za prikupljanje podataka o Zemlji. Na primjer, sustav



daljinskog senzora laserskog snopa projektira laser na površinu Zemlje i mjeri vrijeme potrebno da se laser reflektira natrag do svog senzora (García-Mora i dr., 2019).

Kao znatan doprinos poboljšanju kontinuiteta i frekvencije globalnih opažanja, u programu GMES (Global Monitoring for Environment and Security) europske svemirske agencije (ESA) od nedavno je uspostavljen novi sustav optičkih satelitskih opažanja zvan Sentinel (ESA 2012). Sustav Sentinel sastoji se od dva satelita, Sentinel-2A (lansiran 2015. godine) i Sentinel-2B (lansiran 2017. godine), koji omogućavaju globalno ponovljeno snimanje Zemljine površine u intervalu od 5 dana u prostornoj rezoluciji od 10 metara odnosno 30 metara. Sentinel misija postala je temeljnim sustavom globalnih satelitskih opažanja što ih provodi ESA, čija je prednost da je prema optičkim karakteristikama senzora u velikoj mjeri usporediva s NASA-USGS misijom Landsat 8 i zajednički omogućava globalni ciklus opažanja Zemljine površine u prosjeku svakih 2,9 dana. Kombinirano korištenje većeg broja satelita znatno povećava vjerojatnost dobivanja uporabljivih snimaka Zemljine površine bez naoblake, kao jednog od najčešćih ograničenja kod pasivnih optičkih satelitskih senzora (Li i Roy 2017). Za razliku od navedenih satelitskih senzora srednje prostorne rezolucije (10–30 m), trenutačno se u orbiti nalazi i niz komercijalnih satelita sa sensorima visoke odnosno vrlo visoke rezolucije od 30 cm do 5 m. Prvi komercijalni satelit visoke rezolucije, IKONOS, lansiran je 1998. godine. Od tada pa do danas razvijen je niz senzora koji omogućavaju vrlo precizno razlučivanje detalja na snimkama: RapidEye (5 m), PlanetScope (3 m), QuickBird (60 cm), WorldView-1 i 2 (50 cm), GeoEye-1 (50 cm), WorldView-3 i 4 (30 cm) (Pilaš i dr., 2019).

U većini istraživanih studija, istraživači kombiniraju oba pojma zemljišni pokrov i korištenje zemljišta kao pokrov zemljišta u kojem je prirodna vegetacija označena pokrivačem zemljišta te poljoprivredna i urbana područja koja se tiču korištenja zemljišta. To su dvije razlike, doista, a pitanja između pokrova zemljišta i korištenja zemljišta su temeljna jer se općenito zanemaruju ili zaboravljaju. Nejasnoće i zabuna između ova dva koncepta dovode do praktičnih problema, osobito kada se informacije s oba senzora moraju uskladiti, usporediti i/ili povezati za kartiranje zemljine površine. Kartiranje zemljine površine su oblici korištenja zemljišta i pokrov koji karakteriziraju zemljinu površinu u bilo kojem traženom mjerilu. Često se kartiranje zemljišnog pokrivača (LCM) koristi kao grupna riječ, koja sugerira ili kartu ili kombinaciju obje vrste; zemljišni pokrov i korištenje zemljišta.

## 2.2. Sateliti za promatranje kopnenih površina

Razvoju satelitskog promatranja Zemlje pridonio je uspjeh prvog meteorološkog satelita sredinom prošlog stoljeća. Mnogi vremenski sateliti također se koriste za promatranje Zemljine površine. Međutim, ovi sateliti nisu dizajnirani za precizno kartiranje Zemljine površine, tako da postoji cijela skupina satelita sa sensorima namijenjenim promatranju Zemljine površine, a to su:

- Landsat sateliti su opremljeni sa različitim sensorima: Return Beam Vidicon (RBV), MultiSpectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Najpopularniji senzor u ranijim danima Landsat-a bio je MultiSpectral Scanner (MSS), a nakon njega Thematic Mapper (TM), a u Landsatu 7 bila je poboljšana verzija Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Landsat 8 lansiran je 11.02.2013. godine i ima dva nova spektralna kanala: duboki plavi kanal za priobalne vodene površine i studije aerosola i kanal za otkrivanje cirusa (visoki i tanki oblaci sastavljeni od ledenih kristala). Toplinski infracrveni senzor prikuplja podatke u dva toplinska kanala sa dugim valnim duljinama.

Tab. 1. Karakteristike senzora satelita Landsat 8

| Redosljed bendova | Valna duljina (nm) | Spektralni kanal          | Rezolucija (m) |
|-------------------|--------------------|---------------------------|----------------|
| 1                 | 430–450            | Obalni aerosol            | 30             |
| 2                 | 450–510            | Plava                     | 30             |
| 3                 | 530–590            | Zelena                    | 30             |
| 4                 | 640–670            | Crvena                    | 30             |
| 5                 | 850–880            | Blizak infracrvenom       | 30             |
| 6                 | 1570–1650          | Kratkovalni infracrveni 1 | 30             |
| 7                 | 2110–2290          | Kratkovalni infracrveni 2 | 30             |
| 8                 | 1360–1380          | Cirrus                    | 30             |
| 1                 | 10600–11190        | Toplinski infracrveni 1   | 100            |
| 2                 | 11500–12510        | Toplinski infracrveni 2   | 100            |
| 1                 | 500–680            | Pankromatska              | 15             |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI; Landsat Science – NASA (01.04.2022.)

- SPOT- Kod starijih satelita SPOT 1 do 3 bila su 3 multispektralna kanala, dok su kod novijih satelita po 4 multispektralna kanala. Najnoviji sateliti SPOT 6 i 7 ima poboljšanu prostornu rezoluciju, jer pankromatski snimci mogu ostvariti rezoluciju od 1,5 m.

Tab. 2. Karakteristike senzora satelita SPOT 5, 6 i 7

| <i>Satelit</i> | <i>Redosljed bendova</i> | <i>Valna duljina (nm)</i> | <i>Spektralni kanal</i> | <i>Rezolucija (m)</i> |
|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| SPOT 5         | 1                        | 500–590                   | Zelena                  | 10                    |
|                | 2                        | 610–680                   | Crvena                  | 10                    |
|                | 3                        | 790–890                   | Blizak infracrvenom     | 10                    |
|                | 4                        | 1580–1750                 | Kratkovalni infracrveni | 20                    |
|                | 1                        | 510–730                   | Pankromatska            | 2,5 ili 5             |
| SPOT 6 i 7     | 1                        | 450–520                   | Plava                   | 6                     |
|                | 2                        | 530–590                   | Zelena                  | 6                     |
|                | 3                        | 625–695                   | Crvena                  | 6                     |
|                | 4                        | 760–890                   | Blizak infracrvenom     | 6                     |
|                | 1                        | 450–745                   | Pankromatska            | 1,5                   |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI

- IKONOS- Satelit IKONOS je prvi komercijalni visokorezolucijski satelit za promatranje zemljine površine, ima 4 multispektralna kanala. Oni se u potpunosti podudaraju sa prva 4 kanala Landsat TM i ETM+. Pomoću kojih skuplja elektromagnetsko zračenje u plavom, zelenom, crvenom i infracrvenom spektru.

Tab. 3. Karakteristike senzora satelita IKONOS

| <i>Redosljed bendova</i> | <i>Valna duljina (nm)</i> | <i>Spektralni kanal</i> |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1                        | 526–929                   | Pankromatska            |
| 1                        | 445–516                   | Plava                   |
| 2                        | 506–595                   | Zelena                  |
| 3                        | 632–698                   | Crvena                  |
| 4                        | 757–863                   | Blizak infracrvenom     |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI

- QuickBird satelit je jedan od najpreciznijih sustava za promatranje Zemlje, lansiran je 2001. godine. Satelit se nalazi na visini od 450km, što je znatno manje od drugih satelita za praćenje i zbog toga postiže veći rezoluciju. Zemlju promatra u istim spektralnim kanalima kao IKONOS i djelomično kao Landsat. Rezolucija u pankromatskom kanalu varira od 61 cm do 72 cm.

Tab. 4. Karakteristike senzora satelita QuickBird

| <i>Redoslijed bendova</i> | <i>Valna duljina (nm)</i> | <i>Spektralni kanal</i> |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1                         | 450–900                   | Pankromatska            |
| 1                         | 450–520                   | Plava                   |
| 2                         | 520–600                   | Zelena                  |
| 3                         | 630–690                   | Crvena                  |
| 4                         | 760–900                   | Blizak infracrvenom     |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI

- WorldView-1 lansiran je 2007.g, pankromatski snimaka mu je rezolucije 0,5 m i nalazi se na nadmorskoj visini od 496 km. Prosječno vrijeme ponovne posjete od 1,7 dana.

WorldView-2 lansiran je 2009. g., komercijalni satelit s 8 multispektralnih kanala i nalazi se na nadmorskoj visini od 770 km. Prosječno vrijeme ponovne posjete od 1,1 dana.

WorldView-3- lansiran je 2014. g., pankromatska snimka mu je rezolucija 0,31 m i nalazio se na nadmorskoj visini od 617 km. Prosječno vrijeme ponovne posjete je manja od 1 dana.

WorldView-4 lansiran je 2016. g., pankromatski snimak mu je rezolucije 0,31 m. 2019. godine je umirovljen zbog kvara.

Tab. 5. Karakteristike senzora satelita WorldView-1, 2, 3 i 4

| <i>Satelit</i> | <i>Redoslijed bendova</i> | <i>Valna duljina (nm)</i> | <i>Spektralni kanal</i> | <i>Rezolucija (m)</i> |
|----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| WorldView-1    | 1                         | 400–900                   | Pankromatska            | 0,5                   |
| WorldView-2    | 1                         | 450–800                   | Pankromatska            | 0,48                  |
|                | 1                         | 400–450                   | Obalno plava            | 1,85                  |
|                | 2                         | 450–510                   | Plava                   | 1,85                  |
|                | 3                         | 510–580                   | Zelena                  | 1,85                  |
|                | 4                         | 585–625                   | Žuta                    | 1,85                  |
|                | 5                         | 630–690                   | Crvena                  | 1,85                  |
|                | 6                         | 705–745                   | Crveni rub              | 1,85                  |
|                | 7                         | 770–895                   | Blizak infracrvenom 1   | 1,85                  |
| WorldView-3    | 8                         | 860–1040                  | Blizak infracrvenom 2   | 1,85                  |
|                | 1                         | 450–800                   | Pankromatska            | 0,31                  |
|                | 1                         | 400–450                   | Obalno plava            | 1,24                  |
|                | 2                         | 450–510                   | Plava                   | 1,24                  |
|                | 3                         | 510–580                   | Zelena                  | 1,24                  |
|                | 4                         | 585–625                   | Žuta                    | 1,24                  |
|                | 5                         | 630–690                   | Crvena                  | 1,24                  |

|             |   |           |                           |      |
|-------------|---|-----------|---------------------------|------|
|             | 6 | 705–745   | Crveni rub                | 1,24 |
|             | 7 | 770–895   | Blizak infracrvenom 1     | 1,24 |
|             | 8 | 860–1040  | Blizak infracrvenom 2     | 1,24 |
|             | 1 | 1195–1225 | Kratkovalni infracrveni 1 | 3,70 |
|             | 2 | 1550–1590 | Kratkovalni infracrveni 2 | 3,70 |
|             | 3 | 1640–1680 | Kratkovalni infracrveni 3 | 3,70 |
|             | 4 | 1710–1750 | Kratkovalni infracrveni 4 | 3,70 |
|             | 5 | 2145–2185 | Kratkovalni infracrveni 5 | 3,70 |
|             | 6 | 2185–2225 | Kratkovalni infracrveni 6 | 3,70 |
|             | 7 | 2235–2285 | Kratkovalni infracrveni 7 | 3,70 |
|             | 8 | 2295–2365 | Kratkovalni infracrveni 8 | 3,70 |
| WorldView-4 | 1 | 450–800   | Pankromatska              | 0,31 |
|             | 1 | 450-510   | Plava                     | 1,23 |
|             | 2 | 510-580   | Zelena                    | 1,23 |
|             | 3 | 655-690   | Crvena                    | 1,23 |
|             | 4 | 780-920   | Bliski infracrveni        | 1,23 |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI

- Rapid Eye su prvi komercijalni sateliti koji imaju rubni crveni kanal, koji je osjetljiv na promjene u sadržaju zelenog biljnog zelenila. Kroz istraživanja može pomoći prilikom praćenja zdravlja vegetacije.

Tab. 6. Karakteristike senzora satelita RapidEye

| <i>Redoslijed bendova</i> | <i>Valna duljina (nm)</i> | <i>Spektralni kanal</i> |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1                         | 440–510                   | Plava                   |
| 2                         | 520–590                   | Zelena                  |
| 3                         | 630–685                   | Crvena                  |
| 4                         | 690–730                   | Crveni rub              |
| 5                         | 760–850                   | Blizak infracrvenom     |

Izvor: Izradio autor prema dobivenim podacima s web stranice ESRI

### 2.3. Metode klasifikacije zemljišnog pokrivača snimljenih putem Landsata

Postoji nekoliko metoda klasifikacije, a brojna polja osim daljinskog mjerenja, poput analize slike i prepoznavanja uzoraka, koriste značajan koncept, klasifikaciju. U nekim slučajevima sama klasifikacija može činiti entitet analize i poslužiti kao krajnji proizvod. U drugim slučajevima, klasifikacija može poslužiti samo kao posrednički korak u složenijim analizama, poput studije degradacije zemljišta, studija procesa, modeliranja krajolika, upravljanja obalnim područjem, upravljanja resursima i te druge aplikacija za praćenje okoliša. Kao rezultat toga, klasifikacija slika se pojavila kao značajno oruđe za istraživanje digitalnih slika. Štoviše, odabir odgovarajuće tehnike klasifikacije koja će se primijeniti može imati značajan utjecaj na rezultate o tome koristi li se klasifikacija kao krajnji proizvod

ili kao jedan od brojnih analitičkih postupaka koji se primjenjuju za izvođenje informacija iz slike za dodatne analize.

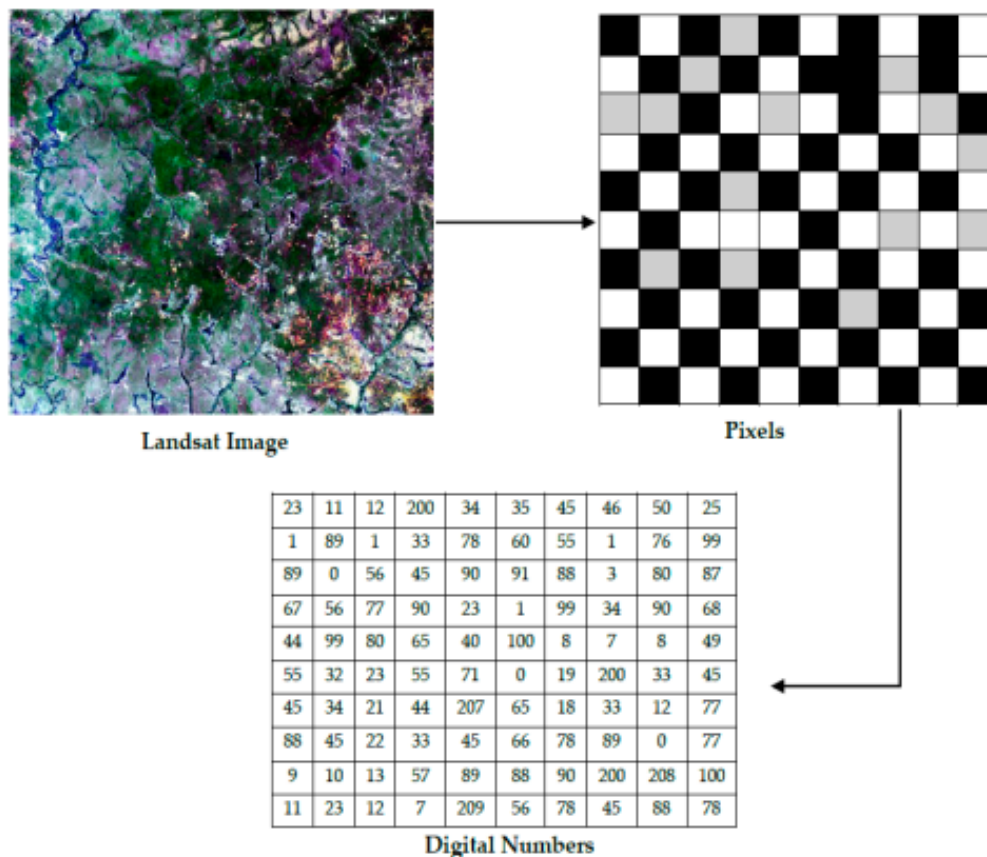
### **2.3.1. Vizualni pristup**

Rane metode klasifikacije kopnenog pokrivača Landsat-a bile su slične onima koje su se koristile u konvencionalnim interpretacijama fotografija iz zraka 1950-ih i 1960-ih. Općenito, Landsat slike korištene su na isti način kao i fotografije iz zraka, koje su bile bogat izvor informacija za prostorno karakteriziranje krajolika na kartografskim kartama različitih razmjera. Početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća putem Landsat-a se klasificirao zemljišni pokrov vizualno i ručno. To je učinjeno ispitivanjem štampanih snimaka iz zraka (Haack i dr., 1987).

Haack je spomenuo da su slike u štampanom formatu i da su dobivene kao crno -bijejele kompozitne ili pojedinačne trake. Rana klasifikacija zemljišnog pokrivača sa snimcima Landsat-a uključivala je sustavno ocrtavanje klasa zemljišnog pokrivača označavanjem granica vrsta pokrivača korištenjem prozirnih površina. U završnoj fazi klasifikacije, tipovi zemljišnog pokrivača označeni su posebnim simbolima za razlikovanje tipova zemljišnog pokrivača. U vizualnoj klasifikaciji, ocrtavanje pokrivača zemljišta temeljilo se na razlikama u tonovima, oblicima, veličinama i uzorcima. Ekstenzije zemljišnog pokrivača izračunate su na osnovu izvedenih ljestvica odnosa udaljenosti slike i stvarne udaljenosti na tlu.

### **2.3.2. Digitalni brojevi**

Napredak u klasifikaciji digitalnog pokrivača zasniva se na numeričkoj manipulaciji digitalnim brojem ili vrijednostima svjetline snimaka daljinskim ispitivanjem. Tako se digitalne slike sastoje od slikovnih elemenata nazvanih pikseli koji se nalaze na sjecištu svakog reda i stupca slike.



Sl. 1. Primjer slike daljinskog mjerenja koja prikazuje piksele i digitalne brojeve; strelica pokazuje napredak u nivou detalja informacija koje se mogu izvući iz slika.

Izvor: MDPI

Što su niže vrijednosti digitalnih brojeva, niže je zračenje predstavljeno u tom pikselu. Promjene vrijednosti zračenja u pikselima predstavljaju varijacije površina pokrivača. Vrijednosti digitalnih brojeva su prikazane u pikselima pojedinačnih slika; međutim, slike Landsat –a prikazane su kao multispektralne slike na kojima se ista scena snima istovremeno u nekoliko opsega elektromagnetskog spektra. Digitalna obrada slike uključuje matematičku transformaciju digitalnih vrijednosti kako bi se dobile korisne informacije koje se odnose na vrste pokrivača (Phiri i dr., 2017).

### 2.3.3. Principi klasifikacije Landsat digitalnih omotača zemljišta

Program Landsat doprinio je brzom i širokoj upotrebi digitalne analize satelitskih snimaka za promatranje Zemlje jer su to bili jedini dostupni satelitski snimci ranih 1970-ih. Krajem 1970-ih, digitalna analiza slika putem računala provedena je samo u specijaliziranim

istraživačkim institucijama; osobna računala i mnogi softverski paketi za daljinsko ispitivanje koji su sada dostupni, nisu postojali.

Razvoj tehnologije daljinskog mjerenja napredovao je u skladu s razvojem GIS-a koji je pružio platformu za unošenje podataka daljinskih mjerenja i drugih geoprostornih informacija u zajednički okvir. Rane automatske metode obrade slike mogu se klasificirati kao tehnike djelomičnog filtriranja ili metode numeričke klasifikacije. Metode prostornog filtriranja bave se transformacijom slika u korisnije oblike i uključuju procese poput zaglađivanja, izoštravanja i izdvajanja značajki. Pristup numeričke klasifikacije jedan je od najvažnijih razvoja u prepoznavanju uzoraka i temelj je modernih metoda klasifikacije zemljišnog pokrivača.

Općenito, prepoznavanje uzoraka koristi sličnosti među objektima u klasifikaciji tipova zemljišnog pokrivača. Suvremene metode klasifikacije razvijene su od ranih tehnika prepoznavanja uzoraka i implementirane su na računalnim automatiziranim programima kroz mehaničko učenje i teorije o umjetnoj inteligenciji (Steiner, 1970).

Najčešći tipovi sličnosti koji se koriste u prepoznavanju uzoraka temelje se na korelaciji i euklidskoj udaljenosti između objekata. U klasifikaciji se ove tehnike mogu koristiti kao jedna tehnika, međutim, Steiner je izvijestio da kombinacija dviju tehnika daje vrhunske rezultate. Drugi važni aspekti prepoznavanja uzoraka koji se koriste u klasifikaciji su tehnike diskriminacije i grupiranja. Tehnike diskriminacije korisne su za uspostavljanje granica između obrazaca, koji su prepoznati na osnovu sličnih svojstava. Ove metode koriste metode linearne ili nelinearne transformacije ovisno o normalnoj distribuciji daljinskog senzora.

Steiner je izvijestio da metode linearne diskriminacije daju rezultate koji su precizniji od linearnih metoda. Tehnike grupiranja korisnije su za uspostavljanje grupa homogenih karakteristika. Općenito, glavna briga u prepoznavanju uzoraka je optimizacija diskriminacije i grupiranja klasa (Barnsley, 1999).

## **2.4. RapidEye**

RapidEye koji čini pet satelita izdvaja se od ostalih pružatelja geoprostornih informacija zasnovanih na satelitima po svojoj jedinstvenoj sposobnosti da svakodnevno prikuplja podatke o slikama velike površine visoke rezolucije. Sustav rapidEye može prikupiti podatke od 4 milijuna kvadratnih kilometara dnevno pri nominalnoj rezoluciji od 6,5 metara. Svaki satelit je veličine jednog kubnog metra i teži 150 kg, a dizajniran je za najmanje sedam

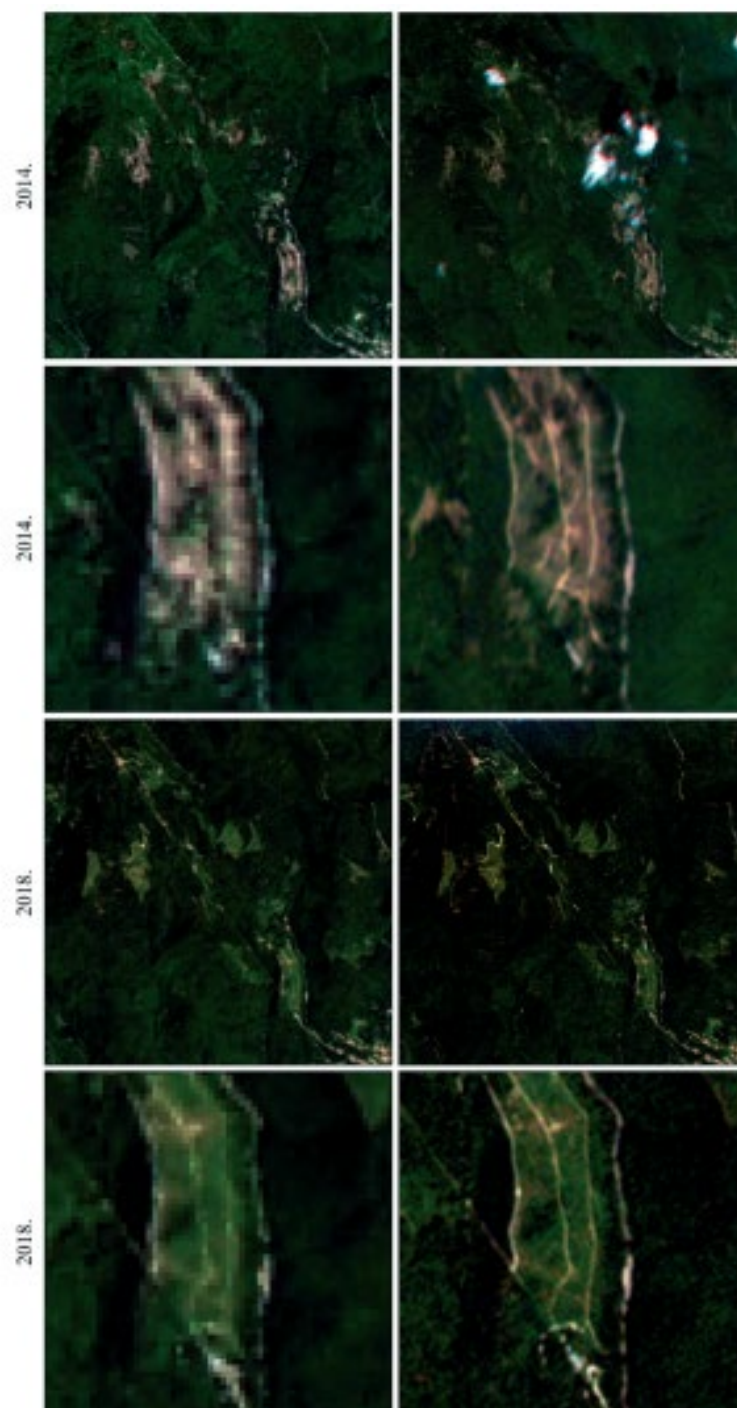


godina trajanja misije. Svih pet satelita opremljeno je identičnim sensorima i nalazi se u istoj orbitalnoj ravni (Planet.com, 2016).

Proizvod RapidEye Basic je radiometrijski i senzorski ispravljen, pružajući slike snimljene sa svemirske letjelice bez korekcije za bilo kakva geometrijska izobličenja svojstvena procesu snimanja, i nije preslikan u kartografsku projekciju. Podaci o slikama popraćeni su svom telemetrijom svemirskih letjelica potrebnom za obradu podataka u geo-korigirani oblik, ili kada su upareni sa stereo parom, za generiranje digitalnih podataka o visini. Rezolucija slika je 6,5 metara GSD na nadiru. Slike se ponovo uzorkuju u koordinatni sustav definiran idealnim osnovnim modelom kamere za poravnanje opsega (Planet.com, 2016).

Tijekom 2019. godine urađeno je istraživanje u kojem su dani prikaz i usporedba satelitskih informacija srednje (Landsat 8, 30 m) i visoke (RapidEye, 5 m) rezolucije radi ispitivanja mogućnosti vizualne i kvantitativne procjene šteta od vjetroizvala na Medvednici, nakon oluje Teodor u studenome 2013. godine, te obnove šumskog pokrova u 2018., odnosno nakon pet godina. Za vizualno otkrivanje šteta na čitavom području korišten je 3D prikaz, u 15 m prostornoj rezoluciji, izveden iz RGB kanala vidljivog dijela spektra, izoštren pomoću pankromatskoga kanala. Prostorna razlučivost različitih satelitskih indeksa (NDVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NBR, NBR2), kao kvantitativne mjere stanja vegetacijskog pokrova, ispitivana je na temelju snimaka Landsat 8 na čitavom području Medvednice.

Na slici 2 možemo vidjeti usporedbu snimaka Landsat 8 i RapidEye iz 2014. i 2018. godine na lokaciji vjetroizvala uz područje potoka Bliznec.



Sl. 2. Lijevo Landsat; desno RapidEye

Izvor: Pilaš I. I dr., Geod. list 2019.

Na ispitivanom dijelu površine s vjetroizvalom, neposredno uz potok Bliznec, utvrđena je znatna komparativna prednost snimaka visoke rezolucije (RapidEye) pri razlučivanju šteta na pokrovu odnosno pri praćenju stanja obnove šumske vegetacije.

## 2.5. Pasivni i aktivni senzori

Kombiniranje raznovrsnih skupova podataka s više satelitskih senzora s naprednim tematskim pronalaženjem informacija je moćan način za proučavanje složenih zemaljskih sustava. Kada je riječ o sensorima posebnu kategoriju predstavljaju pasivni i aktivni senzori.

### 2.5.1. Pasivni senzori

Pasivni senzori koji se koriste u daljinskim senzorskim sustavima mjere sjaj koji odgovara svjetlini duž smjera prema senzoru. Zbog procesa prijenosa zračenja, senzori se koriste za mjerenje zbroja izravne i neizravne refleksije koja je definirana kao omjer reflektirane i ukupne energije. Pasivni senzori imaju različite primjene vezane za ekologiju, urbano planiranje, geologiju, hidrologiju, meteorologiju, znanost o okolišu i znanost o atmosferi.

Pasivni satelitski senzori u svemiru pružaju mogućnost stjecanja globalnih promatranja Zemlje. Većina pasivnih senzora može detektirati refleksiju (tj. vidljivu svjetlost), emisiju (tj. infracrvene i toplinske infracrvene) i/ili mikrovalne dijelove elektromagnetskog spektra korištenjem različitih vrsta radiometara (Chang i dr., 2018):

- Radiometar koji predstavlja instrument za daljinsko ispitivanje koji mjeri intenzitet elektromagnetskog zračenja u nekim vidljivim, infracrvenim ili mikrovalnim pojasevima unutar spektra;
- Hiperspektralni radiometar koji predstavlja napredni instrument za daljinsko otkrivanje koji može detektirati stotine uskih spektralnih pojaseva u vidljivom, bliskom infracrvenom i srednjem infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra. Ovaj tip senzora, koji ima vrlo visoku spektralnu razlučivost, može provesti finu diskriminaciju između različitih ciljeva na temelju njihovog spektralnog odgovora u vezi sa svakim od uskih pojasa.
- Slikovni radiometar koji podrazumijeva instrument za daljinsko otkrivanje, a koji ima sposobnost skeniranja za generiranje dvodimenzionalnog niza piksela iz kojih se može proizvesti slika ciljeva. Skeniranje se može izvesti elektronički ili mehanički pomoću niza detektora.

### **2.5.2. Aktivni senzori**

Aktivni senzor u daljinskim senzorskim sustavima je radar, laser ili akronim za detekciju svjetlosti i dometa (LiDAR). Ovo je instrument koji se koristi za otkrivanje, mjerenje i analizu signala koje senzor prenosi, a koji se reflektiraju, lome ili raspršuju od površine Zemlje i/ili njegovu atmosferu. Aktivni senzori imaju razne primjene vezane za hidrologiju, meteorologiju, ekologiju, znanost o okolišu i znanost o atmosferi.

Aktivni senzor za detekciju i domet svjetla (LiDAR) dizajniran je za mjerenje udaljenosti pri čemu predmet slikanja osvjetljava impulsnim svjetlosnim pojačanjem kroz stimuliranu emisiju zračenja (laserskog) svjetla i mjerenje reflektiranih impulsa (povratno raspršeno ili reflektirano svjetlo). Navedena udaljenost je jednaka brzini pomnoženoj s vremenom, pa se udaljenost do objekta izračunava bilježenjem vremena između odaslanih i povratno raspršenih impulsa pomnoženog brzinom svjetlosti (Chang i dr., 2018).

Laserski visinomjer je instrument koji je dizajniran za LiDAR-a kako bi imao mogućnost mjerenja visine Zemljine površine. On djeluje tako što emitira kratke bljeskove laserskog svjetla prema površini Zemlje, pri čemu se visina razine mora ili tla, u odnosu na srednju površinu Zemlje, tada izračunava vremenom provedenim između emitiranih i reflektiranih impulsa pomnoženim brzinom svjetlosti kako bi se proizvela topografija podloge.

Mikrovalni instrumenti koji su dizajnirani za finiji nadzor okoliša i promatranje zemlje mogu uključivati, ali nisu ograničeni na (Chang i dr., 2018):

- Scatterometer - visokofrekventni mikrovalni radar koji je dizajniran za mjerenje povratno raspršenog zračenja preko oceanskih površina kako bi se izvele karte brzine i smjera površinskog vjetera, te
- Sonder - aktivni senzor koji posebno mjeri vertikalnu distribuciju atmosferskih karakteristika kao što su vlažnost, temperatura, te sastav oblaka i oborine.

### **2.5.3. Izbor podataka s daljinskog očitavanja**

Podaci daljinski otkriveni, uključujući zračne i svemirske senzorske podatke, variraju u prostornim, radiometrijskim, spektralnim i vremenskim rezolucijama. Razumijevanje prednosti i slabosti različitih tipova senzorskih podataka od suštinskog je značaja za odabir odgovarajućih daljinski izmjerenih podataka za klasifikaciju slika (Barnsley, 1999).

Neka prethodna literatura razmatrala je karakteristike glavnih vrsta podataka daljinskog mjerenja. Na primjer, znanstvenici su sumirali karakteristike različitih podataka daljinskog otkrivanja u spektralnim, radiometrijskim, prostornim i vremenskim rezolucijama; polarizacija. Odabir odgovarajućih podataka senzora prvi je važan korak za uspješnu klasifikaciju u određene svrhe što zahtijeva razmatranje faktora poput potreba korisnika, razmjera i karakteristika područja istraživanja, dostupnosti različitih podataka o slici i njihovih karakteristika, troškova i vremenskih ograničenja, te iskustva analitičara u korištenju odabrane slike.

Razmjer, rezolucija snimka i potrebe korisnika najvažniji su čimbenici koji utječu na odabir podataka s daljinskog očitavanja. Potreba korisnika određuje prirodu klasifikacije i razmjere istraživanog područja, čime utječe na odabir odgovarajuće prostorne rezolucije podataka s daljinskog snimanja. Prethodna istraživanja su istraživala utjecaj razmjera i rezolucije na klasifikaciju slika daljinskim senzorom .

Općenito, za klasifikaciju na lokalnoj razini potreban je klasifikacijski sustav u finoj skali, pa su podaci od velike prostorne rezolucije, poput podataka IKONOS i SPOT 5 HRG, od pomoći. Na regionalnoj razini, podaci srednje prostorne rezolucije, poput Landsat TM/ETM+i Terra ASTER, najčešće su korišteni podaci. Na kontinentalnom ili globalnom nivou, poželjni su podaci grube prostorne rezolucije, poput AVHRR -a, MODIS -a i SPOT vegetacije (Quattrocchi i Goodchild, 1997).

Drugi važan faktor koji utječe na odabir podataka senzora je atmosfersko stanje. Česti oblačni uvjeti u vlažnim tropskim regijama često su prepreka za snimanje visokokvalitetnih podataka optičkog senzora. Stoga različite vrste radarskih podataka služe kao važan dodatni izvor podataka. Budući da je sada dostupno više izvora senzorskih podataka, analitičari slika imaju više izbora za odabir odgovarajućih podataka daljinskim ispitivanjem za određenu studiju (Lefsky i Cohen, 2003).

Kombinacija podataka s više senzora s različitim karakteristikama slike obično je korisna za istraživanje. U ovoj situaciji, ekonomsko stanje često je važan faktor koji utječe na odabir podataka daljinskog mjerenja i vrijeme i rad koji se mogu posvetiti klasifikacijskom postupku, čime utječu na kvalitetu rezultata klasifikacije.

Dovoljan broj uzoraka za obuku i njihova reprezentativnost kritični su za klasifikaciju slika. Uzorci za obuku obično se prikupljaju iz terenskog rada ili iz zračnih fotografija i satelitskih snimaka fine prostorne rezolucije. Mogu se koristiti različite strategije prikupljanja, poput

pojedinačnih piksela, poligona, ali bi utjecale na rezultate klasifikacije, posebno za klasifikacije sa finim podacima o prostornoj rezoluciji. Kada je krajolik istraživanog područja složen i heterogen, odabir dovoljnih uzoraka za obuku postaje težak (Hubert-Moy i dr., 2001).

Ovaj bi problem bio kompliciran ako se za klasifikaciju koriste podaci o srednjoj ili gruboj prostornoj rezoluciji, jer se može pojaviti velika količina miješanih piksela. Stoga se pri odabiru uzoraka za obuku mora uzeti u obzir prostorna rezolucija podataka daljinskog mjerenja koji se koriste, dostupnost referentnih podataka sa zemlje i složenost pejzaža u istraživanom području.

## **2.6. Izbor sustava klasifikacije i uzorci obuke**

Potrebno je reći da izbor odgovarajuće metode klasifikacije zavisi od mnogo faktora poput prostorne razlučivosti podataka s daljinskog mjerenja, različitih izvora podataka, sustava klasifikacije i dostupnosti klasifikacijskog softvera. Različite metode klasifikacije imaju svoje prednosti. Nije lako odgovoriti na pitanje koji je pristup klasifikacije prikladan za određenu studiju. Ovisno o odabranom klasifikatoru (klasifikatorima) mogu se dobiti različiti rezultati klasifikacije.

Također, odgovarajući sustav klasifikacije i dovoljan broj uzoraka obuke preduvjeti su za uspješnu klasifikaciju.

U određenoj literaturi, identificirana su tri velika problema kada se za klasifikaciju vegetacije koriste podaci srednje prostorne rezolucije:

1. definiranje odgovarajućih hijerarhijskih nivoa za kartiranje
2. definiranje diskretnih jedinica pokrivača zemljišta koje se mogu razlikovati prema odabranim podacima daljinskog detektiranja
3. odabir reprezentativnih lokacija za obuku (Cingolani i dr., 2004).

Glavni cilj tradicionalnog kartiranja vegetacije jeste identifikacija biljnih zajednica ili strukturnih tipova. Međutim, kada su zajednice ili strukturni tipovi raspoređeni u kopnenom obliku kao zakrpe manje od veličine piksela (30x30 m za TM slike), pokušaji njihovog kartiranja su otežani. Mjesta za obuku odgovarajuće veličine nekada je nemoguće pronaći,

a ako se pronađu, rezultati nadzirane klasifikacije pomoću tih stranica su netočni, posebno ako pomiješani pikseli predstavljaju važan dio područja.

Drugi problem se odnosi na definiciju informacijskih jedinica za kartiranje, jer nakon što se odredi odgovarajući hijerarhijski nivo, problem definiranja diskretnih jedinica koje satelit može uočiti i dalje ostaje. Kada se osnovne komponente jedinica koje treba definirati (npr. vrste, oblici rasta, tipovi zajednica) postupno mijenjaju, a donekle i neovisno, kao odgovor na više faktora okoliša i ometanja, granice oblikovanja informacijskih jedinica istraživač mora proizvoljno nametnuti.

Treći problem vezan je za odabir najbolje obučениh točaka. Ponekad je teško pronaći ili prepoznati na terenu lokacije za obuku odgovarajuće veličine za definirane informativne jedinice o zemljišnom pokrivaču. U takvim slučajevima, nekoliko malih vježbališta mora se koristiti za stvaranje spektralnih potpisa koji definiraju jednu jedinicu. Ovisno o njihovim karakteristikama, različiti spektralni potpisi trebali bi se spojiti, održavati odvojeno ili odbaciti kao izvanredne vrijednosti, ponovno dovodeći do dugotrajnog procesa pokušaja i grešaka, sve dok se ne dobije prihvatljiv skup potpisa i točna konačna slika.

Općenito, sustav klasifikacije je osmišljen na osnovu potreba korisnika, prostorne rezolucije odabranih podataka daljinskog mjerenja, kompatibilnosti, dostupnih algoritama za obradu slike i klasifikacije te vremenskih ograničenja. Takav sustav trebao bi biti informativan, iscrpan i odvojiv. U mnogim slučajevima usvojen je hijerarhijski sustav klasifikacije koji uzima u obzir različite uvjete.

Ovaj se pristup pokazao korisnim za kartiranje kopnenih jedinica u heterogenom području gdje je bila potrebna točna karta, ali je bilo nemoguće dobiti je pomoću tradicionalnih metodologija klasifikacije. Ovaj pristup je stoga visoko preporučljiv za područja gdje tradicionalniji pristupi nisu mogući ili neuspješni (Cingolani i dr., 2004).

### **3. OPĆI POSTUPCI KLASIFIKACIJE SNIMAKA**

Klasifikacija slike je proces dodjeljivanja klasa kopnenog pokrivača pikselima. Na primjer, klase uključuju vodu, urbane, šumske, poljoprivredne i travnjake.

Klasifikacija slike odnosi se na zadatak dodjeljivanja klasa - definiranih u sustavu klasifikacije zemljišnog pokrivača i korištenja zemljišta, poznatom kao shema - svim

pikselima na daljinski snimljenoj slici. Izlazni raster iz klasifikacije slika može se koristiti za izradu tematskih karata. Klasifikacija slike može biti dugotrajan tok rada sa mnogo faza obrade. U ArcGIS-u, tokovi klasifikacije su pojednostavljeni u čarobnjaku za klasifikaciju (*engl. Classification Wizard*), tako da korisnik s nekim znanjem o klasifikaciji može uskočiti i proći kroz tok rada uz neke smjernice čarobnjaka. Postoje i pojedinačni alati za klasifikaciju za naprednije korisnike koji možda samo žele izvesti dio procesa klasifikacije. Također postoji i segmentacija kao ključna komponenta objektno zasnovanog toka klasifikacije. Ovaj proces grupira susjedne piksele koji su slične boje i imaju određene karakteristike oblika (ESRI, 2022).

Neki od osnovnih postupaka klasifikacije su:

- Shema klasifikacije slika dizajna: obično su to informacijski razredi poput urbanih, poljoprivrednih, šumskih područja itd. Potrebno je provesti terenska istraživanja i prikupiti informacije o tlu i druge pomoćne podatke o istraživanom području.
- Predprocesiranje slike, uključujući radiometrijske, atmosferske, geometrijske i topografske korekcije, poboljšanje slike i početno grupiranje slike.
- Odabir reprezentativnog područja slike i analiza početnih rezultata grupiranja.
- Pokretanje algoritma za klasifikaciju snimaka.
- Naknadna obrada: potpuna geometrijska korekcija i filtriranje te klasifikacijsko ukrašavanje.
- Ocjena točnosti: usporedba rezultata klasifikacije s terenskim studijama. (Al-doski i dr., 2013).

### **3.1. Klasifikacija snimaka**

Na temelju ideje da različite vrste obilježja na zemljinoj površini imaju različita svojstva spektralne refleksije i emitiranja, njihovo se prepoznavanje provodi kroz postupak klasifikacije.

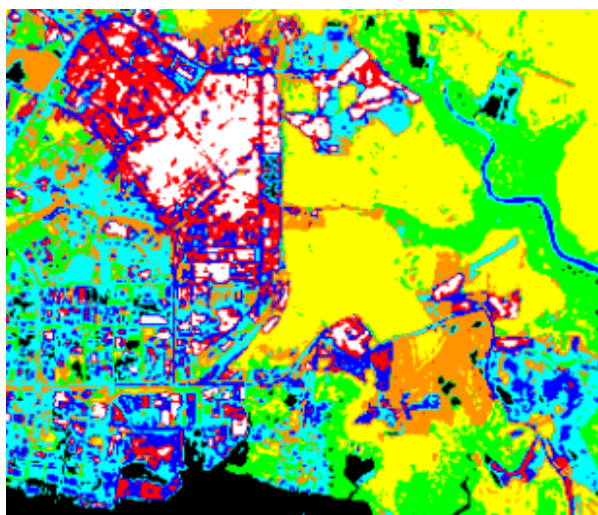
U širem smislu, klasifikacija snimka definirana je kao proces kategoriziranja svih piksela na slici ili neobrađenih satelitskih podataka daljinski osjetljivih radi dobivanja zadanog skupa oznaka ili tema pokrivača, što možemo vidjeti na sljedećim slikama (Lillesand i Keifer, 1994).





Sl. 3. SPOT multispektralni snimak istraživanog područja

Izvor: Al-doski J. i dr., 2013.



Sl. 4. Tematska karta izvedena iz SPOT snimka pomoću algoritma klasifikacije bez nadzora.

Izvor: Al-doski J. i dr., 2013.

### 3.2. Metode klasifikacije slika

Tri glavne vrste metoda klasifikacije slika u daljinskom mjerenju su:

- Nadzirane (polu-automatske) klasifikacijske metode
- Nenadzirane (automatske) klasifikacijske metode
- Objektno orijentirane (engl. object-based) klasifikacijske metode.

Nadzirana klasifikacijska metoda je metoda koja predstavlja klasifikaciju određene scene temeljem uzoraka koje je definirao korisnik. Uzorci se koriste kako bi se definirale klase pokrova zemljišta. Klasifikacija se bazira na spektralnim karakteristikama svakog uzorka. Najpoznatiji algoritmi su maksimalna sličnost (engl. maximum-likelihood) i minimalna udaljenost (engl. minimumdistance) (Rumora i dr., 2018).

Nenadzirana klasifikacijska metoda je metoda koja automatski klasificira scenu na temelju statističkog grupiranja spektralnih značajki i obilježja. Korisnik treba definirati samo broj klasa koje će se kreirati. Najpoznatiji algoritmi su K-means i ISODATA (Rumora i dr., 2018).

Objektno orijentirana klasifikacijska metoda je metoda koja kreira objekte različitih oblika i veličina, dok metode bazirane na klasifikaciji piksela generiraju kvadrate. Najpoznatija metoda je metoda najbližeg susjeda (engl. nearest neighbor). (Rumora i dr., 2018).

Kao što vidimo, ostaju različiti pristupi klasifikacije koji su razvijeni i naširoko se koriste za izradu zemljišnog pokrova. Oni se kreću od nadziranog do bez nadzora, parametarskih do neparametarskih, do ne-metričke, ili soft/hard klasifikacije, ili piksel po piksel što se može vidjeti iz kratkih opisa ovih kategorija u tablici 7. Klasifikacija slika bez nadzora i sa nadzorom su dva najčešća pristupa.

| <b>METODA</b>          | <b>PRIMJER</b>   | <b>KARAKTERISTIKE</b>  |
|------------------------|--|--|
| <b>Parametarska</b>    | Klasifikacija najveće vjerojatnosti i klasifikacija bez nadzora itd              | Pretpostavke: Područje podataka normalno distribuirano<br>Predznanje o funkcijama gustoće klasa                                      |
| <b>Ne-parametarska</b> | Klasifikacija najbližih susjeda, Fuzzy klasifikacija, Neuronske mreže            | Ne postoje prethodne pretpostavke  |
| <b>Ne-metarska</b>     | Klasifikacija odluka na temelju pravila  | Može raditi i na podacima stvarne vrijednosti i na nominalnoj skaliranoj statističkoj analizi podataka                               |
| <b>Sa nadzorom</b>     | Klasifikacija najveće vjerojatnosti, minimalne udaljenosti i paralelepipeda itd. | Analitičar identificira mjesta obuke koja će predstavljati u razredima, a svaki piksel klasificira se na temelju statističke analize |
| <b>Bez nadzora</b>     | ISODATA  | Prethodni podaci o zemlji nisu poznati. Pikseli sa sličnim spektralnim karakteristikama grupirani                                    |

|                              |                                       |   |
|------------------------------|---------------------------------------|---|
|                              |                                       | su prema posebnim statističkim kriterijima  |
| <b>Hard parametarska</b>     | Nadzirane i nenadzirane klasifikacije | Klasifikacija pomoću diskretnih kategorija  |
| <b>Soft parametarska</b>     |                                       | Uzima u obzir heterogenu prirodu stvarnog svijeta<br>Svakom pikselu je dodijeljen udio vrste zemljišnog pokrivača koji se nalazi unutar piksela |
| <b>Pre-pixel</b>             |                                       | Klasifikacija slike piksel po piksel  |
| <b>Objektno-orijentirana</b> |                                       | Slika regenerirana u homogene objekte.<br>Klasifikacija se vrši na svakom objektu i pikselu   |
| <b>Hibridna</b>              |                                       | Uključuje stručne sustave i umjetnu inteligenciju   |

Tab. 7. Sažetak tehnika klasifikacije daljinskog mjerenja

Izvor: Jensen, J. 2005.

Međutim, postoje dvije grupe klasifikacijskih postupaka i svaka nalazi primjenu u obradi slika daljinskog mjerenja: jedna se naziva nadzirana klasifikacija, a druga je klasifikacija bez nadzora. Oni se mogu koristiti kao alternativni pristupi, ali se često kombiniraju u hibridne metodologije koristeći više od jedne metode.

### 3.3. Kriterij klasifikacije

Glavni je cilj klasifikacije grupiranje svih piksela satelitske snimke u određenu klasu. Može se izvoditi na temelju podataka iz samo jednoga spektralnog kanala ili uporabom više kanala. S obzirom na minimalnu veličinu objekta klasifikacije postoje dva pristupa:

- klasifikacija zasnovana na pikselima (engl. Pixel-based classification)
- objektna klasifikacija (engl. Object-based classification).

Klasifikacija zasnovana na pikselima temelji se na principu da, u skladu sa spektralnim svojstvima, svaki piksel predstavlja jednu od klasa. Na primjer, u klasifikaciji šumskog pokrova, spektralne klase odgovaraju klasama vrste vegetacije i izravno su povezane sa spektralnim kanalima koji se upotrebljavaju u klasifikaciji. Nedostatak klasifikacije zasnovane na pikselima jest činjenica da se svakom pojedinom pikselu dodjeljuje jedna klasa, dok u stvarnosti takva jedna ćelija piksela može predstavljati nekoliko različitih klasa.

Jedna klasa može biti predstavljena s više različitih uzoraka za trening zbog čega se javlja varijabilnost spektralnih odziva unutar same spektralne klase. U tom slučaju će se vrijednost piksela računati na osnovi različitih spektralnih vrijednosti klasa što je uzrok nastanka “miješanih” piksela. Miješani pikseli najčešće se pojavljuju na rubovima pojedinih objekata ili uzduž linearnih objekata (prometnice i sl.) i kao takvi izvor su pogrešaka u procesu klasifikacije (Jensen, 2005).

Analiza snimke može se provoditi u domeni objekata, a ne više u domeni piksela, primjenom objektno orijentiranog pristupa. Proces objektno orijentirane klasifikacije započinje razlaganjem digitalne snimke na manje homogenizirane dijelove (objekte) sličnih karakteristika, a kreirani novonastali objekti potom se klasificiraju u određen broj klasa primjenom neke od metoda klasifikacije (Olujić, 2001).

Sustav klasifikacije korištenja zemljišta i pokrivača zemljišta koji može efikasno upotrijebiti podatke o daljinskim senzorima sa orbite i visine mora zadovoljiti sljedeće kriterije:

1. Minimalni nivo preciznosti tumačenja u identifikaciji kategorija korištenja zemljišta i pokrivenosti zemljišta podacima udaljenih senzora trebao bi biti najmanje 85 %.
2. Točnost tumačenja za nekoliko kategorija trebala bi biti približno jednaka.
3. Sustav klasifikacije bi trebao biti primjenjiv na opsežna područja.
4. Kategorizacija bi trebala omogućiti da se vegetacija i druge vrste zemljišnog pokrivača koriste kao surogati za aktivnosti.
5. Klasifikacijski sustav trebao bi biti prikladan za upotrebu s podacima s daljinskog senzora prikupljenim u različito doba godine.
6. Trebalo bi biti moguće efikasno korištenje potkategorija koje se mogu dobiti iz snimanja na tlu ili korištenjem podataka većeg opsega ili poboljšanih daljinskih senzora.
7. Skupljanje kategorija mora biti moguće.
8. Trebalo bi omogućiti usporedbu s budućim podacima o korištenju zemljišta.
9. Treba priznati višestruko korištenje zemljišta kada je to moguće (Anderson i dr., 2013).

Neki od ovih kriterija trebali bi se primjenjivati na korištenje zemljišta i klasifikaciju zemljišnog pokrivača općenito, ali neki od kriterija primjenjuju se prvenstveno na podatke o korištenju zemljišta i zemljišnom pokrivaču interpretirane iz podataka udaljenih senzora.

### 3.4. Nenadzirana i nadzirana klasifikacija

Nenadzirana klasifikacija slike je metoda u kojoj softver za tumačenje slika odvaja veliki broj nepoznatih piksela na slici na temelju njihovih vrijednosti refleksije u klase ili skupine od strane analitičara. Dvije su najčešće metode grupiranja koje se koriste za klasifikaciju bez nadzora: K-means i Iterativna samoorganizirajuća tehnika analize podataka (ISODATA). Ove dvije metode oslanjaju se isključivo na statistiku zasnovanu na spektralnim pikselima i ne uključuju prethodno znanje o karakteristikama tema koje se proučavaju. S druge strane, nadzirana klasifikacija je metoda u kojoj analitičar na slici definira mala područja koja se nazivaju mjesta obuke, a koja sadrže varijable prediktora izmjerene u svakoj jedinici uzorkovanja, te dodjeljuje prethodne klase jedinicama uzorkovanja (Al-doski i dr., 2013).

U nenadziranoj klasifikaciji, prvo se grupiraju pikseli u „grupe“ na osnovu njihovih svojstava, a zatim se klasificira svaki klaster s klasom zemljišnog pokrivača. Sve u svemu, klasifikacija bez nadzora je najosnovnija tehnika jer u osnovi nisu potrebni uzorci i to je jednostavan način za segmentiranje snimka.

Nadzirana tehnika ima određenu prednost u odnosu na onu bez nadzora. U nadziranom pristupu prvo se razlikuju korisne kategorije informacija, a zatim se ispituje njihova spektralna odvojivost, dok u pristupu bez nadzora računalo definira njihovu informacijsku vrijednost.

Što se tiče pikselne klasifikacije snimaka, kao klasična tehnika razvrstavanja slika daljinskim mjerenjima, metode razvrstavanja prema pikselima pretpostavljaju da je svaki piksel čist i tipično označen kao jedna vrsta zemljišta koja se koristi za korištenje zemljišta.

U usporedbi s tradicionalnim metodama klasifikacije po pikselima i podpikselima, objektno-orijentirani modeli pružaju novu paradigmu za klasifikaciju slika daljinskog mjerenja. Tehnikama segmentacije slike, slikovni objekti formiraju se pomoću spektralnih, prostornih te teksturalnih i kontekstualnih informacija. Zatim se ti objekti dalje klasificiraju pomoću spektralnih i drugih relevantnih kriterija. Pristupi temeljeni na objektu smatraju se prikladnijim za VHR slike daljinskog mjerenja budući da pretpostavljaju da više piksela slike tvori geografski objekt (Al-doski i dr., 2013).

Umjesto da sliku smatraju skupinom pojedinačnih piksela sa spektralnim svojstvima, metode temeljene na objektu generiraju slikovne objekte segmentacijom slike, a zatim provode klasifikaciju slike na objektima, a ne na pikselima.

### 3.5. Objektno-orijentirana analiza slika

Sa povećanjem prostorne rezolucije, metode klasifikacije zasnovane na pikselima postale su manje efikasne, jer se odnos između veličine piksela i dimenzije promatranih objekata na Zemljinoj površini značajno promijenio. Stoga je objektno-orijentirana klasifikacija postala sve popularnija u posljednjem desetljeću.

Objektno-orijentirana analiza slike (OBIA) uključuje piksele koji se prvo grupiraju u objekte na osnovu spektralne sličnosti ili vanjske varijable poput vlasništva, tla ili geološke jedinice. Mnoge varijable se mogu odrediti odnosno kategorizirati kao spektralne, varijable oblika i varijable susjedstva. Primjeri spektralnih varijabli su srednja vrijednost i standardna devijacija određenog spektralnog pojasa. Varijable oblika uključuju veličinu, rub i kompaktnost dok varijable susjedstva ukazuju na primjer. Svaki je objekt također dio 'super-objekta', dobivenog kombiniranjem nekoliko susjednih objekata u jedan veći, a svaki se može podijeliti na manje objekte: 'pod-objekte' (Addink, 2010).

Dok je objektna analiza bila poznata u geografskim informacijskim sustavima i digitalnoj obradi slika, u daljinskoj detekciji objektni pristup bio je ograničen na nekoliko pojedinačnih inicijativa i testova koji su se kretali od ranih početaka do devedesetih. Ove studije su koristile ručno segmentirane slike, a samo je nekoliko statističkih atributa izračunato za svaki segment, od kojih se većina odnosila na spektralne karakteristike pojedinog spektralnog pojasa (srednja vrijednost, maksimum, minimum, standardna devijacija). Međutim, prvi pokušaji bili su izazvani radiometrijskim karakteristikama satelitskih snimaka (segmentna radiometrijska varijabilnost) i slabom softverskom podrškom (Veljanovski i dr., 2011).

Međutim, devedesetih godina, kada su se (zbog veće prostorne rezolucije i posljedično većeg broja piksela unutar pojedinog segmenta) svakom segmentu mogli dodijeliti i geometrijski, tekstualni, konceptualni i drugi atributi, proces pretvaranja satelitske slike u tematsku kartu je konačno krenula prema objektno zasnovanoj analizi.

Slike daljinskog detektiranja potrebno je pretvoriti u opipljive informacije koje se mogu koristiti zajedno s drugim skupovima podataka, često unutar široko rasprostranjenih geografskih informacijskih sustava (GIS).

Akronim OBIA znači analiza slike zasnovane na geoprostornim objektima, ona se vrlo kratko osvrće na tradiciju segmentacije slike, koja je mnogo starija od pojave populariziranog komercijalnog softvera. Predmet OBIA odnosi se na koncepte objektno orijentiranog softvera i rukovanje objektima u svijetu GIS-a. Posljednjih godina, unutar

razvijajuće multidisciplinarne zajednice, pojavila se internetska rasprava o tome treba li geografski prostor uključiti u naziv ovog koncepta, ali treba ga nazvati „Analiza slike zasnovane na geografskim objektima“ (GEOBIA), u svrhu predstavljanja poddiscipline GIS-a. Zaista, pojam OBIA može biti preširok, jer se za znanstvenike daljinskog mjerenja, stručnjake za GIS i mnoge druge discipline ne spominje da njihovi podaci slike predstavljaju dijelove Zemljine površine (Addink, 2010).

Većina studija o klasifikaciji zemljišnog pokrivača Landsat izvijestila je o superiornim performansama OBIA-e u različitim krajolicima, poput urbanih područja, poljoprivrednih područja, šuma i močvara. Glavna prednost OBIA-e je ta što predstavlja klasifikacijske jedinice kao objekte iz stvarnog svijeta na terenu i na taj način smanjuje varijabilnost unutar klase.

Iako se OBIA obično primjenjuje na slike fine prostorne rezolucije, većina studija je pokazala njenu superiornu učinkovitost na Landsat slikama jer kombinira različite vrste informacija u klasifikacijskom postupku. Međutim, klasifikacija zemljišnog pokrivača pomoću OBIA-e ima ograničenja kao što su izazovi u odabiru optimalne ljestvice segmentacije, koji mogu generirati greške zbog prekomjerne ili premale segmentacije, te pogrešna klasifikacija malih tipova zemljišnog pokrivača zbog niske ili srednje prostorne rezolucije slika Landsat –a (Blaschke, 2010).

Pristup OBIA također uključuje mnoge korake u svom toku rada, kao što su odabir uzoraka obuke, razvoj pravila i odabir klasifikatora, a svi oni mogu utjecati na točnost klasifikacije ako nisu pravilno izvedeni.

Uz segmentirane slike, OBIA tehnika klasifikacije može se primijeniti za izradu geografskih karata korištenja zemljišta. Tehnike klasifikacije slika temeljene na objektu smatraju se superiornima u usporedbi s tradicionalnim tehnikama temeljenim na pikselima jer mogu uključiti spektralne i prostorno-kontekstualne informacije u procesu klasifikacije (Al-doski i dr., 2013).

Iz ovoga vidimo da su brojne studije izvijestile o vrlo točnim rezultatima klasifikacije kada se primjenjuju na izradu geografskih karata korištenja zemljišta u urbanim područjima s visokom prostornom razlučivošću (Blaschke, 2010).

### *Prednosti objektno-orijentirane klasifikacije:*

- Koristi veliki broj podataka daljinskih mjerenja (spektralne, prostorne, vremenske) i kombinira ih s GIS funkcionalnostima u različitim fazama obrade.
- Objektna klasifikacija koristi sve dostupne i upotrebljive karakteristike segmenata za njihovu klasifikaciju (npr. Oblik, tekstura, odnosi s drugim segmentima).
- Rezultati (identificirani objekti) su vektori koji zahtijevaju lakšu naknadnu obradu od rezultata klasifikacije zasnovanih na pikselima. U određenoj mjeri generalizacija se može izvesti i tokom glavne faze obrade (npr. uklanjanje malih objekata na osnovu njihovog oblika ili veličine).
- Sadržaj slike razvrstava u objekte na način koji je blizak ljudskom razumijevanju okoliša. Rezultati su već generalizirani, budući da klasifikacija koristi jasna semantička pravila koja se također mogu koristiti za poboljšanje ili izostavljanje određenih karakterističnih karakteristika objekta (npr. Linearnost, dužina, širina, pravokutnost zgrada) ili za poboljšanje njihovih ključnih razlika (npr. Tipične veličine u prirodi) .
- Činjenica da su osnovni računski entiteti objekti (a ne pikseli) smanjuje potražnju za računalnim algoritmima i istovremeno omogućava korisnicima da koriste složenije tehnike izračunavanja i širi skup karakteristika podataka (uvođenje konceptualnih atributa).
- To je interaktivni višefazni proces. Omogućava provjeru posrednih rezultata, a trenutna poboljšanja mogu se izvršiti trenutnim finim podešavanjem parametara (Veljanovski i dr., 2011).

### *Ograničenja objektno-orijentirane klasifikacije:*

- Prilikom obrade opsežnih baza podataka (veliko područje interesa, visoka prostorna rezolucija ili oboje) potreban je snažan hardver za obradu, budući da se brojni pikseli obrađuju istovremeno tijekom multispektralne segmentacije slike.
- Segmentacija nema jednolično rješenje. Čak i minimalna promjena radiometrijske rezolucije, parametara segmentacije ili postupaka prethodne obrade daje različite rezultate.
- Objektna klasifikacija relativno je nova metoda daljinskog mjerenja, stoga ne postoji opći konsenzus (niti dovoljno studija) koji bi se bavio odnosom između objekta



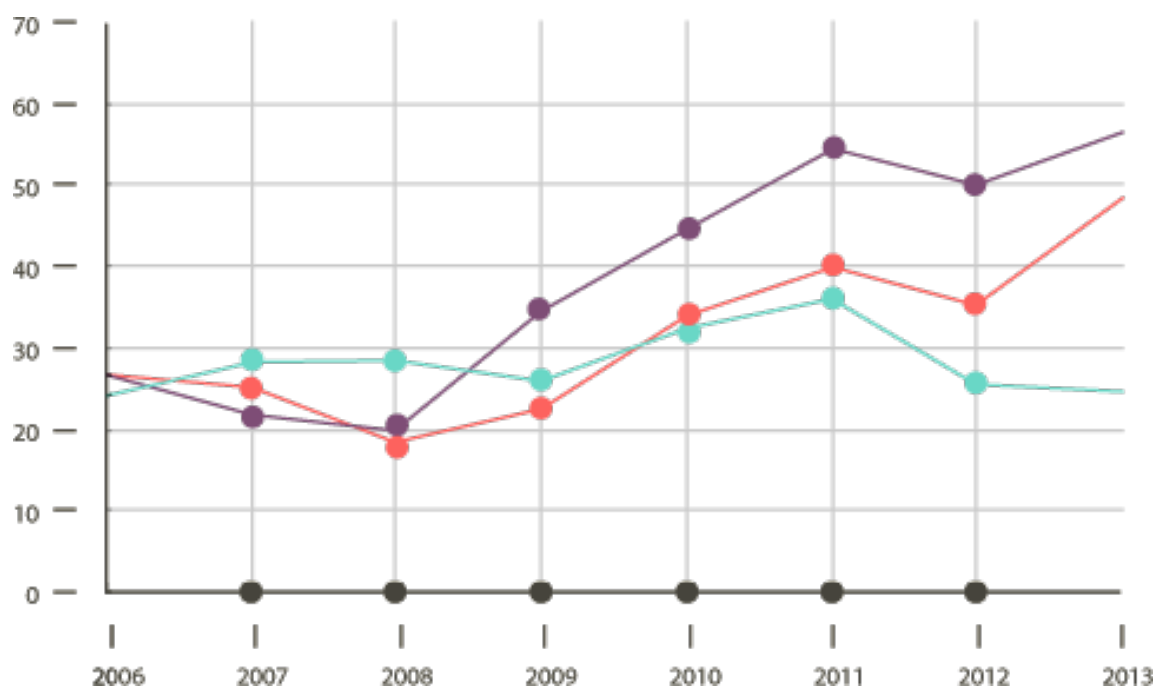
dobivenog u procesu segmentacije i geografskog objekta. Slično, postupci za procjenu kvalitete različitih koraka obrade nisu brojni niti su razvijeni do nivoa koji bi bio dovoljan za njihovo uključivanje u komercijalni softver.

- Nivoi i hijerarhijski odnosi između objekata koji se dobivaju na različitim prostornim razmjerima relativno su slabo proučeni.
- Zbog složene geografske stvarnosti i raznolikosti satelitskih snimaka na kojima se ova stvarnost otkriva, procesi nisu dizajnirani da budu potpuno automatski, već da odgovaraju širokom spektru različitih aplikacija. Automatizam stoga ostaje ograničen samo na visoko specijalizirane zadatke i na određene objekte.
- Sa stanovišta diskriminacije/očuvanja osnovnih geometrijskih svojstava objekta određivanje objekta nije dovoljno jako. Ponovljivost procesa diskriminacije u različitim prirodnim i tehnološkim uvjetima je loša (Veljanovski i dr., 2011).

Kao što vidimo brojne primjene pokazuju da se određeni fenomeni (prisutnost odabranih geografskih objekata) mogu brže i pouzdanije otkriti pomoću objektno zasnovanog pristupa (a ne zasnovanog na pikselima). S druge strane, studije su pokazale da objektna klasifikacija nije nadmašila klasifikaciju zasnovanu na pikselima na satelitskim podacima niske rezolucije (100 do 250 m).

Očito da je došlo do velikog napretka u razvoju tehnologije i dostupnosti slika visoke rezolucije. Ali i tehnike klasifikacije snimaka treba uzeti u obzir. U centru pažnje je analiza snimka zasnovana na objektima kako bi se dobili kvalitetni rezultati.

Prema rezultatima pretraživanja Google Scholar -a, sve tehnike klasifikacije slika pokazale su stalan rast broja publikacija, što možemo vidjeti na sljedećem grafikonu. Plava boja predstavlja nenadziranu metodu, crvena objektno-orijentiranu metodu i ljubičasta nadziranu metodu klasifikacije.



Sl. 5. Porast broja publikacija tehnika klasifikacije

Izvor: GISGeography

### 3.6. Obrada nakon klasifikacije

Obrada nakon klasifikacije služi za uklanjanje evidentnih grešaka (pogrešnih klasifikacija) i generalizaciju rezultata. Očigledne greške mogu se ukloniti vizualnom kontrolom, pregledom na terenu i/ili usporedbom sa referentnim izvorom (ako je dostupan). Svi su ti postupci uglavnom ručni, pa zahtijevaju puno vremena (Veljanovski i dr., 2011).

Kako bi se poboljšala vizualna kvaliteta i sadržaj konačnog rezultata (tematska karta) potrebno je generalizirati dobivene klase objekata. Ako na primjer, ne želimo zadržati male objekte, možemo ih eliminirati spajanjem s dominantnim susjednim klasama, ali obje procedure mogu se provesti samo na rasterskim slikama. Među post-postupcima za finaliziranje vektorskih tematskih karata moramo spomenuti zaglađivanje linija. Budući da se rješava problem prekinutih linija (koje su rezultat oblika piksela i njihove distribucije), ovaj postupak je posebno koristan kada se klasifikacija objekata provodi na satelitskim podacima srednje rezolucije (Veljanovski i dr., 2011).

Tradicionalni klasifikatori po pikselu imaju veliki značaj u klasifikacijskim kartama. Zbog složenosti biofizičkih okruženja, spektralna konfuzija je uobičajena među klasama kopnenog pokrivača. Stoga se pomoćni podaci često koriste za izmjenu slike klasifikacije na osnovu utvrđenih stručnih pravila. Na primjer, distribucija šuma u planinskim područjima povezana je s nadmorskom visinom, nagibom i stranama svijeta. Podaci koji opisuju karakteristike

terena mogu se stoga koristiti za izmjenu rezultata klasifikacije na osnovu poznavanja specifičnih klasa vegetacije i topografskih faktora.

U urbanim područjima, gustoća stanovanja ili naseljenost povezani su sa obrascima raspodjele gradskog korištenja zemljišta, a takvi se podaci mogu koristiti za ispravljanje nekih klasifikacijskih zabuna između komercijalnih i stambenih područja visokog intenziteta ili između rekreacijske trave i usjeva. Iako komercijalna i stambena područja visokog intenziteta imaju slične spektralne potpise, njihova gustoća naseljenosti znatno se razlikuje. Slično, trava za rekreaciju često se nalazi u stambenim područjima, ali pašnjaci i usjevi uglavnom se nalaze daleko od stambenih područja, s rijetkim kućama i malom gustoćom naseljenosti. Stoga se stručno znanje može razviti na osnovu odnosa između gustoće stanovanja ili naseljenosti i urbanih klasa korištenja zemljišta kako bi se pomoglo u odvajanju rekreacijske trave od pašnjaka i usjeva. Prethodna istraživanja su pokazala da je postklasifikacijska obrada važan korak u poboljšanju kvalitete klasifikacija.

#### **4. ZNAČAJ MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA ZA GEOGRAFIJU**

Korištenje zemljišta jeste jedan od aspekata u kojem postoje mnogi međusobno povezani odnosi pa je tako znanje o zemljištu i zemljišnom pokrovu postalo sve važnije jer je bitno da država nadzire probleme nasumičnog, nekontroliranog razvoja, pogoršanje kvalitete okoliša, gubitak primarnog poljoprivrednog zemljišta, uništavanje važnih močvara, i gubitak staništa riba i divljih životinja. Podaci o korištenju zemljišta potrebni su za analizu ekoloških i društvenih procesa jer je veoma bitno za državu da životne uvjete i standarde poboljša ili održi na prihvatljivom nivou.

Za geografiju su daljinska istraživanja prije svega bogat izvor prostornih podataka. Velika većina sustava za daljinska istraživanja usmjerena je na prikupljanje podataka sa Zemljine površine i zato privlače pozornost brojnih geografa i znanstvenika iz drugih znanstvenih disciplina koji u svojem radu koriste geoinformacije (Donnay, Barnsley i Longley, 2003).

U okviru geografije, poznavanje poljoprivrednog, rekreacijskog i urbanog zemljišta, kao i informacije o njihovim promjenjivim proporcijama, potrebni su zakonodavcima, planerima, geografima i urbanistima kako bi utvrdili bolju politiku korištenja zemljišta, za projektiranje

prijevoza i potražnju za komunalnim uslugama, za identifikaciju budućih razvojnih točaka i područja pritiska i za implementaciju efikasnih planova za jedan kvalitetan prostorni razvoj.

Mnogim saveznim agencijama potrebni su trenutni sveobuhvatni popisi postojećih aktivnosti na javnim zemljištima u kombinaciji sa postojećim i promjenjivim namjenama susjednog privatnog zemljišta kako bi se poboljšalo upravljanje javnim zemljištem. Federalnim agencijama također su potrebni podaci o korištenju zemljišta kako bi se procijenio utjecaj na okoliš koji proizlazi iz razvoja energetskih resursa, kako bi se upravljalo resursima divljih životinja i minimiziralo sukobe u ekosustavima između ljudi i divljih životinja, kako bi se napravili nacionalni sažeci obrazaca korištenja zemljišta i izmjene za formuliranje nacionalne politike, te za pripremu izjave o utjecaju na životnu sredinu i procijeniti buduće utjecaje na kvalitetu životne sredine (Anderson i dr., 1976).

Naravno, raznolikost potreba za korištenjem zemljišta te prateći podaci o zemljišnom pokrovu je izuzetno široka. Kao što vidimo, podaci o korištenju zemljišta i zemljišnom pokrovu također su potrebni saveznim, državnim i lokalnim agencijama za popis vodnih resursa, kontrolu poplava, planiranje opskrbe vodom i pročišćavanje otpadnih voda, ali i općenito svakom segmentu geografije.

Zemljišni pokrov (engl. LC- Land Cover) je utjecajan faktor u geografskim istraživanjima, od promatranja fizičke geografije do znanosti o okolišu i tehnika prostornog planiranja. To je dinamički parametar jer predstavlja odnos između društveno-ekonomskih aktivnosti i regionalnih promjena u okolišu. Stalno unaprjeđenje metoda i tehnika satelitskih snimaka vrlo su važni za pravilno planiranje i korištenje i upravljanje prirodnim resursima jer tradicionalni pristupi koji uključuju prikupljanje demografskih podataka, ili ankete obično nisu prikladni za složena područja istraživanja okoliša (Smith, 2008).

U tim istraživačkim područjima često se javljaju mnogi problemi, a poteškoće u upravljanju multidisciplinarnim skupom podataka s novim tehnologijama, poput satelitskih i geografskih informacijskih sustava, često su korištene za prevladavanje problema. Takve tehnologije generiraju informacije za analizu, vizualizaciju i praćenje dinamike zemljišnog pokrova za upravljanje okolišem.

Možemo reći i da su često ažurirane informacije načinu korištenja zemljišta bitne za mnoge društveno-ekonomske i ekološke primjene, uključujući urbano i regionalno planiranje, očuvanje i upravljanje prirodnim resursima. Snimci daljinskim ispitivanjem, koji pokrivaju veliko geografsko područje s velikom vremenskom frekvencijom, nude jedinstvenu priliku

za dobivanje informacija o uporabi zemljišta i zemljišnom pokrivaču kroz proces tumačenja i klasifikacije slika.

## **5. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA SUSTAVA KLASIFIKACIJE**

Što se tiče istraživane literature, još od 1976. Andersonov stručni rad pod nazivom *Sustav klasifikacije korištenja zemljišta i zemljišnog pokrova za uporabu s podacima s udaljenih senzora* govori o okviru nacionalnog sustava klasifikacije korištenja zemljišta i zemljišnog pokrova koji je predstavljen za uporabu s podacima s udaljenih senzora. U radu se govori o tome kako je sustav razvrstavanja razvijen da bi se zadovoljile potrebe saveznih i državnih agencija za ažuriranim pregledom korištenja zemljišta i pokrova zemlje u cijeloj zemlji, na temelju ujednačene kategorizacije na generaliziranijoj prvoj i drugoj razini, koji mogu biti prihvatljivi za podatke sa satelitskih i zračnih senzora.

Istražujući ovaj rad, vidjet ćemo kako predloženi sustav koristi značajke postojećih široko korištenih klasifikacijskih sustava koji su podložni podacima dobivenim iz izvora daljinskog mjerenja. U radu je predstavljen i postupak u kojem se objašnjava kako savezne, regionalne, državne i lokalne agencije mogu imati fleksibilnost u razvoju detaljnijih klasifikacija korištenja zemljišta na trećoj i četvrtoj razini kako bi zadovoljile njihove posebne potrebe i u preostalo vrijeme.

Jedan od praktičnih radova koji je analiziran jeste *Mogućnosti korištenja optičkih satelitskih snimaka* tokom 2019. Pilaš je u ovom radu došla do rezultata koji pokazuju različite mogućnosti primjene multispektralnih satelitskih snimaka u šumskogospodarskoj praksi te osim posredne izmjere i kvantifikacije šumskog pokrova, omogućuju i vizualnu prezentaciju promjena. Kako bi se došlo do ovih rezultata, napravljena je usporedba Landsata 8, 30 m kao satelita srednje rezolucije te i RapidEye-a 5 m visoke rezolucije.

U radu *Utjecaj fuzije snimki na promjenu površine šumskog područja koristeći nenadziranu klasifikaciju (2018)*, Rumora je istraživao utjecaj fuzije multispektralnih i pankromatskih snimki na promjenu površine šumskog područja koristeći nenadziranu klasifikaciju. Analizirajući rad, vidjet ćemo koliko je bitno odabrati algoritam za fuziju snimki, ako uzmemo u obzir da statistički kvaliteta snimke ovisi o odabranom algoritmu. Jedan od

rezultata je da je klasificiranjem izoštrjenih slika moguće, pomoću statističkih pokazatelja i vizualne usporedbe odrediti koja slika zadovoljava tražene uvjete.

Početakom 2010. godine objavljen je rad *Objektna analiza slike za daljinsko mjerenje*, autora Blashcke. U ovom radu dat je pregled razvoja metoda zasnovanih na objektima, koje imaju za cilj razgraničiti lako upotrebljive objekte od slika, a istovremeno kombinirati obradu slike i GIS funkcionalnosti kako bi se spektralne i kontekstualne informacije koristile na integrativan način. Ono što je značajno za ovaj rad jeste da je kroz opsežan pregled literature pregledano nekoliko tisuća sažetaka, a detaljno je analizirano više od 820 članaka povezanih s OBIA-om, uključujući 145 radova u časopisima, 84 poglavlja knjiga i gotovo 600 radova s konferencija. Na kraju rada došlo se do zaključka da su prve godine razvoja OBIA-e/GEOBIA-e obilježene dominacijom 'sive' literature, ali da se broj recenziranih članaka u časopisima naglo povećao u posljednjih četiri do pet godina.

Neki od analiziranih radova, imali su namjera predstaviti teorijsku argumentaciju i metodologiju daljinskih istraživanja, multispektralnih snimaka, te pružiti pregled polja i ukazati na određena ograničenja u pogledu trenutnog stanja. Jedan od takvih radova je rad Veljanovske pod nazivom *Objektno usmerjena analiza podataka daljinskog zaznavanja*, objavljen 2011. Veljanovska smatra da je objektna analiza podataka daljinskog mjerenja postala ključni čimbenik u višerazinskoj analizi površine i kao takva predstavlja važnu vezu između daljinskog mjerenja i geografskih informacijskih sustava. Drugim riječima, smanjuje jaz između GIS informacija, parametara dobivenih s različitih satelitskih senzora i stručnog znanja.

Također Al-doski u svom radu *Klasifikacija slike u daljinskom mjerenju* objavljen 2013. godine govori o snimanju zemljine površine kao o osnovnoj varijabli koja utječe i povezuje nekoliko komponenti ljudskih i fizičkih postavki jer može ponuditi važno znanje za razumijevanje dinamike Zemlje, poput klimatskih promjena, očuvanja biološke raznolikosti i interakcije oko društvenih aktivnosti i zemaljskih promjena, što nam zapravo govori o značaju daljinskog snimanja i multispektralnih snimaka za geografiju.

### **5.1. Pojavnost metoda i algoritama klasifikacije slika u daljinskom mjerenju**

Glavne vrste metoda klasifikacije slika u daljinskom mjerenju su: nadzirane (*semi-automatic*), nenadzirane (*automatic*) i objektno-orjentirane (*object-based*), parametarska

(*parametric*), neparametarska (*nonparametric*), ne-metarska (*nonmetric*), hard-parametarska (*hard parametric*), soft-parametarska (*soft parametric*), pre-piksel (*pre-pixel*), hibridna (*hybrid*).

Najpoznatiji algoritmi klasifikacije su maksimalna sličnost (engl. maximum-likelihood) i minimalna udaljenost (engl. minimum distance), K-means, ISODATA i metoda najbližeg susjeda (engl. nearest neighbor).

### **5.1.1. Problem i predmet istraživanja**

Kako bismo utvrdili koja se od sljedećih metoda najviše koristi, analizirali smo tematske tekstove koje smo naveli u 5. poglavlju ( Pregled dosadašnjih istraživanja sustava klasifikacije) kako bismo utvrdili koja je od sljedećih metoda najčešća.

### **5.1.2. Cilj istraživanja**

Analizom znanstvenih radova i znanstvenih članaka vezanih uz klasifikaciju slika u daljinskom senzoru, cilj nam je na temelju broja ponavljanja utvrditi koja se od navedenih metoda najčešće koristi.

U procesu analize teksta, korišten je online alat za analizu teksta dostupan na:  
<http://www.usingenglish.com/resources/text-statistics.php>  
<https://books.google.com/ngrams>

### **5.1.3. Analiza korpusa**

#### **5.1.3.1. Metode klasifikacija**

Glavna tema predstavljena u korpusu su metode klasifikacije slika u daljinskom senzoru.

***Strukturu analiziranog korpusa čine:***

- stranica: 12,
- tekstovi: 57,
- riječi: 5932,
- rečenica: 218,
- znakova: 34583.

Rezultati korpusne analize pokazuju sljedeći omjer pojavnosti metoda u korpusnim rečenicama:

| <i>Metoda</i>          | <i>Pojavljivanje u korpusu</i> | <i>Pojavljivanje u korpusu u %</i> |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| <i>semi-automatic</i>  | <i>16</i>                      | <i>22%</i>                         |
| <i>automatic</i>       | <i>12</i>                      | <i>17%</i>                         |
| <i>object-based</i>    | <i>24</i>                      | <i>34%</i>                         |
| <i>parametric</i>      | <i>9</i>                       | <i>13%</i>                         |
| <i>nonparametric</i>   | <i>3</i>                       | <i>4%</i>                          |
| <i>nonmetric</i>       | <i>3</i>                       | <i>4%</i>                          |
| <i>hard-parametric</i> | <i>2</i>                       | <i>3%</i>                          |
| <i>soft-parametric</i> | <i>0</i>                       | <i>0%</i>                          |
| <i>pre-pixel</i>       | <i>2</i>                       | <i>3%</i>                          |
| <i>hybrid</i>          | <i>0</i>                       | <i>0%</i>                          |

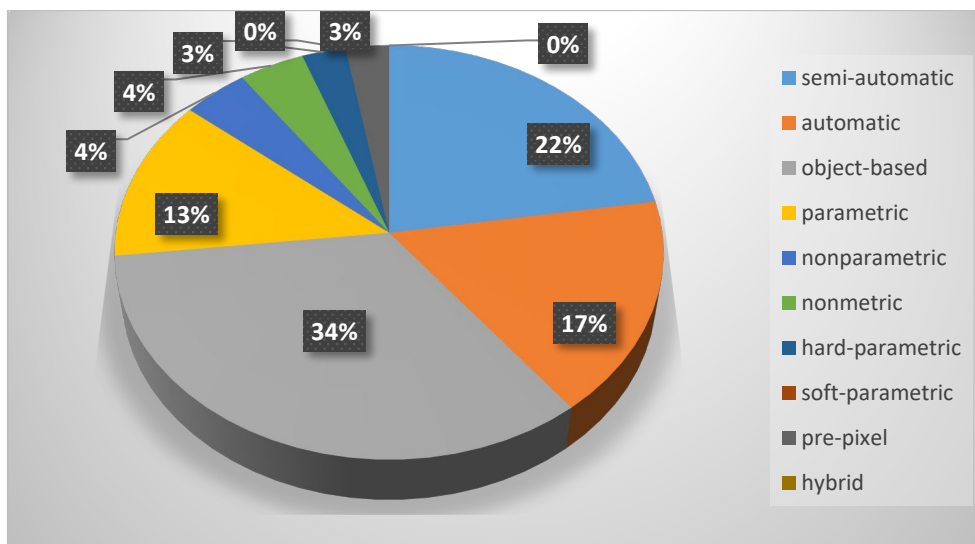
Tab. 8. Pojavnost metoda u korpusu

Izvor: Autor

Temeljem analize korpusa zaključujemo da se u tekstovima najčešće pojavljuje objektno orijentirana metoda (34%), dok se u analiziranom tekstu ne pojavljuju soft-parametarska i hibridna metoda. Nakon objektno orijentiranih metoda slijede polu-automatske (22%), automatske (17%) i parametarske metode (13%), dok su ostale metode zastupljene u tekstu u znatno nižim postocima.

Iako se ova analiza ne temelji na značajnom korpusu, na temelju podataka dobivenih analizom teksta, možemo zaključiti da se metode s najvećom stopom incidencije mnogo češće koriste u daljinskom istraživanju. Kako bismo lakše sagledali prikaz metoda u korpusu, prethodnu tablicu prikazat ćemo i grafički (sl. ).

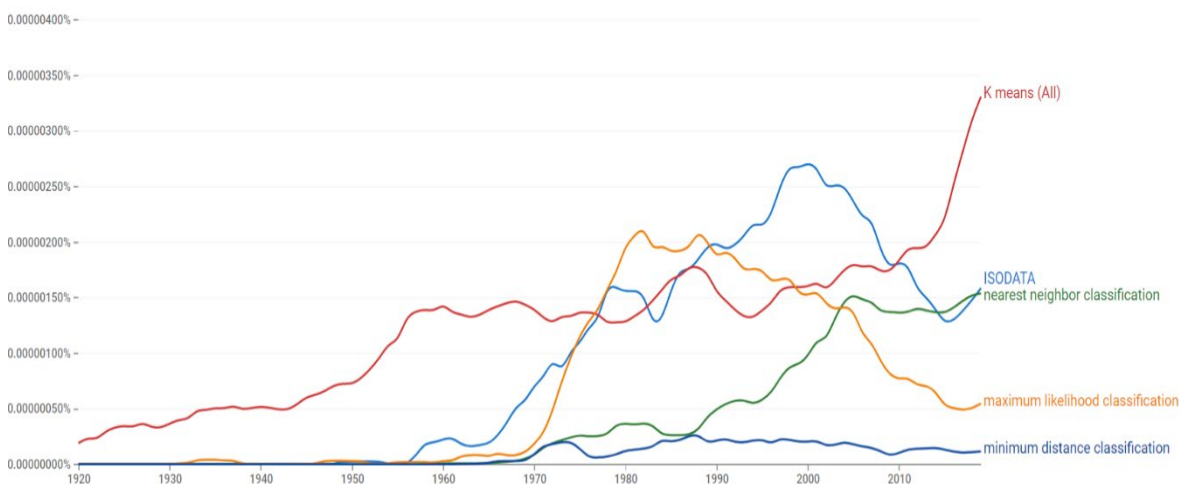




Sl. 6. Pojavnost metoda u korpusu

Izvor: Autor

### 5.1.3.2. Algoritmi klasifikacija



Sl. 7. Pojavnost algoritama u korpusu

Izvor: Google Ngram Viewer

Analizirajući algoritme klasifikacije maksimalna sličnost (engl. maximum-likelihood) i minimalna udaljenost (engl. minimum distance), K-means, ISODATA i metoda najbližeg susjeda (engl. nearest neighbor) pomoću online alata Books Ngram Viewer u izabranom razdoblju od 1920. godine do 2019. godine zaključujemo da se u tekstovima u razdoblju od 1920. do 1970-ih godina najčešće pojavljuje K-means klasifikacija, dok se od 1970-ih

godina povećava pojavljivanje klasifikacije maximum likelihood i polagano prestiže K-means klasifikaciju. 1980-ih godina učestalost klasifikacija K-means, maximum likelihood i ISODATA je skoro pa jednaka, nakon toga 1990.-ih godina najčešće se pojavljuje ISODATA pa sve do 2009. godine kad K-means postaje sve češće spominjan i stalno raste sve do 2019. godine.

Nearest neighbor i minimum distance classification nemaju neki veliki značaj u ovoj korpus analizi, pogotovo minimum distance classification, dok nearest neighbor čak u razdoblju 2000-ih ima blagi porast.

Iz ove analize možemo zaključiti da se u tekstovima u većini vremena kroz razdoblje od 1920. do 2019. godine najviše pojavljuju algoritmi klasifikacije iz nenadzirane metode klasifikacija.

## **6. REZULTATI**

Na osnovu opsežnog istraživanja dosadašnjih radova, može se reći da je jedan od najvažnijih značaja daljinskog snimanja upravo izrada geografskih karata, pa stoga veliki značaj ima i proces koji se naziva klasifikacija multispektralnih snimaka. Klasifikacija snimaka postigla je veliki napredak posljednjih desetljeća u sljedeća četiri područja:

- (1) izrada karte pokrova zemljišta na regionalnoj i globalnoj razini;
- (2) razvoj i korištenje naprednih klasifikacijskih algoritama, kao što su klasifikacija bez nadzora i sa nadzorom, objektno-orijentirana klasifikacija;
- (3) korištenje više značajki daljinskog mjerenja, uključujući spektralne, prostorne, multitemporalne i multisenzorske informacije;
- (4) uključivanje pomoćnih podataka u klasifikacijske postupke, uključujući podatke kao što su topografija, tlo, ceste i popisni podaci. Ocjena točnosti sastavni je dio postupka klasifikacije slika.

U primjeru istraživanja Pilaš (2019) izvršena je komparacija snimaka Landsat i RapidEye, pa tako možemo reći da je Landsat od 30 metara kao što je i dokazano uglavnom namijenjen za detekciju šireg površinskog obuhvata. S druge strane, RapidEye snimke visoke rezolucije od 5 metara daje više detalja kada se radi o šumskim sastojinama, odjelima i odsjecima,

gotovo do razine skupine stabala unutar sastojine (progale, vlake, različiti stadiji obnove i dr.)

Ono što smo iz priloženog mogli vidjeti jeste također da daljinska istraživanja igraju veliku ulogu u suvremenim postupcima klasifikacije Zemljine površine ili krajolika prema određenim obilježjima, ali sama po sebi, bez dodatnih ili pomoćnih izvora podataka, ne mogu poslužiti za dovoljno pouzdano utvrđivanje načina korištenja zemljišta. Također, pojmovi zemljišnog pokrova (engl. land cover) i načina korištenja zemljišta (engl. land use) ili klase na koje se oni dijele, često se spominju i upotrebljavaju zajedno u znanstvenoj literaturi ili se objedinjuju i izmjenjuju unutar jedne klasifikacijske sheme za potrebe konkretnog istraživanja.

Što se tiče Landsata, također možemo reći da su metode klasifikacije zemljišnog pokrova koje se obično primjenjuju na snimke Landsat-a mogu općenito grupirati u pristupe zasnovane na pikselima, na osnovu podpiksela i na objektu. Iako su metode za klasifikaciju zemljišnog pokrova napredovale u posljednja četiri desetljeća, metoda klasifikacije zasnovana na pikselima s najvećom vjerojatnošću, koja je razvijena 1970-ih, najčešće je korištena metoda na snimcima Landsata.

Većina studija o klasifikaciji zemljišnog pokrivača Landsat izvijestila je o superiornim performansama OBIA -e u različitim krajolicima, kao što su urbana područja, poljoprivredna područja, šume i močvare. Na kraju, moguće je reći da je glavna prednost OBIA -e je ta što predstavlja klasifikacijske jedinice kao objekte iz stvarnog svijeta na terenu i na taj način smanjuje varijabilnost unutar klase. Iako se OBIA obično primjenjuje na slike fine prostorne rezolucije, većina studija je pokazala njenu superiornu izvedbu na Landsat slikama jer kombinira različite vrste informacija u klasifikacijskom postupku. Međutim, OBIA klasifikacija zemljišnog pokrivača ima ograničenja kao što su izazovi u odabiru optimalne ljestvice segmentacije, koji mogu generirati greške zbog prekomjerne ili premale segmentacije, te pogrešna klasifikacija malih vrsta pokrivača zemljišta zbog niske ili srednje prostorne rezolucije Landsats snimka.

Pristup OBIA također uključuje mnoge korake u svom radnom tijeku, poput odabira uzoraka obuke, razvoja skupova pravila i odabira klasifikatora, a svi oni mogu utjecati na točnost klasifikacije ako nisu pravilno izvedeni. Također, OBIA je u većini studija proizvela visoku klasifikacijsku točnost koja se temeljila na snimcima Landsata za različite tipove zemljišnog

pokrova međutim, njena ograničenja, poput odabira odgovarajuće ljestvice segmentacije i bavljenja različitim koracima, mogu biti izvor varijacija ako se s njima ne postupa pravilno.

Ono što je važno istaknuti jeste da je sposobnost korištenja različitih informacija, poput oblika, teksture i zbivanja, za komplement spektralnih vrijednosti čini rezultate klasifikacije iz OBIA-e preciznijima.

Analizirane studije ne ukazuju jasno na najbolju klasifikacijsku metodu za snimke, stoga je važno uzeti u obzir snage i ograničenja svake metode u usporedbi s drugom metodom i stoga većina metoda klasifikacije ostaje korisna i ima potencijal proizvesti visok nivo točnosti. Upotrebu hibridnih metoda potrebno je dodatno istražiti jer je kombinacija različitih klasifikatora složena, ali iz ograničene literature čini se da obećavaju klasifikaciju zemljišnog pokrivača pomoću Landsat slika.

I na samom kraju, kada se radi o značaju daljinskog snimanja za geografiju, došli smo do spoznaje da daljinska detekcija pomaže ljudima u prikupljanju informacija o Zemlji. Takvi se podaci mogu koristiti za formuliranje strategija koje će se provesti prije i poslije katastrofa. Budući da daljinsko snimanje može pristupiti područjima koja su ljudima nedostupna, može pratiti utjecaj krčenja šuma na značajne regije, a može biti dobar temelj kartiranja područja koja trebaju zaštitu. Daljinsko snimanje je osobito bitno u praćenju okoliša i upravljanju prirodnim resursima, a ispituje utjecaj ljudi na okoliš. Multispektralni snimci se također koriste u geologiji i istraživanju minerala, šumarstvu i poljoprivredi, te općenito imaju izuzetnu vrijednost za geografiju.

## ZAKLJUČAK

Provođenjem opsežnog pregleda literature o klasifikacijskim metodama daljinskog snimanja, osobito tehnikama prostorno-kontekstualne klasifikacije, moguće je izdvojiti nekoliko zaključaka.

Možemo zaključiti također da uspjeh klasifikacije snimaka u daljinskom mjerenju ovisi o mnogim čimbenicima, dostupnosti visokokvalitetnih snimaka na daljinu i pomoćnim podacima, dizajnu odgovarajućeg postupka klasifikacije te vještinama i iskustvu analitičara.

Tehnike razvrstavanja slika daljinskim mjerenjima bitne su za dobivanje informacija o pokrivanju zemljišta, korištenjem zemljišta za društveno-ekonomsko planiranje i primjenu u okolišu. Trenutno su spektralni klasifikatori još uvijek dominantni pristupi za klasificiranje snimaka daljinskog mjerenja zbog njihove konceptualne jednostavnosti i lake implementacije. Možemo vidjeti da je sve veći broj istraživača shvatio važnost prostorno-kontekstualnih informacija u nadopunjavanju spektralnih klasifikatora.

Brojne studije izvijestile su o znatno većoj točnosti klasifikacije sa segmentacijom slike i objektnom klasifikacijom slike. U posljednje vrijeme sve je više znanstvenika daljinskog snimanja prepoznalo važnost prostornih informacija, a veliki broj studija naglašava razvoj metoda klasifikacije prostorno-kontekstualnih slika.

## LITERATURA

1. Addink, E. (2010) Object-based Image Analysis, Utrecht University, the Netherlands and Fricke Van Coillie. Belgium: Ghent University.
2. Al-doski, J., Shatri B.M., Shafri H.Z.M. (2013) Image Classification in Remote Sensing, Department of Civil Engineering. Malaysia: Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia, 3(10), 141-147.
3. Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., Witmer, R.E., (1976) A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *US Geological Survey Professional Paper* [online], Dostupno na: <https://pubs.usgs.gov/pp/0964/report.pdf> [02.02.2022.]
4. Barnsley, M.J. (1999) Digital remote sensing data and their characteristics. *Geographical Information Systems: Principles, techniques, applications, and management*, 9(6), 451–466.
5. Blaschke T. (2010) Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1); 2-16.
6. Chang, NB., Bai, K. (2018) *Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing*. New York: Taylor & Francis Group.
7. Cingolani, A.M., Renison, D., Zak, M.R., Cabido, M.R. (2004) Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing of Environment*, 92(1); 84- 97.
8. Donnay, J. P., Barnsley, M.J., Longley, P.A., (2003) Remote Sensing and Urban Analysis. In: Donnay, J.P., Barnsley, M.J., Longley, P.A. (edt.), *Remote Sensing and Urban Analysis: GISDATA 9*, New York: Taylor and Francis, str. 2-14.
9. Haack, B., Bryant, N., Adams, S. (1987) An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification. *Remote Sens. Environ.* 21(1); 201–213.
10. Hubert-Moy, L., Cotonnec, A., Le Du, L., Chardin, A., Perez, P. (2001) A comparison of parametric classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, 75(2); 174-187.
11. García-Mora, J., Mas J.F., Hinkley, E.A. Land cover mapping applications with MODIS: a literature review. *International Journal of Digital Earth* [online],

Dostupna na: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2011.565080>  
[03.02.2022.]

12. Jensen, J. (2005) *Introductory Digital Image Processing*, Brigham: Brigham Young University.
13. Lefsky, M.A., Cohen, W.B. (2003) Selection of remotely sensed data. In: Wulder M.A., Franklin S.E. *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and case studies*, Berlin: Springer, str. 13-46.
14. Olujić, M. (2001) *Snimanje i istraživanje Zemlje iz svemira*, Zagreb: Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti.
15. Darius, P., Morgenroth, J. (2017) *Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review*, 9(9); 1-28.
16. Pilaš I., Đodan M., Dugački I., (2019) Mogućnosti korištenja optičkih satelitskih snimaka srednje i visoke rezolucije (Landsat 8, RapidEye) u vizualizaciji i detekciji promjena šumskog pokrova nakon vjetroizvala. *Geod. list*, 73(96); 261–276.
17. Quattrocchi, D., Goodchild, M.F. (eds.) (1997) *Scale in Remote Sensing and GIS*. Florida: Boca Raton, CRC Press.
18. Rumora, L., Miler, M., Medak, D. (2018) Utjecaj fuzije snimki na promjenu površine šumskog područja koristeći nenadziranu klasifikaciju, *Šumarski list*, 142(2); 67–75.
19. Smith, G.M., (2008) The development of integrated object-based analysis of EO data within UK national land cover products, In: Blaschke, T., hay, G.J., Kelly, M., Lang, P., Hoffman, P. (edt.), *Object-Based Image Analysis*, Berlin: Springer, str. 513-528.
20. Steiner, D. (1970) Automation in photo interpretation. *Geoforum*, 1(2); 75–88.
21. Veljanovski T., Kanjir, U., Oštir, K. (2011) Objektno usmerjena analiza podatkov daljinskega zaznavanja. *Geodetski vestnik*, 55(4); 641-664.

## PRILOZI

### Popis slika:

|  |    |
|--|----|
| Sl. 1. Primjer slike daljinskog mjerenja koja prikazuje piksele i digitalne brojeve; strelica pokazuje napredak u nivou detalja informacija koje se mogu izvući iz slika. .... | 13 |
| Sl. 2. Lijevo Landsat; desno RapidEye .....  | 16 |
| Sl. 3. SPOT multispektralni snimak istraživanog područja.....  | 23 |
| Sl. 4. Tematska karta izvedena iz SPOT snimka pomoću algoritma klasifikacije bez nadzora. ....   | 23 |
| Sl. 5. Porast broja publikacija tehnika klasifikacije .....  | 32 |
| Sl. 6. Pojavnost metoda u korpusu .....  | 39 |
| Sl. 7. Pojavnost algoritama u korpusu .....  | 39 |

### Popis tablica:

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1. Karakteristike senzora satelita Landsat 8 .....             | 8  |
| Tab. 2. Karakteristike senzora satelita SPOT 5, 6 i 7 .....         | 9  |
| Tab. 3. Karakteristike senzora satelita IKONOS.....                 | 9  |
| Tab. 4. Karakteristike senzora satelita QuickBird.....              | 10 |
| Tab. 5. Karakteristike senzora satelita WorldView-1, 2, 3 i 4 ..... | 10 |
| Tab. 6. Karakteristike senzora satelita RapidEye .....              | 11 |
| Tab. 7. Sažetak tehnika klasifikacije daljinskog mjerenja.....      | 25 |
| Tab. 8. Pojavnost metoda u korpusu.....                             | 38 |

### Kratice:

|      |   |
|------|---|
| NASA | National Aeronautics and Space Administration)                            |
| USGS | engl. United States Geological Survey - Geološki zavod Sjedinjenih Država |
| OBIA | engl. Object-Based Image Analysis - Objektna analiza slike                |
| MSS  | engl. Multispectral Scanner System - Multispektralni skener               |
| GIS  | Geografski informacijski sustav   |



|      |   |
|------|---|
| SAR  | engl. synthetic aperture radar – radarski senzori   |
| GMES | engl. Global Monitoring for Environment and Security - Globalno praćenje okoliša i sigurnosti |
| LCM  | engl. Land Cover Mapping – kartiranje pokrova zemljišta                                       |
| LC   | engl. Land Cover – Površina zemljišta   |