

Klasifikacija oštećenja objekata uslijed potresa pomoću satelitskih snimki

Samardžić, Kristina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:063414>

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

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



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Kristina Samardžić

KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA OBJEKATA USLIJED POTRESA
POMOĆU SATELITSKIH SNIMKI

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 11. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovno izviđanje i nadzor**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6365

Pristupnik: **Kristina Samardžić (0135240778)**
Studij: **Aeronautika**

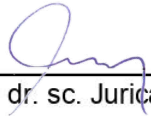
Zadatak: **Klasifikacija oštećenja objekata uslijed potresa pomoću satelitskih snimki**

Opis zadatka:

Navesti mogućnosti daljinskih istraživanja i obilježja satelitskih snimki. Objasniti kategorizaciju oštećenja objekata uslijed potresa. Dati pregled dosadašnjih analiza oštećenja objekata uslijed potresa pomoću daljinskih istraživanja. Klasificirati oštećenja objekata uslijed potresa pomoću satelitskih snimki područja prije i nakon potresa. Analizirati rezultate i uspješnost vizualne klasifikacije.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



doc. dr. sc. Jurića Ivošević

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA OBJEKATA USLIJED POTRESA
POMOĆU SATELITSKIH SNIMKI**

**CLASSIFICATION OF BUILDINGS DAMAGES DUE TO
EARTHQUAKES USING SATELLITE IMAGERY**

Mentor: doc. dr. sc. Jurica Ivošević

Student: Kristina Samardžić

JMBAG: 0135240778

Zagreb, kolovoz 2021.

KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA OBJEKATA USLIJED POTRESA POMOĆU SATELITSKIH SNIMKI

SAŽETAK

Satelitske snimke omogućuju brzo i cjelovito prikupljanje informacija o području interesa. U okolnostima koje iziskuju brzu reakciju, daljinska se istraživanja nameću kao najsigurnije i najbrže sredstvo prikupljanja informacija. Mogućnosti daljinskih istraživanja su neiscrpne. Klasifikacija oštećenja nastalog uslijed potresa jedna je od njih. Upotrebom satelitskih snimki visoke rezolucije moguće je identificirati i klasificirati oštećenje nastalo neposredno nakon potresa te tako u kratkom periodu pružiti informacije o razornosti potresa. Klase oštećenja unaprijed su poznate te jasno definirane. U ovom je radu klasificirano oštećenje grada Petrinje nastalo nakon razornog potresa 29. prosinca 2020. s epicentrom 5 km jugozapadno od Petrinje. Klasifikacija pomoću satelitskih snimki zatim je validirana statistički i vizualno kako bi se potvrdila preciznost klasifikacije.

KLJUČNE RIJEČI: daljinska istraživanja, satelitske snimke, klasifikacija oštećenja, potres u Petrinji

SUMMARY

Satellite imagery provides fast and comprehensive collection of information on an area of interest. In circumstances that require a rapid response, remote sensing is emerging as the safest and fastest means of gathering information. The possibilities of remote sensing are inexhaustible. The classification of earthquake damage is one of them. Using high-resolution satellite images, it is possible to identify and classify damage that occurred immediately after the earthquake, and thus provide information on the destructiveness of the earthquake in a short period of time. Damage classes are known in advance and clearly defined. This thesis classifies the damage that occurred in Petrinja after the devastating earthquake on December 29, 2020 with the epicenter 5 km southwest of Petrinja. Classification using satellite imagery is then validated statistically and visually to verify the accuracy of classification.

KEYWORDS: remote sensing, satellite imagery, damage classification, earthquake in Petrinja

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. DALJINSKA ISTRAŽIVANJA	3
2.1 Princip daljinskih istraživanja	3
2.1.1 Elektromagnetsko zračenje	4
2.1.2 Reflektirajući spektar	6
2.2 Interpretacija snimki daljinskog istraživanja	7
2.2.1 Odabir područja ili objekta od interesa	7
2.2.2 Postupak vizualne interpretacije	8
3. NEDOSTATCI DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA	9
3.1 Raspršenje	10
3.2 Apsorpcija	11
3.3 Interakcija s podlogom	12
3.4 Poznavanje terena i njegovih obilježja	13
3.5 Instrumenti i senzori za snimanje	14
4. PREDNOSTI DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA	15
4.1 Globalna pokrivenost	15
4.2 Raznolikost mjerila i rezolucije	15
4.3 Višestruki prikaz podataka	16
4.4 Transmisija i pristup podacima	16
5. SATELITSKO DALJINSKO ISTRAŽIVANJE	17
5.1 Definiranje satelitske orbite	17
5.1.1 Veličina i oblik orbite	18
5.1.2 Orijentacija orbite	18
5.1.3 Položaj satelita u orbiti	20
5.2 Tipovi orbita	20
5.2.1 Niska zemaljska orbita	21
5.2.2 Sunčeva sinkrona orbita	21
5.3 Satelitske snimke	21
5.4 Satelitski sustavi	22
5.4.1 Prva skupina–Landsat sateliti	22
5.4.2 Druga skupina-globalna pokrivenost	23
5.4.3 Treća skupina-sustavi visoke rezolucije	23

6. KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA POTRESA	24
6.1 Definiranje klasa oštećenja	24
6.2 Metode klasifikacije	27
6.2.1 Dvovremenska metoda	27
6.2.2 Jednovremenska metoda	27
6.3 Validacija klasifikacije	28
6.4 Prikaz rezultata	29
7. PROBLEMSKI ZADATAK I METODOLOGIJA RJEŠAVANJA	30
8. KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA NA PODRUČJU INTERESA	32
8.1 Jednovremenska klasifikacija	34
8.2 Dvovremenska klasifikacija	38
9. ANALIZA REZULTATA	40
10. VALIDACIJA REZULTATA	47
10.1 Statistička validacija	47
10.2 Vizualna validacija	48
11. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA	56
POPIS SLIKA	58
POPIS TABLICA	60
POPIS KRATICA	61

1. UVOD

Satelitski sustavi osmišljeni su kako bi omogućili neprekidnu pokrivenost Zemlje. Njihova je zadaća korisniku prenijeti točne informacije brzo i jednostavno. Uviđanjem velikih prednosti ovakvog načina prikupljanja informacija, tehnologija satelitskih sustava se svakim danom poboljšava. Razvojem satelitskih sustava koji prikupljanju snimke visoke rezolucije te nude pokrivenost područja u pravilnim intervalima, omogućena je upotreba satelitskih snimki za nadzor i analizu preciznih, konkretnih i dinamičkih elemenata na površini Zemlje.

U ovom diplomskom radu klasificirano je oštećenje objekata na području grada Petrinje nastalo jakim potresom 29. prosinca 2020. Cilj rada je detektirati i klasificirati oštećenje objekata prema utvrđenim klasama oštećenja. Satelitske snimke omogućuju procjenu nastalog oštećenja brzo i sigurno čime se olakšava pravovremena reakcija nadležnih tijela u pružanju pomoći. Rad je obrađen kroz jedanaest poglavlja:

1. Uvod
2. Daljinska istraživanja
3. Nedostatci daljinskih istraživanja
4. Prednosti daljinskih istraživanja
5. Satelitsko daljinsko istraživanje
6. Klasifikacija oštećenja potresa
7. Problemski zadatak i metodologija rješavanja
8. Klasifikacija oštećenja na području interesa
9. Analiza rezultata
10. Validacija rezultata
11. Zaključak.

Drugo poglavlje objašnjava osnovni princip rada daljinskog istraživanja te opisuje ispravan način manipulacije podacima daljinskih istraživanja.

Treće poglavlje nabroja sve nedostatke daljinskih istraživanja, od neizbježnih atmosferskih utjecaja do subjektivnih utjecaja interpretatora.

Četvrto poglavlje ukazuje na prednosti daljinskih istraživanja. Daljinska istraživanja uz pomoć satelitskih snimki omogućavaju korisniku pristup velikoj količini podataka u kratkom periodu bez fizičkog kontakta. Ova osobina daljinskih istraživanja glavni je motiv upotrebe satelitskih snimki za procjenu štete nastale neposredno nakon većih ekoloških katastrofa, potresa ili požara. Brza reakcija i pomoć nakon ovakvih događaja neophodna je za smanjenje posljedica događaja.

Peto poglavlje obuhvaća satelitske sustave na način da definira satelitsku orbitu, opisuje sve elemente koji definiraju orbitu te nabroja najrasprostranjenije satelitske sustave u upotrebi.

Metode klasifikacije i validacije objašnjene su u šestom poglavlju. Neophodni uvjet za procjenu oštećenja nastalog potresom je jasno definiran sustav klasifikacije. Podjela objekata u klase čiji su elementi poznati interpretatoru, omogućava objektivnu klasifikaciju primjenjivu i jasnu svim korisnicima. Klasifikacijom objekata dobivaju se informacije o tome koja su područja najoštećenija te u kojoj je mjeri potres bio destruktivan.

U sedmom poglavlju objašnjen je problemski zadatak diplomskog rada te je detaljno opisana metodologija rješavanja. Oštećenje objekata klasificirano je jednovremenskom te zatim dvovremenskom metodom korištenjem satelitskih snimki visoke rezolucije.

Osmo, deveto i deseto poglavlje opsežno uspoređuju i objašnjavaju rezultate klasifikacije. Spomenute metode su zatim validirane vizualno i statistički kako bi se saznalo koja je metoda točnija i bolje primjenjiva za definirano područje interesa.

2. DALJINSKA ISTRAŽIVANJA

Upotreba snimki za dobivanje informacija o položaju, veličini, udaljenosti objekta i mnogim drugim osobinama izučava daljinsko istraživanje [1]. „Daljinsko istraživanje znači otkrivanje zemljine površine iz svemira korištenjem svojstava elektromagnetskog vala koji emitiraju, reflektiraju ili difraktiraju osjetljivi objekti, u svrhu poboljšanja upravljanja prirodnim resursima, korištenja površine i zaštite okoliša.“ [2]. Daljinsko istraživanje je znanost zaključivanja o predmetima iz mjerenja, napravljenim daljinski, bez fizičkog kontakta s objektima koji se proučavaju [3]. Daljinsko istraživanje se može promatrati i kao proces čitanja. Upotrebom senzora prikupljaju se podaci koji se analiziraju kako bi se iz njih mogle prikupiti informacije o objektu ili području interesa [4]. Različitom kombinacijom valnih područja kao i metodom daljinskog istraživanja omogućena je široka primjena. Daljinska istraživanja omogućavaju praćenje promjene tijekom vremena. Kako bi se prikupljeni podaci pravilno koristili, potrebno je biti upoznat s osnovnim vještinama prilikom obrade i interpretacije snimki. Osnovne vještine podrazumijevaju znanja o rezoluciji, mjerilu, spektru elektromagnetskog zračenja te o kanalima snimki.

Prvi satelit koji je dizajniran prvenstveno za proučavanje pokrova Zemlje bio je Landsat 1. To je prvi satelit koji je omogućio sistematično i neprekidno promatranje područja kroz nekoliko različitih kanala. Lansiranjem satelita Landsat 1 započeli su prvi ozbiljniji projekti i istraživanja uz pomoć kojih se dobiveni podaci mogu ekstrahirati i eksploatirati. Nakon 1990. godine lansiraju se sateliti čija je rezolucija manja od 1m te tako otvaraju daljnje mogućnosti upotrebe daljinskog istraživanja. Pristup snimkama olakšan je nakon pokretanja platforme *Google Earth* u 2005. godini. Ona omogućava prikaz podataka i upotrebu istih bez poznavanja dodatnih vještina koje su ranije bile neophodne [1].

2.1 Princip daljinskih istraživanja

Proces kojim se dobiva gotov produkt daljinskog istraživanja, integracija je raznih vještina i elemenata. Dvije glavne aktivnosti su prikupljanje i obrada podataka. Elementi uključeni u prikupljanje podataka su: izvor energije, propagacija energije kroz atmosferu, interakcija energije zračenja i tla, ponovni prijenos energije kroz atmosferu, senzori koji detektiraju energiju i generiranje dobivenih podataka sa senzora u digitalnom formatu. Nakon toga započinje obrada podataka [4].

Istraživanje započinje odabirom objekta ili područja interesa te vrste daljinskog istraživanja. Znanje o objektu od interesa i o njegovom mogućem stanju treba biti na visokoj razini [1]. Pasivno zrakoplovno istraživanje prikuplja informacije na temelju reflektirane sunčeve radijacije ili emitirane radijacije [3]. Svako tijelo temperature veće od apsolutne nule kontinuirano emitira

zračenje. Stefan-Boltzmannovo pravilo objašnjava ovisnost izračene energije koju emitira tijelo o četvrtoj potenciji apsolutne temperature tog istog tijela. Ovisnost je prikazana izrazom:

$$M = \sigma T^4 [W m^{-2}], \quad (1)$$

gdje je: M- ukupna radijacija po jedinici površine materijala,

σ - Stefan-Boltzmannov konstanta, $5,6697 \cdot 10^{-8} [W m^{-2} K^{-4}]$,

T- apsolutna temperatura tijela [K].

Iz izraza (1) vrijedi da se količina emitiranog zračenja povećava s četvrtom potencijom apsolutne temperature tijela [4].

Također, moguće je ozračiti područje osobnim izvorom zračenja koji se nalazi na platformi. Takvo daljinsko istraživanje naziva se aktivno. Aktivni izvori zračenja su Radar i Lidar.

Energija prilikom propagacije interferira s atmosferom i tlom. Takvo zračenje zatim dolazi do senzora. Senzor detektira postojanje energije te ju pretvara u električni impuls [3]. Električni impuls odgovara varijaciji energije na senzoru. Svi se signali pohranjuju na magnetski, optički, *flash* ili online medij s kojeg se naknadno konvertiraju u slikovni oblik. Svaki signal ima pripadajući diskretni iznos (često se koristi izraz „vrijednost piksela“) koji odgovara prosječnoj detektiranoj energiji (*radiance*) signala. Binarni kod se dobije kvantiziranjem svakog signala sa senzora u pozitivne cjelobrojne vrijednosti. Svaki signal može imati nekoliko binarnih kodova ovisno u koliko se slojeva područje snima [4]. Podaci prikupljeni na senzoru se zatim obrađuju i objedinjuju kako bi se mogli interpretirati.

2.1.1 Elektromagnetsko zračenje

Svo zračenje koje se koristi u daljinskim istraživanjima prolazi kroz atmosferu prema Zemlji. Objekti, koji su predmet proučavanja daljinskog istraživanja, emitiraju elektromagnetsko zračenje. Osim što emitiraju, također reflektiraju zračenje drugog tijela. Svaki objekt, ovisno o obilježjima, ima karakterističan obrazac emitiranja i reflektiranja zračenja. Taj se obrazac zračenja primjenjuje ovisno o spektru zračenja. Najrašireniji u upotrebi je spektar vidljive svjetlosti koji zapravo predstavlja vrlo mali udio u cjelokupnom spektru zračenja. Bitne karakteristike elektromagnetskog zračenja su:

- Valna duljina,
- Frekvencija,
- Amplituda,
- Fazni pomak.

Uz to, potrebna je i informacija o brzini širenja zračenja koja odgovara brzini od 299,792 km/s. Ovisno o vrijednostima ranije navedenih karakteristika, spektar elektromagnetskog zračenja se dijeli u karakteristične skupine [1]. Podjela je prikazana u Tablici 1. Infracrveno zračenje je podijeljeno na potkategorije s obzirom da svaka od njih ima različite karakteristike. Ovakva podjela spektra korisna je za daljinska istraživanja jer su određene potkategorije često u upotrebi.

Svaki od dijelova spektra ima različite karakteristike. Nije moguće koristiti cijeli spektar zračenja za daljinska istraživanja zbog ograničavajućih karakteristika. Spektar koji je u upotrebi je optički spektar čije su granice od 0,3 μm do 15 μm . To je spektar koji se može reflektirati i refraktirati pomoću leće ili zrcala. U suprotnom, instrumenti ne bi mogli zabilježiti nikakvo zračenje. Bitan dio spektra je i reflektirajući spektar kojemu su granice od 0,38 μm do 3,0 μm . Reflektirajući spektar se koristi za daljinska istraživanja. U njemu se nalazi vidljiva svjetlost, blisko i srednje infracrveno zračenje [1]. Razlog zašto je određeni dio spektra korisniji za prikupljanje podataka objašnjava se uz pomoć izraza:

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} [J], \quad (2)$$

gdje je: Q- energija kvanta [J],

h- Planckova konstanta, $6,626070040 \cdot 10^{-34}$ [Js],

c- brzina širenja elektromagnetskih valova [m/s],

λ - valna duljina zračenja [m].

Iz izraza (2) vrijedi: veća valna duljina zračenja sadrži manju količinu energije. Zbog toga se zračenja velikih valnih duljina kao što je mikrovalno zračenje teško detektiraju i rijetko koriste za prikupljanje podataka [4].

Tablica 1. Podjela elektromagnetskog spektra obzirom na valnu duljinu, [1]

Elektromagnetski spektar	Valne duljine
Gama zrake	<0,03 nm
x-zrake	0,03 nm - 300 nm
Ultraljubičasto zračenje	0,3 μm - 0,38 μm
Vidljiva svjetlost	0,38 μm - 0,72 μm
Infracrveno zračenje	
Blisko infracrveno	0,72 μm - 1,3 μm
Srednje infracrveno	1,3 μm - 3 μm
Daleko infracrveno	7 μm - 1000 μm
Mikrovalno zračenje	1 mm-30 cm
Radiovalovi	>30 cm

2.1.2 Reflektirajući spektar

Unutar reflektirajućeg spektra nalazi se vidljiva svjetlost i dio infracrvenog zračenja. Granice spektra vidljive svjetlosti predstavljaju ograničenja ljudskog oka. Tri primarne boje, crvena, zelena i plava, dovoljne su za dobivanje bilo koje druge boje. Bijela svjetlost sadrži sve tri boje u jednakim omjerima. Refleksija dijela spektra od objekt, našem oku daje informaciju o boji tog objekta. Dakle, boja objekta je definirana kao boja reflektirane svjetlosti. Kombinacijom po dviju primarnih boja dobivaju se i ostale boje: žuta, tirkizna i magenta.

Infracrveno zračenje je široki spektar zračenja koji se dijeli u tri potkategorije. Blisko i srednje infracrveno zračenje najbliže je vidljivom dijelu spektra. Blisko infracrveno zračenje ima karakteristike propagacije valova jednake onima u vidljivom spektru. Nadalje, ono se nalazi unutar optičkog dijela spektra u potpunosti te kao takvo se može snimati sličnim instrumentima kao i spektar vidljive svjetlosti [1]. Srednje i daleko infracrveno zračenje detektira se termalnim kamerama.

2.2 Interpretacija snimki daljinskog istraživanja

Pravilna interpretacija podataka, ovisno o rezoluciji, mjerilu i spektralnim kanalima, omogućava efektivnu upotrebu podataka. Cilj interpretacije je pretvorba podataka sa senzora u korisnu informaciju [1]. Interpretacija može biti vizualna ili digitalna. Vizualna interpretacija je metoda ekstrahiranja informacija sa snimke uz pomoć elemenata snimke. Digitalna interpretacija koristi informacije cijelog spektra i eliminira pristranost interpretatora. Računalo analizira specifične uzorke zračenja te svaki piksel pridružuje klasi. Na temelju vrijednosti piksela u različitim pojasevima zračenja, omogućava se točnija raspodjela piksela u klase. Klasifikacija piksela se postiže statističkim metodama [3].

Ranije spomenuto znanje o objektu od interesa podrazumijeva poznavanje njegovog odziva na zračenje kroz cijeli spektar zračenja. Prepoznavanje specifičnog obrasca zračenja je uglavnom intuitivno kada je u upotrebi spektar vidljive svjetlosti [1]. Interpretacija vidljivog dijela spektra se svodi na prepoznavanje boja i oblika.

Često se za daljinska istraživanja koriste dijelovi spektra gdje boje imaju drukčije značenje. Osim odziva na zračenje, prilikom interpretacije se proučava i svjetlina objekta. Potrebno je osigurati osjetljivost senzora koja omogućava prikaz kontrasta snimke. Razne su metode kojima se kontrast naknadno može poboljšati.

Rezolucija snimke također definira mogućnost interpretacije snimke. Potrebno je unaprijed znati i odlučiti kolika rezolucija zadovoljava sve željene kriterije istraživanja.

Prije upotrebe snimki potrebno je odraditi određene prilagodbe kako bi se snimke mogle koristiti za računanje površine objekata i njihov međusobni odnos u prostoru. U stvarnosti, svaka snimka sadrži pogreške uzrokovane perspektivom senzora, kretanjem optike za skeniranje, reljefom terena i zakrivljenošću Zemlje. Ove pogreške se ne mogu u potpunosti ukloniti i kao takve se prilikom interpretacije uvijek trebaju računavati.

Nakon što su informacije jasne i dostupne kombiniraju se i uspoređuju s ostalim dostupnim podacima kako bi se moglo doći do željenog ishoda istraživanja [1].

2.2.1 Odabir područja ili objekta od interesa

Prvi korak istraživanja predstavlja odabir područja snimanja. Ovisno o području i interesu pojedinca često je interpretacija integracija različitih znanja. U ovom se radu interpretira oštećenje nastalo potresom što predstavlja integraciju znanja iz područja građevine, geodezije, seizmologije i aeronautike. Interpretatoru obradu podataka olakšava poznavanje područja snimanja. Poželjno je da prije interpretacije snimki poznaje kakva su obilježja tla, topografiju i klimu područja [1]. U slučaju kada se radi o istraživanju ovisnom o vremenu, bitno je područje interesa jednoznačno definirati i kao takvo ga se ne smije mijenjati. Valjani se rezultati mogu dati

samo ako je područje snimanja jednake površine i koordinata te je snimano instrumentima koji omogućavaju jednaku ili bolju rezoluciju snimki.

2.2.2 Postupak vizualne interpretacije

Interpretacija snimki podrazumijeva analizu informacija prikupljenih uz pomoć daljinskih istraživanja, a u svrhu ostvarivanja željenog cilja. Interpretator vrši interpretaciju snimki koje često nisu u vidljivom spektru, nemaju uvijek poznato mjerilo i rezoluciju te prikazuju snimke iz ptičje perspektive. Uspješnost vizualne interpretacije ovisi o iskustvu interpretatora, karakteristikama područja i kvaliteti snimke. Poželjne karakteristike interpretatora su imaginacija i strpljivost te opsežno znanje o području interesa [4].

Prva zadaća interpretatora je klasifikacija objekata. Interpretator detektira, prepoznaje i identificira objekte na snimci na temelju njihovih prepoznatljivih obilježja. Ovaj je postupak potrebno odraditi s visokim stupnjem točnosti i preciznosti kako bi daljnji koraci bili uspješno odrađeni. Interpretator klasificira objekte uz pomoć elemenata snimke. To su: oblik, veličina, uzorak, ton (nijansa), tekstura, sjena, položaj i okruženje.

- a- Oblik: opći prikaz, konfiguracija ili obris pojedinog objekta.
- b- Veličina: element snimke koji se treba promatrati u kontekstu mjerila.
- c- Uzorak: prostorni raspored objekta. Ponavljanje određenih uzoraka interpretatoru olakšava prepoznavanje istih objekata.
- d- Ton ili nijansa: relativna svjetlina boje objekta. Bez ovog elementa oblik, veličina, uzorak i ton ne bi bili prepoznatljivi.
- e- Tekstura: frekvencija promjene tona na snimci. Ona predstavlja skup jedinstvenih obilježja koji su premali da bi se na slici mogli razaznati pojedinačno.
- f- Sjena: pruža informacije o bočnim karakteristikama objekta kao što je reljef.
- g- Položaj: topografska ili geografska lokacija objekta.
- h- Okruženje: vjerojatnost pojave objekta s obzirom na okolinu.
- i- Rezolucija [4].

Osim ovih elemenata, interpretator se koristi ranije stečenim znanjem o području. Nakon toga moguće je pojedine objekte svrstati u kategorije unutar kojih objekti dijele ista obilježja.

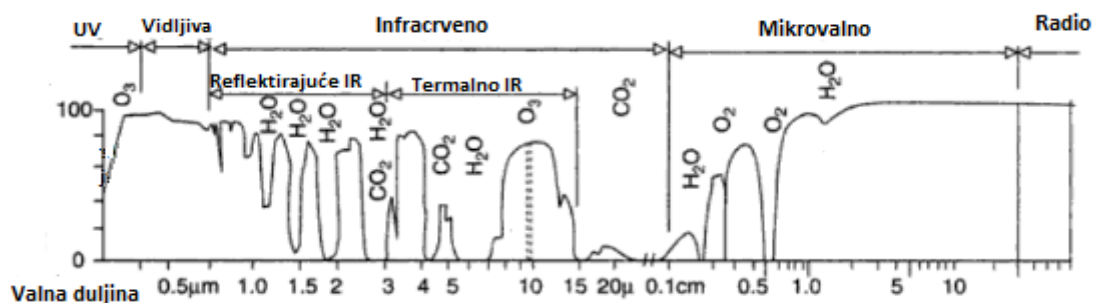
Ovisno potrebama, interpretator vrši mjerenja. Fotogrametrija primjenjuje znanje iz geometrije slike za dobivanje točnih udaljenosti. Interpretacija se završava ocrtavanjem ili odjeljivanjem područja kojeg karakteriziraju specifični tonovi i teksture. Nakon ocrtavanja na snimci se prepoznaju rubovi ili granice između zasebnih područja [1].

3. NEDOSTATCI DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Upotreba snimki daljinskog istraživanja olakšala je znanstvenicima prikupljanje podataka iz daljine što je sa sobom donijelo određene poteškoće. Velika ovisnost instrumenata za prikupljanje podataka i kvalitete snimke otežava mogućnost dostizanja željene rezolucije. Ovisno o vrsti daljinskog istraživanja potrebno je osoblje obučiti i pripremiti za takav rad. Dodatna edukacija i priprema prije samog postupka snimanja produžuje vrijeme potrebno da se istraživanje provede. Interakcija i utjecaj atmosfere i tla također otežava proces daljinskog istraživanja. Prije same upotrebe snimke u istraživačke svrhe, potrebno je sve atmosferske utjecaje ukloniti ili umanjiti. U kolikoj je mjeri utjecaj atmosfere značajan za daljinsko istraživanje ovisi o načinu prikupljanja informacija. Za satelitske snimke oni su puno veći nego za snimke prikupljene zrakoplovom [1]. Razlog tomu je put koji signal mora proći prije nego dođe do krajnjeg korisnika. Signal putuje prema satelitskom senzoru s tla te se vraća prema zemaljskoj stanici [4]. S obzirom na to da se u diplomskom radu koriste satelitske snimke, utjecaj atmosfere je detaljnije objašnjen.

U slučaju kada se atmosferski utjecaj ne otkloni ili ne umanja, može doći do velike degradacije kvalitete snimki. Valne duljine koje su najmanje zahvaćene atmosferskim utjecajima i najlakše prenosive kroz atmosferu predstavljaju „atmosferski prozor“. To je područje koje je najčešće u upotrebi za daljinska istraživanja. Poznavanje tih prozora omogućuje upotrebu daljinskih istraživanja u što većem opsegu koristeći što više informacija koje se mogu dobiti uz pomoć raznih instrumenata. Snimanje zračenja izvan ovih prozora nije učinkovito zbog prevelike apsorpcije atmosfere [1]. Na Slici 1. prikazana je raspodjela atmosferskih prozora te su naznačeni plinovi koji utječu na apsorpciju zračenja.

Stanje atmosfere također uvjetuje kvalitetu snimki. Trajna naoblaka može znatno smanjiti korisnost optičkih senzora. S obzirom da senzori uglavnom bilježe zračenje koje se reflektira od objekte ili tlo, njihova je sposobnost ograničena na bilježenje površinskih pojava koje reflektiraju elektromagnetsko zračenje [5].



Slika 1. Atmosferski prozori

[3]

3.1 Raspršenje

Raspršenje je preusmjeravanje elektromagnetske energije pod djelovanjem čestica u atmosferi ili velikih molekula atmosferskih plinova. Posljedica raspršenja je preusmjeravanje dijela zračenja nazad prema svemiru. Pojava raspršenja ovisi o nekoliko parametara: veličini čestica ili molekula, njihovoj gustoći i valnoj duljini zračenja. J. W. S. Rayleigh je povezo ovisnost valne duljine zračenja i raspršenja, ali uz uvijete čiste atmosfere koja se sastoji samo od atmosferskih plinova. Koeficijent Rayleighovog raspršenja prikazan je izrazom:

$$\alpha_{Rayleigh} = \frac{8 \pi^3}{3 \lambda^4} \left(\frac{n_1^2}{n_0^2} - 1 \right)^2 \cdot \beta k T_f, \quad (3)$$

gdje je: $\alpha_{Rayleigh}$ - koeficijent Rayleighovog raspršenja,

n - indeks loma medija,

β - izotermna kompresibilnost,

k - Boltzmannova konstanta, $1,3806505 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$,

T_f - fiktivna temperatura pri kojoj ne postoji razlika u gustoći unutar medija.

Iz izraza (3) vrijedi da je raspršenje veće na manjim valnim duljinama. Ova ovisnost vrijedi u slučajevima kada je promjer molekula koje uzrokuju raspršenje manji od valne duljine zračenja. Iz Rayleighove povezanosti valne duljine i raspršenja, zaključuje se kako se plava boja najviše raspršuje [1]. Rayleighovo raspršenje je glavni uzrok pojave sumaglice na snimkama. Ona smanjuje oštrinu i kontrast snimke. Njezin se utjecaj smanjuje korištenjem filtera koji ne prenose zračenja male valne duljine [4].

Mieovo raspršenje objašnjava pojavu preusmjeravanja zračenja kada se ono odbije od čestica smoga, vode, prašine ili dima. Zastupljenije je u nižim slojevima atmosfere i kod manjih valnih duljina. Mieovo raspršenje je također ovisno o valnoj duljini, no u manjoj mjeri [6]. U slučaju kada se zračenje odbija od čestice višestruko veće od valne duljine zračenja javlja se raspršenje koje je neovisno o valnoj duljini u obliku sumaglice [1]. Ono utječe na cijeli vidljivi spektar, blisko i srednje infracrveno zračenje. S obzirom na to da se cijeli vidljivi spektar raspršuje u jednakom omjeru, magla i oblaci se na snimkama prikazuju bijeli [4].

Posljedica raspršenja je velika za daljinska istraživanja, pogotovo u slučaju satelitskih snimki. Zbog pojave Rayleighovog raspršenja, područje plavog svijetla i ultraljubičastog zračenja ne može se koristiti za istraživanja. Instrumenti koriste filtere ili smanjuju osjetljivost na zračenja iz tog

dijela spektra. Zbog raspršenja se tamni objekti na snimci čine svjetliji, a svijetli objekti tamniji. Kada na senzor instrumenta pristigne određena količina zračenja, ona je zapravo suma tri različita izvora zračenja. Zadatak je daljinskog istraživanja prepoznati koja količina zračenja pristiže direktno odbijanjem o podlogu kako bi se mogle ekstrahirati korisne informacije [1].

3.2 Apsorpcija

Apsorpcija zračenja je pojava atmosfere gdje ona snažno utječe na količinu prenesenog zračenja. Širenjem valova kroz medij koji apsorbira energiju, amplituda i intenzitet se postupno smanjuju. Za računanje apsorpcije koristi se dubina prodiranja. Dubina prodiranja je dubina na kojoj je intenzitet zračenja smanjen za vrijednost $1/e$. Dubina prodiranja računa se prema izrazu:

$$l_a = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''}, \quad (4)$$

gdje je: l_a - dubina prodiranja,

λ_0 - valna duljina zračenja,

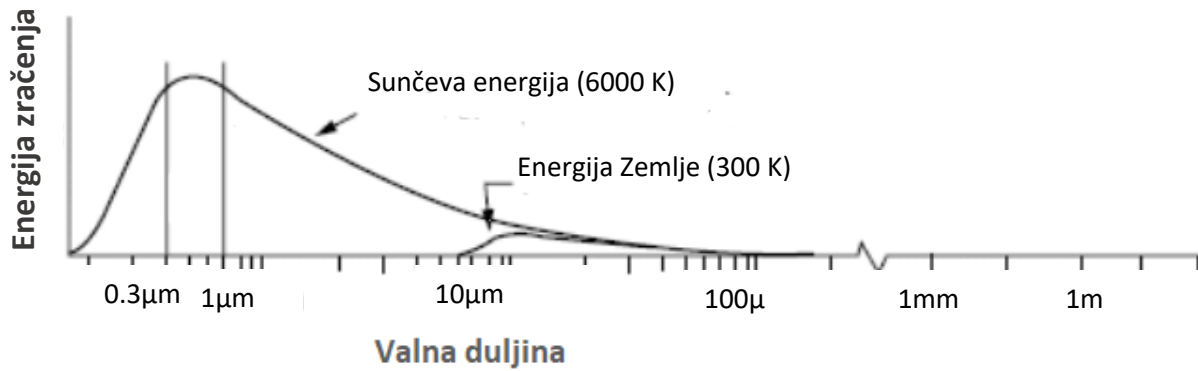
ϵ' - realni dio dielektrične konstante,

ϵ'' - imaginarni dio dielektrične konstante.

Iz izraza (4) primjećuje se da dubina prodiranja ovisi o valnoj duljini proporcionalno, tj, veća valna duljina znači i veća udaljenost za smanjenje intenziteta za $1/e$ [3].

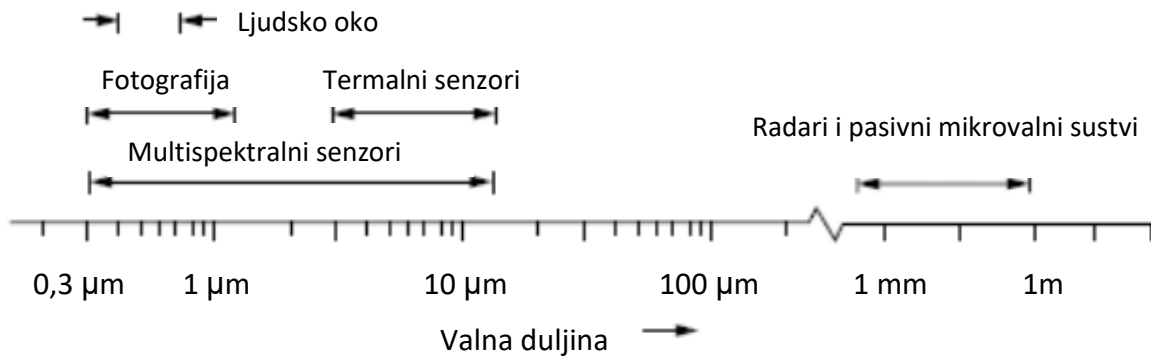
Ozon je plin koji najviše utječe na apsorpciju zračenja. Nalazi se u višim područjima atmosfere. On apsorbira zračenje malih valnih duljina štiteći tako Zemlju od lošeg utjecaja ultraljubičastog zračenja. Ugljikov dioksid je plin koji je prisutan u nižim slojevima atmosfere i kao takav utječe najviše na daljinska istraživanja. On apsorbira područje srednjeg i dalekog infracrvenog zračenja. Vodena para, također najviše prisutna u nižim područjima atmosfere, utječe na apsorpciju, no na način koji nije uniforman kao kod navedenih plinova. Postotak vodene pare i njena pojava razlikuju se od mjesta do mjesta te su promjenjiva vremenom. Za daljinska istraživanja bitno je dobro poznavati područje snimanja. Odrediti moguću pojavu vodene pare i njen utjecaj. Vodena para može apsorbirati veliku količinu energije ako je zračenje u valnim duljinama od $5,5 \mu\text{m}$ do $7 \mu\text{m}$, te veće od $27 \mu\text{m}$. Kada su uvjeti velike vlažnosti, apsorpcija može biti do 80 % te takvo snimanje ne bi bilo korisno [1].

Pojava apsorpcije uvelike utječe na odabir spektra daljinskog istraživanja. Kombiniranjem spektralnih karakteristika atmosferskih prozora prikazanih na Slici 1. i spektralnih karakteristika izvora energije zračenja prikazanih na Slici 2., dobiva se presjek najkorisnijih područja spektra daljinskog istraživanja.



Slika 2. Spektralne karakteristike izvora energije [4]

Valne duljine na koje je ljudsko oko osjetljivo odgovara atmosferskom prozoru vidljive svjetlosti i velikoj količini energije sa Sunca. Energija sa zemlje detektira se unutar atmosferskog prozora od 3 μm do 5 μm te od 8 μm do 14 μm uz pomoć termalnih skenera [4]. Slika 3. prikazuje spektralne karakteristike daljinskih istraživanja.

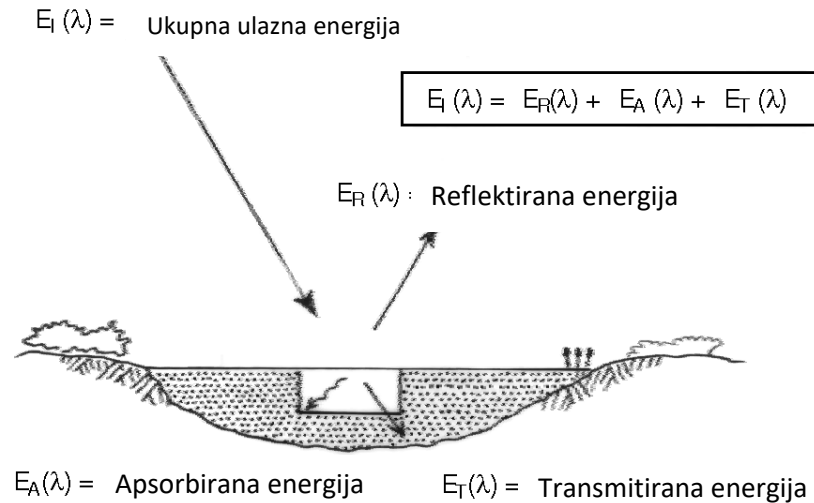


Slika 3. Spektralne karakteristike daljinskih istraživanja [4]

Uz pomoć Slika 1., 2. i 3. primjećuje se neupitna interakcija i ovisnost izvora zračenja, atmosferskih prozora i spektralne osjetljivosti senzora daljinskih istraživanja.

3.3 Interakcija s podlogom

Energija zračenja prilikom dolaska do površine višestruko reagira. Tri su fundamentalne interakcije prikazane na Slici 4.



Slika 4. Interakcija energije s podlogom

[4]

Ukupna ulazna energija je suma reflektirane, apsorbirane i transmitirane energije. Ovisno o tipu podloge i njezinim karakteristikama, mijenja se količina energije pojedinog elementa. Zbog tog se obilježja omogućava razlikovanje različitih objekata uz pomoć daljinskih istraživanja.

Nadalje, odgovor pojedinog objekta mijenja se ovisno o valnoj duljini. Dva identična odgovora na određeno zračenje mogu se razlikovati u nekom drugom spektru zračenja [4]. Uz pomoć izraza (5) računa se reflektirana energija koja je ujedno najkorisnija za daljinska istraživanja.

$$E_R(\lambda) = E_{I(\lambda)} - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)] \quad (5)$$

Ukupna reflektirana energija je ustvari razlika ukupne ulazne energije i apsorbirane i/ili transmitirane energije.

3.4 Poznavanje terena i njegovih obilježja

Daljinska istraživanja prikupljanju korisne podatke uz pomoć zračenja nastalog iz različitih izvora. Bitno je razlikovati što je izvor zračenja kako bi se istraživanje pravilno provelo. Izvor može biti reflektirano zračenje različitih izvora ili zračenje koje emitira svaki objekt. Osim u slučaju dalekog infracrvenog zračenja, daljinska istraživanja se baziraju na zračenju reflektiranom o objekt [1]. Prije odabira senzora potrebno je uzeti u obzir: spektralnu osjetljivost senzora, postojanje atmosferskih prozora, izvor zračenja te njegovu količinu energije u odabranom spektru.

Snimanjem karakterističnih objekata u različitim dijelovima spektra omogućava kreiranje obrasca zračenja. Prije same upotrebe snimki daljinskih istraživanja, korisno je i ponekad nužno

ranije poznavanje karakterističnih obrazaca. Ponekad različiti uzorci koji se interpretiraju mogu izgledati jednako tijekom klasifikacije što može dovesti do pogreške [5]. Ova pojava se javlja prilikom detekcije i interpretacije istog objekta, ali u različitim stanjima. Bez poznavanja očekivanog stanja područja interesa, ne mogu se ni primijeniti karakteristični obrasci. Pojava sjene smanjuje i otežava upotrebu karakterističnih obrazaca s obzirom na to da se objekti unutar sjene prikazuju tamniji i plavlji [4].

Bez ranijeg poznavanja uzoraka, provedba istraživanja je otežana i dovodi u pitanje točnost informacija dobivenih uz pomoć snimki. Cijeli ovaj postupak produžuje postupak istraživanja ako je potrebno dodatno obučiti osoblje na koji način interpretirati snimke. Stoga je dugoročno skupo koristiti tehnologiju daljinskog istraživanja [5].

3.5 Instrumenti i senzori za snimanje

Digitalne snimke nastaju uz pomoć instrumenata koji mogu sustavno skenirati dijelove Zemljine površine, snimajući fotone koji se odbijaju ili emitiraju [1]. Mogućnost razdvajanja dvaju objekata s različitim značajkama predstavlja bitnu karakteristiku senzora. „Pikseli su najmanji elementi elektronički obrađivane slike, svaka od točaka na koje se, radi digitalne vizualizacije, može razložiti sliku, čemu se pridružuje binarna informacija“ [7]. Niz piksela različitih svjetlina zajedno čine sliku. Digitalna slika sastavljena je od mnogo piksela te upravo broj piksela određuje kolika je rezolucija pojedine snimke [1]. Nedovoljna rezolucija ne može zadovoljiti potrebe istraživanja. Nadalje, inzistiranje na rezoluciji koja prikazuje detaljno podatke o objektu dovodi do prezasićenosti informacijama. Broj piksela pojedine snimke povezan je s mogućnostima instrumenta i senzora. Senzori su izrazito osjetljivi materijali koji bilježe postojanje i količinu fotona. Senzori moraju biti osjetljivi u granicama svojih mogućnosti. Visina i brzina satelita ili zrakoplova mora se odabrati tako da odgovaraju osjetljivosti senzora. Senzori se trebaju zadržati iznad područja dovoljno dugo kako bi akumulirali dovoljno fotona za vjerodostojnu interpretaciju promatranog područja.

Digitalni senzori imaju spektralnu osjetljivost koja obuhvaća vidljivi spektar i blisko infracrveno zračenje. Filteri koji se koriste za dobivanje boje smanjuju kvalitetu snimke tako da se količina svjetlosti koja prođe kroz filtere smanjuje. Digitalni senzori mogu biti dizajnirani da imaju spektralnu osjetljivost u uskom rasponu valnih duljina i tako pružiti visoku preciznost u mjerenju, no to uvelike poskupljuje postupak istraživanja [1].

Ljudi su ti koji odabiru koji senzor treba koristiti za prikupljanje podataka, određuju rezoluciju podataka i kalibraciju senzora, odabiru platformu koja će nositi senzor i određuju kada će podaci biti prikupljeni. Zbog svega navedenog, ljudska greška je prisutna i treba se uzeti u obzir kod istraživanja. Instrumenti koji se koriste u daljinskom istraživanju trebaju biti redovito umjeravani, u protivnom može doći do netočnih i nejasnih podataka daljinskog istraživanja [5].

4. PREDNOSTI DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Upotreba snimki daljinskih istraživanja olakšava i ubrzava proces prikupljanja informacija o objektima ili području interesa. U uvjetima gdje može doći do ugroze sigurnosti, daljinska istraživanja predstavljaju jedini mogući oblik prikupljanja informacija. Ovisno o odabiru kanala i interesu pojedinca, mogu se prikupiti i izdvojiti brojne informacije. Satelitsko daljinsko istraživanje pruža globalnu perspektivu Zemlje. Daljinsko satelitsko istraživanje omogućuje promatranje određenog područja kroz elektromagnetski spektar. Omogućeno je i dobivanje snimke u tri pojasa čime se osigurava da se detalji područja snimanja bolje definiraju nego što bi to bilo s jednim pojasom. Velika raznolikost instrumenata i senzora omogućava promatranje i kvantificiranje promjene područja. Mogućnost ponovljenog i dosljednog promatranja satelitskih snimaka također omogućuje stvaranje dugoročnih baza podataka na temelju kojih se procjenjuju klimatske i ljudske promjene na našem planetu [5]. Razna su područja primjene snimki. One omogućuju proučavanje vegetacije, gradova, utjecaja ekoloških katastrofi, zraka, itd.

4.1 Globalna pokrivenost

Daljinska satelitska istraživanja omogućuju dobivanje dosljednih i repetitivnih snimki područja, uključujući područja koja su prilično udaljena i obično nepristupačna poput mnogih polarnih, planinskih, pustinskih i šumskih područja. Omogućuju snimanje veće površine u relativno kratkom periodu te se kao takva koriste nakon većih elementarnih nepogoda. Lakše je locirati poplave ili šumski požar koji se proširio na veliko područje što olakšava planiranje spasilačkim službama. Daljinsko istraživanje je brz i dosljedan izvor jednoliko prikupljenih podataka s globalnom pokrivenosti.

Daljinsko istraživanje omogućuje pokrivanje vrlo velikih područja što omogućuje istraživanja raznih područja i prepoznavanje izuzetno velikih značajki koje su najbolje prepoznatljive iz zraka. Daljinsko istraživanje omogućuje neprekidno snimanje područja što je korisno pri prikupljanju podataka o dinamičkim objektima poput vode ili pokrivenosti snijegom. Neprekidno snimanje je olakšano činjenicom da se daljinsko snimanje obavlja pasivno, bez ometanja i često bez znanja osoba koja se nalaze na području snimanja [5].

4.2 Raznolikost mjerila i rezolucije

Daljinsko istraživanje omogućuje jednostavno prikupljanje podataka u raznim mjerilima i rezolucijama. Satelitski senzori imaju širok raspon nadmorske visine, pokrivenosti i prostorne rezolucije. Slijedom toga, snimljene snimke mogu biti visoke rezolucije s vrlo uskim rasponima pokrivenosti ili mogu imati mnogo veću pokrivenost s lošijom rezolucijom. Ponekad je poželjno da su snimke različitih rezolucija s obzirom na to da je njihova primjena široka. Jedna snimka snimljena daljinskim istraživanjem može se analizirati i protumačiti za upotrebu u raznim

područjima. Nema ograničenja u opsegu informacija koje se mogu dobiti iz jedne snimke. Daljinsko istraživanje pruža prostorno raspoređene podatke kao što su iskorištenost zemljišta, topografija ili sezonski hidrološki i vegetacijski parametri u različitim mjerilima i u redovitim periodima snimanja.

4.3 Višestruki prikaz podataka

Višestruko prikazivanje podataka znači prikupljanje podataka s različitih nadmorskih visina, prikupljanje podataka u nekoliko pojaseva ili prikupljanje podataka u više vremenskih intervala. Prikazivanje podataka s različitih nadmorskih visina omogućeno je integracijom satelitskih snimki i snimki zrakoplovnog istraživanja. Prikupljanje podataka u više pojaseva daje više informacija o objektu nego što daje jedan pojas. Zajedničkom analizom signala multispektralne snimke ekstrahira se više informacije nego što bi analiza svakog pojasa pojedinačno dala. Dvovremensko prikazivanje podatka uspješno detektira promjene nastale na području interesa [4]. Ovisno o daljnjoj upotrebi i potrebama, na pojedincu je da iz svega ponuđenog odabere najbolju kombinaciju koja bi mu omogućila pristup iskoristivim i kvalitetnim podacima.

4.4 Transmisija i pristup podacima

Daljinsko istraživanje prikuplja snimke u digitalnom formatu pružajući mogućnost prijenosa podataka u stvarnom vremenu do zemaljske prijemne stanice i krajnjeg korisnika. Ova karakteristika i mogućnost satelitskog daljinskog istraživanja osobito je važna kada se radi o prirodnim katastrofama i nepogodama koje zahtijevaju pristup snimkama gotovo u stvarnom vremenu. U praksi, jedino meteorološki sateliti nude izravni prijenos podataka u stvarnom vremenu do krajnjeg korisnika, pod pretpostavkom da korisnik ima adekvatan sustav prijema. Signal koji se odašilje je kodiran te zahtijeva sofisticirane prijemne stanice za prijenos podataka visoke i srednje prostorne rezolucije. Slike se odašilju unutar područja pokrivenosti antene u stvarnom vremenu ili se pohranjuju te odašilju kasnije. Korisnik dobiva sliku s vremenskim kašnjenjem zbog kalibracije i obrade podataka. Primljeni podaci mogu se lako obraditi i brzo analizirati pomoću računala za svakodnevnu upotrebu što minimalizira rad koji treba obaviti na terenu [5].

5. SATELITSKO DALJINSKO ISTRAŽIVANJE

Promatranje Zemlje sa satelitske platforme pruža sinoptički pogled na veliko područje. Satelitske platforme omogućuju snimke pod gotovo konstantnim solarnim zenitnim kutovima uz slične uvjete osvjetljenja. Ranije je već navedeno kako satelitske snimke omogućuju nadziranje istog područja u redovitim vremenskim intervalima ovisno o orbiti satelita. Visina s koje sateliti snimaju uvjetuje period revolucije [3]. Satelitsko daljinsko istraživanje je dinamičan sustav podložan promjenama. Pojavom sve više interesnih skupina redovito se lansiraju i najavljuju novi sustavi. Sve su češće to autonomni sateliti u interakciji s ostalim sensorima, satelitima ili zemaljskim postajama [4]. Bitna karakteristika prilikom dizajniranja satelita je njegov senzor.

Današnji senzori snimaju snimke pomicanjem trenutnog vidnog polja instrumenta preko zemljine površine kako bi zabilježili osvjetljenje i energiju. Češći mehanizam je mehanički skener koji snima pod pravim kutom u smjeru kretanja satelita kako bi podaci bili rasterski. Kretanje satelita prema naprijed tada omogućuje stvaranje rasterske snimke. Drugi način skeniranja je „*push-broom*“ mehanizam koji svaki piksel može snimiti pojedinačno. Vrijeme tijekom kojeg se detektira količina energije po pikselu veće je kod skeniranja „*push-broom*“, što obično omogućuje postizanje boljih prostornih rezolucija [6].

5.1 Definiranje satelitske orbite

Pozicija satelita i njegova brzina najbitniji su parametri pri definiraju njegove orbite. Orbita je zaobljena putanja kretanja objekta u svemiru koja nastaje kao posljedica gravitacijske sile. U 17. stoljeću je Johannes Kepler odredio metodu opisivanja orbite kako bi se njihov oblik, veličina i orijentacija lakše vizualizirala. Njegova metoda opisivanja također smješta satelit u tu orbitu. Šest je elemenata uz pomoć kojih se orbita definira. Ti se elementi nazivaju klasični elementi orbite (engl.-, „*Classic Orbital Elements*“ (COEs)). Oni su:

- Veličina orbite,
- Oblik orbite,
- Orijehtacija orbite,
 - Orbitalna ravnina u prostoru,
 - Orbita unutar ravnine,
- Položaj satelita u orbiti

[8].

5.1.1 Veličina i oblik orbite

Veličina orbite definirana je s velikom poluosi elipse. Za određivanje oblika orbite potrebno je odrediti ekscentricitet. Ekscentritet je bezdimenzijska veličina iznosa između 0 i 1 koja opisuje izduženost elipse, tj. u ovom slučaju orbite. Ekscentritet se računa izrazom:

$$e = \frac{2c}{2a} \quad (6)$$

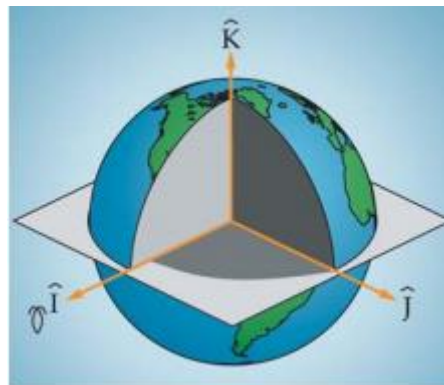
gdje je: c - udaljenost između žarišta elipse tj. mala poluos [m],

a - velika poluos [m]

[8].

5.1.2 Orijentacija orbite

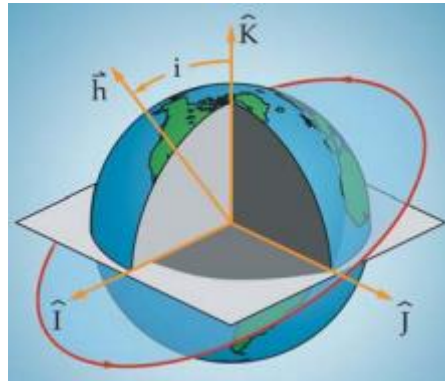
Za definiranje orijentacije orbite koristi se geocentrično-ekvatorijalni koordinatni sustav koji je inercijalan. Orbitalna ravnina je stacionarna u inercijalnom sustavu. Koordinatni sustav prikazan je na Slici 5. Temeljna ravnina je ekvatorijalna ravnina Zemlje, vektor (\hat{I}) usmjeren je prema proljetnoj ravnodnevici, jedinični vektor \hat{K} usmjeren je prema Sjevernom polu te na kraju \hat{J} koji se određuje pravilom desne ruke.



Slika 5. Geocentrično-ekvatorijalni koordinatni sustav

[8]

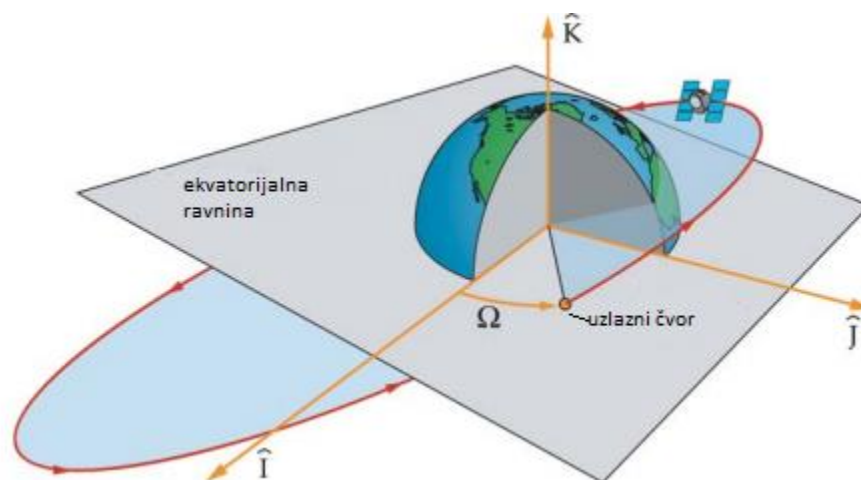
Kada je definiran koordinatni sustav, lakše je razumjeti kutove koji definiraju orijentaciju orbite. Kut inklinacije je kut između temeljne ekvatorijalne ravnine i orbitalne ravnine. Ovisno o iznosu kuta inklinacije razlikuju se orbite koje se kreću u smjeru rotacije Zemlje ili obrnuto od nje. Na Slici 6. prikazan je kut inklinacije u koordinatnom sustavu [8].



Slika 6. Kut inklinacije
[8]

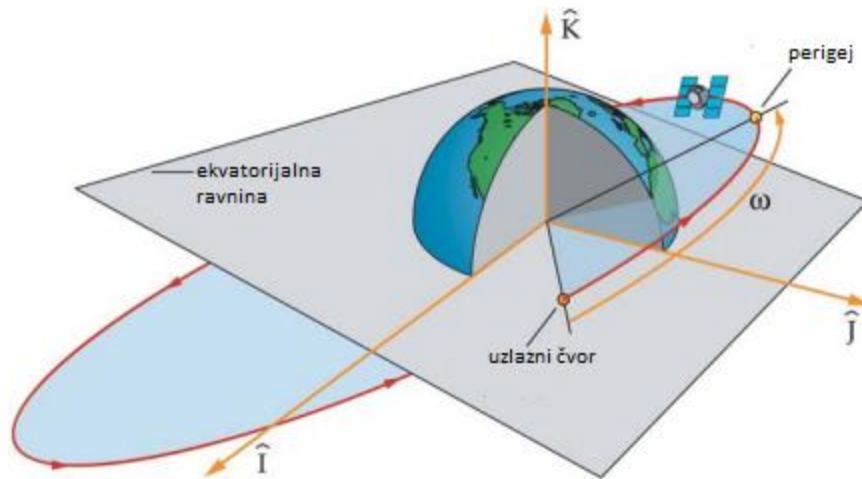
Kut inklinacije jednak je kutu između vektora \hat{K} koji je okomit na ekvatorijalnu ravninu i vektora \vec{h} koji je okomit na orbitalnu ravninu.

Drugi kut kojim se određuje orijentacija orbite je desno uzdizanje uzlaznog čvora [Ω] (*right ascension of the ascending node*). Slika 7. prikazuje kut desnog uzdizanja uzlaznog čvora. Koristi se za opisivanje orbitalne orijentacije s obzirom na vektor \hat{I} . Za objašnjenje pojma „uzlazni čvor“ potrebno je znati geometriju ravnine iz čega presjek dviju ravnina tvori liniju. U ovom slučaju, sjecište orbitalne ravnine i ekvatorijalne ravnine čini liniju čvorova. Dvije točke na kojima orbitalna ravnina presijeca ekvatorijalnu ravninu su čvorovi. Čvor gdje je satelit ispod ekvatora je silazni čvor dok je čvor iznad ekvatora uzlazni čvor. Dakle, desno uzdizanje uzlaznog čvora opisuje orijentaciju orbitalne ravnine s obzirom na glavni smjer. Proljetna ravnodnevica koristi se kao početna točka mjerenja. Od nje do uzlaznog čvora u smjeru istoka i po ekvatorijalnoj ravnini je kut Ω [8].



Slika 7. Kut desnog uzdizanja uzlaznog čvora
[8]

Treći kut koji definira orijentaciju je kut između uzlaznog čvora i perigeja. Naziva se dokaz perigeja $[\omega]$. Perigej je najmanja udaljenost između Zemlje i satelita koji se oko nje giba po elipsi. Ovaj kut opisuje gdje je perigej u usporedbi s ekvatorijalnom ravninom te se mjeri u smjeru kretanja letjelice. Slika 8. prikazuje kut koji dokazuje perigej [8].



Slika 8. Kut dokaza perigeja [8]

5.1.3 Položaj satelita u orbiti

Ranije definirani COE olakšavaju definiranje položaja satelita u orbiti. Kut kojim se opisuje položaj satelita je kut prave anomalije $[v]$. Mjeri se od perigeja do položaja satelita $[\vec{R}]$, a u orbitalnoj ravnini te u smjeru kretanja satelita. Ovo je jedini COE koji se mijenja u ovisnosti s vremenom. Ovakav način opisivanja položaja moguć je jedino ako je poznat položaj perigeja. U slučaju kada je orbita kružna, perigej ne postoji i ovakvo definiranje položaja nije moguće [8].

5.2 Tipovi orbita

Najčešće se sateliti smještaju u unaprijed definirane orbite. Odabir orbite ovisi najviše o području eksploatacije satelita. Vrste orbita su:

- Geostacionarna orbita (GEO),
- Niska zemaljska orbita (LEO),
- Srednja zemaljska orbita (MEO),
- Sunčeva sinkrona orbita (SSO),
- Geostacionarne transferne orbite (GTO),

- Lagrangeove točke.

U daljnjim poglavljima će se opisati samo orbite koje se koriste u satelitskim daljinskim istraživanjima [9].

5.2.1 Niska zemaljska orbita

Niska zemaljska orbita (LEO) je na visini od 160 km do 1000 km. Sateliti unutar LEO imaju određeni kut inklinacije čime je omogućeno više prostora za satelite unutar ove orbite. Njegov položaj blizu Zemlje odgovara kriterijima daljinskog istraživanja za dobivanje snimki visoke rezolucije. Unutar ove orbite se također nalaze Međunarodna svemirska postaja („*International Space Station*“ (ISS)). Sateliti u ovoj orbiti putuju brzinom od oko 7.8 km/s. Ovom brzinom satelitu treba oko 90 minuta da okruži Zemlju, što znači da ISS putuje oko Zemlje 16 puta dnevno [9]. Kašnjenje signala uzrokovano propagacijom u ovoj je orbiti 20 ms - 25 ms [10]. Veliki problem u ovoj orbiti predstavlja svemirski otpad koji nastaje sve češćim sudarima satelita.

5.2.2 Sunčeva sinkrona orbita

Uz LEO, najčešća orbita u upotrebi je kružna sunčeva sinkrona orbita (SSO). Sateliti ove orbite nalaze se na visini od 600 do 800 km putujući brzinom od 7.5 km/s. SSO je ustvari podvrsta polarne orbite. Sateliti u ovoj orbiti putuju od jednog do drugog pola sinkronizirani sa Suncem [9]. U sunčevoj sinkronoj orbiti sve točke na određenoj geografskoj širini imat će isto lokalno srednje sunčano vrijeme. Nadalje, područje snimanja sunčevog sinkronog satelita može se ponoviti točno u intervalima od određenog broja dana održavanjem visine i nagiba orbite, osiguravajući tako repetitivna promatranja područja na istom lokalnom vremenu. Budući da fiksno lokalno vrijeme pruža gotovo identično sunčevo osvjetljenje, ova orbita nudi velike prednosti za interpretaciju satelitskih snimki, istovremeno nadgledajući dinamičke promjene koje se događaju na Zemlji [3].

5.3 Satelitske snimke

Karakteristike satelitskih snimki bitne su prilikom odabira satelitskog sustava kojim će se koristiti daljinska istraživanja. Karakteristike su: prostorna rezolucija, spektralna rezolucija, vremenska rezolucija, radiometrijska rezolucija, povijest programa, dostupna pokrivenost područja i višekutna sposobnost [10].

Rezolucije utječu na ono što se može vidjeti na slici. Prostorna rezolucija je mogućnost senzora da prepozna i odvoji dva različita objekta, veća rezolucija znači prepoznavanje manjih objekata [3]. Utjecaj zaobljenosti Zemlje na rezoluciju snimki izraženija je kod satelitskih snimki. Odmakom od nadira prostorna se rezolucija pogoršava [4]. Spektralna rezolucija predstavlja spektar zračenja unutar kojeg je moguće prikupiti podatke [3]. Bitan parametar ove rezolucije je

širina pojasa. Ona definira koji raspon valnih duljina detektira određeni pojas. Položaj pojasa određen je najmanjom, najvećom i srednjom vrijednosti raspona. Ako senzor detektira nekoliko pojaseva, snimke se nazivaju multispektralne ili hiperspektralne snimke (više od 100 pojaseva) [10]. Radiometrijska rezolucija je mogućnost senzora razdvojiti dva objekta na temelju reflektiranog ili emitiranog zračenja. Veća rezolucija znači da manja razlika u zračenju može biti prepoznata [3]. Karakteristika senzora koja utječe na radiometrijsku rezoluciju je dinamički raspon. On definira gornju i donju granicu intenziteta signala kojeg senzor može detektirati, tj. raspon vrijednosti koje mogu predstavljati vrijednost piksela [10]. Bolja prostorna i spektralna rezolucija smanjuju količinu energije na senzoru. Visoka prostorna rezolucija znači da senzor detektira energiju s manjeg područja, a visoka spektralna rezolucija da senzor detektira energiju unutar uskog dijela spektra [4]. Pojedini senzori mogu i mijenjati rezolucije ovisno o potrebama. Vremenska rezolucija je mogućnost prikazivanja istog objekta u jednakim ili sličnim uvjetima te u pravilnim intervalima [3]. Kratki interval ponavljanja povećava šanse za dobivanje "čiste" slike [10]. U slučaju istraživanja oštećenja potresa ili ostalih prirodnih katastrofa, manji interval ponavljanja je poželjniji [4].

Povijest programa korisniku govori kada je prikupljanje snimki započelo i dokad traje te postoji li arhiva snimki. Dostupna pokrivenost područja korisniku govori koliko će mu snimki biti potrebno. Veći broj snimki povećava potencijalni problem s obradom slika. Višekutna sposobnost omogućava ciljanje određenih područja umjesto sustavnog prikupljanja snimki. Problem stvara gledanje snimki pod kutom koje izobličava sliku, no to se kompenzira tijekom obrade. Ova mogućnost učinkovito skraćuje interval ponavljanja snimanja.

Satelitske snimke se dijele na snimke niske rezolucije (rezolucija od 100 m i više), srednje rezolucije (od 15 m do 100 m) i visoke rezolucije (15 metara i manje) [10].

5.4 Satelitski sustavi

Za lakše razumijevanje njihove raznolikosti, satelitski sustavi podijeljeni su u tri skupine. Prvu skupinu čine sustavi dizajnirani za snimanje širokog geografskog područja s umjerenom razlučivošću. Najčešće se koriste za nadzor velikih površina tla ili vode. U ovoj skupini sustavi su dizajnirani po uzoru na *Landsat*. Druga skupina su sustavi dizajnirani za snimanje velikih površina s lošijom razlučivosti. Njihova je svrha kontinentalno ili globalno pokrivanje. Snimke ovakvih sustava se koriste za proučavanje dinamike okoliša. Treću skupinu čine sustavi namijenjeni za snimanje manjih površina s velikom razlučivosti [1].

5.4.1 Prva skupina—Landsat sateliti

Nakon uspješnog lansiranja prvog Landsat satelita interes za sličnim sustavima uvelike je porastao. Ovakvi sustavi omogućuju regionalni nadzor s umjerenom razlučivošću. Svi sustavi dizajnirani nakon Landsat-a imaju identičan tehnološki dizajn i upravljanje podacima [1].

Posljednji satelit u ovoj skupini je Landsat 8. Ovaj se satelit sastoji od dva instrumenta koji omogućuju snimanje u 11 pojaseva. Rezolucija je 30 m za vidljivi dio spektra i blisko infracrveno zračenje. Najavljeno je lansiranje satelita Landsat 9 15. rujna 2021. koji će po specifikacijama biti isti satelitu Landsat 8, no smanjit će period snimanja željenog područja na 8 dana [11].

5.4.2 Druga skupina-globalna pokrivenost

Ova skupina uključuje satelitske sustave koji pružaju globalnu pokrivenost, no s malom razinom detalja. Snimke tijekom nekoliko tjedana služe za stvaranje kompozita koji prikazuju velika područja Zemlje bez oblaka koji bi inače bili prisutni. Često su ovakvi satelitski sustavi meteorološki sateliti uz pomoć kojih znanstvenici prate povezanost klimatskih promjena i zemaljskog pokrova u različitim klimatskim zonama. Ovakvi sateliti imaju visoko sofisticirane sustave skeniranja koji omogućuju korisniku odabir rezolucije od 1.1 km do 4 km. Također omogućavaju prijenos podataka u stvarnom vremenu, no tada treba uzeti u obzir postojanje oblaka na snimkama [1].

5.4.3 Treća skupina-sustavi visoke rezolucije

U trećoj su skupini svi oni sustavi koji su dizajnirani da omoguće snimke s velikom razlučivošću manje površine. Prvi sustavi unutar ove skupine dizajnirani su za vrijeme hladnog rata. Tek tada se omogućila upotreba satelitskih daljinskih istraživanja za analizu urbane infrastrukture, planiranje prijevoza i izviđanja. Ovakvi sustavi prikupljaju podatke unutar vidljivog spektra i bliskog infracrvenog, često s mogućnošću pružanja pankromatske slike s još većom rezolucijom. Nalaze se unutar sunčano sinkronih orbita tako da mogu pružiti pokrivenost gotovo cijele Zemlje [1].

6. KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA POTRESA

U područjima gdje su potresi i poplave redovita pojava, upotreba daljinskih istraživanja je uvelike implementirana. Potresi nastaju kao posljedica tektonskih promjena. Statičari i ostalo kvalificirano osoblje interpretiraju, detektiraju i procjenjuju razornost bez potrebe za odlaskom na mjesto epicentra. Osim procjene razornosti, uz pomoć satelitskih snimki mogu se detektirati i promatrati veliki rasjedi i propadanje zemlje [4]. Preduvjet za provedbu klasifikacije je pristup snimkama visoke rezolucije. Rezolucija od 60 cm ili manje omogućava preciznije i brže detektiranje oštećenja. Usporedbom zatečenog stanja sa stanjem prije potresa, objekti se uvrštavaju u klase. Klase su unaprijed definirane ovisno o materijalu konstrukcije koja se proučava. Problem ovakve klasifikacije predstavlja subjektivnost interpretatora koja se eliminira uključivanjem više interpretatora čiji se rezultati na kraju uspoređuju i sumiraju [12]. Klasifikaciju je moguće izvršiti i samo analizom snimki nakon potresa.

Osim optičkih podataka koji su najjednostavniji za interpretaciju, mogu se koristiti LIDAR (*Light Detection And Ranging*) podaci, SAR (*Synthetic Aperture Radar*) podaci, termalne infracrvene kamere koje se mogu koristiti za predviđanje potresa i In-SAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) podaci za mjerenje deformacija površine Zemlje. Različite vrste podataka daljinskog istraživanja omogućuju različite, ali i komplementarne informacije o oštećenju. Optički podaci jednostavno se mogu protumačiti dok se SAR podaci mogu prikupiti neposredno nakon potresa neovisno o vremenskim uvjetima. Svojstvo podataka LiDAR je sposobnost otkrivanja oštećenja na zgradama procjenom njezinih visinskih promjena [13]. Vizualna analiza je najpouzdanija i najneovisnija metoda analize koja daje rezultate neovisno o tipu dostupnih podataka. Uz pomoć algoritama moguće je automatizirati vizualnu analizu uz nadzor i naknadnu provjeru rezultata. Rezultati klasifikacije ubrzavaju proces obnove i omogućuju daljnja istraživanja ostalim znanstvenim disciplinama.

6.1 Definiranje klasa oštećenja


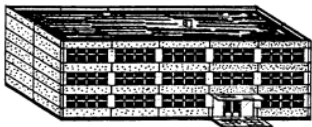





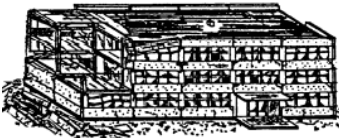


Klase oštećenja nisu jednoznačno određena. Prvi način određivanja klasa je podjela u četiri klase: moguće oštećenje, umjereno oštećenje, teško oštećenje i uništeno. Tablica 2. prikazuje primjere pojedine klase i njeno objašnjenje [14]. Iz Tablice 2. je vidljivo kako je potrebno detaljno proučiti zatečeno stanje objekta i njegovog okruženja kako bi mu se pravilno mogla odrediti klasa. Interpretacija snimki je provedena traženjem karakterističnih obrazaca oštećenja.

Drugi način definiranja klasa je u skladu s Europskom makroseizmičkom ljestvicom (EMS98). Oštećenje se dijeli u pet klasa: neznatno oštećenje, umjereno oštećenje, veliko oštećenje, vrlo veliko oštećenje i uništeno. Ovakva klasifikacija vrijedi za zidane, betonske i armirane objekte.

Tablica 2. Klasifikacija oštećenja objekata – 1. način, [14]

Klasa Oštećenja	Prije potresa	Nakon potresa	Osobine klase
Moguće oštećenje			<p>Zgrade s mogućim oštećenjem</p> <p>Mali tragovi krhotina u blizini zgrada</p> <p>Susjedni objekti oštećeni</p>
Umjereno oštećenje			<p>Objekti s neznatnim strukturalnim ili umjerenim nestrukturalnim oštećenjem</p> <p>Krov uglavnom neoštećen, ali vidljiva manja oštećenja</p>
Veliko oštećenje			<p>Objekti s vrlo teškim strukturalnim i nestrukturalnim oštećenjem</p> <p>Krovovi uglavnom oštećeni ili urušeni</p>
Uništeno			<p>Objekti s vrlo velikim strukturalnim oštećenjem, skoro pa urušeni</p> <p>Pojedini dijelovi objekta neprepoznatljivi ili nepostojeći</p>

Tablica 3. Klasifikacija oštećenja objekata od opeke i armiranog betona- 2. način, [15]

Klasa oštećenja	Zidane konstrukcije	Armirano-betonski objekti	Osobine klase
Neznatno oštećenje			Nema strukturalnih oštećenja, blaga nestrukturalna oštećenja
Umjereno oštećenje			Lagana strukturalna oštećenja, umjerena nestrukturalna oštećenja
Veliko oštećenje			Umjerena strukturalna oštećenja, teška nestrukturalna šteta
Vrlo veliko oštećenje			Velika strukturalna oštećenja, vrlo velika nestrukturalna oštećenja
Uništeno			Vrlo teška strukturalna oštećenja

Drveni objekti dijele se u četiri klase: bez oštećenja, umjereno oštećenje, veliko oštećenje i vrlo veliko oštećenje. Tablica 3. prikazuje EMS98 klase oštećenja i njihovo objašnjenje. Poteškoću stvara uočavanje razlike između klasa te je stoga teško konstruirati korespondenciju između klasa oštećenja iz EMS98 i njihove pojave u snimkama daljinskog istraživanja. Kao rezultat toga, kako bi se postigao zadovoljavajući ishod u otkrivanju oštećenja, definirane su različite sheme klasifikacija oštećenja prema kvaliteti korištenih podataka daljinskog istraživanja. Niže klase oštećenja u praksi se prikupljaju kao jedna klasa [14].

6.2 Metode klasifikacije

Nakon definiranih klasa započinje detekcija oštećenja. Svi se objekti unutar područja interesa prebroje. Postupak dodjeljivanja klasa treba biti odrađen detaljno i precizno. Ovisno o postojanju snimki prije potresa, istraživanje se može provesti pomoću dvije različite metode – jednovremenske i dvovremenske. Glavne razlike između ove dvije metode je njihova primjenjivost i kvaliteta rezultata. Metoda koja koristi samo snimke nakon događaja daje nepreciznije rezultate. Glavna prednost ovakve metode je što se detektiranje oštećenja može provoditi bez referentnih podataka i pogodna je za brzu početnu procjenu oštećenja. Nedostatak jednovremenske metode je otežana precizna detekcija oštećenja bez poznavanja onoga što je postojalo prije potresa. Glavno ograničenje dvovremenske metode je nepostojanje snimki ili lošija kvaliteta snimki prije događaja [13].

6.2.1 Dvovremenska metoda

Oštećene niže klase teško je prepoznati ako se koriste samo podaci nakon događaja. Postojanje snimki prije događaja značajno povećava mogućnost detektiranja nižih klasa oštećenja [12]. Precizni rezultati mogu se dobiti vizualnom interpretacijom. Vizualna interpretacija oduzima puno vremena, zahtjeva obučene interpretatore i proizvodi veliko radno opterećenje što ju čini neprikladnom za brzu procjenu štete na velikom području [13].

Automatska detekcija i klasifikacija oštećenja nije usavršena. Usporedbom automatski prikupljenih podataka i podataka vizualne analize dobiva se podudarnost od 70%. Automatska se metoda temelji na analizi oblika, boje, teksture i usporedbi svjetlosti [13]. Automatizirana metoda koja se temelji na promjeni rubova za otkrivanje srušenih objekata pretpostavlja da oštećeni objekti trpe veliku razliku u rubovima u usporedbi s neoštećenim zgradama. Kada se rezultati analize ucrtaju kao karta oštećenja, uspješno su locirana područja ekstremne promjene. Nedostatak automatske analize je ta što se promjena mjeri relativno, a ne apsolutno. Takvi podaci zahtijevaju daljnje unaprjeđenje kako bi se mogli iskoristiti za proces sanacije štete ili procjene oštećenja [16]. Snimke prije i nakon potresa se povezuju i oduzimaju kako bi se dobila slika koja predstavlja promjenu u vremenu [13]. Postupak povezivanja snimki prije i nakon potresa zahtjeva poboljšanje i međusobno povezivanje snimki prije samog postupka klasifikacije. Nadalje, mnoštvo ograničenja automatske analize usporava i priječi njenu upotrebu.

6.2.2 Jednovremenska metoda

Pojava snimki daljinskog istraživanja s visokom rezolucijom omogućuju otkrivanje oštećenja na temelju samo podataka nakon događaja. Iako je teško utvrditi točan stupanj oštećenja zgrade koristeći se samo podacima nakon događaja, oni su korisni za brzu procjenu štete. Vizualna detekcija i u ovom slučaju ostaje osnovna metoda klasifikacije [13]. Uvođenjem više

interpretatora u postupak klasifikacije, razlike prilikom dodjeljivanja klasa 3, 4 i 5 su veće. Najveća odstupanja su zamijećena za klasu 3. Najveća sličnost u klasifikaciji je za oštećenja klase 5. Odstupanja u klasifikaciji smanjuju se upotrebom dvovremenske metode [12].

Automatska detekcija oštećenja objekata uglavnom je usredotočena na upotrebu različitih izdvojenih značajki snimke [13]. Rubovi se široko koriste kao važna značajka za automatsko detektiranje oštećenja objekata samo sa snimkama nakon događaja. Ograničenja ovakve metode je utvrđivanje štete u zasjenjenim regijama te postavljanje parametara za automatsku detekciju oštećenja [17]. Upotreba teksture rubova, multispektralnih snimki i prostornih odnosa na temelju morfoloških prostornih odnosa daje preciznije podatke. Ovim pristupom dijelovi krhotina ekstrahirani su analizom rubne teksture, a preostali dijelovi objekata ocrtni su na temelju analize prostornih odnosa. Preklapanje između otkrivenih krhotina i preostalih građevinskih površina impliciralo je stupanj oštećenja. Za svaki objekt veće područje preklapanja s krhotinama znači postojanje krhotina i u okolnim objektima. Stoga je pretpostavka da je objekt od interesa teže oštećen. Dobiveni rezultati su podudarni s vizualnom analizom [18].

6.3 Validacija klasifikacije

Nakon provedene klasifikacije potrebno je validirati istraživanje. Prvi oblik validacije se provodi kontrolom kvalitete. Kontrola kvalitete uz pomoć uzorka ima statističku podlogu i jednostavno se implementira. Izračun veličine uzorka nad kojim se provodi kontrola kvalitete ovisi o ukupnoj količini objekata, a bazira se na hipergeometrijskoj razdiobi. Na taj se način dobiva broj pogrešaka koji se, ovisno o veličini uzorka, smije pojaviti prilikom kontrole kvalitete, a da zadovoljava točnost od 95% [14]. Tablica 4. prikazuje ovisnost broja objekata i količine pogrešaka.

Validacija se izvodi bazirana na podacima u Tablici 4. i poželjno je da je izvršava osoba koja nije sudjelovala u prvotnoj klasifikaciji. Validator izvodi klasifikaciju u istim uvjetima i na snimkama iste kvalitete. Rezultati validacije daju postotak točnosti po klasama te ukupnu pouzdanost klasifikacije [14]. Drugi oblik validacije je vizualna validacija istraživanja odlaskom na mjesto potresa.

Validacija je bitan parametar koji pokazuje koliko je istraživanje uspješno te koja su moguća poboljšanja budućih istraživanja. Uz pomoć validacije se mogu usporediti obje metode klasifikacije te odrediti koja daje točnije rezultate.

Tablica 4. Statističke vrijednosti temeljene na hipergeometrijskoj razdiobi za ispitivanje broja netočno klasificiranih objekata za razinu točnosti 95%, [14]

Količina objekata (N)	Količina objekata u uzorku (n)	Granica točnosti 95%
1<N<8	Svi	1
9<N<50	8	2
51<N<90	13	3
91<N<150	20	4
151<N<280	32	4
281<N<400	50	6
401<N<500	60	7
501<N<1200	80	8
1201<N<3200	125	11
3201<N<10000	200	16
10001<N<35000	315	23
35001<N<150000	500	34
150001<N<500000	800	51
N>500000	1250	76

6.4 Prikaz rezultata

Rezultati provedenog istraživanja mogu se prikazati tablično. Objekti koji su unutar područja interesa se dijele na stambene objekte, transportnu infrastrukturu i industrijske objekte. Svaki se objekt prebroji i odredi se ukupna površina koju zauzima [14]. Mapiranje klasi na karti jasnije prikazuje raspodjelu oštećenja te daje konkretne informacije o položaju najoštećenijih objekata.

7. PROBLEMSKI ZADATAK I METODOLOGIJA RJEŠAVANJA

U ovom se diplomskom radu klasificira oštećenje nastalo uslijed potresa uz pomoć jednovremenske, a zatim i dvovremenske metode. Odabrano je područje užeg centra grada Petrinje koje je 29. prosinca 2020. godine stradalo potresom magnitude 6,2 prema Richteru. „Potresi su iznenadne i kratkotrajne vibracije tla uzrokovane urušavanjem stijena, magnetskom aktivnošću ili tektonskim poremećajima u litosferi i dijelovima u Zemljinoj plaštu “[19]. Hipocentar potresa je mjesto nastanka potresa u dubini Zemlje. Iznad hipocentra, na Zemljinoj površini, nalazi se epicentar. Najrazorniji potresi uzrokovani su upravo tektonskim poremećajima [19].

Cilj rada je istražiti u kolikoj je mjeri upotreba snimki visoke rezolucije prihvatljiva i dostupna za brzo i precizno procjenjivanje oštećenja nastalih potresom. U obzir će se, osim preciznosti klasifikacije, uzimati i vrijeme potrebno za klasificiranje, dostupnost neophodnih podataka i jednostavnost provedbe klasifikacije. Snimke korištene za klasifikaciju su 16-bitne snimke visoke rezolucije (50 cm), dostupne u 4 pojasa (RGB i IR), te su snimane 13. siječnja 2021.

Klasifikacija oštećenja je provedena na površini od 547.535 m² (0,5475 km²) te ju vrši jedna osoba. Interpretator klasificira tako da uvrštava objekte u klase oštećenja koje su objašnjene u Tablici 3. Objekti unutar iste klase dijele jednake ili slične uzorke i obrasce na snimkama. Nadalje, stanje područja i vegetacije u neposrednoj blizini objekta olakšava njegovu klasifikaciju.

Nakon provedene jednovremenske metode, isto je područje klasificirano dvovremenskom metodom. Usporedbom snimki nastalih neposredno prije potresa sa snimkama nakon potresa interpretator vrši dvovremensku klasifikaciju. Klase su istovrsne klasama u jednovremenskoj metodi te se također bilježi vrijeme potrebno za provedbu klasifikacije.

Rezultati dobiveni jednovremenskom metodom uspoređuju se s rezultatima dvovremenske metode. Prikazani su dijelovi grada koji imaju najveću korelaciju rezultata i ona područja gdje su rezultati nepodudarni. Prikazane su karte koje prikazuju koji su dijelovi grada najoštećeniji. Osim toga, uspoređeno je i vrijeme potrebno interpretatoru za identificiranje i klasificiranje.

Validacija rezultata provodi se na dva načina. Ovisno o ukupnom broju objekata koji se nalaze na području interesa odabire se uzorak prema Tablici 4. koji mora zadovoljiti određene kriterije kako bi se klasifikacija mogla smatrati preciznom. Obje metode klasifikacije su validirane od strane osobe koja nije bila uključena u klasifikaciju. Osim statističke validacije, provedena je i vizualna validacija. Odlaskom na područje interesa, validator klasificira objekte i uspoređuje ih s rezultatima daljinskih metoda klasifikacije. Osim što određuje mjeru preciznosti, validacija određuje koja metoda pruža točnije rezultate te objašnjava koji su mogući razlozi pogreške rezultata klasifikacije.

Ograničenja istraživanja su: nepostojanje zračnih snimki neposredno nakon potresa, velika količina snijega i oblaka na dan i nakon potresa, klasificiranje provedeno od strane jednog interpretatora i vizualna validacija rezultata mjesecima nakon potresa.

8. KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA NA PODRUČJU INTERESA

Najbitniji preduvjet precizne klasifikacije je pronalazak snimki koje zadovoljavaju sve kriterije. Kriteriji su: visoka rezolucija snimki, minimalna naoblaka na snimkama, što manja površina zahvaćena padalinama, zadovoljavajući datum snimanja i cjenovna prihvatljivost.

Nakon zaprimanja snimki potrebno je odraditi manje poboljšanje istih. Unutar programa „Image J“ poboljšan je kontrast i uravnotežen je histogram kako bi se što jasnije prepoznali elementi koji ukazuju na oštećenje. Uravnoteženjem histograma omogućava se preraspodjela piksela na način da vrijednosti piksela na snimci zadržavaju jednaki omjer. Na ovaj je način velika svjetlina snijega prilagođena ostatku snimke. Slika 9. prikazuje primjer snimke prije poboljšanja, a Slika 10. nakon poboljšanja. Nadalje, rubovi su dodatno naglašeni s obzirom da su upravo rubovi krovova, dimnjaka ili prozora ti koji ukazuju na oštećenje objekata. Način uzorkovanja piksela je kubični.



Slika 9. Snimke prije poboljšanja

Snimke su pohranjene u obliku „GeoTif“ čime je omogućeno georeferenciranje snimke u referentnom koordinatnom sustavu WGS 84. Poboljšane snimke su zatim korištene za klasifikaciju uz pomoć programa „QGIS“. Uz pomoć programa „QGIS“ definiran je poligon koji određuje područje interesa. „QGIS“ osim poligona, omogućava i definiranje točaka koje su interpretatoru od posebnog interesa. Slika 11. prikazuje poligon koji određuje područje interesa čija je površina 547.535 m².



Slika 10. Snimke nakon poboljšanja



Slika 11. Poligon područja interesa

8.1 Jednovremenska klasifikacija

Prva korištena metoda klasifikacije je jednovremenska. Upotrebom isključivo snimke nastale nakon potresa, provedena je klasifikacija. Vrijeme potrebno za dodjeljivanje klasa objektima smanjuje se što je iskustvo interpretatora veće. Detaljnim proučavanjem svakog objekta i njegove bliže okoline najbrže se određuju klase najmanjeg i najvećeg oštećenja. Slika 12. prikazuje primjer objekta s najmanjim oštećenjem. Oštri rubovi objekta i materijal koji ukazuje da je riječ o armaturno-betonskoj konstrukciji elementi su koji svrstavaju objekt u klasu 1. Slika 13. prikazuje objekt s najvećim oštećenjem. Nепрепозпnavanje nosive konstrukcije, krova ili dimnjaka, velika količina građevinskog materijala te visoki stupanj oštećenja objekata u okolini ukazuju na oštećenje klase 5. Najviše iskustva i vremena je potrebno za dodjeljivanje klasa 2 i 3 s obzirom da su male i jedva primjetne razlike te koje svrstavaju objekte u određene klase. Najznačajniji elementi koji ukazuju na oštećenje su oštećenja rubova krovova, oštećenja dimnjaka, oštećenje prozora i zabatnih zidova ukoliko kut snimanja omogućava kosu perspektivu. Slika 14. prikazuje oštećenja krova na objektu koji je u ovoj metodi klasificiran u klasu 3. Slika 15. prikazuje oštećenja koja ukazuju na oštećenja dimnjaka i zabatnih zidova. Ovom metodom oba su objekta klasificirana klasom 2. Slika 16. prikazuje objekt sniman pod velikim kosim kutom čime je omogućeno prepoznavanje oštećenja na pročelju objekta. Objekt je ovom metodom klasificiran u klasu 3.



Slika 12. Objekt klase 1 oštećenja



Slika 13. Objekt klase 5 oštećenja



Slika 14. Oštećenje krova



Slika 15. Oštećenje dimnjaka i zabatnog zida



Slika 16. Oštećenje prozora i pročelja

Interpretator s većim iskustvom prepoznaje specifične obrasce karakteristične za određenu klasu. Okolina objekta također olakšava klasifikaciju. Ako na objektu iz zraka nisu vidljiva oštećenja, a oko njega je veća količina građevinskog materijala i otpada te su objekti oko njega oštećeni, pretpostavlja se kako je i taj objekt većeg oštećenja nego što bi bio kada bi se analizirao izolirano i pojedinačno. Primjer takve klasifikacije prikazan je na slici 17. Iako elementi na objektu ne prikazuju veliki stupanj oštećenja, okolina ukazuje drukčije. Ovom metodom objekt je klasificiran klasom 2. Pokazatelj oštećenja može biti i sjena u čijoj se nepravilnosti također mogu

prepoznati oštećenja. Slika 18. prikazuje takav jedan primjer. Gledajući samo elemente oštećenja na krovu, objekt bi se svrstao u klasu slabijeg oštećenja. Ponašanje sjene ukazuje na veća strukturalna oštećenja što objekt svrstava u klasu 3 oštećenja.



Slika 17. Oštećenje okolnih objekata



Slika 18. Oštećenje vidljivo iz sjene objekta

Prednosti jednovremenske metode su: mogućnost klasifikacije s jednom iskusnom kvalificiranom osobom, upotreba samo jedne snimke, klasifikacija područja iz daljine te brza i sveobuhvatna procjena oštećenja nastalog neposredno nakon potresa.

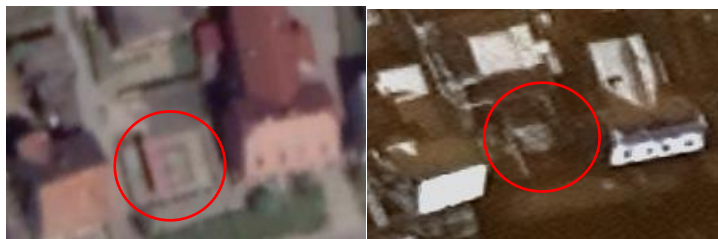
Nedostatak jednovremenske metode je duže vrijeme klasifikacije u usporedbi s dvovremenskom metodom. Dodatno vrijeme koje je interpretatoru potrebno za analizu objekata proizlazi najviše iz određivanja granica objekata i prepoznavanja njegovih elemenata. Naime, ukoliko su kuće građene u nizu jedna do druge, otežano je određivanje gdje prestaje jedan a započinje drugi objekt. Nadalje, meteorološki uvjeti na dan snimanja definiraju i samu kvalitetu snimke s kojom interpretator raspolaže. U snimci je prisutna kosa perspektiva snimanja čime se interpretator neprestano privikava na drugačiju perspektivu. Drugačija perspektiva ujedno znači i promjena karakterističnih obrazaca. Kroz cijelu klasifikaciju potrebno je visoka razina iskustva interpretatora i neprekidna koncentracija.

8.2 Dvovremenska klasifikacija

U svrhu brže i preciznije klasifikacije, provodi se dvovremenska klasifikacija. Usporedbom stanja objekata nakon potresa sa stanjem neposredno prije potresa interpretator raspolaže s više informacija. Vrijeme potrebno za identifikaciju objekata ovom je metodom kraće. S obzirom da su se na području interesa i prije potresa nalazili objekti većih oštećenja, ovom su se metodom oni mogli klasificirati u objekte slabijeg oštećenja s obzirom da oštećenje nije nastalo potresom. Slika 19. prikazuje primjer objekta koji je imao elemente oštećenja i na snimkama prije potresa. Jednovremenskom metodom objekt bi bio svrstan u klasu 5, no dvovremenskom metodom klasificiran je klasom 1. Nadalje, na ovaj su način identificirani i objekti koji nisu ni postojali prije potresa. U suprotnom, moguća je zabuna klasifikacije nepostojećih objekata u klasu 5 oštećenja. Primjer takvog objekta prikazan je na Slici 20. Uz pomoć snimki prije potresa prepoznaje se da je zemljište i prije potresa bilo neiskorišteno.



Slika 19. Objekt oštećen prije potresa



Slika 20. Objekt nepostojan prije potresa

Prednost dvovremenske metode klasifikacije je kraće vrijeme klasifikacije, preciznija klasifikacija koja u obzir uzima i referentno stanje objekta prije potresa, klasifikacija područja iz daljine čime se ne ugrožava sigurnost osoba te brza i sveobuhvatna procjena oštećenja nastalog neposredno nakon potresa.

Nedostatak dvovremenske metode je dodatna potreba za snimkama visoke rezolucije. Nepredvidivost potresa onemogućava snimanje područja neposredno prije samog događaja. I ova metoda klasifikacije ovisi o meteorološkim uvjetima na dan snimanja. Nadalje, različite perspektive snimanja izmjenjuju se na obje snimke čime se interpretator neprestano privikava na različite karakteristične obrasce. Kako bi se u potpunosti iskoristile sve prednosti dvovremenske metode, potrebna su i dva ekrana uz pomoć kojih interpretator simultano uspoređuje stanje objekata. Dodatna potreba za opremom smanjuje jednostavnost izvedbe.

9. ANALIZA REZULTATA

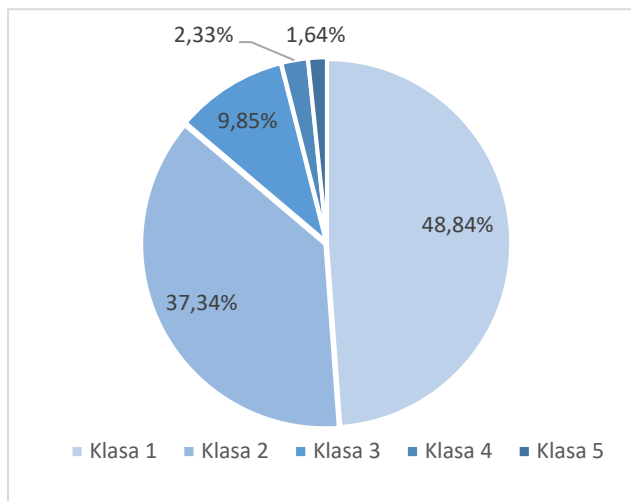
Ukupno vrijeme potrebno jednom interpretatoru za provedbu klasifikacije iznosi 7 sati i 57 min, od kojih je 4h i 29 min izdvojeno za jednovremensku metodu, a 3h i 28 min za dvovremensku metodu. Jednovremenskom metodom identificirano je 731 objekata, a dvovremenskom metodom 730 objekata, tj. ukupno 1461 objekata. U objekte su svrstane sve privatne kuće, stambene zgrade, crkve, škole, vrtići, zgrade gradske i državne uprave te ostali objekti na snimkama iz zraka prepoznati kao građevinski objekti. Tablica 5. prikazuje koliko se objekata nalazi u određenoj klasi.

Tablica 5. Količina objekata unutar klasi oštećenja prema jednovremenskoj i dvovremenskoj metodi klasifikacije

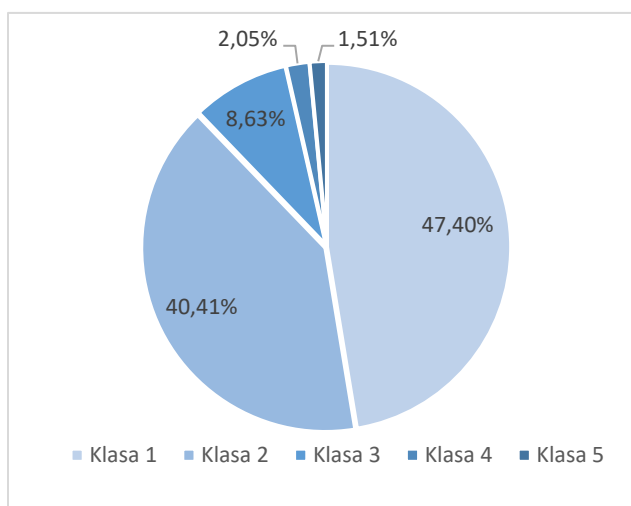
Klasa oštećenja	Količina objekata-jednovremenska metoda (N ₁)	Količina objekata-dvovremenska metoda (N ₂)	Razlika (ΔN)	$\frac{ \Delta N }{\text{Max}(N_1, N_2)} [\%]$
1	357	346	11	3,08%
2	273	295	22	7,46%
3	72	63	9	12,5%
4	17	15	2	11,76%
5	12	11	1	8,33%

Podaci iz Tablice 5. pokazuju da se količina objekata unutar pojedine klase smanjuje što je klasa oštećenja veća. Osim toga, primjećuje se različita raspodjela objekata unutar pojedine klase. Dok jednovremenska metoda više objekata svrstava u klasu 1. 3., 4. dvovremenska više objekata svrstava u kategoriju 2. Razlog tomu je mogućnost preciznije klasifikacije korištenjem dvovremenske metode. Objekti na kojima nije primijećeno oštećenje jednovremenskom metodom te su stoga svrstavani u klasu oštećenja 1. u dvovremenskoj se metodi klasificiraju klasom 2. Iz Tablice 5. se zaključuje kako dvovremenska metoda omogućava prepoznavanje malih razlika i identificira ih lakše nego jednovremenska metoda. Razlika u klasifikaciji samo jednog objekta prisutna je u klasi 5. Objekti devastirani potresom najlakše se prepoznaju na snimkama, neovisno o metodi klasifikacije. Objekt koji je klasificiran jednovremenskom metodom kao klasa 5, dvovremenskom se metodom ispostavio nepostojećim. Prema tablici, veći postotak razlike rezultata klasifikacije prisutan je unutar klasi 2 i 3. Tablica 5. prikazuje kvantitativnu analizu rezultata klasifikacije prema kojoj su najmanji postotci razlike rezultata unutar klasi 1 i 2. Slike 21.

i 22. prikazuju koliko je pojedina klasa zastupljena u svakoj od metoda. Značajnije se razlike primjećuju unutar klase 2 koja je zastupljenija u dvovremenskoj metodi klasifikacije.



Slika 21. Zastupljenost objekata po klasama oštećenja u postotcima - jednovremenska metoda



Slika 22. Zastupljenost objekata po klasama oštećenja u postotcima - dvovremenska metoda

Tablica 6. detaljnije prikazuje razliku između metoda klasifikacije. Prikazano je koliko je objekata drugačije klasificirano od referentne vrijednosti. U ovom je primjeru referentna vrijednost količina objekata klasificiranih dvovremenskom metodom (N_2). „ N_{2+} “ prikazuje koliko je objekata svrstano u tu klasu jednovremenskom metodom više od referentne vrijednosti. „ N_{2-} “ prikazuje koliko je objekata manje svrstano u tu klasu jednovremenskom metodom s obzirom na referentnu vrijednost. Na ovaj način, osim ranije prikazane kvantitativne analize odstupanja, moguće je utvrditi kvalitativnu analizu odstupanja rezultata.

Tablica 6. Kvalitativna analiza odstupanja rezultata

Klasa oštećenja	Referentna vrijednost (N_2)	N_{2+}	N_{2-}	Konačna vrijednost (N_1)	$\frac{N_2 - N_{2-}}{N_2}$ [%]
1	346	56	45	357	86,99%
2	295	53	75	273	74,58%
3	63	26	17	72	73,02%
4	15	6	4	17	73,33%
5	11	1	0	12	100%

Iz Tablice 6. se vidi najveća podudarnost rezultata unutar klasi 5 i 1. Klase koje su jednovremenskom metodom bile najteže za identificirati najmanje su istovjetne dvovremenskoj metodi klasifikacije. Iz Tablice 6. se primjećuje kako je najviše objekata svrstanih u klasu 2 dvovremenske metode klasificirano klasom 1 jednovremenske metode. Sve razlike u klasifikaciji proizlaze iz manjka informacija o objektu.



Slika 23. Odstupanje u metodama uzrokovano manjkom informacija

Slika 23. prikazuje primjer manjka informacija koji dovodi do odstupanja u rezultatima. Lijevo na slici je prikaz nakon potresa, prema njemu može se zaključiti da je objekt umjereno do jako oštećen s obzirom da nisu jasno prepoznatljivi elementi krova i dimnjaka. Nakon provedene dvovremenske klasifikacije utvrđeno je kako je nejasnoća proizašla iz manjka informacija o

materijalu krova s obzirom da je riječ o metalnom krovu. Jednovremenskom metodom ovaj je objekt uvršten u klasu 4, dok je dvovremenskom analizom uvršten u klasu 1.

Kako bi se lakše prikazali i razumjeli rezultati, na Slikama 24. i 25. oni su prikazani na karti. Karta korištena za mapiranje oštećenja nalazi se unutar programa QGIS pod nazivom „Open Strees Map“. Slika 24. prikazuje položaj klasi oštećenja na karti klasificirane jednovremenskom metodom. Slika 25. prikazuje položaj klasi oštećenja na karti klasificirane dvovremenskom metodom. Iz slika 24. i 25. primjećuje se najveća zastupljenost klasi velikog oštećenja u području užeg centra grada.



Slika 24. Položaj klasi oštećenja na karti- jednovremenska metoda

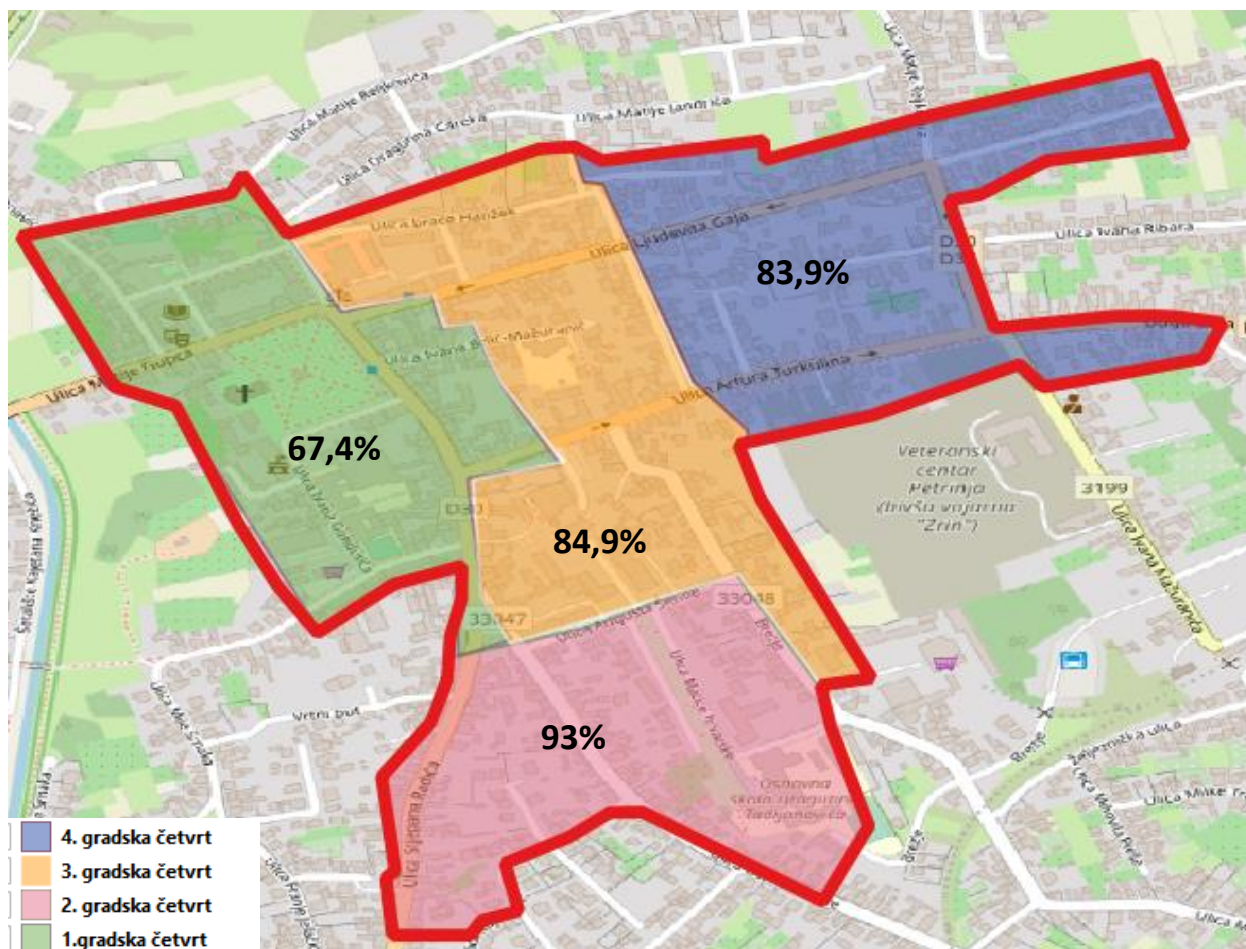


Slika 25. Položaj klasi oštećenja na karti- dvovremenska metoda

Područje interesa je podijeljeno na manje gradske četvrti kako bi se lakše identificiralo područje najveće srodnosti rezultata klasifikacije. Tablica 7. prikazuje količinu objekata i površinu svake gradske četvrti, a Slika 26. prikazuje gradske četvrti na karti.

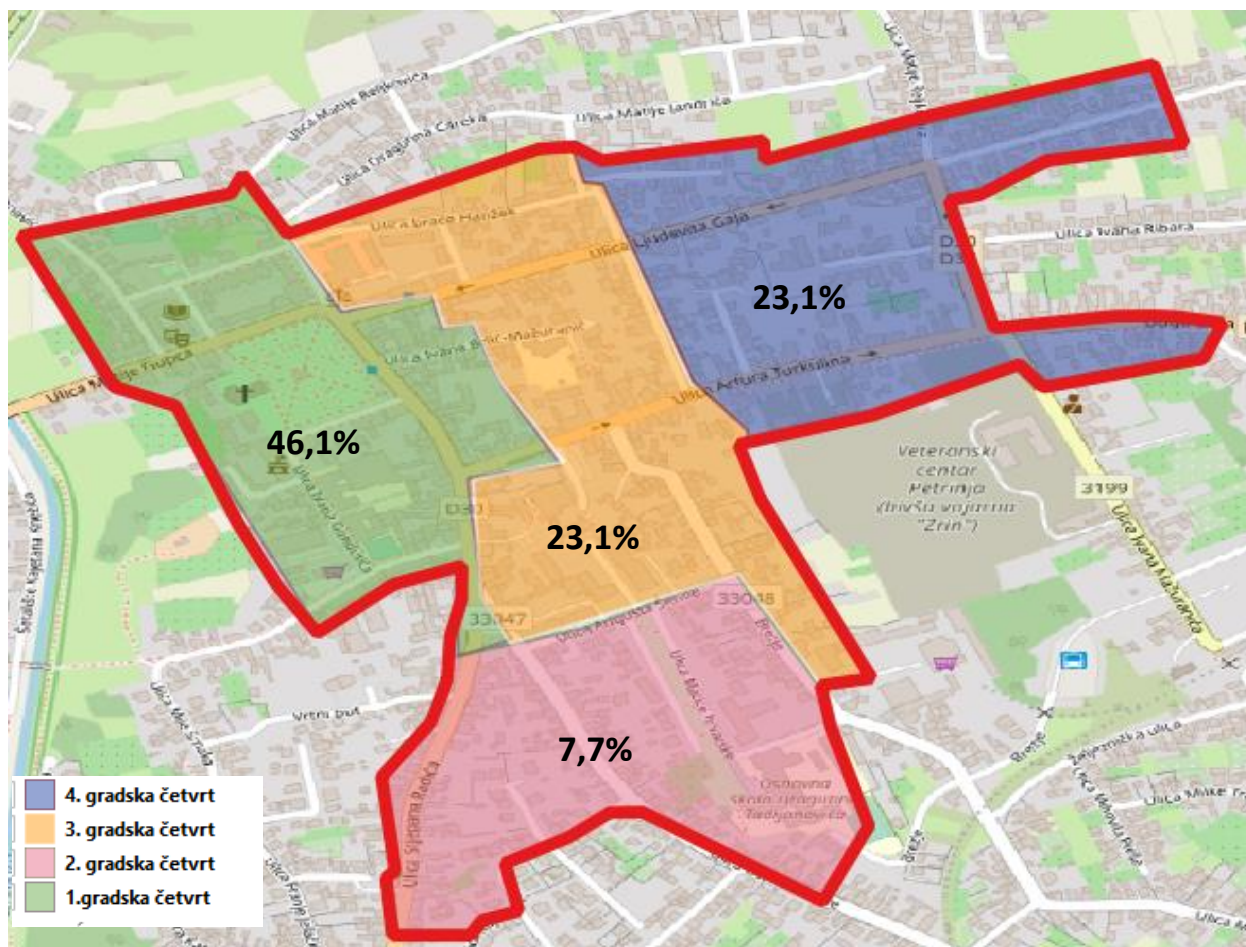
Tablica 7. Količina objekata i površina gradskih četvrti Petrinje

	1. gradska četvrt	2. gradska četvrt	3. gradska četvrt	4. gradska četvrt
Količina objekata	138	171	186	236
Površina [m²]	139.830	128.989	142.350	137.489



Slika 26. Gradske četvrti Petrinje

Na Slici 26. prikazano je također koliki je postotak objekata jednako klasificiranih objema metodama. Najveća sličnost prisutna je u 2. gradskoj četvrti. Razlog tomu je velika prisutnost klase 1 oštećenja na tom području. Bolju korelaciju između sličnosti rezultata i jačine oštećenja prikazana je na Slici 27. Slika 27. prikazuje koliki je postotak objekata klase 4 i 5. unutar gradske četvrti u odnosu na ukupan broj objekata unutar tih klasi. Primjećuje se kako je najveća sličnost rezultata (1. i 2. gradska četvrt) u područjima gdje prevladava ili klasa 1 oštećenja (2. gradska četvrt) ili klasa 4 i 5 oštećenja (1. gradska četvrt). Velika odstupanja nastaju kada na području prevladavaju klase oštećenja 2 i 3. Male razlike između klasa 2 i 3 dovele su do velikog odstupanja u rezultatima klasifikacije.



Slika 27. Postotak objekata klase 4 i 5 u odnosu na ukupan broj objekata u tim klasama

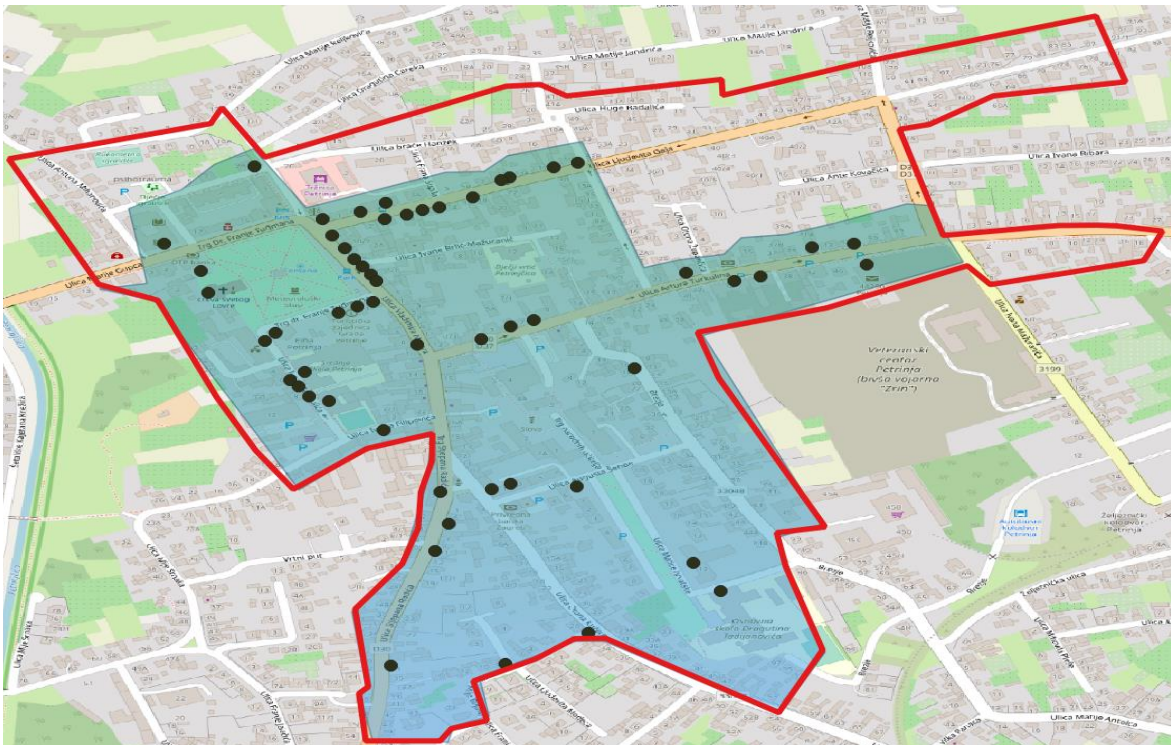
Dvovremenska metoda je brža, no smanjena je jednostavnost izvedbe zbog potrebe za dodatnim podacima i opremom. Jednovremenska metoda je sporija i iziskuje veće iskustvo interpretatora s obzirom da se puno vremena troši na identificiranje objekata na snimci. Iz rezultata se zaključuje najveća srodnost unutar klasi neznatnog oštećenja (klasa 1) i klasi velikog oštećenja (klasa 4 i 5). Mali elementi koji razlikuju klase umjerenog oštećenja doveli su i do velikih razlika u rezultatima klasifikacije.

10. VALIDACIJA REZULTATA

Iz rezultata klasifikacije nije moguće odrediti koja je metoda točnija. Potrebna je validacija koja će pokazati u kojoj je mjeri pojedina metoda ispravna. U ovom su primjeru rezultati validirani vizualno i statistički s obzirom da obje metode validacije imaju određena ograničenja i prednosti. Kako bi validacija bila što preciznija, isti će objekti biti validirani objema metodama. Ukupan broj validiranih objekata je 54.

10.1 Statistička validacija

U slučajevima kada nije moguće fizički biti na području interesa, koristi se statistička validacija. Prema Tablici 4. uz pomoć hipergeometrijske razdiobe poznate su vrijednosti koje trebaju biti ispunjene kako bi klasifikacija bila zadovoljavajuća. Područje validacije prikazano je na Slici 28. zajedno s objektima koji će biti validirani. Površina prikazanog područja je 388.620 m². Ukupan broj objekata unutar područja je 486 koji prema Tablici 4. iziskuje od 50 do 60 objekata unutar uzorka. Dopušten broj različito klasificiranih objekata je 7. Validaciju vrši osoba koja nije bila uključena u interpretaciju. Klasifikacija objekata provedena je u skladu s klasama prikazanim u Tablici 3. Nužno je osobu koja validira upoznati s klasama oštećenja kako bi rezultati u što većoj mjeri bili dosljedni. Validirane su jednovremenska i dvovremenska metoda klasifikacije.



Slika 28. Područje validacije i objekti unutar uzorka

Ukupan broj objekata unutar uzorka je 52. Validacijom jednovremenske metode utvrđeno je 17 nesukladnih objekata. Validacijom dvovremenske metode utvrđeno je 6 različito klasificiranih objekata. Statističkom validacijom jedino dvovremenska metoda ispunjava kriterij točnosti od 95% za navedenu odabranu površinu te je dovoljno precizna za daljnju upotrebu. Precizni rezultati klasifikacije brzo daju povratnu informaciju o razornosti potresa i položaju oštećenih objekata čime je ujedno brži proces obnove i sanacije objekata. Jednovremenska metoda ne zadovoljava kriterij točnosti. Iz rezultata statističke validacije zaključuje se kako je dvovremenska metoda preciznija. Točnost dvovremenske analize je veća od 95% te je kao takva primjenjiva za klasifikaciju oštećenja objekata uslijed potresa.

Prednost statističke validacije je jednostavnost izvedbe, ona ne iziskuje dodatne materijale. Ograničenje statističke validacije predstavlja subjektivnost. Svaki interpretator podložan je subjektivnom dojmu. Objektivnija i preciznija klasifikacija zahtijevala bi veći broj interpretatora čiji bi se rezultati zatim uspoređivali kako bi klasifikacija dala što preciznije rezultate. Objektivniji rezultati validacije bi se stoga dobili uključivanjem više validatora.

10.2 Vizualna validacija

Eliminiranje subjektivnog dojma validatora moguće je provođenjem vizualne validacije. Odlaskom na područje interesa i klasificiranjem zatečenog stanja, uspoređuju se rezultati ranije klasifikacije sa zatečenim stanjem. Objekti validirani vizualnom validacijom jednaki su objektima u statističkoj validaciji te su prikazani na Slici 28.

Prema vizualnoj validaciji 36,5% objekata klasificirano jednovremenskom metodom dijele jednake klase. Klase objekata dvovremenske klasifikacije su 26,9% srodne klasama vizualne validacije. Mnogi su razlozi zašto dolazi do velikog odstupanja u rezultatima klasifikacije. Najčešći uzroci su prikazani i objašnjeni u radu.

Najčešći razlog odstupanja rezultata je mnogo veće oštećenje na području interesa od onog prikazanog na snimkama. Razlog tomu ne mora biti nužno manjak informacija o stanju objekta koristeći snimke iz zraka. Razlog može biti i naknadno oštećenje uzrokovano manjim potresima koji su nakon 29.12.2020.g. zadesili područje. Nadalje, s obzirom da je odlazak na teren uslijedio šest mjeseci nakon potresa, validator nije upoznat s mogućim sanacijskim rušenjem objekata kako bi se zaštitila sigurnost građana. Primjer takvog preventivnog sanacijskog rušenja prikazan je na Slikama 29. i 30. Slika 29. prikazuje objekt na snimkama, dok Slika 30. prikazuje zatečen objekt 30.srpnja 2021.g. Daljinskim metodama klasifikacije, objekt se nalazi unutar klase 1. Slika 30. prikazuje kako cijelog objekta na dan validacije nema te je stoga klasificiran klasom 5.



Slika 29. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-1.primjer



Slika 30. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-1.primjer

Slike 31. i 32. prikazuju objekt klasificiranom klasom 4 koji je vizualnom validacijom klasificiran klasom 5. Ovakvi primjeri također proizlaze iz preventivnog sanacijskog rušenja objekata velikog oštećenja.



Slika 31. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-2.primjer



Slika 32. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-2.primjer

Prisutni su i primjeri gdje su daljinske klasifikacije objekt uvrstile u klase nižeg oštećenja zbog manjka informacija o oštećenju unutarnjih nosivih konstrukcija ili zabatnih zidova. Slike 33. i 34. prikazuju takav primjer oštećenja objekta. Slika 33. prikazuje snimke iz zraka na kojima se ne primjećuje znatno oštećenje te je objekt klasificiran klasom 2. Slika 34. prikazuje stanje zabatnog zida objekta. Iz ovog se primjera jasno primjećuje veliko ograničenje satelitskog daljinskog istraživanja, a to je pogled iz zraka.



Slika 33. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-3.primjer



Slika 34. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-3.primjer

Primjer 4 prikazuje objekt klasificiran klasom 3 daljinskim metodama klasifikacije koji je vizualnom validacijom utvrđen kao neoštećen. Slika 35. prikazuje snimke dok Slika 36. prikazuje zatečeno stanje na dan validacije. Razlog precijenjenog oštećenja može biti kriva interpretacija elemenata tijekom klasifikacije ili je objekt obnovljen neposredno nakon potresa. S obzirom da je objekt ustanova za obrazovanje te je relativno nove gradnje, moguće je da je obnova nastupila brzo.



Slika 35. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-4.primjer



Slika 36. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s većim oštećenjima-4.primjer

Primjer 5 prikazuje objekt koji je jednovremenskom klasifikacijom i vizualnom klasifikacijom svrstan u klasu 5 oštećenja. Dvovremenskom klasifikacijom utvrđeno je da objekt nije postojao ni prije potresa. Slike 37. i 38. prikazuju objekt u primjeru 5.



Slika 37. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-5.primjer



Slika 38. Zatečeno stanje objekta -5.primjer

Prednost vizualne validacije je dobivanje više informacija o oštećenju s obzirom da se dobiva uvid u oštećenja pročelja, zabatnih zidova, prozora i unutarnjih nosivih konstrukcija. Manje je prisutna subjektivnost nego u statističkoj validaciji.

Ograničenje vizualne validacije je složenost izvedbe, potrebno je na siguran i efikasan način obići objekte od interesa te evidentirati podatke bez da se ugrozi sigurnost validatora. Vizualna validacija s odmakom vremena smanjuje preciznost validacije s obzirom da se pojedini objekti nužno i žurno moraju sanirati. Ograničenje je svakako i veći broj slabih i umjerenih potresa koji su područje interesa zadesili do dana validacije. Informacije koje validator ne posjeduje je stanje prije potresa. Odlaskom na područje interesa teško je identificirati oštećenje nastalo potresom

od oštećenja prisutnog i prije potresa. Iz toga i slijedi veća srodnost jednovremenske klasifikacije i vizualne validacije.

11. ZAKLJUČAK

Globalna pokrivenost, visoka rezolucija snimki, jednostavna transmisija i prikaz podataka u pravilnim vremenskim intervalima glavne su prednosti satelitskih snimki. Raznovrsni satelitski sustavi omogućuju korisniku odabir rezolucije, spektra, vremena i područja snimanja. Navedene karakteristike satelitskih snimki omogućile su široku primjenu daljinskih istraživanja nad velikim površinama.

Snažni potresi često su popraćeni velikim brojem potresa čime se onemogućava brza, učinkovita i sigurna procjena oštećenja. Daljinska istraživanja omogućuju klasifikaciju oštećenja uz pomoć satelitskih snimki ne dovodeći nikoga u opasnost. Interpretator klasificira objekte prema unaprijed utvrđenim klasama. Bitne vještine i karakteristike interpretatora su: iskustvo, poznavanje područja interesa, poznavanje meteoroloških uvjeta na dan snimanja te prilagodba na perspektivu iz zraka. S obzirom na razne okolnosti moguća je klasifikacija jednovremenskom ili dvovremenskom metodom. Kako bi se odredilo koja je metoda preciznija, potrebno je rezultate validirati. S obzirom da svaka metoda validacije ima određena ograničenja rezultati se validiraju statistički i vizualno.

U diplomskom radu klasificirano je oštećenje objekata uslijed potresa u Petrinji 29. prosinca 2020. Uz pomoć satelitskih snimki visoke rezolucije klasificirano je područje grada površine 547535 m². Rezultati su pokazali velika odstupanja u klasifikacijama uzrokovana raznim elementima. Razlike u klasifikaciji veće su unutar klasi umjerenog oštećenja dok su klase neznatnog i velikog oštećenja najviše usklađene. Glavni razlog odstupanja u rezultatima je manjak informacija o stanju objekta prije potresa. Nadalje, dvovremenska metoda ispostavila se bržom metodom klasifikacije s obzirom da interpretator manje vremena troši na identificiranje objekata.

Statističkom validacijom je dvovremenska metoda zadovoljila prag točnosti od 95%. Precizniji rezultati validacije dobili bi se uvođenjem više validatora. Iz tog razloga provedena je i vizualna validacija. Vizualna validacija područja interesa izvršena je šest mjeseci nakon potresa. Validacijom je utvrđeno 36,5% objekata klasificirano jednako jednovremenskom metodom, tj. 26,9% objekata dvovremenskom metodom. Vizualna validacija prednost daje jednovremenskoj metodi klasifikacije.

Zaključuje se kako je dvovremenska metoda vremenski prihvatljivija te je jednostavnije izvedbe. Statistička validacija jedino dvovremensku metodu odobrava kao dovoljno preciznu no potrebno je uvesti više validatora kako bi rezultati bili objektivni. Vizualnom validacijom jednovremenska metoda ima veću točnost. Vizualna validacija ne uzima u obzir stanje objekata prije potresa kao ni preventivno rušenje objekata nakon potresa koji ugrožavaju sigurnost građana.

LITERATURA

- [1] Campbell JB, Wynne HB. Introduction to Remote sensing, fifth edition, A Division of Guilford Publications, Inc., New York: 2011
- [2] UN General Assembly, Principles relating to Remote Sensing of the Earth from Outer Space : Resolution, 1987
- [3] Joseph G. Fundamentals of Remote sensing, Universities Press (India) Private Limited, Hyderabad: 2005
- [4] Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. Remote sensing and image interpretation, sixth edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey: 2008
- [5] Chuevicio E, Huete A. Fundamentals of Satellite remote sensing, CRC Press, Boca Raton, Florida: 2009.
- [6] Richardson JA, Jia X. Remote Sensing Digital Image Analysis, fourth edition, Springer, Berlin: 2006
- [7] Hrvatski jezični portal. Preuzeto sa: <https://hjp.znanje.hr/> [Pristupljeno: svibanj 2021.]
- [8] Federal Aviation Administration, Advanced Aerospace Medicine On-line. Preuzeto sa: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/aam/cami/library/online_libraries/aerospace_medicine/tutorial/section3/spacecraft_design/ [Pristupljeno: svibanj 2021]
- [9] The European Space Agency. Preuzeto sa: http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits [Pristupljeno: svibanj 2021.]
- [10] Horning N. What you need to know when searching for satellite imager, American Museum of Natural History, Center for Biodiversity and Conservation, 2004. Preuzeto sa: <http://biodiversityinformatics.amnh.org>. (Pristupljeno: svibanj 2021.)
- [11] Landsat Science. Preuzeto sa: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview> [Pristupljeno: svibanj 2021.]
- [12] Yamazaki F, Kouchi K, Kohiyama M, Muraoka N, Matsouka M. Earthquake Damage Detection Using High-resolution Satellite Images. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2004;4: 2280-2283.

- [13] Dong L, Shan J. A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013; 84: 85-99.
- [14] Copernicus EMS Risk and Recovery Mapping, Final Report EMSN074: Croatia, Zagreb earthquake damage assessment, 2020.
- [15] European Seismological Commission, European Macroseismic Scale 1998 EMS-98, Luxembourg: 1998.
- [16] Huyck CK, Adams BJ, Cho S, Chung HC, Eguchi RT. Towards Rapid Citywide Damage Mapping Using Neighborhood Edge Dissimilarities in Very High-Resolution Optical Satellite Imagery—Application to the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Spectra* 2005;21(1): 255-266.
- [17] Ishii M, Goto T, Sugiyama T, Saji H, Abe K. Detection of Earthquake Damaged Areas from Aerial Photographs by Using Color and Edge Information. *The 5th Asian Conference on Computer Vision*, Melbourne: 2002;
- [18] Vu TT, Yamazaki T, Matsuoka M. Context-based detection of post-disaster damaged buildings in urban areas from satellite images. *Urban Remote Sensing Joint Event 2007*; 1-5.
- [19] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49792> [Pristupljeno: srpanj 2021]

POPIS SLIKA

Slika 1. Atmosferski prozori, [3]

Slika 2. Spektralne karakteristike izvora energije, [4]

Slika 3. Spektralne karakteristike daljinskih istraživanja, [4]

Slika 4. Interakcija energije s podlogom, [4]

Slika 5. Geocentrično-ekvatorijalni koordinatni sustav, [8]

Slika 6. Kut inklinacije, [8]

Slika 7. Kut desnog uzdizanja uzlaznog čvora, [8]

Slika 8. Kut dokaza perigeja, [8]

Slika 9. Snimke prije poboljšanja

Slika 10. Snimke nakon poboljšanja

Slika 11. Poligon područja interesa

Slika 12. Objekt klase 1 oštećenja

Slika 13. Objekt klase 5 oštećenja

Slika 14. Oštećenje krova

Slika 15. Oštećenje dimnjaka i zabatnog zida

Slika 16. Oštećenje prozora i pročelja

Slika 17. Oštećenje okolnih objekata

Slika 18. Oštećenje vidljivo iz sjene objekta

Slika 19. Objekt oštećen prije potresa

Slika 20. Objekt nepostojan prije potresa

Slika 21. Količina objekata unutar klase u odnosu na ukupan broj objekata- jednovremenska metoda

Slika 22. Količina objekata unutar klase u odnosu na ukupan broj objekata- dvovremenska metoda

Slika 23. Odstupanje u metodama uzrokovano manjkom informacija

Slika 24. Položaj klasi oštećenja na karti- jednovremenska metoda

Slika 25. Položaj klasi oštećenja na karti- dvovremenska metoda

Slika 26. Gradske četvrti Petrinje

Slika 27. Postotak objekata klase 4 i 5 u odnosu na ukupan broj objekata u tim klasama

Slika 28. Područje validacije i objekti unutar uzorka

Slika 29. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-1.primjer

Slika 30. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-1.primjer

Slika 31. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-2.primjer

Slika 32. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-2.primjer

Slika 33. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-3.primjer

Slika 34. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s manjim oštećenjima-3.primjer

Slika 35. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-4.primjer

Slika 36. Zatečeno stanje objekta klasificiranog s većim oštećenjima-4.primjer

Slika 37. Objekt prikazan na snimkama prije i nakon potresa-5.primjer

Slika 38. Zatečeno stanje objekta -5.primjer

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela elektromagnetskog spektra obzirom na valnu duljinu, [1]

Tablica 2. Klasifikacija oštećenja objekata – 1. način, [14]

Tablica 3. Klasifikacija oštećenja objekata od opeke i armiranog betona- 2. način, [15]

Tablica 4. Statističke vrijednosti temeljene na hipergeometrijskoj razdiobi za ispitivanje broja netočno klasificiranih objekata za razinu točnosti 95%, [14]

Tablica 5. Količina objekata unutar klasi oštećenja prema jednovremenskoj i dvovremenskoj metodi klasifikacije

Tablica 6. Kvalitativna analiza odstupanja rezultata

Tablica 7. Količina objekata i površina gradskih četvrti Petrinje

POPIS KRATICA

LIDAR	Light Detection And Ranging
RADAR	Radio Detection and Ranging
COE	Classic Orbital Elements
GEO	Geostacionarna orbita
LEO	Niska zemaljska orbita (
MEO	Srednja zemaljska orbita
SSO	Sunčeva sinkrona orbita
GTO	Geostacionarne transferne orbite
EMS	European macroseismic scale
QGIS	Quantum Geographic Information System



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ diplomski rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ diplomskog rada
pod naslovom **Klasifikacija oštećenja objekata uslijed potresa pomoću satelitskih
snimki**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 30.8.2021.

Student/ica:
Kristina Jemerđić
(potpis)