



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Anđela Lasić

**PRIMJENA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA U
MJERENJU HIDROLOŠKIH VELIČINA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Anđela Lasić

**PRIMJENA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA U
MJERENJU HIDROLOŠKIH VELIČINA**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Damir Bekić

Zagreb, 2024.



UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Andela Lasić

**APPLICATION OF REMOTE SENSING IN
MONITORING HYDROLOGICAL PARAMETERS**

Supervisor: izv.prof.dr.sc. Damir Bekić

Zagreb, 2024.

SAŽETAK

Dostupnost točnih i pouzdanih hidroloških i meteoroloških podataka te njihovo praćenje, omogućuju racionalni razvoj i pametno upravljanje svjetskim resursima vode, a svaki podatak koji nije izmjeren neće moći biti izmjeren. Nepostojanje promatračkih mreža na velikim područjima predstavljalo je probleme u praćenju vodnih resursa do prije dvadesetak godina.

Primjena daljinskih istraživanja, odnosno satelitski daljinski senzori dokazali su svoju učinkovitost u mjerenju i praćenju hidroloških parametara kao što su oborine, vlažnost tla, razina vode i protok, površinsko otjecanje, evapotranspiracija itd.

U ovom završnom radu objašnjena je tehnologija daljinskih istraživanja i veličine koje se promatraju satelitskim daljinskim sensorima. Osim objašnjenja hidroloških parametara, opisane su i različite platforme i senzori koji se koriste, te njihove prednosti i mane. Bitna uloga praćenja hidroloških veličina slikovno je prikazana na primjerima klimatskih promjena i globalnog zagrijavanja koje se očituje značajnim smanjenjem razine vode, kao i smanjenjem ledenih površina.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, hidrološke veličine, nedostajući podaci, senzori

SUMMARY:

The availability of accurate and reliable hydrological and meteorological data and their monitoring enable rational development and smart management of the world's water resources, and any data that has not been measured will not be able to be measured. The absence of monitoring networks in large areas was a problem in monitoring water resources until about twenty years ago.

The application of remote sensing, satellite remote sensors, have proven their effectiveness in measuring and monitoring hydrological parameters such as precipitation, soil moisture, water level, surface runoff, etc.

This paper explains the technology of remote sensing and parameters observed by satellite remote sensors. In addition to the explanation of the hydrological parameters, the different platforms and sensors used, as well as their advantages and disadvantages, are also described. The essential role of the monitoring of hydrological quantities is illustrated by the examples of climate change and global warming, which is manifested by a significant decrease in water levels, as well as a decrease in ice surfaces.

Key words: remote sensing, hydrological parameters, missing data, sensors

SADRŽAJ

1	UVOD	4
2	TEHNOLOGIJA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA.....	5
2.1	Objekti.....	6
2.2	Platforme.....	6
2.3	Senzori.....	7
2.2.1	Pasivni senzori	8
2.2.2	Aktivni senzori.....	9
2.3	Frekvencija snimanja.....	10
3	MJERENJA HIDROLOŠKIH VELIČINA.....	11
3.1	Vodostaj i doseg vode.....	11
3.2	Brzina vode i protok.....	13
3.4	Vlažnost tla.....	14
3.5	Evapotranspiracija.....	15
3.6	Snijeg.....	15
3.7	Led.....	17
4.	ZAKLJUČAK.....	20

1 UVOD

Nepotpuna hidrološka mjerenja ograničavaju kvalitetu različitih studija koje zahtijevaju hidrološke podatke i provedbu operativnih kratkoročnih kao i dugoročnih hidroloških prognoza [1]. Kvalitetna simulacija hidroloških procesa uvelike je ograničena zbog nedostataka ili nepoznavanja ulaznih hidrometeoroloških podataka, kao na primjer parametri topljenja snijega ili evapotranspiracije, koji nisu izmjereni ili su njihova mjerenja nedostatna.

Također, na pouzdanost prognostičkog modela utječu i prekidi u mjerenjima koji nastaju zbog prekida rada hidroloških ili meteoroloških postaja u kraćem ili duljem razdoblju.

Kako bismo povećali kvalitetu mjerenja hidroloških veličina, primjenjuju se metode daljinskih istraživanja.

Daljinska istraživanja u hidrologiji su metode prikupljanja podataka o vodama na Zemlji pomoću uređaja za snimanje iz daljine, poput zrakoplova, satelita, svemirskih letjelica i drugih daljinskih uređaja. Hidrološke veličine su se počele istraživati već prije 200 godina, a od tada su se tehnologije istraživanja znatno poboljšale, osobito početkom 21. stoljeća nakon znatnog napretka i primjene daljinskih istraživanja, što je omogućilo još preciznije prikupljanje podataka o vodama na Zemlji. Ova metoda otvara mnoge nove mogućnosti, ali ima i prepreke koje se mogu teško savladati.

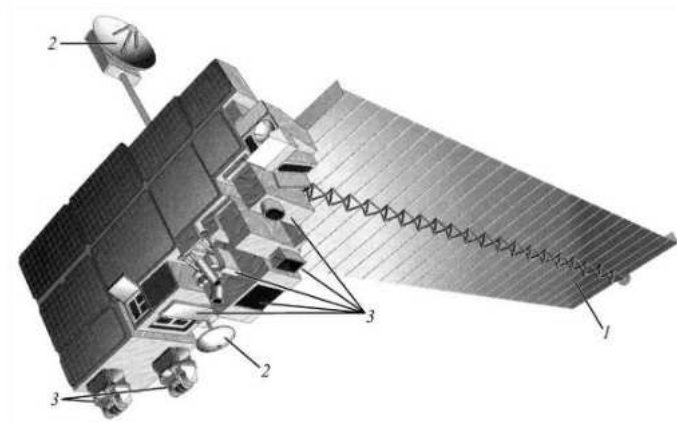
Karakteristike daljinskih istraživanja:

- Mjerenja se mogu obavljati vrlo brzo
- Informacije se mogu učinkovito prikupljati na velikim područjima
- Izravna opažanja hidrološke varijable nisu uvijek moguća, ali daljinska istraživanja mogu dati vrijedne informacije o čimbenicima koji utječu na to
- Točnost metoda daljinskog istraživanja ne može biti provjerena
- Troškovi metoda daljinskih istraživanja smatraju se visokima u usporedbi s konvencionalnim metodama

U ovom radu će se detaljnije analizirati daljinska istraživanja, odnosno njihova bitna uloga kako u svakodnevnom životu, tako za budućnost i efikasno upravljanje vodnim resursima. Objasniti će se različiti tipovi senzora i hidrološke veličine koje njima određujemo – vodostaj, brzina vode i protok, vlažnost tla i evapotranspiracija. Također, spomenut će se bitna uloga daljinskih istraživanja u praćenju klimatskih promjena kao i sprječavanje ekstremnih hidroloških događaja poput poplave i suše.

2 TEHNOLOGIJA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Tehnologija daljinskih istraživanja uključuje različite postupke prikupljanje podataka o hidrološkim veličinama koji se dijele prema načinu snimanja, prijenosu i obrađivanju snimaka i izgledu snimke. Daljinska istraživanja su temeljena na postupcima transformacije elektromagnetskog zračenja u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra u smislene oblike i pojave, a koriste se za prikupljanje informacija s površine Zemlje, iz atmosfere i oceana.



DALJINSKA ISTRAŽIVANJA, satelit Terra – 1. sunčana baterija, 2. antene, 3. senzori za daljinska mjerenja

Slika 1. Primjer satelita (Izvor: [2])

Poteškoće u provođenju daljinskih istraživanja stvaraju nedostajući podaci, a njihovo popunjavanje predstavlja složenu aktivnost u hidrološkoj praksi i može se rješavati na više načina i metoda. Uglavnom se promatra ovisnost veličina između postaja s nedostajućim podacima i mjerodavnih postaja na kojima postoje podaci, s primjenom višestrukih linearnih i nelinearnih korelacijskih ovisnosti, ali i primjenom metoda interpolacije. Zavisnosti veličina formiramo za dovoljno duga razdoblja za koja postoje podaci na obje postaje, zatim kasnije se te zavisnosti koriste za popunjavanje nedostajućih vremenskih nizova. Ukoliko nemamo dovoljno raspoloživih podataka, popunjavanje se ne može izvršiti. Jedan od najznačajnijih izvora za popunjavanje nedostajućih podataka u hidrološkom modeliranju su podaci koji su dobiveni kroz satelitske misije, npr. projekta Copernicus Europske svemirske agencije – ESA, različiti projekti Američke nacionalne uprave za zrakoplovstvo i svemir – NASA, Američke nacionalne oceanografske i atmosfenske službe / Nacionalnog centra za informacije o okolišu - NOAA i drugih [1]. Obzirom na prikupljene podatke, veliku učestalost snimanja, kao i veliku prostornu

pokrivenost misija, ove misije omogućuju nam generiranje velike količine informacija na lokalnim ali i međunarodnim razinama, a velika prednost je što su svi podaci potpuno besplatni.

2.1 Objekti

Sve ono što možemo promatrati iz daljine smatramo objektom daljinskih istraživanja. U hidrologiji, pod objekte daljinskih istraživanja ubrajamo vodne površine, podzemne vode, snijeg i led, kao i druge čimbenike koji utječu na kretanje vode u prirodi.

Ova metoda omogućuje nam prikupljanje podataka o promjenama vodnih resursa na velikim područjima, uključujući i teško dostupna mjesta, na temelju kojih se određuju hidrološke veličine poput visine vodostaja i doseg, brzina vode, količina vode u rijekama i jezerima, kao i za predviđanje poplava i suša.

2.2 Platforme

Za daljinska istraživanja koriste se platforme koje uključuju različite vrste senzora preko kojih prikupljaju podatke. Razlikujemo tri glavna tipa platformi, a to su zemaljske, zračne i svemirske.

- Zemaljske – koriste se za snimanja na površini Zemlje iz neposredne blizine. Snimanja se obavljaju vozilima ili čamcima i plutačama, a najčešći parametar koji se mjeri je vlažnost tla.
- Zračne – koriste se za snimanja iz Zemljine atmosfere, a snimke koje se dobiju su visoke kvalitete. Snimanja obavljaju zrakoplovi, helikopteri i dronovi. Zračne platforme dijele se na one s posadom i bez posade, odnosno bespilotne letjelice. Platforme s posadom trebaju pilota koji će upravljati letjelicom, a idealne su za snimanje podataka na velikim područjima. Uglavnom se koriste za kartiranje, ali i za motrenje i izviđanje. Platforme bez posade su bespilotne letjelice (dronovi) koje se počinju sve više primjenjivati. Za razliku od platformi s posadom, koriste se za snimanje slika na malim visinama pa imaju širi raspon primjene. Prednost im je lako praćenje opasnih i teško dostupnih područja u različitim vremenskim uvjetima. Hidrološke veličine koje se najčešće mjere bespilotnim letjelicama su vodostaj i protok vode.
- Svemirske – koriste se za snimanje u svemiru, a najčešće korištene platforme su sateliti. Njihova prednost je što omogućuju praćenje oceana, kopna i atmosfere.

Sateliti se dijele u dvije kategorije ovisno o poziciji:

- a. Platforme u niskoj Zemljinoj orbiti – sateliti koji kruže oko Zemlje na visini manjoj od 2 000km. Prekrivaju mala područja, a snimke koje se dobiju su visoke rezolucije. Koriste se za proučavanje Zemljine površine, ali i praćenje šumskih požara.
- b. Platforme u geostacionarnoj orbiti – sateliti koji kruže oko Zemlje na visini oko 36 000km. Koriste se za praćenje klime i predviđanje vremenske prognoze. Obzirom na veliku udaljenost na kojoj se nalaze, omogućuju promatranje atmosfere, oceana i kopna.

2.3. Senzori

Fotografska metoda se već oko 100 godina primjenjuje u daljinskim istraživanjima. Zemljina se površina snima posebnim fotografskim kamerama na filmove različite spektralne osjetljivosti, a snimke se izrađuju u mjerilima od 1 : 5 000 do 1 : 30 000. Tehnički razvoj fotografskog postupka je bio spor, ali su se tijekom godina razvili novi senzori koji se koriste za daljinska istraživanja, a svemirski senzori su dosegli svoj praktični maksimum i omogućili izradu topografskih karata u mjerilu 1 : 100 000 ili čak 1 : 50 000. Iako se prostorna rezolucija smatra najvažnijom karakteristikom senzora, za hidrološke primjene vremenske rezolucije su važnije od prostornih, budući da je u hidrologiji potrebno promatranje velikih područja.

Prema izvoru elektromagnetskog zračenja, postoje dvije vrste senzora – pasivni i aktivni. Pasivni senzori detektiraju prirodnu radijaciju koju emitiraju ili reflektiraju promatrani objekti ili promatrano područje. Primjer pasivnih senzora su optički multispektralni i hiperspektralni senzori koji refleksiju detektiraju u različitim valnim duljinama. Najčešći izvor radijacije koji mjeri pasivni senzor je sunčeva svjetlost. Aktivni senzor emitira energiju radi skeniranja objekta i područja, nakon čega pasivni senzor detektira i mjeri radijaciju.

Type of sensor	Imaging		Spectral sensitivity	Platform	
	Yes	No		A	S
Camera (CA)	x		0.4 - 1.1 mm	A	S
Scanner					
Multispectral (MSS)	x		0.3 - 13.5 mm	A	S
Thermal(TSC)	x		3.5 - 13.5 mm	A	
Radiometer					
Spectrometer(SMR)		x	0.3 - 18.5 mm	A	S
Microwave(MWR)	x	x	1 - 90 GHz	A	S
Gamma spectrometer(GSM)		x	0.5 - 3.0 MeV	A	
Radar					
SLAR	x		About 9.5 GHz	A	S
SAR	x		1.3; 5.3; 9.6 GHz	A	S
Altimeter (AM)		x	13.5 GHz	S	
Scatterometer (SCM)		x	3.5; 13.5 GHz	A	S
Laser (LA)		x	Narrow bands/ 0.5-1.3 mm	A	

A = aircraft; S = spacecraft

Slika 2. Senzori i njihove karakteristike (Izvor: [3])

2.2.1 Pasivni senzori

Za daljinski senzorni sustav primjenjuju se pasivni senzori koji mjere sjaj koji odgovara svjetlini duž smjera prema senzoru. Senzori se koriste za mjerenje zbroja izravne i neizravne refleksije zbog procesa prijenosa zračenja. Primjenjuju se u hidrologiji, meteorologiji, ekologiji, geologiji i mnogim drugim znanostima, a uključuju različite vrste radiometara i spektrometara ovisno o tome detektiraju li refleksiju (tj. vidljivu svjetlost), emisiju (tj. infracrvene i toplinske infracrvene) ili mikrovalne dijelove elektromagnetskog spektra.

Najveći nedostatak pasivnih senzora je nemogućnost korištenja ako je nebo prekriveno oblacima.



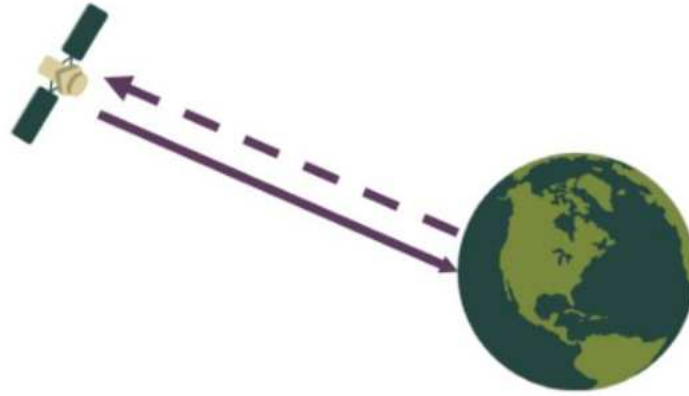
Slika 3. Pasivni senzor (Izvor: [6])

Pasivni daljinski senzori uključuju sljedeće:

- **Radiometar** predstavlja instrument mjeri intenzitet elektromagnetskog zračenja u nekim pojasevima unutar spektra. Dodatno se identificira po pojasu spektra koji pokriva, odnosno vidljivim, infracrvenim ili mikrovalnim pojasevima unutar spektra;
- **Spektrometar** predstavlja uređaj za otkrivanje, mjerenje i analizu spektralnog sadržaja upadnog elektromagnetskog zračenja.;
- **Spektroradiometer** predstavlja radiometar koji mjeri intenzitet zračenja u više pojaseva valnih duljina
- **Sonder** predstavlja instrument koji mjeri vertikalnu distribuciju atmosferskih kao što su temperatura, tlak i sastav iz multispektralnih informacija
- **Akcelerometar** predstavlja instrument koji mjeri ubrzanje, odnosno promjenu brzine po jedinici vremena. Razlikujemo dvije vrste akcelerometara; jedan mjeri translacijska ubrzanja (promjene u linearnim gibanjima u jednoj ili više dimenzija), a drugi mjeri kutna ubrzanja (promjene brzine rotacije po jedinici vremena).
- **Hiperspektralni radiometar** je napredni multispektralni senzor koji detektira stotine vrlo uskih vrpca u vidljivom, bliskom infracrvenom i srednjem infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

2.2.2 Aktivni senzori

U daljinskim senzorskim sustavima, aktivni senzor je radar, laser ili akronim za detekciju svjetla i dometa (LiDAR). Većina aktivnih senzora radi u mikrovalnom dijelu elektromagnetskog spektra pa zbog toga mogu prodrijeti u atmosferu u većini uvjeta. Rad aktivnih senzora najjednostavnije se može pojasniti na primjeru fotoaparata s bljeskom koji radi na istom principu kao i senzor. Bljesak osvjetljava svoju metu nakon čega fotoaparat hvata povratno svjetlo. Dvije ključne prednosti aktivnih senzora su mogućnost prikupljanja slika tijekom noći i dana i neovisnost o lošim vremenskim uvjetima.



Slika 4. Aktivni senzor (Izvor: [6])

Razlikujemo sljedeće aktivne senzore:

- **Radar** je aktivni senzor za aktivno radijsko otkrivanje i domet koji pruža vlastiti izvor elektromagnetske energije. Detektira se, mjeri i tempira povratno raspršeno mikrovalno zračenje, a vrijeme potrebno da energija putuje do cilja i vrati se natrag u senzor određuje udaljenost;
- **Instrument za mjerenje udaljenosti** – mjeri udaljenost između instrumenta i ciljnog objekta;
- **Sonder** predstavlja instrument koji mjeri vertikalnu distribuciju padalina, temperaturu, vlažnost i sastav oblaka, idealan za izradu topografskih modela
- **Laserski visinomjer** predstavlja instrument koji uz pomoć lidra mjeri visine platforme iznad površine;
- **Lidar** predstavlja senzor koji koristi laser radar za prijenos svjetlosnog impulsa i prijammnik za mjerenje raspršene ili reflektirane svjetlosti. Bilježenjem vremena između poslanih i povratnih impulsa, te brzine svjetlosti određujemo udaljenost do objekta.

Glavna razlika između LiDAR i Sonar instrumenta je mjesto na kojem bolje provode mjerenja; LiDAR je prikladniji za tlo, dok Sonar bolje radi pod vodom. Korištenjem ovih topografskih modela, možemo predvidjeti rizik od poplava, arheološka nalazišta i slivove.

2.3 Frekvencija snimanja

Podaci dobiveni daljinskim istraživanjima mogu se smatrati modelima Zemljine površine. Na kvalitetu i sadržaj daljinski očitanih podataka utječe mnogo čimbenika, ali najvažnija su

dva koncepta – rezolucija i frekvencija snimanja, čije su kombinacije omogućile da imamo različite vrste podataka daljinskih istraživanja.

Rezolucija je najveća moć razdvajanja ili razlikovanja mjerenja, a može se podijeliti u četiri tipa: spektralni, radiometrijski, prostorni i vremenski.

Frekvencija snimanja određuje koliko često prikupljamo podatke za daljinska istraživanja.

Razlikujemo 3 vrste prikupljanja podataka: spektralno, prostorno i vremensko.

Na temelju frekvencije ili valne duljine, kategoriziramo svako spektralno područje.

Postoje dvije vrste slika za pasivne senzore, a to su multispektralne i hiperspektralne slike.

Glavna razlika među njima je broj vrpca i koliko su uske vrpce. Hiperspektralne slike imaju

stotine uskih vrpca, dok se multispektralne sastoje od 3-10 širih vrpca. Primjer za

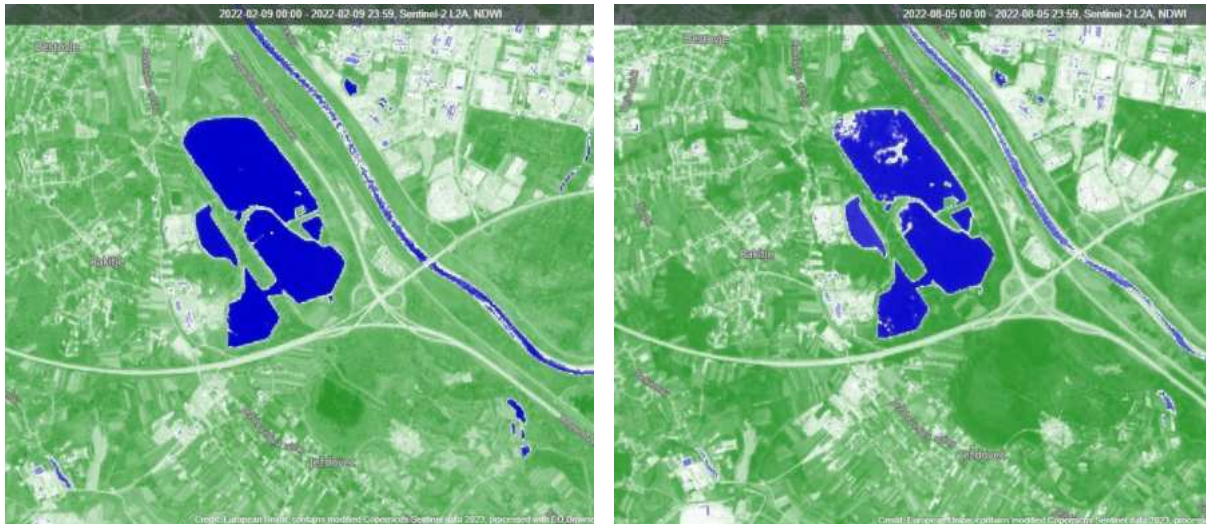
multispektralne slike je satelit Landsat-8 koji proizvodi 11 zasebnih slika za svaku scenu.

3 MJERENJA HIDROLOŠKIH VELIČINA

3.1 Vodostaj i doseg vode

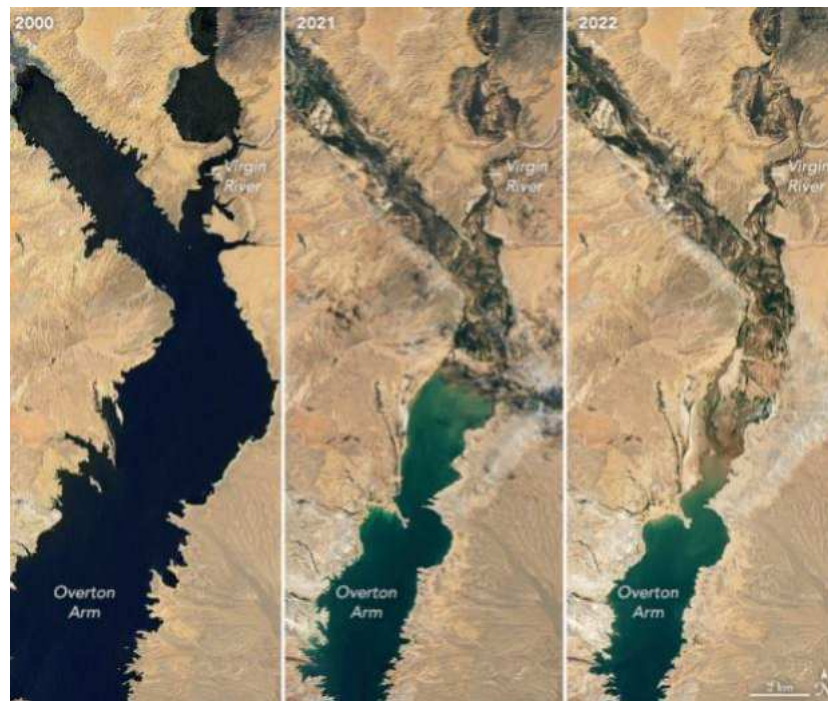
Kako bi se upravljalo vodenim resursima nadziru se ključne varijable koje uključuju vodostaj, protok vode, opseg površinskih voda i kapacitet skladištenja vode. Vodostaj je definiran kao razina vode koja se uglavnom izražava u centimetrima, a uglavnom se mjeri uz pomoć vodomjerne letve. Promatraju ga svemirski radarski visinomjeri koji mjere vrijeme potrebno radarskim impulsima da dosegnu ciljeve i vrate se, izravno ispod svemirske letjelice. Zbog toga se mogu nadzirati samo vodene površine koje se nalaze duž staza satelita, a kvaliteta mjerenja ne ovisi samo o veličini vodene površine već i o topografiji i vegetaciji. Već 30 godina kontinentalne vode se prate tehnikom koja se zove satelitska altimetrija, a za praćenje veliki značaj imaju i skupovi visinomjernih podataka iz raznih mjerenja. Trenutačni vodostaj, odnosno visina vode mogu se izmjeriti preko satelitske altimetrije s centimetarskom točnošću.

U nastavku prikazujem usporedbu vodostaja jezera Rakitje u zimskom i ljetnom periodu.



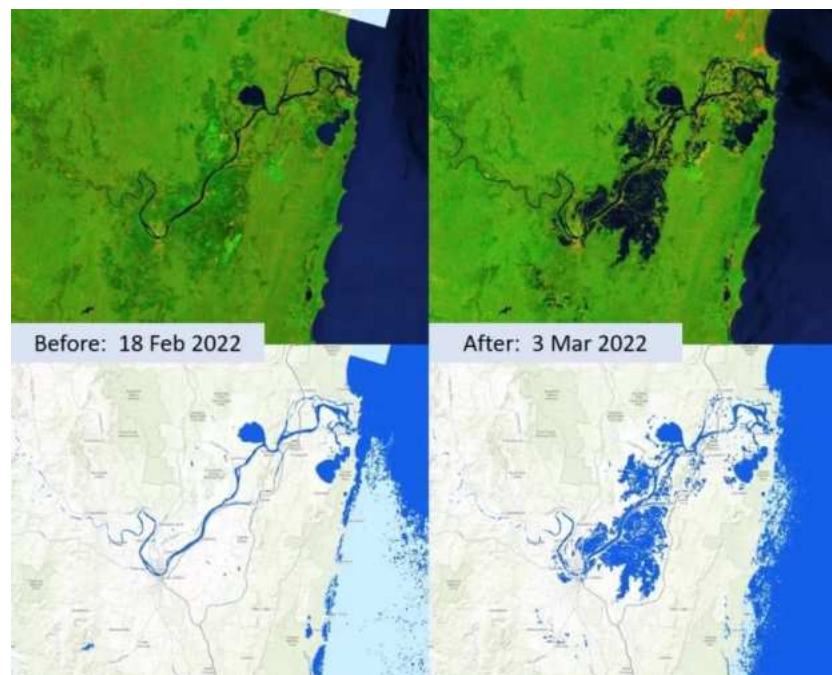
Slika 5. Usporedba vodostaja jezera Rakitje za različite periode;
Lijevo - 9. veljače 2022., Desno – 5. kolovoza 2022.

Obzirom na današnji problem globalnog zagrijavanja, velike klimatske promjene su itekako vidljive zahvaljujući satelitskim podacima. Jedan primjer smanjenja vodostaja tijekom 20 godina, uzrokovan iznimnim sušama je svakako američko jezero Mead čija je razina vode drastično smanjena. Iako je razina vode iz 2000. godine znatno veća od prošlogodišnje, već je ta razina bila ispod minimalne razine vode iz 1990-ih godina.



Slika 6. Prikaz smanjenja vodostaja jezera tijekom godina (Izvor: [10])

Kada govorimo o poplavama, satelitska snimanja također imaju bitnu ulogu u smanjenju rizika od poplava, kao i brži odgovor i oporavak od same poplave. Početkom 2022. godine u Australiji je proglašeno izvanredno stanje zbog niza poplava koje su izazvale olujne kiše na istoku zemlje, a podaci od Sentinel-1 satelita pomogli su kako bi se odredio opseg područja zahvaćenog poplavama i poboljšala svijest o situaciji.



Slika 7. Prikaz promatranja satelita ESA Sentinel-1 za pregled stanja vode prije i poslije poplave (Izvor: [13])

Ova satelitska snimka prikazuje dvije različite metode pregleda stanja vode prije i poslije poplave, odnosno gornji red prikazuje kvalitativnu procjenu regije, a donji red prikazuje kvantitativnu količinu poplavne vode. Iako se na snimkama jasno vidi da je poplavljeno područje veliko, ovaj satelitski senzor ima ograničenje da ne prikazuje vode pod vegetacijom ili vode u urbanim područjima.

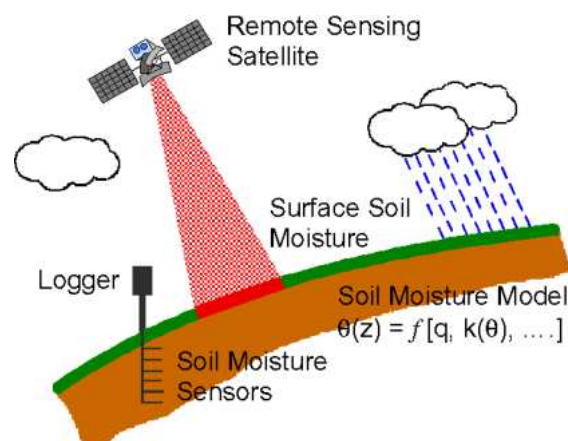
3.2 Brzina vode i protok

Dugo godina oslanjali smo se na in-situ mjerne stanice, nakon čega je dokazano da takve postaje nisu prikladne za globalne i regionalne studije zbog prostorno-vremenske neravnomjerne distribucije i nedosljednosti u podacima. Daljinska mjerenja su imala veliku ulogu u rješavanju ovih problema. Budući da se protok vode ne može izravno mjeriti preko

daljinskih istraživanja, razvijene su empirijske formule između širine rijeke ili vodostaja, ili kombinacije oba parametra. Ukoliko je poznat vodostaj, koristi se empirijska krivulja kako bismo dobili protok vode. Budući da se i opseg vode i protok mogu izraziti preko vodostaja, došli smo do zaključka da je vodostaj ključna varijabla za proučavanje dinamike površinske vode.

3.4 Vlažnost tla

Voda koja se sastoji od zone vode tla, intermedijarna zona i kapilarna zona, u praksi se naziva vlažnost tla. Količina vode u tlu varira u vremenu i prostoru, a podaci o vlažnosti tla bitni su jer njezine varijacije utječu na evoluciju vremena i klime. Vlažnost tla utječe na rast vegetacije, kontrolira otjecanje i igra značajnu ulogu u isparavanju i transpiraciji. Određivanje količine vode uvelike otežava teško ili gotovo nemoguće mjerenje podzemne vode pomoću promatranja samo kopnene površine.



Slika 8. Ilustracija mjerenja vlažnosti tla (Izvor: [7])

Vlažnost tla (eng. soil moisture) glavni je čimbenik u hidrologiji budući da utječe na rast vegetacije, kontrolira količinu vode koja se infiltrira u tlo i količinu koja doprinosi površinskom otjecanju i kanaliziranom protoku. Velika područja se promatraju uz pomoć satelitskih senzora koji mogu biti optički, mikrovalni daljinski senzori. Satelitski senzori imaju sposobnost uzastopnog promatranja velikih područja, ali prostorna rezolucija i opseg senzora ovise o frekvenciji, valnoj duljini, dimenzijama antene i visini iznad Zemljine površine.

Aktivna i pasivna daljinska istraživanja pružaju jedinstvenu mogućnost opažanja vlažnosti tla na globalnoj i regionalnoj razini. Značajke emisije i raspršenja površine tla ovise o vlažnosti tla, ali i o površinskoj temperaturi, hrapavosti površine i vegetaciji. Učinci koji se

ne odnose na vlagu tla smatraju se pomoćnima, budući da se povećavaju na višim frekvencijama, niske frekvencije se smatraju prikladnijima za mjerenje vlažnosti tla.

3.5 Evapotranspiracija

Isparavanje je proces kojim se voda prenosi iz kopnene mase i vodenih površina na Zemlji u atmosferu, a transpiracija je isparavanje vode iz biljaka. Kombinacija ova dva procesa čini evapotranspiraciju koja predstavlja vrlo bitan dio kruženja vode u prirodi.

Evapotranspiracija je od velikog značaja za praćenje i procjenu suše za velike površine, čija je učestalost povećana zbog globalnog zatopljenja. Budući da je izravno mjerenje evapotranspiracije dugotrajno, skupo i teško, procjenjivala se neizravno iz klimatskih varijabli kao što su sunčevo zračenje, temperatura zraka, brzina vjetra, vlažnost tla, temperatura tla i karakteristike površine.

Satelitska daljinska mjerenja evapotranspiracije bitan su dio globalnog sustava promatranja i daje ulazne podatke za poljoprivredu, upravljanje vodnim resursima, vremenske prognoze, klimatske studije i mnoge druge primjene.

S obzirom na veliku važnost evapotranspiracije, Europska svemirska agencija (ESA) financira projekt *Sentinels for Evapotranspiration (SEN-ET)*, a glavni cilj je razviti optimalnu metodologiju za procjenu evapotranspiracije na temelju promatranja satelita Sentinel 2 i Sentinel 3. Konačno, metodologija će biti implementirana kao softver besplatno dostupan svim korisnicima.

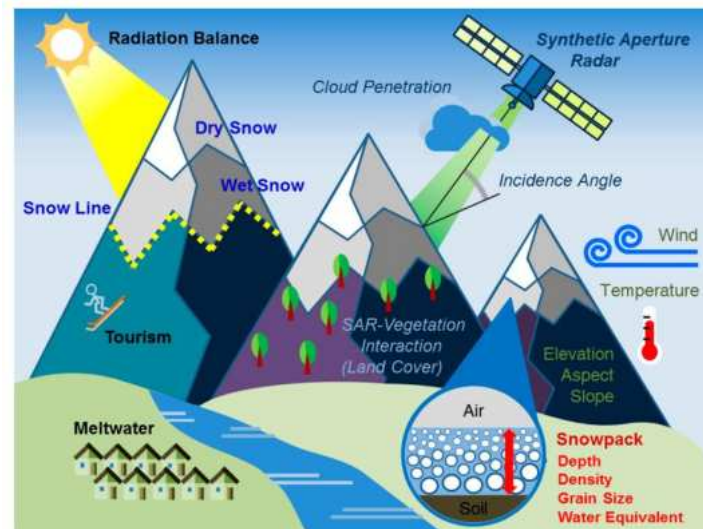
3.6 Snijeg

Površinsko otjecanje i vlažnost tla uvelike ovise o skladištenju vode u snježnom pokrivaču, samim time snijeg je važan za različite primjene kao što su predviđanje poplava i upravljanje vodnim resursima. Snijeg ima jedinstvenu i spektralno različitu refleksiju u odnosu na druge uobičajene materijale na Zemlji pa to čini osnovu za mapiranje snijegom prekrivenog područja (SCA) iz svemira.

Dvije glavne metode za mapiranje SCA su:

- binarna klasifikacija u kojoj je svaki piksel na slici označen kao „snijeg” ili „ne-snijeg”
- frakcijska klasifikacija u kojoj se izračunava udio snježnog pokrivača u pikselu slike

Frakcijska klasifikacija često ima prednost u odnosu na binarnu jer može točnije prikazati varijabilnost snježnog pokrivača koja imaju mrljast snijeg, kao što je u blizini snježne granice i u području s vjetrom. Postoji i hiperspektralno daljinsko istraživanje kod kojeg senzor mjeri u mnogo uskih spektralnih pojaseva, a na temelju njih razvijeni su novi pristupi za točno dohvaćanje veličine zrna snijega.



Slika 9. Ilustracija različitih tipova snijega, snježne granice, i čimbenika koji utječu na snijeg (Izvor: [8])

Jedno od najvažnijih svojstava snježnog pokrivača je ekvivalent snježne vode koji predstavlja ukupnu količinu vode koja je dostupna ukoliko bi se snježni pokrivač trenutačno otopio. Ekvivalent snježne vode se godinama pokušavao izmjeriti, ali su stručnjaci imali ograničen uspjeh. Krajem dvadesetog stoljeća otkriveni su pasivni i aktivni radiometri koji se koriste za otkrivanje ekvivalenta snježne vode, a koriste valne duljine od mm do cm. Vrlo je bitno detektiranje početka otapanja snijega budući da ukazuje na najraniji mogući datum otapanja snijega. Upotreba pasivnih mikrovalnih podataka znatno je ograničena već s malom količinom tekuće vode u snijegu budući da mokar snijeg ima emisiju usporedivu s onim tlom koje je bez snijega. Devedesetih godina prošlog stoljeća na temelju uspoređivanja nadvožnjaka sa snijegom i bez njega, razvijen je indikator mokrog snijega pomoću kojega su mogli detektirati zimsko otapanje i razaznati područja snijega čak i kada je bio mokar.



Slika 10. Primjer snimke snježnog pokrivača preko Sentinel – 2 satelita

3.7 Led

Led karakterizira velika sezonska varijabilnost. Razlikujemo više vrsta leda prema starosti i stupnju razvoja, a razdvajamo ih na prvogodišnji i višegodišnji led, odnosno led koji je preživio barem jedno ljetno otapanje. Površinske vode sezonski se smrzavaju i stvaraju sloj leda čija debljina varira od centimetara do nekoliko metara. Prvogodišnji led nazivamo i sezonskim budući da se formira tijekom jedne zime, a debljina mu je obično između 0,3 i 2m. Višegodišnji led preživio je jednu ili više sezona otapanja, debljine je približno 2-5m i ima hrapavu površinu s grebenima.

Razdavanje je moguće jer su pasivni mikrovalni podaci osjetljivi na svojstva koja su različita za ove dvije vrste leda, a ta svojstva uključuju salinitet, temperaturu, gustoću, hrapavost površine i svojstva snježnog pokrivača. Desalinizacija je jedna velika razlika koja led čini manje slan i omogućuje dublje prodiranje mikrovalova u led u usporedbi s prvogodišnjim ledom. Glavne nesigurnosti u razdvajanju tipova leda često se nalaze u rubnoj zoni leda, u područjima veće deformacije leda zbog čega se povećava hrapavost površine prvogodišnjeg leda pa može dovesti do pogrešne klasifikacije. Podaci o ledu prikupljaju se već pet desetljeća, a prvi podaci prikupljeni su preko pasivnog mikrovalnog satelita Nimbus-5. Promatranje leda smatralo se jednom od najuspješnijih primjena satelitskog promatranja Zemlje, a još uvijek su opažanja satelitskih mikrovalnih radiometara primarni izvor podataka za praćenje veličine morskog leda u polarnim regijama.

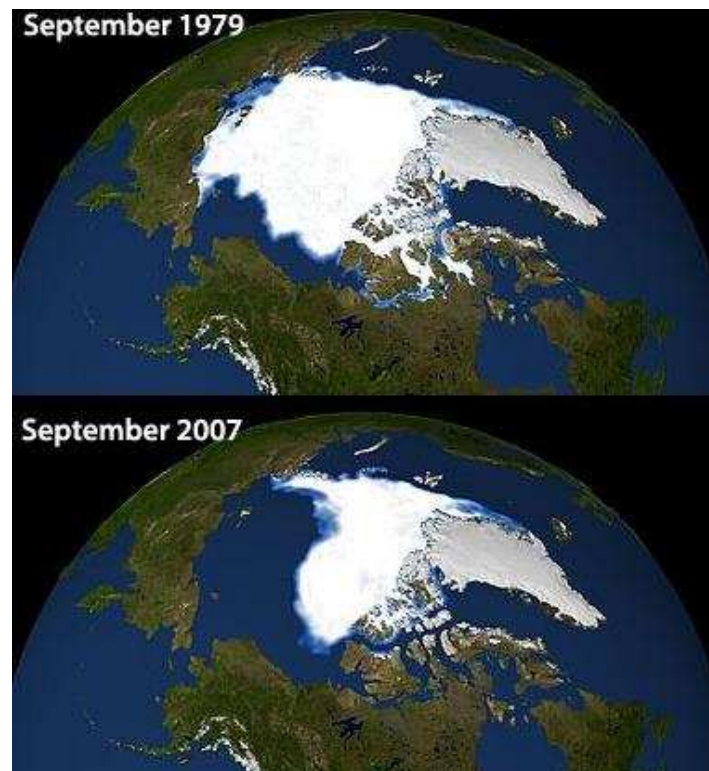
Led je važna je komponenta klimatskog sustava jer reflektira puno više svjetlosti s površine u usporedbi s otvorenom vodom. Karakteristike leda ovise o klimatskim promjenama, a te promjene znatno utječu na klimatski sustav, kako regionalno tako i

globalno. Smanjenje arktičkog leda jedan je od najjačih signala klimatskih promjena koje se danas promatraju na globalnoj razini, a izravno je povezano s pojačanim zagrijavanjem atmosfere blizu površine.

Iako se smatralo da su ove promjene ograničene samo na arktička područja, studije su dokazale drugačije. Zbog jače vijugave polarne struje, dolazi do povećanog prodora hladnog zraka od Arktika do srednjih geografskih širina, odnosno prodora toplijeg zraka na Arktik.

Satelitski podaci s NASA-inog satelita Nimbus 7 iz kraja 1970-ih godina pokazali su da se prosječna površina, ili opseg, arktičkog morskog leda preostalog na kraju ljetnog topljenja dramatično smanjio, padajući za više od 8% po desetljeću.

U rujnu 2007. razina morskog leda bila je rekordno niska, što se može vidjeti na priloženoj snimci satelita.



Slika 11. Satelitski podaci NASA-inog satelita Nimbus-7 za led (Izvor [11])

Krajem devedesetih godina prošlog stoljeća razvijeno je nekoliko metoda za praćenje pomaka morskog leda iz podataka disperzometra koje se svakodnevno provode nad oceanima prekrivenim ledom. Karte pomaka izrađene na temelju ovih metoda imaju razlučivost samo oko 60km. Ove metode koriste se u razdoblju od listopada do travnja

budući da zbog teškog prepoznavanja značajki nisu pouzdane tijekom sezone topljenja. U drugoj polovici dvadesetog stoljeća, točnije 1970-ih godina, bile su dostupne tehnike daljinskog istraživanja za mapiranje i praćenje veličine leda. Dvadeset godina kasnije razvijene su tehnike satelitskog visinomjera za procjenu debljine leda (Laxon et al. 2003.). Pokazalo se da je kontinuirano praćenje debljine leda teži zadatak od mjerenja veličine leda.

4. ZAKLJUČAK

Daljinska istraživanja ključni su faktor za praćenje i određivanje hidroloških veličina na globalnoj razini. Omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka o padalinama, vodostaju i protoku vode što omogućuje precizno predviđanje promjena razine vode te se time sprječavaju i kontroliraju ekstremni vremenski događaji poput poplave i suše. Osim sprječavanja ekstremnih događaja, sustavno praćenje hidroloških veličina poboljšava razvoj poljoprivredne industrije, osigurava vodu za život te omogućava efikasno upravljanje vodnim resursima.

Prednost daljinskih istraživanja u hidrologiji je mogućnost promatranja čitavih riječnih tokova, a ne samo određenih točaka. Iako daljinska istraživanja u prošlosti nisu bila vrlo razvijena, novija vremena donijela su nove mogućnosti i bolje metode kojima se hidrološke veličine uspješno prate, ali još uvijek nisu savladane sve prepreke. Razvoj daljinskih istraživanja uvelike je utjecao na pouzdanost prognostičkog modela, budući da na meteorološkim i hidrološkim stanicama dolazi do kvara ili nekog drugog zastoja u radu, zbog čega podaci ostaju neizmjereni.

POPIS LITERATURE

1. Sarač, M. ; Bekić, D. ; Gašparović, M. (2021) *Analiza mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u popunjavanju nedostajućih podataka u operativnom sustavu hidroloških prognoza*. Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/daljinska-istrazivanja>
3. Kuitinen, R. (1992) *Remote sensing for hydrology progress and prospects*. Geneva, Secretat of the world meteorological organization
4. Pipitone, C. ; Maltese, A. ; Dardanelli, G. ; Lo Bruto, M. ; La Loggia, G. (2018) *Monitoring Water Surface and Level of a Reservoir Using Different Remote Sensing Approaches and Evaluated vis GNSS*. Palermo, Italy, Department of Civil, Environmental, Aerospace, Materials Engineering
<https://www.mdpi.com/2072-4292/10/1/71>
5. <https://gisgeography.com/remote-sensing-earth-observation-guide/>
6. <https://space4climateaction.unoosa.org/es/content/soil-moisture>
7. https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-soil-moisture-estimation-problem_fig1_2800832
8. https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-soil-moisture-estimation-problem_fig1_2800832
9. Thakur, K.P. ; Nikam, R. B. ; Garg, V. (2017) *Hydrological Parameters Estimation Using Remote Sensing and GIS for Indian REgion: A Review*. India, *Proceedings of the National Academy of Sciences*
https://www.researchgate.net/publication/321199265_Hydrological_Parameters_Estimation_Using_Remote_Sensing_and_GIS_for_Indian_Region_A_Review
10. Khanbilvardi, R. ; Lakhankar, T. ; Krakauer, N. ; Nazari, R. ; Powell, A.
Remote Sensing Dana and Inforation for Hydrological Monitoring and Modeling center for Satellite Applications and Research, Camp Springs, MD, USA.
https://nirkrakauer.net/papers/Chapter_Remote_Sensing_Hydrology.pdf

-
11. Sandven, S. ; Spreen, G. ; Heygster, G. et al. (2023) *Sea Ice Remote Sensing – Recent Development sin Methods and Climate Data Sets*. *Surv Geophys* 44
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-023-09781-0>
 12. https://en.as.com/latest_news/nasa-shows-historic-change-in-the-largest-reservoir-in-the-us-n/
 13. Amani, M. ; Mehravar, S. ; Moghimi, A. et al. (2022) *Ocean remote Sensing Techniques and Applications*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3401>
 14. W. Nollin, A. (2017) *Recent advances in remote sensing of seasonal snow*. *Journal of Glaciology* <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/recent-advances-in-remote-sensing-of-seasonal-snow/FFAC5B88D4480213436D6617A5ED208F>
 15. <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/disasters/disasters-activations/australia-floods-2022>
 16. <https://www.spatialpost.com/types-of-platforms-in-remote-sensing/>

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer satelita (Izvor: [2]).....	5
Slika 2. Senzori i njihove karakteristike (Izvor: [3]).....	8
Slika 3. Pasivni senzor (Izvor: [6])	8
Slika 4. Aktivni senzor (Izvor: [6]).....	10
Slika 5. Usporedba vodostaja jezera Rakitje za različite periode;.....	12
Slika 6. Prikaz smanjenja vodostaja jezera tijekom godina (Izvor: [10]).....	12
Slika 7. Prikaz promatranja satelita ESA Sentinel-1 za pregled stanja vode prije i poslije poplave (Izvor: [13]).....	13
Slika 8. Ilustracija mjerenja vlažnosti tla (Izvor: [7]).....	14
Slika 9. Ilustracija različitih tipova snijega, snježne granice, i čimbenika koji utječu na snijeg (Izvor: [8])	16
Slika 10. Primjer snimke snježnog pokrivača preko Sentinel – 2 satelita	17
Slika 11. Satelitski podaci NASA-inog satelita Nimbus-7 za led (Izvor [11]).....	18