

Primjena SAR snimki sa satelita Sentinel-1 za detekciju i praćenje poplava, studija slučaja poplava u vrgoračkom kraju tijekom studenog i prosinca 2020. godine

Mladen Viher

Sažetak

U radu su prikazane metode digitalne obrade slike koje, slijedno primijenjene, omogućavaju detekciju i praćenje poplavljenih površina korištenjem satelitskih snimki dobivenih radarom sa sintetičkom aperturom (SAR) sa satelita Sentinel-1 na studiji slučaja poplave u vrgoračkom kraju, tijekom studenog i prosinca 2020. godine. Metoda se temelji na raspršenju polariziranog radarskog vala na vodenim površinama. U radu su komentirane prednosti i nedostaci korištenja otvorenih resursa te je predloženo žurno pristupanje Republike Hrvatske Povelji o svemiru i katastrofama.

Ključne riječi

elementarne nepogode, poplave, GEOINT, SAR, Sentinel-1, daljinska istraživanja

¹ Članak je primljen u Uredništvo 18. listopada 2021. i prihvaćen za objavu 06. prosinca 2021.

Uvod

Tema ovog rada je mogućnost detekcije i praćenja poplavljenog područja korištenjem satelitskih radarskih snimki za detekciju i kartiranje poplavljenih površina. Poplava u području grada Vrgorca bila je uzrokovana ekstremnom količinom oborine, s dnevnom količinom do 80 mm po kvadratnom metru, što je izazvalo bujanje krških vodotokova. Trajala je od 29. studenoga do 21. prosinca 2020. godine i bila je proglašena prirodnom nepogodom. Poplavom su bile zahvaćene poljoprivredne površine u nizinama, a najteže štete pretrpjelo je selo Kokorići, u kojem je voda prodrla u kuće i izazvala velike štete. Debeli sloj oblaka i kiša, koji su pratili ovu prirodnu nepogodu, onemogućili su snimanja drugim sensorima. Snimka slikovnog radara omogućava brzi uvid u veličinu poplavljenog područja te prioritizaciju stupnja ugroženosti ljudi i imovine, a potom i okoliša. Istodobno, snimka slikovnog radara omogućava pregled raspoloživih komunikacija (npr. autocesta E65 ostala je prohodna), kao i područja za evakuaciju i postavljanje privremenih naselja, skladišta i zborišta interventnih snaga.

Slična istraživanja provedena su i drugim sensorima, konkretno određivanjem tzv. normalizirane razlike vodenog indeksa (engl. *Normalized Difference Water Inadex* – NDWI) korištenjem radiometrijskog multispektralnog senzora na satelitu Sentinel-2 (Župan et al., 2019a), kod kojeg je osnovni nedostatak nedostupnost snimki noću i u uvjetima velike količine naoblake. Općenito, satelitski radarski senzori omogućavaju kontinuirano snimanje poplavljenih površina, bez obzira na noć i naoblaku, a njima su komplementarne radiometrijske snimke u razdobljima koja su povoljna za primjenu ove vrste senzora (Župan et al., 2019a; Župan et al., 2019c). Sentinel-1 je prvi radarski satelitski par u europskom programu Copernicus, koji je iniciran na početku stoljeća od Europske komisije u suradnji s Europskom svemirskom agencijom. Sentinel-1A lansiran je 3. travnja 2014. godine, a slijedio je identičan satelit Sentinel-1B, koji je lansiran 25. travnja 2016. godine.

Njihov primarni sensor je radar sa sintetičkim otvorom, aperturom (engl. *Synthetic Aperture Radar* – SAR) koji radi u C-pojasu, na 5405 MHz s radiometrijskom preciznosti od 1 dB u četiri različita moda rada (Veci, 2016):

- Strip Map (SM)
- Interferiometric Wide Swath (IW)
- Extra Wide Swath (EW)
- Wave (WV).

Mod SM omogućava najveću prostornu rezoluciju od 5 x 5 metara u pojasu zahvata širine 80 km u jednostrukoj (horizontalnoj HH, vertikalnoj VV) ili dvostrukoj polarizaciji (HH+HV, VV+VH). SM mod omogućava kontinuitet s ranijim satelitskim misijama ERS i Envisat. Senzor ne radi kontinuirano u ovom modu pa snimke nisu uvijek raspoložive. Taj mod predviđen je za krizne situacije i snimanje malih otoka, a snimanje željenog područja mora se najaviti.

IW mod ima duži zahvat, od 250 km, sa slabijom rezolucijom okomito na projekciju putanje satelita na tlu; 5 x 20 m, u jednostrukoj ili dvostrukoj polarizaciji, kao i kod SM moda. Pritom se radarski snop pomiče i po azimutu, što omogućava bolju rezoluciju snimke ovoga slikovnog radara. Ova tehnika naziva se TOPSAR (engl. *Terrain Observation with Progressive SAR*) i rezultira scenom sastavljenom od tri puta devet potpodručja (tzv. „otkosa“, engl. *swath*, i „izboja“, engl. *burst*). Razlika među njima je što se „izboji“ mogu spajati, dok je za „otkose“ nužno napraviti odvojene „proizvode“ (engl. *product*) koji se poslije mogu spajati u mozaik satelitskih snimki. Mod IW koristi se u radarskoj interferometriji (deformacije tla nakon potresa, odrona, klizišta...), a korišten je i u ovom radu, na razini predobrade GRD (engl. *Ground Range Detected*), što će detaljnije biti opisano u nastavku. To je osnovni mod Sentinel-1 senzora nad kopnom.

Za oceanska i polarna područja primjenjiv je mod EW, gdje SAR u pojasu duljine 400 km ima prostornu rezoluciju 25 x 100 m, također u jednostrukoj ili dvostrukoj polarizaciji. Razlika u odnosu prema prethodnom modu IW u tome je što EW ima pet otkosa. EW mod koristi se za obalna i oceanska područja, za praćenje onečišćenja na moru te za stanje ledenog pokrova.

WV je mod specijaliziran za oceanografske potrebe i u njemu senzor stvara snimke dimenzija 20 x 20 km koje imaju piksele prostorne rezolucije 5 x 20 m. U ovom modu radar ne radi kontinuirano pa su razmaci između snimki oko 100 km, a senzor radi samo u jednostrukoj polarizaciji (HH ili VV).

ESA, kao operator konstelacije Sentinel, omogućava otvoreni pristup satelitskim podacima kroz program Copernicus. Satelitske snimke raspoložive su unutar jednog sata za hitne potrebe (NRT - engl. *Near Real-Time - Emergency Response*), unutar tri sata po posebnom zahtjevu prema operatoru, dok svi ostali korisnici mogu do snimki pristupiti unutar 24 sata nakon akvizicije preko otvorenog čvorišta (engl. *hub*) projekta Copernicus, za koji je u Republici Hrvatskoj zadužen Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (URL <http://science.geof.unizg.hr/copernicus/>, uz prethodnu registraciju korisnika). Pritom je moguće zahtijevanje prioritarnog snimanja u visokoj rezoluciji (<https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/who-can-use-service>), za što je ovlašteno Ravnateljstvo civilne zaštite. Alternativa je korištenje komercijalnih satelita, poput COSMO SkyMed i Radarsat, čije snimke dostižu cijene nekoliko tisuća eura. Na primjer, korištenje snimki sa satelita COSMO SkyMed, s vremenskom rezolucijom 6 sati, u rezoluciji ScanSAR 30 x 30 m, tijekom trajanja promatranog razdoblja prirodne nepogode u vrgoračkom kraju, iznosilo bi više od 138 000 eura (e-GEOS, 2017).

Snimke Sentinela-1 mogu biti predobrađene na jednu od četiri razine:

- Level 0
- Level 1 SLC, Single Look Complex
- Level 1 GRD, Ground Range Detected
- Level 2 OCN, Ocean.

Level 0 su izvorni, „sirovi“, SAR podatci koji su komprimirani metodom FDBAQ (engl. *Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization*) i nefokusirani. Na ovoj razini prisutan je značajan šum i snimka je još nekalibrirana. Operator ih u ovoj izvornoj razini sprema u arhive jer se iz njih izvode snimke predobrađene na višim razinama.

Level 1 je primjeren za većinu korisnika i korišten je u ovom radu. Podatci s razine 0 prolaze internu kalibraciju i predobradu te fokusiranje (Miranda, 2015). Na ovoj razini predobrada može rezultirati sačuvanom informacijom o fazi. U tom slučaju dobivamo satelitsku snimku s kanalima koji sadrže fazu i amplitudu signala u formi kompleksnih brojeva koji se dalje mogu obrađivati standardnim matematičkim metodama razvijenim u digitalnoj obradi slike. To je tzv. *Single Look Complex* (SLC), koji je primjenjiv u

interferometrijskoj obradi SAR snimki. U ovom radu metode za detekciju poplavljenih površina temeljili smo na razlikama u polaritetu odaslanog i na površini raspršenog radarskog snopa te je korištena GRD predobrada u kojoj je najpreciznija amplituda signala koja je višestrukim opserviranjem jednog te istog piksela (tzv. *multi-look*) očišćena od šuma. GRD snimke su projicirane na WGS84 elipsoid i kao takve mogu se dalje spajati u mozaike.

Level 2 Ocean (OCN) koristi se za određivanje valova i smjera vjetra nad oceanima i nije primjenjiv u detekciji i praćenju poplavljenih površina.

Satelitski par Sentinel-1A i Sentinel-1B sa SAR sensorima po svojim su tehničkim značajkama u potpunosti primjereni detekciji i praćenju poplavljenih površina (tablice 1 i 2). Radi se o satelitima koji koriste provjerenu tehnologiju satelitskog SAR-a, razvijenu na satelitima sa SAR sensorima ranije generacije: Seasat, ERS-1/2, JERS, SIR-C/X-SAR, Radarsat-1, SRTM, ENVISAT/ASAR, ALOS/PalSAR te komplementarnu tekućim SAR misijama: TerraSAR-X, Radarsat-2, COSMO SkyMed, RISAT i dr. Metode akvizicije i obrade SAR snimki danas su dobro razvijene, dokumentirane te softverski i hardverski podržane. Sve zajedno, to stvara povoljno okruženje za razvoj metoda za detekciju i praćenje poplava u kontekstu nacionalnog GEOINT-a (geoprostorna obavještajna disciplina²) u potpori vojnim operacijama u slučajevima velikih prirodnih i tehničkih katastrofa (Viher et al., 2021), što je i tema ovog rada.

² GEOINT objedinjuje sposobnosti daljinskih istraživanja, analize slikovnih zapisa i geoprostornih informacija kako bi se opisali, procijenili i vizualno prikazali geografski referencirani objekti i aktivnosti na zemlji.

Tablica 1. Tehničke i operativne značajke satelita Sentinel-1 (prema <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>)

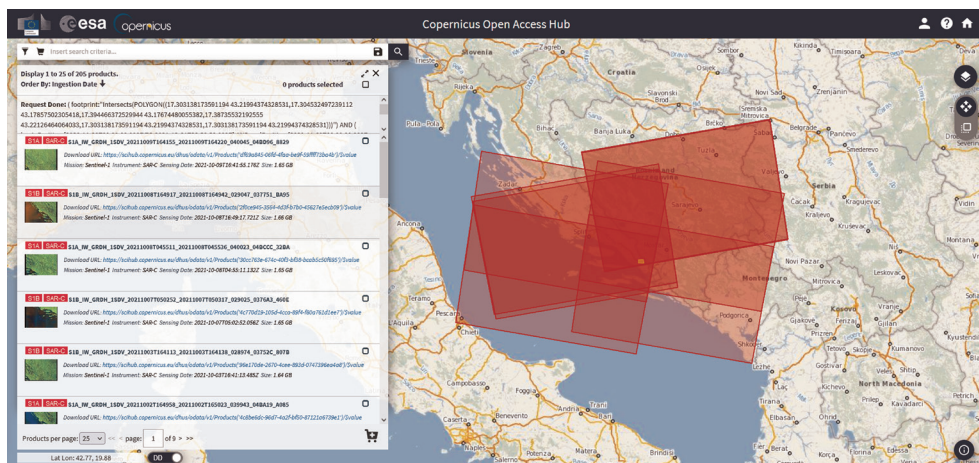
| Značajka | Opis |
|--|---|
| Proizvođači | Thales Alenia Space, Astrium Satellites, DLR i Jena-Optronik |
| Postavljen u orbitu | Sentinel-1A 3. travnja 2014. Sentinel-1B 25. travnja 2016. Raketa nosač Soyuz, raketodrom Kourou, Francuska Gvajana |
| Predviđeni vijek trajanja | 7 - 12 godina, planirana zamjena parom satelita Sentinel-1C i Sentinel-1D |
| Masa satelita | 2300 kg |
| Protežnosti tijela satelita | 3.9 x 2.6 x 2.5 m ³ |
| Orbita | blisko polarna, sinkronizirana sa Suncem 693 km visine nad WGS84 orbitalni period 98.6 minuta ponavljanje ravnine orbite 12 dana |
| Stabilizacija | po sve tri osi |
| Brzina prijenosa prema Zemlji (downlink) | 2 x 260 Mbps, u X pojasu |

**Tablica 2. Tehničke značajke C-SAR senzora na satelitima Sentinel-1A i Sentinel-1B
(prema <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>)**

| Značajka | Opis |
|---------------------------|----------------------|
| Noseća frekvencija | 5.405 GHz (C pojas) |
| Impulsna frekvencija | 1 – 3 kHz |
| Polarizacija | HH+HV, VV+VH, VV, HH |
| Širina pojasa | 0 – 100 MHz |
| Dimenzije antene | 12.3 m x 0.821 m |
| Širina snopa po azimutu | 0.23° |
| Širina snopa po elevaciji | 3.43° |
| Binarna kvantizacija | 10-bitna |

Primijenjene metode

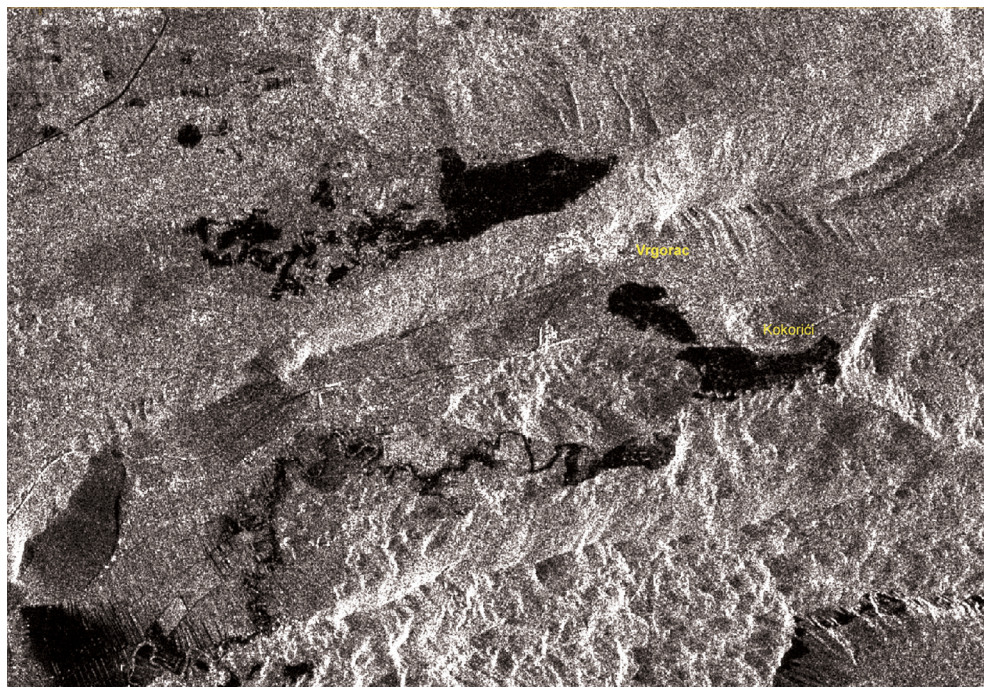
Uvid u raspoložive satelitske snimke za vrijeme trajanja poplave prikazan je na Slici 1, kao rezultat pretraživanja Copernicus baze snimki uz kriterije izbora poplavljenog područja, senzora SAR (sateliti Sentinel-1A i Sentinel-1B), produkt GRD u modu rada IW. Snimke s aktivnih radarskih senzora raspoložive su i noću, kao i u uvjetima potpune naoblake. Od ukupno raspoloživih devet snimki, nakon izdvajanja ponovljenih snimki te snimki na kojima je područje od interesa bilo na samom rubu snimke, korištene su četiri SAR snimke, od: 30. studenoga te 6., 12. i 18. prosinca 2020. godine.



Slika 1. ESA OpenHUB: raspoložive snimke satelita Sentinel-1A i Sentinel-1B na Copernicus Open Hubu koje zahvaćaju područje pogođeno poplavom u području grada Vrgorca od 29. studenoga do 21. prosinca 2020. godine

S obzirom na veličinu GRD-a, koja obuhvaća višestruko veću površinu od poplavljenog područja, u prvom koraku izdvojeno je samo užo područje od interesa, koje je u potpunosti obuhvatilo poplavljenog područja. S obzirom na to da Sentinel-1A i Sentinel-1B imaju identične orbite, izdvajanje pravokutnog područja relativno je jednostavno. Izabrano je pravokutno područje određeno dijagonalom (43.227°N , 17.501°E) (43.148°N , 17.278°E), koje je prikazano na Slici 2 koja još nije geokodirana. S obzirom na to da se satelit pritom kretao

u silaznoj orbiti (od pola prema ekvatoru), ona prikazuje relativan položaj objekata na površini u izvornoj formi kako je prikuplja senzor. Zbog toga relativan odnos položaja mjesta (npr. Vrgorac i Kokorići) još ne odgovara njihovu relativnom geografskom položaju.



Slika 2. Subset: izdvojeno područje od interesa koje je bilo ugroženo poplavom kod grada Vrgorca u studenome i prosincu 2020.

Matrica polarizacije

Za detekciju poplavljenih površina koristio se SAR senzor koji odašilje elektromagnetski val čija je jakost električnog polja na odašiljaču \vec{E}_r , koji se reflektira od površine i vraća natrag na antenu senzora (Anusha i Bharathi, 2019). Pritom on dva puta prelazi udaljenost r i vraća se na antenu prijamnika na kojem je tada jakost reflektiranog elektromagnetskog vala \vec{E}_r . Ta jakost

električnog polja elektromagnetskog vala, ovisno o polarizaciji odaslanog i primljenog vala koji opisuje matrica \mathbf{S} , općenito se može izraziti (Moriera et al., 2013):

$$\vec{E}_r = \frac{\exp(-jkr)}{r} \mathbf{S} \vec{E}_t^* \quad (1)$$

pri čemu je j imaginarna jedinica, $*$ označava konjugirano kompleksni vektor, a k je valni broj koji za valnu duljinu C-SAR-a na satelitu Sentinel-1 $\lambda = 5.5465763$ cm iznosi:

$$k = \frac{2\pi}{5.5465763 \cdot 10^{-2} \text{ cm}} = 113.28043 \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

Jednadžbu (1) možemo raspisati po komponentama; H - horizontalna polarizacija, V - vertikalna polarizacija, kako bismo detaljno proučili utjecaj polarizacije:

$$\begin{bmatrix} E_{r,H} \\ E_{r,V} \end{bmatrix} = \frac{\exp(-jkr)}{r} \cdot \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{t,H} \\ E_{t,V} \end{bmatrix}^* \quad (3)$$

Na taj način, kroz matricu polarizacije \mathbf{S} opisujemo razliku između raspršenja:

HH - horizontalno polariziran pri odašiljanju, horizontalno polariziran na prijemu

VV - vertikalno polariziran pri odašiljanju, vertikalno polariziran na prijemu

HV - horizontalno polariziran pri odašiljanju, vertikalno polariziran na prijemu

VH - vertikalno polariziran pri odašiljanju, horizontalno polariziran na prijemu.

Za detekciju vodenih površina koristimo se empiričkom činjenicom da su vodene površine skoro zrcalni reflektori, što znači da će njihov odraz biti slab jer će reflektirani val mimoići prijamnik (Yamaguchi, 2020). To će rezultirati slabim intenzitetom, koji se prikazuje kao tamna područja na

Slici 2. Unatoč tome što ćemo vodene površine detektirati u VV polarizaciji, nije pojednostavljen izraz (3), već je zadržana VH polarizacija koja postoji u GRD produktu za kasniju izradu kompozitne SAR snimke na kojoj će, u raznim bojama, biti omogućena lakša subjektivna interpretacija vrlo složene scene ovog krškog terena.

Radiometrijska kalibracija

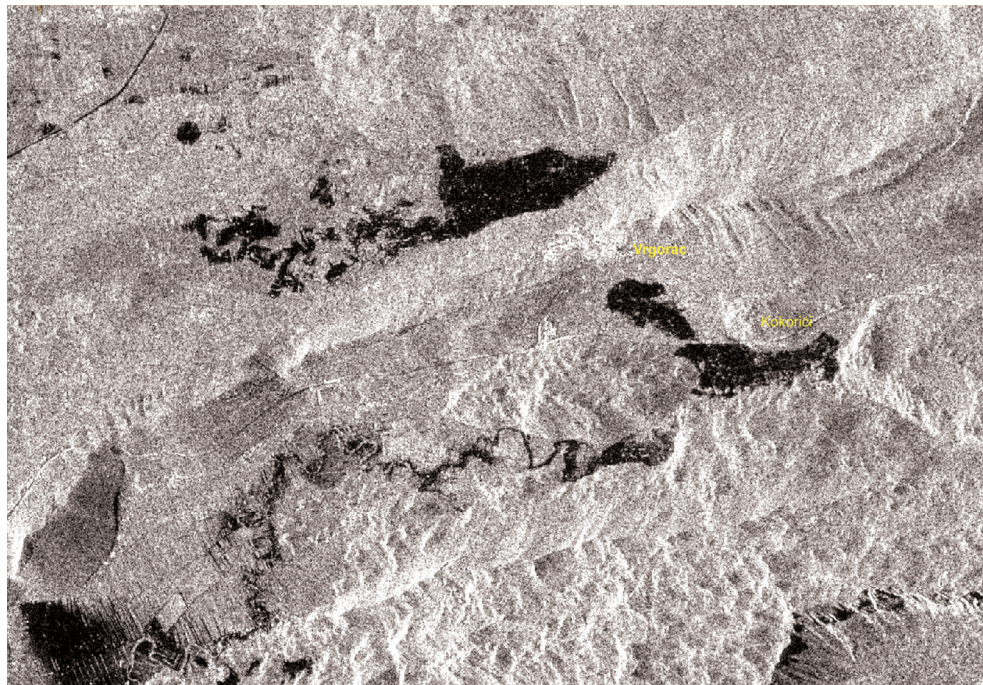
Radi usporedivosti s drugim snimkama istog terena provedena je radiometrijska kalibracija na taj način da je digitalna vrijednost piksela (DN) po apsolutnom iznosu kvadrirana i podijeljena s kvadratom koeficijenta raspršenja σ^0 za korespondentni piksel (Moriera et al., 2013):

$$C_{ij} = \frac{|DN_{ij}|^2}{(\sigma_{ij}^0)^2} \quad (4)$$

pri čemu koristimo iste koeficijente polarizacije iz (3)

$$\sigma_{ij}^0 = 4\pi |S_{ij} S_{ij}^*|. \quad (5)$$

Rezultat je prikazan na Slici 3, koja se sad može izravno uspoređivati s drugim snimkama istog senzora. S nje u sljedećim koracima treba ukloniti inherentni šum, a nakon što ćemo napraviti sva radiometrijska poboljšanja, možemo je geokodirati i prevesti u jednu od standardnih projekcija za preklapanje na GIS podloge.



Slika 3. Radiometrijska kalibracija: kalibrirana SAR snimka u VV polarizaciji postaje izravno usporediva sa snimkama istog senzora

Filtriranje inherentnog šuma

Na kalibriranom međurezultatu (Slika 3) prisutan je značajan inherentni šum (tzv. „*salt-and-pepper*“) koji nastaje od interferencije radarskog odraza unutar i u neposrednoj blizini promatranog piksela, a manifestira se kao slučajna prostorna razdioba konstruktivne i destruktivne interferencije. Ova vrsta šuma može se ukloniti:

- prostornim filtrom
- višestrukim snimanjem iste površine (tzv. *multilook*).

Filtriranje je provedeno prostornim, Leejevim, filtrom. Model Leejeva filtra temelji se na tome da na snimci dobivamo intenzitet piksela C_{ij} koji

je proporcionalan jakosti električnog polja u prijamu, nakon kalibriranja provedenog u prethodnom koraku i koji je konvolucija stvarnog iznosa piksela x_{ij} i slučajnog šuma n_{ij} (Yamaguchi, 2020):

$$C_{ij} = x_{ij} \cdot n_{ij}. \quad (6)$$

Budući da je n_{ij} slučajna varijabla, promjenjiva od piksela do piksela, ne postoji drukčiji način njene procjene do statističke, na temelju aritmetičke sredine iznosa piksela unutar kvadratne jezgre konvolucije s promatranim pikselom u njenoj sredini. Mogu se koristiti jezgre konvolucije 3×3 , 5×5 , $7 \times 7 \dots$ piksela, što je stvar vještine. Ne postoji način objektivnog određivanja koja je veličina jezgre konvolucije najprimjerenija. Općenito govoreći, veće jezgre konvolucije bolje usrednjavaju sliku, no uz neizbježan gubitak oštine. Snimke sa slabijim šumom možemo filtrirati manjim jezgrama konvolucije (3×3 i 5×5), dok one s jakim šumom treba filtrirati većima. U ovom radu korištena je jezgra konvolucije 5×5 , što je određeno empirijski, prvo je isprobano filtriranje s jezgrom 3×3 , a zatim i većim jezgrama te su vizualno uspoređeni rezultati s obzirom na preostali šum. Ideja Leejeva filtra je da možemo procijeniti iznos piksela \hat{C}_{ij} koji je približno stvarna vrijednost piksela x_{ij} :

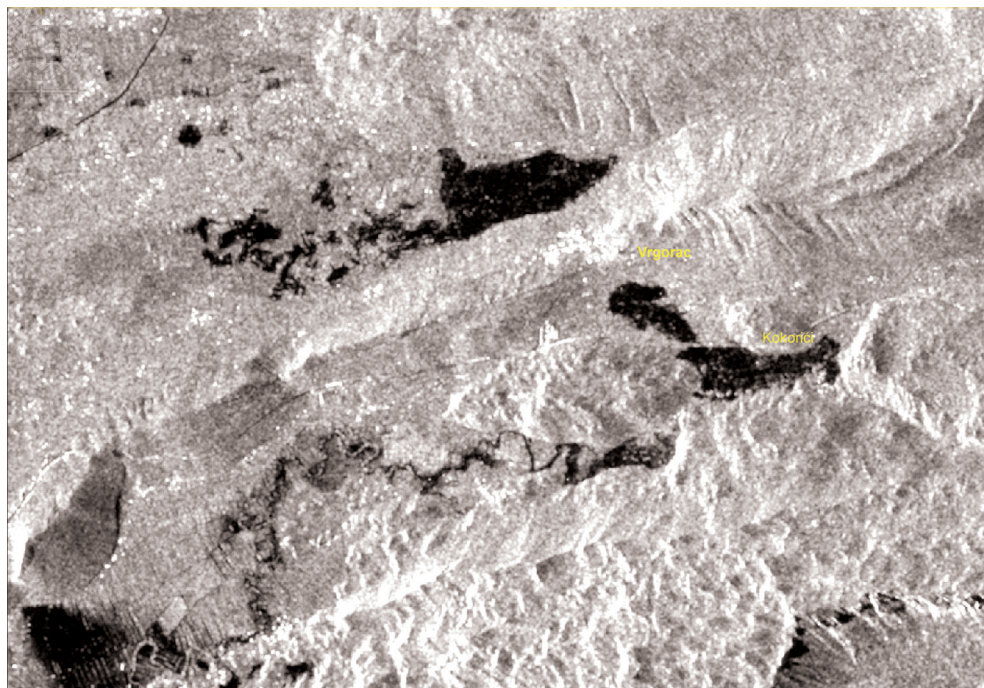
$$\hat{C}_{ij} \approx x_{ij} \quad (7)$$

pri čemu iz piksela obuhvaćenih jezgrom konvolucije veličine k (npr. 5×5 piksela) izračunavamo srednju vrijednost piksela $\bar{x}_{ij,k}$ i procjenu varijance $\hat{\sigma}_{ij,k}^2$ oko središnjeg piksela x_{ij} , a za stvarnu vrijednost varijance, u slučaju senzora C-SAR na satelitu Sentinel-1A, pretpostavlja se $\sigma_{\mu}^2 = 0.05$ (Rubel et al., 2019):

$$\hat{C}_{ij} = \bar{x}_{ij,k} + \frac{\hat{\sigma}_{ij,k}^2}{\bar{x}_{ij}\sigma_{\mu}^2 + \hat{\sigma}_{ij,k}^2} (x_{ij} - \bar{x}_{ij,k}). \quad (8)$$

Nakon primjene Leejeva filtra dobivamo međurezultat s uklonjenim inherentnim šumom, uz neizbježan gubitak oštine. Razlog tome je što svi filtri koji provode prostorno usrednjavanje uklanjaju visokofrekventne

pojave, koje mogu biti i prirodne, na primjer rubovi ili područja s izraženom prostornom promjenom varijance.

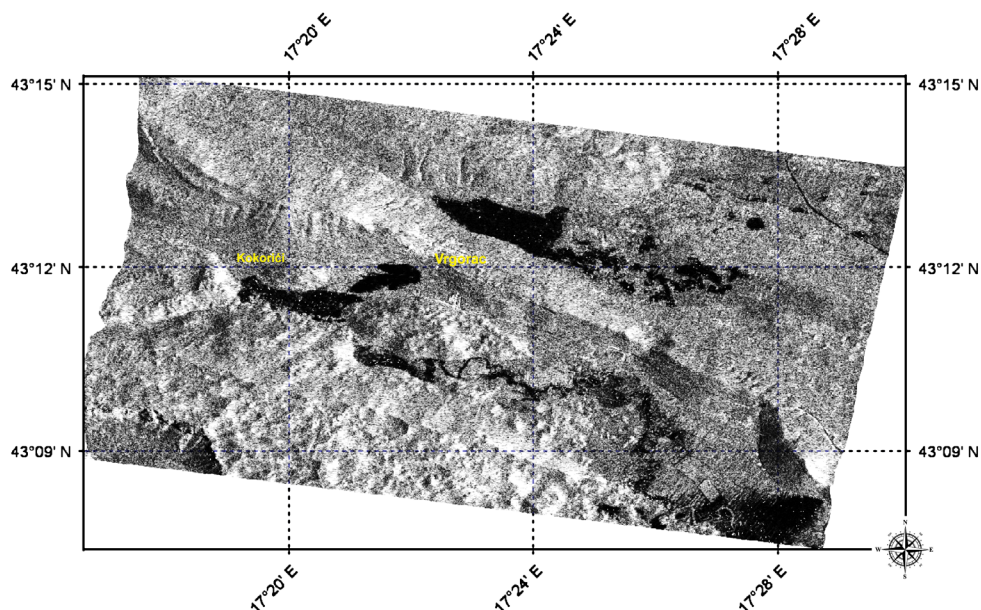


Slika 4. Filtracija inherentnog šuma: nakon obrade kalibrirane snimke (na Slici 3) dobivena je snimka s uklonjenim inherentnim šumom, no s nešto slabijom oštrinom (v. tekst); snimka još nije geokodirana pa su relativni položaji na terenu prikazani kako ih vidi senzor na izvornoj snimci

Geokodiranje

U ovoj fazi obrade provedene su radiometrijska i geometrijska poboljšanja snimke te se može pristupiti njenom geokodiranju, pri čemu će pikseli dobiti odnose kakve imaju u stvarnosti, preslikani na jednu od standardnih projekcija. Geokodiranje snimke je automatizirani proces u čije detalje nećemo ulaziti jer nije tema ovog rada. Napominjemo samo da se koriste podatci o točnom položaju satelita (koji je stabiliziran po sve tri osi) te orijentacije

senzora. Za model geoida koriste se digitalni modeli terena izvedeni od rezultata *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) rezolucije 3" x 3" ili 1" x 1", ovisno o primjeni. Portal Copernicus nudi mogućnost i drugih digitalnih modela terena, a u ovom radu korišten ja SRTM rezolucije 1" x 1", što je prostorna rezolucija oko 30 metara na srednjim geografskim širinama.



Slika 5. Geokodiranje: geokodirana snimka područja oko grada Vrgorca, snimljena dana 12. 12. 2020. oko 04:50 po lokalnom vremenu sa C-SAR senzora na satelitu Sentinel-1A

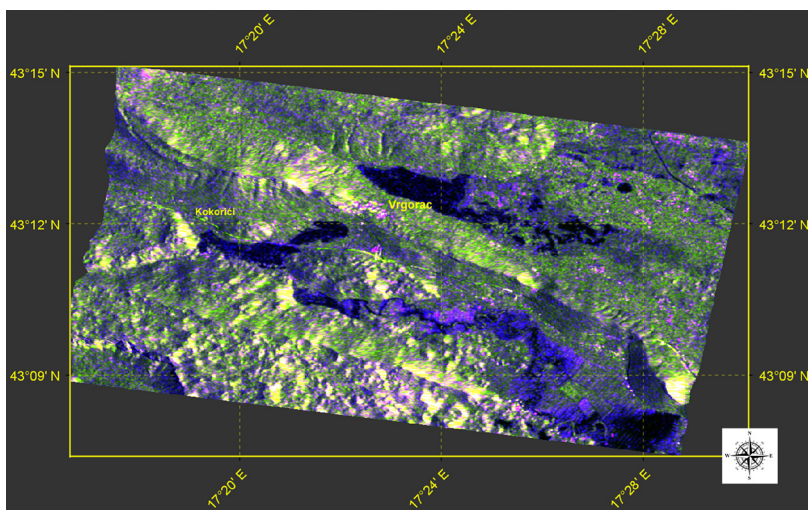
Na međurezultatu, na Slici 5, vodene površine ističu se kao tamna područja, na kojima je intenzitet piksela nizak. To je posljedica refleksije VV polariziranog vala koji se, prema izrazu (3), odbio od površine vode u stranu od radarskog senzora, zbog čega radarski prijamnik ne registrira značajan odraz.

Radarski kompozit

Za vizualnu interpretaciju radarske snimke možemo iskoristiti i VH komponentu koju sadrži GRD. Pri tome ćemo koristiti tri RGB kanala (Anusha i Bharathi, 2019):

- crveni za VV polarizaciju
- zeleni za VH polarizaciju
- plavi za omjer VV/VH.

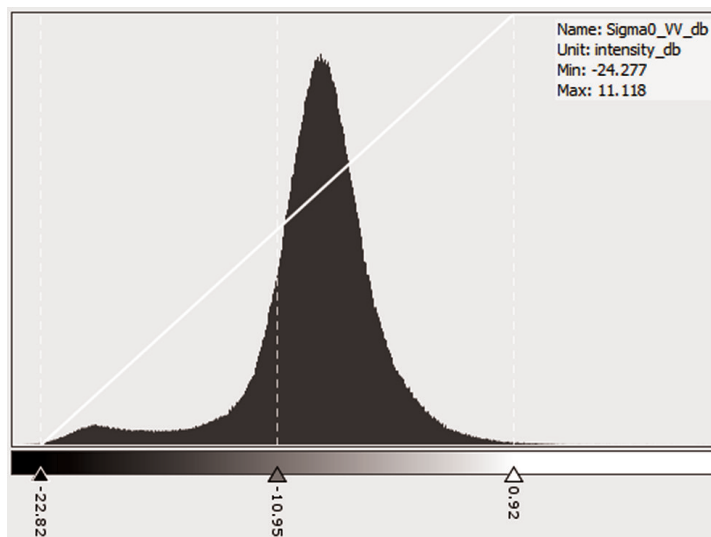
Na taj način dobit ćemo trokanalni kompozit (Slika 6) kod kojeg su radarski glatke površine prikazane kao crna područja (vodene površine), a one nešto manje glatke kao plava područja. Žuto i zeleno su radarski hrapave krške i šumovite podloge, dok su naselja, s jakim refleksijama od kutnih reflektora (npr. zgrada) ljubičasta. Ovaj se korak ne mora napraviti, no s obzirom na to da se ne radi o zahtjevnoj klasifikaciji snimke, brzo se dobiva i koristan je kod sljedećeg koraka segmentacije u kojem se, ponovo gotovo empiričkom metodom, izdvajaju vodene površine (Mason et al., 2021).



Slika 6. Trokanalni kompozit: RGB kompozit dobiven različitim polarizacijama SAR snimke omogućava detaljniju subjektivnu interpretaciju scene krškog terena; crno su vodene površine, plavo i tamnoljubičasto ravna polja, zeleno-žuto je krški teren, a svjetloljubičasto su jake refleksije od građevina u naseljima

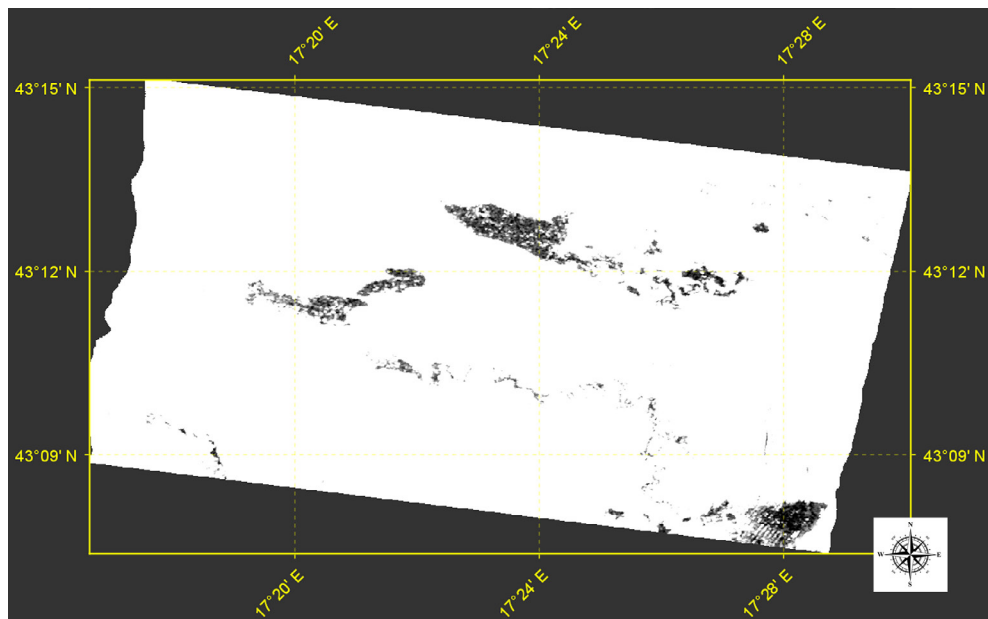
Izdvajanje vodenih površina

Izdvajanje vodenih površina sa Slike 5 provodi se temeljem histograma na kojem bi se trebala dobro uočavati bimodalna razdioba (dva maksimuma, kao na Slici 7) ako smo dobro izrezali područje od interesa. Prevelika područja od interesa u pravilu ostaju jednomodalna i tada je graničnu vrijednost VV polarizacije teško odrediti. U praksi s tim ne bi trebalo biti problema jer se vodene površine odmah uočavaju na VV polarizaciji. Histogram međurezultata prikazanog na Slici 5 ima upravo željenu bimodalnu razdiobu s tim da lijevi, manje izraženi mod, pripada razdiobi piksela s glatkih, vodenih površina, s kojih je radarski senzor primio najslabiji signal. Radi lakše interpretacije velikog raspona jakosti signala, on je preveden u decibelnu skalu. S područja na Slici 5 radar je primio signale u rasponu od -24.277 dB do 11.18 dB, no na Slici 5 prikazani su samo oni u rasponu od -22.82 dB do 0.92 dB, čime se postigao bolji kontrast slike jer su se ekstremno jaki i ekstremno slabi signali rijetko pojavljivali.



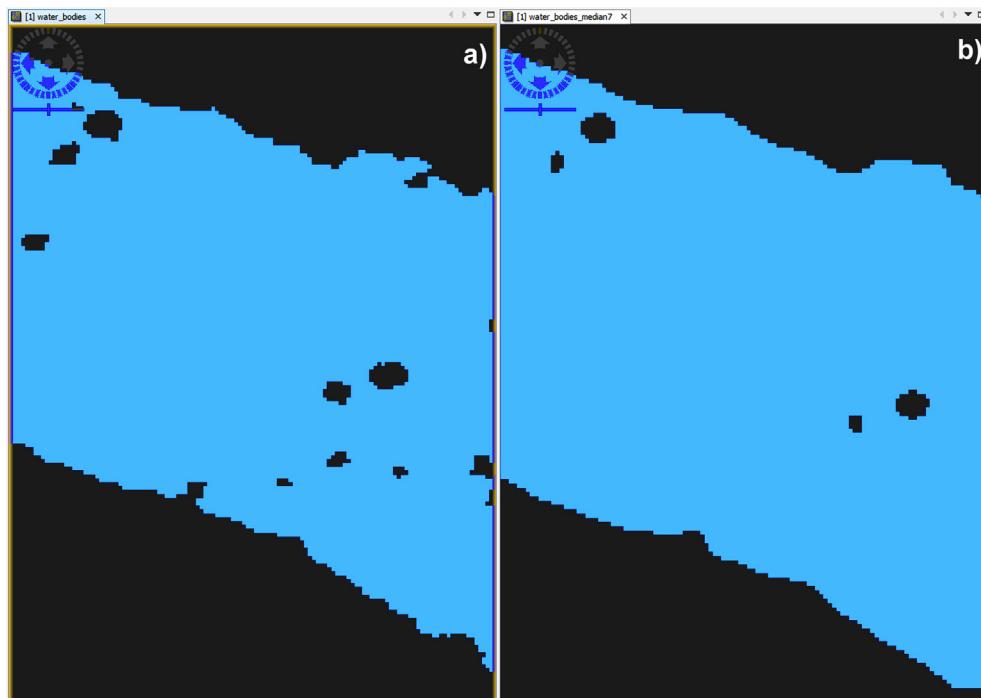
Slika 7. Bimodalna razdioba intenziteta: segmentiramo li prikaz jakosti primljenog signala na raspon od -22.67 dB do -16.78 dB (Slika 8), obuhvatit ćemo lijevi, manje izražen mod, što iz snimke izdvaja područja slabe VV refleksije karakteristične

za vodene površine



Slika 8. Segmentacija: segmentiranjem signala u rasponu od -22.67 dB do -16.78 dB izdvojen je samo lijevi, manje izražen mod razdiobe jakosti VV signala, čime su izdvojene detektirane vodene površine

Novi međurezultat je binarna slika detektiranih vodenih površina i onih koje to nisu. Sve površine na snimci koje nisu detektirane kao vodene, pretvaramo u transparentne i dobivamo rasterski sloj detektiranim vodenim površinama, koji možemo obojiti po želji, npr. plavo. Sljedeći korak nije nužan, ali pridonosi generalizaciji prikaza vodenih površina, posebno ako ćemo provoditi vektorizaciju vodenih površina (izvorna satelitska snimka je rasterska). U tom slučaju možemo primijeniti geometrijski niskopropustni filtar, na primjer medijanski filtar. Izbor filtra i veličine jezgre konvolucije određen je empirijski. U ovom se radu kao dobar pokazao medijanski filtar s jezgrom konvolucije 7×7 piksela, koji je rezultat učinio kompaktnijim (uklonjena su malena poplavljena područja, kao i malena suha područja unutar većih vodenih površina, Slika 9).



Slika 9. Generalizacija: primjenom niskopropustnog medijanskog filtra s jezgrom konvolucije 9 x 9 piksela na rezultat 9.a, uklonjena su manja kontrastna područja (sitna poplavljena i sitna suha unutar većih poplavljenih), čime je postignuta djelomična geografska generalizacija

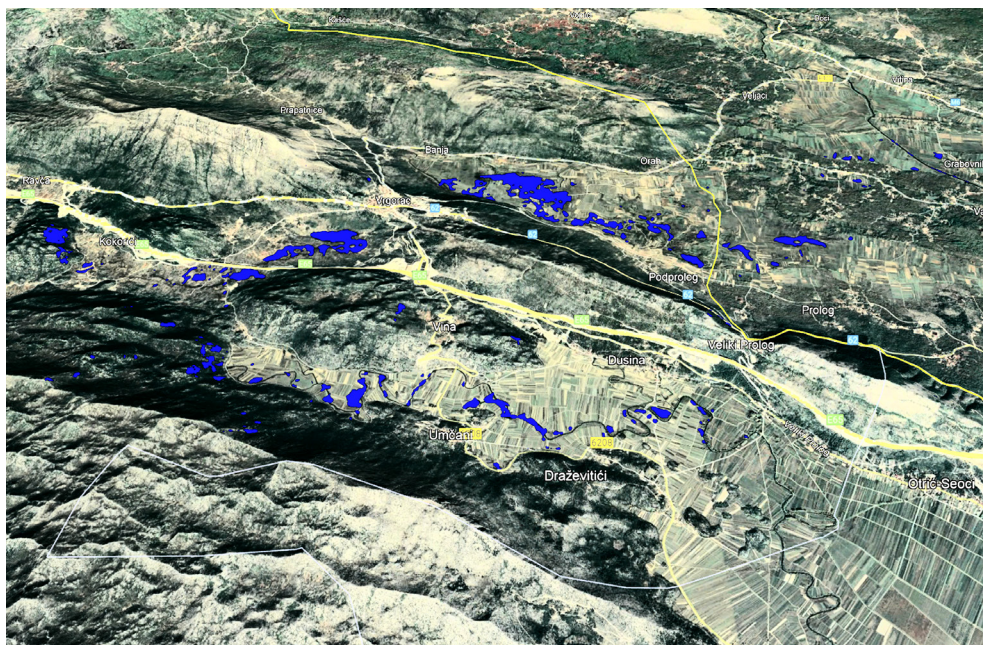
Konačni rezultat je georeferenciran i može se, kao tematski sloj, preklopiti preko standardne geografske podloge. U ovom radu rezultat je preveden u KML format (engl. *Keyhole Markup Language*) i preklopljen preko ortogonalne projekcije u alatu Google Maps (Slike 10, 11 i 12.).

Rezultati

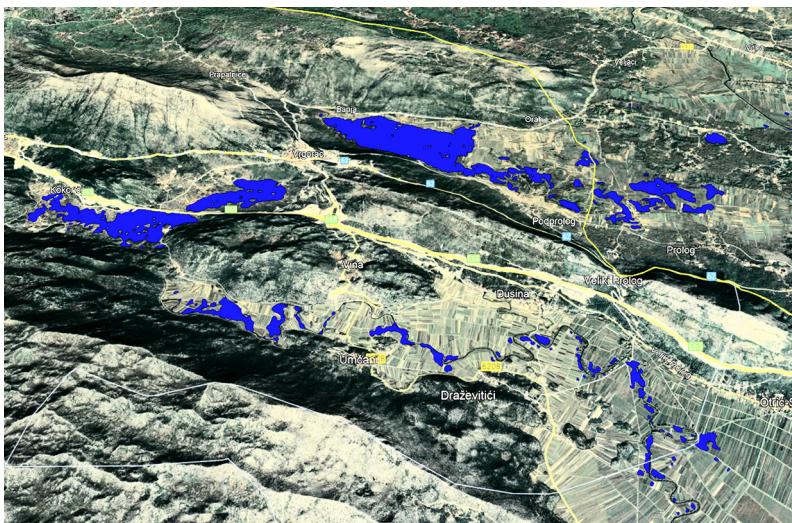
Razdoblje trajanja prirodne nepogode u vrgoračkom kraju praćeno je na četiri satelitske snimke, pri prolazima satelita Sentinel-1A:

- 30. listopada 2020. godine oko 04:50 GMT
- 6. prosinca 2020. godine oko 16:50 GMT
- 12. prosinca 2020. godine, oko 04:50 GMT
- 18. prosinca 2020. godine, oko 16:50 GMT.

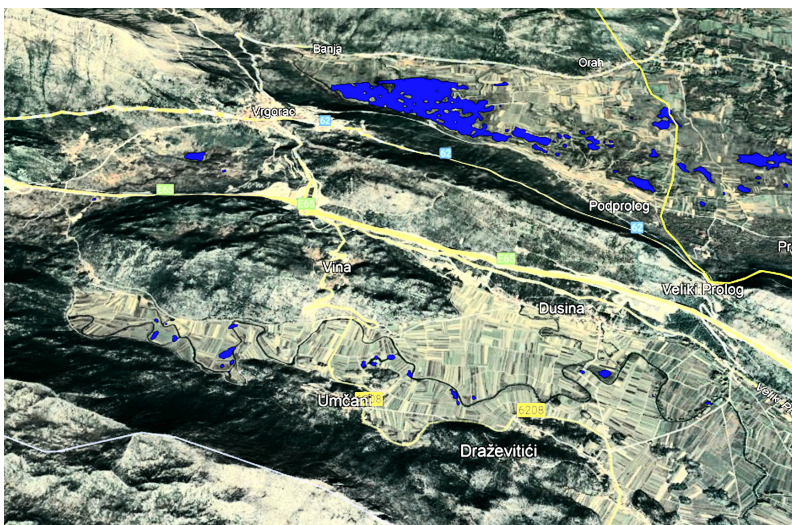
Na snimci od 30. listopada još nisu detektirane poplavljene površine, unatoč obilnim oborinama pa zbog toga ona nije prikazana u nastavku. Na toj snimci nema jezera i većih vodenih površina, a u slučaju kad bismo ih imali na nepoplavljenom području, morali bismo pratiti razliku između vodenih površina prije poplave i u vrijeme poplave.



Slika 10. Početak poplave: poplavljene površine detektirane na satelitskoj snimci Sentinel-1A na dan 6. prosinca 2020. godine, oko 17:50 po lokalnom vremenu – primjećuje se izlivanje vodotokova i postupno poplavljanje nizinskih područja



Slika 11. Vrhunac poplave: poplavljene površine detektirane na satelitskoj snimci Sentinel-1A na dan 12. prosinca 2020. godine, oko 05:50 po lokalnom vremenu, u vrijeme vrhunca poplave



Slika 12. Kraj poplave: poplavljene površine detektirane na satelitskoj snimci Sentinel-1A na dan 18. prosinca 2020. godine, oko 17:50 po lokalnom vremenu, u razdoblju kad se voda počela postupno povlačiti

Slike 10, 11 i 12 prikazuju razvoj situacije tijekom prirodne nepogode, poplave u vrgoračkom kraju u studenome i prosincu 2020. godine. One su izravno primjenjive za GEOINT potporu vojnim operacijama potpore u slučajevima prirodnih i tehničkih nepogoda. Iz njih je izravno moguće procijeniti ugroženost ljudi i imovine, procijeniti prohodnost terena i raspoloživost cestovnih komunikacija te odrediti zborništa ljudi i opreme tijekom trajanja operacije. One mogu poslužiti za brzu procjenu šteta i raščlambe nakon djelovanja.

Zaključak

Primjena slikovnog radara, konkretno SAR senzora na satelitskom paru Sentinel-1, u polarimetrijskom modu, za detekciju i praćenje poplavljenih površina ima niz prednosti. Sama metoda nije numerički zahtjevnija i brza je u primjeni. S operativne strane, prednost korištenja Copernicus resursa su otvorenost i mogućnost potpore od strane široke znanstveno-stručne zajednice. S druge strane, satelitski resursi Copernicus nude ograničene operativne sposobnosti zbog relativno slabe vremenske rezolucije, u ovom slučaju jednom u svakih šest dana. Tijekom prirodnih nepogoda, a posebno poplava, situacija na terenu brzo se mijenja pa je nužna informacija dobivena satelitskim daljinskim istraživanjima više puta dnevno. Komercijalni sateliti, poput COSMO SkyMed i Radarsat, skupi su i cijene njihovih snimki dostižu vrijednosti više tisuća eura. Na primjer, korištenje snimki sa satelita COSMO SkyMed, s vremenskom rezolucijom 6 sati, u rezoluciji ScanSAR 30 x 30 m, tijekom trajanja promatranog razdoblja prirodne nepogode u vrgoračkom kraju, iznosilo bi više od 138 000 eura (e-GEOS, 2017).

Metoda pragova detekcije prikazana u ovom radu optimalna je po brzini i zahtjevu za računalnim resursima (brzina procesora i memorijski prostor), a pokazala se dobrom čak i u jako razvijenoj krškoj orografiji, pri čemu su primijećeni izolirani lažni pozitivni na silaznom gradijentu terena, zbog refleksije u smjeru „od radara”. Implementaciju metode moguće je provesti neovisno o raspoloživoj aplikaciji za obradu satelitskih snimki, a u ovom je radu korišten program SeNtinel Applications Program, SNAP 8.0.7.

Segmentirane vodene površine moguće je koristiti kao ulazne parametre u hidrološke i modele prohodnosti terena, čime se u značajnoj mjeri objektivizira i automatizira postupak brze procjene utjecaja okoliša (REA, *Rapid Environment Assessment*) na planiranje i provedbu vojnih operacija.

Preporuke

U slučajevima velikih prirodnih i tehničkih katastrofa do kvalitetnih satelitskih snimki moguće je doći i bez plaćanja putem Povelje o svemiru i katastrofama (<https://disasterscharter.org>). Vodeće svemirske agencije, imajući na umu potrebu za raspolaganjem svim GEOINT informacijama, daju na raspolaganje satelitske snimke i GIS podloge pogođenih područja, no samo državnim institucijama koje su na nacionalnoj razini zadužene za krizna stanja. U vrijeme pisanja ovog rada, Republika Hrvatska još nije potpisala Povelju i odredila stručni tim za obradu i diseminaciju podataka primljenih putem Povelje. S obzirom na činjenicu da živimo u okruženju u kojem su prirodne i tehničke katastrofe sasvim izvjesne, nužno je da na nacionalnoj razini što prije pristupimo Povelji. Usporedno tome, bit će potrebno stvoriti nacionalni tim koji ima sposobnost preuzimanja i obrade satelitskih snimki dobivenih s različitih senzora i izradu tematskih podloga po vojnim standardima kvalitete i formata koji se mogu postojećim C2 kanalima dostaviti postrojbama na terenu koje će ih znati pravilno tumačiti i primijeniti. U tome veliku ulogu mogu imati upravo Copernicus resursi, koji su odličan resurs za školovanje i obuku ove vrste stručnjaka. Jedna ovakva inicijativa mogla bi se realizirati za manje od godine dana.

Literatura

Anusha, N., Bharathi, B. (2019) Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 23, DOI: 10.1016/j.ejrs.2019.01.001, 207-219

e-GEOS (2017) e-GEOS Price List, BDS-COM-17-002, 52 pp.

Moriera, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, P. (2013) A Tutorial on Synthetic Aperture Radar, *IEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, March 2013, DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301, 38 pp.

Mason, D. C., Dance, S. L., Cloke, H. L. (2021) Floodwater detection in urban areas using Sentinel-1 and WorldDEM data, *Journal of Applied Remote Sensing*, Jul-Sep 2021, Vol 15(3), DOI: 10.1117/1.JRS.15.032003, 22 pp.

Rubel, O., Lukin, V., Rubel, A., Egiazarian K. (2019) NN-Based Prediction of Sentinel-1 SAR Image Filtering Efficiency, DOI:10.3390/geosciences9070290, *Geosciences*, vol. 9, no. 7, 22 p.

Miranda, N. & Meadows, P. J. (2015) Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF, *ESA Technical Note SA-EOPG-CSCOP-TN-0002*, European Space Agency, 13 pp.

Veci, L. (2016) Sentinel-1 Toolbox - Polarimetric Tutorial, ESA & Array Systems Computing Inc., 29 pp

Viher, M., Žiža, I., Radun, B., Tomljenović, I., Čvrljak, M., Kušan, V., Vuković, V., Knežević, L. (2021) GEOINT in Natural and Technical Disasters, *Proceedings of 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering, 1CroCEE, Zagreb, Croatia - March 22nd to 24nd*, 397-403

Yamaguchi, Y. (2020) Polarimetric SAR Imaging, ISBN: 978-0-367-47831-5, Taylor & Francis Group, 350 pp.

Župan, R., Frangeš, S., Vinković, A. (2019a) Normalized water index for mapping a flood, *ISEM - The International Society for Ecological Modelling Global Conference 2019*, 1.-5.10.2019., Salzburg, Austrija

Župan, R., Frangeš, S., Vinković, A. (2019b) What Method to Use for Fast Mapping of Flooded Area?, *15th International conference Geoinformation and Cartography - Program and Abstracts*, Lapaine, M. (ed.). Zagreb: Croatian Cartographic Society, 2019. p. 39-39

Župan, R., Frangeš, S., Molak-Župan, Ž., Vinković, A. (2019c) Flood Analysis Using Sentinel Images and Mapping, *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019) - Abstract collection book / Ashton, A. – P. (ur.)*. Praha: IOP Publishing Ltd, 2019. p. 293-293

O autoru

Brigadir doc. dr. sc. Mladen Viher (mladen.viher@morh.hr) doktorirao je fiziku i geofiziku na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2011. godine. U vrijeme pisanja ovog rada pročelnik je sveučilišnog Odjela za tehnički razvoj i istraživanja u Centru za obrambene i strateške studije „Janko Bobetko” na Hrvatskom vojnom učilištu „Dr. Franjo Tuđman”. Od 2015. do 2020. bio je nacionalni predstavnik u NATO Science and Technology Organization panelu za senzore i elektroničke tehnologije, a od 2020. godine nacionalni je direktor za istraživanja i tehnologije u Direktoratu Europske obrambene agencije za istraživanja, tehnologije i inovacije (EDA-RTI). Bavi se istraživanjima u područjima daljinskih istraživanja, propagacije elektromagnetskih valova u atmosferi te primjene znanosti o podacima (*Data Science*) u upravljanju znanstvenim istraživanjima za potrebe obrane i sigurnosti.