

Analiza mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u popunjavanju nedostajućih podataka u operativnom sustavu hidroloških prognoza

Sarač, Mirza; Bekić, Damir; Gašparović, Mateo

Source / Izvornik: **7. simpozij doktorskog studija građevinarstva 2021. : zbornik radova, 2021, 81 - 93**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2021.02>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:716795>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Analiza mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u popunjavanju nedostajućih podataka u operativnom sustavu hidroloških prognoza

Mirza Sarač¹, izv.prof.dr.sc. Damir Bekić², doc.dr.sc. Mateo Gašparović³

¹ Međunarodna komisija za sliv rijeke Save, msarac@savacommission.org

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, damir.bekic@grad.hr

³ Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, mgasparovic@geof.unizg.hr

Sažetak

U hidrologiji postoji pravilo da podatak koji nije izmjeren neće ni moći biti izmjeren. Potreba za hidrometeorološkim podacima postoji, kako na hidrološki neizučeni slivovima, tako kod popunjavanja prekida u podacima, a što je izazovno područje istraživanja u hidrologiji. Podaci daljinskih istraživanja Sentinel, Landsat i drugih misija su prostorno-vremenski određeni i dostupni širom svijeta te se uz brojne druge primjene koriste kod hidroloških prognoza i za potrebe popunjavanja nepotpunih vremenskih nizova. U radu su prikazane opcije interpolacije nepotpunih vremenskih nizova u operativnom sustavu hidroloških prognoza za sliv rijeke Save korištenjem daljinskih istraživanja s osvrtnom na klasične statističke metode popunjavanja podataka.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, modeliranje, prognoziranje, nedostajući podaci, interpolacija, sliv rijeke Save

An analysis of the possible application of remote sensing for interpolation of missing data in the operational hydrological forecasting

Abstract

In hydrology, there is a rule that the data not currently recorded will never be recorded. The need for hydrometeorological data exists for the hydrologically ungauged basins as well as for the filling of gaps in timeseries, which is a challenging research area in hydrology. The remote sensing data from Sentinel, Landsat and other missions are spatially and temporally determined and have worldwide coverage, and can be used, among many other purposes for the flow forecast and the data gap filling. This paper presents the possibilities of gap fillings in timeseries in the operational hydrological forecasting system for the Sava River Basin by using remote sensing data with reference to classical statistical methods of data interpolation.

Key words: remote sensing, modelling, forecasting, missing data, interpolation, Sava River Basin

1 Uvod

Nepotpuna hidrološka mjerenja ograničavaju kvalitetu različitih studija koje zahtijevaju hidrološke podatke i provedbu operativnih kratkoročnih kao i dugoročnih hidroloških prognoza [1]. Podaci prikupljeni putem opažanja i mjerenja na hidrometeorološkim postajama se u postupku operativnog hidrološkog modeliranja sve više pokazuju kao nedovoljni zbog prostorne nejednolikosti hidroloških fenomena, vremenskog odmaka dobivanja podatka (za opažanja), kao i zbog prilagodbe modela prostorno distribuiranim ulaznim podacima. Nadalje, pojedini ulazni hidrometeorološki podaci, kao na primjer parametri topljenja snijega ili evapotranspiracije, vrlo često su nepoznati zato što ili nisu izmjereni ili su mjerenja nedostatna za predmetno područje. Osim toga, postoji i evidentna potreba za interpolacijom nedostajućih podataka kod vremenskih nizova hidrometeoroloških podataka zbog prestanka rada meteoroloških ili hidroloških postaja u određenom kraćem ili dužem razdoblju. Prekidu u mjerenjima na postajama se dešavaju uslijed različitih okolnosti, a koje onda utječu na funkcionalnost i pouzdanost cjelokupnog prognostičkog modela.

Problem nepotpunih hidroloških mjerenja prepoznat je i u okviru operativnog prognostičkog sustava u slivu rijeke Save. Naime, nedostaci u ulaznim podacima, zbog nepotpunih mjerenja ili nepostojanja ulaznih podataka (topljenje snijega, evapotranspiracija, volumen vode u akumulacijama) u značajnoj mjeri ograničavaju kvalitetnu simulaciju hidroloških procesa na slivu te time utječu na pouzdanost hidroloških prognoza. Dodatna je potreba za popunjavanjem nepotpunih podataka u dugoročnom prekidu mjerenja u razdoblju od 1991. godine, pa ponegdje sve do 2005. godine, u regiji sliva rijeke Save gdje gotovo uopće nije bilo sustavne provedbe hidroloških mjerenja.

Moguće primjene rezultata naprednih metoda daljinskih istraživanja u hidrologiji su brojne, naročito uzimajući u obzir neposredne posljedice nepostojećih i/ili nepotpunih hidroloških podataka, od koji se mogu izdvojiti:

- poboljšanje pouzdanosti operativnog hidrološkog modeliranja i prognoziranja;
- poboljšanje praćenja hidroloških pojava i s njima povezanih prirodnih procesa;
- poboljšanje definiranja statističkih pokazatelja hidroloških veličina;
- poboljšanje definiranja vjerojatnosti pojave različitih hidrometeoroloških varijabli;
- poboljšanje analiza trendova vremenskih nizova hidroloških veličina, itd.

U ovom radu daje se pregled postojećih pristupa i metoda u hidrološkoj praksi za popunjavanje nedostajućih vremenskih nizova hidroloških veličina s naglaskom na primjenu podataka iz daljinskih istraživanja. Prikazana je mogućnost primjene raspoloživih produkata misija Sentinel -1 -2 i -3 [2], Landsat [3], AVHRR (eng. *Advanced Very High Resolution Radiometer*) [4], MODIS (eng. *Moderate Resolution*

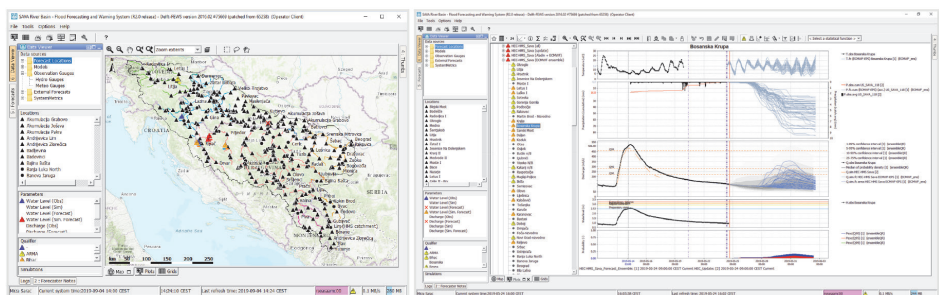
Imaging Spectroradiometer) [5], AMSR-E (eng. *Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System*) [6], DMSP (eng. *Defense Meteorological Satellite Program*) [7] i drugih. Veliki potencijal primjene podataka daljinskih istraživanja je evidentan, kako za kalibriranje hidroloških modela tako i za operativno hidrološko prognoziranje kao i za popunjavanje nedostajućih vremenskih nizova na slivovima bez terenskih mjerenja ili s nedostatnom mrežom mjernih postaja.

2 Operativni hidrološki prognostički sustav za sliv rijeke Save i daljinska istraživanja

Hidrološki prognostički sustav za sliv rijeke Save – Sava FFWS (eng. *Flood Forecasting and Warning System*), uspostavljen je 2018. godine i zasnovan je na Delft-FEWS softverskoj platformi [8]. Delft-FEWS platforma primijenjena je za sustave hidroloških prognoza na brojnim slivovima, ali uglavnom u okviru jedne države.

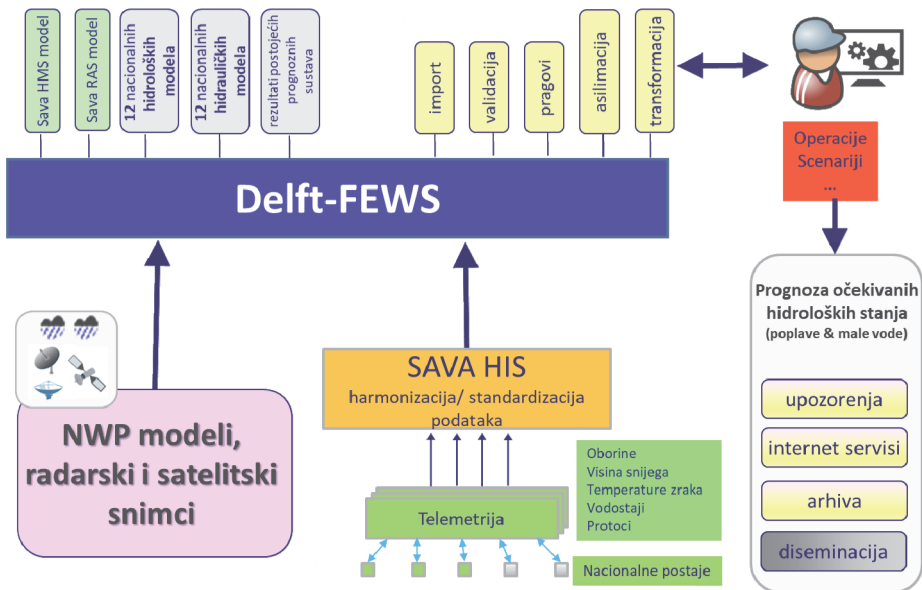
Sava FFWS implementiran je kao otvorena struktura za upravljanje podacima i prognozama uz integraciju različitih podataka i modela iz pet savskih zemalja, a uključuje sljedeće međusobno povezane ulazne komponente:

- izmjerene hidrološke i meteorološke podatke u stvarnom vremenu - Hidrološki informacijski sustav sliva rijeke Save (Sava HIS),
- razne numeričke meteorološke prognostičke produkte,
- dostupne vremenske radarske i satelitske snimke,
- izlaze i rezultate postojećih nacionalnih prognostičkih sustava,
- različite meteorološke, hidrološke i hidrauličke modele.



Slika 1. Prikaz klijentske aplikacije Sava FFWS sustava

Na slici 2. prikazana je struktura Sava FFWS sustava koji u najvećoj mogućoj mjeri koristi postojeću infrastrukturu i modele.



Slika 2. Shema strukture Sava FFWS sustava

2.1 Numerički meteorološki prognostički produkti

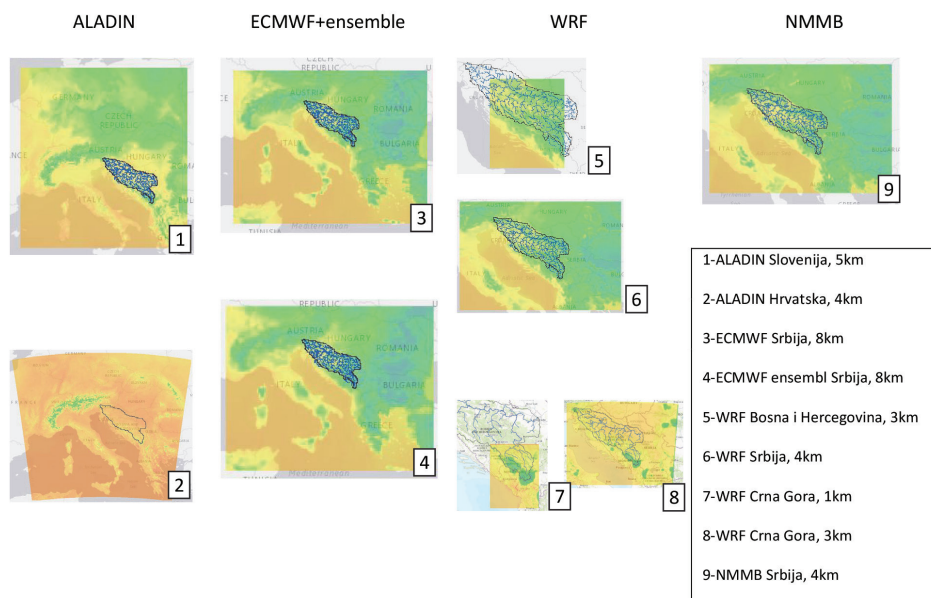
Za hidrološke prognoze u Sava FFWS sustavu osnovni izvor podataka o meteorološkoj prognozi su produkti numeričkih vremenskih modela - NWP (eng. *Numerical Weather Prediction*). NWP su rezultati matematičkih modela koji daju vremenske prognoze na osnovi trenutačnih atmosferskih uvjeta, a u hidrološkim operativnim modelima kao ulazi koriste se prognoze oborina i temperature zraka. Tijekom posljednjih godina podaci daljinskih istraživanja postupno postaju dodatni izvor informacija za prilagodbu NWP modela. To je omogućeno zahvaljujući značajnom poboljšanju uređaja za daljinsko mjerenje različitih atmosferskih veličina, ali u velikoj mjeri i poboljšanjima u tehnikama asimilacije podataka. Prednost satelitskih podataka je u tome što pružaju ujednačenu prostornu i vremensku pokrivenost atmosfere. Međutim, tu prednost sadržaju podataka prati uglavnom nedovoljna vertikalna rezolucija uređaja koji se trenutačno koriste i poteškoće s oblacima, oborinama i površinskim zaprekama, pa su zbog toga NWP produkti i dalje u najvećoj mjeri oslonjeni na matematičku komponentu modela [1].

U okviru Sava FFWS koristi se devet NWP produkata kao ulazni podaci (slika 3), a rezultat su slijedećih regionalnih i globalnih modela:

- model za dinamičku prilagodbu ograničenog područja, ALADIN [9],
- model Europskog centra za srednjoročne prognoze i skupnu, ensembl prognozu, ECMWF [10],

- model istraživanja i prognoziranja vremena, WRF [11],
- više srazmjerni nehidrostatski model, NMMB [12].

Dostupni NWP produkti omogućuju korisnicima pregled i daljnje korištenje rezultata vremenskih prognoza o oborinama i temperaturi zraka za nekoliko (3, 5, 7, 9) dana unaprijed kao ulaznih podataka za hidrološki model.

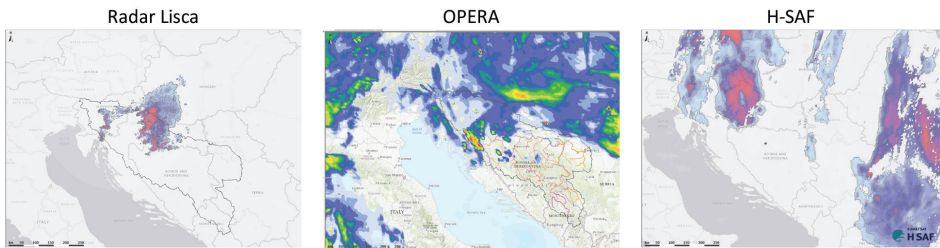


Slika 3. NWP produkti u slivu rijeke Save, raspoloživi i integrirani u Sava FFWS (s naznačenom prostornom rezolucijom)

2.2 Satelitski i radarski snimci

Uz NWP produkte, Sava FFWS je pripremljen i za ekstrapolaciju radarskih ili satelitskih snimaka oborina radi osiguranja vrlo precizne kratkoročne hidrološke prognoze za do 2 sata unaprijed, odnosno za nekoliko sati unaprijed na osnovi izmjerenih vrijednosti (eng. *nowcasting*). Trenutačno ipak ne postoje dostupni produkti za ovu vrstu prognoze u slivu rijeke Save, a prvi korak je dostupnost detaljnih radarskih snimaka oborina korigiranih s izmjerenim podacima na kišomjernim postajama. U Sava FFWS integrirani su samo podaci s radara Lisca Agencije za okolje Republike Slovenije, ARSO [13]. Uzimajući u obzir važnost osiguranja detaljne kratkoročne hidrološke prognoze i podizanja svijesti stručnjaka i na ovaj ulazni podatak, tijekom uspostave, u Sava FFWS su integrirane kompozitne OPERA radarske snimke Europskog udruženja nacionalnih meteoroloških i hidroloških službi, EUMETNET [14] kao

i H-SAF satelitske snimke Europske organizacije za korištenje meteoroloških satelita, EUMETSAT [15].



Slika 4. Raspoložive radarske i satelitske snimke u slivu rijeke Save integrirane u Sava FFWS

Ovi podaci se trenutačno unutar sustava koriste samo za prikaz i vizualnu usporedbu s NWP produktima i nisu povezani s hidrološkim modelima.

Uzimajući u obzir sve potencijale daljinskih istraživanja i činjenicu da se primjena njihovih podataka pokazala mnogo točnijom od regularnih NWP podataka kod kratkoročnih prognoza, integracija produkata daljinskih istraživanja u Sava FFWS je neminovna. U budućim istraživanjima dat će se prijedlog produkata za redovno korištenje u prognozama i za popunjavanje nedostajućih podataka u hidrološkom modeliranju.

2.3 Simulacijski modeli

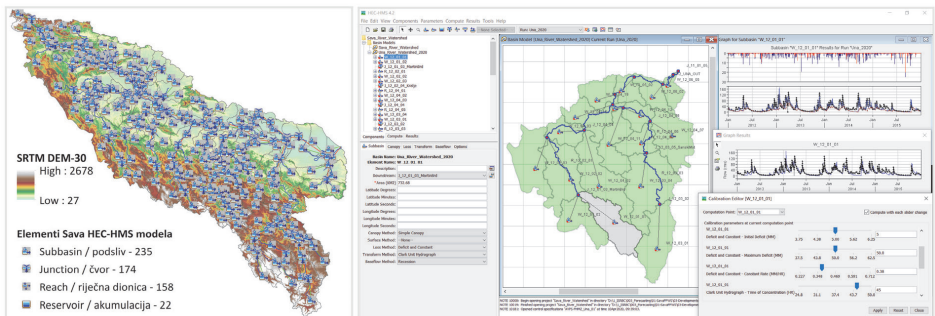
U Sava FFWS-u je trenutačno integrirano 13 hidroloških modela od kojih pojedini modeli uključuju i hidrauličku komponentu te dodatnih 13 zasebnih hidrauličkih modela. Neki modeli pokrivaju relativno velika slivna područja, dok drugi samo lokalne riječne slivove odnosno riječne dionice, a razvijeni su korištenjem različitih alata (HEC, DHI, Wflow, HBV). HEC-HMS (eng. *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) [16] hidrološki model za sliv rijeke Save jedini pokriva cjelokupni sliv rijeke Save i okosnica je Sava FFWS sustava te će se koristiti za ispitivanje primjenjivosti popunjavanja nedostajućih podataka putem daljinskih istraživanja.

2.3.1 Sava HEC-HMS hidrološki model

HEC-HMS model za simulaciju hidroloških procesa na slivu rijeke Save (Sava HEC-HMS) razvijen je pomoću USACE (eng. *United States Army Corps of Engineers*) standardnih alata HEC-HMS, HEC-GeoHMS, i HEC-DSSVue. Sava HEC-HMS model razvijen je kao skup 21-nog podmodela neposrednih slivovova glavnog toka rijeke Save, a koji su sastavljeni u jedan cjelovit model (slika 5). U okviru Sava HEC-HMS modela koriste se sljedeći pristupi kod simulacije hidroloških procesa [16]:

- efektivne oborine,
- transformacija efektivnih oborina u direktno otjecanje,
- bazno otjecanje,
- propagacija vodnog vala duž korita vodotoka.

Početna kalibracija modela bila je zasnovana na izmjenjenim poplavnim događajima u razdoblju 2009.-2015. Korišteni su kratki kalibracijski periodi, uglavnom zimi i karakteriziraju ih uvjeti prosječnih do velikih voda, dok periodi malih voda nisu bili uključeni. Nakon integracije hidrološkog modela u operativni Sava FFWS sustav, model je ponovno kalibriran na duge vremenske nizove u razdoblju 2010.-2018. Upravo kroz ponovljenu kalibraciju modela utvrđene su određene manjkavosti vezane na nedostupnost pojedinih ulaznih parametara, a ističu se utjecaj topljenja snijega i evapotranspiracije, kao i volumen vode u velikim akumulacijama.



Slika 5. Struktura cjelovitog Sava HEC-HMS modela i prikaz elemenata kalibracije jednog od podmodela u HEC-HMS

Budući da model simulira hidrološke procese kroz dvije komponente: (1) meteorološki model i (2) model otjecanja sliva, ovdje će se prikazati mogućnosti primjene daljinskih istraživanja u ova dva osnovna elementa.

Numerički meteorološki produkti unutar Sava FFWS sustava daju satne prognoze oborina i temperatura zraka na slivovima. U okviru Sava HEC-HMS modela izračun prosječnih meteoroloških veličina na slivu provodi se metodom inverznih udaljenosti za oborine, a metodom temperaturnog indeksa za topljenje snijega. Za evapotranspiraciju koristi se prosječna mjesečna potencijalna evapotranspiracija. Uzimajući u obzir nedostatne podatke o topljenju snijega, bitno je istaknuti da su za metodu temperaturnog indeksa korištene početne vrijednosti vodnog ekvivalenta snijega - SWE (eng. *Snow Water Equivalent*). Utvrđivanje SWE je važan parametar za određivanje volumena otjecanja od snijega. Za Sava HEC-HMS model, SWE je

izračunan na osnovi dnevnog globalnog SWE grida AMSR-E/Aqua Level 3, prostorne rezolucije 25 km [17], uz pridruživanje početnih SWE vrijednosti za tri visinska dijapazona unutar svakog podsliva po kalibracijskim događajima. Granice visinskih dijapazona, koji su definirani za potrebe izračunavanja razlika u padanju snijega i snježnog sloja preko raspona nadmorskih visina za svaki podsliv, postavljene su pomoću SRTM DEM-30. Zbog niske rezolucije SWE grida, točnost je dosta neizvjesna, međutim satelitski SWE grid tijekom razvoja Sava HEC-HMS modela bio je najbolji dostupan podatak.

Hidrološki model otjecanja u Sava FFWS sustavu (Sava HEC-HMS) simulira otjecanje sa slivova i transformaciju vodnih valova u vodotocima te uključuje i 22 velike akumulacije. Iako HEC-HMS model omogućava upotrebu različitih metoda kod hidroloških procesa, za Sava HEC-HMS su odabrane metode u skladu sa specifičnim karakteristikama sliva (vrsta terena, urbanizacija i drugo), ali i prema dostupnosti potrebnih podataka. Za model efektivnih oborina primijenjene su: metoda konstantnih gubitaka i pojednostavljena metoda intercepcije; za model direktnog otjecanja: Clark metoda jediničnog hidrograma; za model baznog otjecanja: metoda recesije; za model propagacije duž toka: Muskingum-Cunge metoda. Za izračun fizikalnih parametara sliva (delineacija podslivova, dužina riječnih tokova, vrijeme koncentracije, parametri jediničnog hidrograma) korišten je SRTM (eng. *Shuttle Range Topography Mission*) digitalni model visina 30-metarske rezolucije (DEM-30).

Trenutačno najveći nedostatak Sava HEC-HMS modela se upravo odnosi na meteorološku komponentu, točnije ulazne podatke o oborinama, topljenju snijega i evapotranspiraciji, a iz razloga nedovoljnog broja meteoroloških postaja, odnosno vrlo skromnih mjerenja i nepostojanja podataka o topljenju snijega i evapotranspiraciji.

3 pristupi u popunjavanju nedostajućih podataka

Popunjavanje nedostajućih podataka je složena aktivnost u hidrološkoj praksi i može se rješavati na više načina i metoda. Često se formiraju zavisnosti veličina između postaja s nedostajućim podacima i reprezentativnih (mjerodavnih) postaja na kojima podaci postoje, a primjenom višestrukih linearnih i nelinearnih korelacijskih i regresijskih zavisnosti te primjenom metoda interpolacije putem stohastički linearnih skalarnih i vektorskih modela, npr. autoregresije pomičnog prosjeka – ARMA (eng. *AutoRegressive Moving Average*), kao i asimilacijom vremenskih nizova primjenom dostupnih metoda, npr. Kalman filter ensembla - EnKF (eng. *Ensemble Kalman Filtering*). Zavisnosti se definiraju za dovoljno duga razdoblja za koja podaci postoje na obje postaje, a kasnije se te zavisnosti koriste za popunu nedostajućih vremenskih nizova. U okviru realizacije ovakvih metoda nužno je definirati reprezentativne (mjerodavne) mjerne postaje (meteorološke i hidrološke), uključujući

sve potrebne kriterije (postojanost i raspoloživost podataka za promatrani period). Ova aktivnost uključuje i prikupljanje svih raspoloživih vremenskih nizova podataka za definirane mjerodavne mjerne postaje, kao i drugih važnih podataka i informacija. Navedeni kriteriji, tijekom realizacije, mogu biti uz odgovarajuću argumentaciju prilagođeni shodno raspoloživosti mjerodavnih postaja i podataka. Međutim, ako se za razmatrano područje i postaje, za koje je nužno izvršiti popunjavanje nedostajućih podataka, nema dovoljno raspoloživih podataka, problem se vraća na početak. Upravo iz tog razloga se u okviru cjelovitog istraživanja planira razmatranje mogućnosti korištenja raspoloživih produkata daljinskih istraživanja kao izvora podatka koji bi bili osnova za popunjavanje nedostajućih informacija u hidrološkom modelu za sliv rijeke Save, uključujući specifične parametre i vremenske nizove. Svakako će jedan od pristupa biti korištenje ensembela raznovrsnih izvora podataka daljinskih istraživanja kroz statistički pristup ažuriranja pojedinog člana ensembela radi analize raspona povjerenja primjene, npr. ARMA modela. Raspon povjerenja bit će analiziran primjenom algoritma kvantilne regresije za procjenu hidrološke nepouzdanosti koja će biti temeljena na analizama povijesnih simulacija u kojima će se generirati nedostajući podaci primjenom „savršenih“ graničnih uvjeta. Na ovaj način će se simulirati procjena ukupne nepouzdanosti koja obuhvaća i meteorološku i hidrološku nepouzdanost. U ovom postupku Sava HEC-HMS model bit će korišten za analizu raspodjele vjerojatnosti hidrološke nepouzdanosti korištenja svakog pojedinačnog člana ensembela podataka daljinskih istraživanja. Detaljan opis ovog postupka, kao jednog od mogućih, opisan je u radu Verkade i dr. [17].

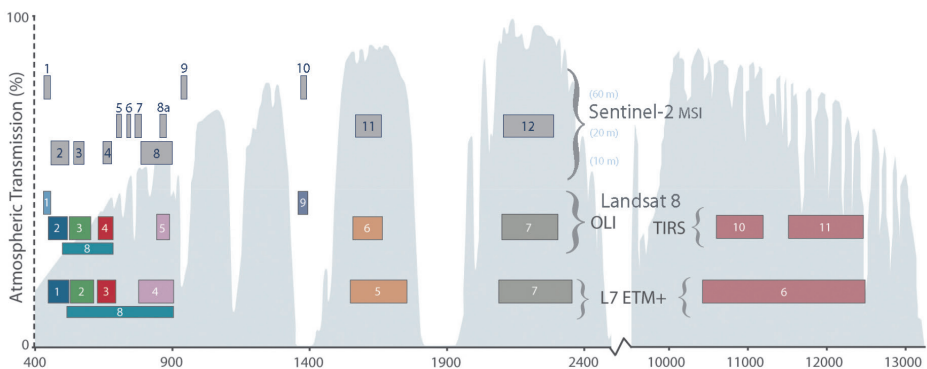
4 Raspoloživa i relevantna daljinska istraživanja pogodna u hidrološkom modeliranju

Jedan od zasigurno najznačajnijih mogućih izvora za popunjavanje nedostajućih podataka u hidrološkom modeliranju su podaci koji su na raspolaganju kroz satelitske misije, npr. projekta Copernicus Europske svemirske agencije – ESA, zatim više različitih projekata Američke nacionalne uprave za zrakoplovstvo i svemir – NASA, Američke nacionalne oceanografske i atmosfere službe / Nacionalnog centra za informacije o okolišu – NOAA i drugih [1]. Prikupljeni podaci, pokrivenost misija i velika učestalost ponovnih snimanja omogućuju generiranje velike količine geoinformacija na lokalnoj, regionalnoj, nacionalnoj i međunarodnoj razini, a od kojih je većina potpuno besplatna. Podaci su dizajnirani tako da ih modificiraju i prilagođavaju korisnici zainteresirani za tematska područja kao što su: prostorno planiranje; agrookoliš; sektor voda; šuma i vegetacije; kopneni ugljik, praćenje prirodnih resursa; globalni nadzor usjeva [2].

Sentinel-1 satelit, kao prvi u seriji ESA-e, lansiran je u orbitu u travnju 2014. godine, a sada pruža operativne radarske snimke za brojne primjene. Sentinel-1 SAR (*eng.*

Synthetic Aperture Radar), signal je radara sa sintetičkim otvorom antene tako da prolazi kroz oblake i može dati prilično dobru procjenu terena, dok vodena tijela ne odražavaju takav signal (ili vrlo malo). Često se koristi za odvajanje poplavnog područja ili čak za praćenje nadmorske visine, ali to zahtijeva više prolazaka i napredne tehničke obrade podataka satelitskih snimaka kako bi se u osnovi dobila točna procjena [2]. U lipnju 2015. slijedio je Sentinel-2 koji koristi multispektralni optički snimač visoke rezolucije s 13 spektralnih opsega i nudi novu perspektivu zemlje i vegetacije. Sentinel-2 MSI (*eng. Multispectral Instrument*) ima 13 spektralnih opsega signala u rasponu od infracrvenog do graničnog UV-a, a također pruža vidljivi (RGB) spektralni opseg ili područje. Neki opsezi su vrlo korisni za oblake i vodenu paru. Od ukupnog broja spektralnih opsega, četiri su na 10 metara prostorne rezolucije, šest na 30 metara i tri na 60 metara. Podaci Sentinel misija se kroz Copernicus program prerađuju u skup produkata biofizičkih varijabli koje opisuju stanje i razvoj vegetacije, energetske proračun, vodni ciklus i kriosferu na kopnu na globalnoj razini, uključujući i elemente za pripremu podataka o ekvivalentu vode u snijegu, evapotranspiraciji i promjenama u volumenu velikih akumulacija [2].

Landsat misija NASA-e je također vrlo koristan izvor za utvrđeni problem, a u usporedbi sa Sentinel misijom, točnije Sentinel-2 MSI, može se reći da ima vrlo slične karakteristike, s time da Landsat 8 posjeduje i termalne kanale termalnog infracrvenog senzora pogodne za mjerenje temperature tla i objekata na zemlji [3]. Specifični položaj opsega Sentinel-2 MSI, u usporedbi s Landsat 7 i 8, može se vidjeti na slici 6.



Slika 6. Usporedba opsega signala Sentinel-2 MSI s Landsat 7 i 8 u odnosu na valnu duljinu (izvor: USGS)

Glavni vidljivi i bliski infracrveni opsezi Sentinel-2 MSI imaju prostornu rezoluciju od 10 metara, dok njegovi "crveni rubovi" (crveni i bliski infracrveni opsezi) i dva kratkovalna infracrvena opsega imaju prostornu rezoluciju od 20 metara. Obalni/aerosolni, vodena para i cirrusni opsezi imaju prostornu rezoluciju od 60 metara. Produkti Landsat 8 imaju sličnu geometrijsku točnost kao Sentinel-2, a uzimajući u

obzir da je Landsat misija i nešto starija od Sentinela, ne bi trebalo biti puno informacija koje Sentinel ne može pružiti [19].

Iako mu je primarni cilj skeniranje površine oceana i kopna kako bi se prikupile informacije povezane s biološkim procesima, Sentinel-3 OLCI (eng. *Ocean and Land Colour Imager*) pruža 22 spektralna kanala uključujući mnogo informacija o atmosferi, a fokusira se na površinske temperature i pokrivač tla i ima dnevno vrijeme ponovnog snimanja ili čak i više. Ovisno o određenom produktu, ocijenjen je kao još jedan izvor koji bi mogao biti vrlo koristan za popunjavanje nedostajućih podataka u okviru hidrološkog modeliranja [2].

Uz Sentinel i Landsat produkte značajan potencijal je prepoznat i kod snimaka naprednog radiometra vrlo visoke rezolucije – AVHRR, a koji se mogu koristiti za klasifikaciju naoblake (za raspodjelu oborina unutar sliva) i razmjere snijega (za ažuriranje internog mehanizma modela). Indeksi vegetacije izvedeni iz podataka AVHRR pomažu u procjeni isparavanja i transpiracije iz svake vrste pokrivača. Protuvrijednost volumena vode nastale od snijega može se izračunati i korištenjem pasivnih mikrovalnih podataka satelita DMSP. Također podaci spektrometra za snimanje umjerene rezolucije – MODIS kao i pasivnih mikrovalnih istraživanja – AMSR-E, a koji kod uspostave Sava HEC-HMS modela zasigurno su već upotrijebljeni izvori koji će biti uzeti u obzir kod cjelovitog istraživanja, uključujući i nove tehnologije istraživanja u nastajanju, npr. bespilotni zrakoplovni sustavi – dronovi koji koriste globalne navigacijske satelitske sustave – GNSS (eng. *Global Navigation Satellite System*) s interferometrijskom reflektometrijom i sl. [19].

5 Zaključak

Rezultati ovog rada pokazuju da korištenje podataka daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju mogu poslužiti u rješavanju hidroloških problema u riječnom slivu vezanih za nedostatak podataka nužnih za provedbu pouzdanih hidroloških simulacija i prognoza. Budući da napredne metode daljinskih istraživanja putem satelitskih, radarskih kao i drugih sofisticiranih tehnologija u nastajanju, u novije vrijeme dostižu vrlo zavidne rezultate u pogledu pouzdanosti s visokom prostornom i vremenskom rezolucijom, sve je veća tendencija korištenja njihovih produkata, posebice podataka otvorenog pristupa. Trenutačna uporaba podataka daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju, a naročito u slivu rijeke Save, još je uvijek na dosta niskoj razini. Razlozi su vezani za više različitih problema, kao što je nedostatak odgovarajuće obuke o primjeni ovih produkata, ali je jedan od glavnih razloga taj što postoji samo nekoliko univerzalno primjenjivih operativnih metoda za preuzimanje i pripremu hidroloških parametara iz kompleksnih podataka daljinskih istraživanja. U radu je prikazan dio mogućnosti produkata daljinskih istraživanja koja raspoložu velikom količinom podataka, a za koja se još uvijek pronalaze odgovarajuće tehni-

ke za njihovu primjenu u hidrološkom modeliranju. Za hidrološki model sliva rijeke Save uočena je potreba korištenja podataka daljinskog istraživanja, posebice vodeni ekvivalent snijega, evapotranspiracije i promjene volumena vode u velikim akumulacijama. Algoritmi i procedure za uporabu navedena tri ulaza iz daljinskih istraživanja u hidrološkom modeliranju još uvijek su ograničeni na određena područjima na koja se mogu primijeniti. Radari sa sintetičkim otvorom antene multispektralni optički snimači visoke rezolucije, kao i pasivni mikrovalni podaci koriste se rutinski za procjenu vodnog ekvivalenta snijega, ali su algoritmi trenutačno ograničeni na određene regije i pokrov zemlje. Poznavanje evapotranspiracije i promjena volumena vode u velikim akumulacijama također je od važnosti za Sava HEC-HMS model, ali postojeći algoritmi za dobivanje ovih podataka iz daljinskog istraživanja često su pojednostavljeni i primjenjuju se samo na određena područja.

Potreba za razvojem algoritama za pripremu podataka daljinskih istraživanja za operativne hidrološke modele svakako postoji. Takvo cjelovito istraživanje trebalo bi dovesti i do razrade metode popunjavanja nepostojećih i/ili nepotpunih hidroloških podataka vremenskih nizova.

Literatura

- [1] Kite G.W., Pietroniro A. (1996), Remote sensing applications in hydrological modelling, *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, 41(4), pages 563-591
- [2] Sentinel, Europska svemirska agencija – ESA, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>.
- [3] Landsat, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [4] AVHRR, Napredni radiometar vrlo visoke rezolucije, Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm.
- [5] MODIS, Spektroradiometar za snimanje umjerene rezolucije, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- [6] AMSR-E, Napredni radiometar za mikrovalno skeniranje, Američka nacionalna uprava za zrakoplovstvo i svemir – NASA, <https://aqua.nasa.gov/amr-e>.
- [7] DMSP, Meteorološki satelit progama odbrane Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>.
- [8] Delft-FEWS, Deltares, <https://www.deltares.nl/en/software/flood-forecasting-system-delft-fews-2/>

- [9] ALADIN (eng. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational), Model za dinamičku prilagodbu ograničenog područja, <http://www.umr-cnrm.fr>
- [10] ECMWF (eng. European Center for Medium range Weather Forecasting), Model Europskog centra za srednjoročne prognoze i skupnu, ensembl prognozu, <https://www.ecmwf.int/>
- [11] WRF (eng, the Weather Research and Forecasting model), Model istraživanja i prognoziranja vremena, <https://www.mmm.ucar.edu/>
- [12] NMMB (eng. Nonhydrostatic Mesoscale Model on B-grid), Više srazmjerni nehidrostatski model, Američka nacionalna oceanografska i atmosferska služba / Nacionalni centar za informacije o okolišu – NOAA, <https://nomads.ncep.noaa.gov>
- [13] Lisca, Radar Agencije za okolje Republike Slovenije – ARSO, <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/weather/observ/radar/>
- [14] OPERA, Radarski program Europskog udruženja nacionalnih meteoroloških i hidroloških službi – EUMETNET, <https://www.eumetnet.eu/>
- [15] H-SAF, Satelitska aplikacija za podršku operativnoj hidrologiji i gospodarenju vodama Europske organizacije za korištenje meteoroloških satelita – EUMETSAT, <https://www.eumetsat.int/h-saf>
- [16] Feldman A. (2000), Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. Dostupno na: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs>
- [17] Tedesco M., Kelly R., Foster J.L., Chang A. T.C. (2004). AMSR-E/Aqua Daily L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids. Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Dostupno na: https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_DYSNO.002
- [18] Verkade J.S., Brown J.D, Davids F, Reggiani P, Weerts A.H (2017), Estimating predictive hydrological uncertainty by dressing deterministic and ensemble forecasts; a comparison, with application to Meuse and Rhine, *Journal of Hydrology*, Volume 555, pages 257-277. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.024>
- [19] Sentinel Hub, Sinergise Laboratory for geographical information systems, Ltd., <https://www.sentinel-hub.com/>