

## 2. Monitoring i kartiranje plavljenja unutrašnjim vodama sa velikom tačnošću

---

Zalán Tobak; Boudewijn van Leeuwen; Ferenc Kovács; József Szatmári

### Uvod

U periodima sa mnogo padavina na područjima bez površinskog oticanja vode koja se pritom nedovoljno infiltrira ili gubi kroz proces evapotranspiracije, odnosno gde ona dotiče putem podzemnih voda sa viših delova terena, pojavljuju se plitko plavljene površine. To su periodične suvišne unutrašnje vode (inland excess water) koje predstavljaju izvor ozbiljnih privrednih, ekoloških i socijalnih problema u nižim delovima Karpatskog basena.

Kartiranje plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama je veoma važno sa 3 aspekta: (1) pomaže u razumevanju veze između faktora koji doprinose u nastajanju suvišnih unutrašnjih voda, (2) poznavanje mesta i veličine plavljenja omogućavaju preduzimanje operativnih aktivnosti na odvodnjavanju kojima se sprečavaju dalje štete, i (3) može se predvideti lokacija, mera i obim budućih poplava od suvišnih unutrašnjih voda, što može biti od pomoći u preventivnim aktivnostima (Szatmári i van Leeuwen, 2013).

Za kartiranje i monitoring suvišnih unutrašnjih voda primenjuju se 4 generalna metoda: (1) snimanje na terenu zahteva mnogo vremena, opterećeno je greškama, skupo je, a dobijene karte su često netačne. (2) Integrisanjem faktora koji utiču na nastanak suvišnih unutrašnjih voda u geografski informacioni sistem (GIS) mogu se izraditi karte ugroženosti, ali plavljenja koja su već nastala ne mogu se odrediti korišćenjem ove metode (Pálfai, 2003; Bozán et al., 2005; Bozán et al., 2009; Pásztor et al., 2014). (3) Kompleksni modeli za opis hidroloških procesa nastajanja suvišnih unutrašnjih voda zahtevaju veliku količinu ulaznih podataka, s toga se u regionalnim razmerama ne mogu efikasno koristiti. (4) Podaci prikupljeni satelitskom ili vazdušnom daljinskom detekcijom, koji podležu automatskoj obradi i analizi, pružaju informacije sa velikih površina, te nude optimalna rešenja za operativno kartiranje suvišnih unutrašnjih voda na regionalnom nivou. U sklopu korišćenja ovog pristupa, u proteklih 30 godina realizovano je više istraživačkih projekata upotrebom avio snimaka (Liczkó et al., 1987; Rakonczai et al., 2003; van Leeuwen et al., 2012), multispektralnih satelitskih snimaka (Csornai et al., 2000; Rakonczai et al., 2001; Mucsi and Henits, 2010, van Leeuwen et al., 2013) i hiperspektralnih podataka (Csendes and Mucsi, 2016). Pored pasivnih, optičkih senzora stečena su prva iskustva i u primenljivosti aktivnih, radarskih podataka (Csornai et al., 2000; Csekő, 2003; Gálya et al., 2016, Gulácsi és Kovács, 2019).

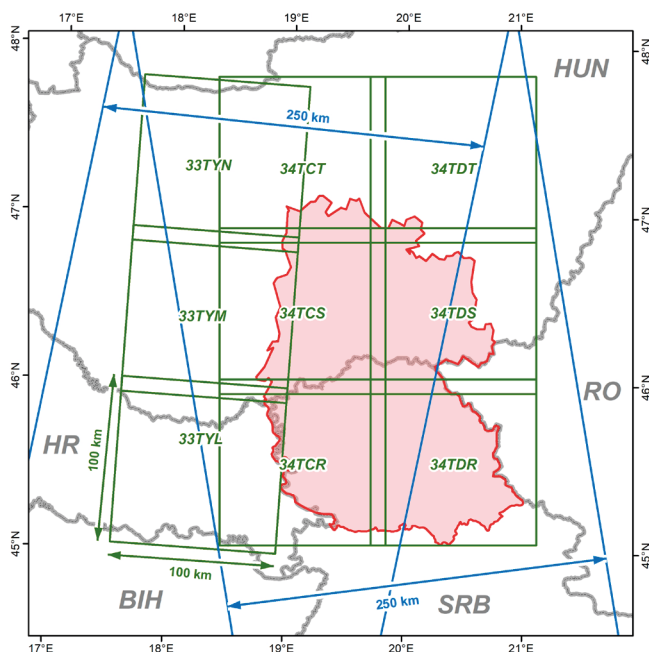
Operativnu primenu satelitskih snimaka uveliko je pomoglo uspostavljanje satelitskih sistema za osmatranje Zemlje sa adekvatnom prostornom rezolucijom (min. 10-30 m) i sa sve boljim vremenom povratka. U okviru programa Copernicus Evropske svemirske agencije (ESA) od 2014. lansirana je porodica satelita Sentinel za potrebe raznih oblasti primene, između ostalog i za multispektralne i radarske snimke (Malenovský et al., 2012). Aktivni senzori satelita Sentinel 1A i 1B bez obzira ne meteorološke prilike pružaju radarske, a sateliti Sentinel 2A i 2B pružaju multispektralne podatke nedeljno 2-3 puta.

Radni proces razvijen u okviru projekta Water@Risk koristeći satelitske snimke Sentinela 1 i Sentinela 2 u stanju je na operativan način proizvesti nedeljne karte plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama u regionalnim razmerama.

## Posmatrani prostor i podaci

Posmatrani prostor projekta Water@Risk obuhvata 2 županije južne nizije Mađarske (Bač-Kiškun i Čongrad), kao i pokrajinu Vojvodinu u Srbiji. Topografski uslovi, niski reljefni oblici, klimatski uslovi i karakteristike zemljišta pogoduju nastajanju suvišnih unutrašnjih voda. Najveći deo ovog prostora je poljoprivredno zemljište, zbog čega često nastaju znatne ekonomske štete.

Čitavo posmatrano područje (oko 27.000 km<sup>2</sup>) pokriveno je sa 3 uzlazne i 2 silazne Sentinel 1 zone, kao i 9 kom Sentinel 2 sekcija (slika 1).



Slika 2.1. Zone Sentinel 1 (plavo) i Sentinel 2 ploče (zeleno) na posmatranom prostoru

Karte plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama izrađuju se na osnovu podataka satelita Sentinel 1 i Sentinel 2.

## Sentinel 1

Faza procesa obrade na bazi radara koristi snimke Sentinel 1A i 1B. Ova dva satelita o posmatranom prostoru otprilike svaka tri dana daju punu pokrivenost zahvaljujući tehnologiji aktivne daljinske detekcije u C-pojasu, bez obzira na doba dana i vremenske uslove. Proizvodi Level-1GRD koji se slobodno mogu skinuti sa servera ESA čine ulazne podatke. Senzor u tzv. Interferometric Wide (IW) režimu proizvodi snimak širine površine 250 km sa prostornom rezolucijom 20x10 m (Malenovský et al., 2012). Paketi podataka podjednako sadrže slojeve vertikalno-vertikalne (VV) i vertikalno-horizontalne (VH) polarizacije, koji se u celosti koriste u radarskom procesu rada. U ovoj studiji koristili smo podatke Sentinel 1 iz perioda 26. mart - 1. april 2018. (13. nedelja) i 2 - 8. april 2018. (14. nedelja) (Tabela 1).

Tabela 2.1. Zbirni parametri korišćenih podataka

Izvor podataka	Datum (broj produkta)	Prostorna rezolucija/ Prostorni obuhvat / razmera	Spektralna rezolucija / Tematika
<b>Sentinel 1</b>			
Nedelja 13.	28.03.2018.(3) 29.03.2018. (5) 30.03.2018. (4) 31.03.2018. (3)	20x10 m / 250 km width	C-opseg (5,405 GHz)
	Nedelja 14.		
<b>Sentinel 2</b>			
Nedelja 13.	28.03.2018. 31.03.2018.	B2: 10m B3: 10m B4: 10m B5: 20m B6: 20m B7: 20m B8: 10m	B2: 492,4 / 492,1 nm B3: 559,8 / 559,0 nm B4: 664,6 / 664,9 nm B5: 704,1 / 703,8 nm B6: 740,5 / 739,1 nm B7: 782,8 / 779,7 nm
		Nedelja 14.	
		100x100 km sekcije	

Izvor podataka	Datum (broj produkta)	Prostorna rezolucija/ Prostorni obuhvat / razmera	Spektralna rezolucija / Tematika
<b>Avionski snimak</b>	28.03.2018.	10 cm / 20 km <sup>2</sup>	Stvarne boje (RGB)
<b>CORINE Land Cover</b>	1998 / 2018	1:50000 / 1:100000	vodni objekat / močvarno područje / veštačke površine
<b>High Resolution Layers</b>	2009-2015	20 m	stalne i povremene vode i vodom zasićene površine
<b>Google Earth (GeoEye / Pleiades)</b>	2017-2018	0,41 / 0,5 m	Stvarne boje (RGB)
<b>OpenStreetMap</b>	razno	-	stambeno područje, put, željeznica, jezero i akumulacija

## Sentinel 2

Sateliti Sentinel 2A i 2B pružaju multispektralne snimke sa 5-dnevnim povratnim periodom. U vidljivom (VIS), blisko infracrvenom (NIR) i kratkotalasno infracrvenom (SWIR) opsegu na raspolaganju je ukupno 13 pojasa sa prostornom rezolucijom 10-20-60 m (Tabela 1) Sa servera ESA besplatno se mogu preuzeti proizvodi Sentinel 2A u obliku pločica 100x100 km, koje sadrže vrednosti površinske refleksije bez uticaja atmosferskih smetnji. U procesima rada koji se zasnivaju na optičkim podacima koristili smo 10 pojaseva ovog paketa podataka (B2-B3-B4-B5-B6-B7-B8-B8A-B11-B12), kao i sloj sa informacijama o oblačnosti, tzv. sloj za klasifikaciju scene (scene-classification). U okviru ovog istraživanja obradili smo snimke Sentinel 2, koji su sačinjeni 28. i 31. marta 2018. i 2, 3, 5. i 8. aprila 2018. (Tabela 1).

## Dopunski podaci

Kako procesi rada na bazi radara, tako i na bazi optičkih snimaka zahtevaju dopunske podatke. Oni s jedne strane igraju ulogu u razvoju algoritama, s druge strane preciziraju rezultirajuće karte plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama maskiranjem onih površina na kojima se – prema definiciji – ne mogu javiti suvišne unutrašnje vode. Otvorene vodene površine koje predstavljaju referentni set podataka potiču iz snimka CORINE Land Cover razmere 1:50000 i 1:100000, a stalne vodene površine (Büttner et al., 2014) iz pan-evropskih slojeva visoke rezolucije (High Resolution Layers - HRS), koji su ažurirani i precizirani pomoću snimaka visoke rezolucije Google Earth-a (Tabela 1). Set podataka sa maskama uključuje gradska područja, veštačke površine poljoprivrednog zemljišta, puteve, željeznicu, jezera, reke - i plavna područja ograničena nasipima -, zatim vlažna staništa, koja su dobijena iz baza podataka CORINE i OpenStreetMap-a. Takođe, sa snimka Sentinel 2 su na početku obrade, na osnovu sloja maske oblaka, bila isključena područja pokrivena oblakom ili senkom oblaka.

## Avio snimci

Za validaciju rezultata prikupljali smo podatke vazdušnom daljinskom detekcijom iz vazduha. Na raspolaganju smo imali senzore koji su postavljeni na krilima aviona Cessna 172, odnosno na dronu fiksnih krila eBee X, i to: PhaseOne P65+ rezolucije 60 MP, odnosno senseFly S.O.D.A RGB kamere rezolucije 20 MP, kao i multispektralni senzor Parrot Sequoia rezolucije 1,2 MP. Snimanje iz vazduha smo obavili 28. marta 2018. na delu uzorka, SI od Senteša, na površini od oko 20 km<sup>2</sup> prostornom rezolucijom od 10 cm. Od pojedinačnih snimaka sastavljen je ortofoto-mozaik.

## Metoda

Metodologija izrade karata plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama sastoji se od koraka - predobrade i obrade. Unutar druge grupe izdvajaju se algoritmi za radar i dva algoritma za multispektralne snimke iz čijih se rezultata korakom integracije izrađuje binarna karta plavljenja. Dobro automatizovana i operativno primenjiva metodologija ne vrši kategorisanje različitih tipova suvišnih unutrašnjih voda, ali pruža informacije o plavljenju na nedeljnom nivou i sa srednjom rezolucijom (10 m).

## Predobrada

U toku predobrade, koristeći OpenData API i OpenData API, obavlja se automatsko preuzimanje proizvoda Sentinel 1 GRD i Sentinel 2 L2A za istraživano područje sa ECA servera.

Radarski snimci Sentinel 1 zahtevaju kompleksnu geometrijsku i radiometrijsku predobradu, što uključuje radiometrijsku kalibraciju, eliminaciju šumova, korekciju distorzije koja nastaje zbog topografije površine i geometrije snimanja sa strane, kao i korekciju tzv. lokalnih ulaznih uglova (van Leeuwen et al., 2017). Pikseli 10x10 m tako dobivene rasterske datoteke sadrže dB vrednosti od površine odbijenih radarskih signala (backscattering).

Optički podaci Sentinel 2 već se preuzimaju u delimično obrađenom obliku (Level2A), koji sadrže površinsku refleksiju. Od 13 pojasa snimanja uzimaju se podaci iz njih 10, pa se pretvaraju u jedinstvenu rezoluciju od 10 m. Područja pokrivena različitim tipovima oblaka ili njihovim senkama na svim satelitskim snimcima su maskirana. Za to smo koristili tzv. sloj za klasifikaciju scene (scene classification), koji je bio uključen u preuzeti paket podataka.

Obrada za oba izvora podataka bila je ograničena na područja ugrožena suvišnim unutrašnjim vodama (Pálfai, 2003).

Predobrada satelitskih snimaka je izvršena korišćenjem softvera ESA SNAP (Sentinel Application Platform), primenom pokrenutih modela.

## Obrada

### Analiza radarskih podataka na bazi graničnih vrednosti

Na osnovu referentnog sloja koji prikazuje otvorene vodene površine, iz VV i VH pojaseva su uzeti osnovni statistički podaci površina pokrivenih vodom (minimum, maksimum, prosek, standardna devijacija dB vrednosti). Upotrebom tih podataka definisane su granične vrednosti za otvorene vodene površine. Pošto je odbijanje radarskih signala sa vodenih površina – uz pretpostavku da nema talasanja i vrtloženja – niže nego sa drugih površina, na slikama sa pikselima ispod granične vrednosti može se pretpostaviti prisustvo vode.

### Automatska klasifikacija multispektralnih podataka

Na snimcima Sentinel 2 izvršena je ISODATA klasifikacija, a dobijene klase su upoređene sa prosečnim spektrom referentnih površina. Spektralna sličnost je izračunata na osnovu odstupanja uglova izmerenih u 10-dimenzionom prostoru određenih pojasevima snimanja (Kruse et al., 1993), zatim su rangirane klase i među njima su one sa najmanjom razlikom, odnosno najvećom sličnošću, označene sa „površina pokrivena vodom“. I u ovom slučaju je kao rezultat dobijena binarna karta (ima vodenog pokrivača | nema vodenog pokrivača)

### Proračun spektralnog indeksa

Na osnovu multispektralnih snimaka izračunat je MNDWI (Modified Normalized Differential Water Index), za koji su korišćeni vidljivi zeleni (B3) i jedan kratkotalasno infracrveni (B11) pojas (1. i 2. jednačina) (Xu, 2005). Na indeksnoj karti smo definisali granične vrednosti uz pomoć osnovnih statističkih podataka o vrednostima indeksa izračunatim za referentne oblasti, koje su bile pogodne za određivanje površina pokrivenih suvišnim unutrašnjim vodama. Rezultat i u ovoj fazi rad je binarna karta plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama.

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR}} \quad (\text{Eq. 1})$$

koji se, upotrebom pojaseva Sentinel-a 2, razvija na sledeći način:

$$MNDWI_{\text{Sentinel-2}} = (3\text{pojas} - 11.\text{ pojas} / (3.\text{ pojas} + 11.\text{ pojas})) \quad (\text{Eq. 2})$$

## Integracija

U poslednjem koraku smo integrisali binarne karte koje su rezultat radarske i multispektralne faze rada. Broj ovih karata je određen brojem satelitskih snimaka koji su dostupni i koji se mogu obraditi u toku jedne nedelje u određenom vremenskom periodu. Ovim integrisanim kartama plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama može se pridodati parametar pouzdanosti, jer na osnovu svih dostupnih ulaznih podataka i postupaka obrade definišu udeo vodenog pokrivača na datoj slici.

## Validacija

Za validaciju dobijenih integrisanih karata plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama koristili smo zone suvišnih unutrašnjih voda pribavljenih na osnovu avio snimaka. Na blizu 20 km<sup>2</sup> putem metode unakrsnog proračuna analizirali smo odnos in-situ posmatrane vodene površine i predviđene vodene površine koju smo dobili u toku postupka obrade.

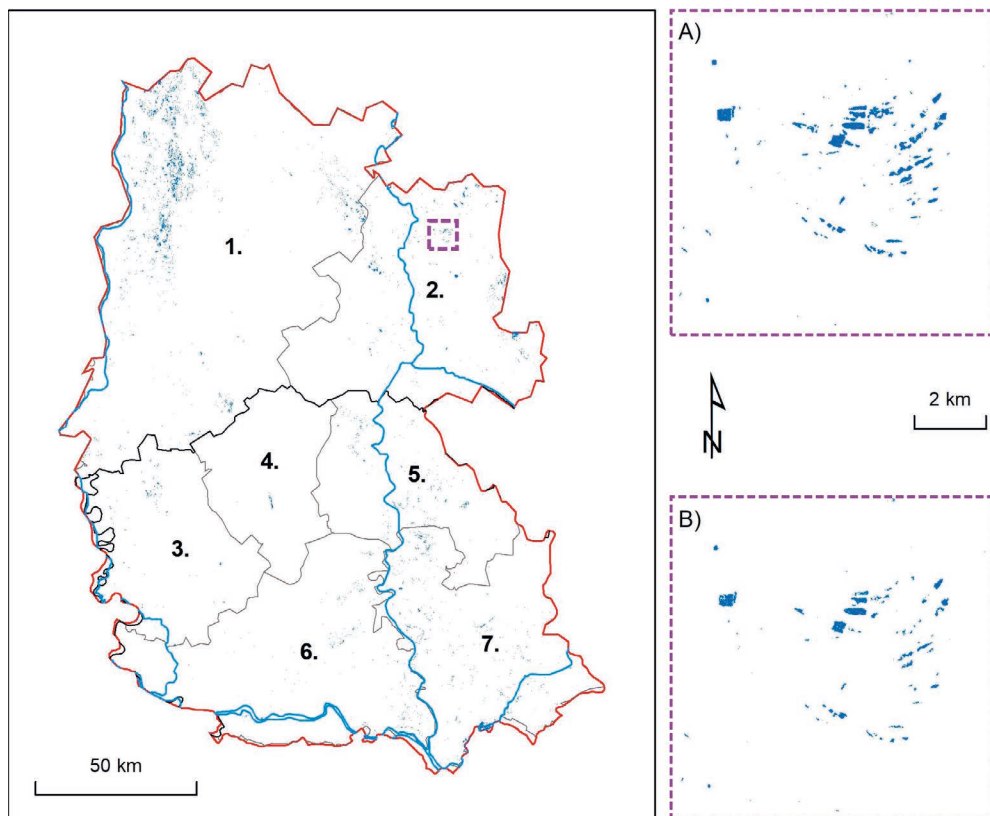
## Rezultati

### Karte suvišnih unutrašnjih voda

U proleće 2018. na posmatranom području došlo je do značajnog plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama. U nastavku prikazaćemo karte suvišnih unutrašnjih voda tokom 2 izabrane nedelje (13. nedelja: 29. mart – 1. april 2018. / 14. nedelja: 2 – 8. april 2018.) koje su generisane na osnovu snimaka satelita Sentinel (slika 2). Ukupno je obrađeno za 13. nedelju 42 (15+27), a za 14. nedelju 33 (12+21) proizvoda.

Radi poboljšanja pouzdanosti rezultata smatrali smo vodom pokrivenim površinama samo one elemente slika, na kojima su algoritmi obrade na najmanje 40% dostupnih snimaka pokazali plavljenje suvišnim unutrašnjim vodama.

Na celom prostoru detektovali smo vodeni pokrivač površine 17.800 ha, odnosno 10.990 ha. Najviše pogođena područja su: SZ deo županije Bač-Kiškun, gde su detektovana pretežno prirodna vodena staništa, zatim Potisko područje u Mađarskoj i u Srbiji, gde su suvišne unutrašnje vode pretežno ugrožavale poljoprivredno zemljište. Može konstatovati da je vremenom, tokom 14. nedelje, došlo do blagog smanjenja površine poplavljenog područja (slika 2).



Slika 2.2. Suvršne unutrašnje vode na istraživnom području krajem marta / početkom aprila 2018. (1. Bač-Kiškun, 2. Čongrad, 3. Zapadna Bačka, 4. Severna Bačka, 5. Severni Banat, 6. Južna Bačka, 7. Južni Banat)

## Validacija

Referentni podaci za validaciju metode potiču od aero snimaka koji su sačinjeni 28. marta 2018. (13. nedelja). Na osnovu vrednosti dobijenih unakrsnom tabulacijom, 93,6% plavljenja ustanovljenih u toku procesa rada označava stvarne zone suvišnih unutrašnjih voda (tačnost korisnika, istinito pozitivna), dok stepen precenjenosti iznosi svega 6,4% (greška komisije, lažna pozitivna) (Tabela 2). Treba međutim napomenuti, da prvenstveno zbog različite rezolucije ulaznih podataka i terenskih snimaka, kao i subjektivnih činilaca u formiranju referentne karte, na sloju rezultata pokazano je svega 5,4% referentnih zona suvišnih unutrašnjih voda. To znači da je stepen podcenjenosti (greška izostavljanja, lažno negativna) veoma visok.



Tabela 2.2. Rezultati validacije karte suvišnih unutrašnjih voda na osnovu analize 13. nedelje

Tačnost proizvođača:		<b>5.42</b>	Tačnost korisnika:		<b>93.58</b>
Potcenjivanje		<b>94.58</b>	Precenjivanje:		<b>6.42</b>

		Referentne vrednosti		
		otvorena voda	ostale vode	nema vode
Detektovano	nema vode	94.55	99.97	98.58
	vodolež	5.42	0	0.03
	maska	0.03	0.03	1.39

		Referentne vrednosti		
		otvorena voda	ostale vode	nema vode
Detektovano	nema vode	6.88	3.39	89.72
	vodolež	93.58	0	6.42
	maska	0	0	0

## Diskusija i zaključci

Metodologija razvijena za detekciju plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama obradom radarskih, optičkih i multispektralnih satelitskih snimaka može pružiti informacije o plavljenju na nedeljnom nivou. Svaki korak radnog procesa se može automatizovati, stoga je metoda pogodna i za operativnu upotrebu.

Ograničenja metode prvenstveno se mogu svesti na karakteristike ulaznih podataka: (1) Prostorna rezolucija rezultujuće karte naravno ne prelazi rezoluciju ulaznih podataka (maks. 10 m), pa realno je obezbeđena identifikacija vodenih zona koja su za red veličine veća od te rezolucije. (2) U slučaju korišćenja optičkih podataka, oblačnost je najveća upravo u periodima za koje su karakteristične suvišne unutrašnje vode, pa često nedostatak podataka sprečava punu prostornu pokrivenost. (3) Jačina reflektovanih radarskih signala može pokazati velike varijacije u slučaju vodenih površina različite hrapavosti – talasasta naspram ravna površina – pa se teško mogu tačno definisati primenjene granične vrednosti. Vrsta površinskog pokrivača, kao i tip zemljišta takođe u značajnoj meri utiču na intenzitet radarskog signala sa površine suvišnih unutrašnjih voda.

Metoda ne pravi razliku između suvog zemljišta, otvorenih površina pod suvišnim unutrašnjim vodama, vegetacije u vodi i vodom zasićenog zemljišta, pa se na binarnoj rezultujućoj karti pojavljuju samo kategorije otvorenih vodenih površina i suvih zemljišnih površina. Za identifikaciju biljaka u vodi i na zemljištu zasićenom vodom bili bi potrebni dodatni ulazni podaci, čija bi integracija zahtevala mnogo resursa i mogla bi ograničiti mogućnost automatizacije procesa obrade.

Potrebno je ostvariti napredak u postupku određivanja i kalibracije što tačnijih graničnih vrednosti pri obradi radarskih signala za područja sa različitim površinskim

pokrivačima i različitim zemljištima. Brojni izazovi stoje i na putu rešavanja problema oblačnosti i povećavanja tačnosti na multispektralnim snimcima takođe predstavlja. Rešavanjem navedenih nedostataka može se još više smanjiti precenjivanje površina zahvaćenih suvišnim unutrašnjim vodama.

Takođe, potrebno je poboljšati metodologiju validacije: neophodno je terensko i vazdušno pribavljanje podataka vršiti istog dana kada se obavlja i satelitsko snimanje, i mora se osigurati standardizacija interpretacije aero snimaka.

Razvijena metoda omogućuje redovno kartiranje plavljenih površina suvišnim unutrašnjim vodama na velikim površinama – na regionalnom, ili čak nacionalnom nivou – što je zahvaljujući automatizaciji već pogodno za operativnu upotrebu.

## **Rezime**

Ranije metode kartiranja suvišnih unutrašnjih voda oslanjale su se na terenske podatke prikupljenje na licu mesta u određenom trenutku, ili eventualno na aero snimke ili satelitske snimke. Metoda razvijena u okviru projekta pogodna je za kontinuirano praćenje plavljenja suvišnim unutrašnjim vodama velikih površina uz operativnu upotrebu dobijenih podataka. Radarski i optički satelitski snimci koji su postali dostupni proteklih godina svojom rezolucijom sve više se približavaju prostornim i vremenskim skalama fenomena suvišnih unutrašnjih voda, nudeći time, u isto vreme, nove mogućnosti i izazove. Karte koje su rezultat automatizovanog procesa rada, mogu biti od koristi nacionalnim vodoprivrednim organizacijama u pogledu ublažavanja šteta, a mogu dopuniti ili precizirati rezultate terenskih merenja koja se i dalje primenjuju.