

### 3. Monitoring suše na osnovu vlažnosti zemljišta pomoću daljinske detekcije i terenskih merenja

Boudewijn van Leeuwen; Károly Barta; Zsuzsanna Ladányi; Viktória Blanka, György Sipos

#### Uvod

Suša se smatra trajnom atmosferskom pojavom, koju možemo okarakterisati kao pojavu sa količinom padavina mnogo manjom od prosečnih i/ili bitno većim temperaturama od prosečnih. Usled toga nastaje značajan i trajan deficit vode (WMO, GWP, 2016). Za numeričko iskazivanje suše razrađeni su brojni indeksi (npr. Palmer, 1965; Pálfai, 2004, Balint et al., 2011, Zargar et al, 2011), koji u obzir uzimaju pretežno klasične meteorološke parametre (padavine, temperatura, itd.), a pri tome zapostavljaju činjenicu da u datoj meteorološkoj situaciji na intenzitet suše u značajnoj meri utiče stanje vlažnosti zemljišta. Deo indeksa to pokušava na indirektan način ugraditi u karakterizaciju suše pomoću količina padavina u periodu koji je prethodio suši, kao što npr. u Mađarskoj u najširoj primeni se nalazi Palfajev indeks suše (Pálfai, 2004). Drugi indeksi uzimaju u obzir i vlažnost zemljišta, ali često to čine ne na osnovu direktnih merenja na terenu, već pomoću simuliranih vrednosti (npr. Narasimhan, Srinivasan, 2005). Uloga vlažnosti zemljišta istovremeno se ne javlja samo u regionalnoj modifikaciji intenziteta suše, nego i u prostornoj diferencijaciji suše u zavisnosti od raznih tipova zemljišta unutar datog područja (zemlje, regije, predela). Za primere iz Mađarske i Srbije mogu se navesti, da na peskovitom zemljištu između Dunava i Tise ista meteorološka situacija prouzrokuje mnogo težu sušu, nego na černoziem zemljištu istočno od Tise. U Mađarskoj nedostatak vode za gornji sloj od 1 m računa se na osnovu procene Nacionalne meteorološke službe (OMSZ) o vlažnosti zemlje koja je zasnovana na simulaciji (Chen, Dudhia, 2001; Horváth et al., 2015, OMSZ 2019a).

Za terensko merenje vlažnosti zemlje postoje brojne mogućnosti. Kako u domaćoj, tako i u međunarodnoj praksi najrasprostranjenije su metode na osnovu dielektričnih stalnih merenja, a od njih merenje zapreminske vlažnosti TDR-tehnikom (Time Domain Reflectometry) (Kirkham, 2014). U okviru jednog ranijeg projekta (WAHASTRAT, HUSRB/1203/121/130; 2013-2014) u južnoj niziji i u Vojvodini postavili smo ukupno 16 takvih meteoroloških mernih stanica, koje obavljaju i merenje vlažnosti zemljišta na 6 različitih dubina (10, 20, 30, 45, 60 i 75 cm) (Barta et al., 2014). Nakon ove mreže stanica 2016. godine došlo je do postavljanja sistema monitoringa vlažnosti zemljišta (koji se stalno proširuje) na celoj teritoriji zemlje (Fiala et al., 2018), o

čijem radu brine Nacionalna direkcija vodoprivrede (OVF). Broj stanica do leta 2019. dostigao je 47 (OVF Monitoring suše 2019).

Bez obzira na monitoring koji se širi i horizontalno i vertikalno, stručnjacima još uvek predstavlja ozbiljan izazov izrada mape aktuelne vlažnosti zemljišta državnih razmera, jer prostorna distribucija rezultata tačkastih merenja u slučaju vlažnosti zemljišta nailazi na brojne poteškoće. Bez namere navođenja svih faktora, svakako treba navesti prostornu razuđenost hidrofizičkih svojstava zemljišta (npr. tekstura, hidraulička vodopropusnost u uslovima zasićenosti, zbijenost), ulogu makro- i mikro-reljefa u kretanju vlažnosti, uticaj na vlažnost raznolike upotrebe i namene zemljišta, kao i pokrivenost površine. Povrh svega na prostoru fiksno postavljenih stanica za monitoring ne može se odvijati poljoprivredna delatnost, pa razlike u zemljišnom pokrivaču i nedostatak obrade zemljišta dovodi u pitanje reprezentativnosti podataka o vlažnosti zemljišta. Rešenje ovog složenog zadatka može se naći primenom metoda daljinske prostorne detekcije koje neprekidno pružaju podatke.

Daljinska detekcija putem satelita omogućava razradu i primenu takvih algoritama, koji omogućavaju prikupljanje informacija sa velikih prostora Zemljine površine i to jedinstvenim metodama. Procena vlažnosti tla pomoću satelitskih podataka predstavljala je takav izazov, kojim su se detaljnije bavili stručnjaci u protekle tri decenije (Srivastava et al., 2016). Primenjivali su metode približne procene vlažnosti zemljišta zasnovane na optičkim, termalnim, infracrvenim i mikrotalasnim senzorima na velikim površinama. Barret i Petropoulos detaljno razmatraju ove pristupe (2014). Najveći broj metoda za analizu vlažnosti zemljišta putem satelitskih podataka u današnje vreme zasniva se na mikrotalasnim podacima. Postavljanjem radarskih satelita Sentinel 1 ovaj pravac je postao naročito perspektivan. Nažalost zasad nemamo na raspolaganju rešenje za vlažnost zemljišta od srednje do visoke rezolucije, upravo zbog toga u toku istraživanja primenili smo jedan optički-termalni infracrveni pristup.

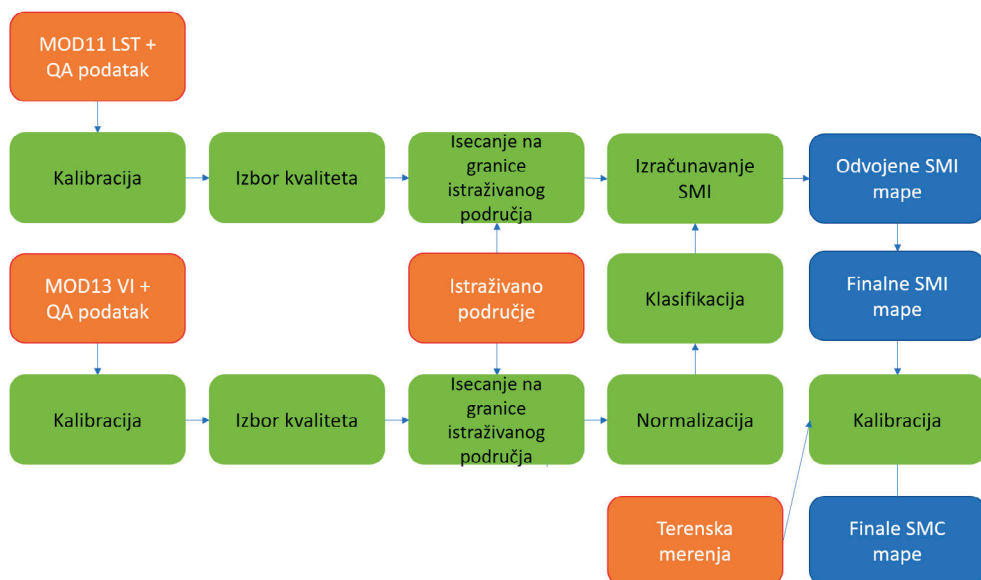
Zbog velike prostorne i vremenske razuđenosti sadržaja vlage u zemljištu teško je izraditi tačne procene za velike površine. Tačkasta merenja su reprezentativna u slučaju relativno malih površina, dok satelitska merenja integrišu merenja na veliku površinu, a rezultate čuvaju u jednom pikselu. Kalibracija i validacija merenja na osnovu satelita terenskim merenjima upravo zbog toga predstavlja težak zadatak.

Cilj našeg istraživanja je da obezbedimo neprekidno prikupljanje podataka o vlažnosti zemljišta zasnovanih na satelitskim merenjima za projektno područje (u Mađarskoj županije Čongrad i Bač-Kiškun, i pokrajina Vojvodina u Srbiji). Da bi se indeks vlažnosti zemljišta (SMI) dobijen na ovaj način pretvorio u sadržaj vlage zemljišta (SMC) izražen u zapreminskom procentu (zapreminski sadržaj vlage, koristi se uglavnom u pedologiji), SMI mape rađene na osnovu satelitskih podataka pokušali smo kalibrisati terenskim merenjima sadržaja vlage zemljišta. Ovo poglavlje će prikazati metode istraživanja i iskustva stečena u toku projekta.

## Metode

Predstavljena metoda se zasniva na satelitskim podacima i to na indeksu vegetacije MODIS MOD13 16 dnevnim kompozitima i na MODIS MOD11 podacima o temperaturi Zemljine površine. Ti podaci se prikupljaju već od 2000. godine i baš zbog toga su pogodni za dugoročne studije i neprekidni monitoring. Podatak o vegetaciji nastaje tako što se maksimalna vrednost NDVI čuvamo za svaki pojedinačni piksel u jednom 16-to dnevnom intervalu (Huete 1999). Na taj način uticaj oblaka i drugih smetnji se minimizira, pa možemo dobiti podatke koji se odnose na čitavo posmatrano područje. Pretpostavljamo da je u toku šesnaestodnevnog perioda stanje vegetacije relativno stabilno. Prostorna rezolucija podataka je 250 x 250 metara. Temperaturu Zemljine površine merimo svaki dan u prostornoj rezoluciji od 500 metara (Wang 1999). Nakon registracije obe ulazne datoteke mogu se preuzeti i slobodno koristiti.

Optička metoda na osnovu TIR zasniva se na pretpostavci da su razlozi temperaturnih razlika na područjima pod sličnom vegetacijom u promenama sadržaja vlage zemljišta (Vicente-Serrano et al., 2004). Algoritam je izrađen upotrebom python skriptova i arcpy biblioteke za geoprocesiranje (Slika 1.).



Slika 3.1. Proces obrade indeksa vlažnosti zemljišta

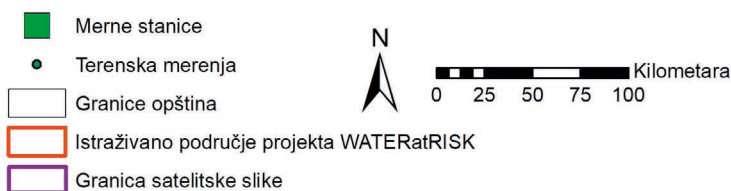
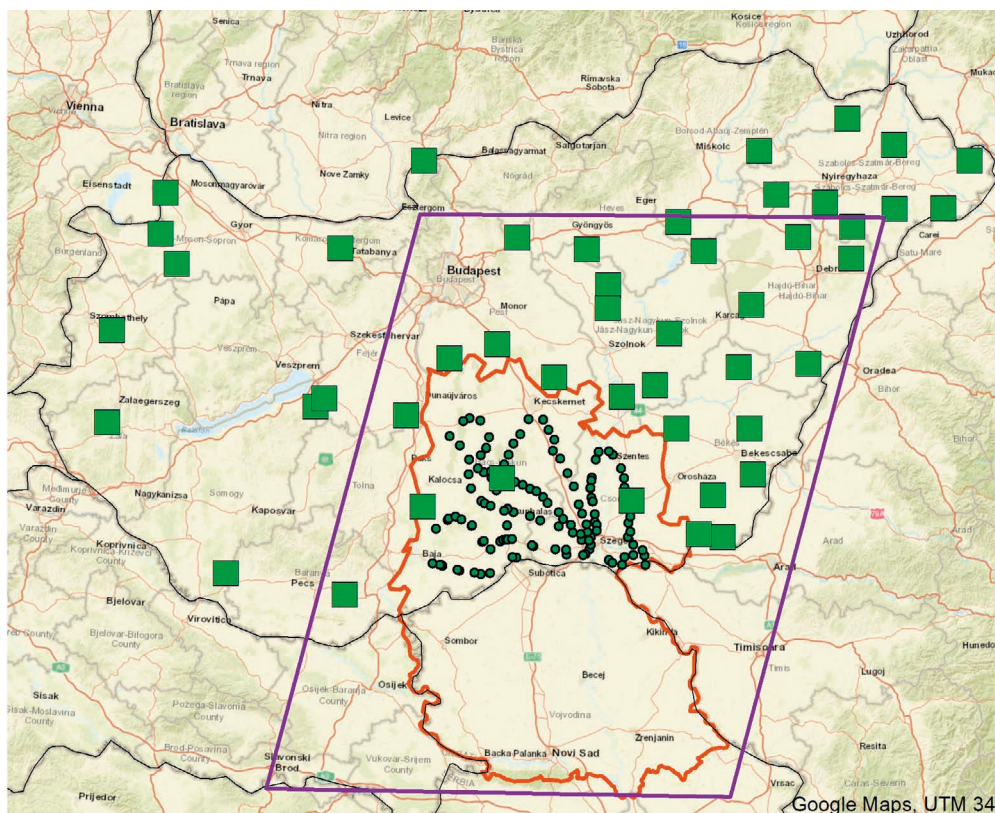
Za određivanje podataka o tome, koje površine su pokrivene sličnom vegetacijom, koristimo sloj NDVI iz proizvoda MOD13. Upotrebom sloja pouzdanosti istog proizvoda MOD13 odstranjujemo piksele neodgovarajućeg kvaliteta. Vršimo normalizaciju preostalih piksela i svrstavamo ih u 10 kategorija sa istom širinom. Samo ako smo definisali sve kategorije (koje imaju svoje piksele), onda možemo u potpunosti

odrediti algoritam i mogu se obraditi podaci o temperaturi. Sloj temperature površine Zemlje vadimo iz proizvoda MOD11. U toku dalje obrade koristimo samo piksele dobrog kvaliteta. Za svaku fazu vegetacije / klasu uzimamo podatke o minimalnim i maksimalnim temperaturama, a linearna veza između temperature Zemljine površine i indeksa sadržaja vlage u zemljištu unutar klase određujemo pomoću (1)

$$SMI_{i,c} = \frac{LST_{c,min} - LST}{LST_{c,max} - LST_{c,min}} + 1 \quad (1)$$

u kojem  $SMI_{i,c}$  je indeks vlažnosti zemljišta piksela  $i$  u klasi  $c$ . Na taj način stvaramo 10 SMI mapa, pridodajući svakoj klasi vegetacionog perioda indeks vlažnosti zemljišta. Kombinacijom raznih SMI mapa dobijamo SMI mapu celog posmatranog područja. Ta zbirna mapa sadrži vrednosti indeksa 0 (minimalan sadržaj vlage zemljišta) i 1 (maksimalan sadržaj vlage zemljišta). SMI mape se mogu sačiniti ukoliko imamo na raspolaganju dovoljnu količinu piksela u podacima za vegetaciju i o površini Zemljine površine i ako su određene sve klase vegetacije.

Da bi se SMI mape mogle pretvoriti u zapreminski% sadržaj vlage zemljišta po jedinici, potrebno je pojedine mape kalibrisati terenskim merenjima. Za kalibraciju podataka koristimo dve metode. Prva metoda se zasniva na podacima iz mreže stanica za merenje vlažnosti zemljišta nacionalne vodoprivredne organizacije (OVF Monitoring suše 2019). Ova mreža se marta 2009. sastojala od 47 stanica, od kojih 27 se nalazi na području kojim se bavi ova studija (Slika 2.). Te stanice mere sledeće pokazatelje: temperaturu vazduha, sadržaj vlage u zemljištu na 6 različitih dubina, temperaturu zemljišta u 6 različitih dubina, relativnu vlažnost vazduha i količinu padavina. Automatsko preuzimanje podataka sa svake stanice na svakih sat vremena se obezbeđuje pomoću PHP i CURL API-a. Koristimo Python skript za preuzimanje podataka o vlažnosti zemljišta na dubini od 10 cm za period od 1. januara 2017. i 30. marta 2019. godine. Ukoliko smo imali na raspolaganju SMI mapu, onda smo indekse vlažnosti zemljišta uzimali iz SMI mapa za geografski položaj mernih stanica i uporedili smo ih sa terenskim merenjima 11:00 UTC, što je manje-više jednako vremenu prolaska satelita MODIS. Na taj način za svaki dan se vršio proračun koeficijenta determinacije između merenja na osnovu satelita i terenskih merenja. Ukoliko je koeficijent determinacije bio veći od 0,5, originalnu SMI mapu smo kalibrisali upotrebom nagiba i preseka u osi merenja na terenu i na taj način smo dobili konačnu SMC mapu.

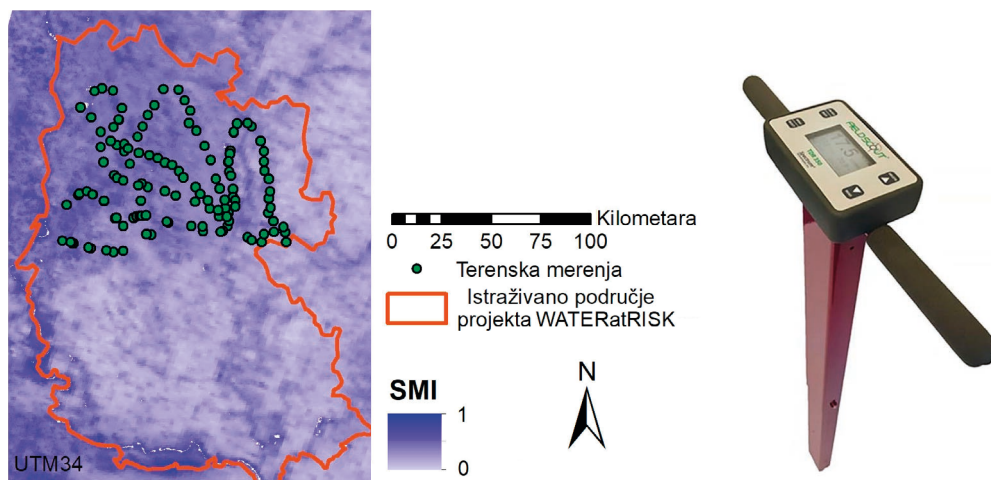


Slika 3.2. Posmatrano područje sa stanicama za merenje vlažnosti zemljišta i tačkama terenskih merenja u okviru istraživanja dana 27. marta 2019.

Osnove druge metode za kalibraciju obezbedila je serija terenskih merenja dana 27. marta 2019. Tog dana četiri ekipe su posetile dato područje da bi se pomoću prenosivih senzora FieldScout TDR350 izmerio sadržaj vlažnosti zemljišta. Ti senzori direktno u zapreminskom procentu određuju prosečnu vlažnost gornjeg sloja zemljišta od 12 cm, a zahvaljujući ugrađenom GPS modulu mernim podacima pridodaju i koordinate. Svaka ekipa je na oko 35 mesta merila sadržaj vlage zemljišta, pokrivaјуći razdaljinu od oko 200 km po ekipi (Slika 2.). Mobilna sredstva su omogućila, da u mernim podacima bude dobro prezentovan način korišćenja zemljišta i tip zemljišta na pojedinim delovima analiziranog područja. Prilikom izbora mernih tačaka važan aspekt je bio da se merenja obave na parcelama takve veličine, koje pokrivaju barem jedan piksel na MODIS snimcima daljinske detekcije. Imajući u vidu rezoluciju slika

od 250 x 250 m, cilj je bio izbor parcela od najmanje 500 x 500 m. Najveći deo su bile oranice, a među njima je bilo i pašnjaka, voćnjaka (vinograda) i šuma.

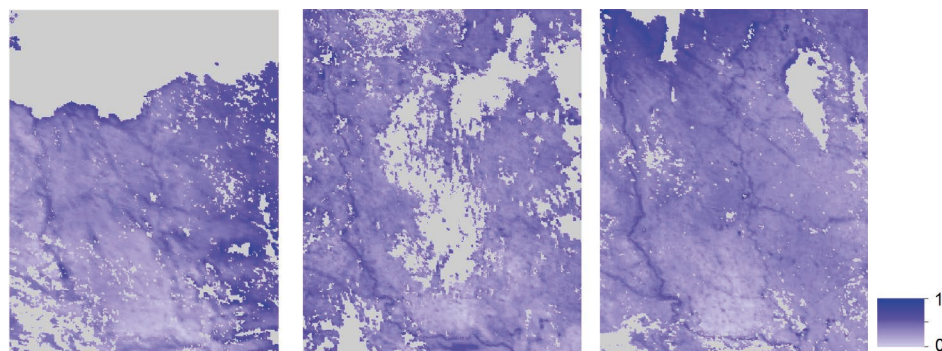
Na istim mestima gde je obavljeno terensko merenje, iz SMI mape za dati dan uzimali smo podatke za indekse o vlažnosti zemljišta (Slika 3.). Za ta mesta smo izračunali koeficijent determinacije, kako bi smo ustanovili, koliko je jaka veza između procena na osnovu satelitskih podataka i merenja na terenu.



Slika 3.3. Serija terenskih merenja 27. marta 2019., kao i instrument za merenje FieldScout TDR350

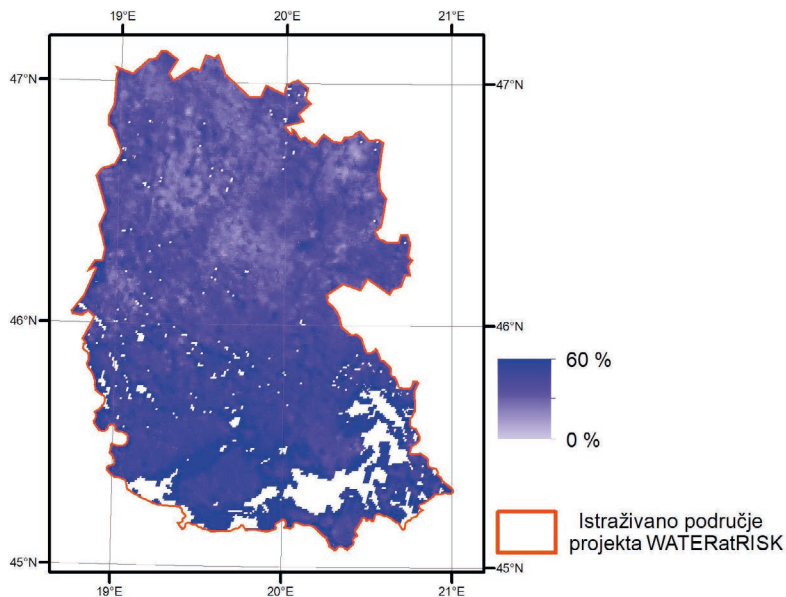
## Rezultati

Mape vlažnosti zemljišta sačinjene pomoću satelita smo uporedili sa podacima 27 stanica za merenje vlage zemljišta u periodu od 1. januara 2017. i 29. marta 2019. Za 630 dana smo mogli proizvesti SMI mape na osnovu satelitskih podataka, ali mnogi snimci su rađeni kada je bilo oblačno, pa su velike površine ostale bez SMI vrednosti (Slika 4.).



Slika 3.4. Mape indeksa vlažnosti zemljišta sa različitim količinama nedostajućih podataka (sivi delovi) za 1. januar 2017. (s leve strane), 25. april 2017. i 12. novembar 2018. (s desne strane)

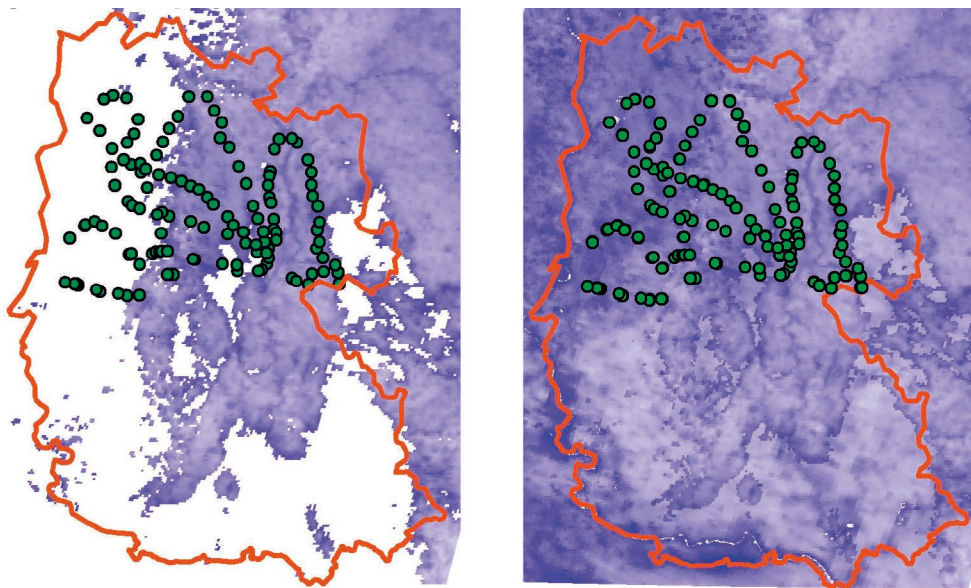
Za utvrđivanje veze između podataka terenskih merenja i dobijenih putem satelita, na osnovu našeg iskustva smo utvrdili da su potrebne najmanje četiri tačke. U mnogim slučajevima taj uslov nije ispunjen, jer su se merne stanice nalazile na takvim geografskim lokacijama, za koje nismo imali na raspolaganju SMI podatke. Jednačina regresije mogla je biti određena za 440 dana (70%). Dodatno ograničenje su predstavljali mnogi slučajevi u kojima je koeficijent determinacije bio veoma nizak. Odlučili smo se da ćemo podatke mernih stanica za merenje vlažnosti zemlje koristiti za kalibraciju SMI mape, ukoliko je veza bila pozitivna, a koeficijent determinacije je bio veći od 0,5. Kao rezultat toga dobili smo 27 (to je 7,5% perioda od 630 dana) SMI mapa (Slika 5.).



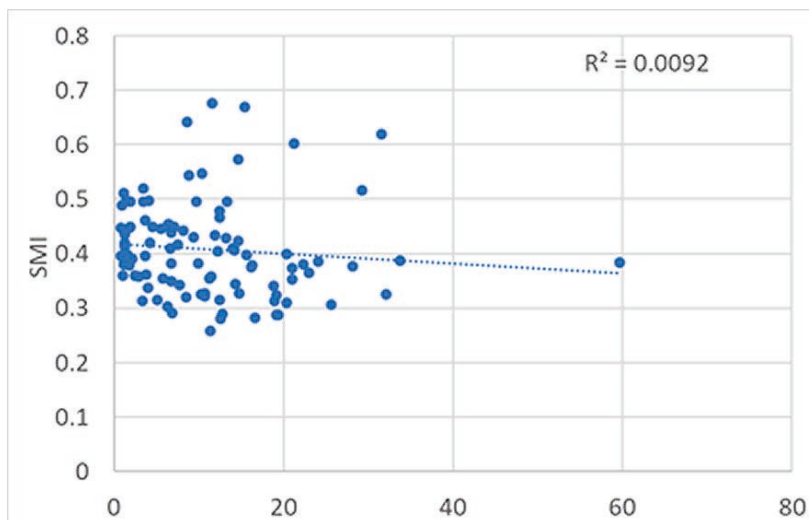
Slika 3.5. Mapa sadržaja vlage zemljišta kalibrisana podacima stanica za merenje vlažnosti zemljišta OVF-a, 14. jul 2018.

Rezultat obavljenih merenja vlažnosti zemljišta 27. marta 2019. bila je *in situ* skup podataka o 136 merenja vlažnosti zemljišta. Te podatke smo uporedili sa satelitskom SMI mapom za 28. mart 2019. Zato smo doneli tu odluku, jer je snimak dana kada su obavljena terenska merenja bila oblačna i na mnogim mestima nismo imali podatke na raspolaganju (Slika 6.)

Na osnovu koordinata pojedinih terenskih merenja SMI podatke smo uzimali iz onog piksela, koji se nalazio tačno na tom mestu. Te podatke smo prikazali u jednoj funkciji sa vrednostima sadržaja vlažnosti zemljišta koje su dobijene terenskim merenjima, pa smo izračunali koeficijent determinacije (slika 7.). Nažalost nije se mogla utvrditi statistička veza među vrednostima. Imali smo niz pokušaja da stvorimo partitivne skupove podataka na osnovu korišćenja zemljišta i tipa zemljišta, ali koeficijent determinacije je i u tom slučaju bio blizak 0.



Slika 3.6. Raspoloživi podaci za 27. mart 2019. i 28. mart 2019

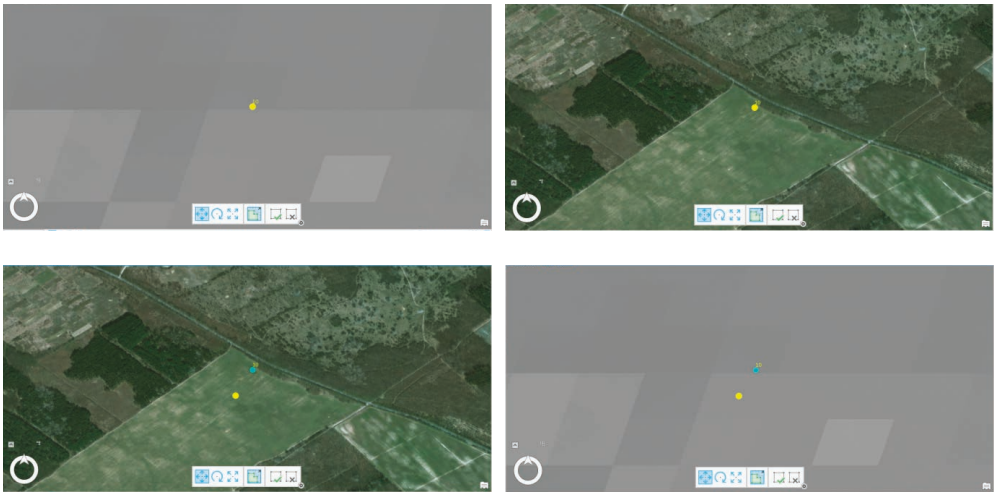


Slika 3.7. Relacija vrednosti volumetrijskih terenskih merenja vlažnosti zemljišta (horizontalna osa) i satelitskih vrednosti indeksa vlažnosti zemljišta (vertikalna osa) (ceo skup)

Vrednosti indeksa vlažnosti zemljišta na osnovu satelitske tehnike indirektno smo izveli iz optičkih, podataka blisko infracrvenom području, kao i termalnih podataka izmerenih za dato područje, što smo integrisali u jednu vrednost celom pikselu. Terenska merenja vlažnosti zemljišta su tačkasta merenja koja su karakteristična za neposredno okruženje merenja. Glavni razlog što nema veze između dva skupa podataka je to, što je tako velika razlika u srazmeri. Drugi razlog može biti to što



je teško ustanoviti koji piksel satelitskog snimka sadrži vrednost indeksa sadržaja vlage zemljišta tačno u tački merenja. Ako poklopimo dva skupa podataka, vidimo da jedna tačka može se nalaziti na graničnoj liniji dva piksela (Slika 8. levo gore). Kada na jednom satelitskom snimku veoma velike rezolucije analiziramo razmeštaj tačkastih merenja, vidi se da tačka označava veliko polje na južnom delu (Slika 8. gore). Taj problem smo rešili tako, što smo ove tačka premestili u onaj piksel, u kojem smo s velikom šansom dobili vrednost bliže stvarnoj (Slika 8. levo dole i desno dole). Na žalost i ova manuelna korekcija nije obezbedila bolji koeficijent determinacije.



Slika 3.8. Manuelna adaptacija terenskih merenja radi poboljšanja dobijanja SMI vrednosti. *Levo gore: žutom označeno prvobitno mesto tačkastog merenja na SMI mapi (u sivoj boji) Desno gore: prvobitno mesto tačkastog merenja na satelitskom snimku veoma visoke rezolucije Levo dole: prvobitno tačkasto merenje (ovde plavom označeno) premestili smo na pravo mesto (označeno žutom). Desno dole: novo mesto tačke na SMI podatku.*

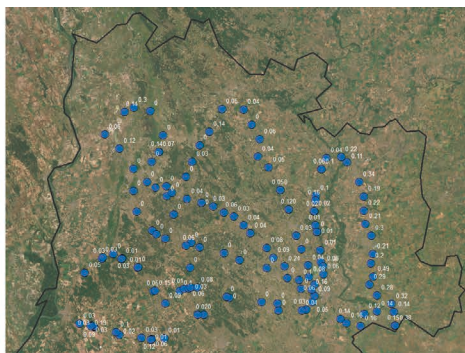
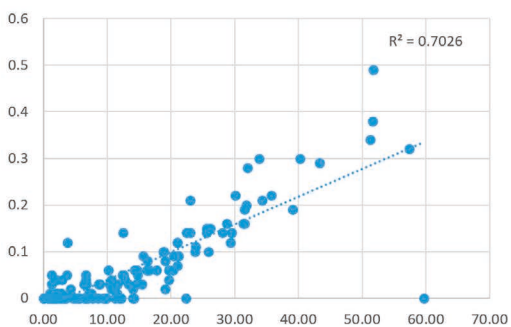
Jedan drugi primer za pogrešno prikazivanje tačkastih merenja vidi se na slici 9. Tačkasto merenje premešteno na SMI fajl izgleda kao da predstavlja jedan piksel, a zapravo piksel se sastoji od integrisane vrednosti indeksa vlažnosti zemljišta, koja se zasniva na veoma različitom načinu korišćenja zemljišta, npr. izgrađena površina, šuma i polja sa različitom poljoprivrednom delatnošću (na slici 9. desno).



Slika 3.9. Primer mešovite upotrebe zemljišta

Od izabranih tačaka zemaljske interpretacije jedan od najvažnijih očekivanja jeste da budu stvarno na takvoj parceli sa homogenim korišćenjem zemljišta, čije dimenzije u oba pravca nadmašuju dvostruku prostornu rezoluciju satelitskog snimka. Čak i na ovakvim homogenim parcelama mogu predstavljati problem razlike u temperaturi odn. sadržaju vlage, koje su nastale usled uticaja mikroreljefa (slika 8). Nažalost na posmatranom prostoru kako na peščanim površinama sa živim reljefom, tako i na blago talasastoj površini lesne ravni u Bačkoj u udubljenjima i na grebenima postoje značajne razlike u sadržaju humusa (u boji) i u sadržaju vlage. U predstavljenoj kampanji merenja dodatni izvor greške može biti da je snimanje obavljeno u suvom periodu i da se front isušivanja nalazio na dubini od 8-15 cm. Dakle, vrednost izmerena senzorom dužine 12 cm je proizvedena je kao prosek isušene gornje površine i vlažnog sloja ispod. Prema našim iskustvima idealno vreme za kalibraciju je period koji počinje 5-6 dana posle kišovito perioda, kada u zavisnosti od hidrofizičkih svojstava zemljišta isušivanje je u toj fazi da postoje znatne razlike kako u temperaturi zemljišta, tako i u vlažnosti zemljišta, ali gornji sloj tla još nije isušen.

Dalje iskustvo kampanje merenja je bilo to, što su izmerene vrednosti vlažnosti zemljišta pokazale jake veze sa sadržinom soli zemljišta (Slika 10/a). Slika 10/b pokazuje prostornu razućenost sadržaja soli i na njoj dobro se vidi da u tačkama snimljenim u područjima preko Tise sadržaj soli pokazuje mnogo veće vrednosti nego na područjima između Dunava i Tise. Međutim ukoliko uzmemo tačke u kojima je sadržaj soli veći od 0,06%, i povezanost upoređujemo ne samo sa zemljištem koje pokazuje slatinasta svojstva, veza se ne može dokazati. Kao zaključak nameće se rešenje, da kod organizacije sledeće kampanje merenja bilo bi svrsishodno za kalibraciju primeniti merenje sadržaja vlage zemljišta na nekim drugačijim metodološkim osnovama.



Slika 3.10. Veza vlažnosti zemljišta i sadržaja soli na posmatranom području (a) i vrednosti sadržaja soli izmerene za vreme kampanje merenja (b)

## Zaključci

U toku testiranja razrađene metode naišli smo na brojne limitirajuće faktore koji otežavaju primenljivost kalibracije. U sledećem periodu projekta na osnovu dosadašnjih iskustava organizovaćemo dalje kampanje merenja, kada ćemo terenska merenja obaviti nakon vlažnog perioda, kako bi smo u što širem opsegu mogli obezbediti podatke o vlažnosti zemljišta, zatim obratićemo veću pažnju na prethodnu selekciju većih i homogenih tačaka. Pored mobilnih uređaja koji primenjuju TDR metodu, uzećemo i uzorke zemljišta. Sadržaj vlage ćemo izmeriti i u laboratoriji (m/m%), čime ćemo eliminisati eventualni uticaj slatinastih svojstava. Trenutno stvorene i neprekidno publikovane SMI mape za sada daju podatke o relativnoj vlažnosti zemljišta, koje ne odražavaju apsolutni zapreminski postotak, ali su ipak pogodno da predstavljaju trenutne prostorne razlike u vlažnosti zemljišta. Pored sve bolje prostorne rezolucije radarski podaci pogodni su za eliminisanje problema oblačnosti, ali njihova kalibracija i validacija za sada još takođe nije rešena.