

USPOREDBA KARTI HRANIVA ZA DOPUNSKU PRECIZNU GNOJIDBU IZRAĐENIH PRIMJENOM SATELITSKIH SNIMKI I BESPILOTNOG ZRAKOPLOVA

COMPARISON OF NUTRIENT MAPS FOR ADDITIONAL PRECISION FERTILISATION CREATED WITH THE HELP OF SATELLITE IMAGERY AND AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

D. Radočaj, I. Plaščak, I. Vidaković, M. Jurišić

SAŽETAK

Suvremena poljoprivreda teži povećanju produktivnosti uz smanjenje negativnog utjecaja na okoliš, pri čemu dopunska precizna gnojidba predstavlja važan segment precizne poljoprivrede. Napredak u metodama daljinskih istraživanja, osobito uporabom vegetacijskih indeksa poput NDVI-a (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*), omogućuje prostorno varijabilnu primjenu gnojiva. Cilj ovog rada jest usporediti tehnička svojstva Sentinel-2 satelitskih snimki i bespilotnih zrakoplova s RGB (engl. *red-green-blue*) kamerom u svrhu izrade karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu. Usporednom analizom svojstava daljinskih istraživanja utvrđeno je da Sentinel-2 pruža širu spektralnu pokrivenost, besplatnu i redovitu dostupnost, ali ima ograničenu prostornu razlučivost (do 10 m) i ovisan je o vremenskim uvjetima. S druge strane, bespilotni zrakoplovi omogućuju visoku prostornu razlučivost (do 1 cm) i veću fleksibilnost u odabiru vremena snimanja, ali zahtijevaju početna ulaganja i ograničeni su na manje površine. Praktična primjena provedena je na poljoprivrednoj čestici unutar Pokušališta Tenja Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek, pod pšenicom, gdje su zone gnojidbe izrađene na temelju vegetacijskih indeksa NDVI i VARI (engl. *Visible Atmospherically Resistant Index*). Rezultati pokazuju značajne razlike u preporukama, osobito u središnjem dijelu čestice, što upućuje na potrebu daljnjeg istraživanja točnosti obje metode.

Ključne riječi: precizna poljoprivreda, vegetacijski indeksi, daljinska istraživanja, Sentinel-2, bespilotni zrakoplov

ABSTRACT

Modern agriculture strives to increase productivity while reducing the negative impact, on the environment. Supplementary precision fertilisation is an important segment of precision agriculture. Advances in remote sensing methods, in particular the use of vegetation indices such as the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), enable spatially variable fertiliser application. The aim of this work is to compare the technical characteristics of Sentinel-2 satellite imagery and unmanned aircraft with a red-green-blue (RGB) camera in order to develop recommendations for supplementary precision fertilisation. A comparative analysis of remote sensing characteristics has shown that Sentinel-2 offers wider spectral coverage, free and regular availability, but limited spatial resolution (up to 10 m) and dependence on weather conditions. On the other hand, unmanned aircraft provide high spatial resolution (up to 1 cm) and flexibility in the choice of recording time, but require initial investment and are limited to smaller areas. The practical application was carried out on an agricultural plot within the Tenja experimental site of the Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek with wheat, where fertilisation zones were created based on NDVI and Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) vegetation indices. The results show significant differences in the recommendations, especially in the central part of the plot, which indicates the need for further research on the accuracy of both methods.

Key words: precision agriculture, vegetation indices, remote sensing, Sentinel-2, unmanned aircraft

UVOD

Suvremena poljoprivreda suočava se s izazovima povećanja produktivnosti uz istovremeno smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Dopunska precizna gnojidba predstavlja ključnu komponentu suvremene poljoprivrede, omogućavajući optimiranu primjenu gnojiva na temelju stvarnih potreba usjeva (Vizzari i sur., 2019.). Tradicionalne metode gnojidbe često se oslanjaju na aplikaciju prosječnih vrijednosti za cijelu poljoprivrednu česticu, što može dovesti do neujednačene distribucije hranjivih tvari, smanjene učinkovitosti i povećanih troškova. Napredak u tehnologiji daljinskih istraživanja, osobito korištenjem vegetacijskih indeksa, revolucionirao je ovaj proces omogućavajući prostorno varijabilnu primjenu gnojiva s visokom razinom točnosti. Vegetacijski indeksi omogućuju kvantitativnu procjenu zdravlja biljaka i

fotosintetske aktivnosti te su osobito korisni za procjenu udjela dušika u usjevima, budući da postoji jaka korelacija između sadržaja klorofila i dostupnog dušika u biljkama (Radočaj i sur., 2023.). Primjenom daljinskih istraživanja putem satelita ili bespilotnih zrakoplova, moguće je izraditi detaljne karte vegetacijskih indeksa koje pokazuju varijabilnost vegetativnih svojstava unutar poljoprivredne čestice. Te se karte zatim mogu integrirati u sustave precizne gnojidbe, čim se omogućuje varijabilna aplikacija gnojiva ovisno o potrebama pojedinih dijelova poljoprivredne čestice. Prethodne studije ukazuju na to da ovakav pristup smanjuje troškove i onečišćenje okoliša te povećava prinose uz održivu upotrebu resursa (Lu i sur., 2022.).

Jedan od ključnih alata za postizanje ovog cilja jest precizna gnojidba, koja omogućuje dinamičku prilagodbu primjene gnojiva na temelju stvarnih potreba usjeva. Temeljna prednost ovog pristupa leži u korištenju vegetacijskih indeksa dobivenih tehnologijama daljinskih istraživanja, koje omogućuju prikupljanje podatka o stanju usjeva u stvarnom vremenu. Vegetacijski indeksi, među kojima je najpoznatiji NDVI (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*), postali su nezamjenjivi u procjeni zdravlja biljaka, fotosintetske aktivnosti i sadržaja klorofila (Radočaj i sur., 2023.). Njihova primjena omogućuje prepoznavanje varijabilnosti unutar poljoprivrednih čestica i određivanje zona koje zahtijevaju dodatnu gnojidbu. NDVI vegetacijski indeks, koji se temelji na refleksiji crvenog i bliskog infracrvenog zračenja, omogućuje detekciju biljnog stresa uzrokovanog nedostatkom hranjivih tvari prije nego što postane vidljiv golim okom. Osim toga, integracija vegetacijskih indeksa u sustave precizne poljoprivrede omogućuje varijabilnu primjenu gnojiva, što dovodi do smanjenja troškova i povećanja iskoristivosti nutrijenata. Studije pokazuju da se primjenom precizne gnojidbe temeljene na vegetacijskim indeksima može postići ušteda gnojiva od 6 do 46 % (Koch i sur., 2004.). Ova je tehnologija posebno korisna u uvjetima klimatskih promjena, gdje racionalna upotreba resursa postaje ključna za održivu proizvodnju. U Hrvatskoj je implementacija precizne poljoprivrede sve prisutnija, posebno u ratarskoj proizvodnji i vinogradarstvu. Međutim, unatoč prednostima, širokoj upotrebi ove tehnologije još uvijek stoje na putu visoki početni troškovi i potreba za edukacijom poljoprivrednika.

Cilj ovog stručnog rada je analizirati tehnička svojstva satelitske misije Sentinel-2 i komercijalnih bespilotnih zrakoplova opremljenih RGB senzorima te procijeniti njihovu primjerenost za izradu karata hraniva kao osnove za dopunsku preciznu gnojidbu. Poseban naglasak stavljen je na prosudbu

spektralnih, prostornih i vremenskih karakteristika obiju tehnologija u kontekstu detekcije varijabilnosti unutar poljoprivredne čestice, kao i s obzirom na točnost, troškove i praktičnu primjenu u poljoprivrednim gospodarstvima.

USPOREDBA SVOJSTAVA IZVORA PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA ZA DOPUNSKU PRECIZNU GNOJIDBU

Dva najčešće korištena pristupa za izračun vegetacijskih indeksa na poljoprivrednim područjima jesu korištenje satelitskih misija, osobito multispektralne satelitske misije Sentinel-2 kojom upravlja Europska svemirska agencija (ESA) i snimanje primjenom bespilotnih zrakoplova (Tablica 1). Sentinel-2 provodi istovremeno snimanje velikih površina unutar širine zahvata od 290 km koristeći 13 multispektralnih spektralnih kanala, uključujući rubni crveni (engl. *red-edge*) i bliski infracrveni (engl. *near-infrared*) (ESA, 2013). Multispektralno snimanje omogućuje praćenje širokog spektra svojstava poljoprivrednih usjeva kroz izračun brojnih vegetacijskih indeksa, uključujući NDVI. Dodatna je prednost što su Sentinel-2 besplatno dostupni putem različitih internetskih platformi, poput *Google Earth Engine* (Velasgui-Montoya i sur., 2023.). Satelitske snimke Sentinel-2 također omogućuju redovito praćenje promjena svojstava usjeva jer imaju vremensku razlučivost (prikuplja uzastopne snimke istog područja) približno svakih pet dana. Međutim, iskoristivost Sentinel-2 snimki izravno ovisi o vremenskim uvjetima, budući da oblaci mogu onemogućiti korištenje podataka na dijelu snimanog područja te se snimanje provodi s prostornom razlučivosti (duljina na terenu koju predstavlja jedan piksel na rasteru) do 10 m.

S druge strane, komercijalni bespilotni zrakoplovi imaju prednost u visokoj prostornoj razlučivosti snimanja do 1 cm te fleksibilnost uzimajući u obzir meteorološke prilike jer se mogu koristiti proizvoljno o potrebama korisnika, osim u uvjetima jakog vjetra ili oborina. Njihovi se nedostaci očituju u visokoj cijeni početnog ulaganja, pri čemu cjenovno pristupačni komercijalni bespilotni zrakoplovi opremljeni RGB kamerama (Rozenberg i sur., 2021.) ne omogućuju izračun brojnih vegetacijskih indeksa koji zahtijevaju multispektralni senzor, niti omogućuju izravno geopozicioniranje korištenjem kinematike u stvarnom vremenu (engl. *real-time kinematic*, RTK) putem globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS). U tom je slučaju nužno na terenu postaviti orijentacijske točke, što dodatno zahtijeva korištenje GNSS prijamnika i produljuje naknadnu obradu snimki. Na tržištu su dostupni i bespilotni

zrakoplovi opremljeni multispektralnom kamerom i GNSS RTK prijamnikom, no oni zahtijevaju znatno veće početno ulaganje od cjenovno pristupačnih komercijalnih bespilotnih zrakoplova opremljenih RGB kamerom. Snimke prikupljene putem bespilotnih zrakoplova za korištenje u preciznoj poljoprivredi također je potrebno obraditi primjenom softvera za fotogrametrijsku obradu snimki kako bi se izradio digitalni ortofoto, što dodatno povećava potrebu za inicijalnim ulaganjem. Zbog nedostatka bliskog infracrvenog spektralnog kanala u standardnim RGB kamerama, nužno je koristiti alternativne vegetacijske indekse koji koriste spektralne kanale iz vidljivog dijela spektra, kao što su VARI (engl. *Visible Atmospherically Resistant Index*) i NGRDI (engl. *Normalized Green-Red Vegetation Index*). Bespilotni su zrakoplovi prikladni za snimanje manjih površina do nekoliko hektara, jer za veće površine zahtijevaju višestruke letove, što uzrokuje razlike u insolaciji što dovodi do neusklađenostima u digitalnom ortofotu. Dodatno je ograničenje relativno kratko trajanje leta koje obično iznosi približno 20 minuta efektivnog leta po bateriji, ne računajući vrijeme potrebno za povratak bespilotnog zrakoplova na početnu lokaciju zbog iskorištenog kapaciteta baterije.

Karte hraniva u preciznoj poljoprivredi, koje služe kao osnova za dopunsku preciznu gnojidbu putem vegetacijskih indeksa, nužno je prilagoditi mogućnostima preciznog rasipača definiranjem prostorne razlučivosti na približno 20 m (Atfarm, 2025). Uzimajući u obzir veliku razliku u prostornoj razlučivosti snimki prikupljenih putem bespilotnog zrakoplova (do 1 cm), tijekom procesa promjene prostorne razlučivosti rastera vegetacijskih indeksa na 20 m automatski se uprosječuje i gubi vrlo velika količina tako prikupljenih podataka.

Tablica 1. Usporedni prikaz svojstava prikupljanja i obrade snimki korištenjem Sentinel-2 satelitskih snimki i snimki prikupljenih korištenjem bespilotnog zrakoplova za potrebe izrade karte za dopunsku preciznu gnojidbu

Table 1 A comparative display of image collection and processing properties using Sentinel-2 satellite images and unmanned aerial vehicle images to create a supplementary precision fertilization map

Svojstva prikupljanja i obrade snimki	Sentinel-2 satelitske snimke (SAT)	Snimke prikupljene korištenjem bespilotnog zrakoplova s RGB kamerom (BES)	Optimalni izvor podataka za izradu karte za dopunsku preciznu gnojidbu
Prostorna razlučivost	do 10 m	do 1 cm	I SAT i BES omogućuju adekvatnu prostornu razlučivost (~20 m)
Vremenska razlučivost	5 dana	Po želji, uz povoljne meteorološke uvjete.	BES
Broj spektralnih kanala	13	3	SAT
Postupak naknadne obrade podataka	ESA automatski provodi naknadnu obradu podataka.	Nužno kreiranje digitalnog ortofota korištenjem softvera za fotogrametrijsku obradu	SAT
Odabir vegetacijskih indeksa	Vegetacijski indeksi koji koriste kanale iz vidljivog, rubnog crvenog i bliskog infracrvenog dijela spektra (npr. NDVI).	Vegetacijski indeksi koji koriste kanale samo iz vidljivog dijela spektra (npr. NGRDI).	SAT
Pouzdanost snimki za korištenje	ESA automatski provodi atmosferske i radiometrijske korekcije snimki.	Razlike u insolaciji i potencijalni nedostatak senzora insolacije uzrokuju radiometrijske neusklađenosti u digitalnom ortofotu.	SAT
Postupak georeferenciranja snimki	ESA automatski provodi georeferenciranje snimki, no točnost je ograničena prostornom razlučivosti snimanja.	Automatski s točnošću do 3 m, a korištenjem orijentacijskih točaka ili GNSS RTK pozicioniranja do 2 cm.	BES
Visina početnog ulaganja	Preuzimanje snimki i dostupan GIS softver za obradu (npr. QGIS) su besplatni.	Nužno ulaganje u bespilotni zrakoplov, potencijalne nadogradnje (multispektralni senzor, GNSS RTK prijamnik, senzor insolacije) i softver za fotogrametrijsku obradu. GIS softver za obradu (npr. QGIS) je besplatan.	SAT

USPOREDBA IZRAĐENIH ZONA ZA DOPUSNKU PRECIZNU GNOJIDBU KORIŠTENJEM SATELITSKIH SNIMKI I SNIMKI PRIKUPLJENIH KORIŠTENJEM BESPILOTNOG ZRAKOPLOVA

Praktični slučaj izrade karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu dušikom izrađen je na dijelu poljoprivredne čestice (ARKOD ID 1515769) unutar Pokušališta Tenja Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek, na kojoj je uzgajana pšenica (Slika 1). Terensko snimanje bespilotnim zrakoplovom proveden je 4. travnja 2025. godine. Za planiranje misije korištena je Android aplikacija *Pix4D Capture*, a za snimanje je korišten DJI Mavic 2 Pro bespilotni zrakoplov s integriranom RGB kamerom. Snimanje je provedeno na relativnoj visini od 50 m, uz 80 % uzdužnim i poprečnim preklapom snimanja, što je rezultiralo prostornom razlučivosti od 1,87 cm. Ukupna snimljena površina iznosila je 1,68 ha. Sentinel-2 snimka iste poljoprivredne čestice prikupljena je 5. travnja 2025. godine te predstavlja vremenski najbližu dostupnu snimku terenskom snimanju bespilotnim zrakoplovom.

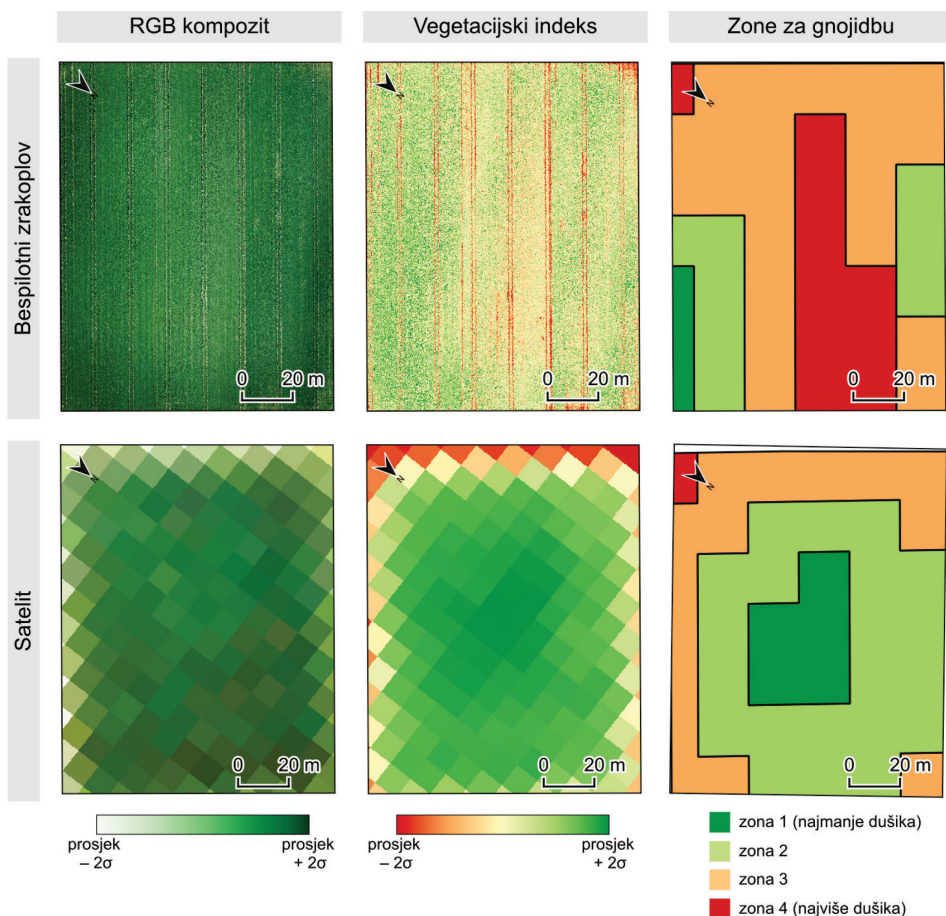


*Slika 1. Uvećani prikaz dijela analizirane poljoprivredne čestice
na dan provedbe terenskog dijela studije*

*Figure 1 An enlarged view of part of the analysed agricultural parcel
on the day the field study was implemented*

Fotogrametrijska obrada zasebnih snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom, izračun vegetacijskih indeksa za oba izvora podataka te njihova zonacija provedeni su u programu *Pix4D Fields*. Vegetacijski indeks VARI odabran je kao osnova za zonaciju iz digitalnog ortofota dobivenog iz snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom, dok je za Sentinel-2 satelitsku snimku izračunat NDVI. Za oba skupa podataka izračunate su četiri zone preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu primjenom metode kvantila, čime je poljoprivredna čestica podijeljena prema pravilnim intervalima distribucije vrijednosti vegetacijskih indeksa. Usporedni prikaz RGB kompozita, korištenih vegetacijskih indeksa te konačnih zona preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu izrađenih korištenjem bespilotnog zrakoplova i satelita kao nosača senzora daljinskih istraživanja prikazan je na Slici 2. Pri usporednoj vizualnoj analizi utvrđena su manja odstupanja u georeferenciranju zona za dopunsku preciznu gnojidbu.

Zone preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu izrađene na temelju satelitske snimke i snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom znatno se razlikuju, osobito u središnjem dijelu snimanog područja. Na tom području satelitski podaci ukazuju da je potrebno aplicirati najmanje dušika, dok podaci prikupljeni bespilotnim zrakoplovom ukazuju na najviši deficit, pri čemu je nužna aplikacija maksimalne količine dušika za analiziranu poljoprivrednu česticu. Zoniranje poljoprivredne čestice prema vrijednostima vegetacijskih indeksa predstavlja završni korak u izradi karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu. Točnu vrijednost potrebne aplikacije gnojiva po zoni određuje agronom, a ona se ne može uvijek pouzdano odrediti na temelju vegetacijskih indeksa. Za izračun prostornog obuhvata pojedinih zona korištena je prostorna razlučivost od 20 m, pri čemu su pikseli unutar iste zone grupirani i pretvoreni u vektorski format. Konačni rezultat obrade podataka jest izvoz karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu u ISOXML format, koji je nužan radi kompatibilnosti s većinom traktorskih kontrolera i preciznih rasipača gnojiva.



Slika 2. Zone preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu izrađene na temelju satelitske snimke i snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom

Figure 2 Recommendation zones for supplementary precision fertilization based on satellite and unmanned aerial vehicle images

Bez dodatnih terenskih uzorkovanja nije moguće utvrditi koji je pristup za izradu karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu točniji. Ipak, prethodna istraživanja dokazala su visoku korelaciju vegetacijskog indeksa NDVI iz Sentinel-2 snimki s količinom klorofila u biljkama te posredno i količinu dušika (Vizzari i sur., 2019; Sharifi, 2020). S druge strane, nedostatak

senzora insolacije na bespilotnom zrakoplovu, kao i kalibracijskog panela za radiometrijsku kalibraciju snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom sugerira da bi tako prikupljeni podaci mogli sadržavati nepouz dane spektralne odzive. Unatoč tome, dodatna su istraživanja nužna kako bi se utvrdila pouz danost satelitskih snimki i snimki prikupljenih bespilotnim zrakoplovom za izradu karte preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu.

ZAKLJUČCI

U ovom stručnom radu analizirana su tehnička svojstva satelitskih snimki Sentinel-2 i snimki prikupljenih korištenjem bespilotnih zrakoplova s RGB kamerom za izradu karata preporuke za dopunsku preciznu gnojidbu. Analiza pokazuje da obje tehnologije imaju svoje prednosti i nedostatke u kontekstu primjene u preciznoj poljoprivredi. Satelitske snimke Sentinel-2 sadrže veći broj spektralnih kanala, redovitu dostupnost podataka svakih pet dana, automatsku atmosfersku i radiometrijsku korekciju te besplatnu dostupnost. Međutim, njihova je upotreba ograničena vremenskim uvjetima i prostornom razlučivošću od 10 m. Snimke prikupljene korištenjem bespilotnih zrakoplova omogućuju visoku prostornu razlučivost do 1 cm, fleksibilnost u terminu snimanja i preciznije georeferenciranje. Nedostaci ove metode uključuju visoke troškove, potrebu za naknadnom fotogrametrijskom obradom, ograničenja u veličini snimane površine i potencijalne radiometrijske neusklađenosti. Rezultati praktičnog usporednog istraživanja pokazuju značajne razlike u izrađenim zonama za dopunsku preciznu gnojidbu između dvije tehnologije, osobito u središnjem dijelu snimanog područja. Bez dodatnih terenskih uzorkovanja nije moguće pouz dano utvrditi koja metoda daje točnije rezultate. Stoga bi se budući razvoj trebao bi usmjeriti na daljnja istraživanja pouz danosti obje tehnologije, s posebnim naglaskom na razvoj hibridnih pristupa koji bi kombinirali prednosti obje metode. Također, potrebna je edukacija poljoprivrednika i razvoj pristupačnih tehnoloških rješenja kako bi se precizna poljoprivreda široko implementirala u praksi.

LITERATURA

1. Atfarm (2025.): How can I create an application map in the Atfarm web app and transfer it to my terminal? Dostupno na: <https://support.at.farm/hc/en-gb/articles/13201195286812-How-can-I-create-an-application-map-in-the-Atfarm-web-app-and-transfer-it-to-my-terminal> (pristupljeno 18.04.2025.)
2. ESA (2013.): Sentinel-2 user handbook. Dostupno na: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (pristupljeno 18.04.2025.)
3. Koch, B., Khosla, R., Frasier, W. M., Westfall, D. G., Inman, D. (2004.): Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agronomy Journal*, 96(6); 1572-1580
4. Lu, Y., Liu, M., Li, C., Liu, X., Cao, C., Li, X., Kan, Z. (2022.): Precision fertilization and irrigation: Progress and applications. *AgriEngineering*, 4(3); 626-655
5. Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., Jurišić, M. (2023.): State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in web of science: A review. *Agriculture*, 13(3); 707
6. Rozenberg, G., Kent, R., Blank, L. (2021.): Consumer-grade UAV utilized for detecting and analyzing late-season weed spatial distribution patterns in commercial onion fields. *Precision Agriculture*, 22; 1317-1332
7. Sharifi, A. (2020.): Using Sentinel-2 data to predict nitrogen uptake in maize crop. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13; 2656-2662
8. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., Adami, M. (2023.): Google Earth Engine: a global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 15(14); 3675
9. Vizzari, M., Santaga, F., Benincasa, P. (2019.): Sentinel 2-based nitrogen VRT fertilization in wheat: Comparison between traditional and simple precision practices. *Agronomy*, 9(6); 278

Adrese autora – Author's addresses:

doc. dr. sc. Dorijan Radočaj

e-mail: dradocaj@fazos.hr,

prof. dr. sc. Ivan Plaščak

e-mail: iplascak@fazos.hr

doc. dr. sc. Ivan Vidaković

e-mail: ividakovic@fazos.hr

prof. dr. sc. Mladen Jurišić

e-mail: mjurisic@fazos.hr

Primljeno – received:

25.04.2025.

Revidirano – revised:

07.05.2025.

Prihvaćeno – accepted:

22.05.2025.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek

Vladimira Preloga 1, Osijek, Hrvatska