

Mogućnosti korištenja optičkih satelitskih snimaka srednje i visoke rezolucije (*Landsat 8*, *RapidEye*) u vizualizaciji i detekciji promjena šumskog pokrova nakon vjetroizvala

Ivan PILAŠ¹, Mateo GAŠPAROVIĆ², Martina ĐODAN³, Ivan BALENOVIĆ⁴, Ivica DUGAČKI⁵

¹ Dr. sc. Ivan Pilaš, Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: ivanp@sumins.hr

² Doc. dr. sc. Mateo Gašparović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mgasparovic@geof.hr

³ Dr. sc. Martina Đodan, Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: martinat@sumins.hr

⁴ Dr. sc. Ivan Balenović, Hrvatski šumarski institut, Trnjanska cesta 35, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: ivanb@sumins.hr

⁵ Ivica Dugački, dipl.ing. Hrvatske šume d.o.o., Šumarija Zagreb, Kosirnikova 35b, HR-10000 Zagreb

SAŽETAK. U radu je napravljen prikaz i usporedba satelitskih informacija srednje (*Landsat 8*, 30 m) i visoke (*RapidEye*, 5 m) rezolucije s ciljem ispitivanja mogućnosti vizualne i kvantitativne procjene šteta od vjetroizvala na Medvednici, nakon oluje Teodor u studenom 2013. godine, te obnove šumskog pokrova u 2018., odnosno nakon pet godina. Za vizualnu detekciju šteta na čitavom području korišten je 3D prikaz, u 15 m prostornoj rezoluciji, izveden iz RGB kanala vidljivog dijela spektra, izoštren pomoću pan-kromatskog kanala. Prostorna razlučivost različitih satelitskih indeksa (NDVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NBR, NBR2), kao kvantitativne mjere stanja vegetacijskog pokrova, ispitivana je na temelju *Landsat 8* snimaka na čitavom području Medvednice. Od ispitivanih indeksa, najbolja razlučivost vegetacijskog pokrova postignuta je kod korigiranih SAVI i MSAVI indeksa u odnosu na NDVI, dok su indeksi temeljeni na infra-crvenom dijelu spektra (NDMI, NBR, NBR2) pokazali dosta dobru osjetljivost kod detekcije narušenosti šumskog pokrova nakon vjetroizvala. Na ispitivanom dijelu površine s vjetroizvalom, neposredno uz potok Bliznec, utvrđena je značajna komparativna prednost snimaka visoke rezolucije (*RapidEye*) pri razlučivanju šteta na pokrovu odnosno pri praćenju stanja obnove šumske vegetacije. Na osnovu dobivenih prethodnih rezultata, utvrđene su značajne mogućnosti satelitskih snimaka srednje i visoke rezolucije, kako s ciljem detekcije šteta nakon prirodne nepogode, tako i kod praćenja obnove šuma na tim površinama, a što će potvrditi daljnji tijek ovog istraživanja.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, satelitska opažanja, *Landsat 8*, *RapidEye*, šumske štete, vjetrolom, obnova šuma, Medvednica

1. Uvod

Daljinska istraživanja (*engl. remote sensing*) predstavljaju niz naprednih metodoloških i tehničkih rješenja prikupljanja informacija sa površine Zemlje, atmosfere i oceana. Ona se temelje na postupcima transformacije elektromagnetskog zračenja u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra u ljudima smislene oblike i pojave. S obzirom na izvore elektromagnetskog

zračenja, metode daljinskih istraživanja dijele se na aktivne i pasivne od kojih se prve temelje na detekciji energije koja se pojavljuje od prirode, kao što je reflektirajuće sunčevo zračenje s površine Zemlje. Aktivne metode, s druge strane koriste vlastiti izvor elektromagnetskog zračenja čiji se odbljesak od zemljine površine povratno detektira i analizira. Primjer za prvu grupu predstavljaju tzv. optički multispektralni i hiperspektralni senzori koji detektiraju refleksiju u različitim valnim duljinama dok u drugu grupu spadaju radarski senzori odnosno SAR (*engl. synthetic aperture radar*). S obzirom na sustave odnosno letjelice na kojima se nalaze instrumenti za detekciju, opažanja dijelimo na satelitska, opažanja iz zrakoplova odnosno aerofoto te u današnje vrijeme sve učestalija opažanja pomoću bespilotnih letjelica.

U proteklih nekoliko desetljeća postignut je značajan tehnološki napredak u poboljšanju značajki optičkih senzora koje omogućuju poboljšanu razlučivost detalja na snimci kao što su prostorna rezolucija, spektralna rezolucija i radiometrijska rezolucija. Prostorna rezolucija senzora odnosi se na najmanju veličinu objekta koji se može detektirati na snimci. Najčešće je možemo predočiti s veličinom pixela (*engl. ground sample distance*). Spektralna rezolucija vezana je uz opseg intervala valnih duljina. Što je spektralna rezolucija nekog senzora bolja, uži je interval valnih duljina koji senzor može detektirati. Prema toj karakteristici razlikujemo multi-spektralne senzore koji očitavaju desetak te hiper-spektralne senzore koji očitavaju više stotina različitih valnih duljina u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra. Radiometrijska rezolucija označava osjetljivost uređaja pri razlučivanju gradijenata elektromagnetskog zračenja iz izvora. Što je radiometrijska rezolucija senzora bolja, senzor je osjetljiviji na promjene u reflektiranoj ili emitiranoj energiji.

Početak prikupljanja uporabljivih i šire dostupnih satelitskih informacija s primjenom u različitim segmentima ljudske djelatnosti usko je vezan uz misiju Landsat, koja operativno djeluje od 1972. pa sve do danas. Landsat program, koji je nastao suradnjom američke svemirske agencije (NASA) i američke geološke službe (USGS), sastoji se od niza satelitskih misija (Landsat 1 – Landsat 8) koje su se kontinuirano unaprjeđivale sve do danas, te stoga predstavljaju jedan od najznačajnijih izvora globalnih retrospektivnih podataka (Gutman i Masek 2012). Korištenje satelitskih Landsat snimaka posebno je intenzivirano unatrag nekoliko godina od kada su arhivi snimaka postali besplatni i javno dostupni na USGS portalu <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Kao značajan doprinos poboljšanju kontinuiteta i frekvencije globalnih opažanja, u okviru programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) europske svemirske agencije (ESA) od nedavno je uspostavljen novi sustav optičkih satelitskih opažanja zvan Sentinel (ESA 2012). Sentinel sustav sastoji se od dva satelita, Sentinel-2A (lansiran 2015. godine) i Sentinel-2B (lansiran 2017. godine) koji omogućavaju globalno ponovljeno snimanje zemljine površine u intervalu od 5 dana u prostornoj rezoluciji od 10 odnosno 30 m. Sentinel misija postala je temeljnim sustavom globalnih satelitskih opažanja koja provodi ESA, a čija je prednost da je prema optičkim karakteristikama senzora u velikoj mjeri usporediva s NASA-USGS Landsat 8 misijom čime se zajednički omogućava globalni ciklus opažanja zemljine površine svakih 2,9 dana u prosjeku. Kombinirano korištenje većeg broja satelita značajno povećava vjerojatnost pridobivanja uporabljivih snimaka zemljine površine bez zastora oblaka, kao jednog od najčešćih ograničenja kod pasivnih optičkih satelitskih senzora (Li i Roy 2017). ESA također vodi proaktivnu politiku što većeg korištenja satelitskih informacija putem omogućavanja besplatnog pristupa i korištenja Sentinel proizvoda dostupnih na web portalu: <https://scihub.copernicus.eu/>.

Za razliku od navedenih satelitskih senzora srednje prostorne rezolucije (10-30m), trenutno se u orbiti nalazi i niz komercijalnih satelita sa sensorima visoke odnosno vrlo visoke rezolucije od 30 cm do 5 m. Prvi komercijalni satelit visoke rezolucije, IKONOS, lansiran je 1998.

godine. Od tada pa do danas, razvijen je niz senzora koji omogućavaju vrlo precizno razlučivanje detalja na snimkama kao što je: RapidEye (5 m), Planetscope (3 m), QuickBird (60 cm), WorldView-1 i 2 (50 cm), GeoEye-1 (50 cm), WorldView-3 i 4 (30 cm).

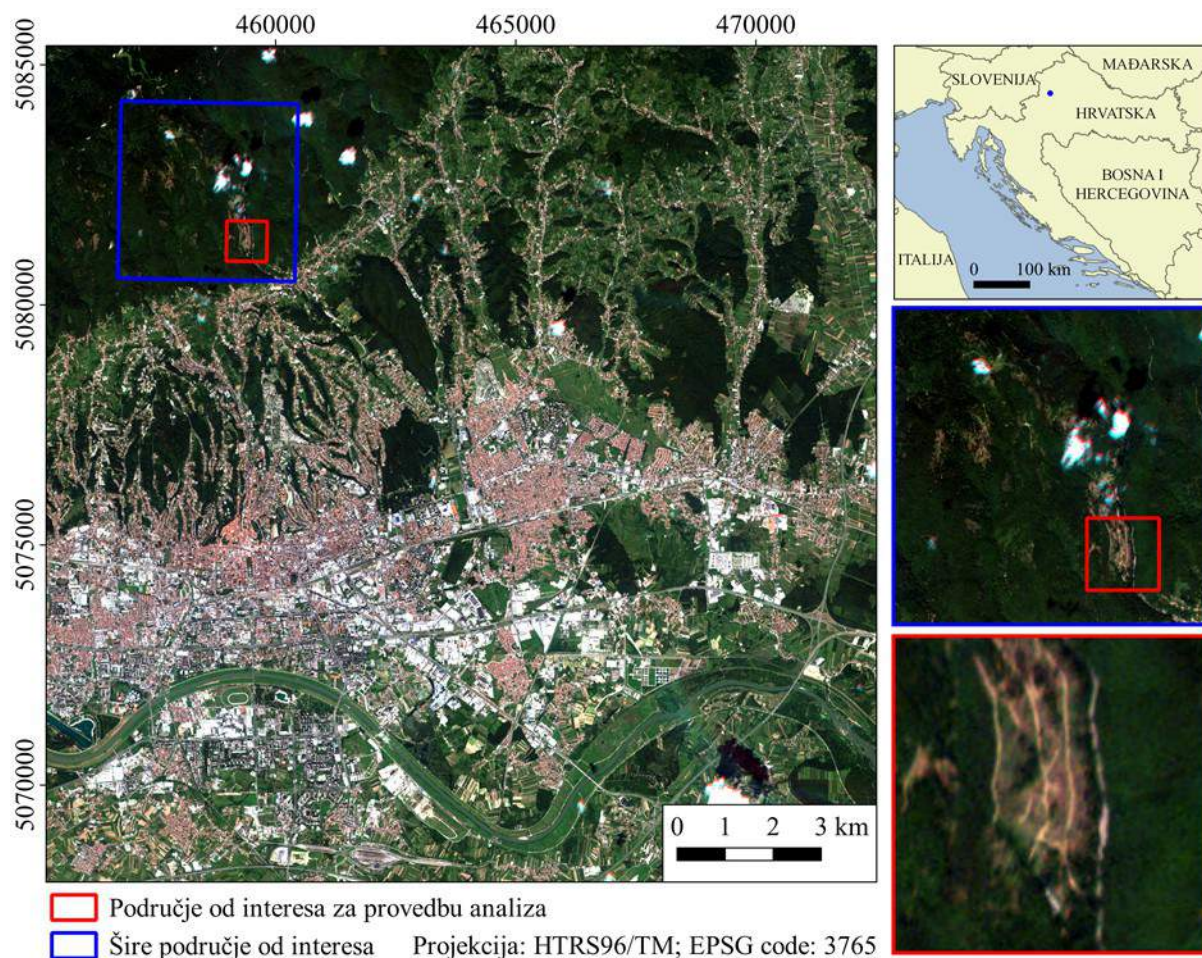
Šume u Hrvatskoj predstavljaju jedan od najvrjednijih prirodnih i ekonomskih resursa koji zauzima površinu od oko 2 miliona hektara i samim time pridobivanje aktualnih informacija o stanju i promjenama u šumskom pokrovu predstavlja preduvjet za gospodarenje šumama na potrajan odnosno održiv način. Samim time, šumarstvo kao struka koja upravlja šumskim resursima, predstavlja sektor koji može u značajnoj mjeri koristiti raspoložive satelitske informacije radi poboljšanog praćenja i detektiranja promjena u šumama uslijed redovnih gospodarskih aktivnosti, prirodnih nepogoda (suše, požari, vjetrolovi, ledolomi i dr.) kao i praćenja obnove površina nakon gospodarskih zahvata ili izvanrednih prilika. Međutim, u dosadašnjoj šumarskoj praksi, operativno korištenje satelitskih informacija u bilo kojoj od tradicionalnih šumarskih disciplina kao što su uređivanje šuma, uzgajanje šuma, zaštita šuma, ekologija šuma, genetika i oplemenjivanje šumskog drveća te šumarska politika je praktički nepostojeće i to unatoč vrlo očitim mogućnosti primjene satelitskih opažanja u šumsko-proizvodnom ciklusu.

S obzirom na izneseno, ovaj rad ima za cilj, kroz analizu široko poznatog i za javnost vrlo aktualnog slučaja vjetrolova na Medvednici iz studenog 2013. godine, uputiti šumarsku i geodetsku struku na mogućnosti primjene suvremenih satelitskih opažanja srednje i visoke rezolucije pri detekciji promjena i praćenju obnove šumskog pokrova. U radu su, na osnovu prvih rezultata obrade satelitskih snimaka vjetrolova iz 2013. prikazane mogućnosti satelitskih opažanja, a to su mogućnost retrospektivnog sagledavanja događaja, vizualizacija slučaja te kvantitativna analiza odnosno procjena učinka.

2. Materijal i metode

2.1. Područje istraživanja

Istraživanje je provedeno na području Medvednice, brdskog masiva u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, koje ima značajnu krajobraznu, ekološku, biološku i rekreativnu ulogu za stanovnike grada Zagreba. Medvednica, odnosno njen zapadni dio zbog svojih prirodnih vrijednosti je 1981. godine proglašena parkom prirode te je time uvrštena u područja s posebnom zaštitom. Nakon dopune Zakona 2009. godine, definirane su nove granice parka prirode Medvednica koje trenutno iznose 17938 ha, a koje su ujedno i granice obuhvata područja ekološke mreže Natura 2000 (PP Medvednica 2014). Biljni pokrov Medvednice zbog vertikalne zonacije, morfološke razvedenosti i geološke heterogenosti odlikuje se izrazitom heterogenošću vegetacije tako da na tom području nalazimo 12 prirodnih šumskih tipova. Na donjim obroncima pridolazi najniži tip, šuma hrasta kitnjaka i običnog graba, koja na pojedinim mjestima dosta duboko ulazi u urbano gradsko područje. Na hrast kitnjak nastavlja se zona bukovih šuma te zatim šuma bukve i jele koja se proteže duž glavnog grebena. U šumsko gospodarskom smislu, područje Medvednice je razgraničeno na četiri gospodarske jedinice (GJ) od kojih tri GJ Sljeme Medvedgradske šume, GJ Markuševačka gora i GJ Bistranska gora pripadaju Šumariji Zagreb dok GJ Stubička gora u najsjevernijem dijelu pripada šumariji Donja Stubica. Unatrag zadnjih nekoliko godina, područje Medvednice je u više navrata bilo izvrgnuto prirodnim nepogodama koje su utjecale na devastaciju prirodnog šumskog pokrova (Slika 1). Jedna od najvećih nepogoda dogodila se u studenom 2013. kada je zbog oluje „Teodor“ porušen značajan dio šuma u središnjem dijelu Medvednice, a čiji su ožiljci vidljivi i do današnjeg dana.



Slika 1. Područje Medvednice s prikazom istraživane vjetroizvale uz potok Bliznec, nakon oluje Teodor u studenom 2013. godine.

2.2. Preuzimanje i obrada satelitskih podataka

Za provedbu ovog istraživanja, prikupljeni su raspoloživi satelitski snimci koji obuhvaćaju vremensko razdoblje od 2013. godine pa do danas, pomoću kojih je bilo moguće izraditi retrospektivnu analizu promjena u šumskom pokrovu. Od snimaka srednje prostorne rezolucije, korišteni su snimci najnovije Landsat 8 misije (30 m) dok su za usporedbu za isto razdoblje korišteni snimci RapidEye satelita visoke rezolucije (5 m).

2.2.1. Landsat 8

Landsat 8 predstavlja osmi u nizu satelita u sklopu Landsat programa koji je operativan od veljače 2013. godine. Landsat 8 sastoji se od dva senzora, OLI (*engl. Operational Land Imager*) i TIRS (*engl. Thermal Infrared Sensor*), koji prikupljaju informacije u 9 kratkovalnih i dva termalna dugovalna kanala (USGS 2016). Prostorna rezolucija snimaka se kreće u rasponu od 15 m kod pan-kromatskog, 30 m kod multispektralnih i 100 m kod termalnih kanala. Radiometrijska rezolucija od 12 bita omogućuje postizanje izuzetno dobre razlučivosti vizura na snimkama. Za razliku od prethodnih misija, OLI multispektralni senzor kod Landsat 8 ima poseban kanal u plavom kratkovalnom području (Band 1, 0.433-0.453 μm), tri kanala u vidljivom području, plavi, zeleni i crveni (Band 2,3 i 4, 0.450-0.680 μm), blizu infracrveni (Band 5, 0.845-0.885 μm), dva kratkovalna infracrvena (Band 6 i 7, 1.560-1.660 μm , 2.100-2.300 μm), pankromatski (Band 8, 0.500-0.680 μm) te Cirrus kanal (Band 9, 1.360-1.390 μm).

Dva TIRS termalna dugovalna kanala (Band 10 i 11) dolaze u rasponu valnih duljina 10.30-11.30 μm i 11.50-12.50 μm .

2.2.2. RapidEye

RapidEye predstavlja konstelaciju od 5 satelitskih senzora koji su operativni od 2008. godine, te koji omogućuju pridobivanje snimaka zemljine površine sa 630 km visine na dnevnoj frekvenciji opažanja. RapidEye senzor sastoji se od 5 spektralnih kanala od kojih su tri u vidljivom (plavi 440-510 nm, zeleni 520-590 nm i crveni 630-685 nm), jedan u prijelaznom (tzv. *Red Edge* 690-730 nm) i blizu infra crvenom (NIR 760-850 nm) dijelu spektra. RapidEye snimci izvorno dolaze u 12 bitnoj rezoluciji koja se zatim procesuiru u 8 bita u vidljivom (RGB prikaz) odnosno 16 bita u tzv. „analitičkom obliku“ što omogućuje pridobivanje vrlo oštih i jasnih snimaka zemljine površine.

2.2.3. Pred-procesuiranje snimaka

Landsat 8 snimci (*Level 1*) preuzeti su s portala <https://earthexplorer.usgs.gov/> i to za datume 18. 6. 2013, 20. 5. 2014., 8. 6. 2015., 5. 7. 2016., 22. 6. 2017., 18. 7. 2018. odnosno u sezoni najveće vegetacijske aktivnosti s minimalnom zastrtošću oblaka. *Landsat Level 1* označava snimke sa terenskom korekcijom kako bi se umanjio utjecaj reljefa na opažani signal. Daljnja obrada podataka odnosila se na transformaciju *Level 1* snimaka iz digitalne numeričke skale (*engl. digital numbers - DN*) u vrijednosti spektralne radijacije na otvoru senzora (*engl. Spectral Radiance at the sensor aperture*) odnosno količinu primljene energije u vatima/metru². Nakon toga je bilo potrebno izvršiti atmosfersku korekciju odnosno transformacija snimka u vrijednosti refleksije na vrhu atmosfere (*engl. Top of atmosphere reflectance – TOA*). Landsat 8 snimci dolaze sa pripremljenim vrijednostima, odnosno faktorima specifičnim za svaki kanal, pomoću kojih se može napraviti neposredna transformacija snimka iz DN u TOA vrijednosti. Snimci u vidljivom dijelu spektra (RGB) su izoštrani s prostorne rezolucije od 30 m na prostornu rezoluciju od 15 m pomoću pankromatskog kanala. Sve navedene pred-pripreme i transformacije preuzetih Landsat 8 snimaka napravljene su u Qgis okruženju (verzija 3.2.3 – Bonn) pomoću „*Semiautomatic classification*“ dodaka (Congedo 2018) namijenjenog za procesuiranje satelitskih snimaka. Nakon atmosferske korekcije, na snimkama su primijenjeni filteri za uklanjanje zastrtosti oblacima u Qgis „*Cloud Masking*“ dodatku (*FMask, Blue Band i Pixel QA*).

Komercijalni RapidEye snimci visoke rezolucije (5 m), dobiveni su besplatno na korištenje za potrebe provođenja znanstvenih istraživanja od strane kompanije Planet (www.planet.com) sa sjedištem u San Franciscu, SAD. Planet je kompanija osnovana 2010. godine čija je glavna djelatnost uspostava novih satelitskih senzora u orbiti oko Zemlje od kojih je trenutno aktivno 150, dok se sama kompanija financira iz prodaje snimaka odnosno na snimkama temeljenih servisa i proizvoda. RapidEye snimci, zajedno sa snimkama PlanetScope (3 m) su ustupljeni Geodetskom Fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu za provođenje znanstvenih istraživanja u okviru projekta Hrvatske zaklade za znanost – GEMINI (*Geospatial Monitoring of Green Infrastructure by Means of Terrestrial, Airborne and Satellite Imagery*). RapidEye snimci su preuzeti s već unaprijed napravljenom atmosferskom korekcijom u obliku orto-rektificiranih proizvoda 3A razine procesuiranja.

2.2.4. Izračun spektralnih indeksa

Daljnji postupak obrade preuzetih satelitskih snimaka na kojima je prethodno napravljena atmosferska korekcija odnosio se na izračun različitih spektralnih satelitskih indeksa. Spektralni satelitski indeksi predstavljaju daljnju transformaciju satelitskih snimaka temeljenu na odnosima između različitih spektralnih kanala (*engl. spectral rationing*) koja omogućava

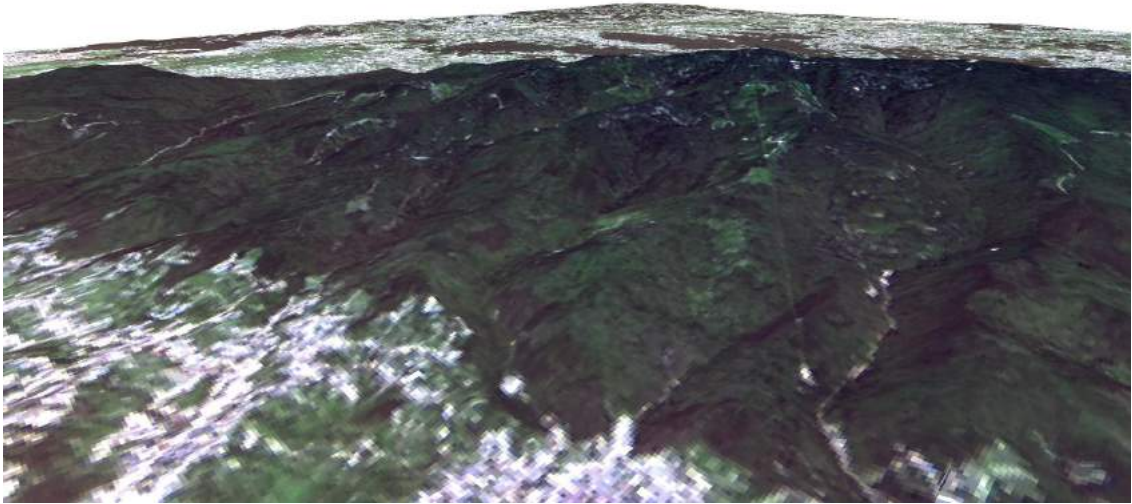
izdvajanje suptilnih značajki specifičnih za pojedini vegetacijski pokrov kao što je npr. sadržaj klorofila u lišću. Najčešće korišteni indeks je NDVI (*engl. Normalized Difference Vegetation Index*) koji predstavlja odnos između kanala u crvenom i infracrvenom dijelu spektra i osjetljiv je na sadržaj klorofila odnosno na sadržaj lisne mase na snimku. Povećani udio lisne mase koja bolje adsorbira crveni vidljivi dio spektra dok odbija nevidljivi infra-crveni dio, rezultira različitim vrijednostima NDVI-a s time da male vrijednosti (0.1-0.2) odražavaju područja bez vegetacije, dok vrijednosti bliže 1 odražavaju gusti šumski pokrov. SAVI (*engl. Soil Adjusted Vegetation Index*) reducira utjecaj refleksije s tla kada je vegetacijski pokrivač relativno rijedak. MSAVI (*engl. Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) predstavlja modificiranu verziju SAVI indeksa u kojoj je također uključen faktor redukcije utjecaja refleksije s tla. NDMI (*engl. Normalized Difference Moisture Index*) ili NDWI (*engl. Normalized Difference Water Index*) temelji se na normaliziranoj razlici infra-crvenih kanala (blizu infracrveni NIR i kratkovalni infracrveni SWIR1) u nevidljivom dijelu spektra koji su osjetljivi na sadržaj vode u lišću tako da se često koriste za detekciju sušnih uvjeta uslijed manjka vlažnosti tla. NBR (*engl. Normalized Burn Ratio*) također se temelji na normaliziranom odnosu infra-crvenih kanala (blizu infracrveni NIR i kratkovalni infracrveni SWIR) samo za razliku od NDMI koristi SWIR2 kanal 7 (2.100-2.300 μm) umjesto SWIR1 kanala 6 (1.560-1.660 μm). NBR2 (*engl. Normalized Burn Ratio 2*) temelji se na normaliziranoj razlici između infra-crvenih SWIR1 i SWIR2 kanala. Svi navedeni indeksi obračunati su iz Landsat 8 snimaka za čitavo područje Medvednice s ciljem prikaza njihovih mogućnosti u detekciji i kvantifikaciji različitih značajki vegetacijskog pokrova. Na RapidEye snimkama koje sadrže znatno manji broj spektralnih kanala (nedostatak kratkovalnih infracrvenih anala poput SWIR-a) obračunat je samo osnovni MSAVI indeks koji daje nešto bolju prostornu razlučivost u odnosu na osnovni NDVI indeks.

2.2.5. Detekcija promjena

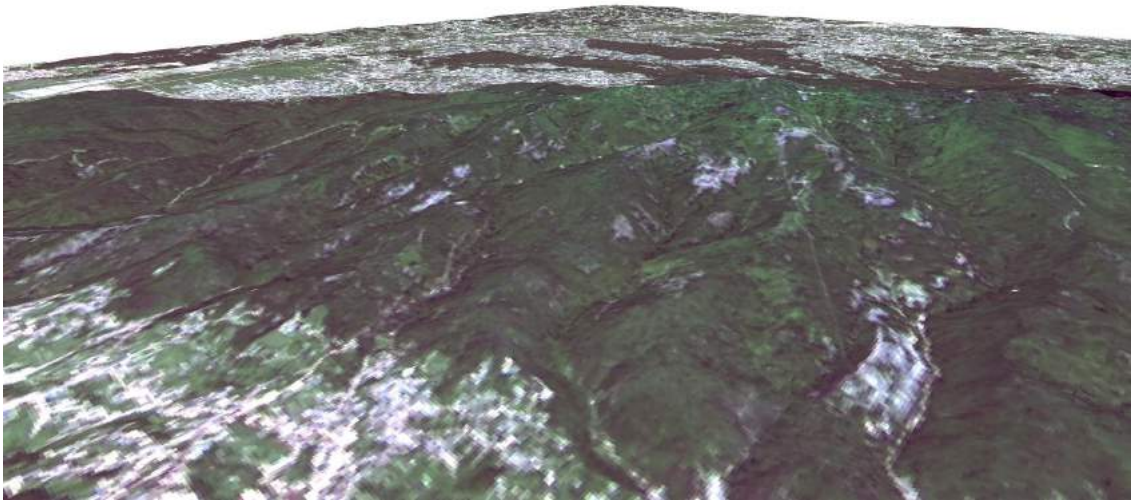
MSAVI indeks kod Landsat 8 i RapidEye senzora korišten je za usporednu analizu detekcije i praćenje promjena vegetacijske aktivnosti na izabranoj površini s vjetroizvalom, neposredno uz potok Bliznec (Slika 1). Obnova vegetacijskog pokrova nakon vjetroizvale također je analizirana pomoću MSAVI indeksa u sukcesivnim mjerenjima u 2014. i 2018. tj. pet godina nakon oluje Teodor.

3. Rezultati

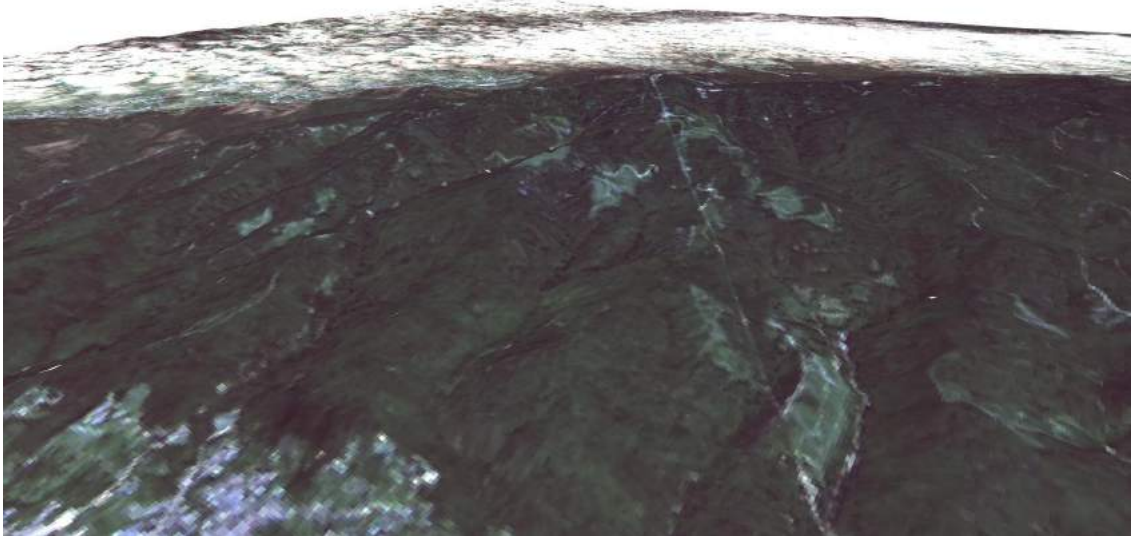
Preliminarni retrospektivni uvid u stanje šuma na Medvednici prije i nakon oluje Teodor moguće je utvrditi metodom vizualizacije temeljene na kolor-kompozitnim snimcima iz vidljivog dijela spektra (Slika 2). Ovako izrađeni kolor-kompozitni snimci izvedeni su iz vidljivih spektralnih Landsat 8 kanala (plavi, zeleni i crveni), izoštreani sa izvornih 30 m na prostornu rezoluciju od 15 m korištenjem tzv. *pan-sharpening* metode pomoću pan-kromatskog (Band 8) kanala. Iz prikazanih snimaka moguće je jasno izdvojiti stradale površine šuma te otprilike uočiti smjer udara olujnog vjetra koji je svom silinom uglavnom zahvatio istočne odnosno jugoistočne ekspozicije na Medvednici. Na snimkama se također može uočiti ponovna uspostava inicijalnog šumskog pokrova kao rezultat sanacije i obnove stradalih šuma pet godina nakon elementarne nepogode.



a)



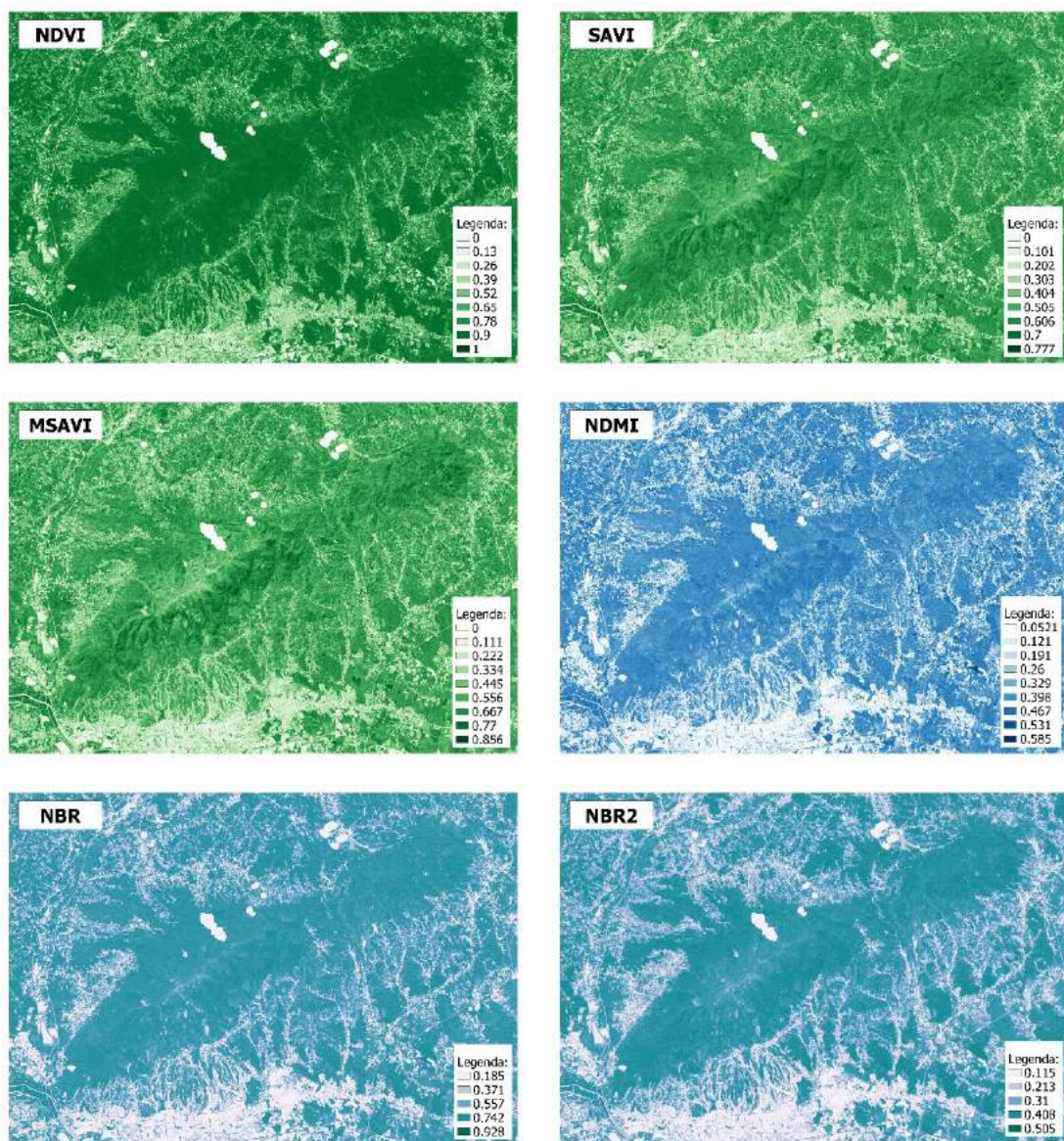
b)



c)

Slika 2. Izgled Medvednice: a) prije vjetroizvala 18. 6. 2013. godine, b) nakon vjetroizvala 20. 5. 2014. godine i c) nakon izvršene sanacije površina 18. 7. 2018. godine iz Landsat 8 snimaka.

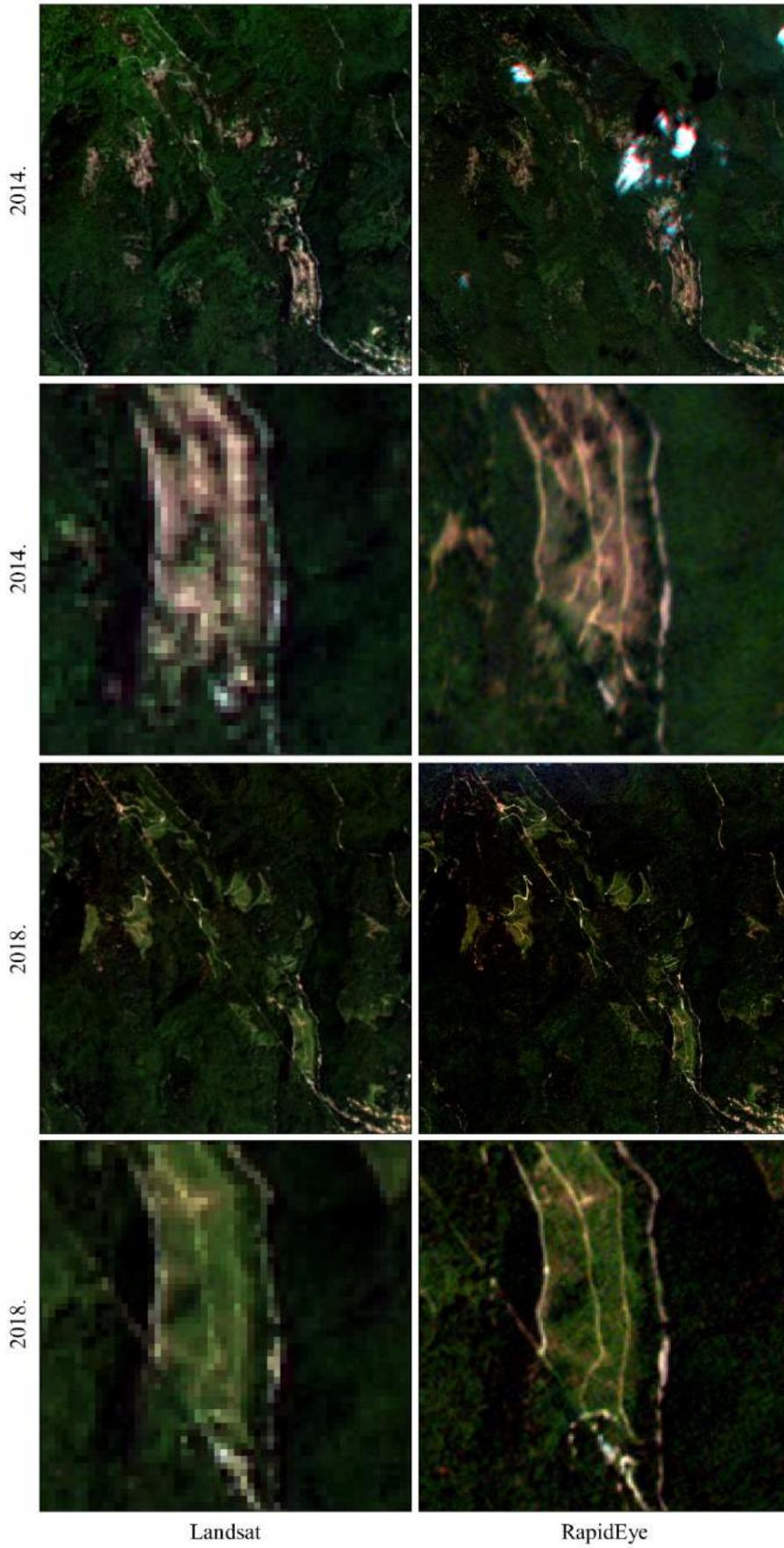
Promjene u vegetacijskom pokrovu moguće je detaljno utvrditi i kvantificirati pomoću navedenih spektralnih vegetacijskih indeksa osjetljivih na sadržaj klorofila, koji se temelje na odnosu crvenog i infracrvenog dijela spektra kao što su NDVI, SAVI i MSAVI. Prostorna razlučivost različitih vegetacijskih indeksa izvedenih iz Landsat 8 snimaka za čitavo područje Medvednice vidljiva je iz usporednog prikaza na slici 3. Na prikazu je jasno uočljiva znatno veća razlučivost promjena u šumskom pokrovu kod korigiranih vegetacijskih indeksa kao SAVI i MSAVI u odnosu na osnovni NDVI indeks. Indeksi koji se temelje samo na nevidljivom, infra-crvenom dijelu spektra kao što je NDMI, NBR i NBR2, također pokazuju izuzetno dobru sposobnost detekcije značajnijih promjena u šumskom pokrovu na snimkama, što se može uočiti iz jasno izdvojenih površina s vjetroizvalama.



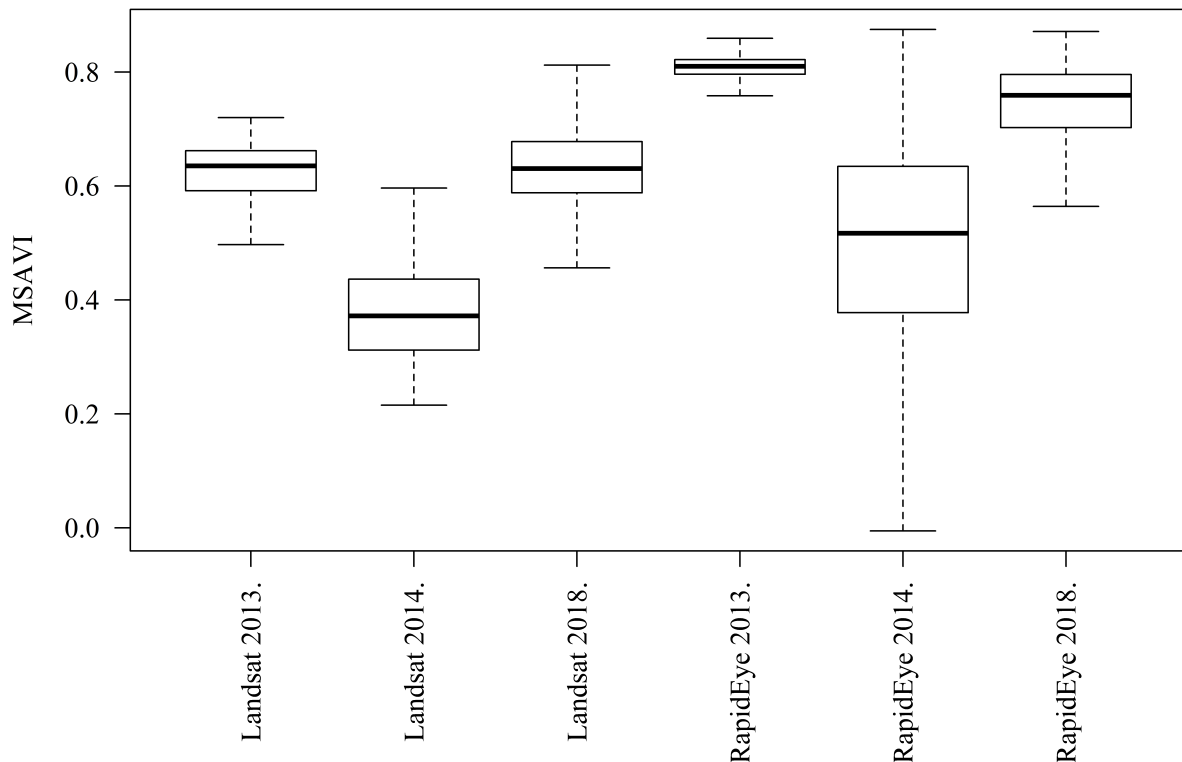
Slika 3. Prikaz mogućnosti razlučivanja šumskog pokrova različitih spektralnih indeksa za područje Medvednice u 2014. godini.

Usporedba razlučivosti detalja između snimaka srednje rezolucije (Landsat 8) te snimaka visoke rezolucije (RapidEye) na površinama vjetroatizvala neposredno uz lokaciju potoka Bliznec, prikazana je na slici 4. Iz snimka stradale površine u 2014. godini na snimkama visoke rezolucije (RapidEye) jasno se ističu šumske vlake koje su izgrađene radi izvlačenja porušene drvene mase te grupacije preostalih stabala, koje međutim nije moguće detaljno razaznati na Landsat 8. Isto tako na RapidEye snimkama iz 2018. godine, pet godina nakon vjetroatizvala, jasno je uočljiv novi šumski pokrov odnosno pomladak bukovih sastojina koje su uspostavljene nakon uspješno izvedene sanacije i obnove na tim površinama. Iz prikazane usporedbe jasno se može utvrditi kako su Landsat 8 snimci srednje rezolucije uglavnom primjenjivi za detektiranje promjena na većem šumskom području odnosno značajnijih promjena na razini šumske sastojine, odjela i odsjeka, koje je moguće detektirati sa prostornom rezolucijom od 30 m. S druge strane, RapidEye snimci visoke rezolucije omogućavaju detekciju promjena unutar samih sastojina do razine pojedinačnih stabala koja se mogu izdvojiti na snimkama u prostornoj rezoluciji od 5 m.

Kao primjer kvantitativnog praćenje stanja šumske vegetacije na površinama pod vjetroatizvalama korišten je MSAVI indeks kojeg je bilo moguće obračunati na oba senzora s ciljem njihove usporedbe (slika 5). Vrijednosti MSAVI indeksa u 2013. godini odgovaraju prosječnim vrijednostima u tamošnjim bukovim sastojinama nenarušenog sklopa. Prosječne vrijednosti MSAVI-a su nešto niže kod Landsat 8 u odnosu na RapidEye čemu jedan od razloga može biti lošije izvedena atmosferska korekcija kod Landsat 8 napravljena u eksternoj Qgis aplikaciji u odnosu na preuzete RapidEye snimke s unaprijed, od proizvođača izvedenom korekcijom. MSAVI indeks kod oba senzora pokazuje znatno niže vrijednosti u 2014. godini čemu je uzrok prekid vegetacijske aktivnosti na površinama vjetroatizvala. RapidEye snimci, međutim, pokazuju značajno veći rasap vrijednosti MSAVI indeksa koji je posljedica puno detaljnijeg izdvajanja površina u rasponu od golog tla bez vegetacije (npr. traktorske vlake) pa do preostalih obraslih dijelova. Iz prikazane obrade vidljivo je kako su se vrijednosti MSAVI indeksa u 2018. godini, na oba senzora gotovo u potpunosti izjednačile s prvobitnim stanjem iz 2013. prije vjetroatizvala.



Slika 4. Usporedba Landsat 8 i RapidEye snimaka 2014. i 2018. godine na lokaciji vjetroizvala uz područje potoka Bliznec.



Slika 5. Usporedne vrijednosti MSAVI indeksa za oba senzora na odabranoj površini s vjetroizvalama tijekom promatranog razdoblja.

4. Diskusija i zaključak

Prikazani prethodni rezultati istraživanja ukazuju na različite mogućnosti primjene multispektralnih satelitskih snimaka u šumsko-gospodarskoj praksi, koji osim posredne izmjere i kvantifikacije šumskog pokrova, omogućuju i vizualnu prezentaciju promjena, što je posebno izraženo na primjeru analize obuhvata šumskih šteta od vjetroizvala na Medvednici. Satelitska opažanja, u odnosu na klasične terestičke načine izmjera, imaju značajnu prednost zbog prostorne i vremenske višedimenzionalnosti. Snimke Landsat 8, koji je operativan od početka 2013. godine, te RapidEye koji je operativan od 2008. godine omogućile su uvid u stanje šumskog pokrova na Medvednici neposredno prije vjetrooloma, a također i uvid u stanje oporavka šumske vegetacije do današnjeg dana. Prostorna višedimenzionalnost vidljiva je na primjeru raspona obuhvata interpretiranog područja koji se kreće od čitavog prostora Medvednice, koje je obuhvaćeno Landsat 8 snimkama, pa do jasno razlučivih dijelova površina vjetroizvala na RapidEye snimku visoke rezolucije. Iz komparativne usporedbe senzora može se uočiti kako su Landsat snimci od 30 m. odnosno 15 m. prvenstveno namijenjeni za analizu šireg prostornog područja te da su primjenjivi za detekciju stanja minimalno na razini sastojine odnosno odjela/odsjeka, najmanje jedinice u šumsko gospodarskoj razdiobi. S druge strane, RapidEye snimci visoke rezolucije od 5 m. omogućuju razlučivanje detalja unutar šumske sastojine, odjela i odsjeka, skoro do razine grupa stabla unutar sastojine (progale, vlake, različiti stadiji obnove i dr.).

Primjer prostorne uporabljivosti Landsat 8 snimaka predstavlja istraživanje od Šimić i dr. (2015) u kojem su Landsat 8 snimci srednje prostorne rezolucije korišteni za detekciju i klasifikaciju šteta od ledoloma iz 2014. godine na čitavom području Gorskog kotara. Također je potrebno izdvojiti primjer korištenja Landsat 8 snimaka na području šume Česma (Vrbovec) sa strane Rumora i dr. (2018). U šumsko gospodarskoj operativi, međutim, često je od velikog značaja pridobivanje informacija na puno detaljnijoj razini odnosno na razini pojedinačnog stabla ili grupe (prorede, sanitarne sječe i dr.) za čiju namjenu su prikladni snimci visoke odnosno vrlo visoke rezolucije. Istraživanja razlučivosti snimaka visoke i vrlo visoke rezolucije (RapidEye 5 m, PlanetScope 3 m i WorldView 2) na temelju čega je provedena klasifikacija i izdvajanje zelene infrastrukture na urbanom području grada Zagreba provodili su Gašparović i dr. (2018) i Dobrinčić i dr. (2018). Međutim, analiza mogućnosti navedenih senzora visoke rezolucije na homogenoj šumskoj površini s ciljem kategorizacije različitih strukturnih osobina šumskih sastojina odnosno, detekciji i praćenju obnove šuma do danas nije u Hrvatskoj rađena u značajnijoj mjeri.

U konkretnom slučaju na istraživanoj površini uz potok Bliznec, olujni vjetar u studenom 2013. godine uzrokovao je izvalu stabala u čistoj sastojini obične bukve. Tijekom 2014. godine, Hrvatske šume, šumarija Zagreb, izgradila je traktorske vlake putem kojih su se izvukla porušena stabla te je uveden tzv. šumski red. Na tim površinama zatim se je pristupilo obnovi radi ponovne uspostave šumskog pokrova te mladih bukovih sastojina koje trebaju zamijeniti stare stradale sastojine obične bukve. Obična bukva je vrsta koja se relativno dobro prirodno pomlađuje tako da je obnova na tim površinama obavljena putem naplođivanja sjemenom (bukvicama) iz okolnih stabala i sastojina. Kod obične bukve do osrednjeg uroda dolazi u pravilu svake 2-3 godine, a puni urod se javlja u razmaku od 4-8 godina (Matić i dr. 2003). Nakon obnove površina, slijedi postupak njege koji obuhvaća uzgojne postupke kojima se nastoji formirati takva struktura sastojina koja će osiguravati stabilnost, produktivnost i mogućnost uspješne prirodne obnove. Njega bukovih sastojina od najmlađih razvojnih stadija do pune zrelosti obuhvaća (Matić i dr. 2003); radove s tlom radi uklanjanja korova i poboljšanja edafskih uvjeta, zaštitu mlade sastojine od različitih štetočina, popunjavanje nedovoljno obnovljenih površina, njegu sastojine čišćenjem kod sastojina u stadiju koljika, njegu sastojine proredom kod mladih, srednjedobnih i starih sastojina. Također, bukove sastojine od najranije mladosti pa do kraja svoje ophodnje (sječive zrelosti) od 100 godina prolaze različite razvojne stadije kao što su ponik, pomladak, mladik, mlada sastojina, srednjedobna, starija i stara sastojina. Iz prikaza površina, posebno na RapidEye snimcima visoke rezolucije, vidljivo je kako se na snimcima mogu vrlo jasno vizualno razlučiti odnosno pratiti različiti razvojni stadiji pomlatka odnosno mladika s jasno izraženim sklopom krošanja. Treba također napomenuti kako je nakon uspješno izvršene obnove na toj površini, stvoren uglavnom homogen vegetacijski pokrov kod kojeg je vegetacijska aktivnost odnosno lisna površina gotovo jednaka lisnoj površini kod starih sastojina prije obnove, a što potvrđuju vrijednosti izračunatog MSAVI indeksa. Iz navedenih rezultata, vidljivo je kako se iz vrijednosti MSAVI vegetacijskog indeksa, kod oba ispitivana senzora, može uspješno pratiti stanje obnove šumskih površina, uz naknadno izvedenu provjeru stanja na terenu (tzv. *ground truth*) što predstavlja jedan od ciljeva u nastavku ovog započetog istraživanja.

U današnje vrijeme satelitske informacije imaju izrazito veliki potencijal primjene u šumarstvu, temelj čega predstavlja program globalnih opažanja Europske Unije, Copernicus. Posebni značaj za ispitivanje inovativnih mogućnosti primjene daljinskih istraživanja predstavlja niz najnovijih satelitskih misija Sentinel te dostupnost snimaka na korištenje široj znanstvenoj zajednici. Trenutno je vrlo izražena inicijativa EU s ciljem ispitivanja različitih načina primjene i komercijalizacije satelitskih informacija, prvenstveno prikupljenih sa Sentinel-a, u različitim gospodarskim sektorima koji gospodare s zemljištem (šumarstvo,

poljoprivreda, zaštita prirode, vodno gospodarstvo...). S tim u vezi 2018. godine u sklopu Obzor 2020, najvećeg znanstveno inovacijskog programa EU, započet je projekt pod nazivom „My Sustainable Forest“ (www.mysustainableforest.eu) koji ima za cilj, putem izrade komercijalnih servisa, iznaći nove mogućnosti operacionalizacije optičkih daljinskih opažanja srednje, visoke i vrlo visoke rezolucije kao i radarskih snimaka te Lidar-a. „My Sustainable Forest“ je inovacijsko-tehnološki projekt u kojem pod vođenjem industrijsko-tehnološke korporacije GMV iz Madrida (Španjolska), sudjeluje niz partnera, šumsko-gospodarskih asocijacija, znanstvenih instituta i tehnoloških kompanija iz Španjolske, Portugala, Francuske, Litve, Češke Republike i Hrvatske (Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko). Aktivnosti projekta temelje se na izradi skoro u potpunosti automatiziranog sustava odnosno platforme s integriranim i validiranim proizvodima daljinskih istraživanja u šumsko gospodarske operativne procese (inventura šuma, analiza kakvoće stabala, procjena biomase, praćenje stanja sastojina, značajki ekosustava i dr.) s ciljem učinkovitijeg upravljanja šumama. Usporedno s navedenom aktivnošću na EU razini, trenutno su u Republici Hrvatskoj aktualne dvije znanstveno-istraživačke inicijative koje imaju za cilj ispitivanje uporabljivosti daljinskih istraživanja, odnosno integraciju satelitskih snimaka, Lidar-a te informacija pridobivenih terestičkim snimkama i bespilotnim letjelicama kako u urbanim tako i u prirodnim šumama. Od inicijativa vezanih uz urbane šume, potrebno je istaknuti projekt Hrvatske zaklade znanost (HRZZ), GEMINI (Geoprostorno praćenje zelene infrastrukture pomoću terestičkih, zrakoplovnih i satelitskih opažanja (nositelj Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, <https://gemini.geof.hr/>) koji se temelji na korištenju satelitskih opažanja visoke rezolucije, bespilotnih letjelica i terestičkih multispektralnih video zapisa pri kartiranju vegetacije u urbanom područja grada Zagreba. Kroz trenutno aktivni HRZZ projekt 3D FORINVENT (nositelj Hrvatski šumarski institut) ispituje se točnost proizvoda (oblak točaka, DMVK, ortofoto) izvedenih iz različitih 3D podataka (aerosnimke, satelitske snimke, snimke bespilotne letjelice) i različitih prostornih rezolucija, za procjenu varijabli pojedinačnih stabala i šumskih sastojina na raznim prostornim razinama. Također je potrebno spomenuti i nedavno završen HRZZ projekt AFORENSA (Napredne metode procjene usluga šumskih ekosustava) koji se temeljio na objedinjavanju terestičkih i satelitskih informacija o stanju i promjenama u šumskim ekosustavima.

Zahvala

Ovaj rad izrađen je u sklopu aktivnosti projekta Obzor 2020 „My Sustainable Forest“, te uz potporu Hrvatske zaklade za znanost i projekata GEMINI (Geoprostorno praćenje zelene infrastrukture pomoću terestičkih, zrakoplovnih i satelitskih opažanja) i 3D FORINVENT (Pridobivanje informacija iz različitih optičkih 3D izvora daljinskih opažanja za inventarizaciju šuma).

Literatura

Congedo L. (2018): Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, Release 6.0.1.1.

Dobrinić, D., Gašparović, M., Župan, R. (2018): Horizontal accuracy assessment of PlanetScope, RapidEye and WorldView-2 satellite imagery. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Photogrammetry and Remote Sensing.

ESA (2012): Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. European Space Agency.

Gašparović, M., Dobrinić, D., Medak, D. (2018): Urban vegetation detection based on the land-cover classification of PlanetScope, RapidEye and WorldView-2 satellite imagery. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Photogrammetry and Remote Sensing.

Gutman G. , Masek J.G. (2012): Long-term time series of the Earth's land-surface observations from space, *International Journal of Remote Sensing*, 33:15, 4700-4719.

Li J., Roy D.P. (2017): A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sens.* 9, 902.

Matić, S., Anić, I., Oršanić, M. (2003): Uzgojni postupci u bukovim šumama. Obična bukva u Hrvatskoj, Matiće, S. (ed.), *Akademija šumarskih znanosti*, 340-369.

Matić, S., Anić, I., Oršanić, M. (2003): Osnivanje šuma obične bukve. Obična bukva u Hrvatskoj, Matiće, S. (ed.), *Akademija šumarskih znanosti*, 307-325.

Mishra S., Shrivastava P., Dhurvey P. (2017): Change Detection Techniques in Remote Sensing: A Review. *International Journal of Wireless and Mobile Communication for Industrial Systems*. Vol. 4, No. 1 , 1-8.

PP Medvednica (2014): Prostorni plan parka prirode Medvednica, Knjiga 1. Odredbe za provođenje, Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, 1-74.

Rumora L., Miler M., Medak D. (2018): Utjecaj fuzije snimki na primjeru površine šumskog područja koristeći nenadziranu klasifikaciju. *Šumarski list*, 1-2: 67-75.

Šimić M.A., Rapasinghe P., Balenović I., Grosevski P. (2015): Assessment of Forest Damage in Croatia using Landsat-8 OLI Images. *South-east Eur. For.* 6 (2): 159-169.

USGS 2016 Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, Version 2.0, EROS Sioux Falls, South Dakota, p 106.

Possibilities of the application of the medium-resolution Landsat 8 and the high-resolution RapidEye optical imagery in visualization and detection of changes in the forest cover by windthrows

ABSTRACT. This paper presents a comparison of the satellite information of medium (Landsat 8, 30 m) and high (RapidEye, 5 m) resolutions for the purpose of examining the visual and quantitative estimates of wind damages and the renovation of the forest cover following the Theodor storm in November 2013 in Medvednica mountain, North-western Croatia. 3D visualization of the whole Medvednica area was derived from the Landsat 8 RGB channels of the visible part of the spectrum, pan-sharpened with the pan-chromatic channel on 15 m spatial resolution for visual forest damages detection. The spatial sensitivity of different satellite indices (NDVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NBR, NBR2), based on Landsat 8 imagery, as a quantitative measure of the state of the vegetation cover, was investigated throughout the whole Medvednica area. From the investigated indices, the best detection of the changes in the forest cover was achieved by soil corrected indices such as SAVI and MSAVI in relation to the standard NDVI index. Indices based on the infra-red part of the spectra (NDMI, NBR, NBR2) showed quite good performance in detection of the damages of the forest cover. By the comparative assessment on the chosen pilot area with severe windthrows near Bliznec, a significant advantage of the high-resolution RapidEye imagery in comparison with Landsat 8, was confirmed for the potential purpose of the more precise

silvicultural subgroups delineation and monitoring of the success of the restoration of the young forest cover. Based on the obtained results, substantial possibilities of medium and high-resolution satellite imagery have been identified, both for the purpose of damages assessment after natural disasters and for the monitoring of the reforestation on these surfaces, which will be confirmed in the further course of this research. This research is performed as a part of the ongoing activities in the Horizon2020 project “My Sustainable Forest” with support of the Croatian science foundation projects GEMINI and 3D Forinvent.

Keywords: remote sensing, satellite observations, Landsat 8, RapidEye, forest damages, windthrows, forest restoration, Medvednica mountain