

UDK 528.88:630*42:630*58:(497.5)(234 Medvednica)
Pregledni znanstveni članak / Review

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

Ivan PILAŠ – Jastrebarsko¹, Mateo GAŠPAROVIĆ – Zagreb²,
Martina ĐODAN – Jastrebarsko¹, Ivan BALENOVIĆ,
Ivica DUGAČKI – Zagreb²

SAŽETAK. U radu su dani prikaz i usporedba satelitskih informacija srednje (Landsat 8, 30 m) i visoke (RapidEye, 5 m) rezolucije radi ispitivanja mogućnosti vizualne i kvantitativne procjene šteta od vjetroizvala na Medvednici, nakon oluje Teodor u studenome 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 pankromatskoga kanala. Prostorna razlučivost različitih satelitskih indeksa (NDVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NBR, NBR2), kao kvantitativne mjere stanja vegetacijskog pokrova, ispitivana je na temelju snimaka Landsat 8 na čitavom području Medvednice. Od ispitivanih indeksa najbolja razlučivost vegetacijskog pokrova postignuta je na korigiranim SAVI i MSAVI indeksima u odnosu na NDVI, dok su indeksi temeljeni na infracrvenom dijelu spektra (NDMI, NBR, NBR2) pokazali dosta dobru osjetljivost pri detekciji narušenosti šumskog pokrova nakon vjetroizvala. Na ispitivanom dijelu površine s vjetroizvalom, neposredno uz potok Bliznec, utvrđena je znatna komparativna prednost snimaka visoke rezolucije (RapidEye) pri razlučivanju šteta na pokrovu odnosno pri praćenju stanja obnove šumske vegetacije. Na osnovi dobivenih prethodnih rezultata utvrđene su znatne mogućnosti satelitskih snimaka srednje i visoke rezolucije, kako u svrhu detekcije šteta nakon prirodne nepogode, tako i pri praćenju obnove šuma na tim površinama, što će potvrditi daljnji tijek ovog istraživanja.

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

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

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

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

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

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

1. Uvod

Daljinska su istraživanja (engl. *remote sensing*) niz naprednih metodoloških i tehničkih rješenja za prikupljanje informacija s površine Zemlje, iz atmosfere i oceana. Temelje se na postupcima transformacije elektromagnetskog zračenja u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra u 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 koriste se vlastitim izvorom elektromagnetskog zračenja čiji se odbлесак od Zemljine površine povratno detektira i analizira. U prvu skupinu pripadaju tzv. optički multispektralni i hiperspektralni senzori koji detektiraju refleksiju u različitim valnim duljinama, a u drugu skupinu 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 znatan 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 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 multispektralne senzore, koji očitavaju desetak, te hiperspektralne 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. Program Landsat, 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 te su jedan od najvažnijih izvora globalnih retrospektivnih podataka (Gutman i Masek 2012). Korištenje satelitskih snimaka Landsat posebno je intenzivirano unatrag nekoliko godina, od kada su arhivi snimaka postali besplatni i javno dostupni na USGS portalu <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Kao znatan doprinos poboljšanju kontinuiteta i frekvencije globalnih opažanja, u programu GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) europske svemirske agencije (ESA) od nedavno je uspostavljen novi sustav optičkih satelitskih opažanja zvan Sentinel (ESA 2012). Sustav Sentinel 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 što ih provodi ESA, čija je prednost da je prema optičkim karakteristikama senzora u velikoj mjeri usporediva s

NASA-USGS misijom Landsat 8, čime se zajednički omogućava globalni ciklus opažanja Zemljine površine u prosjeku svakih 2,9 dana. Kombinirano korištenje većeg broja satelita znatno povećava vjerojatnost dobivanja 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 omogućavanjem besplatnog pristupa Sentinel proizvodima dostupnim na web portalu: <https://scihub.copernicus.eu/>.

Za razliku od navedenih satelitskih senzora srednje prostorne rezolucije (10–30 m), trenutačno 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: 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 jedan su od najvrjednijih prirodnih i ekonomskih resursa, koji zauzima površinu od oko 2 milijuna hektara te je dobivanje aktualnih informacija o stanju i promjenama u šumskom pokrovu preduvjet za gospodarenje šumama na potrajan odnosno održiv način. Stoga je šumarstvo kao struka koja upravlja šumskim resursima sektor koji može u znatnoj mjeri upotrebljavati raspoložive satelitske informacije radi poboljšanog praćenja i detektiranja promjena u šumama zbog redovitih gospodarskih aktivnosti, prirodnih nepogoda (suše, požari, vjetrolomi, 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 praktično je nepostojeće, i to unatoč vrlo očitim mogućnostima primjene satelitskih opažanja u šumsko-proizvodnom ciklusu.

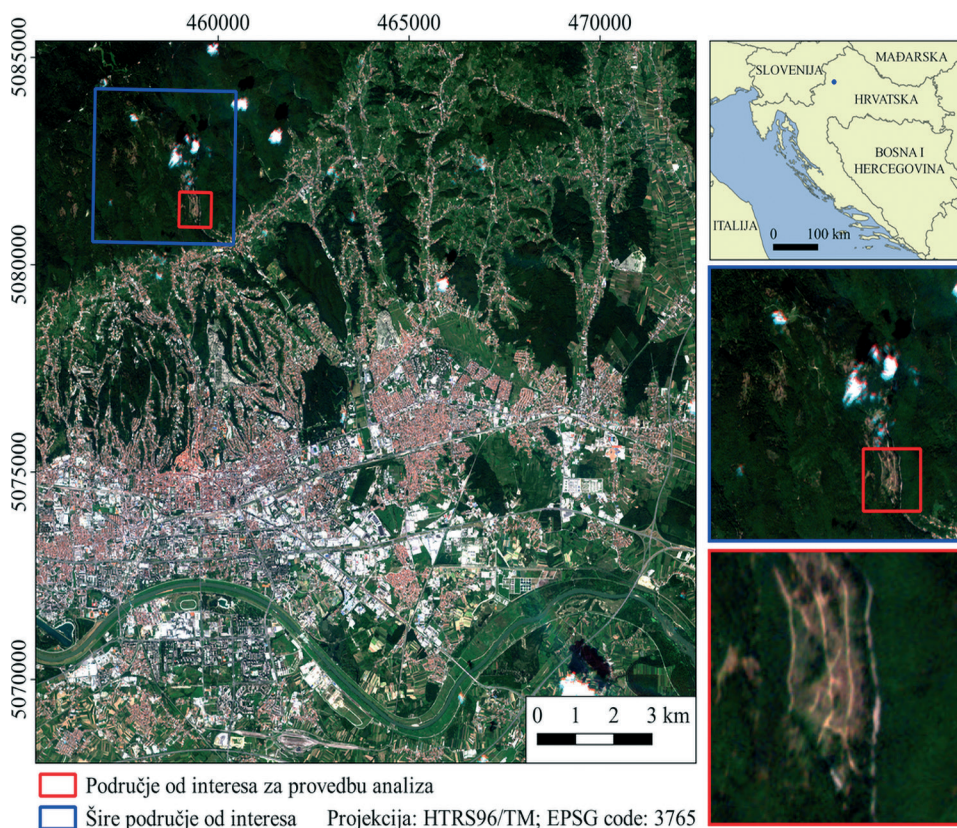
S obzirom na izneseno ovaj rad ima svrhu analizom široko poznatog i za javnost vrlo aktualnog slučaja vjetroloma na Medvednici u studenome 2013. godine uputiti šumarsku i geodetsku struku na mogućnosti primjene suvremenih satelitskih opažanja srednje i visoke rezolucije pri detekciji promjena i praćenju obnove šumskog pokrova. U radu su, na osnovi prvih rezultata obrade satelitskih snimaka vjetroloma 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 veliku krajobraznu, ekološku, biološku i rekreativnu ulogu za stanovnike grada Zagreba. Medvednica, odnosno njezin zapadni dio, zbog svojih je prirodnih vrijednosti 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 trenutačno 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 je obroncima najniži tip, šuma hrasta kitnjaka i običnoga graba, koja na pojedinim mjestima dosta duboko ulazi u urbano gradsko područje. Na hrast kitnjak nastavlja se zona bukovih šuma, zatim šuma bukve i jele koja se proteže duž glavnoga grebena. U šumskogospodarskom smislu, područje Medvednice razgraničeno je 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. Posljednjih nekoliko godina područje Medvednice u više je navrata bilo izvrgnuto prirodnim nepogodama koje su utjecale na devastaciju prirodnog šumskog pokrova (slika 1). Jedna od najvećih nepogoda dogodila se u studenome 2013., kada je zbog oluje Teodor porušen znatan dio šuma u središnjem dijelu Medvednice, čiji su ožiljci vidljivi do danas.



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

2.2. Preuzimanje i obrada satelitskih podataka

Za provedbu ovog istraživanja prikupljene su raspoložive satelitske snimke koje 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, korištene su snimke najnovije misije Landsat 8 (30 m), dok su za usporedbu za isto razdoblje korištene snimke RapidEye satelita visoke rezolucije (5 m).

2.2.1. Landsat 8

Landsat 8 osmi je u nizu satelita u sklopu programa Landsat, koji je operativan od veljače 2013. godine. Sastoji se od dva senzora, OLI (engl. *Operational Land Imager*) i TIRS (engl. *Thermal Infrared Sensor*), koji prikupljaju informacije u devet kratkovalnih i dva termalna dugovalna kanala (USGS 2016). Prostorna rezolucija snimaka kreće se u rasponu od 15 m u pankromatskom, 30 m u multispektralnim i 100 m u termalnim kanalima. Radiometrijska rezolucija od 12 bita omogućuje postizanje iznimno dobre razlučivosti vizura na snimkama. Za razliku od prethodnih misija, OLI multispektralni senzor u 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 kanal Cirrus (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 konstelacija je od 5 satelitskih senzora koji su operativni od 2008. godine i omogućuju dobivanje snimaka Zemljine površine sa 630 km visine na dnevnoj frekvenciji opažanja. Senzor RapidEye 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), a po jedan u prijelaznom (tzv. *Red Edge* 690–730 nm) i blizu infracrvenom (NIR 760–850 nm) dijelu spektra. Snimke RapidEye 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. Predprocesuiranje snimaka

Snimke Landsat 8 (*Level 1*) preuzete 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 s terenskom korekcijom kako bi se umanjio utjecaj reljefa na opažani signal. Daljnja obrada podataka odnosila se na transformaciju snimaka *Level 1* 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 W/m^2 .

Nakon toga je bilo potrebno obaviti atmosfersku korekciju odnosno transformaciju snimaka u vrijednosti refleksije na vrhu atmosfere (engl. *Top of atmosphere reflectance – TOA*). Snimke Landsat 8 dolaze s pripremljenim vrijednostima, odnosno faktorima specifičnim za svaki kanal, pomoću kojih se može napraviti neposredna transformacija snimaka iz DN u TOA vrijednosti. Snimke u vidljivom dijelu spektra (RGB) izoštrene su s prostorne rezolucije od 30 m na prostornu rezoluciju od 15 m pomoću pankromatskoga kanala. Sve navedene predpripreme i transformacije preuzetih snimaka Landsat 8 obavljene su u Qgis okruženju (verzija 3.2.3 – Bonn) pomoću dodatka *Semiautomatic classification* (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*).

Komercijalne snimke RapidEye visoke rezolucije (5 m) dobivene su besplatno na korištenje za potrebe provođenja znanstvenih istraživanja od 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 trenutačno aktivno 150, a financira se iz prodaje snimaka odnosno na snimkama temeljenih servisa i proizvoda. Snimke RapidEye, zajedno sa snimkama PlanetScope (3 m) ustupljene su Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za provođenje znanstvenih istraživanja u projektu Hrvatske zaklade za znanost – GEMINI (*Geospatial Monitoring of Green Infrastructure by Means of Terrestrial, Airborne and Satellite Imagery*). Snimke RapidEye preuzete su s već unaprijed napravljenom atmosferskom korekcijom u obliku ortorektificiranih proizvoda 3A razine procesuiranja.

2.2.4. Izračun spektralnih indeksa

Daljnji postupak obrade preuzetih satelitskih snimaka na kojima je prethodno obavljena atmosferska korekcija odnosio se na izračun različitih spektralnih satelitskih indeksa. Spektralni satelitski indeksi daljnja su transformacija satelitskih snimaka temeljena 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 je korišten indeks NDVI (engl. *Normalized Difference Vegetation Index*) koji označava 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 a odbija nevidljivi infracrveni dio, rezultira različitim vrijednostima NDVI-a tako 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*) modificirana je verzija 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 infracrvenih kanala (blizu infracrveni NIR i kratkovalni infracrveni SWIR1) u nevidljivom dijelu spektra koji su osjetljivi na sadržaj vode u lišću tako da se često upotrebljavaju za detekciju sušnih uvjeta zbog manjka vlažnosti tla. NBR (engl. *Normalized Burn Ratio*) također se temelji na normaliziranom odnosu infracrvenih kanala (blizu infracrveni NIR i kratkovalni

infracrveni SWIR), samo što za razliku od NDMI upotrebljava 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 infracrvenih SWIR1 i SWIR2 kanala. Svi navedeni indeksi obračunati su iz snimaka Landsat 8 za čitavo područje Medvednice u svrhu prikaza njihovih mogućnosti u detekciji i kvantifikaciji različitih značajki vegetacijskog pokrova. Na snimkama RapidEye koje sadrže znatno manji broj spektralnih kanala (nedostatak kratkovalnih infracrvenih kanala 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

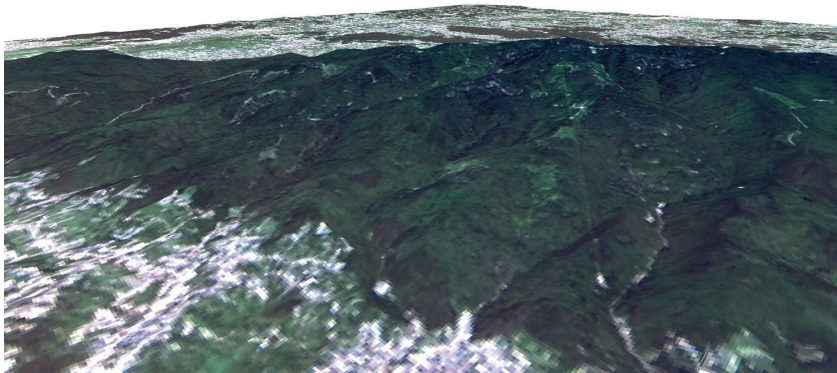
MSAVI indeks kod senzora Landsat 8 i RapidEye korišten je za usporednu analizu detekcije i praćenje promjena vegetacijske aktivnosti na izabranom površini s vjetroizvalom, neposredno uz potok Bliznec (slika 1). Obnova vegetacijskog pokrova nakon vjetroizvale također je analizirana pomoću MSAVI indeksa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

3. Rezultati

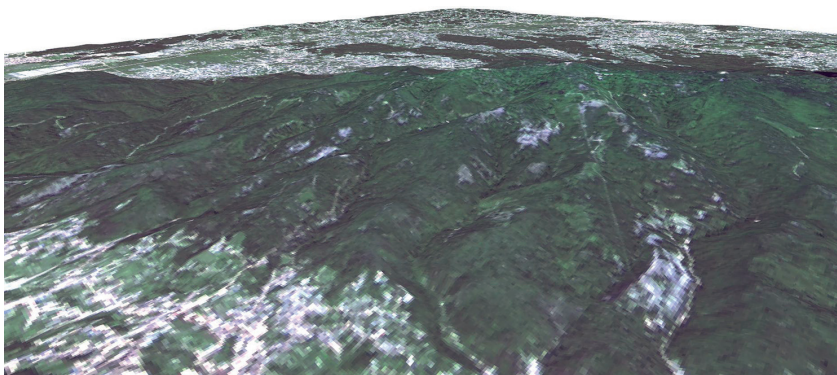
Preliminarni retrospektivni uvid u stanje šuma na Medvednici prije i nakon oluje Teodor moguće je utvrditi metodom vizualizacije temeljene na kolor-kompozitnim snimkama iz vidljivog dijela spektra (slika 2). Tako izrađene kolor-kompozitne snimke izvedene su iz vidljivih spektralnih kanala Landsat 8 (plavi, zeleni i crveni), izoštranih s izvornih 30 m na prostornu rezoluciju od 15 m korištenjem tzv. *pan-sharpening* metode pomoću pankromatskog (Band 8) kanala. Iz prikazanih snimaka moguće je jasno izdvojiti stradale površine šuma te otprilike uočiti smjer udara olujnog vjetra koji je svom silinom zahvatio uglavnom istočne odnosno jugoistočne ekspanzije 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.

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 snimaka Landsat 8 za čitavo područje Medvednice vidljiva je iz usporednog prikaza na slici 3. Na prikazu je jasno uočljiva znatno veća razlučivost promjena u šumskom pokrovu na korigiranim vegetacijskim indeksima poput SAVI i MSAVI u odnosu na osnovni NDVI indeks. Indeksi koji se temelje samo na nevidljivom, infracrvenom dijelu spektra kao što je NDMI, NBR i NBR2, također pokazuju iznimno dobru sposobnost detekcije znatnijih promjena u šumskom pokrovu na snimkama, što se može uočiti iz jasno izdvojenih površina s vjetroizvalama.

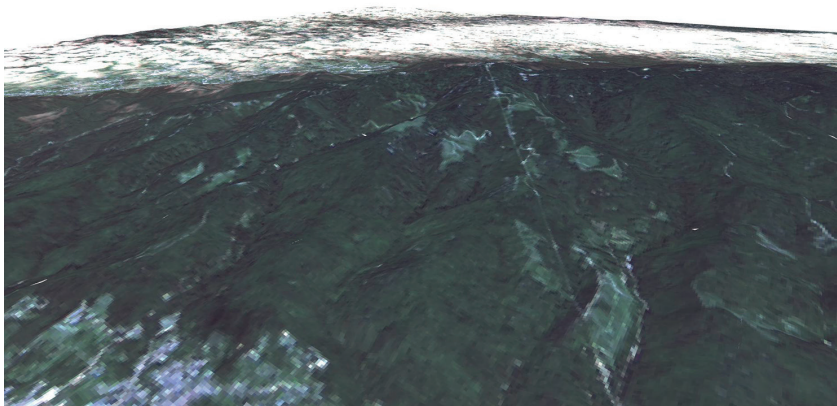
Usporedba razlučivosti detalja između snimaka srednje rezolucije (Landsat 8) te snimaka visoke rezolucije (RapidEye) na površinama vjetroizvala neposredno uz lokaciju potoka Bliznec, prikazana je na slici 4. Na snimkama stradale površine iz 2014. godine na snimkama visoke rezolucije (RapidEye) jasno se ističu šumske vlake izgrađene radi izvlačenja porušene drvene mase te grupacije preostalih stabala,



a)

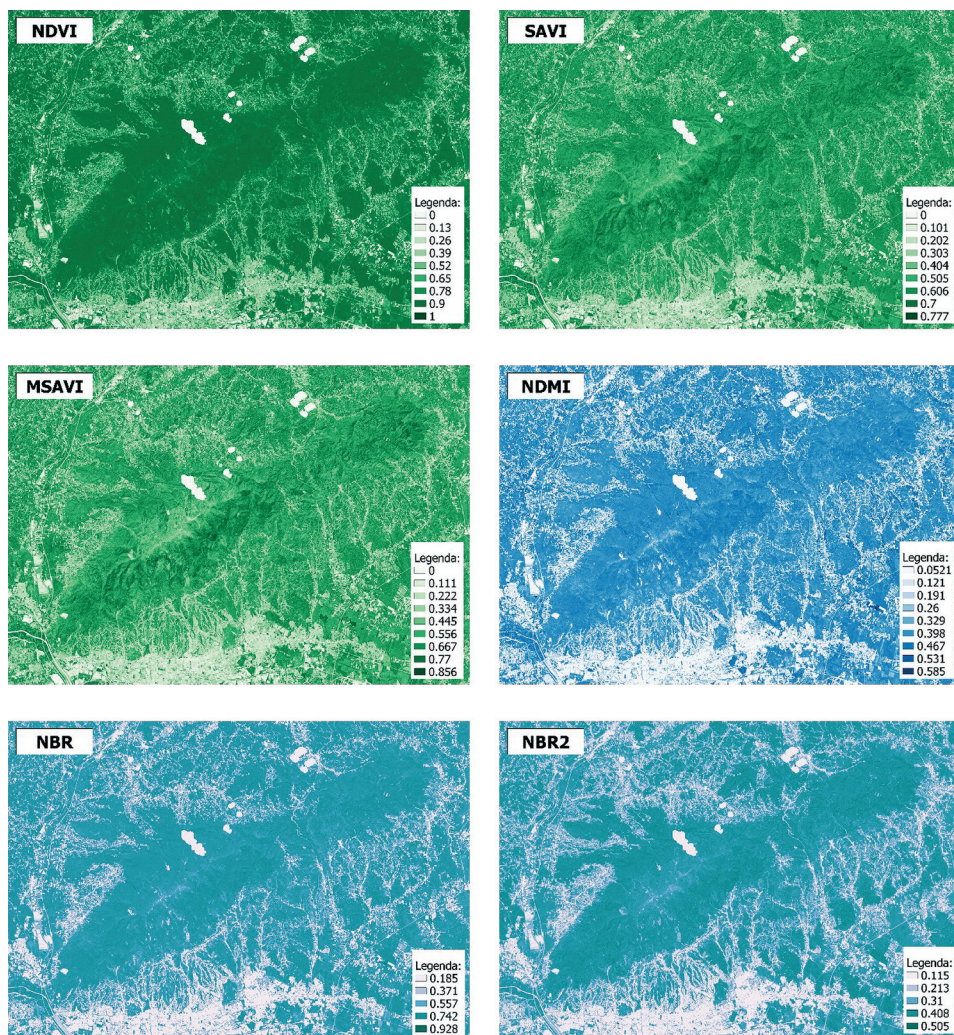


b)



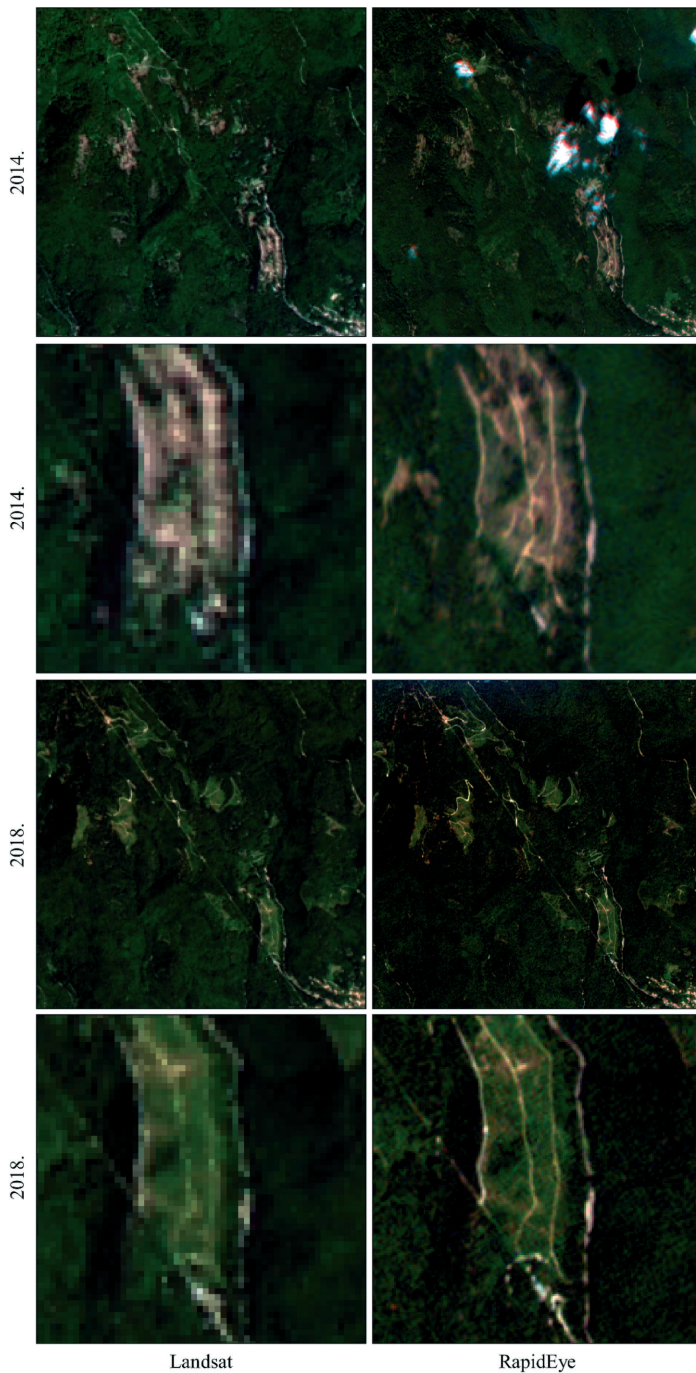
c)

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

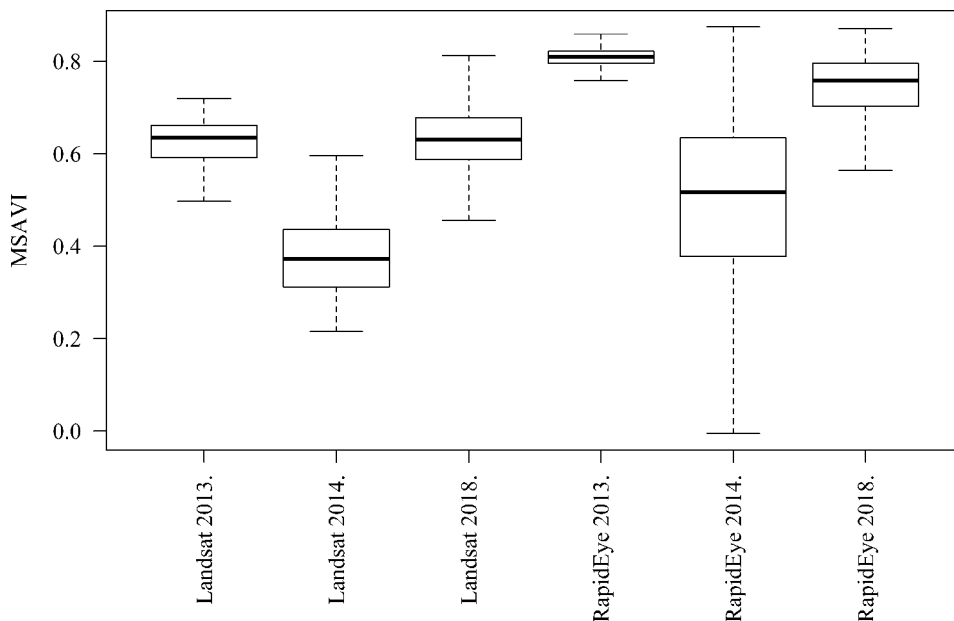


Slika 3. Prikaz mogućnosti razlučivanja šumskog pokrova različitih spektralnih indeksa za područje Medvednice u 2014.

koje međutim nije moguće detaljno razaznati na Landsat 8. Isto tako na snimkama RapidEye iz 2018. godine, pet godina nakon vjetroizvala, 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 može se utvrditi kako su snimke Landsat 8 srednje rezolucije uglavnom primjenjive za detektiranje promjena na većem šumskom području odnosno znatnijih promjena na razini šumske sastojine, odjela i odsjeka, koje je moguće detektirati s prostornom rezolucijom od 30 m. S druge strane, snimke RapidEye visoke rezolucije omogućavaju detekciju promjena unutar samih sastojina do razine pojedinačnih stabala koja se mogu izdvojiti na snimkama u prostornoj rezoluciji od 5 m.



Slika 4. Usporedba snimaka Landsat 8 i RapidEye iz 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.

Kao primjer kvantitativnog praćenja stanja šumske vegetacije na površinama pod vjetroizvalama korišten je MSAVI indeks koji je bilo moguće obračunati na oba senzora radi njihove usporedbe (slika 5). Vrijednosti MSAVI indeksa u 2013. godini odgovaraju prosječnim vrijednostima u tamošnjim bukovim sastojinama nena-rušenog sklopa. Prosječne vrijednosti MSAVI-a nešto su niže na Landsat 8 u odnosu na RapidEye, a jedan od razloga tomu može biti lošije izvedena atmosferska korekcija na Landsat 8 napravljena u eksternoj Qgis aplikaciji u odnosu na RapidEye snimke preuzete unaprijed od proizvođača, s unaprijed izvedenom korekcijom. MSAVI indeks na oba senzora pokazuje znatno niže vrijednosti u 2014. godini zbog prekida vegetacijske aktivnosti na površinama vjetroizvala. Snimke RapidEye, međutim, pokazuju znatno 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 vjetroizvala.

4. Diskusija i zaključak

Prikazani prethodni rezultati istraživanja pokazuju različite mogućnosti primjene multispektralnih satelitskih snimaka u šumskogospodarskoj praksi te osim prosredne 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 terestričke načine izmjera, imaju znatnu 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 vjetroloma, 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, obuhvaćenog Landsat 8 snimkama, pa do jasno razlučivih dijelova površina vjetroizvala na RapidEye snimci visoke rezolucije. Iz komparativne usporedbe senzora može se uočiti kako su Landsat snimke od 30 m odnosno 15 m namijenjene ponajprije za analizu šireg prostornog područja te da su primjenjive za detekciju stanja minimalno na razini sastojine odnosno odjela/odsjeka, najmanje jedinice u šumskogospodarskoj razdiobi. S druge strane, RapidEye snimke visoke rezolucije od 5 m omogućuju razlučivanje detalja unutar šumske sastojine, odjela i odsjeka, gotovo do razine skupine stabala unutar sastojine (progale, vlake, različiti stadiji obnove i dr.).

Primjer prostorne uporabljivosti snimaka Landsat 8 dan je u istraživanju Šimić i dr. (2015), u kojem su Landsat 8 snimke srednje prostorne rezolucije korištene za detekciju i klasifikaciju šteta od ledoloma 2014. godine na čitavom području Gorskoga kotara. Također je potrebno izdvojiti primjer korištenja snimaka Landsat 8 na području šume Česma (Vrbovec) (Rumora i dr. 2018). U šumskogospodarskoj operativi, međutim, često je vrlo važno dobivanje informacija na puno detaljnijoj razini, odnosno na razini pojedinačnog stabla ili grupe (prorede, sanitarne sječe i dr.) za čiju namjenu su prikladne snimke 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 radi kategorizacije različitih strukturnih osobina šumskih sastojina odnosno, detekcije i praćenja obnove šuma do danas nije u Hrvatskoj rađena u znatnijoj mjeri.

U konkretnom slučaju na istraživanoj površini uz potok Bliznec olujni vjetar u studenome 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 je površinama zatim započela obnova radi ponovne uspostave šumskog pokrova te mladih bukovih sastojina koje trebaju zamijeniti stare stradale sastojine obične bukve. Obična bukva vrsta je koja se relativno dobro prirodno pomlađuje tako da je obnova na tim površinama obavljena naplođivanjem sjemenom (bukvicama) iz okolnih stabala i sastojina. Kod obične bukve do osrednjeg uroda dolazi u pravilu svake 2–3 godine, a puni se urod javlja u razmaku 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 na tlu radi uklanjanja korova i poboljšanja edafskih uvjeta, zaštitu mlade sastojine od različitih štetočina, popunjavanje nedovoljno obnovljenih površina, njegu sastojine čišćenjem na sastojinama u stadiju koljika, njegu sastojine proredom na mladim, srednjodobnim i starim sastojinama. 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, srednjodobna, starija i stara sastojina. Iz prikaza površina, posebno na RapidEye snimkama visoke rezolucije, vidljivo je kako se na snimkama 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 obavljene obnove na toj površini stvoren uglavnom homogen vegetacijski pokrov na kojem je vegetacijska aktivnost odnosno lisna površina gotovo jednaka lisnoj površini na starim sastojinama prije obnove, što potvrđuju vrijednosti izračunatog MSAVI indeksa. Iz navedenih rezultata vidljivo je kako se iz vrijednosti MSAVI vegetacijskog indeksa, na oba ispitivana senzora, može uspješno pratiti stanje obnove šumskih površina, uz naknadno izvedenu provjeru stanja na terenu (tzv. *ground truth*) što je jedan od ciljeva u nastavku ovog započetog istraživanja.

Satelitske informacije danas imaju izrazito veliki potencijal primjene u šumarstvu, temelj čega predstavlja program globalnih opažanja Europske unije, Copernicus. Posebnu važnost za ispitivanje inovativnih mogućnosti primjene daljinskih istraživanja ima niz najnovijih satelitskih misija Sentinel te dostupnost snimaka na korištenje široj znanstvenoj zajednici. Trenutačno je vrlo izražena inicijativa EU s ciljem ispitivanja različitih načina primjene i komercijalizacije satelitskih informacija, ponajprije prikupljenih sa Sentinela, u različitim gospodarskim sektorima koji gospodare zemljištem (šumarstvo, poljoprivreda, zaštita prirode, vodno gospodarstvo...). S tim u vezi 2018. godine u sklopu projekta Obzor 2020, najvećeg znanstveno-inovacijskog programa EU, započet je projekt pod nazivom „My Sustainable Forest“ (www.mysustainableforest.eu) kojega je cilj, izradom komercijalnih servisa, pronaći nove mogućnosti operacionalizacije optičkih daljinskih opažanja srednje, visoke i vrlo visoke rezolucije kao i radarskih snimaka te Lidara. „My Sustainable Forest“ je inovacijsko-tehnologijski projekt u kojem pod vođenjem industrijskotehnološke korporacije GMV iz Madrida (Španjolska) sudjeluje niz partnera, šumskogospodarskih 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 gotovo u potpunosti automatiziranog sustava odnosno platforme s integriranim i validiranim proizvodima daljinskih istraživanja u šumskogospodarske operativne procese (inventura šuma, analiza kakvoće stabala, procjena biomase, praćenje stanja sastojina, značajki ekosustava i dr.) radi učinkovitijeg upravljanja šumama. Usporedno s navedenom aktivnošću na razini EU, trenutačno su u Republici Hrvatskoj aktualne dvije znanstvenoistraživačke inicijative kojih je cilj ispitivanje uporabljivosti daljinskih istraživanja, odnosno integracija satelitskih snimaka, Lidara te informacija dobivenih terestričkim snimkama i bespilotnim letjelicama kako u urbanim tako i u prirodnim šumama. Od inicijativa vezanih uz urbane šume potrebno je istaknuti projekt Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ) GEMINI (Geoprostorno praćenje zelene infrastrukture pomoću terestričkih, 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 terestričkih multispektralnih videozapisa pri kartiranju vegetacije u urbanom područja grada Zagreba. Trenutačno aktivnim projektom HRZZ-a 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 projekt HRZZ-a AFORENSA (Napredne metode procjene usluga šumskih ekosustava), koji se temelji na objedinjavanju terestričkih i satelitskih informacija o stanju i promjenama u šumskim ekosustavima.

ZAHVALA / ACKNOWLEDGMENT. 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 terestričkih, zrakoplovnih i satelitskih opažanja) i 3D FORINVENT (Pridobivanje informacija iz različitih optičkih 3D izvora daljinskih opažanja za inventarizaciju šuma).

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.

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, Matić, S. (ur.), *Akademija šumarskih znanosti*, 340–369.
- Matić, S., Anić, I., Oršanić, M. (2003): Osnivanje šuma obične bukve, Obična bukva u Hrvatskoj, Matić, S. (ur.), *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*, 4, 1, 1–8.
- PP Medvednica (2014): Prostorni plan parka prirode Medvednica, Knjiga 1, Odredbe za provođenje, Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Zagreb.
- 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.

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 panchromatic 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.

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

Primljeno / Received: 2019-04-17

Prihvaćeno / Accepted: 2019-09-17