

UDK 528.854:528.931:630\*58:519.254:004  
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

# Geostatistička analiza vegetacijskih indeksa na šumskom ekosustavu Česma

Ela VELA – Zagreb<sup>1</sup>, Ivan MEDVED – Jastrebarsko<sup>2</sup>,  
Vanja MILJKOVIĆ – Zagreb<sup>1</sup>

*SAŽETAK.* Zbog mogućnosti prikupljanja i analize velikih količina prostornih podataka u duljem vremenskom razdoblju, dobivaju se nove informacije koje olakšavaju provođenje geostatističkih analiza na većim područjima. Multispektralne satelitske snimke kao jedan od izvora informacija, prostorne rezolucije od 30 m sa satelita Landsat 7 i Landsat 8, primjenjuju se pri reprezentativnom uzorkovanju u geostatističkoj analizi. U ovom radu provedena je geostatistička analiza NDVI, NDWI, GNDVI, EVI i SAVI kroz desetogodišnje vremensko razdoblje u točkama piezometara na šumi Česma. Procijenjeni su vegetacijski indeksi izračunati iz multispektralnih snimki temeljem apsorpcije, transmisije i refleksije energije od vegetacije u različitim spektralnim kanalima. Vegetacijski indeksi dosljedno pružaju prostorno-vremenske informacije o vegetacijskom pokrovu, a u ovom istraživanju šumski sustav je promatran na dva načina: prvo temeljem razlika na osnovi izračunatih vegetacijskih indeksa dobivenih iz sirovih podataka gdje je vrijednost piksela DN, a zatim temeljem atmosferski korigiranih satelitskih snimki DOS1 korekcijom. Automatizacija obrade podataka napravljena je u statističkom programskom jeziku R, što je ubrzalo obradu velike količine rasterskih snimki. R je upotrijebljen za implementaciju algoritma u svrhu kvalitetne geostatističke analize.

*Ključne riječi:* geostatistika, vegetacijski indeksi, atmosferska korekcija DOS1, korelacija, prostorno-vremenska analiza.

## 1. Uvod

Informacije o trenutačnom stanju i nedavnim promjenama šumskog ekosustava važna su osnova za donošenje preciznijih odluka iz ekonomije, zaštite okoliša i šumarstva. Analizom velikih količina interdisciplinarnih prostornih podataka u duljem vremenskom razdoblju dostupne su nam nove informacije koje olakšavaju

<sup>1</sup> Dr. sc. Ela Vela, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: evela@geof.hr,

Vanja Miljković, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: vmiljkovic@geof.hr,

<sup>2</sup> Dr. sc. Ivan Medved, Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: ivanm@sumins.hr.

provođenje nadzora šumskoga pokrova na većem području i daju konačnu sliku o promjenama šumskih ekosustava. U daljinskim istraživanjima pod pojmom detekcije promjena podrazumijevamo analitički proces kojem je cilj otkriti prostorno-vremenske promjene na Zemljinu pokrovu (Coppin i Bauer 1996).

Prostorno-vremensko praćenje promjena na Zemljinoj površini iznimno je značajno za razumijevanje odnosa između ljudskih i prirodnih fenomena. Daljinska istraživanja omogućuju prikupljanje i analiziranje velikih količina prostornih podataka tijekom duljega vremenskog razdoblja čime se dobivaju vrijedne informacije. Zbog toga je poboljšana nadzor šumskog pokrova i olakšana detekcija promjena ekosustava što omogućuje pravodobno i učinkovito donošenja odluka (Treiz i Howarth 1999).

Promjena šumskoga pokrova tijekom određenoga vremenskog razdoblja izrazito je važna kako bi se bolje razumjela složena međuzavisnost ljudskih i prirodnih čimbenika te donijele ispravne odluke pri gospodarenju šumskim blagom. Daljinska istraživanja kao primarni izvor informacija potaknula razvoj tehnika i metoda koje služe za precizno praćenje promjena Zemljina pokrova. Najčešće korištene tehnike praćenja promjena su diferenciranje snimki, analiza komponenata i klasifikacija snimki (Singh 1989). Analiza spektralnih kombinacija, integracija geografskih informacija s podacima daljinskih istraživanja, umjetne neuronske mreže koje su razvijene posljednjih godina omogućile su istraživačima detektiranje točnijih promjena. Vegetacijski indeksi izračunati iz multispektralnih satelitskih snimki, temeljem spektralnih karakteristika vegetacije u različitim spektralnim kanalima, dosljedno pružaju prostorno-vremenske informacije o vegetacijskom pokrovu.

Podaci prikupljeni daljinskim istraživanjima dobra su osnova za geostatističke analize. Međutim, različiti algoritmi za detekciju promjena nisu podjednako dobri za sve analize, pa na digitalnu detekciju promjena utječu prostorna, spektralna, tematska i vremenska ograničenja. Zbog toga nam stoje na raspolaganju mnogobrojne tehnike detekcije promjena, a izbor prikladne metode ili algoritma za zadatak istraživanje ključalno je za uspješnost analize.

## 2. Spektralni potpis vegetacije

Daljinska istraživanja su znanost o istraživanju Zemljine površine, objekata i fenomena bez izravnog doticaja s njima. Senzori su glavni uređaji u daljinskim istraživanjima za otkrivanje, registraciju i mjerenje elektromagnetskog zračenja što ga emitira ili reflektira objekt promatranja. Senzori konvertiraju zabilježenu elektromagnetsku energiju u električne impulse, a izgrađeni su tako da mogu snimati uže ili šire spektralno područje (Oluić 2001).

Prema načinu snimanja elektromagnetske energije senzori se dijele:

- na aktivne senzore, koji šalju energiju prema objektu i registriraju dio koji se odbio
- na pasivne senzore, koji samo primaju energiju što dolazi od objekta.

Prema broju i širini spektralnoga kanala senzori mogu biti:

- pankromatski (mjere refleksije u jednom širokom dijelu elektromagnetskog spektra unutar širokog raspona valnih duljina)

- multispektralni (mjere energiju u višekanalnom detektoru i uskom rasponu valnih duljina)
- hiperspektralni (sadrže više od sto spektralnih kanala)
- ultraspektralni (još su u razvoju).

Elektromagnetski spektar predstavlja raspon svih mogućih frekvencija elektromagnetskog zračenja od radiovalova do gama zraka (Pitts i Kleinstein 1993).

Raspon elektromagnetskog spektra kreće se od gama zraka kraćih valnih duljina prema dužim radiovalovima. Ultraljubičasti dio spektra najkraća je vrijednost valne duljine koja se upotrebljava u daljinskim istraživanjima. Može se podijeliti ovisno o energiji, valnoj duljini i frekvenciji, a sve su tri veličine matematički vezane. U daljinskim istraživanjima se koriste vidljivi, infracrveni i mikrovalni (radar) dijelovi elektromagnetskog spektra. Ljudsko oko detektira vidljivi dio spektra od 0,4  $\mu\text{m}$  do 0,7  $\mu\text{m}$ , koji zauzima mali dio cjelokupnog spektra:

- ljubičasta: 0,4 – 0,446  $\mu\text{m}$
- plava: 0,446 – 0,500  $\mu\text{m}$
- zelena: 0,500 – 0,578  $\mu\text{m}$
- žuta: 0,578 – 0,592  $\mu\text{m}$
- narančasta: 0,592 – 0,620  $\mu\text{m}$
- crvena: 0,620 – 0,7  $\mu\text{m}$ .

Nakon vidljivog dijela spektra slijedi infracrveni (engl. *Infra Red* – IR) dio spektra, koji obuhvaća valne duljine od 0,7  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . Taj dio spektra može se podijeliti na dva dijela: reflektirani IR (0,7 – 3,0  $\mu\text{m}$ ) i termalni IR (3,0 – 100  $\mu\text{m}$ ).

Svi satelitski podaci nastaju kao zapis elektromagnetskog zračenja koje se detektira na senzoru satelita. Produkt prikupljanja informacija u daljinskim istraživanjima digitalna je satelitska snimka sastavljena od mreže piksela koji predstavljaju najmanju površinu koju određeni senzor može prikupiti, čime je ujedno određena prostorna rezolucija snimke. Položaj svakog piksela određen je u Kartezijevu koordinatnom sustavu, na Landsat snimkama ishodište koordinatnog sustava nalazi se u gornjem lijevom kutu snimke. Svaki piksel ima numeričku vrijednost, tzv. digitalni broj (engl. *Digital Number* – DN), vrijednost kojega pokazuje razinu sivila. Radiometrijska rezolucija označava ukupan broj sivih nijansi u jednom kanalu. Vrijednost intenziteta elektromagnetskog zračenja u jednom pikselu može se izračunati iz vrijednosti digitalnog broja pod uvjetom da je snimka radiometrijski kalibrirana (Schroeder i dr. 2006).

### 3. Landsat misije

Landsat misija, utemeljena davne 1972. godine, najduža je serija lansiranih satelita koji snimaju Zemljinu površinu. Dulje od četiri desetljeća prikupljaju se i pohranjuju podatci srednje rezolucije i kontinuirano pružaju uvid u vizualne i znanstvene značajke našega planeta. Spomenuto vremensko razdoblje dovoljno je dugo za procjenu i praćenje trendova i analizu promjena na Zemljinoj površini. Tako je stvorena jedinstvena povijesna arhiva koja se ističe po broju detalja, kvaliteti i obuhvaćenom prostorno-vremenskom segmentu. Spomenuta baza kontinuirano pruža uvid u vizualne i znanstvene značajke našega planeta. Arhiva snimki Landsat često se spominje kao jedna od najvećih dragocjenosti čovječanstva, postignuće koje donosi veliku korist u svim segmentima društva (Roy i dr. 2014).

Tablica 1. *Obilježja Landsat misija.*

Parametri	Landsat 1-3 MSS	Landsat 4,5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OIL/TIRS
Trajanje misije	1972. – 1978. 1975. – 1983. 1978. – 1983.	1982. – 1993. 1984. – 2013.	1999. – ...	2013. –...
Visina orbite (km)	915	705	705	705
Spektralni kanali	R, G, 2 NIR	R, G, B, 2 NIR, MIR, TIR	R, G, B, 2 NIR, TIR, MID, PAN	Obalni, R, G, B, NIR, SWIR-1, SWIR-2, TIR-1, TIR-2, PAN, cirus oblaci
Prostorna razlučivost (m)	80 MS	30 MS 120 TIR	15 PAN 30 MS 60 TIR	15 PAN 30 MS 100 TIR
Vremenska razlučivost (dana)	18	16	16	16
Površina snimke	185 km x 185 km			

NASA je 1972. godine lansirala nekoliko svemirskih misija te se, iako se u to vrijeme bavila tajnim vojnim projektima, javila potreba za komercijalizacijom satelitskih sustava. Godine 1966. izgrađen je ERTS-1 (engl. *Earth Resources Technology Satellite*), prvi multispektralni satelitski sustav za snimanje Zemljine kopnene površine. Satelit je poslije preimenovan u Landsat-1. Tijekom 1970-ih godina lansirana su još dva Landsat satelita s istim karakteristikama. Landsat sateliti kreću se po polarnoj orbiti s otklonom od nekoliko stupnjeva, s područjem prekrivanja između 81° sjeverne i 81° južne geografske širine (URL 1). Landsat 7,8 još uvijek rade, a Landsat 1,2,3,4,5 završili su s radom. Landsat 5 nadživio je svoj trogodišnji životni vijek i isporučio kvalitetne globalne podatke o Zemljinoj kopnenoj površini u 28 godina i 10 mjeseci te je službeno ušao u Guinnessovu knjigu rekorda pod naslovom „Najdugotrajnije operabilan satelit za promatranje Zemlje“. Misija Landsat 6 nije zaživjela zbog kvara na samom satelitu prilikom lansiranja (Wulder i dr. 2012).

Sateliti imaju različite tipove senzora implementirane na sustavu, *Vidicon system* s povratnim zrakama (engl. *Return Beam Vidicon* – RBV), multispektralni skener (engl. *Multispectral Scanner System* – MSS), tematski kartograf (engl. *Thematic Mapper* – TM), napredni tematski kartograf (engl. *Enhanced Thematic Mapper Plus* – ETM+). Satelit Landsat 7 ima ugrađen ETM + senzor koji je bolja verzija MSS-a (tablica 1). Najnoviji senzori ugrađeni su na satelit Landsat 8. Riječ je o dva senzora nove generacije: operativni uređaj za snimanje Zemljine površine (engl. *Operational Land Imager* – OLI) i infracrveni termalni senzor (engl. *Thermal Infrared Sensor* – TIRS) s kojima se svaki dan dobije preko 500 snimki (Roy i dr. 2014).

Različiti senzori detektiraju različita spektralna područja elektromagnetskog zračenja, a ovisno o načinu primanja i odašiljanja zračenja dijele se na pasivne i aktivne senzore. Landsat senzori čije se snimke upotrebljavaju u ovom istraživanju ubrajamo u pasivne jer bilježe Sunčevo zračenje reflektirano od oblaka, oceana i Zemljine površine, te infracrveno zračenje koje emitira Zemlja i njena atmosfera.

## 4. Vegetacijski indeksi

Vegetacijski indeksi su podaci koji se računaju iz različitih kanala multispektralnih snimki na temelju apsorpcije, transmisije i refleksije energije vegetacije u različitim spektralnim kanalima. Ponajprije služe kao grafički indikator procjene aktivnosti vegetacije na promatranom području. Vegetacijski indeksi na području s vegetacijom pokazuju veće vrijednosti piksela nego na područjima bez nje (She i dr. 2015).

Zahvaljujući karakterističnom spektralnom potpisu biljaka moguće je dobiti vegetacijski indeks kombinacijom snimki iz više različitih spektralnih područja. Klorofil u biljkama jako apsorbira valne duljine u crvenom i plavom dijelu spektra, a odbija zeleno svjetlo. Vegetacijski indeksi predstavljaju bezdimenzionalnu radiometrijsku mjeru, koja se dobiva kombinacijom informacije iz različitih kanala gdje se uglavnom upotrebljavaju crveni i bliskoinfracrveni (engl. *Near Infrared* – NIR) dio elektromagnetskog spektra (Maeda i dr. 2016).

Na formiranje bilo kojega vegetacijskog indeksa utječu sljedeći parametri: mjera elektromagnetskog zračenja vegetacije, količina zelenog prekrivača, količina klorofila u biljci, količina biomase, upijanje fotosintetičke aktivnosti radijacije (engl. *Absorbed Photosynthetic Active Radiation* – APAR), radijacija indeksa lista.

### 4.1. Vegetacijski indeks normalizirane razlike

Vegetacijski indeks normalizirane razlike (engl. *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) najkorišteniji je indikator za otkrivanje promjena u biljnom pokrovu. Uveo ga je Deering 1978. godine i predstavlja omjer između razlike i zbroja bliskoinfracrvenog dijela spektra i crvenog dijela spektra (Deering 1978). Mjerenje refleksije u bliskom infracrvenom i crvenom vidljivom dijelu spektra veoma je precizan mehanizam za određivanje zdravlja vegetacije. Pomoću toga indeksa mogu se pratiti sezonske i višegodišnje vegetacijske promjene (Jensen i Lulla 1987).

Izraz po kojem se računa NDVI iz refleksije svjetlosti u vidljivom i bliskoinfracrvenom spektru glasi (Carlson i Ripley 1997):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

gdje su:

NIR – dio spektra  $\lambda \approx 0,8 \mu\text{m}$

RED – dio spektra  $\lambda \approx 0,6 \mu\text{m}$ .

Vrijednosti su NDVI-ja između minus jedan (-1) i plus jedan (+1). Nula je područje gologa tla i kamena, međutim u praksi gotovo nikada ne susrećemo vrijednost 0. Negativne vrijednosti predstavljaju vodu, snijeg i oblake, a vrijednosti blizu jedan (0,8 – 0,9  $\mu\text{m}$ ) upućuju na to da je riječ o vegetaciji velike gustoće.

### 4.2. Vodeni indeks normalizirane razlike

Vodeni indeks normalizirane razlike (engl. *Normalized Difference Water Index* – NDWI) dizajnirao je McFeeters kako bi maksimizirao refleksiju vode koristeći

zeleni dio spektra i smanjujući refleksiju NIR-a na vodenim površinama, te koristeći prednosti visoke refleksije u NIR dijelu elektromagnetskog spektra za vegetaciju i tlo (McFeeters 1996):

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}} \quad (2)$$

U navedenoj formuli GREEN je zeleni kanal ( $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ ), a NIR bliskoinfracrveni kanal. Za vodene površine vrijednosti indeksa su pozitivne, a za vegetaciju i tlo su uglavnom nula ili negativne što daje dobar kontrast pri detekciji vodenih površina. Voda i vegetacija imaju istu refleksiju u vidljivom dijelu spektra, a u infracrvenom dijelu spektra potpuno različitu.

### 4.3. Zeleni vegetacijski indeks normalizirane razlike

Zeleni vegetacijski indeks normalizirane razlike (engl. *Green Normalized Difference Vegetation Index* – GNDVI) zeleni je NDVI, te umjesto crvenoga kanala upotrebljava zeleni kanal. Mnoge studije su pokazale kako je zeleni kanal u velikoj korelaciji s vegetacijskim parametrima. Neka su istraživanja pokazala kako zeleni dio spektra ima bolju osjetljivost na klorofil od crvenog dijela spektra te je zbog toga nastao GNDVI (Yoder i Waring 1994) i pokazao je veću korelaciju s indeksom površine lista (engl. *Leaf Area Index* – LAI) od NDVI-ja (Wang i dr. 2007):

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}} \quad (3)$$

### 4.4. Vegetacijski indeks prilagođen tlu

U područjima s izraženijim površinama tla i manje biljnog pokrova, refleksija svjetlosti u crvenom i infracrvenom dijelu spektra može utjecati na vrijednosti vegetacijskog indeksa. Vegetacijski indeks prilagođen tlu (engl. *Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI) modificirani je NDVI koji ima iste vrijednosti kao NDVI. Međutim, SAVI se primjenjuje kada je potrebno otkloniti utjecaj atmosfere i tla na snimci sa smanjenim vegetacijskim pokrovom (Huete 1988):

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L)(\text{NIR} - \text{RED})}{\text{NIR} + \text{RED} + L} \quad (4)$$

gdje je L faktor prilagođavanja pozadini lišća koji se upotrebljava za postupni prestanak diferencijalnog crvenog i bliskoinfracrvenog učinka kroz listove biljaka.

### 4.5. Poboljšani vegetacijski indeks

Poboljšani vegetacijski indeks (engl. *Enhanced Vegetation Index* – EVI) razvio je znanstveni tim MODIS (engl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), kako bi se iskoristile sve prednosti senzora (URL 1). Sličan je NDVI-ju, međutim EVI upotrebljava i plavi kanal kako bi se poboljšala osjetljivost vegetacijske

refleksije. EVI je modificirani NDVI s povećanom osjetljivošću na područjima visoke biomase s minimalnim utjecajem atmosfere i područja tla. Međutim, zbog korištenja plavoga dijela spektra ograničen je na dizajn pojedinih senzora i limitiran na vremenski period (Jiang i dr. 2008):

$$EVI = G \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L}, \quad (5)$$

gdje su:

NIR, RED, BLUE – atmosferski korigirana refleksija

$C_1$  i  $C_2$  – koeficijenti koji se odnose na korekciju aerosoli

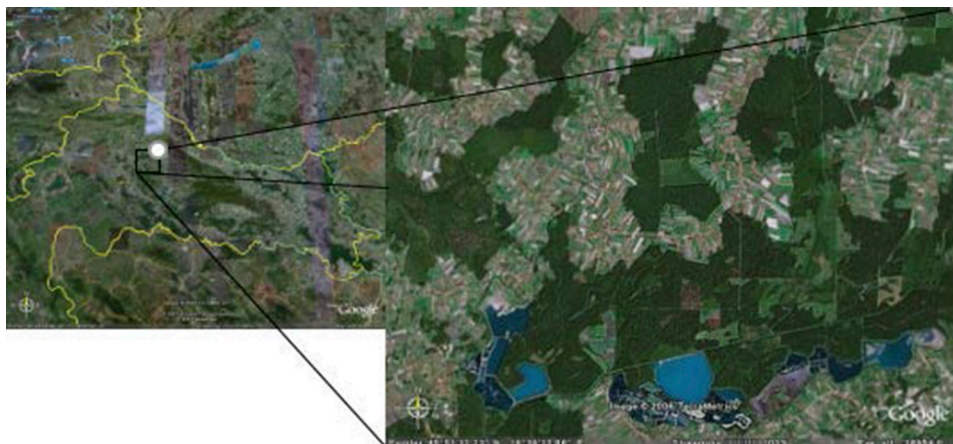
G – faktor poboljšanja

L – faktor tla.

Ovaj indeks je osjetljiviji pri visokim koncentracijama biomase, te poboljšava mogućnosti praćenja vegetacije kroz reduciranje utjecaja pozadine listova i smanjenog atmosferskog utjecaja (Jensen 1996). Zbog njegove visoke osjetljivosti na područja s visokim razinama biomase pokazao se kao jako dobar indeks u praćenju šumskih pokrova. Vrijednosti koje su se koristile za navedene koeficijente su:  $L = 1$ ,  $C_1 = 6$ ,  $C_2 = 7,5$  i  $G = 2,5$ .

## 5. Područje istraživanja

Istraživanje je provedeno na lokalitetu nizinske šume hrasta lužnjaka. Šuma Česma sa svojom heterogenošću koja podrazumijeva visokodinamične procese dobar je temelj za praćenje promjena pomoću daljinskih istraživanja. Gospodarska jedinica Česma smještena je u blizini Vrbovca kao poseban rezervat šumske vegetacije zaštićen od 1982. godine (slika 1). Starost sastojina, u koje ubrajamo obični grab i dominantan hrast lužnjak, procjenjuje se na oko 130 godina. Ova stoljetna nizinska šumska zajednica hrasta lužnjaka (lat. *Quercus robur* L) u Hrvatskoj jedinствен je takav primjer u Europi.



Slika 1. Lokacija šume Česma kod Vrbovca (Google Earth).



Slika 2. Nazivi i lokacije piezometara u šumi Česma.

Nizinske šume zauzimanju najniže reljefne forme i ne mogu se upotrebljavati za poljoprivredu ili stanovanje, zbog toga ih i danas nalazimo u njihovu arhaičnom obliku i površini. Zbog njihova specifičnog reljefnoga udubljenja i hidroloških posebnosti nalazimo obilje vode, neovisno o tome je li riječ o rijekama, pritocima, kanalima, podzemnim vodama ili jezerima. Voda u tlu je temeljni i najvažniji ekološki čimbenik koji je tijekom proteklih nekoliko desetljeća utjecao na fenološke promjene u spomenutom šumskom ekosustavu.

Mnogobrojni dokazi upućuju na to da nizinske šume reagiraju na klimatske promjene. Kada govorimo o šumi Česma treba naglasiti da sušenje hrasta lužnjaka u posljednjih petnaestak godina nije posljedica isključivo klimatskih promjena već i promjena vodnog režima. Postavljena su 22 hidrološka piezometra za praćenje saturacije tla vodom (slika 2). Na svakoj lokaciji su ugrađena po četiri piezometra na različitim dubinama u slojevima od 10 cm do 250 cm (Pilaš i Planinšek 2011). Za razumijevanje prostorno-vremenske dinamike šumskih ekosustava provedena je analiza multispektralnih satelitskih snimki srednje rezolucije za razdoblje od 2005. do 2016. godine. Izdvojene su 92 snimke bez oblaka. Iz snimki su izračunati mjesečni i godišnji vegetacijski indeksi čime je dobiven godišnji i sezonski vegetacijski trend.

## 6. Obrada i analiza rezultata istraživanja

Iscrpno korištenje raspoloživih Landsat podataka od 2005. do 2016. godine dostupnih u obliku snimki omogućilo je izračun cijeloga niza indeksa kao što su NDVI, NDWI, GNDVI, EVI i SAVI. Provedena analiza pokazala je visoku korelaciju između vegetacijskih indeksa i potvrdila kontinuitet u vegetacijskom trendu svih pet navedenih indeksa. Korištene su multispektralne satelitske snimke Landsat 7



i Landsat 8 preuzete za istraživačko područje šume Česma. Početna obrada i preuzimanje snimki izvedeno je u slobodnom programu otvorenoga koda (engl. *Free and Open Source Software* – FOSS) QGIS-u, koristeći proširenje poluautomatska klasifikacija 4.3.3. (engl. *Semi-automatic Classification Plugin* – SCP).

## 6.1. Obrada multispektralnih snimki

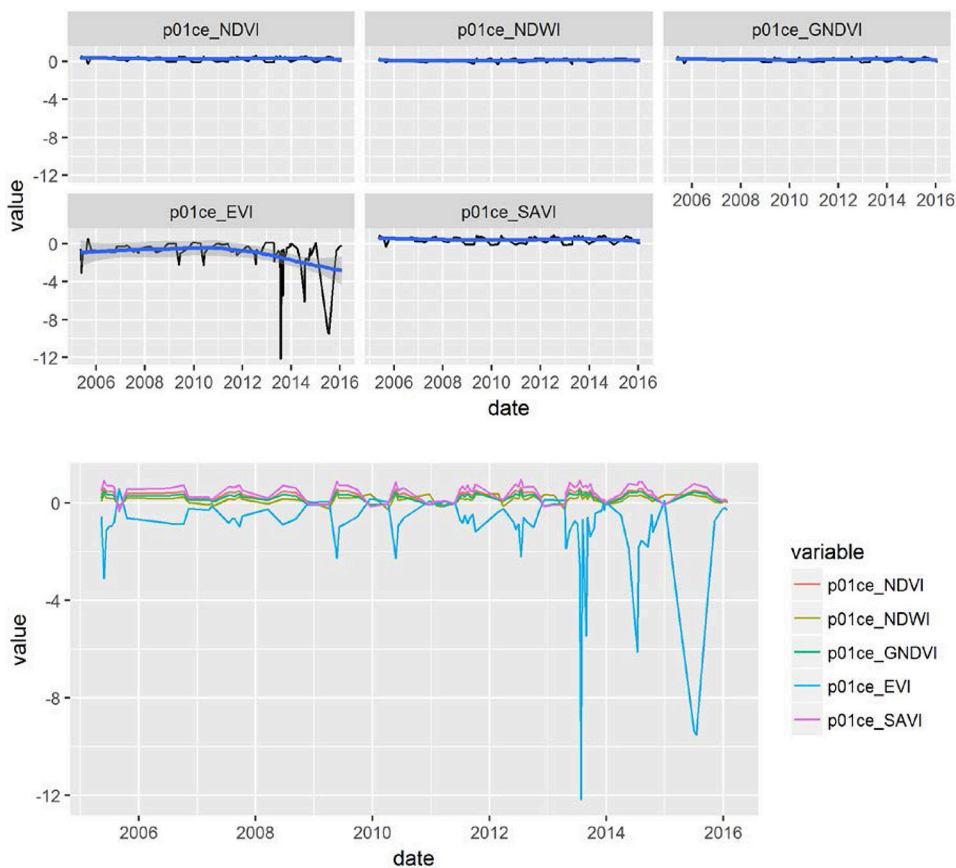
U statističkom programskom jeziku *R* obrađene su sve odabrane snimke raster-skog formata za istraživačko područje. Filtriranje satelitskih snimki koje su opterećene oblacima provedeno je vizualnom kontrolom svake snimke. Za analizu su izabrane 92 satelitske snimke iz dviju satelitskih misija Landsat 7 i Landsat 8 u vremenskom razdoblju od 2005. do 2016. godine. Prvi je korak bio napraviti atmosfersku korekciju DOS1 svih kanala koji su bili potrebni za obradu kako bi se izvorne vrijednosti piksela, tzv. digitalni broj (engl. *Digital Number* – DN), preračunale u refleksijsku vrijednost pojedinoga kanala. Na taj su način stvorena dva skupa podataka od kojih je jedan predstavljao izvorne podatke, dok je drugi skup sadržavao korigirane podatke za atmosferske utjecaje. Iz jednog i drugog skupa izdvojeni su podaci koji pokrivaju područje istraživanja šume Česma. Zbog toga je napravljen poligon u *shp* formatu koji je služio za izdvajanje traženih podataka. Potom su izračunati vegetacijski indeksi NDVI, NDWI, GNDVI, EVI, SAVI za oba skupa podataka, nakon čega je generirano sveukupno 920 datoteka. Time su generirani svi potrebni ulazni elementi za provedbu prostorno-vremenske analize dinamike šumskog ekosustava Česma.

## 6.2. Analiza provedenih istraživanja

Vegetacijski indeksi izračunati su s nekorigiranim i korigiranim satelitskim snimkama s atmosferskom korekcijom DOS1. Izabrane su lokacije od 22 točke na prostoru šume Česma koje su ujedno i lokacije piezometara (slika 1). Na tim lokalitetima su onda ekstrahirane vrijednosti svih izračunatih vegetacijskih indeksa, u svakoj točki piezometra. Provedena je točkasta analiza rastera na 22 lokacije piezometra, u vremenskom razdoblju od deset godina. Analiza je pokazala vegetacijske trendove svih pet indeksa izračunatih iz korigiranih i nekorigiranih satelitskih snimki. Na grafovima su za nekorigirane snimke zamjetna velika odstupanja indeksa EVI s rasponom vrijednosti od  $-4$  do  $+3$ , a izrazit skok vrijednosti izračunatih indeksa vidljiv je za snimke dobivene sa satelita Landsat 8.

Automatizacija obrade slojeva rasterskih podataka izvedena je u *R* programskom jeziku. Napravljen je algoritam za izračunavanje svih pet vegetacijskih indeksa i ekstrahiranje vrijednosti svih pet indeksa iz nekorigiranih i korigiranih satelitskih snimki u svim točkama piezometra. Na temelju tih podataka izvedeni su trendovi intenziteta pojedinih vegetacijskih indeksa i međusobni odnos svih pet indeksa na lokacijama piezometara. Jedan od primjera može se vidjeti na slici 3, gdje je prikazan grafički tijek svih pet indeksa vegetacije izračunatih u točki piezometra p01ce. Također se jasno vidi godišnji trend vegetacije za svaki indeks i njihov međusoban odnos.

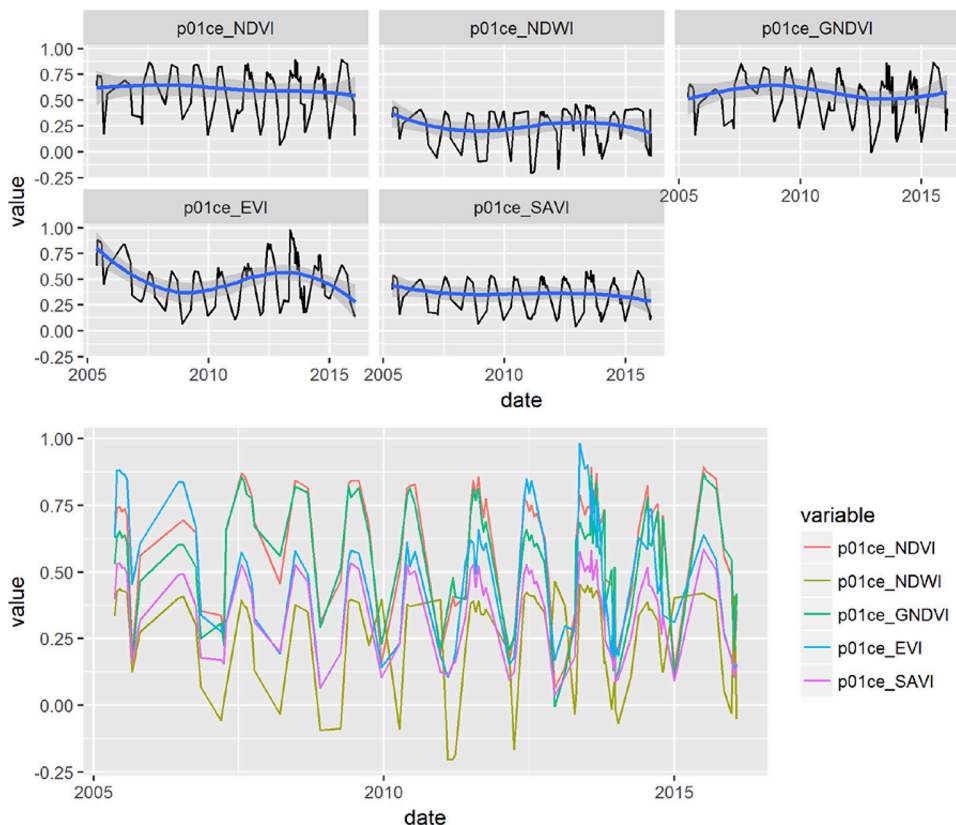
Kako su izračunati vegetacijski indeksi s nekorigiranim i korigiranim satelitskim snimkama atmosferskom korekcijom DOS1, izrađena je usporedbena analiza. Na slikama 3 i 4 možemo usporediti rezultate takve analize. Kod izvornih podataka utjecaj atmosfere je najveći pri izračunu EVI indeksa, dok je kod ostalih indeksa



Slika 3. Grafički prikaz NDVI, NDWI, GNDVI, EVI i SAVI izračunatih s DN u točki piezometra p01ce.

puno manji. Stoga se kod EVI-ja uočava veliki skok, što dovodi do zaključka kako taj indeks nije primjenljiv kad se računa bez atmosferski korigiranih satelitskih snimki. Kod NDVI, NDWI, GNDVI i SAVI indeksa moguće je za dulje vremenske nizove podataka izostaviti atmosfersku korekciju i samim time ubrzati i pojednostavniti određivanje trendova. Naime, jasno je dokazan veliki skok EVI-ja što nameće neupitnu nužnost atmosferske korekcije za navedeni indeks. To nije slučaj s ostala četiri indeksa koji se mogu koristiti nekorigiranim snimkama širih područja istraživanja čime je olakšana obrada velikih skupova podataka. Općenito EVI je primjeren za istovremeno smanjenje atmosferskog utjecaja i pozadinskih šumova tla i često se upotrebljava kao zamjena za NDVI iako je izrazito osjetljiv na topografska obilježja terena. Treba naglasiti da sama topografija može imati neizravan utjecaj na oba indeksa, NDVI i EVI (Matsushita i dr. 2007).

Na slici 4 prvo su napravljene gornji grafovi za svaki indeks posebno u točki piezometra. Nakon toga je određeno područje s najboljom aproksimacijom podataka za koje je provučena zgladnena krivulja gibanja indeksa. Graf ispod prikazuje sve

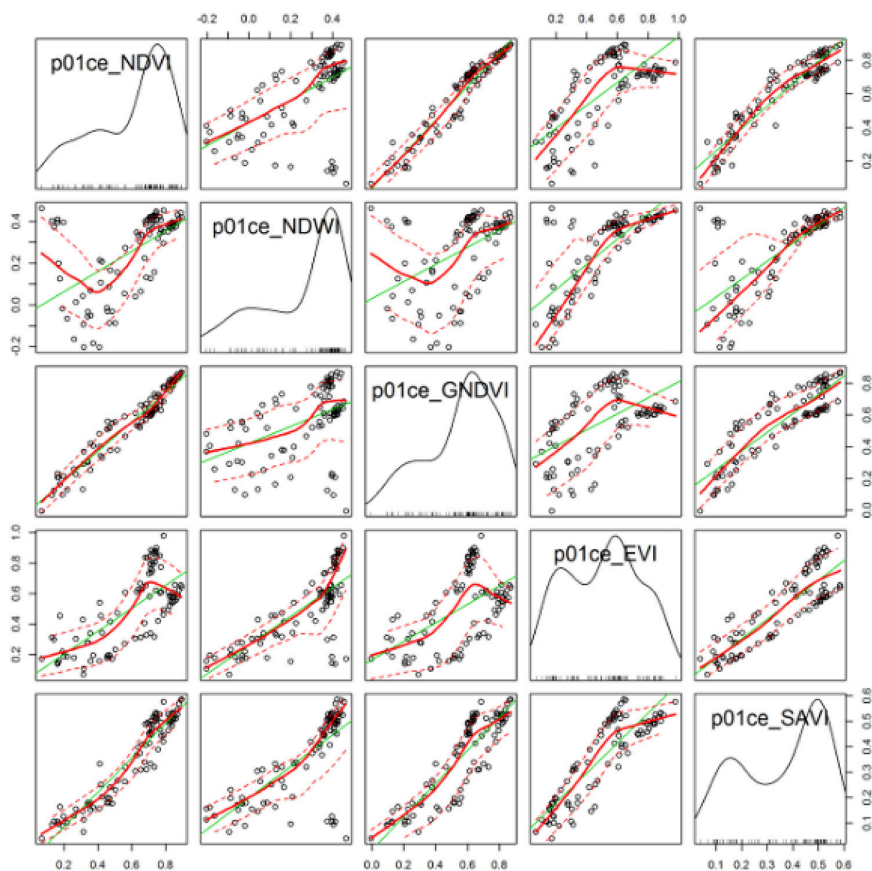


Slika 4. Grafički prikaz NDVI, NDWI, GNDVI, EVI i SAVI izračunatih s DOS1 korekcijom u točki piezometra p01ce.

indekse zajedno i njihove suodnose. Prostorno-vremenskom analizom u točkama dobiven je trend kojim se prati aktivnost vegetacije i izvodi predikcija budućega hoda.

Korelacijska matrica vegetacijskih indeksa pokazuje visoku korelaciju između indeksa na području s gustom vegetacijom. Provedena analiza pokazala je visoku korelaciju između vegetacijskih indeksa i potvrdila kontinuitet u vegetacijskom trendu svih pet ranije navedenih indeksa. Na slici 5 prikazana je korelacijska matrica vegetacijskih indeksa izračunatih s atmosferskom korekcijom DOS1, iz koje se može vidjeti kako najbolju korelaciju imaju NDVI i GNDVI te NDVI i SAVI. Svojevrsne vrijednosti korelacijskih koeficijenata dane su tablično, gdje se jedan od primjera može vidjeti u tablici 2.

Također je izvedena korelacija svih indeksa koji se nalaze na lokacijama piezometara. Izdvojene su vrijednosti najboljih korelacija u svakoj točki piezometra, što je pokazalo da indeks NDVI najbolje korelira s indeksima GNDVI i SAVI i koeficijent korelacije je 0,95.



Slika 5. Korelacijska matrica vegetacijskih indeksa izračunatih s korekcijom DOS1 u točki piezometra p01ce.

Tablica 2. Koeficijenti korelacije u točki piezometra p01ce.

Broj	Prva varijabla	Druga varijabla	Korelacija
1	p01ce_NDVI	p01ce_GNDVI	0,965872
2	p01ce_NDVI	p01ce_SAVI	0,94748
3	p01ce_GNDVI	p01ce_SAVI	0,875374
4	p01ce_EVI	p01ce_SAVI	0,868191
5	p01ce_NDWI	p01ce_EVI	0,755344
6	p01ce_NDWI	p01ce_SAVI	0,731737
7	p01ce_NDVI	p01ce_EVI	0,714604
8	p01ce_NDVI	p01ce_NDWI	0,573989
9	p01ce_GNDVI	p01ce_EVI	0,553655
10	p01ce_NDWI	p01ce_GNDVI	0,468276

## 7. Zaključak

Postoje mnogobrojni načini računanja vegetacijskih indeksa i praćenja aktivnosti vegetacije temeljem satelitskih snimki. U području kontinentalne Hrvatske vegetacijski pokrov bilježi sezonske promjene, što je potvrđeno ovim istraživanjem. Automatizacija obrade podataka koja je izrađena za potrebe ovog istraživanja u statističkom programu *R* umnogome je olakšala manipulaciju i obradu velike količine rasterskih podataka.

Izračunati su i uspoređeni vegetacijski indeksi s nekorigiranim i korigiranim satelitskim snimkama s atmosferskom korekcijom DOS1. Kako u dobivenim indeksima nisu zamijećeni veliki skokovi, to upućuje na mogućnost korištenja nekorigiranih satelitskih snimki na većim područjima istraživanja. Kada razmatramo pet analiziranih vegetacijskih indeksa treba naglasiti da ovo istraživanje upućuje na velika odstupanja i praktičnu neprimjenljivost EVI-ja kada se računa iz snimki bez atmosferske korekcije. Za izračun ostalih četiriju indeksa: NDVI, NDWI, GNDVI i SAVI, mogu se upotrebljavati nekorigirane snimke širih područja istraživanja, što je znatno olakšalo obradu većih setova podataka. Ovo istraživanje potvrdilo je da EVI ima vrijednosti koje nisu primjenjive kada se isti računa iz sirovih snimki bez atmosferske korekcije.

Točkasta analiza znatno ubrzava procesiranje podataka pri obradi većih područja s puno satelitskih snimki i dopušta provođenje analize u realnom vremenu. Točkasta analiza primjenljiva je pri usporedbi s terestričkim informacijama ili kada se želi dobiti informacija točno na određenim lokacijama. Analiza točkastih procesa jednostavnija je metoda za dobivanje prostorno-vremenske informacije i daje točne rezultate kada je potrebno napraviti analizu na specifičnoj lokaciji. Nije isključivo i na širem području izabrati skup referentnih točaka te napraviti analizu. No u tom slučaju treba izabrati što bolje lokacije kako bi se tražena anomalija u šumi detektirala i nakon toga napravila detaljna analiza.

Vegetacijski indeksi imaju značajnu ulogu u nadzoru i detekciji vegetacijskih promjena u smislu kvantitete ili kvalitete. Njihova je najveća prednost u tome što imaju nisku osjetljivosti na nestabilnost korekcije za atmosferu i varijacije u kutu opažanja satelita. Za predviđanje prostorno-vremenske varijable u nepromatranim točkama podzemnih voda dan je statistički pristup za prostorno-vremensko predviđanje i predikciju kao što je multivarijantni pristup u kojem se korelacija između prostornih varijabli različitih vremena obrađuje, dok se razlike u vremenu i prostoru modeliraju preko trendova.

*R* se pokazao kao vrijedan resurs koji pojednostavnjuje i skraćuje vrijeme potrebno za geostatističke analize. Ova je tvrdnja osobito primjenljiva za analizu velikih količina podataka dobivenih iz vremenskih sljedova. U takvom se istraživanju u dužem vremenskom razdoblju prikupi veliki broj informacija koje, osobito kada je riječ o rasterskim podacima, zauzimaju velik memorijski prostor.

Ubuduće bi bilo dobro uključiti i druge parametre, npr. temperaturu i veći broj snimki s različitih senzora od Zemlje do svemira. Mogla bi se provesti mnogobrojna terenska mjerenja i prikazati klasifikacija pojedine sastojine u šumi na osnovi vegetacijskih indeksa.

*ZAHVALA.* Ovaj rad financirala je Hrvatska zaklada za znanost, projektom AFO-RENSA I-2389-2015, br. projekta 1924.

## Literatura

- Carlson, T. N., Ripley, D. A. (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252.
- Coppin, P. R., Bauer, M. E. (1996): Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery, *Remote Sensing Reviews*, 13(3–4), 207–234.
- Deering, D. W. (1978): Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors, Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station.
- Huete, A. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Jensen, J. R. (1996): *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*, Second edition, Prentice Hall., New Jersey, 197–253.
- Jensen, J. R., Lulla, K. (1987): *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*, Geocarto International, 2(1), 65–65.
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, K., Miura, T. (2008): Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3833–3845.
- Maeda, E. E., Moura, Y. M., Wagner, F., Hilker, T., Lyapustin, A. I., Wang, Y., Chave, J., Mõttus, M., Aragão, L. E. O. C., Shimabukuro, Y. (2016): Consistency of vegetation index seasonality across the Amazon rainforest, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 42–53.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G. (2007): Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects, A Case Study in High-density Cypress Forest, *Sensors*, 7(11), 2636–2651.
- McFeeters, S. K. (1996): The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Oluić, M. (2001): *Snimanje i istraživanje Zemlje iz Svemira: sateliti, senzori, primjena*, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti (HAZU) i Geosat, Zagreb.
- Pilaš, I., Planinšek, Š. (2011): Obnova vodnog režima nizinskih šuma kao potpora potrajnom gospodarenju, *Šumarski list*, 135(13), 138–147.
- Pitts, D. G., Kleinstein, R. N. (1993): *Environmental vision: interactions of the eye, vision, and the environment*, Butterworth-Heinemann.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindaschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., Hipple, J. D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C. O., Kilic, A., Kovalsky, V., Lee, Z. P., Lyburner, L., Masek, J. G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R. H., Zhu, Z. (2014): Landsat 8: Science and product vision for terrestrial global change research, *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172.
- Schroeder, T. A., Cohen, W. B., Song, C., Canty, M. J., Yang, Z. (2006): Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon, *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 16–26.
- She, X., Zhang, L., Cen, Y., Wu, T., Huang, C., Baig, M. H. A. (2015): Comparison of the Continuity of Vegetation Indices Derived from Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ Data among Different Vegetation Types, *Remote Sensing*, 7(10), 13485–13506.

- Singh, A. (1989): Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003.
- Treitz, P. M., Howarth, P. J. (1999): Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems, *Progress in Physical Geography*, 23(3), 359–390.
- Wang, F., Huang, J., Tang, Y., Wang, X. (2007): New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice, *Rice Science*, 14(3), 195–203.
- Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., Woodcock, C. E. (2012): Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat, *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10.
- Yoder, B. J., Waring, R. H. (1994): The normalized difference vegetation index of small Douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentrations, *Remote Sensing of Environment*, 49(1), 81–91.

### **Mrežne adrese**

URL 1: NASA, <https://www.nasa.gov/>, (10. 12. 2016.).

# Geostatistical Analysis of Vegetation Indices in Forest Ecosystem Česma

*ABSTRACT.* Because of a possibility to gather and analyse a large amount of spatial data in the longer temporal period, we can get new information which alleviates the implementation of geostatistical analysis on a larger area. Multispectral satellite images with spatial resolution of 30 m taken with Landsat 7 and Landsat 8 satellites were being used in the representative smoothing in the geostatistical analysis. In this study the geostatistical analysis NDVI, NDWI, GNDVI, EVI and SAVI was conducted through a ten-year period in the piezometer points in the Česma forest. This study assesses vegetation indices calculated from the multispectral images on the basis of absorption, transmission and reflection of energy from the vegetation in different spectral bands. Vegetation indices consistently provide spatio-temporal information about vegetation cover, and in this study the forest composition is being observed in two ways. Foundation for the first one are the differences based upon calculated vegetation indices from the raw data where the value of a pixel is DN, and foundation for the second one are the atmospheric corrected satellite images with DOS1 correction. Automatization of data processing was made in statistical program language R which accelerated the processing of a large amount of raster images. R was used for the implementation of the algorithm and its purpose was to conduct a quality geostatistical analysis.

*Keywords:* geostatistics, vegetation indices, atmospheric correction DOS1, correlation, spatio-temporal analysis.

*Primljeno / Received:* 2017-01-05

*Prihvaćeno / Accepted:* 2017-02-11