

Analiza svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj

Čelebićanin, Bojan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:121468>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Bojan Čelebićanin

Analiza svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj

Diplomski rad

**Zagreb,
2021.**

Bojan Čelebićanin

Analiza svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj

Diplomski rad

predan na ocjenu Geografskom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog zvanja
magistra geografije

**Zagreb,
2021.**

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija *Geografija; smjer: istraživački (Geografski informacijski sustavi)* na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Luke Valožića

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Diplomski rad

Analiza svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj

Bojan Čelebićanin

Izvadak: Svjetlosno onečišćenje definira se kao višak svjetlosti noću koji nastaje ljudskim djelovanjem u prostoru. Svjetlosno onečišćenje kakvo danas poznajemo nuspojava je procesa urbanizacije, industrijalizacije i suburbanizacije koji se odvijaju od kraja 19. stoljeća do danas. Ovaj tip onečišćenja predmet je interesa geografa, ekologa, biologa, građevinara, geofizičara te sve više i medicine zbog mogućeg učinka na ljude. U ovom radu analizirano je svjetlosno onečišćenje u Hrvatskoj na temelju podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima DMSP-OLS i SNPP-VIIRS senzorima od 1992. do 2018. godine. GIS analizom utvrđeno je da je svjetlosno onečišćenje u Hrvatskoj u neprestanom porastu te da su glavni uzroci suburbanizacija i učinci izgradnje suvremene mreže autocesta.

59 stranica, 32 grafičkih priloga, 10 tablica, 45 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: svjetlosno onečišćenje, daljinska istraživanja, DMSP, VIIRS, Hrvatska, GIS analiza

Voditelj: doc. dr. sc. Luka Valožić

Povjerenstvo: doc. dr. sc. Luka Valožić
izv. prof. dr. sc. Neven Bočić
doc. dr. sc. Mladen Maradin

Tema prihvaćena: 16. 1. 2020.

Rad prihvaćen: 11. 2. 2021.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geography

Master Thesis

Analysis of light pollution in Croatia

Bojan Čelebićanin

Abstract: Light pollution is defined as excess night-time light generated by human activities. Light pollution as we know it today is a by-product of urbanisation, industrialisation and suburbanisation, processes which have been observed since the late 19th century all the way to today. The subject of light pollution interests' geographers, ecologists, biologists, construction engineers, geophysicists, and even medical professionals due to the potential effect on human health. In this thesis light pollution in Croatia is analysed using data collected by the DMSP-OLS and SNPP-VIIRS sensors. Results of a GIS analysis indicate that light pollution in Croatia is increasing and that the driving factors of the increase are suburbanisation and the effects of building a new motorway system.

59 pages, 32 figures, 10 tables, 45 references; original in Croatian

Keywords: light pollution, remote sensing, DMSP, VIIRS, Croatia, GIS analysis

Supervisor: Luka Valožić, PhD, Assistant Professor

Reviewers: Luka Valožić, PhD, Assistant Professor
Neven Bočić, PhD, Associate Professor
Mladen Maradin, PhD, Assistant Professor

Thesis title accepted: 16/01/2020

Thesis accepted: 11/02/2021

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
1.1. Predmet istraživanja.....	1
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	2
1.3. Prostorni i vremenski obuhvat istraživanja.....	4
1.4. Cilj i hipoteze istraživanja.....	5
2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	6
2.1. Teorijski okvir.....	6
2.2. Obrada DMSP-OLS podataka.....	8
2.3. Obrada SNPP-VIIRS podataka.....	12
3. ANALIZA SVJETLOSNOG ONEČIŠĆENJA.....	15
3.1. Razdoblje od 1992. do 2012.	15
3.1.1. Noćna svjetla i stanovništvo.....	15
3.1.2. Noćna svjetla i BDP.....	16
3.1.3. Prosječne vrijednosti noćne svjetlosti.....	17
3.1.4. Promjena intenziteta noćnih svjetala.....	23
3.1.5. Udio teritorija RH pod svjetlosnim onečišćenjem.....	28
3.1.6. Svjetlosno onečišćenje i naselja.....	32
3.1.7. Noćna svjetlost i mreža autocesta.....	38
3.2. Razdoblje od 2013. do 2018.	43
3.2.1. Radijancija kroz vrijeme.....	43
3.2.2. Stanovništvo, gospodarstvo i radijancija.....	46
4. RASPRAVA.....	48
5. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	54
IZVORI.....	58
POPIS PRILOGA.....	VII

1. UVOD

1.1. Predmet istraživanja

Više od 3 milijarde godina život na planeti Zemlji odvija se u ritmu svijetla i tame, odnosno dana i noći. Svjetlina noćnog neba bila je uvjetovana isključivo sjajem Mjeseca i svjetlošću dalekih zvijezda. Industrijalizacijom i urbanizacijom krajem 19. i početkom 20. stoljeća pojavljuje se svjetlosno onečišćenje kakvo danas poznajemo (IDA, n.d.). IDA (Internacionalna organizacija za zaštitu noćnog neba) nevladina je organizacija iz SAD-a čiji je cilj upoznati svijet sa štetnim učincima svjetlosnog onečišćenja te raditi na očuvanju prirodne ravnoteže u ekosustavima, ljudskog zdravlja i prirodnog noćnog neba. IDA definira svjetlosno onečišćenje kao svaki višak svjetlosti koji nastaje ljudskim djelovanjem u prirodi te u to uključuje: povećanje svjetline noćnog neba, osvjetljenje izvan područja koje je potrebno osvijetliti, prekomjerno osvjetljenje i rasipanje svjetlosne energije.

U dijelu znanstvene zajednice, čije je područje interesa geografija, zaštita okoliša i geoinformatika, svjetlosno onečišćenje definira se kao umjetno osvjetljenje noćnog neba nastalo djelovanjem uličnih svjetiljki te ostalih antropogenih izvora svjetlosti koji uključuju: svjetlost na eksterijerima zgrada, svjetlost iz interijera zgrada, svjetlost iz industrijskih kompleksa i infrastrukture (Elstarghy i Kim, 2015, Butt, 2012). Pojava svjetlosnog onečišćenja veže se uz urbanizirana područja, njihov razvoj i ekonomske aktivnosti (Bennie i dr., 2014). Chalkias i dr. (2006) ističu glavne negativne učinke svjetlosnog onečišćenja: narušavanje bioloških ritama u ekosustavima, psihološki utjecaj na ljude te degradaciju okoliša.

Svijest o problemu svjetlosnog onečišćenja javlja se 1970-ih godina te su ovu problematiku prvi otvorili astronomi zbog poteškoća u promatranju nebeskih tijela teleskopima sa zemljine površine. Godine 1972. astronom Merle F. Walker proveo je prva mjerenja svjetlosnog onečišćenja sa zemljine površine (Andreić i dr., 2011). Tek sredinom i krajem 90-ih godina prošlog stoljeća i s redovitom objavom podataka nastalih daljinskim istraživanjima počinje interes šire znanstvene zajednice, posebice geografa, za ovu problematiku (Elstarghy i Kim, 2015, Eldvige i dr., 1999).

U Republici Hrvatskoj problematikom svjetlosnog onečišćenja bavili su se uglavnom astronomi, geofizičari i fizičari. Godine 2019. na Petrovoj gori otvoren je prvi hrvatski park tamnog neba. Tema svjetlosnog onečišćenja privukla je pažnju javnosti 2020. godine kada

je objavljeno da će izgradnja komunikacijske infrastrukture nepovratno uništiti već spomenuti park tamnog neba.

1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanje svjetlosnog onečišćenja započelo je 1972. godine, a začetnik istraživanja je astronom Merle F. Walker. Cilj istraživanja bio je utvrditi utjecaj svjetlosnog onečišćenja na rad i isplativost zvezdarnica u Kaliforniji i Arizoni. Istraživanje je provedeno sa Zemljine površine i podaci su prikupljeni fotometrom, uređajem koji mjeri elektromagnetsko zračenje u svim spektrima (Walker, 1973). U sklopu istraživanja izrađene su i prve karte koje prikazuju stupanj svjetlosnog onečišćenja, te je definiran Walkerov zakon koji opisuje povećanje svjetline noćnog neba u odnosu na veličinu i udaljenost od naselja.

U Republici Hrvatskoj provedeno je nekoliko istraživanja svjetlosnog onečišćenja te sva istraživanja u svojoj osnovi imaju opažanje i prikupljanje podataka fotometrom ili drugim mjernim instrumentima na zemljinoj površini. Andreić i dr. (2011) istraživali su svjetlosno onečišćenje u Hrvatskoj na 20 lokacija te su na većini utvrdili umjeren stupanj onečišćenja, neznatan stupanj svjetlosnog onečišćenja utvrđen je u Gorskom kotaru i Lici. Sharma i dr. (2015) istraživali su svjetlosno onečišćenje u Zagrebu unutar osmomjesečnog razdoblja 2010. i 2011. godine. Utvrdili su vezu između meteoroloških prilika poput magle i naoblake sa stupnjem svjetlosnog onečišćenja u središtu Zagreba. Pavlić i Andreić (2020) istraživali su stupanj i promjenu svjetlosnog onečišćenja u središtu Zagreba i zagrebačkom suburbiju u razdoblju od 2014. do 2017. godine. Glavni zaključak ovog istraživanja jest veće povećanje svjetlosnog onečišćenja u zagrebačkom suburbiju u odnosu na središte grada.

Upotreba GIS softvera i alata u istraživanjima svjetlosnog onečišćenja započinje nakon objave podataka prikupljenim daljinskim istraživanjima. Razvoj metodološkog okvira za usporedbu i analizu detaljnije je opisan u poglavlju metodologija.

Chalkias i dr. (2006) i Tavoosi i dr. (2009) analiziraju dinamiku širenja gradova Atene i Teherana na temelju promjena svjetlosnog onečišćenja te također analiziraju utjecaj reljefa na širenje viška svjetlosti koji nastaje u gradovima.

Nekoliko autora postavlja vezu između svjetlosnog onečišćenja i socio-ekonomskog razvoja. Eldvige i dr. (2009a) izradili su svjetsku kartu siromaštva temeljenu na podacima popisa stanovništva i kućanstava, satelitskih snimki, razvoja naselja i izgrađenosti te dinamici

noćnih svjetala. Han i dr. (2014) i Wu i dr. (2018) istražuju socio-ekonomski razvoj Kine i neravnomjeran regionalni razvoj analizirajući podatke o noćnim svjetlima. Eldvige i dr. (2014) stavljaju kretanje nacionalnih vrijednosti BDP-a i kretanje broja stanovnika države u korelaciju sa svjetlosnim onečišćenjem te kategoriziraju države na temelju rezultata. U radu iz 1999. godine Eldvige i dr. predlažu analizu noćnih svjetala i svjetlosnog onečišćenja kao jednu od metoda utvrđivanja gustoće stanovništva. Pestallozi i dr. (2014) uspoređuju kretanje broja stanovnika u aglomeracijama diljem svijeta te zaključuju da porast površine pod izraženim svjetlosnim onečišćenjem je u direktnoj vezi sa porastom broja stanovnika aglomeracije. Također izračunavaju promjenu površine pod izraženim svjetlosnim onečišćenjem za stotinjak zemalja svijeta, no bez dovođenja u vezu istog sa demografskim trendovima u tim zemljama. Ma i dr. (2020) uspoređuju kretanje SOL vrijednosti i ukupnog svjetskog BDP-a, te čine isto za nekoliko država ali bez detaljne analize. Li i dr. (2013) stavljaju promjenu noćne svjetlosti u korelaciju sa promjenom BDP-a i utvrđuju jaku povezanost ovih varijabli.

Levin i Zhang (2017) istražuju utjecaj ekonomskih, bioloških i klimatskih čimbenika na broj i količinu noćne svjetlosti u različitim dijelovima godine.

U literaturi se pojavljuju i radovi čiji je cilj ukazati na problem svjetlosnog onečišćenja kao sve većeg suvremenog problema i štetnog učinka na ekosustave. Elstarghy i Kim (2015) na istraživanju u južnoj Kaliforniji predlažu postupno smanjenje učinka svjetlosnog onečišćenja mjerama poput: boljeg planiranja ulične rasvjete, većeg razmaka između rasvjetnih stupova na ulicama, nižih rasvjetnih stupova te kvalitetnijeg usmjeravanja svjetlosti sa ulične rasvjete. Rodrigues i dr. (2012) istražuju učinak svjetlosnog onečišćenja na aktivnosti noćnih životinja i populaciju velikih zovoja na Azorskom otočju. U istraživanju je potvrđen izrazito negativan utjecaj na ponašanje ptica te da je otprilike 20 % populacije ptica na Azorima pod utjecajem svjetlosnog onečišćenja. Kamrowski i dr. (2012) istražuju utjecaj svjetlosnog onečišćenja na morske kornjače na obalama Australije te zaključuju da svjetlosno onečišćenje utječe na ponašanje kornjača.

Iz pregleda literature mogu se vidjeti različiti pristupi u istraživanju svjetlosnog onečišćenja. Ova problematika zanimljiva je astronomima, fizičarima, biologima, geografima i građevinarima što ju čini veoma interdisciplinarnom.

1.3. Prostorni i vremenski obuhvat istraživanja

Prostorni obuhvat istraživanja čini cjelokupni teritorij Republike Hrvatske, odnosno zbog prirode problematike svjetlosnog onečišćenja sav naseljeni prostor Republike Hrvatske. U Hrvatskoj ima preko 6 500 naselja no kao glavni izvor svjetlosnog onečišćenja izdvajaju se gradska naselja. Od 60-ih godina prošlog stoljeća u Hrvatskoj se gradska naselja izdvajaju prema različitim kriterijima, najčešće prema veličini odnosno broju stanovnika, udjelu nepoljoprivrednog stanovništva, udjelu radnika u mjestu stanovanja te administrativnom značaju. Zupanc (2008) ističe važnost socioekonomskih kriterija u određivanju statusa naselja. Prema DZS (2011) u RH se izdvaja 143 gradska naselja te se ističe potreba za preciznijim izdvajanjem prijelaznih naselja. U Hrvatskoj se danas izdvaja nešto više od 200 gradskih ili urbaniziranih naselja (Magaš, 2013).



Sl.1. Mreža odabranih naselja i važnijih prometnica u Republici Hrvatskoj

Prema CIA World Factbook stopa urbanizacije u Republici Hrvatskoj iznosi oko 58 % dok prema Magašu (2013) oko 65 %. Glavna obilježja urbanog sustava Republike Hrvatske su

nedostatak velikih gradova, nepravilan red veličine gradova te prevlast malih naselja. Dominantni procesi u hrvatskim gradovima i njihovim okolicama od 80-ih i 90-ih godina prošlog stoljeća su suburbanizacija i satelitizacija (Vresk, 1992; Vresk, 1998). Suburbanizacija je proces fizionomske, socijalne i funkcionalne promjene okolice gradova. Vremenski okvir istraživanja obuhvaća razdoblje od 1992. do 2018. godine. Zbog promjene senzora za prikupljanje podataka i metodologije obrade podataka vremenski okvir istraživanja podijeljen je na dva razdoblja:

- 1.) Od 1992. do 2012. – ovo razdoblje obuhvaća podatke prikupljene DMSP-OLS misijama. Dio Domovinskog rata te cjelokupno razdoblje prije ulaska Republike Hrvatske u EU.
- 2.) Od 2013. do 2018. – ovo razdoblje obuhvaća podatke prikupljene SNPP-VIIRS senzorom. Hrvatsko članstvo u EU.

U trenutku definiranja teme i pisanja ovog diplomskog rada nije bilo dostupnih podataka o svjetlosnom onečišćenju za razdoblje nakon 2018. godine iako je SNPP satelit i dalje u funkciji.

1.4. Cilj i hipoteze istraživanja

Glavni cilj ovog rada jest analizirati promjenu svjetlosnog onečišćenja od 1992. do 2018. u Republici Hrvatskoj i utvrditi glavne izvore. Uz promjenu kroz vrijeme cilj je istražiti vezu svjetlosnog onečišćenja sa kretanjem broja stanovnika i gospodarskim pokazateljima te vezu svjetlosnog onečišćenja sa izgradnjom prometne infrastrukture koja ima utjecaj na razvoj naselja. Na temelju ovoga hipoteze ovog rada su:

H1: Kontinuirani pad broja stanovnika u Republici Hrvatskoj rezultira padom svjetlosnog onečišćenja na nacionalnoj razini.

H2: Razvoj prometne infrastrukture, ponajviše suvremenih autocesta, posebice kroz Gorski kotar, Liku, Dalmaciju i Slavoniju utječe na porast svjetlosnog onečišćenja lokalno, u naseljima uz čvorišta.

H3: Proces suburbanizacije i satelitizacije utječu na porast svjetlosnog onečišćenja na lokalnoj razini.

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

2.1. Teorijska osnova

Cilj ovog potpoglavlja 2.1. je prikazati najvažnije pojmove za istraživanu temu. Daljinska istraživanja su proces prikupljanja podataka o Zemljinoj površini pomoću senzora koji bilježe elektromagnetsko zračenje u jednom ili više dijelova elektromagnetskog spektra, bilo ono izvorno sa Zemljine površine ili reflektirano od nje (Campbell i Wayne, 2011). Elektromagnetsko zračenje čine dvije glavne komponente: električno polje (E) i magnetsko polje (B). Električno i magnetsko polje su okomiti u odnosu jedno na drugo te okomiti u odnosu na smjer širenja vala. Glavne veličine za opisivanje elektromagnetskog zračenja odnosno elektromagnetskih valova su valna duljina (λ) i frekvencija (ν):

- Valna duljina je linearna udaljenost između dvaju valnih maksimuma ili minimuma, izražava se u mikrometrima ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) ili nanometrima ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
- Frekvencija je broj grebena valova koji prolaze kroz fiksnu točku u vremenskom intervalu, izražava se u hertzima (hz).

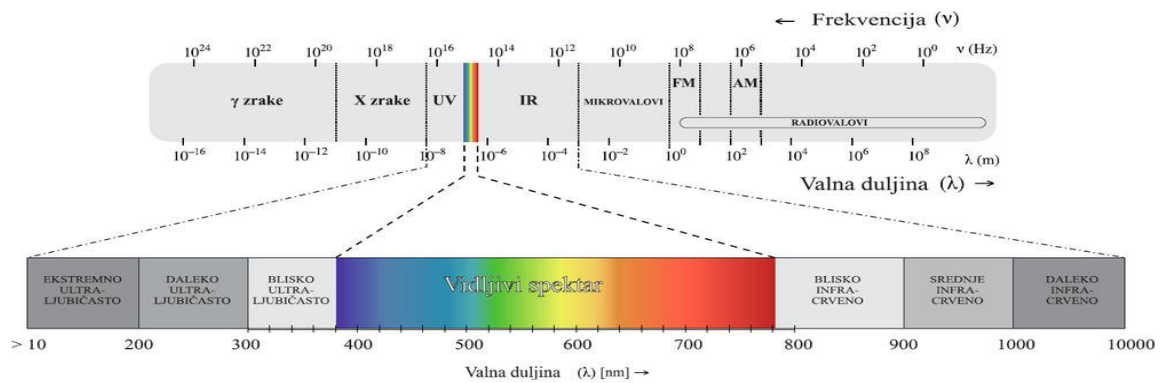
Brzina širenja elektromagnetske energije je konstantna te je jednaka brzini svjetlosti c koja iznosi 299 792 km/s te je definirana kao umnožak valne duljine i frekvencije (Campbell i Wayne, 2011):

$$c = \lambda * \nu$$

Karakteristike elektromagnetske energije mogu se iskazivati frekvencijom ili valnom duljinom, u daljinskim istraživanjima uobičajeno je definirati dijelove elektromagnetskog spektra valnom duljinom izraženom u μm i nm.

Elektromagnetski spektar može se prema valnim duljinama podijeliti na: gama zračenje ($< 0,03 \text{ nm}$), X-zračenje ($0,03 - 300 \text{ nm}$), UV zračenje ($0,30 - 0,38 \mu\text{m}$), ljudskom oku vidljiv dio spektra ($0,38 - 0,72 \mu\text{m}$), infracrveni dio spektra ($0,72 - 1\ 000 \mu\text{m}$ (1 mm)), mikrovalni dio spektra ($1 \text{ mm} - 30 \text{ cm}$) i radiovalovi ($> 30 \text{ cm}$) (Campbell i Wayne, 2011). Na sl. 2 shematski je prikazan elektromagnetski spektar.

Podaci prikupljeni daljinskim istraživanjima i korišteni u ovom radu snimljeni su u vidljivom i infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.



Sl.2. Elektromagnetski spektar

Izvor: Ratkajec, 2014

Kvalitetu rasterskih podataka često iskazujemo rezolucijom. Prema Enciklopedija HR (2020) rezoluciju se može definirati kao mjeru za razaznavanje pojedinosti na nekom prikazu ili sposobnost mjernog uređaja da razlikuje bliska svojstva ili dijelove cjeline promatranog objekta. U daljinskim istraživanjima razlikujemo prostornu, spektralnu, radiometrijsku i vremensku rezoluciju:

- Prostorna rezolucija senzora odnosi se na najmanju veličinu objekta koji se može detektirati na snimci, najčešće se predočava veličinom piksela u metrima.
- Spektralna rezolucija opisuje opseg intervala valnih duljina koje senzor može detektirati. Razlikujemo multispektralne (do 10 kanala) i hiperspektralne (više od 10 kanala) senzore
- Radiometrijska rezolucija označava osjetljivost senzora pri razlučivanju gradijenata elektromagnetskog zračenja, izražava se brojem bitova u koje je podijeljeno zabilježeno elektromagnetsko zračenje, ponekad se može iskazati digitalnim brojem DN
- Vremenska rezolucija je vrijeme potrebno za ponovno snimanje iste lokacije, izražava se u intervalima

Izvor elektromagnetskog zračenja koji se proučava u ovom radu je svjetlost koja dolazi sa Zemljine površine. Za opisivanje elektromagnetskog zračenja koje dolazi sa neke površine koristi se mjerna veličina radijancije (L), a izražava se u vatima po kvadratnom metru po steradianu ($W m^{-2} sr^{-1}$)

2.2. Obrada DMSP-OLS podataka

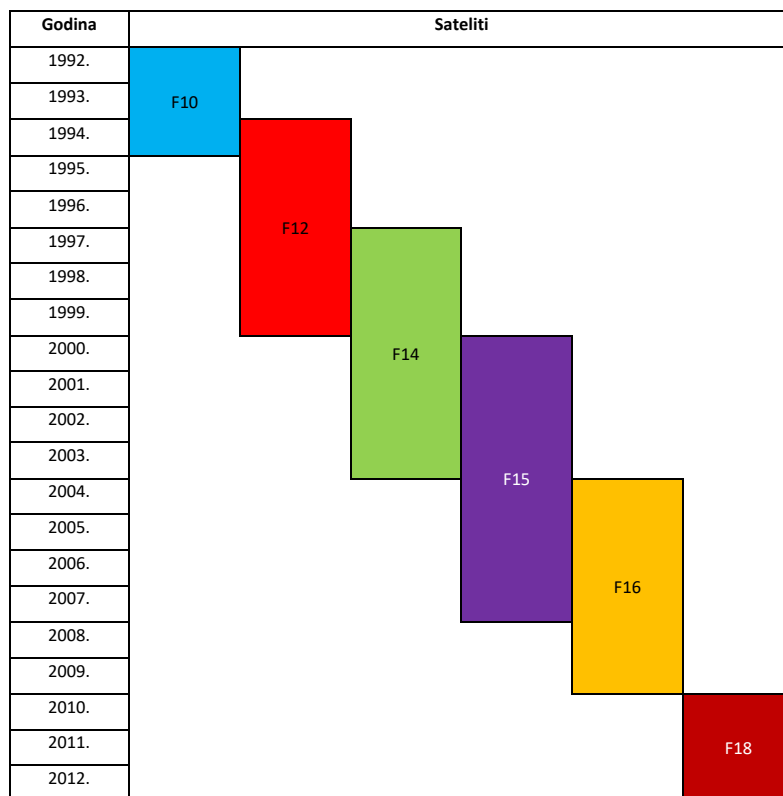
Sredinom 60-ih godina prošlog stoljeća ministarstvo obrane SAD-a pokrenulo je istraživački projekt pod nazivom „Defense Meteorological Satellite Program“, skraćeno DMSP. Početni cilj ovog projekta je bio svakodnevno prikupljanje meteoroloških podataka za potrebe američkih oružanih snaga. Osim meteoroloških prilika senzori na satelitima bilježili su i izvore noćnog osvjetljenja na zemljinoj površini. DMSP-OLS sateliti nalazili su se u polarnoj orbiti oko 850 km od zemljine površine, bili su opremljeni sensorima za vidljivi i infracrveni dio elektromagnetskog spektra (VNIR kanal). Bilo je uobičajeno da su u orbiti istovremeno dva satelita što dovodi do preklapanja podataka u pojedinim godinama (Pestallozi i dr., 2014). Sateliti bi obišli Zemlju u prosjeku 14 puta dnevno, snimanja noćnih izvora svjetlosti najčešće bi se odvijala između 19:30 i 21:30 po lokalnom vremenu. Životni vijek jednog satelita u prosjeku je bio između 6 i 8 godina (Eldvige i dr., 2001).

Godine 1972. ovaj projekt je deklasificiran i prikupljeni, uglavnom meteorološki, podaci DMSP-OLS misija postali su dostupni znanstvenoj zajednici. Od 1992. godine podaci o noćnim svjetlima se objavljuju u rasterskom obliku kao prosječni godišnji kompoziti prostorne rezolucije 1 km i pokrivaju područje od 180° E do 180° W i od 75° N do 65° S. Moguće ih je preuzeti besplatno sa službenih stranica National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Posljednji podaci o noćnim svjetlima objavljeni su 2013. godine.

Za istraživanje svjetlosnog onečišćenja koristi se skup podataka Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series. Unutar ovog skupa podataka su dva podskupa: Average, Visible Stable Lights, and Cloud-free Coverages te Average Lights x pct.

Pri izradi diplomskog rada korišten je podskup Average, Visible Stable Lights, and Cloud-free Coverages koji sadrži pročišćene (bez privremenih pojava poput dugotrajnih šumskih požara) rasterske podatke o antropogenim izvorima noćne svjetlosti snimljene u vidljivom i blisko-infracrvenom dijelu spektra te radiometrijske rezolucije 6 bita (2^6) gdje vrijednost digitalnog broja (DN) 0 predstavlja tamna i potpuno neosvijetljena područja a vrijednost 63 osvjetljenjem izrazito zasićena područja u središtima velikih gradova.

Sl.3. prikazuje šest DMSP satelita kroz godine od 1992. do 2012. godine, iz prikaza vidljivo je preklapanje u pojedinim godinama. Satelit F18 jedini je koji nema preklapanja.



Sl.3. Shematski prikaz satelita i preklapanja prikupljenih podataka

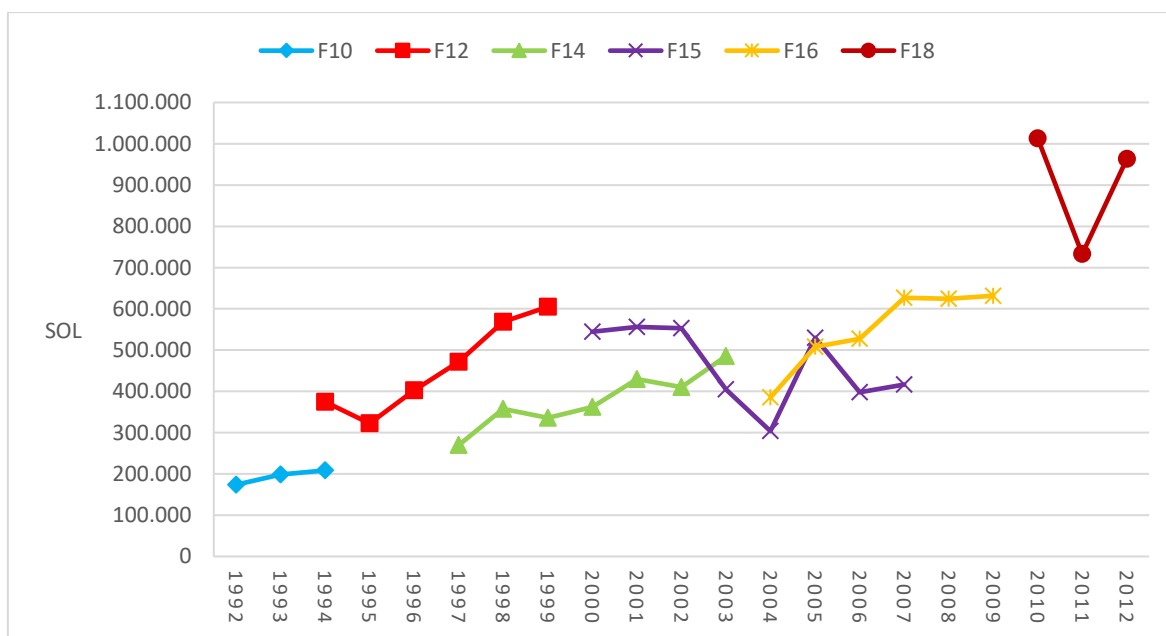
Podaci o noćnim svjetlima prikupljeni DMSP-OLS misijama u svom izvornom obliku, u kojem su preuzeti od NOAA-e, nisu međusobno usporedivi. Razlog neusporedivosti podataka prikupljenih različitim satelitima jest nedostatak *on-board* kalibracije na sensorima. Nerijetko i podaci prikupljeni istim sensorom u različitim godinama nisu usporedivi zbog degradacije senzora (Pestalozzi i dr., 2014, Eldvige i dr., 2014). Sama izrada kvalitetnog metodološkog okvira za usporedbu ovih podataka predmet je brojnih znanstvenih radova. Godine 2009. Eldvige i dr. razvili su metodu interkalibracije DMSP-OLS podataka temeljenu na regresiji drugog reda. Podaci prikupljeni satelitom F12 1999. godine odabrani su kao referentni te su stavljeni u regresijski odnos s podacima prikupljenim ostalim satelitima. Rezultati ovog postupka su jednadžbe s regresijskim koeficijentima za svaku godinu i satelit. Mnogi radovi koji se bave interkalibracijom DMSP-OLS podataka često su fokusirani na samo jednu državu ili jednu regiju te često u svojoj osnovi imaju metodologiju Eldvigea i dr. iz 2009. godine, poput Han i dr. (2014) koji koriste Kinu kao referentnu regiju. Li i Zhou (2017) predložili su metodu interkalibracije u nekoliko koraka, gdje svaki korak odgovara pojedinom satelitu. Ma i dr. (2020) predlažu novi model interkalibracije zasnovan na nekoliko matematičkih funkcija, no predloženi model još nije bio primijenjen u istraživanjima drugih autora.

Pri izradi ovog rada primijenjena je metodologija koju su razvili Eldvige i dr. 2014. godine. Riječ je o doradenoj metodologiji iz 2009. godine te uključuje kalibracijske koeficijente za gotovo cijeli vijek DMSP-OLS misije. Radijancija, tj. svjetlina piksela, iskazana je digitalnim brojem (DN), odnosno vrijednošću piksela, koja poprima vrijednost od 0 do 63, kako je opisano ranije u ovom poglavlju. Kako bi bili međusobno usporedivi podatke je potrebno interkalibrirati prema jednadžbi:

$$DN_{novi} = C_0 + C_1 * DN_{stari} + C_2 * DN_{stari}^2$$

gdje je DN_{novi} interkalibrirana vrijednost digitalnog broja, DN_{stari} izvorna vrijednost, a C_0 , C_1 i C_2 kalibracijski koeficijenti izvedeni iz regresijskog modela. Vrijednosti koeficijenata prikazane su u Tab.1. Interkalibrirane minimalne vrijednosti mogu biti manje od 0 a maksimalne veće od 63, u tim slučajevima vrijednosti se zaokružuju na 0 i 63.

Sl. 4 prikazuje SOL (Sum of lights) dijagram za Republiku Hrvatsku, odnosno zbroj svih svjetala, tj. vrijednosti piksela. U zbroj svih svjetala ulaze pikseli sa $DN \geq 6$, sve manje vrijednosti predstavljaju potpunu tamu i male ruralne zajednice koje ne doprinose značajno svjetlosnom onečišćenju (Eldvige i dr., 2014). Analizom sl. 4. potvrđuje se neusporedivost izvornih podataka, glavni dokaz tome jest nepreklapanje SOL vrijednosti za satelite čije se vrijeme rada preklapa.



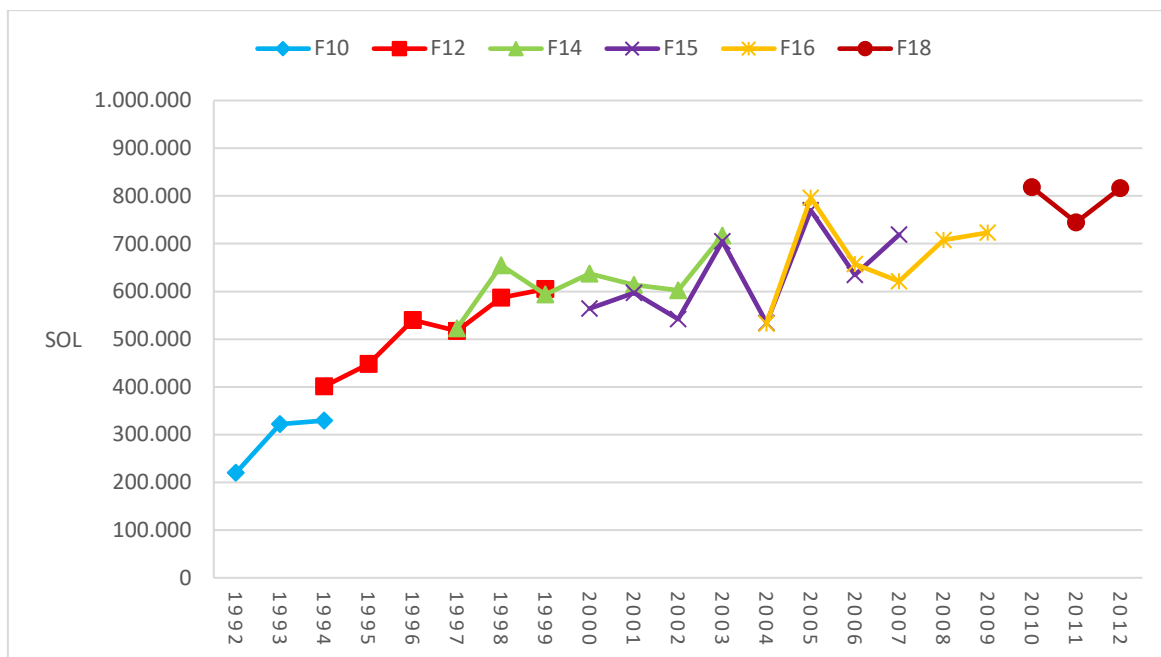
Sl.4. Zbroj noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2012. godine, izvorne vrijednosti, $DN \geq 6$

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Tab.1. Koeficijenti za interkalibraciju DMSP-OLS podataka

Satelit	Godina	C ₀	C ₁	C ₂	R ²
F10	1992.	-2,0570	1,5903	-0,009	0,9075
F10	1993.	-1,0582	1,5983	-0,0093	0,9360
F10	1994.	-0,3458	1,4864	-0,0079	0,9243
F12	1994.	-0,6890	1,1770	-0,0025	0,9071
F12	1995.	-0,0515	1,2293	-0,0038	0,9178
F12	1996.	-0,0959	1,2727	-0,004	0,9319
F12	1997.	-0,3321	1,1782	-0,0026	0,9245
F12	1998.	-0,0608	1,0648	-0,0013	0,9536
F12	1999.	0,0000	1,000	0,000	1,0000
F14	1997.	-1,1323	1,7696	-0,0122	0,9101
F14	1998.	-0,1917	1,6321	-0,0101	0,9723
F14	1999.	-0,1557	1,5055	-0,0078	0,9717
F14	2000.	1,0988	1,3155	-0,0053	0,9278
F14	2001.	0,1943	1,3219	-0,0051	0,9448
F14	2002.	1,0517	1,1905	-0,0036	0,9203
F14	2003.	0,7390	1,2416	-0,004	0,9432
F15	2000.	0,1254	1,0452	-0,001	0,9320
F15	2001.	-0,7024	1,1081	-0,0012	0,9593
F15	2002.	0,0491	0,9568	0,001	0,9658
F15	2003.	0,2217	1,5122	-0,008	0,9314
F15	2004.	0,5751	1,3335	-0,0051	0,9479
F15	2005.	0,6367	1,2838	-0,0041	0,9335
F15	2006.	0,8261	1,2790	-0,0041	0,9387
F15	2007.	1,3606	1,2974	-0,0045	0,9013
F16	2004.	0,2853	1,1955	-0,0034	0,9039
F16	2005.	-0,0001	1,4159	-0,0063	0,9390
F16	2006.	0,1065	1,1371	-0,0016	0,9199
F16	2007.	0,6394	0,9114	0,0014	0,9511
F16	2008.	0,5564	0,9931	0,0000	0,9450
F16	2009.	0,9492	1,0683	-0,0016	0,8918
F18	2010.	2,343	0,5102	0,0065	0,8462
F18	2011.	1,8956	0,7345	0,003	0,9095
F18	2012.	1,8750	0,6203	0,0052	0,9392

Izvor: Eldvige i dr., 2014.



Sl. 5. Zbroj noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2012., interkalibrirane vrijednosti, $DN \geq 6$

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Nakon interkalibracije vidljivo je više preklapanja u podacima različitih satelita (sl. 5), moguće je vidjeti trend te je moguća direktna usporedba podataka kroz vrijeme. Također vidi se da je jači porast trajao do sredine 2000-ih godina te je od tada porast slab, ali nema govora o stagnaciji. No, bitno je naglasiti da ova metoda interkalibracije nije savršena te ne otklanja u potpunosti nedostatke poput degradacije senzora ili mogući prelet satelita iznad istraživanog područja u noćnim satima kada je manje noćnih svjetala.

Interkalibracija DMSP-OLS rastera provedena je uz pomoć alata *Raster calculator*. Analiza i kartografski prikazi izrađeni su uz pomoć aplikacije ArcMap koja je dio ArcGis 10.3.1. paketa. Dio grafičkih priloga izrađen je u MS Excellu.

2.3. Obrada SNPP-VIIRS podataka

Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP) proizvod je suradnje NASA-e, Ministarstva Obrane SAD-a i NOAA-e. Riječ je o satelitu u polarnoj orbiti, na visini od 830 kilometara. Glavna zadaća SNPP satelita je prikupljanje podataka o vremenskim prilikama, klimi te praćenje promjena na kopnenim i vodenim površinama, vegetaciji te atmosferi.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, skraćeno VIIRS, je instrument na SNPP satelitu koji snima zemljinu površinu dvaput dnevno u 22 spektralna kanala (NASA, n.d.).

Day-Night-Band, skraćeno DNB, je kanal za valne duljine od 0,50 do 0,90 μm te pokriva dio vidljivog i blisko-infracrveni dio elektromagnetskog spektra. Koristi za prikupljanje podataka o radijanciji antropogene noćne svjetlosti i reflektirane sunčeve ili mjesečeve svjetlosti (VIIRS SDR User Guide, 2017). Prostorna rezolucija DNB kanala je 742 m a radiometrijska rezolucija je 14 bita (2^{14}). Za razliku od DMSP-OLS-a koji snima noćnu svjetlost u ranijim večernjim satima, iza 19:30 po lokalnom vremenu, VIIRS DNB snimci prikazuju stanje u 1:30 sati po lokalnom vremenu. Smatra se da je noćna svjetlost u urbanim sredinama na svom vrhuncu oko 22 sata, no iako snimci nastali oko 1:30 sati bilježe nešto manje antropogene noćne svjetlosti i dalje se smatraju relevantnima (Eldvige i dr., 2013).

Podaci SNPP VIIRS-a dostupni su besplatno na mrežnim stranicama National Oceanic and Atmospheric Administration¹ pod nazivom Version 1 Nighttime VIIRS Day/Night Bands Composites. Za razliku od DMSP-OLS podataka, koji su dostupni samo kao godišnji kompoziti, SNPP VIIRS podaci dostupni su na mjesečnoj i dnevnoj bazi. Umjesto jednog rasterskog sloja koji pokriva cijeli svijet, SNPP VIIRS podaci dostupni su u 6 dijelova. Na sjevernoj polutki rasteri imaju prostorni obuhvat do 75° sjeverno od ekvatora te svaki dio obuhvaća po 120° geografske dužine. Na južnoj polutki svaki dio također obuhvaća po 120° geografske dužine no samo do 65° južno od ekvatora. Dijelovi rastera numerirani su od 1 do 6 u smjeru od zapada prema istoku te označeni graničnom paralelom i meridijanom. Za potrebe ovog rada korišteni su mjesečni rasteri označeni brojem 2 i 75 N 60 W od 2013. do 2018. godine.

Podaci za svaki mjesec dostupni su u dvije konfiguracije:

- 1) VCM – kompoziti bez podataka na čiju kvalitetu utječe zalutala svjetlosti
- 2) VCMSL – kompoziti nastali nakon korekcije utjecaja zalutale svjetlosti.

Zalutala svjetlost se u ovom slučaju definira kao sunčeva svjetlost i radijancija iz zone sumraka na istoku koja upada na senzore i utječe na kvalitetu snimka (Mills i dr., 2013). Utjecaj tzv. zalutale svjetlosti na sjevernoj polutki najizraženiji je u ljetnim mjesecima te stoga u VCM kompozitima vrijednost radijancije na teritoriju Republike Hrvatske od svibnja do kolovoza, zbog isključivanja podataka, iznose 0. Kako bi se izbjegao utjecaj zalutale

¹ Od kraja prosinca 2020. godine SNPP-VIIRS podaci dostupni su na novoj web adresi Earth Observation Group-a, uz prethodnu registraciju korisnika, te su objavljeni prethodno nedostupni mjesečni podaci za 2019. godinu

svjetlosti i isključivanje četvrtine podataka u ovom radu korišteni su VCMSL mjesečni kompoziti, na kojima je provedena korekcija od strane proizvođača podataka. Preuzeti VCMSL mjesečni kompoziti sadrže dva rasterska sloja podataka:

- 1) Sloj sa prosječnim mjesečnim vrijednostima radijancije
- 2) Sloj sa brojem *cloud-free* snimaka na temelju kojih je izračunat mjesečni prosjek

Za praćenje promjene svjetlosnog onečišćenja, odnosno radijancije, potrebno je napraviti prosječne godišnje kompozite iz mjesečnih podataka. Li i dr. (2020) izračunavaju godišnji prosjek radijancije prema sljedećem postupku: zbog često različite kvalitete VIIRS mjesečnih prosjeka u različitim regijama, vrijednost radijancije u svakom pikselu ponderirana je brojem *cloud-free* snimaka u tom pikselu. Ponder za svaki mjesec, W_{cf}^m , izračunat je formulom:

$$W_{cf}^m = cf_m / \sum_{m=1}^{12} cf_m$$

gdje je cf_m cjelobrojna vrijednost, odnosno broj *cloud-free* snimaka u danom pikselu. Godišnji kompozit računa se kao ponderirana aritmetička sredina prema formuli:

$$VIIRS_a = \sum_{m=1}^{12} VIIRS_m * W_{cf}^m$$

gdje $VIIRS_a$ vrijednost godišnjeg prosjeka, a $VIIRS_m$ vrijednost mjesečnog prosjeka radijancije. Izvorni rasteri su uz pomoć alata *Clip* svedeni na kopneni dio teritorija RH. Uz pomoć *Raster calculatora* izračunate su vrijednosti pondera te potom ponderirane aritmetičke sredine. Pri izradi godišnjih kompozita te analizi i vizualizaciji korišteni su programi ArcMap 10.3.1. i ArcGIS Pro 2.6.

Bitno je napomenuti da DMSP-OLS i SNPP-VIIRS podaci nisu direktno usporedivi. Izrađeno je više radova sa ciljem postizanja usporedivosti ovih podataka upotrebom različitih matematičkih funkcija i modela no trenutno ne postoji jedna općeprihvaćena metodologija (Li i dr., 2020, Wu i Wang, 2019, Ma i dr., 2020).

Svi kartografski prikazi DMSP-OLS i SNPP VIIRS podataka izrađeni su u projekcijskom koordinatnom sustavu HTRS96/TM. Ostali prostorni podaci korišteni u ovom radu preuzeti su sa Središnjeg registra prostornih jedinica (DGU) i Open Street Map servisa.

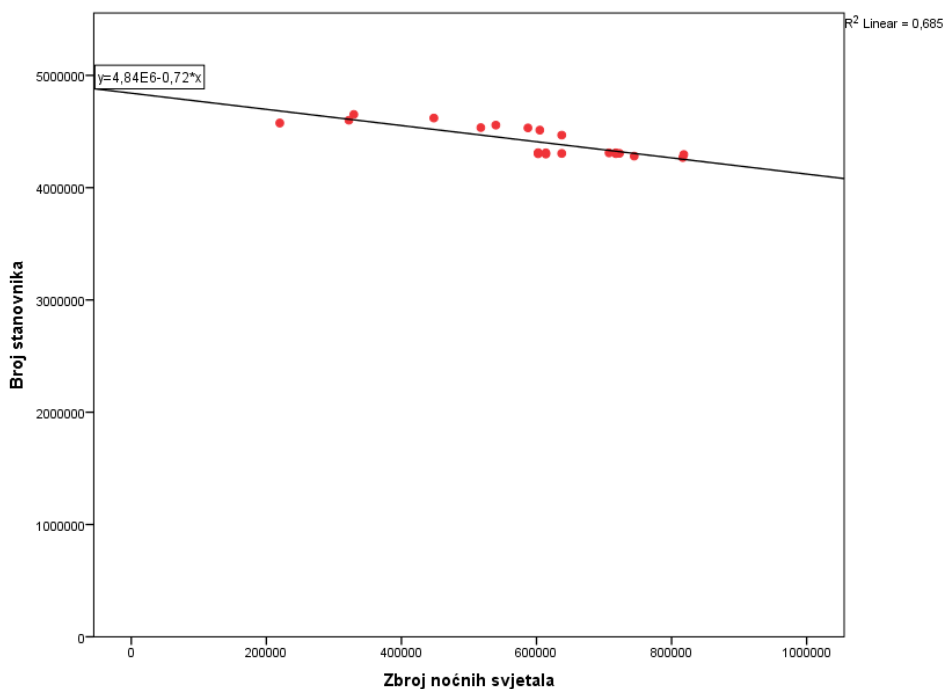
3. ANALIZA SVJETLOSNOG ONEČIŠĆENJA

3.1. Razdoblje od 1992. do 2012.

3.1.1. Noćna svjetla i stanovništvo

Eldvige i dr. (2014) proveli su analizu korelacije zbroja noćnih svjetala sa brojem stanovnika država i ukupnim BDP PPP-om koristeći DMSP-OLS podatke do 2009. godine. U ovom radu u istu analizu biti će uvršteni podaci prikupljeni satelitom F18. Izvor podataka za ekonomske pokazatelje i broj stanovnika izvan popisnih godina jest Svjetska banka. U statističkoj analizi i izradi popratnih priloga korišten je IBM-ov SPSS Statistics 24. U godinama gdje se preklapa rad dvaju satelita, korišteni su podaci recentnijeg satelita. Primjer: godine 2006. preklapaju se sateliti F15 i F16, u izračun ulazi interkalibrirani raster satelita F16.

Zbroj noćnih svjetala (SOL, $DN \geq 6$) stavljen je u korelacijski odnos s brojem stanovnika Republike Hrvatske u razdoblju od 1992. do 2012. godine. U ovom razdoblju Republika Hrvatska bilježi pad broja stanovnika, no porast SOL vrijednosti. Uz pomoć IBM SPSS programa provedena je analiza korelacije, te je izračunat Pearsonov koeficijent korelacije. Koeficijent korelacije iznosi -0,828 a koeficijent determinacije 0,685. Utvrđena korelacija je negativna i statistički značajna te rezultat upućuje na to da pad broja stanovnika Republike Hrvatske nema utjecaja na svjetlosno onečišćenje.



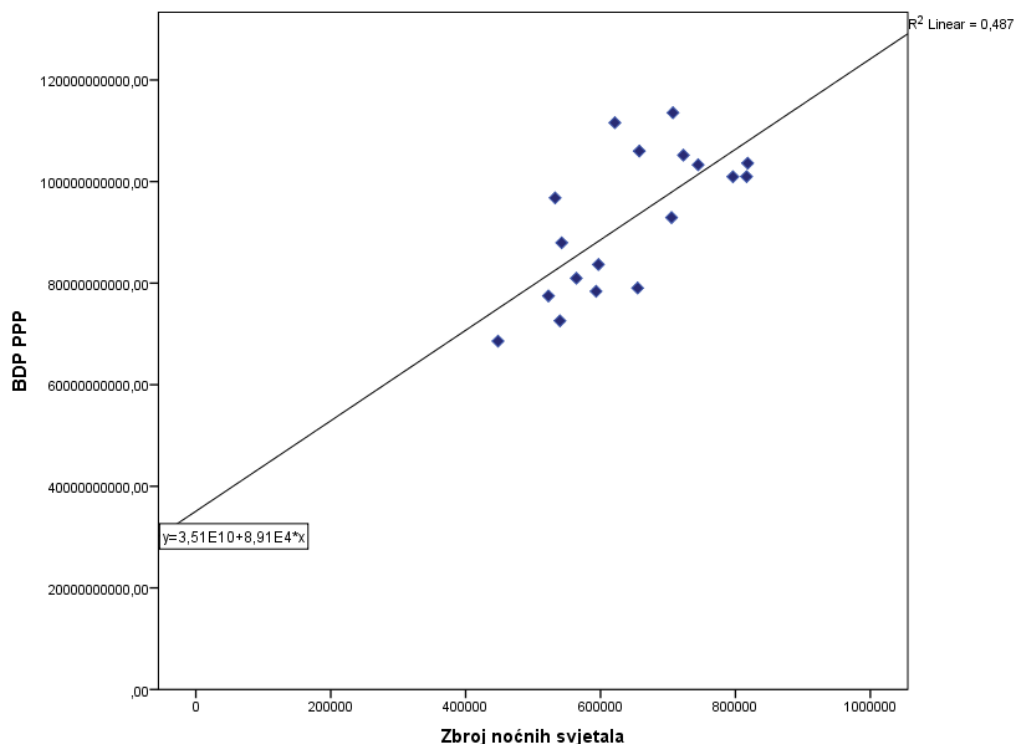
Sl.6. Dijagram rasipanja zbroja noćnih svjetala i broja stanovnika od 1992. do 2012. godine

Izvor: DMSP-OLS, Svjetska Banka, DZS (2001, 2011)

3.1.2. Noćna svjetla i BDP

Prema Eldvige i dr. (2014) za ovu analizu koriste se podaci BDP-PPP odnosno BDP po paritetu kupovne moći. Prema Međunarodnom monetarnom fondu (2007) BDP mjeren paritetom kupovne moći smatra se boljim pokazateljem ekonomskog razvoja i životnog standarda.

Za analizu korelacije korišteni su podaci od 1995. do 2012. godine. Razlog tome je nedostupnost podataka o BDP PPP-u za razdoblje od 1992. do 1994. U promatranom razdoblju Republika Hrvatska bilježila je porast BDP PPP-a do 2008. godine kada počinje pad kao posljedice globalne financijske krize. Godine 2012., do kada sežu DMSP-OLS podaci, hrvatsko gospodarstvo nalazilo se u recesiji. Zbroj noćnih svjetala (SOL, $DN \geq 6$) stavljen je u korelaciju sa kretanjem BDP-PPP-a. Pearsonov koeficijent korelacije iznosi 0,698 a koeficijent determinacije 0,487. Porast vrijednosti uočen je u obje promatrane varijable te je korelacija pozitivna. Povezanost je jaka i statistički značajna i upućuje na povezanost porasta ekonomskog standarda i gospodarskih aktivnosti na porast svjetlosnog onečišćenja.



Sl. 7. Dijagram rasipanja zbroja noćnih svjetala i BDP PPP-a (prema internacionalnom tečaju dolara 2017. godine)

Izvor: DMSP-OLS, Svjetska Banka

3.1.3. Prosječne vrijednosti noćne svjetlosti

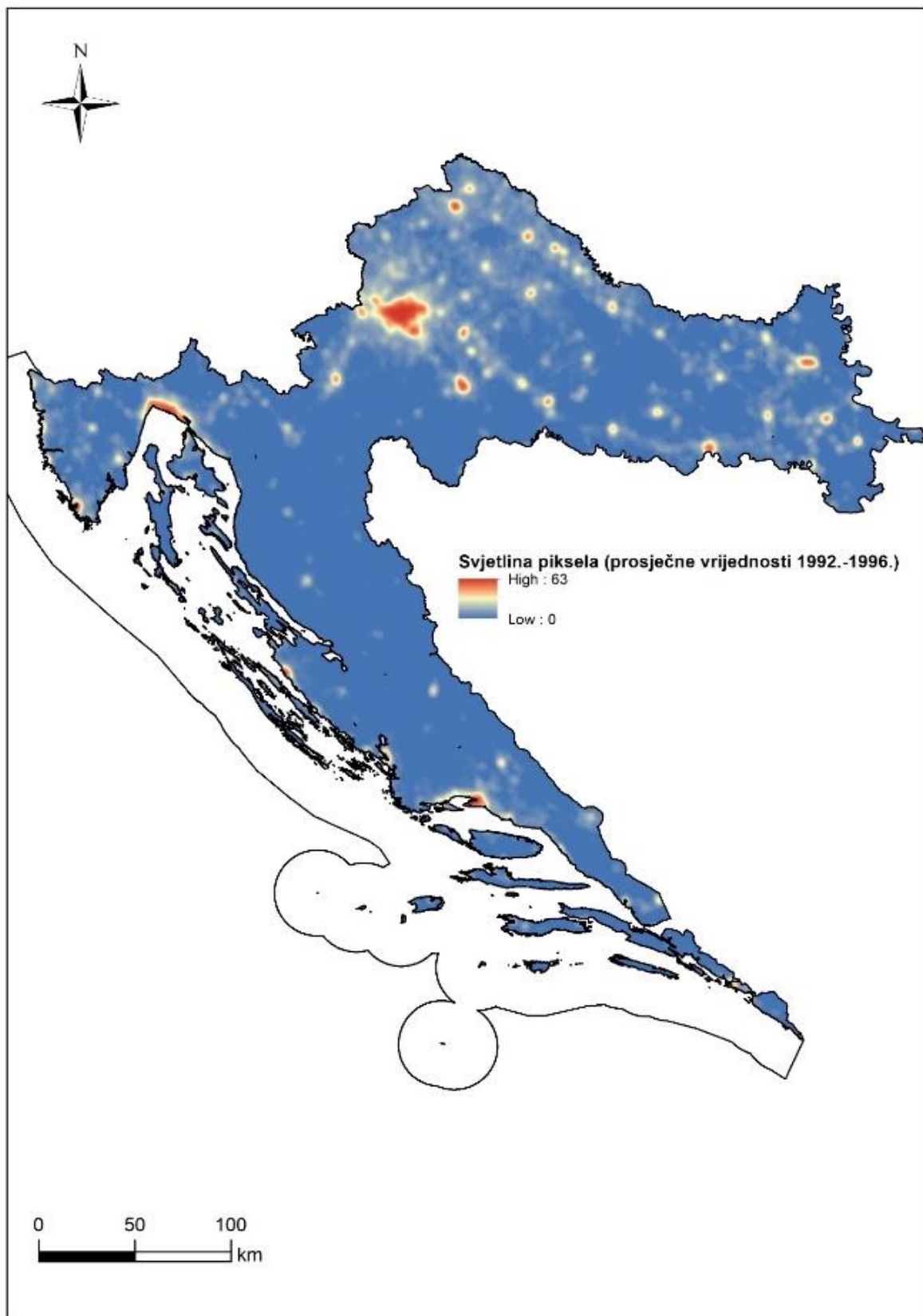
Prema metodama koje su u svojim radovima koristili Bennie i dr. (2014) i Han i dr. (2014) interkalibrirane DMSP-OLS podatke najbolje je uspoređivati i pratiti promjene promatrajući prosječne, najčešće petogodišnje, vrijednosti svjetline piksela odnosno DN. Period od 1992. do 2012. godine dijeli se u 5 razdoblja za koje se računaju prosjeci interkalibriranih vrijednosti:

- 1) Od 1992. do 1996. godine
- 2) Od 1996. do 2000. godine
- 3) Od 2000. do 2004. godine
- 4) Od 2004. do 2008. godine
- 5) Od 2008. do 2012. godine

U skupu DMSP-OLS podataka su 33 rastera te u godinama gdje se preklapa rad dva satelita, isto kao i pri odabiru podataka za analizu povezanosti broja stanovnika i BDP-a sa svjetlosnim onečišćenjem, koriste se podaci recentnijeg satelita. Prosječna vrijednost piksela u izlaznom rasteru izračunata je upotrebom alata *Cell statistics*, odabirom opcije *mean*.

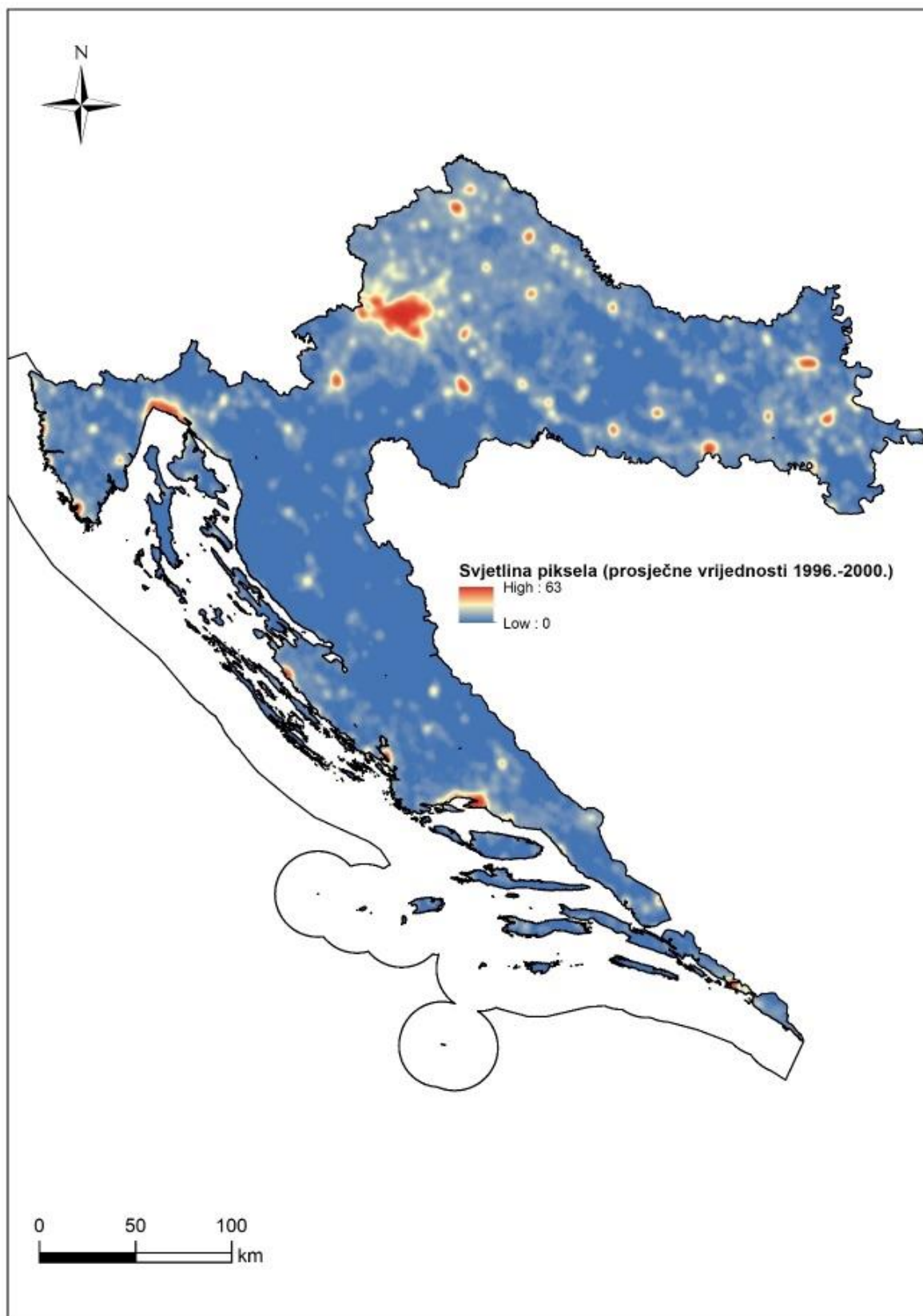
Važno je istaknuti da maksimalna vrijednost izvornog, interkalibriranog i prosječnog DN može iznositi 63, no ta vrijednost ne predstavlja jednaku vrijednost radijancije na različitim prostorima. U središtima velikih gradova i na periferiji može se pojaviti DN = 63 no u središtima gradova generira se velika količina svjetlosti te zbog ograničenosti radiometrijske rezolucije na 6 bita sve potencijalno veće vrijednosti radijancije bilježe se kao DN = 63 te dolazi do zasićenja.

Osim što pružaju osnovni uvid u problematiku, rasteri prosječnih petogodišnjih interkalibriranih vrijednosti koriste se u daljnjoj analizi. Iz ovih rastera izračunava se udio površine države pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja. Iz ovih rastera također se izdvajaju naselja prema stupnjevima svjetlosnog onečišćenja. Moguće je pratiti promjenu broja, odnosno udjela naselja čije je noćno nebo onečišćeno viškom svjetlosti.



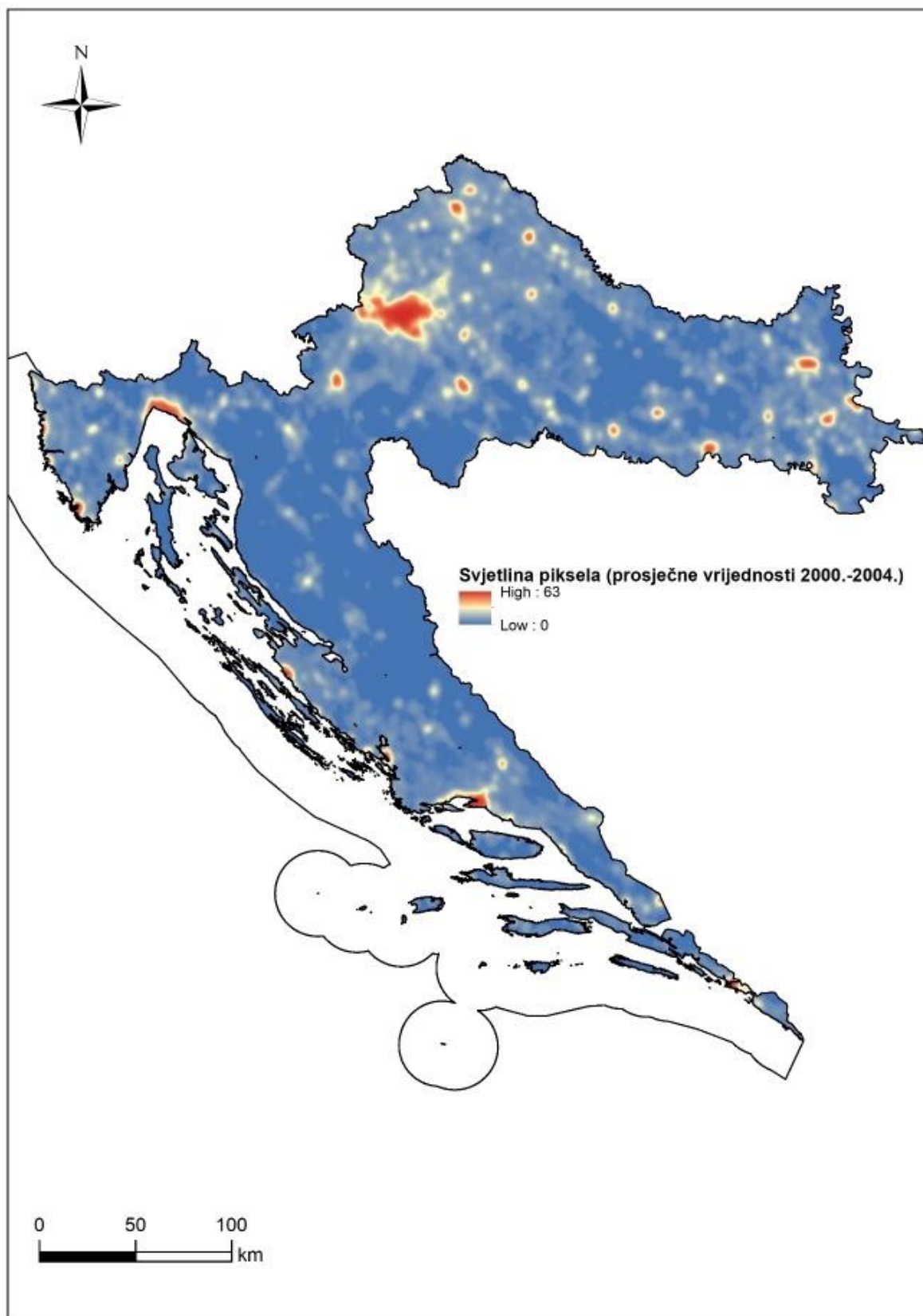
Sl. 8. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 1992.-1996.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



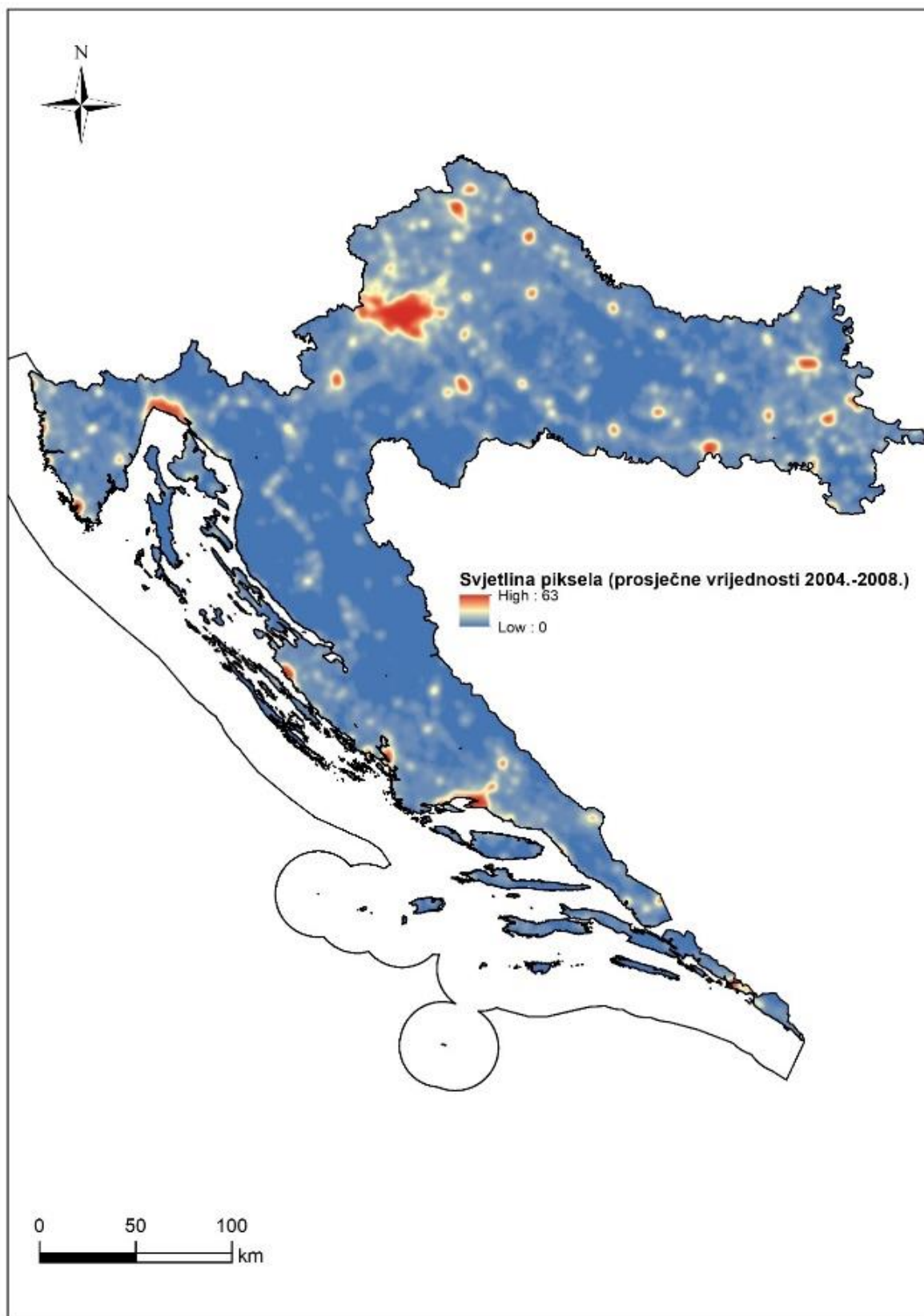
Sl. 9. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 1996.-2000.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



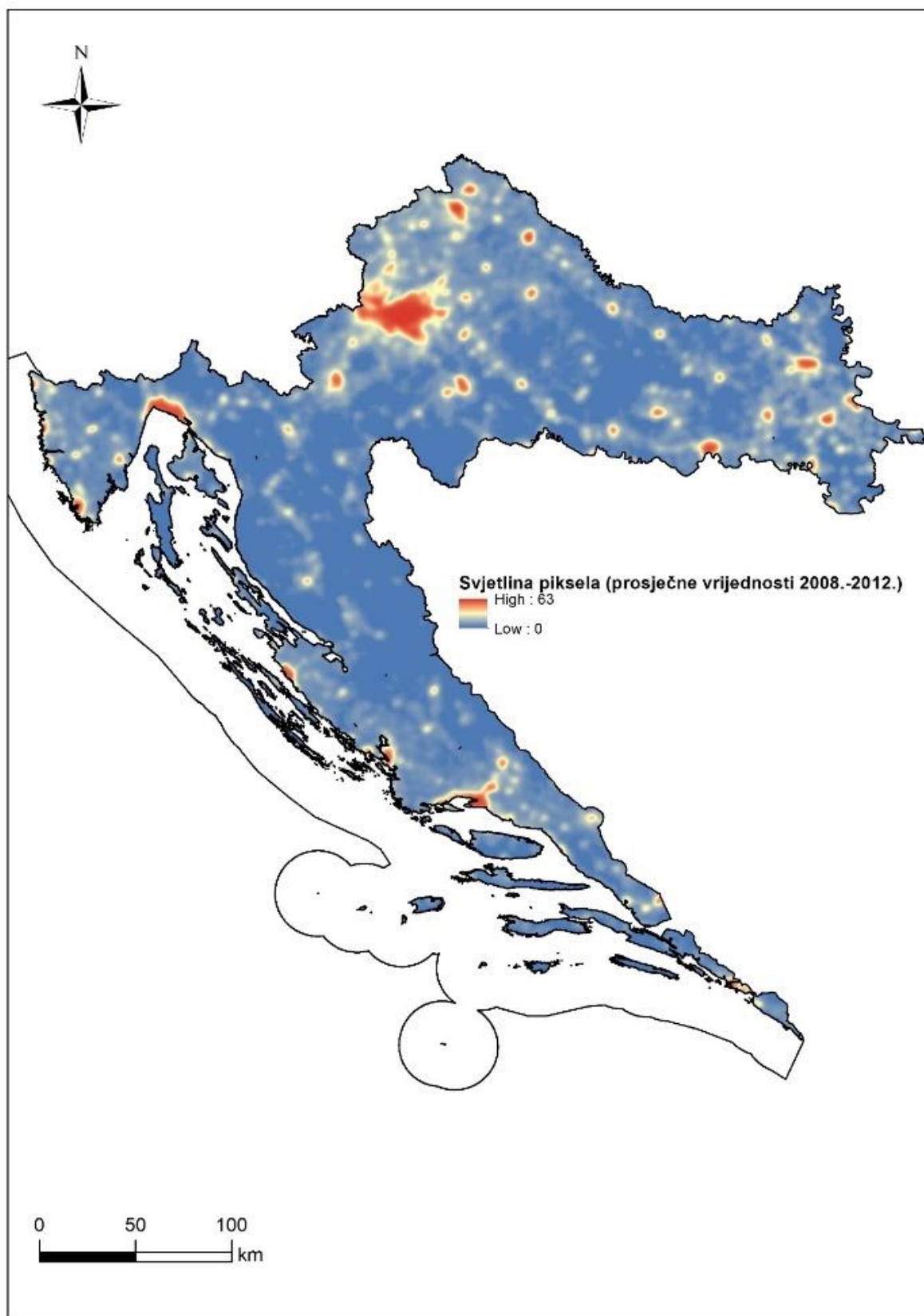
Sl. 10. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2000.-2004.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



Sl. 11. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2004.-2008.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



Sl. 12. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2008.-2012.

Izvor: autor prema DMSP-OLS

3.1.4. Promjena intenziteta noćnih svjetala

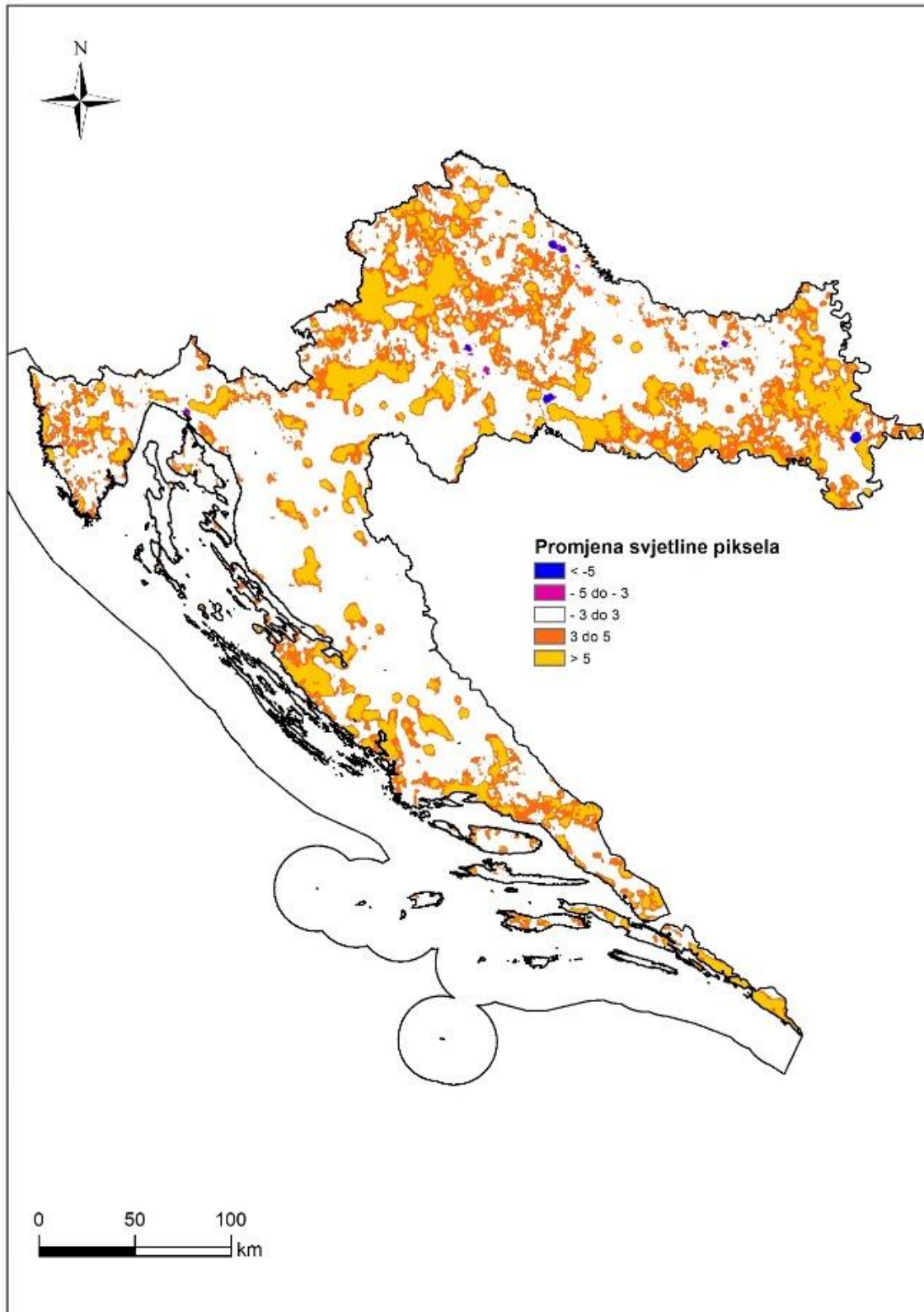
Za analizu, praćenje i vizualizaciju promjene svjetlosnog onečišćenja nekog prostora Bennie i dr. (2014) predlažu izračunavanje razlike između petogodišnjih prosjeka vrijednosti DN. U svom radu Bennie i dr. analizirali su promjenu svjetlosnog onečišćenja na europskom kontinentu uspoređujući razlike prosječnih vrijednosti svjetline piksela, odnosno DN, u razdobljima 1995.-2000. i 2005.-2010. Han i dr. (2014) primjenjuju istu metodologiju za analizu promjene svjetlosnog onečišćenja u Kini te koriste razlike između više vremenskih razdoblja kako bi dobili detaljniji uvid u promjenu kroz vrijeme. Kumar i dr. (2019) upotrebljavaju ovu metodologiju istražujući trendove u promjeni svjetlosnog onečišćenja u Indiji, uz drugačiju klasifikaciju vrijednosti promjene DN. Osnovu ove metode čini formula:

$$DN_p = DN_a - DN_b$$

gdje DN_p predstavlja vrijednost promjene digitalnog broja u danom pikselu, DN_a predstavlja prosječnu vrijednost digitalnog broja u recentnijem razdoblju a DN_b prosječnu vrijednost digitalnog broja u prethodnom promatranom razdoblju. Vrijednosti DN_p prema Bennie i dr. (2014) klasificiraju se razrede: vrijednosti od -3 do 3 predstavljaju neznčajnu promjenu svjetlosnog onečišćenja. Pozitivne vrijednosti veće od 3 ukazuju na manje povećanje broja noćnih svjetala i svjetlosnog onečišćenja dok vrijednosti veće od 5 na značajnije povećanje, negativne vrijednosti manje od -3 na blago smanjenje, a manje od -5 na značajno smanjenje. Za potrebe ovog rada, odnosno što detaljnije analize izračunate su promjene svjetlosnog onečišćenja između svih petogodišnjih prosjeka:

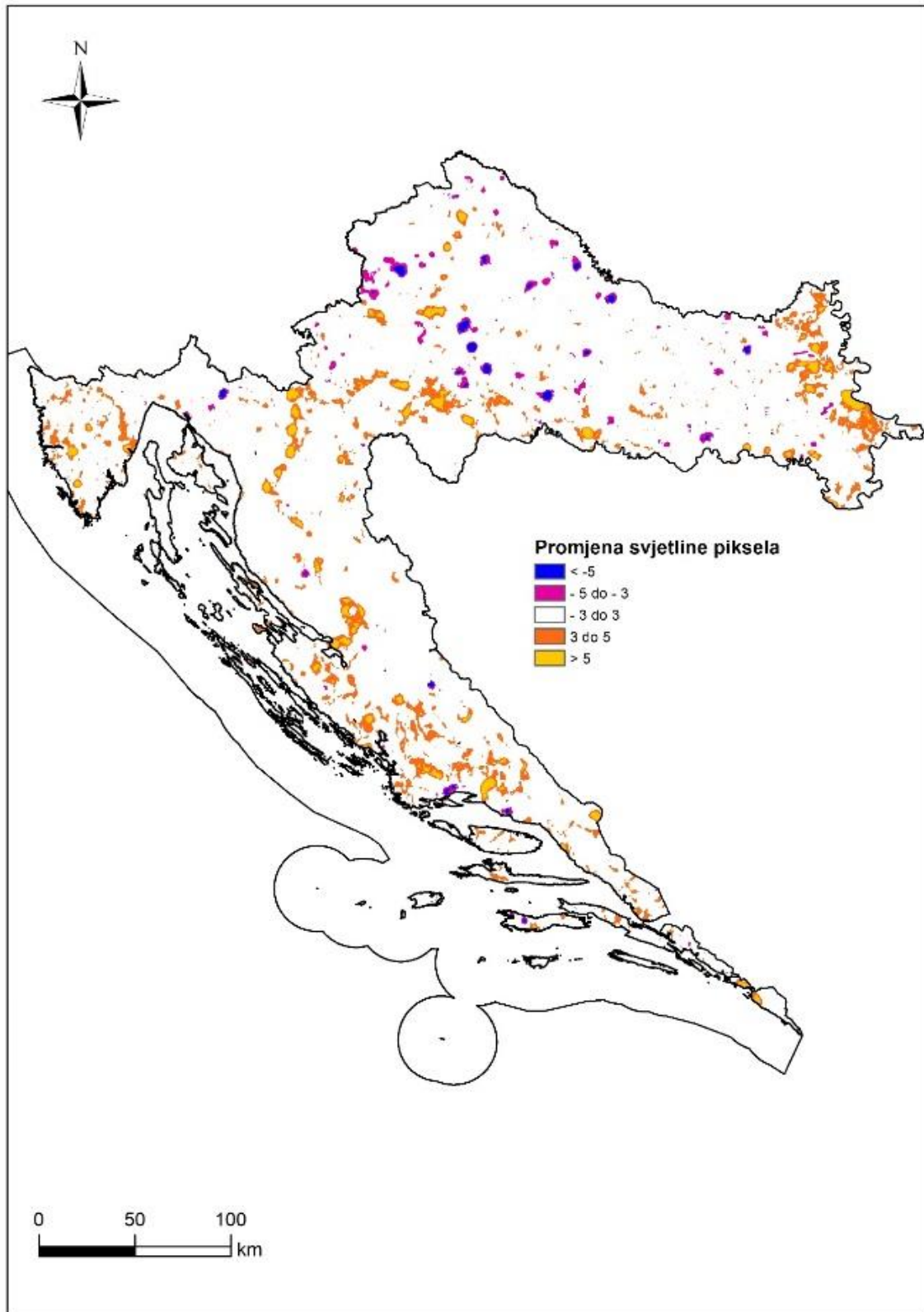
- 1) 1992.-1996. do 1996.-2000.
- 2) 1996.-2000. do 2000.-2004.
- 3) 2000.-2004. do 2004.-2008.
- 4) 2004.-2008. do 2008.-2012.

Što detaljniji uvid u promjenu kroz vrijeme potreban je ponajviše zbog analize utjecaja prometnica tj. izgradnje suvremene mreže autocesta na svjetlosno onečišćenje. Rasteri promjene također se koriste pri utvrđivanju povećanja ili smanjenja svjetlosnog onečišćenja u gradovima i njihovim okolicama.



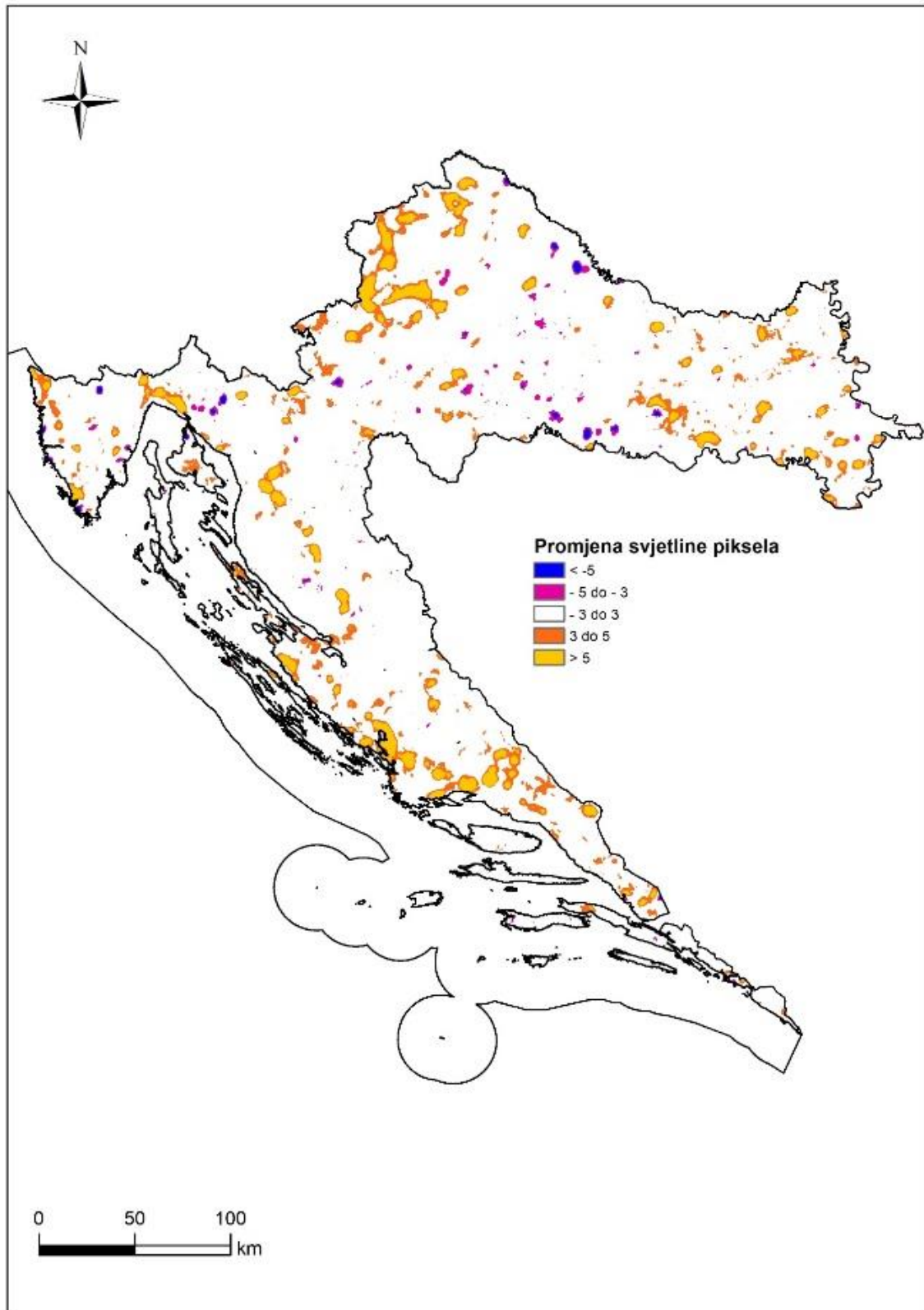
Sl. 13. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 1992.-1996. i 1996.-2000.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



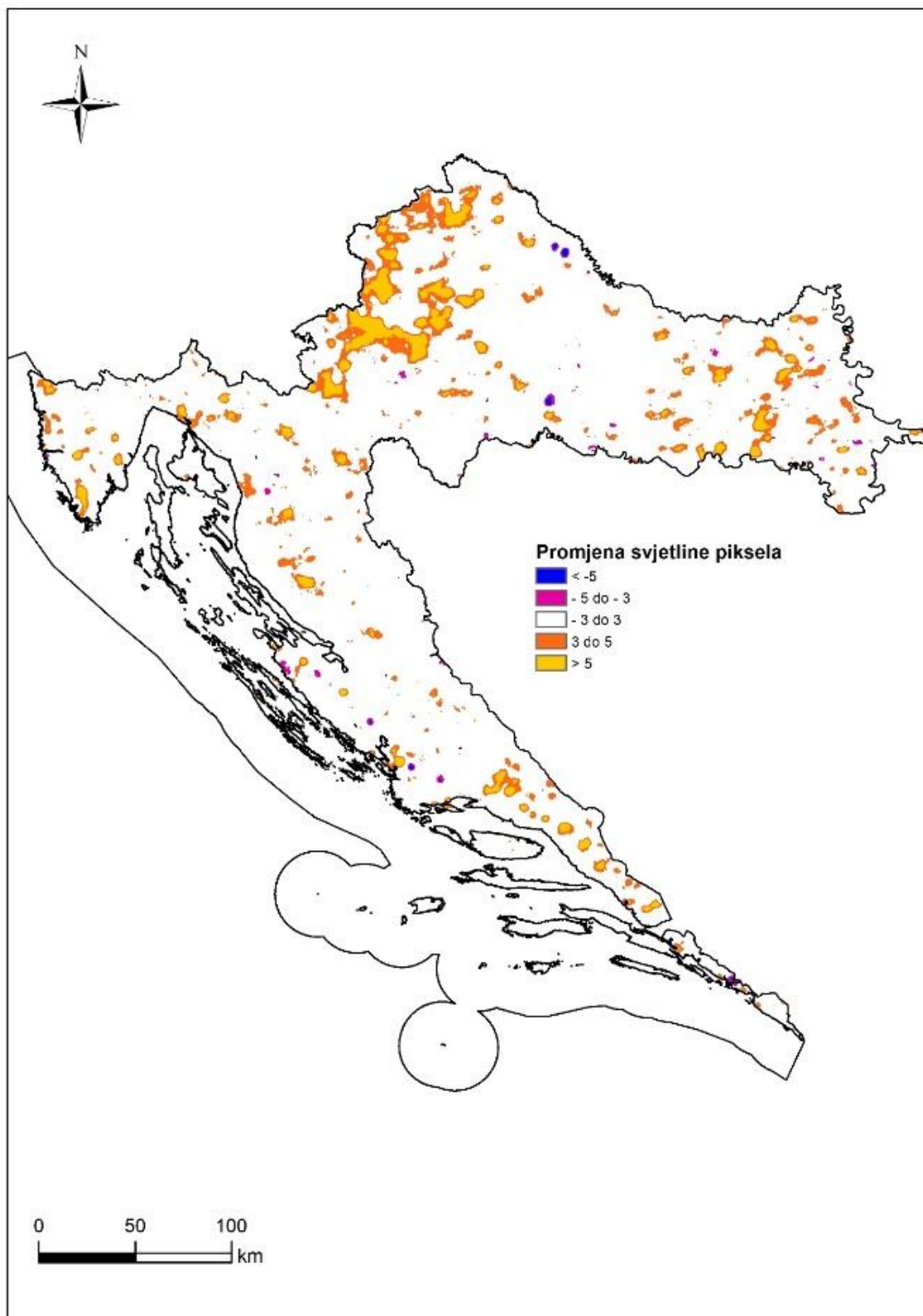
Sl. 14. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 1996.-2000. i 2000.-2004.

Izvor: autor prema DMSP-OLS



Sl. 15. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 2000.-2004. i 2004.-2008.

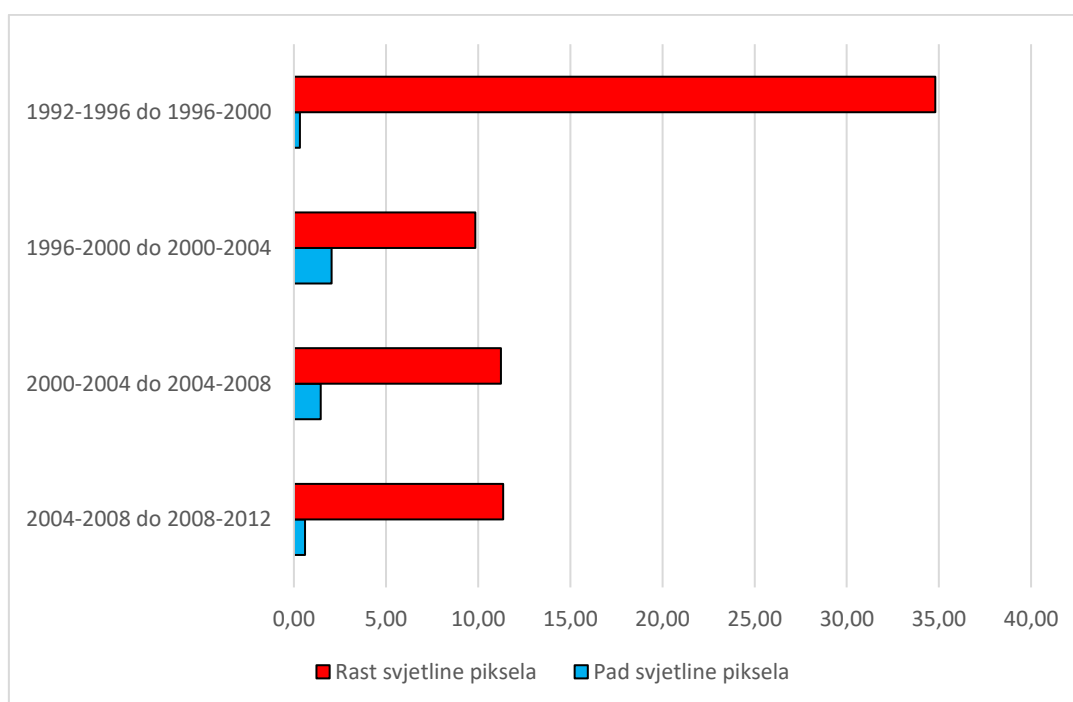
Izvor: autor prema DMSP-OLS



Sl. 16. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.

Izvor: autor prema DMSP-OLS

Bennie i dr. (2014) i Han i dr. (2014) uz izradu kartografskih prikaza promjene prosječne vrijednosti DN predlažu izračun udjela teritorija istraživanog područja sa trendom rasta i pada prosječne vrijednosti DN između promatranih razdoblja. Najveća promjena prosječne svjetline piksela u Hrvatskoj dogodila se između razdoblja 1992-1996 i 1996-2000 te je porast prosječnog osvjetljenja zahvatio 35 % teritorija. Razdoblje 1996-2000 je poslijeratno te je porast DN na velikoj površini rezultat prestanka ratnih zbivanja iz prethodnog razdoblja i obuhvaća mirnu reintegraciju dijelova hrvatskog teritorija, povratak izbjeglog stanovništva i poslijeratnu obnovu. Najveći pad prosječne vrijednosti DN zahvatio je 2 % teritorija Hrvatske te se dogodio između razdoblja 1996-2000 i 2000-2004. Izuzev razlike između ratnog i poslijeratnog razdoblja udio teritorija Hrvatske koji bilježi porast osvjetljenja između ostalih promatranih razdoblja kreće se oko 10 % te je bio prisutan blagi trend rasta.



Sl. 17. Udjeli teritorija prema rastu ili padu prosječne svjetline piksela (DN) između promatranih razdoblja

Izvor: autor prema DMSP-OLS

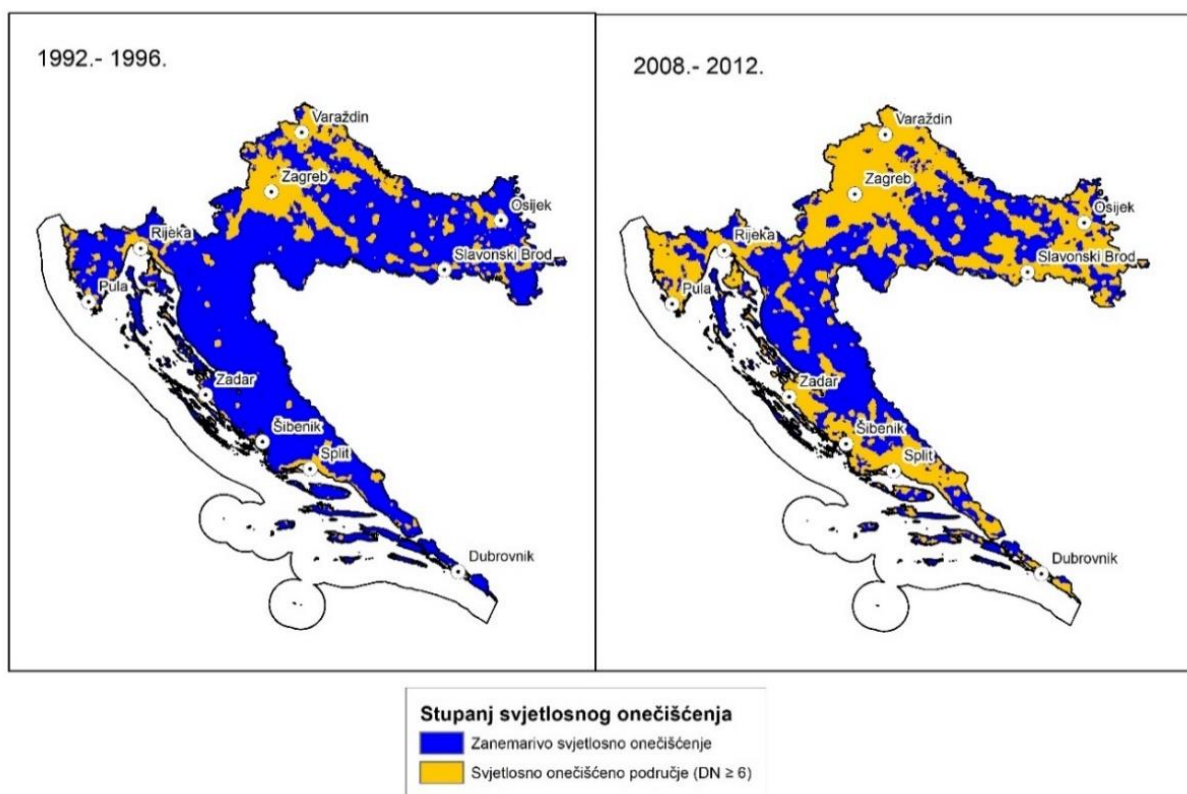
3.1.5. Udio teritorija pod svjetlosnim onečišćenjem

Prema Eldvige i dr. (2014) svi pikseli u DMSP-OLS rasterskom prikazu nekog područja čija je interkalibrirna vrijednost jednaka ili veća od 6 prikazuje neki oblik ljudske aktivnosti u prostoru čiji produkt umjetna svjetlost. Sve vrijednosti manje od 6 predstavljaju potpunu

tamu te male ruralne zajednice čija je noćna svjetlost zanemariva. Za usporedbu korištene su prosječne vrijednosti piksela iz razdoblja 1992.-1996. i 2008.-2012. Vrijednosti piksela odabranih rastera su reklasificirane u dvije skupine:

- 1) $DN < 6$ – zanemarivo svjetlosno onečišćene/nema svjetlosnog onečišćenja
- 2) $DN \geq 6$ – tragovi ljudske aktivnosti/prisutno svjetlosno onečišćenje

Razdoblje 1992-1996 većim dijelom obuhvaća period Domovinskog rata. Kao prostori sa svjetlosnim onečišćenjem izdvajaju se makroregionalna središta i njihove okolice, Međimurje te varaždinska regija i sjeverna Podravina, u primorskoj hrvatskoj ističe se Istra (sl. 18). U razdoblju 2008-2012 ističe se gotovo neprekinut pojas svjetlosnog onečišćenja od Karlovca preko Zagreba i okolice do Čakovca i Varaždina. Onečišćene viškom noćne svjetlosti su cijela Posavina te istočna Slavonija i Baranja.



Sl. 18. Prostor Republike Hrvatske sa prisutnim svjetlosnim onečišćenjem u razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

U primorskoj Hrvatskoj svjetlosno onečišćenje javlja se u gotovo cijeloj Istri, Ravnim kotarima i zadarskoj regiji, Šibeniku i dijelu šibenskog zaleđa te većem dijelu srednje i južne Dalmacije.

Tab.2. Udio teritorija Republike Hrvatske sa prisutnim svjetlosnim onečišćenjem ($DN \geq 6$)

Prosječno razdoblje	Površina (km ²)	Udio (%)
1992. – 1996.	12407,04	21,92
2008. – 2012.	29475,83	52,08

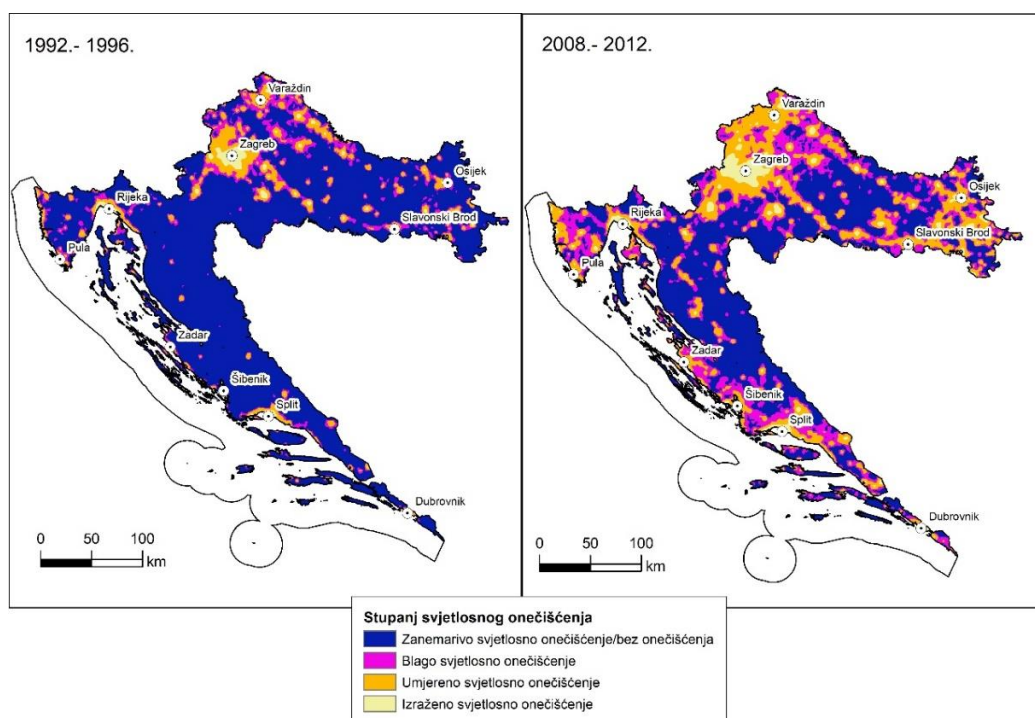
Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Tablica 2 prikazuje udio kopnenog teritorija Republike Hrvatske pod nekim oblikom svjetlosnog onečišćenja u promatranim razdobljima. U razdoblju 1992-1996 22 % teritorija Republike Hrvatske bilo je pod nekim oblikom svjetlosnog onečišćenja. Na ovaj rezultat nesumnjivo su utjecala ratna zbivanja u većem dijelu promatranog razdoblja. U razdoblju 2008-2012 u prosjeku nešto više od 50 % teritorija Republike Hrvatske bilo je pod nekim oblikom svjetlosnog onečišćenja, te se u odnosu na prethodno promatrano razdoblje udvostručilo.

Za detaljniji uvid u udio prostora pod svjetlosnim onečišćenjem potrebno je klasificirati interkalibrirane prosječne vrijednosti DN. Eldvige i dr. (2014) klasificiraju vrijednosti u dvije skupine kako je prethodno opisano. Tavoosi i dr. (2009) kao donju granicu blagog onečišćenja uzimaju vrijednost $DN = 10$. Dio autora izdvaja samo urbane i suburbane sredine te se slažu da je donja granica izraženog svjetlosnog onečišćenja $DN = 30$. Rasteri prosječnih vrijednosti razdoblja 1992.-1996. i 2008.-2012. reklasificirani su u 4 stupnja svjetlosnog onečišćenja prema Xiang i Tan (2017):

- 1) $DN < 6$ – zanemarivo svjetlosno onečišćenje/nema onečišćenja
- 2) $6 \leq DN < 10$ – blago svjetlosno onečišćenje
- 3) $10 \leq DN < 30$ – umjereno svjetlosno onečišćenje
- 4) $DN \geq 30$ – izraženo svjetlosno onečišćenje

Karte na slici 19. prikazuju teritorij Republike Hrvatske prema stupnjevima svjetlosnog onečišćenja. Vidljiv je značajan porast blagog i umjerenog svjetlosnog onečišćenja. U tablici 3 prikazani su i uspoređeni udjeli teritorija Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja.



Sl. 19. Prostor Republike Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja u razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Usporedbom udjela teritorija Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja u krajnjim promatranim razdobljima vidljivo je povećanje teritorija pod izraženim svjetlosnim onečišćenjem. Smanjuje se prostor pod zanemarivim onečišćenjem ili bez onečišćenja. Na temelju prosjeka DN iz razdoblja 2008.-2012. gotovo 50 % teritorija Hrvatske je pod blagim ili umjerenim svjetlosnim onečišćenjem. Izraženo svjetlosno onečišćenje je u oba promatrana razdoblja obuhvaća makroregionalne centre te u razdoblju 2008.-2012. to uključuje i njihove bliže okolice.

Tab.3. Teritorij Republike Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja²

Kategorija svjetlosnog onečišćenja	Prosječna razdoblja			
	1992. – 1996.		2008. – 2012.	
	km ²	%	km ²	%
Zanemarivo	44354,32	78,37	27256,17	48,16
Blago	5756,23	10,17	13505,55	23,86
Umjereni	5545,75	9,80	13388,96	23,66
Izraženo	1105,06	1,95	2581,32	4,56

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

² Zbroj udjela u oba razdoblja prelazi 100 % zbog različitih vrijednosti ukupnih površina pod onečišćenjem. Za izračun udjela korištena je službena površina RH

3.1.6. Svjetlosno onečišćenja i naselja

U tab. 4 razvrstana su sva naselja Republike Hrvatske po stupnjevima svjetlosnog onečišćenja njihovog noćnog neba. Promatrane su prosječne interkalibrirne petogodišnje vrijednosti DN. Primjetno je povećanje broja naselja u svim kategorijama onečišćenja osim zanemarivog. Prema posljednjim DMSP-OLS podacima najviše naselja u Hrvatskoj ima umjereno onečišćeno noćno nebo. Najveći udio stanovništva Hrvatske živi u naseljima s izraženim svjetlosnim onečišćenjem (tab. 5). Podatke za razdoblje 1992.-1996. treba uzeti s rezervom zato što je popis stanovništva proveden 1991. godine, prije početka rata. Zanimljivo je istaknuti kako je u posljednjem razdoblju skoro 60 % stanovnika RH živjelo u naseljima s izraženim svjetlosnim onečišćenjem, što se poklapa sa stopom urbanizacije.

Tab.4. Naselja Republike Hrvatske prema stupnju svjetlosnog onečišćenja

Kategorija svjetlosnog onečišćenja	Prosječna razdoblja									
	1992.-1996.		1996.-2000.		2000.-2004.		2004.-2008.		2008.-2012.	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
Zanemarivo	4395	65,02	2736	40,48	2360	34,92	2186	32,34	1901	28,13
Blago	1088	16,10	1979	29,28	2412	35,69	2288	33,85	2022	29,92
Umjereno	1109	16,41	1757	25,99	1688	24,97	1908	28,23	2318	34,30
Izraženo	167	2,47	287	4,25	299	4,42	377	5,58	518	7,66

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Tab.5. Udio stanovništva RH po kategorijama svjetlosnog onečišćenja u prosječnim razdobljima s popisnim godinama

kategorija svjetlosnog onečišćenja	Prosječna razdoblja		
	1992.-1996.*	2000.-2004.	2008.-2012.
zanemarivo	23,34	6,73	4,85
blago	10,11	14,53	9,97
umjereno	21,93	26,53	27,11
izraženo	44,62	52,21	58,08

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Kako bi se utvrdilo u kojim naseljima je svjetlosno onečišćenje u porastu a u kojima u padu, rasteri promjene prosječnih vrijednosti DN su reklasificirani u 3 kategorije:

- 1) $DN < -3 \rightarrow$ pad DN, odnosno smanjenje svjetlosnog onečišćenja
- 2) $-3 - 3 \rightarrow$ neznčajna promjena, odnosno stagnacija
- 3) $DN > 3 \rightarrow$ porast DN, odnosno povećanje svjetlosnog onečišćenja

Selekcijom na temelju lokacije izdvojena su naselja koja se nalaze unutar prostora sa padom i prostora sa porastom vrijednosti DN (tab. 6).

Tab.6. Udio naselja Republike Hrvatske sa porastom ili padom vrijednosti DN

Razdoblja/kategorije	1992.-1996. do 1996.-2000.		1996.-2000. do 2000.-2004.		2000.-2004. do 2004.-2008.		2004.-2008. do 2008.-2012.	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
Rast DN	3049	45,11	707	10,46	962	14,23	1342	19,86
Pad DN	8	0,12	200	2,96	129	1,91	41	0,61
Bez značajne promjene	3702	54,77	5852	86,58	5668	83,86	5376	79,54

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Uzimajući u obzir da prosjek vrijednosti DN 1992.-1996. obuhvaća gotovo cijelo razdoblje Domovinskog rata a prosjek 1996.-2000. neposredno poslijeratno razdoblje, porast vrijednosti DN, odnosno svjetlosnog onečišćenja u velikom broju naselja je očekivan. Između prosječnih razdoblja 1996.-2000. i 2000. i 2004. svjetlosno onečišćenje je u porastu u nešto više od 10 % naselja. Između iduća dva prosječna razdoblja vrijednost DN porasla je u 14 % naselja. Trend povećanja broja naselja s porastom vrijednosti DN nastavlja se i između posljednja dva promatrana prosječna razdoblja. Najveći pad vrijednosti DN zabilježen je između prosječnih razdoblja 1996.-2000. i 2000.-2004 u 3 % naselja.

Pestalozzi i dr. (2014) i Xu i dr. (2020) izdvajaju urbane i suburbane zone iz DMSP-OLS rastera na temelju vrijednosti digitalnog broja DN većeg ili jednakog 30. Autori također ističu da je riječ o značajnom svjetlosnom onečišćenju. Radi lakše usporedbe i utvrđivanja koji je prostor Republike Hrvatske pod izraženim svjetlosnim onečišćenjem korištena je NUTS 2 regionalizacija koja je bila na snazi do 2012. godine, do kad sežu dostupni DMSP-OLS podaci. Ova NUTS 2 regionalizacija dijeli Republiku Hrvatsku na tri regije; Sjeverozapadnu Hrvatsku, Panonsku Hrvatsku i Jadransku Hrvatsku. Prednost ove regionalizacije je relativno ravnomjeran raspored broja stanovnika i naselja po regijama. Tablica 7 prikazuje apsolutni i relativni broj naselja u Republici Hrvatskoj sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem za cijeli vijek DMSP-OLS misije.

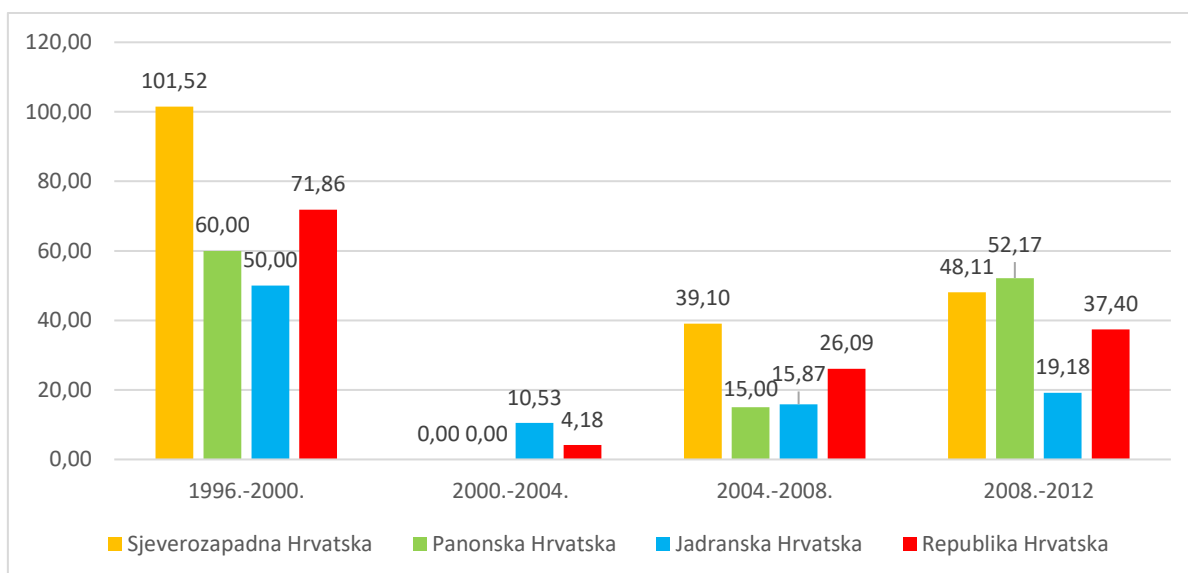
Tab.7. Naselja Republike Hrvatske sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem po regijama

Regija	Ukupno naselja	Prosječna razdoblja									
		1992.-1996.		1996.-2000.		2000.-2004.		2004.-2008.		2008.-2012.	
		Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
SZ Hrvatska	1883	66	3,51	133	7,06	133	7,06	185	9,82	274	14,55
Panonska Hrvatska	2429	25	1,03	40	1,65	40	1,65	46	1,89	70	2,88
Jadranska Hrvatska	2447	76	3,11	114	4,66	126	5,15	146	5,97	174	7,11
Republika Hrvatska	6759	167	2,47	287	4,25	299	4,42	377	5,58	518	7,66

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Kroz sva promatrana razdoblja najveći broj naselja s izraženim svjetlosnim onečišćenjem bio je u Sjeverozapadnoj Hrvatskoj, koja obuhvaća Grad Zagreb, Zagrebačku, Varaždinsku i Međimursku županiju. Najmanje naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem bilo je u Panonskoj Hrvatskoj koja obuhvaća čitavu Slavoniju te Sisačko-moslavačku i Karlovačku županiju.

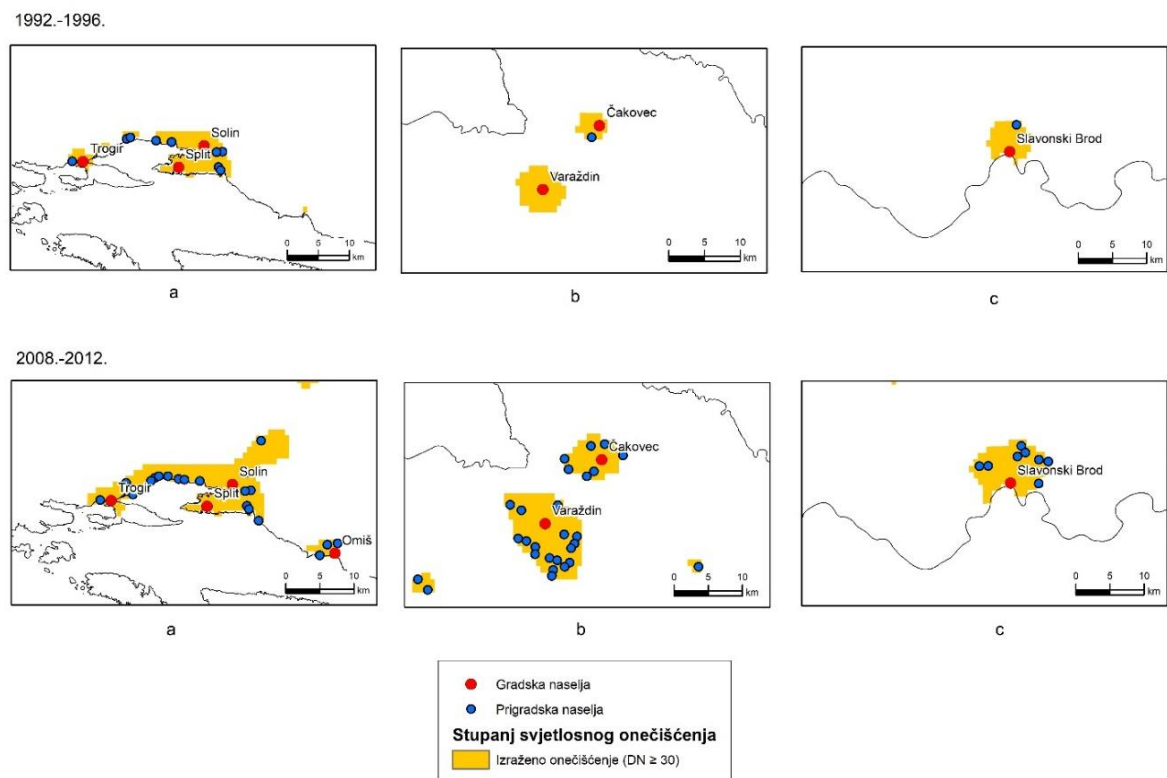
Iz verižnih indeksa promjene izvedene su stope promjene broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem (sl. 20). Najveći porast broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem bio je u razdoblju 1996.-2000. u odnosu na prethodno, ratno razdoblje. U razdoblju 2000.-2004. nema promjene broja naselja u odnosu na 1996.-2000. u SZ Hrvatskoj i Panonskoj Hrvatskoj već samo porast u Primorskoj Hrvatskoj. Povećanje broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem u razdoblju 2004.-2008. u odnosu na prethodno bilježe sve regije, najveći porast je u SZ Hrvatskoj. U razdoblju 2008.-2012. najveći porast u odnosu na 2004.-2008. bio je u Panonskoj Hrvatskoj i SZ Hrvatskoj. Dva su moguća razloga većeg porasta broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem: puštanje u promet autoceste A5, što za posljedicu može imati pozitivne ekonomske i demografske učinke, te specifičnost stare NUTS 2 regionalizacije. Kako je već spomenuto, prema ovoj regionalizaciji Karlovačka i Sisačko-moslavačka županija pripadaju Panonskoj Hrvatskoj iako su njihova županijska središta funkcionalno povezana sa Zagrebom i dio su Zagrebačke regije u kojoj je, većim dijelom, svjetlosno onečišćenje u stalnom porastu.



Sl. 20. Stopa promjene broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem u Republici Hrvatskoj, regionalni pregled

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Kartografski prikazi na slici 21 prikazuju makroregionalni centar Split (a) i regionalne centre Varaždin i Čakovec (b) i Slavonski Brod (c). Ovaj prikaz služi kao primjer prostornog širenja zona izraženog svjetlosnog onečišćenja te je usporedba stanja između krajnjih prosječnih razdoblja. Chalkias i dr. (2006) i Han i dr. (2014) navode suburbanizaciju, satelitizaciju i decentralizaciju kao glavne procese koji potiču porast svjetlosnog onečišćenja. Ovi procesi prisutni su u Hrvatskoj od kraja prošlog stoljeća (Vresk, 1998) te su prisutni i aktualni danas. Iz ovog primjera vidljivo je kako širenju pojasa izraženog svjetlosnog onečišćenja pridonosi grupiranje manjih, prigradskih naselja oko središnjih gradskih naselja. Također riječ je i o komunalnom opremanju naselja, otvaranju poduzetničkih i gospodarskih zona te izgradnji i otvaranju šoping centara u predgrađima pojedinih naselja.



Sl. 21. Širenje prostora i povećanje broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem na primjeru Splita (a), Varaždina i Čakovca (b) i Slavenskog Broda (c) u prosječnim razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

Grad Zagreb te dijelovi Zagrebačke i Krapinsko-zagorske županije neposredno uz Zagreb imaju najveće udjele naselja s izraženim onečišćenjem noćnog neba. Samo promatranjem kartografskih prikaza promjene vrijednosti DN moguće je uočiti veliki prostor u okolici

grada sa kontinuiranim porastom svjetlosnog onečišćenja (sl. 21). Dio razloga porasta svjetlosnog onečišćenja svakako leži u demografskim trendovima na prostoru zagrebačke aglomeracije. Bašić (2005) zaključuje kako je od posljednjeg desetljeća 20. stoljeća zagrebačka aglomeracija u zreloj fazi suburbanizacije s apsolutnom decentralizacijom kao osnovnim obilježjem populacijskog razvoja. Obilježja suburbanizacije s apsolutnom decentralizacijom su:

- migracijski saldo i prirodni prirast okolice su pozitivni – porast broja stanovnika okolice
- prirodni prirast centralnog naselja nije dovoljan da pokrije negativni migracijski saldo – pad broja stanovnika centralnog naselja
- ukupno kretanje stanovništva aglomeracije je pozitivno

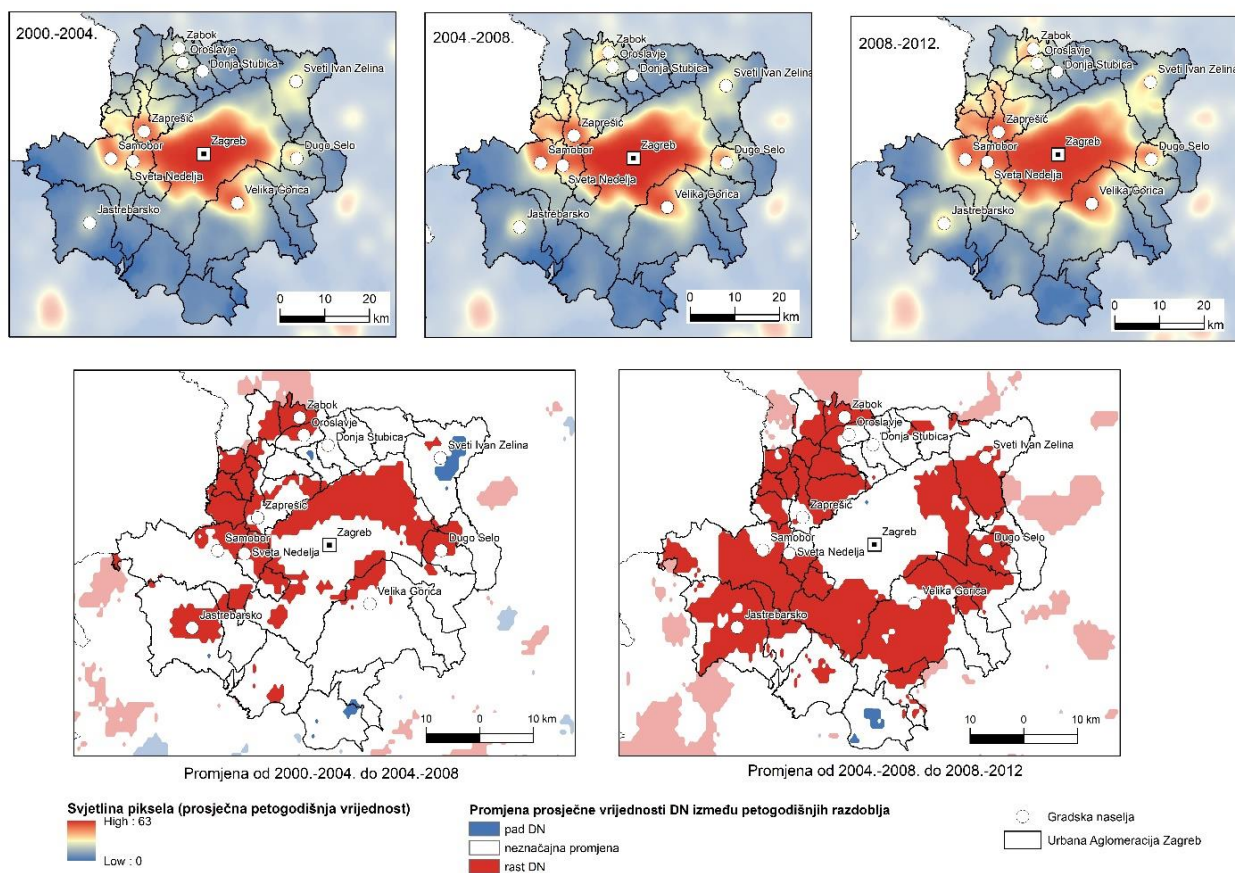
Najveći porast svjetlosnog onečišćenja nad Zagrebom i okolicom osim u poslijeratnom razdoblju odvija se od druge polovice prvog desetljeća 21. stoljeća. Promjena svjetlosnog onečišćenja nad Zagrebom i okolicom analizirana je na razini urbane aglomeracije Zagreb, čiji je prostorni obuhvat definiran od strane Gradskog ureda za strategijsko planiranje i razvoj Grada (2016). Rajić i dr. (2017) analiziraju socioekonomske i demografske trendove urbane aglomeracije Zagreb u razdoblju od 2001. do 2011. godine, koje se poklapa sa promatranim razdobljem DMSP-OLS podataka o noćnim svjetlima. Autori zaključuju da ovaj prostor bilježi porast općeg kretanja stanovništva te da je najdinamičniji rast u naseljima Zagrebačke županije. Kao bitno obilježje ističe se i satelitizacija i razvoj Dugog Sela, Zaprešića, Samobora i Velike Gorice i njihovih okolica. Slika 22 prikazuje prostornu promjenu vrijednosti DN, a tablica 7 udio naselja sa porastom DN odnosno svjetlosnog onečišćenja u urbanoj aglomeraciji Zagreb, sistematizirano po županijama.

Analizom promjene između prosječnih razdoblja 2000.-2004. i 2004.-2008. porast DN zabilježen je u podsljemenskoj zoni Grada Zagreba, Sesvetama, Dugom Selu i Buzinu. Porast DN je i na prostoru uz zagrebačku obilaznicu na istoku i autocestu A2 do Zaboka te autocestu A1 do Jastrebarskog. Pad DN prisutan je u okolici Svetog Ivana Zeline te općini Pokupsko, najvjerojatnije zbog negativnih demografskih trendova. Porast DN najveći je u naseljima Zagrebačke županije a na razini urbane aglomeracije Zagreb, porast DN je u 30 % svih naselja.

Prostor sa porastom DN između prosjeka razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012. čini prsten oko Zagreba. Pad DN prisutan je na dvije lokacije u Pokupskom. Unutar Grada Zagreba

porast DN, odnosno svjetlosnog onečišćenja, prisutan je u naseljima u gradskim četvrtima Sesvete i Brezovica. Polovica naselja, koja su u sastavu urbane aglomeracije Zagreb iz Zagrebačke županije, imaju porast vrijednosti DN. Najmanje naselja s porastom DN između promatranih razdoblja je iz Krapinsko-zagorske županije.

Grad Zagreb i njegova okolica kao populacijsko i gospodarsko središte Republike Hrvatske bilježi porast prosječnih vrijednosti DN, te je samim time najviše pridonosi višku svjetlosti i svjetlosnog onečišćenja.



Sl. 22. Svjetlosno onečišćenje u urbanoj aglomeraciji Zagreb od 2000. do 2012. godine

Izvor: autor, prema DMSP-OLS, Grad Zagreb (2016)

Tab.8. Udio naselja urbane aglomeracije Zagreb sa porastom svjetlosnog onečišćenja po županijama

Županija	Od 2000 - 2004 do 2004 - 2008	Od 2004 - 2008 do 2008-2012
Grad Zagreb	7,01	9,18
Zagrebačka	19,20	50,92
Krapinsko - zagorska	4,01	5,18
Urbana aglomeracija Zagreb	30,22	65,28

Izvor: autor, prema DMSP-OLS

3.1.7. Noćna svjetlost i mreža autocesta

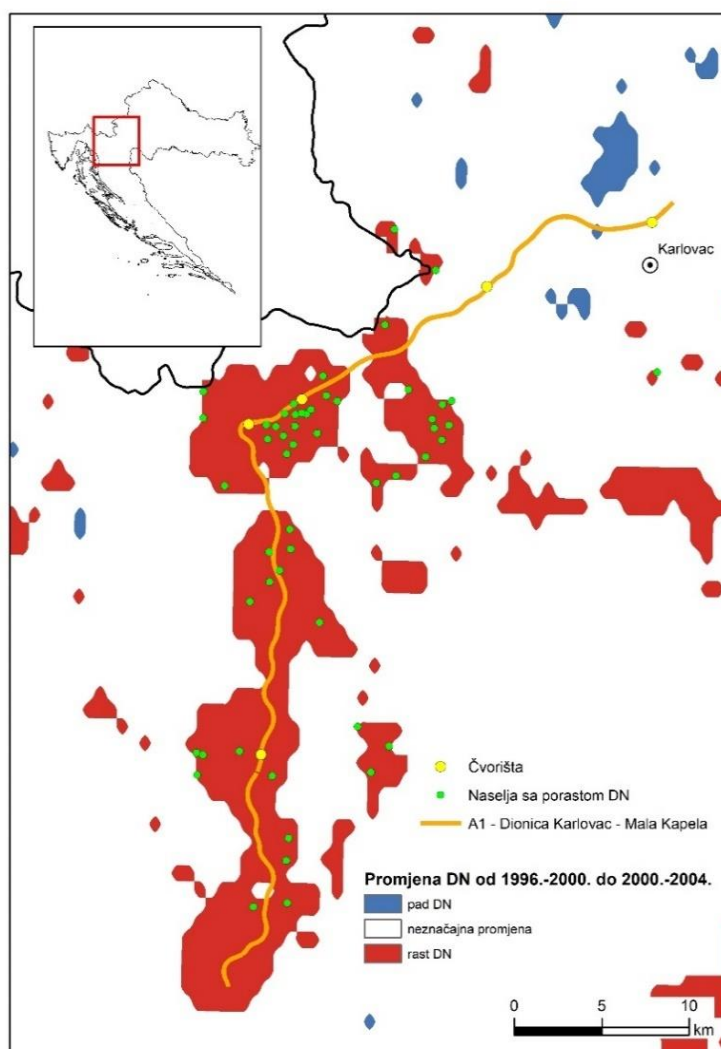
Autoceste su cestovne prometnice najvišeg reda te omogućuju brz prijevoz putnika i tereta. Važnost autocesta u organizaciji i razvoju prostora proučava se od 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća nakon njihove izgradnje u zapadnim zemljama. Autocestovni čvorovi i priključci smatraju se lokacijski atraktivnim područjima (Sić, 2009). Čvorovi i priključci su kontakti subjekata cestovnog prometa i autoceste te su zbog toga najdostupnije i time najprivlačnije točke. U blizini čvorova se smještaju sekundarne i tercijarne djelatnosti u posebne poduzetničke i gospodarske zone, te blizina čvora privlači stvaranje novih stambenih zona i jačanje procesa suburbanizacije uz obilaznice u većim gradskim naseljima (Sić, 2009; Diaz i dr., 2016).

Pri analizi utjecaja autocesta na svjetlosno onečišćenje korišteni su rasteri promjena vrijednosti DN između petogodišnjih prosjeka. Sa Open Street Map servisa preuzeti su prostorni podaci za Republiku Hrvatsku. Selekcijom po atributima iz sloja koji sadrži sve prometnice izdvojene su autoceste. Sloj autocesta u izvornom obliku je segmentiran što je olakšalo stvaranje posebnih slojeva za svaku promatranu autocestu. Osim po nazivu dio autocesta podijeljen je po etapama izgradnje i puštanju u promet. U podacima preuzetim sa Open Street Map-a, svi priključci na autoceste su prikazani segmentiranim linijskim elementima. Selekcijom po atributima izdvojeni su svi priključci. Ovom selekcijom osim priključaka na čvorištima, selektirani su i priključci na odmorištima i benzinskim postajama. Ovi elementi nisu potrebni u analizi utjecaja autocesta na promjenu svjetlosnog onečišćenja u naseljima, iako su odmorišta i benzinske postaje izvor onečišćenja, te su ručno uklonjeni. Čvorište je potrebno prikazati kao jedan element te su segmenti svakog čvorišta spojeni u jedan linijski element koristeći opciju *merge* iz izbornika za uređivanje. Za stvaranje točkastog elementa čvorišta korišten je alat *Feature to point*. Oko čvorišta napravljen je pojas od 10 km koristeći alat *Buffer*. Vrijednost od 10 km odabrana je kako bi se u potpunosti obuhvatilo područje promjene vrijednosti DN neposredno uz autoceste. Rasterski sloj promjene DN pretvoren je u vektorski upotrebom alata *Raster to polygon*. Upotrebom alata *Intersect* preklapljeni su slojevi naselja, promjene DN i pojasa od 10 km. Rezultat je točkasti sloj naselja unutar 10 km od čvorišta unutar prostora sa promjenom DN.

Ako je autocesta izgrađena i puštena u promet unutar jednog razdoblja za koje je izračunata prosječna vrijednost DN, utjecaj autoceste na promjenu prosječnog DN vidljiv je iz razlike u prosječnim vrijednostima DN iz razdoblja kada je autocesta građena i puštena u promet te

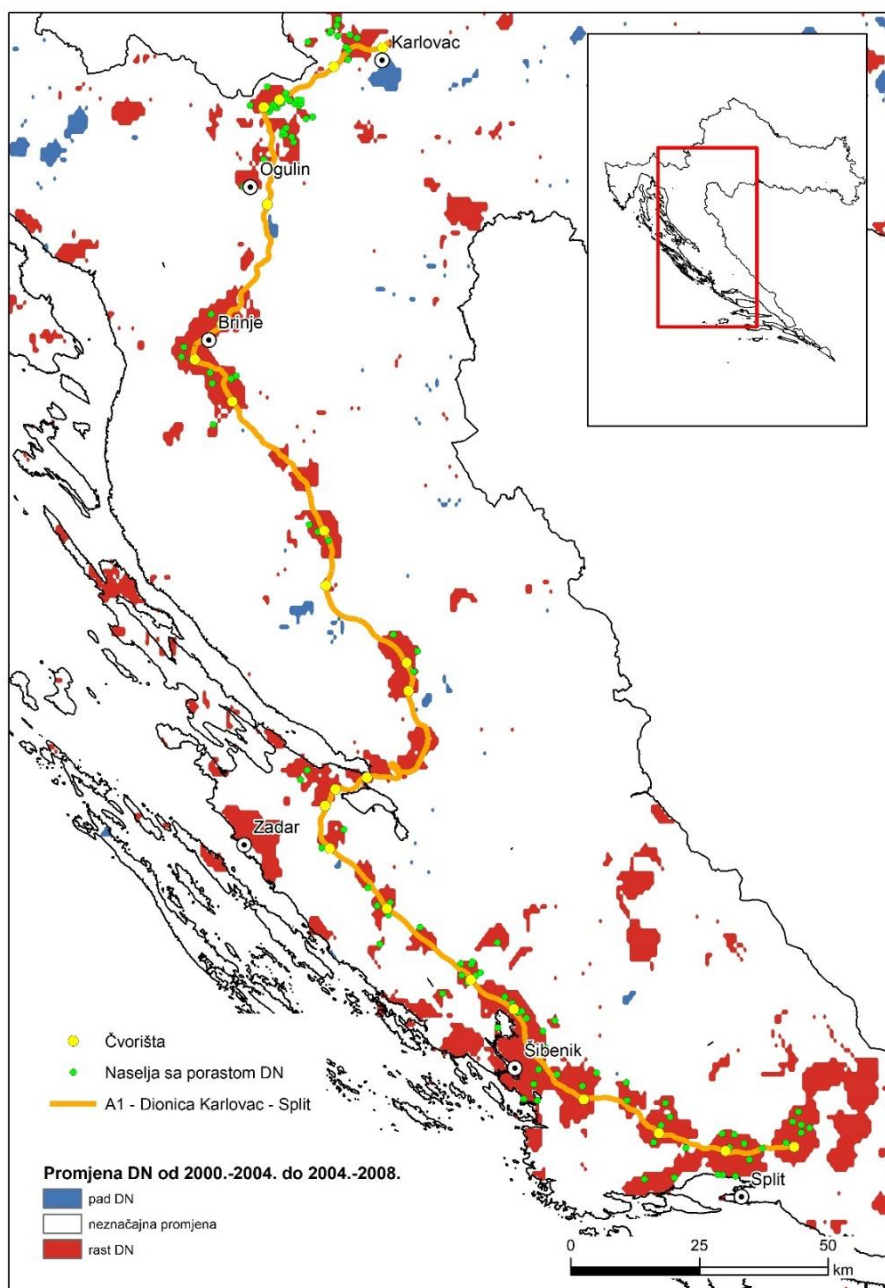
razdoblja neposredno nakon. Podaci o izgradnji i puštanju u promet autocesta preuzeti su sa web stranice Ministarstva mora, prometa i infrastrukture.

Utjecaj izgradnje autocesta na svjetlosno onečišćenje prikazan je kartografskim prikazima na primjerima autoceste A1 Zagreb – Split – Ploče i autoceste A5 od Svilaja na granici sa BIH do Osijeka (sl. 23, 24, 25 i 26). Utjecaj autocesta prikazan je i u tab. 9, iz analize su isključene autoceste A7 koja je većim dijelom trase u izgradnji ili u fazi planiranja, autoceste A10 i A11 koje nisu bile dovršene u vremenskom razdoblju koji obuhvaćaju DMSP-OLS podaci te autocesta A3 i autocesta Zagreb – Karlovac, koje s većim dijelom ili u potpunosti izgrađene prije devedesetih godina prošlog stoljeća. Utjecaj autoceste A1 podijeljen je u više dijelova zbog duljine i višegodišnje izgradnje u nekoliko faza.



Sl.23. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz dionicu Karlovac – Mala Kapela na autocesti A1 između razdoblja 1996.-2000. i 2000.-2004.

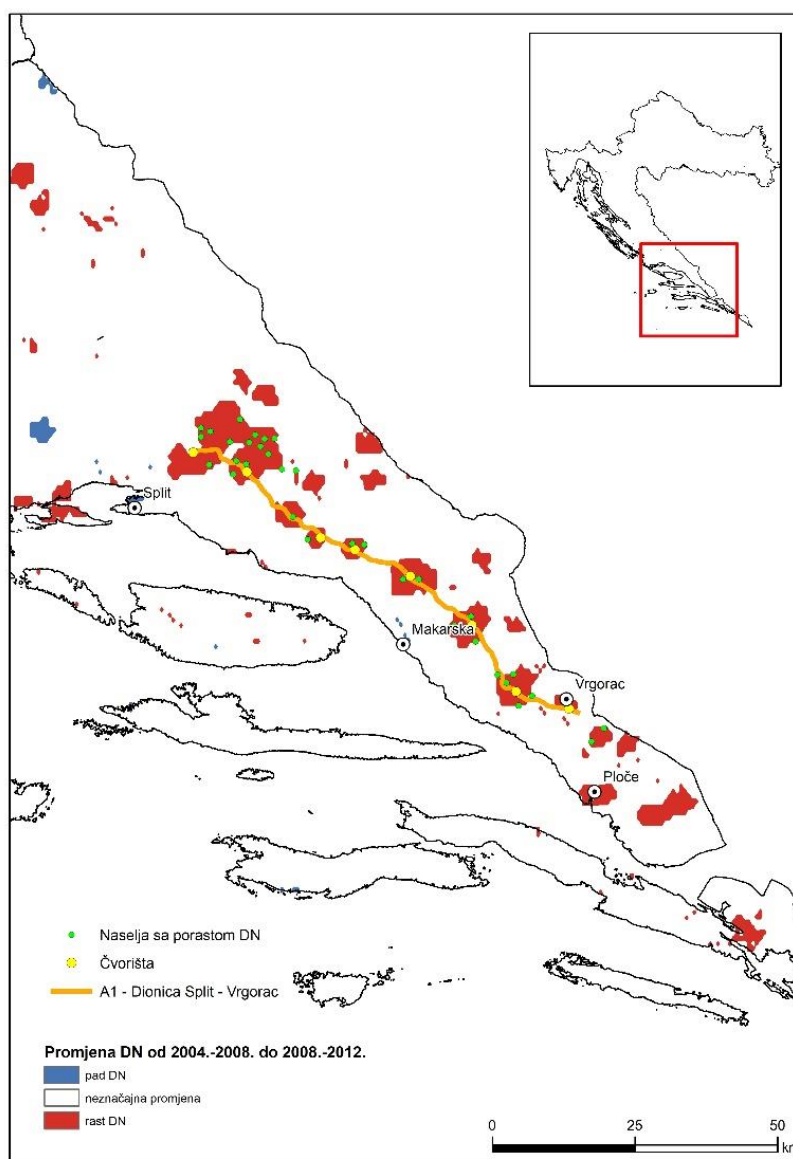
Dionica Karlovac – Mala Kapela prva je puštena u promet 2003. godine. Vidljiv je porast DN neposredno uz autocestu te naseljima uz čvorišta (sl. 23). Najviše naselja s porastom DN grupirano je oko čvora Bosiljevo, koji je svojevrsno račvanje pravaca prema Rijeci i Istri na zapadu i Dalmaciji i Splitu na jugu.



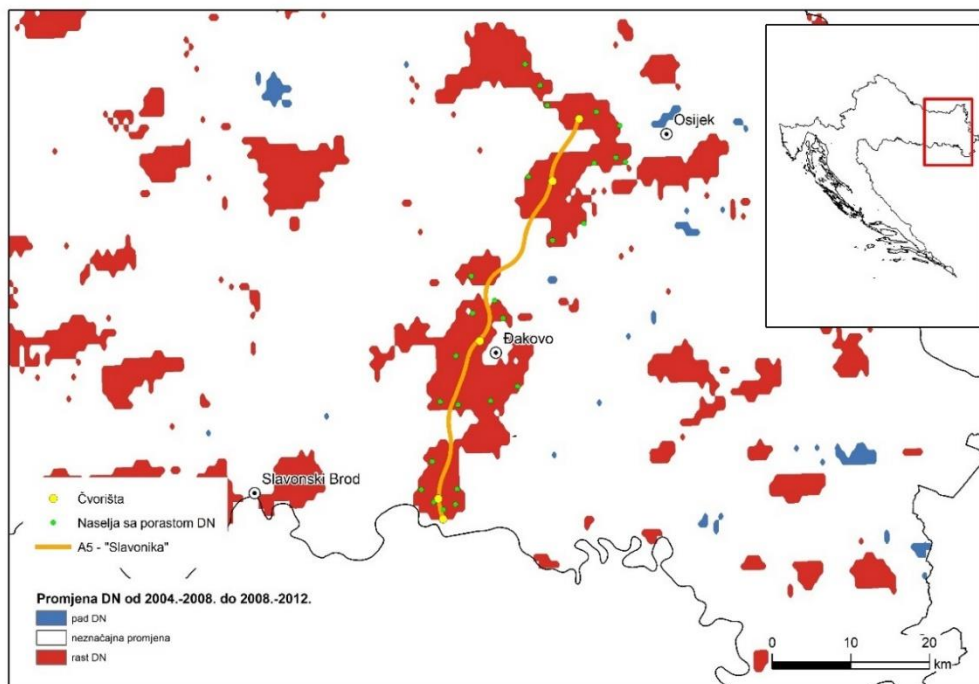
Sl.24. Promjena svjetlosnog onečišćenja u uz dionicu Karlovac – Split na autocesti A1 između razdoblja 2000.-2004. i 2004.-2008.

Dionica autoceste A1 do Splita puštena je u promet 2005. godine. Nastavlja se porast svjetlosnog onečišćenja uz Bosiljevo. Istaknut je porast oko Brinja i čvora Žuta Lokva.

Porast svjetlosnog onečišćenja bilježi gotovo cijeli prostor od Šibenika do Splita. Pad DN prisutan je oko Gospića, no promatranjem razlika DN iz kasnijih razdoblja taj prostor bilježi rast DN. Bitno je istaknuti da je autocesta A1 imala ulogu u jačanju gospodarstva Like, što se vidi iz otvaranja i uspješnog rada poduzetničkih i gospodarskih zona u Ogulinu, Otočcu, Brinju, Žutoj Lokvi, Gospiću i Svetom Roku (Sić, 2009) što kao posljedicu ima povećanje svjetlosnog onečišćenja. U Dalmaciji dio porasta svjetlosnog onečišćenja uz autoceste veže se uz gospodarske zone Novi Stankovci u Zadarskoj županiji te gospodarsku zonu Podi kod Šibenika i gospodarsku zonu Dugopolje kod Splita. Na dionici od Splita do Vrgorca svjetlosno onečišćenje je u porastu u manjim naseljima uz čvorišta



Sl.25. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz dionicu Split – Vrgorac na autocesti A1 između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.



Sl.26. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz autocestu A5 između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.

Autocesta A5 dio je paneuropskog koridora V-c koji povezuje Budimpeštu sa lukom Ploče i prolazi kroz Mađarsku, Hrvatsku i Bosnu i Hercegovinu. Prije puštanja u promet 2009. godine jedina autocesta kroz Slavoniju bila je A3 koja je udaljena nešto više od 50 km od Osijeka. U naseljima uz autocestu A5 zabilježen je porast DN. Ističe se porast DN u okolini Đakova dok u samom gradu nema značajne promjene. Uz autocestu A5 izgrađene su gospodarske i poduzetničke zone Đakovo, Široko Polje, Tenja, Antunovac i Petrijevci (OBŽ, n.d.) Izgradnjom autocesta u nekom prostoru dolazi do porasta DN, odnosno svjetlosnog onečišćenja, u velikoj većini obližnjih naselja (tab. 9).

Tab.9. Promjena prosječne vrijednosti DN u naseljima uz autoceste

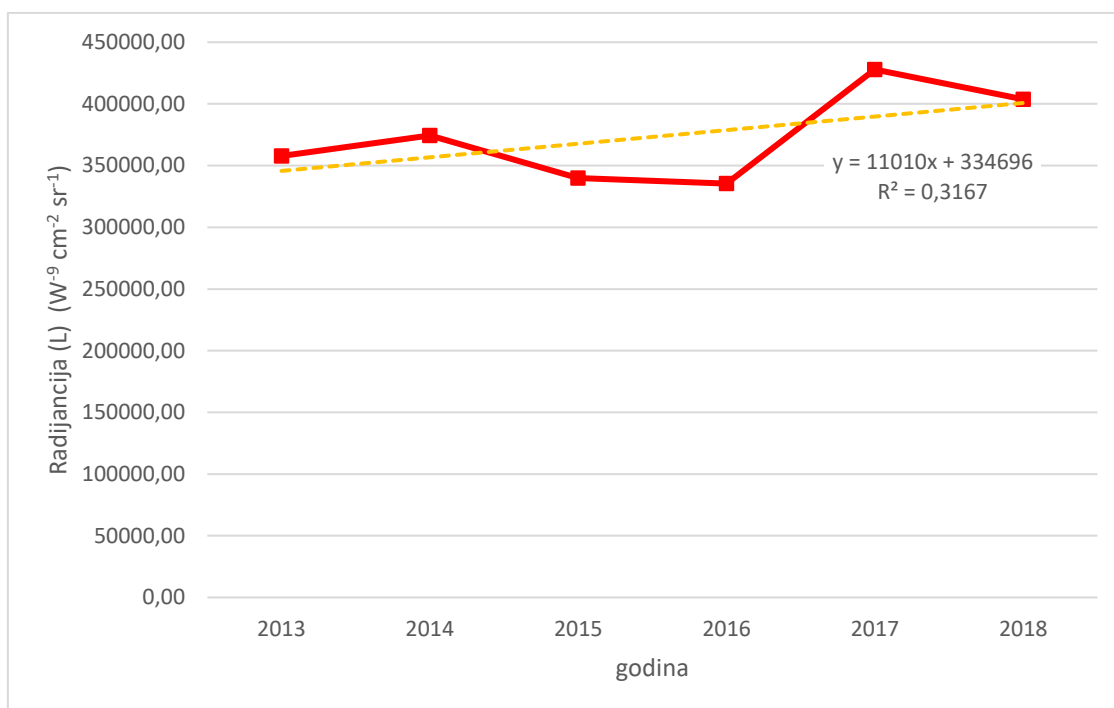
Autocesta (dionica)	autocesta u potpunosti u prometu od:	Broj naselja sa porastom DN	Broj naselja sa padom DN
A1 (Karlovac - Mala Kapela)	2003	53	5
A1 (Karlovac - Split)	2005	119	6
A1 (Split - Vrgorac)	2011	34	0
A2	2008	205	0
A4	2008	176	0
A5	2009	26	1
A6	2008	49	0
A8	2011	21	0
A9	2006	67	6

Izvor: autor, Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture

3.2. Razdoblje od 2013. do 2018.

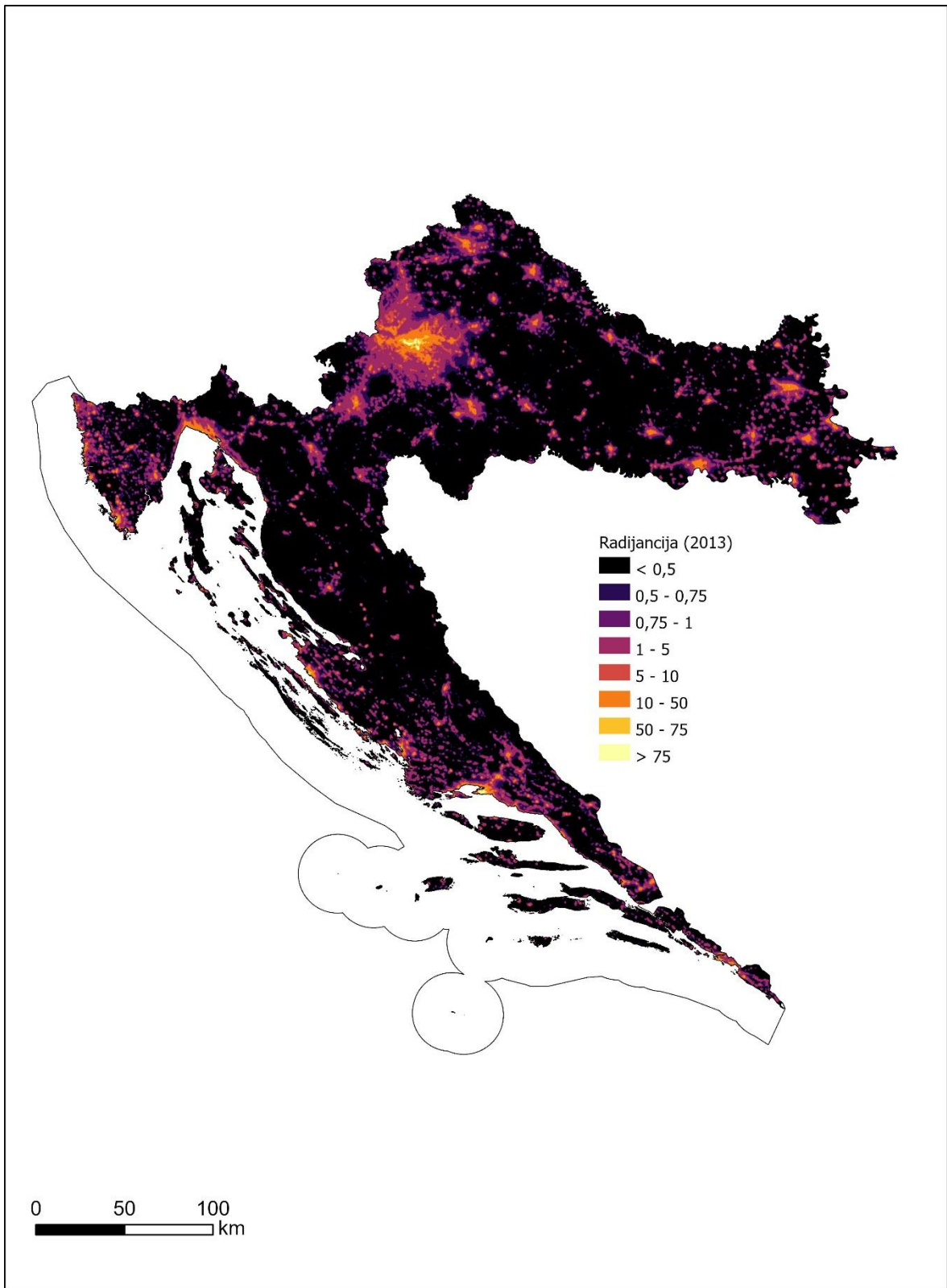
3.2.1. Radijancija kroz vrijeme

Podaci prikupljeni SNPP VIIRS senzorom obuhvaćaju znatno kraći vremenski period, no predstavljaju budućnost istraživanja pojava poput svjetlosnog onečišćenja. Za razliku od DMSP-OLS podataka koji prikazuju vrijednosti radijancije na relativnoj skali, SNPP-VIIRS podaci prikazuju radijanciju u izvedenoj mjernoj jedinici nanovat po kvadratnom centimetru po steradianu ($W^{-9} cm^{-2} sr^{-1}$). Slika 27 prikazuje ponderirane aritmetičke sredine radijancije uzrokovane noćnim svjetlima na teritoriju Republike Hrvatske od 2013. do 2018. godine. U promatranom skupu podataka minimum radijancije zabilježen je 2016. godine a maksimum 2017. godine. Također prisutan je trend sporog porasta radijancije uzrokovane noćnim svjetlima, sličan sporijem rastu SOL vrijednosti koji je karakterističan za period nakon 2008. godine te se može govoriti o svojevrsnom nastavku trenda. Također su izrađene karte prostorne raspodjele radijancije na u Hrvatskoj za početnu i krajnju godinu promatranog razdoblja (sl. 28 i 29).



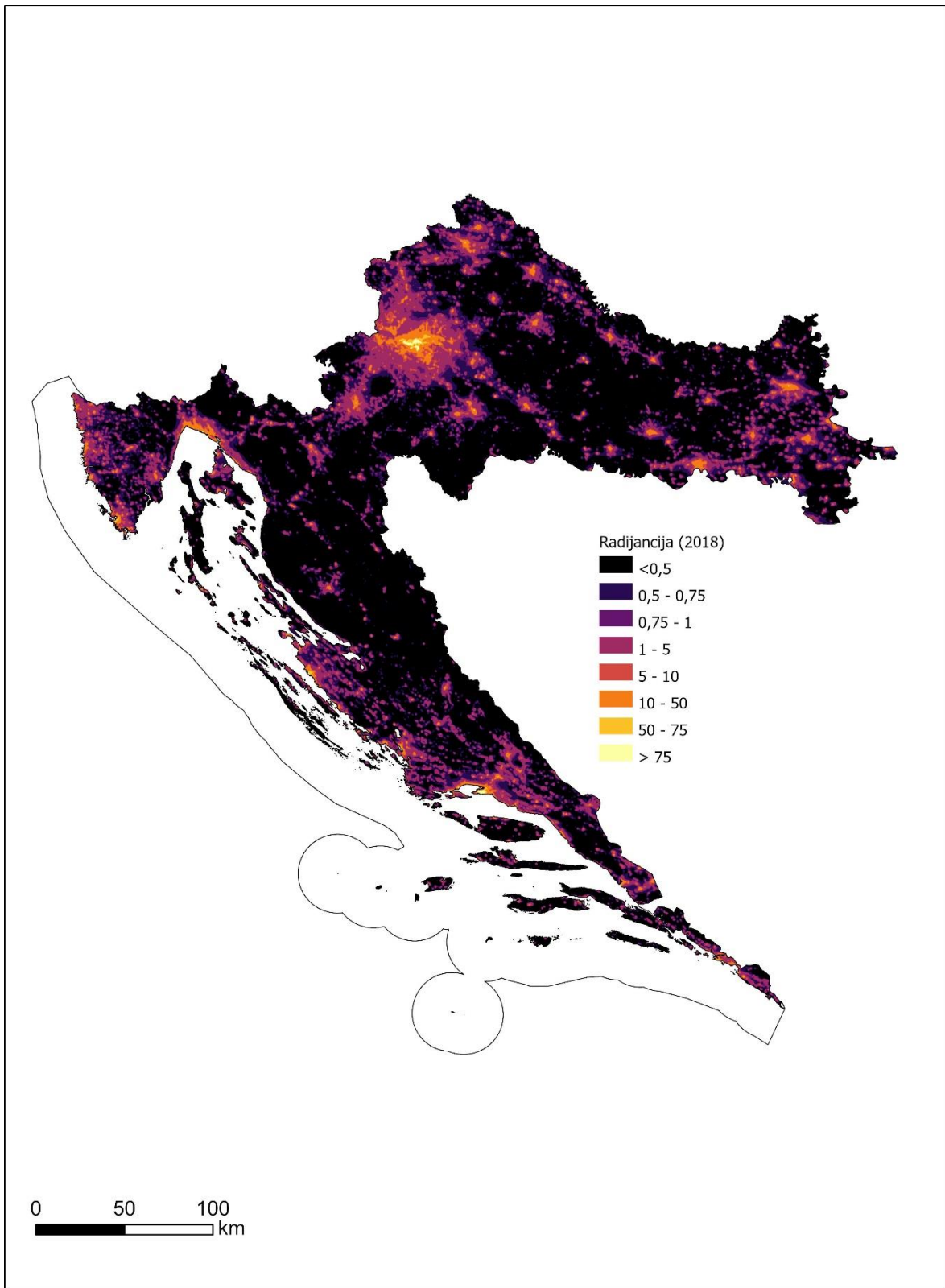
Sl. 27. Ponderirane aritmetičke sredine radijancije noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 2013. do 2018. godine

Izvor: autor, prema SNPP VIIRS



Sl. 28. Prosječne godišnje vrijednosti radijancije uzrokovane noćnom svjetlosti u Republici Hrvatskoj 2013. godine

Izvor: autor prema VIIRS



Sl. 29. Prosječne godišnje vrijednosti radijancije uzrokovane noćnom svjetlosti u Republici Hrvatskoj 2018. godine

Izvor: autor prema VIIRS

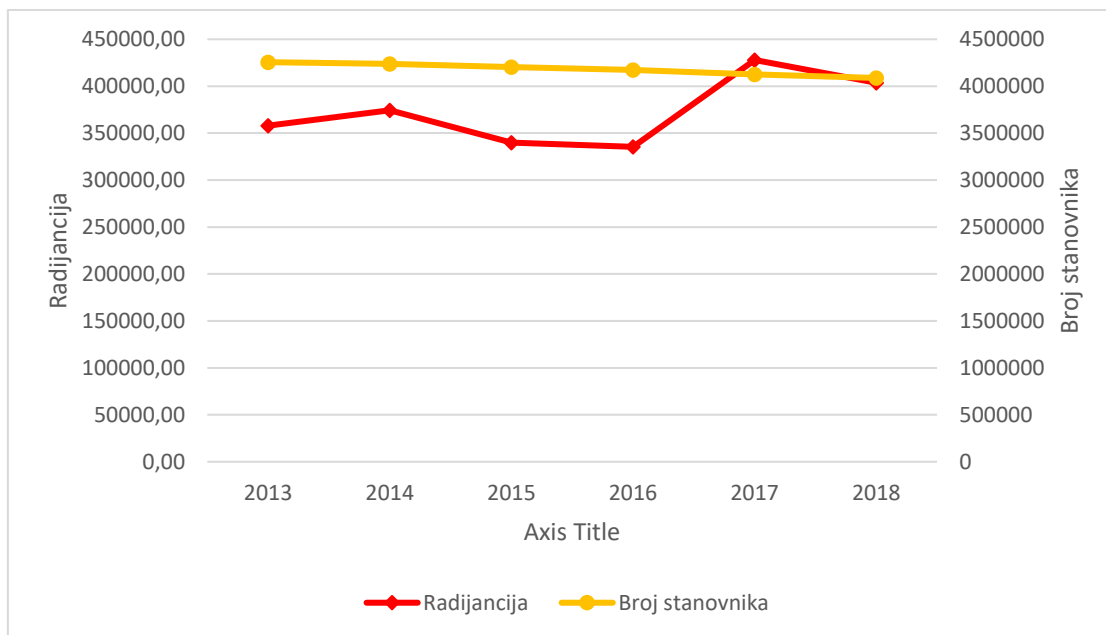
Iz prostorne distribucije radijancije na slikama 28 i 29 na prvi pogled nema značajnih razlika. Kao prostori s radijancijom većom od $75 \text{ W}^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ ističu se uža središta gradova, odnosno prostori oko glavnih gradskih trgova te najbitnijih gradskih prometnica i većih stambenih četvrti. Tragovi ljudske aktivnosti, mreže prometnica i naselja imaju radijanciju veću od $1 \text{ W}^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Radijancija je veća u naseljenijim izgrađenim područjima te se ponovno ističu Zagreb i okolica, sjever i sjeverozapad Hrvatske, priobalje i istočna Slavonija i Baranja. Niske vrijednosti radijancije zastupljene su u Gorskom kotaru, većem dijelu Like, dijelovima Banovine i Korduna te slavonskom gorju oko Požege. Prikaz prostorne promjene radijancije na razini države nije optimalan iz razloga što su prostori na kojima je značajna primjetna promjena mali te je za praćenje i analizu promjene primjereniji prikaz na lokalnoj razini.

Prema Nurbandi i dr. (2016) ne postoji direktna metoda transformacije radijancije u stupanj svjetlosnog onečišćenja. Autori smatraju da je najbolje satelitom izmjerenu radijanciju usporediti sa kvalitetom noćnog neba na nekom prostoru terenskim istraživanjem te na temelju rezultata odrediti stupanj onečišćenja na Bortle ljestvici, koju najčešće koriste astronomi. Bortle ljestvica sastoji se od 9 stupnjeva onečišćenja gdje 1. stupanj predstavlja savršeno tamno nebo a 9. stupanj nebo nad gradskim središtima te se izračunava i opisuje vidljivosti nebeskih objekata golim okom. Na određivanje Bortle stupnja svjetlosnog onečišćenja mogu utjecati naoblaka i svjetlost Mjeseca.

3.2.2. Stanovništvo, gospodarstvo i radijancija

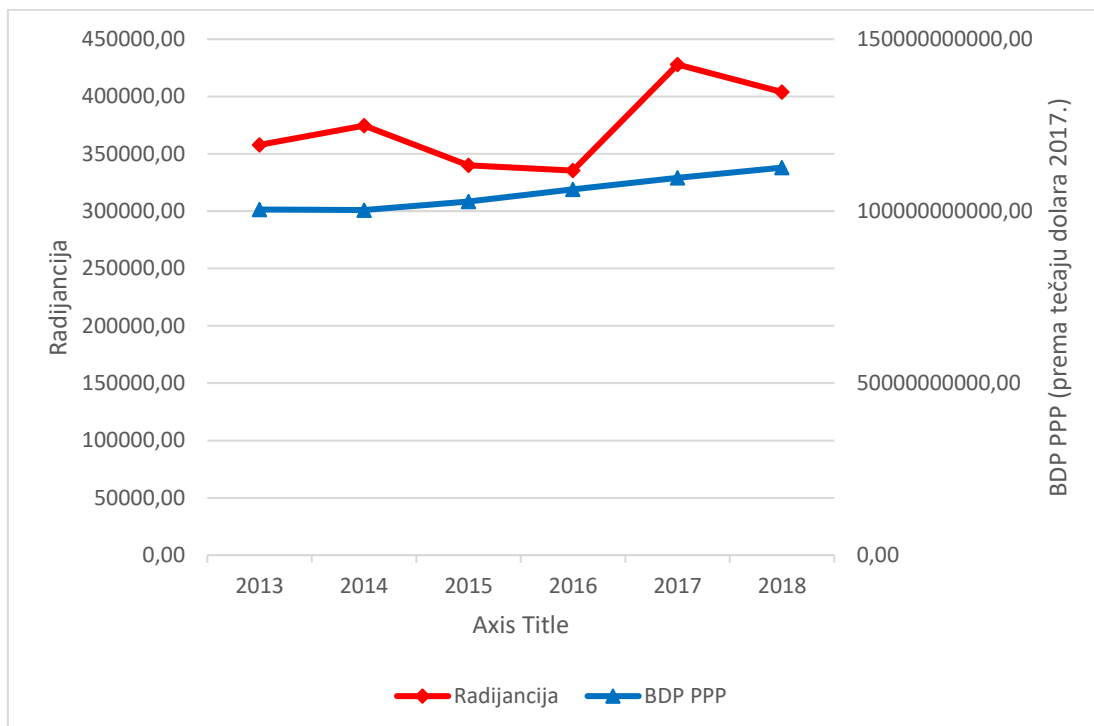
Zadnji popis stanovništva u Republici Hrvatskoj bio je 2011, godine a sljedeći je 2021. godine stoga su ponovno korištene procjene broja stanovnika koje je napravila Svjetska banka. Demografski trendovi u Hrvatskoj su nepovoljni, od 1991. država bilježi pad broja stanovnika a od 2013. godine i pojačano iseljavanje stanovništva kao posljedicu ulaska u EU i otvaranja novih tržišta rada (Jerić, 2019). Nakon perioda pada i stagnacije, od 2015. godine hrvatsko gospodarstvo se oporavlja od posljedica financijske krize. Slike 30 i 31 prikazuju procjene broja stanovnika od 2013. do 2018. i BDP-PPP i vrijednosti radijancije. Na prvi pogled bi se moglo zaključiti da se radi o svojevrsnom nastavku trendova opisanih analizom povezanosti radijancije izmjerene DMSP-OLS senzorom i podataka o stanovništvu i gospodarstvu. Iako DMSP-OLS i SNPP-VIIRS prikupljaju podatke o radijanciji oni su prezentirani na različite načine. Također zbog značajno kraćeg vremenskog obuhvata SNPP-

VIIRS podataka, ne bi bilo metodološki opravdano stavljati u korelaciju jako kratke nizove podataka.



Sl. 30. Promjena radijancije i broja stanovnika od 2013. do 2018. godine

Izvor: autor, prema SNPP VIIRS, Svjetska banka



Sl. 31. Promjena radijancije i ukupnog godišnjeg BDP-PPP-a od 2013. do 2018. godine

Izvor: autor, prema SNPP VIIRS, Svjetska banka

4. Rasprava

Eldvige i dr. (2014) stavljaju kretanje broja stanovnika i vrijednosti BDP-PPP-a u korelaciju sa noćnom svjetlosti kako bi utvrdili koji faktor potencijalno uvjetuje porast ili smanjenje noćne svjetlosti. Autori na temelju rezultata analize više od 100 zemalja svijeta definiraju 7 kategorija:

- 1) Države s ubrzanim porastom noćne svjetlosti – jaka pozitivna korelacija SOL i broja stanovnika, SOL i BDP-PPP
- 2) Države s umjerenim porast noćne svjetlosti – pozitivna korelacija, zbroj koeficijenata korelacije SOL i broja stanovnika i SOL i BDP-PPP veći od 1 i manji od 1,8
- 3) Države antipola – negativna korelacija SOL i broj stanovnika, SOL i BDP-PPP
- 4) Države sa stabilnom noćnom svjetlosti – bez značajne korelacije između SOL i broja stanovnika, SOL i BDP-PPP, vrijednosti SOL prikupljene različitim satelitima se preklapaju
- 5) Države s nepravilnom noćnom svjetlosti – bez značajne korelacije između SOL i broja stanovnika, SOL i BDP-PPP, vrijednosti SOL prikupljene različitim satelitima se ne preklapaju, odstupanje veće od 20 %
- 6) Države s gospodarski uvjetovanim kretanjem noćne svjetlosti – negativna korelacija SOL i broja stanovnika, pozitivna korelacija SOL i BDP - PPP
- 7) Države s populacijski uvjetovanim kretanjem noćne svjetlosti – pozitivna korelacija SOL i broja stanovnika, negativna korelacija SOL i BDP-PPP.

Prema rezultatima korelacijske analize u potpoglavljima 3.1.1 i 3.1.2, Republika Hrvatska spada u kategoriju država s gospodarski uvjetovanim kretanjem noćne svjetlosti. Ova tvrdnja upućuje da je porast noćne svjetlosti i svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj do 2012. godine uvjetovan razvojem gospodarstva i gospodarskih aktivnosti u prostoru te izgradnjom infrastrukture. Kontinuirani pad broja stanovnika nije utjecao na broj noćnih svjetala i svjetlosno onečišćenje. Prema kategorizaciji Eldvige i dr. (2014) u skupini sa Republikom Hrvatskom nalaze se Albanija, Armenija, Poljska, Rumunjska, Litva i Latvija, odnosno europske tranzicijske zemlje. Ostale tranzicijske zemlje nalaze se su skupini država sa nepravilnom noćnom svjetlosti ili populacijski uvjetovanim kretanjem noćne svjetlosti.

Veće svjetlosno onečišćenje se često veže uz visoko razvijene zemlje no Eldvige i dr. (2014) ističu da neke visoko razvijene zemlje poput UK, Švedske i Japana imaju pad svjetlosnog onečišćenja. Pad onečišćenja nije uvjetovan gospodarskim ili demografskim trendovima već

poduzimanjem mjera za smanjenje svjetlosnog onečišćenja, poput eko-rasvjete. Bennie i dr. (2014) u analizi promjene svjetlosnog onečišćenja u Europi promatraju razliku prosječnih vrijednosti DN između razdoblja 1995.-2000. i 2005.-2010. Autori svrstavaju Republiku Hrvatsku u vrh europskih zemalja sa porastom svjetlosnog onečišćenja, no ne bave se prostornim rasporedom, uzrocima ili utjecajem čovjeka u prostoru koji generira ovu vrstu onečišćenja. Slično kao i kod kategorizacije Eldvige i dr. (2014), zemlje slične Hrvatskoj po porastu svjetlosnog onečišćenja su bivše komunističke zemlje, izuzev Slovačke, koja jedina bilježi pad.

Analizom dostupnih SNPP-VIIRS podataka utvrđen je nastavak blagog trenda porasta radijancije, te samim time i svjetlosnog onečišćenja na teritoriju Hrvatske. Levin i Zhang (2017) ističu da je prikupljanje podataka o radijanciji noćne svjetlosti instrumentima poput VIIRS-a još uvijek u svojoj početnoj fazi te da je dio geografskih istraživanja ove problematike i dalje na razini kvalitativne analize i deskripcije.

Podaci o svjetlosnom onečišćenju od 1992. do 2018. godine prikupljeni su dvama različitim satelitima i sensorima. Eldvige i dr. (2013), Shen i dr. (2019) i Ma i dr. (2020) uspoređuju obilježja DMSP-OLS i SNPP-VIIRS i rezultati usporedbe objedinjeni su u tablici 10. Kartografski prikazi na slici 32, na primjeru Zagreba, služe boljoj ilustraciji razlika između dvaju senzora. Podaci prikupljeni DMSP-OLS sensorom su vrijedni zbog dugogodišnjeg kontinuiteta što je omogućilo detaljna istraživanja. Glavna prepreka u radu s DMSP-OLS podacima bila je nedostatak kalibracije na sensorima što je onemogućilo direktnu usporedbu izvornih snimaka snimljenih različitim satelitima, no razvojem tehnologije ova prepreka je otklonjena do puštanja u rad SNPP-VIIRS senzora.

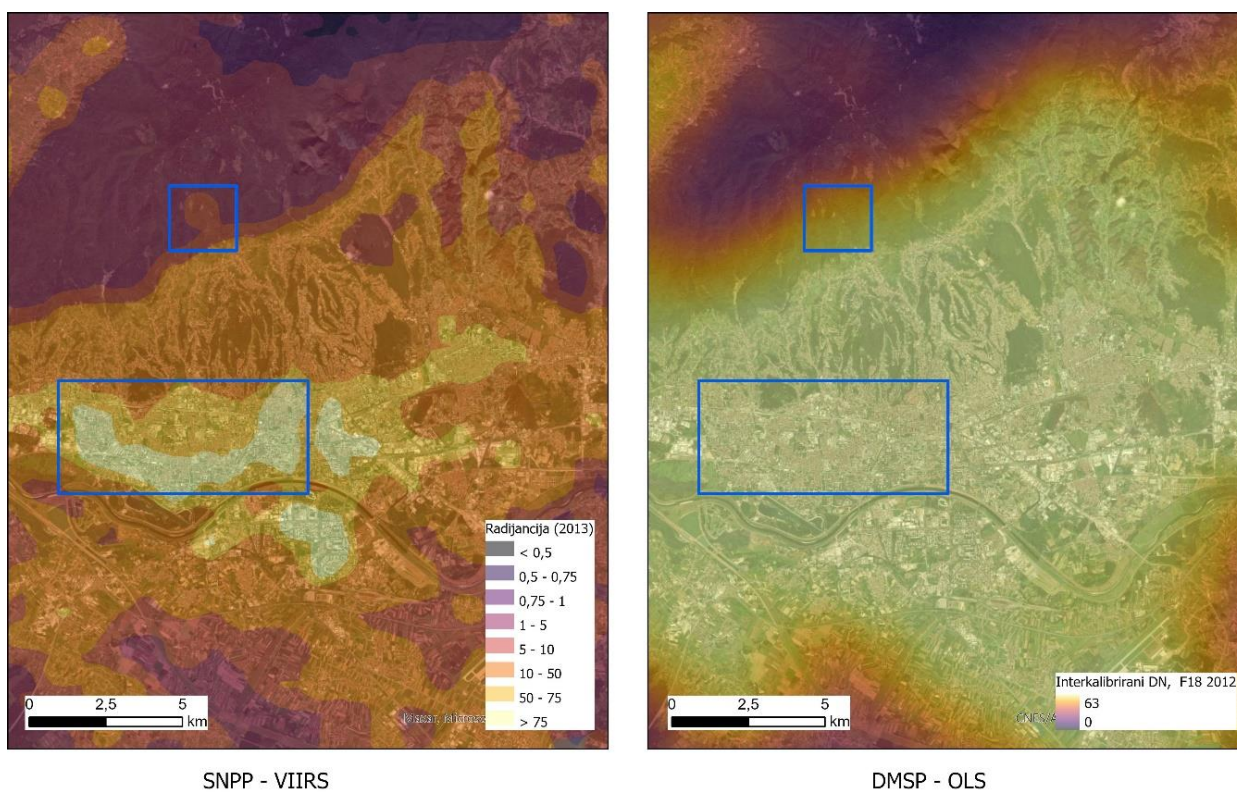
Tab.10. Usporedba satelita i elektromagnetskih kanala za istraživanje svjetlosnog onečišćenja

Obilježje	Satelit/Senzor	
	DMSP-OLS	SNPP VIIRS
Radni vijek	1992. - 2012.	travanj 2012. - danas
Orbita	Polarna	Polarna
Visina	850 km	830 km
Pojas snimanja (swath)	3000 km	3000 km
Valna duljina kanala	0,4 – 1,1 μm	0,5 – 0,9 μm
Prostorna rezolucija kompozita	1 km	750 m
Radiometrijska rezolucija	6 bita	14 bita
Vremenska rezolucija	12 sati	12 sati
Vrijeme snimanja (noćni snimak)	19:30 - 21:30	1:30

Obilježje	Satelit/Senzor	
	DMSP-OLS	SNPP VIIRS
Mjerna jedinica	Relativna skala, 0-63	$W^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
Zasićenje u urbanim područjima	Da	Ne
On-board kalibracija	Ne	Da

Izvor: autor, prema Eldvige i dr. (2013), Shen i dr. (2019), Ma i dr. (2020)

Najbitnije razlike DMSP-OLS i SNPP-VIIRS su u prostornoj i radiometrijskoj rezoluciji te mjernim jedinicama korištenim za prikaz pojave svjetlosnog onečišćenja. DMSP-OLS i SNPP-VIIRS senzori bilježe radijanciju noćnih svjetala no samo SNPP-VIIRS podaci sadrže izvorne izmjerene vrijednosti radijancije dok DMSP-OLS podaci koriste relativnu skalu od 0 do 63. Bitno je ponovno istaknuti činjenicu da zbog manje radiometrijske rezolucije DMSP-OLS snimaka dolazi do zasićenja u gradovima te vrijednost od 63 na relativnoj skali ne prikazuje maksimalnu vrijednost radijancije.



Sl. 32. Usporedba SNPP-VIIRS i DMSP-OLS podataka na primjeru Zagreba

Izvor: autor, prema DMSP-OLS, SNPP-VIIRS

Na slici 32 vidljivo je da cijeli prostor grada Zagreba, uključujući i rjeđe izgrađeno područje, ima vrijednost DN veću od 60. U kombinaciji sa prostornom rezolucijom od 1km na temelju DMSP-OLS podataka nije moguće proučavati svjetlosno onečišćenje u različitim dijelovima jednog naselja. SNPP-VIIRS podaci imaju nešto bolju prostornu rezoluciju (750 m) no

značajno bolju radiometrijsku rezoluciju. Iz navedenih razloga moguće je veće razlikovanje intenziteta radijancije te proučavanje svjetlosnog onečišćenja na razinama gradskih četvrti ili kvartova. Plavim pravokutnicima na slici 32 označeni su Medvedgrad na Medvednici te dio centra i zapad Zagreba. Na DMSP-OLS snimku iz 2012. godine centar i zapad Zagreba te dio prostora oko Medvedgrada ima gotovo istu vrijednost DN. Na SNPP-VIIRS snimku vidljive su različite vrijednosti radijancije u različitim dijelovima grada. Prostor oko Medvedgrada ističe se kao osvjetljeniji od okolice dok je u gradu vidljiv „pojas“ visoke vrijednosti radijancije koji obuhvaća Gornji i dio Donjeg grada, prostor uz Savsku ulicu te stambene zone u četvrtima Trešnjevka Sjever i Jug uz bitne gradske prometnice. Eldvige i dr. (2013), Levin i Zhang (2017), Shen i dr. (2019), Ma i dr. (2020) slažu se da budućnost istraživanja svjetlosnog onečišćenja se nalazi u tehnologiji VIIRS senzora.

5. Zaključak

Svjetlosno onečišćenje aktualna je problematika suvremenog svijeta. Svjetlosno onečišćenje kakvo danas poznajemo javlja se krajem 19. i početkom 20. st. razvojem industrijskih gradova te korištenjem električne energije. Danas se u literaturi kao vodeći proces koji uzrokuje pojavu svjetlosnog onečišćenja navodi suburbanizacija.

Podaci o svjetlosnom onečišćenju prikupljeni daljinskim istraživanjima dostupni su od 90-ih godina prošlog stoljeća i korišteni su u razne svrhe poput analize socioekonomskog razvoja, širenja gradova i naselja, procjene broja i gustoće stanovništva te procjene ekonomskog razvoja nekog prostora.

U Hrvatskoj se dosad svjetlosno onečišćenje uglavnom istraživalo prikupljanjem podataka mjernim instrumentima na Zemljinoj površini. U ovom radu analizirano je svjetlosno onečišćenje u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2018. godine na temelju podataka prikupljenih daljinskim istraživanjima. Rezultati analize pokazuju porast svjetlosnog onečišćenja u Hrvatskoj, koji je karakterističan za većinu post tranzicijskih zemalja. Potrebno je osvrnuti se na hipoteze postavljene u uvodu:

H1: Kontinuirani pad broja stanovnika u Republici Hrvatskoj rezultira padom svjetlosnog onečišćenja na nacionalnoj razini – Ova hipoteza se odbacuje iz razloga što rezultati istraživanja upućuju na vezu porasta svjetlosnog onečišćenja sa porastom broja stanovnika na lokalnoj razini, u okolici gradova, što je posljedica preseljena stanovništva. Na nacionalnoj razini svjetlosno onečišćenje je u porastu od početka praćenja podataka iako Republika Hrvatska bilježi pad broja stanovnika.

H2: Razvoj prometne infrastrukture, ponajviše suvremenih autocesta, posebice kroz Gorski kotar, Liku, Dalmaciju i Slavoniju utječe na porast svjetlosnog onečišćenja lokalno, u naseljima uz čvorišta – Ova hipoteza je potvrđena. Analizom promjene svjetlosnog onečišćenja utvrđen je porast u naseljima uz čvorišta i priključke na autoceste. Na porast svjetlosnog onečišćenja djelomično utječu poduzetničke i gospodarske zone izgrađene uz pojedina čvorišta i naselja te ekonomske aktivnosti na samoj autocesti, npr. odmorišta sa benzinskim postajama i ugostiteljskim objektima.

H3: Procesi suburbanizacije i satelitizacije utječu na porast svjetlosnog onečišćenja na lokalnoj razini. – Ova hipoteza je potvrđena. Rezultati analize ukazuju na povećanje svjetlosnog onečišćenja u okolicama gradova, posebno većih poput Zagreba i Splita. To je

vidljivo i iz širenja pojasa izraženog svjetlosnog onečišćenja od početka mjerenja pojave u okolici manjih, tj. regionalnih centara.

Svjetlosno onečišćenje nastavlja biti problematika koja interesira mnoge istraživače iz različitih područja znanosti. Podaci prikupljeni DMSP-OLS misijama, iako prvi prikupljeni o ovoj problematici te s nekim ograničenjima, polazna su točka gotovo svih istraživanja svjetlosnog onečišćenja. Suvremena istraživanja nastoje spojiti DMSP-OLS podatke sa recentnijim SNPP-VIIRS podacima kako bi se stvorila potpuna slika ove teme. Razvoj tehnologije bez sumnje će utjecati na daljnja istraživanja ove problematike u Hrvatskoj i svijetu.

Literatura

Andreić, Ž., Korlević, K., Andreić, D., Bonaca, A., Korlević, P., Kramar, M., 2011: Svjetlosno onečišćenje u Hrvatskoj, *Građevinar*, Vol. 63, 8,

Bašić, K., 2005: Apsolutna decentralizacija u populacijskom razvoju Zagrebačke aglomeracije, *Hrvatski geografski glasnik*, 67/1, 63-80

Bennie, J., Davies, T., Duffy, J., Inger, R., Gaston, K., Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights, *Nature, Scientific reports* 4: 3789

Butt, M. J., 2014: Estimation of light pollution using satellite remote sensing and geographic information system techniques, *GIScience and Remote sensing*, 49-4, 609-621

Chalkias, C., Petrakis, M., Psiloglu, B., Linanou, M., 2006: Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS, *Journal of Environmental Management* 79, 57-63

CIA World Factbook, 2020: Croatia – People and Society, <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/croatia/#people-and-society> (10.1.2021.)

Diaz, R., Behr, J., Ng, M., 2016: Quantifying the economic and demographic impact of transportation infrastructure investments: A simulation study, *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol. 92, 1-17

Državni zavod za statistiku, DZS, 2011: Model diferencijacije urbanih, ruralnih i prijelaznih naselja u Republici Hrvatskoj

Eldvige C., Baugh, K., Dietz, T., Bland, T., Sutton, P., Kroehl, H., 1999: Radiance calibration of DMSP-OLS low-light imaging data of human settlements

Eldvige, C., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., 2013: Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network. Vol. 35, 62-69

Eldvige, C., Hsu, F., Baugh, K., Ghosh, T., 2014: National trends in satellite observed lighting 1992 – 2009,

Eldvige, C., Imhoff, M., Baugh, K., Hobson, V., Nelson, I., Safran, J., Dietz, J., Tuttle, B., 2001: Night time lights of the world: 1994-1995, ISPRS Journal of Photogrametry and Remote sensing 56, 81-99

Eldvige, C., Sutton, P., Ghosh, T., Tuttle, B., Baugh, K., Bhaduri, B., Bright, E., 2009a: A global poverty map derived from satellite data, Computers and Geosciences 35

Eldvige, C., Ziskin, D., Baugh, K., Tuttle, B., Ghosh, T., Pack, D., Erwin, E., Zhizhin, M., 2009b: A fifteen-year record of global natural gas flaring derived from satellite data, Energies, 2, 595-622

Elstarghy, M., Kim, J.L., 2015: Assessment and strategies to reduce light pollution using Geographic information systems, Procedia Engineering 118, 479-488

Grad Zagreb, 2016: Urbana aglomeracija Zagreb – konačni prijedlog obuhvata, Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj grada

Han, P., Huang, J., Li, R., Wang, L., Hu, Y., Wang, J., Huang, W., 2014: Monitoring trend sin light pollution in China based on nighttime satellite imagery, Remote sensing, 6, 5541-5558

International Dark Sky Association (IDA), n.d., Light Pollution
<https://www.darksky.org/light-pollution/> (3.11.2020.)

Jerić, M., 2019: Suvremeno iseljavanje Hrvata: Kakva je budućnost Republike Hrvatske?, Oeconomica Jadertina, 2, 21-31

Kamrowski, R., Col, L., Moloney, J., Hamann, M., 2012: Costal light pollution and marine turtles: assessing the magnitude of the problem, *Endangered species research*, 19, 85-98

Kumar, P., Rehman, S., Sajjad, H., Tripathy, B. R., Rani, M., Singh, S., 2019: Analyzing trends in artificial light pollution pattern in India using NTL sensor data, *Urban Climate*, 27, 272-283

Levin, N., Zhang, Q., 2017: A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas, *Remote Sensing of Environment*, 190, 366-382

Li, X., Ge, L., Chen, X., 2013: Detecting Zimbabwe's Decadal Economic Decline Using Nighttime Light Imagery, *Remote Sensing* 2013, 5,

Li, X., Zhou, Y., 2017: A stepwise calibration of global DMSP-OLS stable nighttime light data (1992.-2013.), *Remote sensing*, 9

Ma, J., Guo, J., Ahmad, S., Li, Z., Hong, J., 2020: Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS Nighttime light, *Remote sensing*, 12

Magaš, D., 2013: *Geografija Hrvatske, Meridijani, Samobor*

Međunarodni monetarni fond (MMF), 2007: PPP Versus the Market: Which Weight Matters?, <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2007/03/basics.htm> (15.11.2020.)

Mills, S., Weiss, S., Liang, C., 2013: VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction, *Earth Observing Systems* 18

NASA, n.d., Suomi NPP, https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/main/index.html

Nurbandi, W., Yusuf, F. R., Prasetya, R., Afrizal, M. D., 2016: Using Visible Infrared Radiometer Suite (VIIRS) Imagery to identify and analyze light pollution, 2nd International conference of Indonesian Society for Remote Sensing

Pavlić, K., Andreić, Ž., 2020: Comparison of night sky brightness above Zagreb and nearby rural location 2014.-2017., Zbornik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Petalozzi, N., Cauwels, P., Sornette, D., 2014: Dynamics and spatial distribution of global nighttime lights

Rajić, N., Pejaković, T., Lončarić, S., 2017: Polazne osnove za određivanje prostornog obuhvata urbane aglomeracije Zagreb – demografski aspekti, Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj grada

Rodrigues, P., Aubrecht, C., Gil, A., Longcore, T., Eldvige, C., 2012: Remote sensing to map influence of light pollution on Cory's shearwater in Sao Miguel island, Azores archipelago, European Journal of Wildlife research

Sharma, I., Mostečak, A., Andreić, Ž., 2015: Svjetlosno onečišćenje grada Zagreba u periodu prosinac 2010.- srpanj 2011., Zbornik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Tavoosi, H., Darvishzadeh, R., Shakiba, A., Mirbagheri, B., 2009: Modelling light pollution in suburbs using remote sensing and GIS, The Seventh International Conference on Urban Climate

U.S. Department of Commerce, 2017: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Sensor Data Record (SDR) User's Guide, Washington D.C.

Vresk, M., 1992: Urbanizacija Hrvatske 1981-1991, Hrvatski geografski glasnik, 54, 99-116

Vresk, M., 1998: Satelitizacija splitske aglomeracije, Hrvatski geografski glasnik, 60, 31-48

Walker, M., 1972: Light pollution in California and Arizona, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol.85

Wu, K., Wang, X., 2019: Aligning Pixel Values of DMSP and VIIRS Nighttime Light Images to Evaluate Urban Dynamics, *Remote Sensing* 2019, 11

Wu, R., Yang, D., Dong, J, Zhang, L., Xia, F., 2018: Regional inequality in China based on NPP-VIIRS night-time light imagery, *Remote sensing* 2018, 10

Xiang, W., Tan, M., 2017: Changes in Light Pollution and the Causing Factors in China's Protected Areas. 1992-2012, *Remote Sensing* 2017, 9

Xu, P., Jin, P., Cheng, Q., 2020: Monitoring Regional Urban Dynamics Using DMSP-OLS Nighttime Light Data in Zhejiang Province, China, *Mathematical Problems in Engineering* 2020

Zupanc, I., 2008: Gradska naselja Hrvatske u popisima stanovništva 1961.-2001., *Geografski Horizont* 54/2, 43-52

Izvori

Državna geodetska uprava (DGU): Središnji registar prostornih jedinica

Državni zavod za statistiku (DZS), 2001: Popis stanovništva 2001., <https://www.dzs.hr/>

Državni zavod za statistiku (DZS), 2011: Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011., <https://www.dzs.hr/>

Earth Observation Group (EOG): Version 1 VIIRS Day/Night Band Nighttime lights, https://eogdata.mines.edu/download_dnb_composites.html

Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture, n.d.: Kronologija izgradnje, <http://mppi.hr/default.aspx?id=9724> (21.12.2020)

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), n.d.: VIIRS DNB Composites, https://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html (1.9.2020.)

National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA), n.d.: Version 4 DMSP-OLS Nighttime series, <https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html> (1.9.2020.)

Open street map: <http://download.geofabrik.de/europe/croatia.html>

Osječko-baranjska županija (OBŽ), n.d.: Katalog poduzetničkih zona Osječko-baranjske županije

Ratkajec, D., 2014: Provedba energetskeg pregleda javne rasvjete, Elektronički fakultet u Osijeku

Svjetska banka, 2020: Croatia, <https://data.worldbank.org/country/croatia> (5.11. 2020)

POPIS PRILOGA

Popis tablica

Tab.1. Koeficijenti za interkalibraciju DMSP-OLS podataka.....	11
Tab.2. Udio teritorija Republike Hrvatske sa prisutnim svjetlosnim onečišćenjem ($DN \geq 6$).....	30
Tab.3. Teritorij Republike Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja..	31
Tab.4. Naselja Republike Hrvatske prema stupnju svjetlosnog onečišćenja.....	32
Tab.5. Udio stanovništva RH po kategorijama svjetlosnog onečišćenja u prosječnim razdobljima s popisnim godinama.....	32
Tab.6. Udio naselja Republike Hrvatske sa porastom ili padom vrijednosti DN.....	33
Tab.7. Naselja Republike Hrvatske sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem po regijama.....	33
Tab.8. Udio naselja urbane aglomeracije Zagreb sa porastom svjetlosnog onečišćenja po županijama.....	37
Tab.9. Promjena prosječne vrijednosti DN u naseljima uz autoceste.....	42
Tab.10. Usporedba satelita i elektromagnetskih kanala za istraživanje svjetlosnog onečišćenja.....	49

Popis slika

Sl. 1. Mreža odabranih naselja i važnijih prometnica u Republici Hrvatskoj	4
Sl. 2. Elektromagnetski spektar.....	7
Sl. 3. Shematski prikaz satelita i preklapanja prikupljenih podataka.....	9
Sl. 4. Zbroj noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2012. godine, izvorne vrijednosti, $DN \geq 6$	10
Sl. 5. Zbroj noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 1992. do 2012., interkalibrirane vrijednosti, $DN \geq 6$	12
Sl. 6. Dijagram rasipanja zbroja noćnih svjetala i broja stanovnika od 1992. do 2012. godine.....	15
Sl. 7. Dijagram rasipanja zbroja noćnih svjetala i BDP PPP-a (prema internacionalnom tečaju dolara 2017. godine).....	16
Sl. 8. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 1992.-1996.....	18
Sl. 9. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 1996.-2000.....	19
Sl. 10. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2000.-2004.....	20
Sl. 11. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2004.-2008.....	21
Sl. 12. Prosječna vrijednost interkalibrirane svjetline piksela u razdoblju 2008.-2012.....	22

Sl. 13. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 1992.-1996. i 1996.-2000.....	24
Sl. 14. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 1996.-2000. i 2000.-2004.....	25
Sl. 15. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 2000.-2004. i 2004.-2008.....	26
Sl. 16. Promjena prosječne vrijednosti svjetline piksela između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.....	27
Sl. 17. Udjeli teritorija prema rastu ili padu prosječne svjetline piksela (DN) između promatranih razdoblja.....	28
Sl. 18. Prostor Republike Hrvatske pod svjetlosnim onečišćenjem u razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.....	29
Sl. 19. Prostor Republike Hrvatske pod različitim stupnjevima svjetlosnog onečišćenja u razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.....	31
Sl. 20. Stopa promjene broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem u Republici Hrvatskoj, regionalni pregled.....	34
Sl. 21. Širenje prostora i povećanje broja naselja sa izraženim svjetlosnim onečišćenjem na primjeru Splita (a), Varaždina i Čakovca (b) i Slavonskog Broda (c) u prosječnim razdobljima 1992.-1996. i 2008.-2012.....	35
Sl. 22. Svjetlosno onečišćenje u urbanoj aglomeraciji Zagreb od 2000. do 2012. godine....	37
Sl. 23. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz dionicu Karlovac – Mala Kapela na autocesti A1 između razdoblja 1996.-2000. i 2000.-2004.....	39
Sl. 24. Promjena svjetlosnog onečišćenja u uz dionicu Karlovac – Split na autocesti A1 između razdoblja 2000.-2004. i 2004.-2008.....	40
Sl. 25. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz dionicu Split – Vrgorac na autocesti A1 između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.....	41
Sl. 26. Promjena svjetlosnog onečišćenja uz autocestu A5 između razdoblja 2004.-2008. i 2008.-2012.....	42
Sl. 27. Ponderirane aritmetičke sredine radijancije noćnih svjetala u Republici Hrvatskoj od 2013. do 2018. godine.....	43
Sl. 28. Prosječne godišnje vrijednosti radijancije uzrokovane noćnom svjetlošću u Republici Hrvatskoj 2013. godine.....	44
Sl. 29. Prosječne godišnje vrijednosti radijancije uzrokovane noćnom svjetlošću u Republici Hrvatskoj 2018. godine.....	45

Sl. 30. Promjena radijancije i broja stanovnika od 2013. do 2018. godine.....	47
Sl. 31. Promjena radijancije i ukupnog godišnjeg BDP-PPP-a od 2013. do 2018. godine...	47
Sl. 32. Usporedba SNPP-VIIRS i DMSP-OLS podataka na primjeru Zagreba.....	50