

Svjetlosno onečišćenje u Republici Hrvatskoj

Željko Andreić, Korado Korlević, Doroteja Andreić, Ana Bonaca, Petra Korlević, Mirna Kramar

Ključne riječi

svjetlosno onečišćenje,
Republika Hrvatska,
statistički model,
Walkerov zakon,
mjerenja,
zakonska regulativa

Key words

light pollution,
Republic of Croatia,
statistical model,
Walker's law,
measurements,
regulations

Mots clés

pollution lumineuse,
République de Croatie,
modèle statistique,
loi de Walker,
mesure, règlements

Ключевые слова

световое загрязнение,
Республика Хорватия,
статистическая
модель,
закон Волкера,
измерения,
законодательство

Schlüsselworte

Lichtverschmutzung,
Republik Kroatien,
statistisches Modell,
Walker's Gesetz,
Messungen,
gesetzliche Regulative

Ž. Andreić, K. Korlević, D. Andreić, A. Bonaca, P. Korlević, M. Kramar

Izvorni znanstveni rad

Svjetlosno onečišćenje u Republici Hrvatskoj

Opisana je analiza svjetlosnoga onečišćenja na području Republike Hrvatske na temelju statističkoga modela zasnovanog na Walkerovom zakonu. Rezultati su provjereni mjerenjima svjetlosnoga onečišćenja na dvadesetak lokacija. Oni pokazuju da je cijelo područje RH barem umjereno svjetlosno onečišćeno, s izuzetkom nekoliko otoka te nekih područja u Lici i Gorskome kotaru. Učinjen je i osvrt na trenutačno stanje hrvatske zakonske regulative koja se odnosi na svjetlosno onečišćenje.

Ž. Andreić, K. Korlević, D. Andreić, A. Bonaca, P. Korlević, M. Kramar

Original scientific paper

Light pollution in Croatia

Light pollution in the Republic of Croatia is analyzed using a statistical model based on the Walker's law. The results have been verified by measurement of light pollution on some twenty sites. They show that the entire Croatian territory is at least moderately polluted by light, with the exception of several islands and some areas in Lika and Gorski kotar. An overview of prevailing Croatian regulations relating to light pollution is also given.

Ž. Andreić, K. Korlević, D. Andreić, A. Bonaca, P. Korlević, M. Kramar

Ouvrage scientifique original

Pollution lumineuse en Croatie

La pollution lumineuse dans la République de Croatie est analysée à l'aide d'un modèle statistique basé sur la loi de Walker. Les résultats ont été vérifiés par mesure de la pollution lumineuse sur une vingtaine de sites. Ils montrent que le territoire entier de Croatie est au moins moyennement pollué par lumière, à l'exception de d'un nombre d'îles et quelques zones dans les régions de Lika et Gorski kotar. Un aperçu des règlements croates sur la pollution lumineuse est également présenté.

Ж. Андревич, К. Корлевич, Д. Андревич, А. Бонаца, П. Корлевич, М. Крамар

Оригинальная научная работа

Световое загрязнение в Республике Хорватии

Описан анализ светового загрязнения на территории Республики Хорватии на базе статистической модели, основывающейся на законе Волкера. Результаты проверены измерениями светового загрязнения, проведенными приблизительно в двадцати местах. Они показывают, что на всей территории РХ имеет место по крайней мере умеренное световое загрязнение. Исключение составляют несколько островов и некоторые области в Лике и Горском котаре. Приведен обзор состояния хорватского законодательства, относящегося к световому загрязнению.

Ž. Andreić, K. Korlević, D. Andreić, A. Bonaca, P. Korlević, M. Kramar

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Lichtverschmutzung in der Republik Kroatien

Beschrieben ist eine Analyse der Lichtverschmutzung im Gebiet der Republik Kroatien auf Grund eines statistischen Modells begründet auf Walker's Gesetz. Die Ergebnisse sind durch Messungen der Lichtverschmutzung auf rund zwanzig Standorten beglaubigt. Sie zeigen dass das ganze Gebiet der RH mässig lichtverschmutzt ist, mit Ausnahme einiger Inseln und einiger Gebiete in Lika und Gorski kotar. Man gibt auch einen Rückblick auf den jetzigen Stand der kroatischen gesetzlichen Regulative die sich auf die Lichtverschmutzung bezieht.

Autori: Prof. dr. sc. **Željko Andreić**, dipl. ing. fizike, Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet; **Korado Korlević**, profesor politehnike i informatike, Zvezdarnica Višnjan; **Doroteja Andreić** studentica diplomskog studija, Veterinarski fakultet, Zagreb; mr. sc. **Ana Bonaca**, Department of Astronomy, Yale University; **Petra Korlević**, bacc. biologije, Znanstveno-edukacijski centar Višnjan; **Mirna Kramar**, studentica diplomskog studija, Kemijski Odsjek PMF, Zagreb

1 Uvod

International Dark Sky Association (IDA) definira svjetlosno onečišćenje (engl. *light pollution*) kao "svaki štetni efekt umjetnoga svjetla, uključujući povećanje svjetline noćnoga neba, zasljepljivanje, osvjetljivanje izvan područja koja je potrebno osvijetliti, prekomjerno osvjetljivanje, smanjenu vidljivost noću i rasipanje svjetlosne energije" [1]. Ponekad se koristi i termin "rasipanje svjetla" (engl. *light spill*) [2]. Zakon o zaštiti okoliša [3] definira svjetlosno onečišćenje na sljedeći način: "Svjetlosno je onečišćenje promjena razine prirodne svjetlosti u noćnim uvjetima uzrokovana unošenjem svjetlosti proizvedene ljudskim djelovanjem".

Istraživanja svjetlosnoga onečišćenja i njegovih posljedica provode se u novije vrijeme, a znatno su pojačana posljednja dva desetljeća kada se u pojedinim državama širom svijeta pojavljuju zakonske mjere i ograničenja kojih je cilj smanjiti negativne posljedice umjetne rasvjete.

Povećanje svjetline noćnog neba prvi su primijetili astronomi nakon što je javna rasvjeta ušla u masovnu upotrebu [4]. To je potaknulo selidbu profesionalnih zvjezdarnica na lokacije koje su daleko od većih naselja što je bilo poduprto i potrebom da se nađu lokacije sa što većim brojem vedrih noći i sa što mirnijom i čistom atmosferom. Ovaj je proces završen i velike su zvjezdarnice danas locirane na nekoliko vrlo izoliranih mjesta u svijetu. Prve studije utjecaja umjetne rasvjete na svjetlinu noćnoga neba pojavile su se nedugo nakon toga [5-7].

Jedan od prvih pokušaja da se predvidi utjecaj umjetne rasvjete na svjetlinu noćnoga neba napravio je astronom Merle Walker (SAD) oko 1975. godine [5, 8]. Nakon niza mjerenja svjetline noćnog neba u okolici nekoliko izoliranih naselja, formulirao je empirijski zakon propagacije povećanja svjetline noćnoga neba izazvano umjetnom rasvjetom naselja koji je danas poznat kao Walkerov zakon [9]. Drugi su autori modelirali svjetlosno onečišćenje na osnovi teorije raspršivanja svjetla, uz pretpostavku jednostrukoga raspršivanja [7, 10], ili uzimajući u obzir i višestruko raspršivanje [11, 12]. Modeli zasnovani na teoriji višestrukoga raspršenja rijetko se primjenjuju zbog kompleksnosti i nemogućnosti da se potrebni fizikalni parametri definiraju dovoljno točno.

U devedesetim godinama prošlog stoljeća pojavio se i treći pristup ovom problemu na osnovi satelitskih slika noćne strane Zemljine kugle, teoretski je, opet uz pomoć teorije raspršivanja, proračunato povećanje svjetline noćnoga neba izazvano izvorima svjetla zabilježenim na satelitskim slikama. Slaba točka ovoga pristupa jest određivanje omjera količine svjetla koje od izvora ide vertikalno prema gore (tj. svjetla koje satelit vidi) i svjetla

koje se prema gore širi pod malim kutovima prema horizontali i koje je u najvećoj mjeri odgovorno za povećanje svjetline noćnoga neba. Karte svjetlosnoga onečišćenja dobivene ovom metodom danas su svima dostupne [13-17], kao i originalne satelitske slike koje dolaze od meteoroloških satelita američke vojske [18].

Što se tiče praćenja svjetlosnoga onečišćenja na jednoj određenoj lokaciji, danas se primjenjuje nekoliko metoda različite složenosti. Najjednostavnije je mjerenje svjetline noćnoga neba u zenitu uz pomoć opće prihvaćenog uređaja koji se naziva *Sky Quality Meter* (SQM) [19]. Uređaj je razvijen u Kanadi, a danas se rabi u cijelom svijetu. Velika mu je prednost jednostavnost upotrebe, jer je dovoljno senzor uređaja usmjeriti prema gore, pokrenuti postupak mjerenja i očitati rezultat. Nadalje, nabavna cijena mu je niska (oko 1.500 kn) što je pridonijelo njegovoj rasprostranjenosti. Manji je nedostatak što mu spektralna osjetljivost ne odgovara u cijelosti osjetljivosti oka prilagođenoga na tamu, već je mnogo sličnija spektralnoj osjetljivosti modernih digitalnih kamera. Ovaj se nedostatak uglavnom zanemaruje, pogotovo zato što se i digitalne kamere rabe u analizama svjetline noćnoga neba, a rezultati dobiveni njima i mjerenjima SQM uređajem zbog toga su izravno usporedivi.

Za analizu raspodjele svjetline noćnoga neba preko cijele nebeske polukugle rabe se tzv. *all-sky* kamere (kamere koje na jednoj snimci bilježe sliku cijele nebeske polukugle) koje se mogu izraditi povezivanjem ispupčenog zrcala i obične kamere [20, 21] ili uz upotrebu posebnoga objektivna, tzv. ribljeg oka (*fish-eye lens*). Cijena je takvoga mjernog sustava u RH oko 12.000 kn. Želi li se analiza snimki *all-sky* kamerom učiniti količinskom, potrebno je senzor kamere usmjeriti, a to se trenutačno u RH ne može učiniti, a cijena postupka u Europskoj Uniji je nekoliko tisuća eura. Međutim i bez tog usmjeravanja dobivaju se mjerenja koja pokazuju raspodjelu svjetline noćnoga neba u relativnim jedinicama s dovoljnom točnošću, a skala svjetline može se kalibrirati u apsolutnim jedinicama usporedbom s mjerenjima SQM uređajem, naravno uz nešto manju točnost.

Svjetlosno onečišćenje danas se smatra kompleksnim problemom koji ima vrlo široke posljedice i djelovanja. Mnogo pažnje danas se usmjerava na utjecaj svjetlosnog onečišćenja na okoliš i ljudsko zdravlje [2, 22].

2 Walkerov zakon

Nakon niza mjerenja svjetline noćnoga neba u ovisnosti o udaljenosti od izoliranoga naselja, provedenih vrlo osjetljivim fotometrom, M. Walker formulirao je empirijski zakon koji opisuje ovisnost povećanja svjetline noćnoga neba o veličini naselja i udaljenosti od njegova središta [9]:

$$\Delta L = c_0 p d^{-2,5} \quad (1)$$

U izrazu (1) ΔL je povećanje svjetline noćnoga neba u zenitu izazvano svjetlosnim onečišćenjem naselja, izraženo u cd/m^2 ; c_0 je konstanta proporcionalnosti koja u sebi sadrži razne faktore koji povezuju povećanje svjetline noćnog neba i količinu umjetnog svjetla, a izražava se u $\text{cd/m}^2/\text{stanovniku}$; d je udaljenost mjesta opažanja od središta naselja u m, uz pretpostavke da je naselje približno kruznoga oblika i da je točka opažanja izvan njega; p je populacija naselja.

Konstanta proporcionalnosti može se razložiti na umnožak dvaju faktora:

$$c_0 = \varepsilon r_0 \quad (2)$$

Konstanta ε naziva se efikasnost raspršenja i ona je dio svjetla koje se pri prolasku kroz atmosferu rasprši i tako tvori svjetlosno onečišćenje; r_0 se naziva rastrošnost i predstavlja količinu svjetla koju javna rasvjeta proizvodi po glavi stanovnika naselja, a izražava se u $\text{lm}/\text{stanovniku}$. Ovo se razlaganje primjenjuje, ako se u model mogu uključiti i podaci o rastrošnosti. Ako to nije moguće primjenjuje se konstanta c_0 . Sljedeća pretpostavka koja je kod ovog zakona učinjena jest da je cijelo promatrano područje ravno (tj. zanemaruje se utjecaj reljefa) što olakšava modeliranje, a kao krajnju posljedicu ima da je dobiveno povećanje svjetline noćnoga neba najveće moguće, jer istaknuti reljef zbog zasjenjenja dijela izvora umjetne rasvjete dovodi do smanjenja rezultirajućeg povećanja svjetline neba.

Ovdje treba napomenuti da je svjetlina prirodnoga noćnog neba oko $0,191 \text{ mcd/m}^2$ ($=21,9 \text{ mag}/\text{lučna sekunda}^2$) u vedroj noći bez mjesečine u vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti [23]. Svjetlina noćnoga neba općenito ovisi o intenzitetu Sunčeve aktivnosti i kuta između smjera u kojem se nalazi Sunce (ispod obzora) i smjera zenita i u najgorem slučaju (vrlo jaki maksimum Sunčeve aktivnosti) može biti oko tri puta veća od ovdje navedene vrijednosti [24, 25].

Nadalje, Walkerov zakon vrijedi za motritelja izvan naseljena mjesta, i ne daje nikakvo predviđanje svjetlosnoga onečišćenja unutar njega. Ovaj je problem proučio Garstang [10], ali njegovi su zaključci neprecizni i presloženi da bi se mogli uključiti u zatvoreni numerički model. Albers i Duriscoe [23] pretpostavili su jednostavno linearno povećanje svjetline neba od ruba naselja do njegova središta za faktor 2,5. Na kraju, je potrebno još napomenuti da se kod svih takvih modela pretpostavlja standardno čista atmosfera. Vlaga, sumaglica, smog ili oblaci, koji ovdje nisu uzeti u obzir, znatno povećavaju doprinos svjetlosnoga onečišćenja svjetlini noćnoga neba.

3 Model svjetlosnoga onečišćenja

Opisani model temeljen je na Walkerovu zakonu (1), pri čemu su rezultati izraženi u standardnim astronomskim jedinicama (magnituda po lučnoj sekundi na kvadrat, skraćeno $\text{mag}/\text{arcsec}^2$). Astronomska je skala svjetline logaritamska, s neobičnošću da veća magnituda odgovara zvijezdi slabijega sjaja. Svjetlina noćnoga neba definira se kao sjaj zvijezde čije svjetlo, razdijeljeno po površini nebeskog svoda od jedne kvadratne lučne sekunde, daje odgovarajuću svjetlinu neba. U ovoj skali, prirodna svjetlina noćnog neba je u najpovoljnijem slučaju (tamna, vedra noć za vrijeme Sunčeva minimuma) oko $21,9 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. Prelazak iz svjetline noćnog neba izražene fotometrijskim jedinicama na astronomsku mjeru dan je sljedećom formulom:

$$m_N = 12,60 - 1,0857 \ln(L_N) \quad (3)$$

gdje je m_N svjetlina noćnoga neba izražena u astronomskim jedinicama ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), a L_N svjetlina noćnog neba u cd/m^2 .

Predviđanja dobivena Walkerovim zakonom treba popraviti za utjecaj zakrivljenosti Zemlje [11, 23]. Utjecaj reljefa je i dalje zanemaren, kao i stvarni oblik naselja. Ovaj se popravak vrši prema sljedećoj formuli:

$$f = \exp\left(-\frac{h}{h_a}\right) \quad (4)$$

gdje je h depresija obzora na udaljenosti motritelja od naselja, a h_a je tzv. visinska skala koncentracije aerosola koja se definira kao visina na kojoj koncentracija aerosola pada na $1/e$ koncentracije uz tlo. Popravak se provodi tako da se iznos doprinosa svjetlosnom onečišćenju proračunan po Walkerovu zakonu (1) pomnoži s faktorom određenim uz pomoć jednadžbe (4).

Za potrebe modela, polumjeri naselja su diskretizirani (tablica 1.). Vrlo velika naselja nepravilnog oblika obrađena su pojedinačno. Njihov je srednji polumjer određen na osnovi satelitskih slika ili je njihov oblik aproksimiran s nekoliko krugova odgovarajuće veličine i populacije.

Tablica 1. Diskretizacija polumjera naselja prema broju stanovnika

Populacija (x1000)	Polumjer (km)
<5	1
5-20	2
20-80	3
80-200	4
>200	5, ili pojedinačno procijenjen

Tablica 2. Izvori statističkih podataka o populaciji naselja. Napomene: 1 - nema novijih podataka. 2 - samo dio Italije na jadranskoj strani Apenina. 3 - samo dijelovi zemlje koji su granici s RH bliži približno 200 km

Zemlja	Godina popisa stanovništva	Primijenjeni element za model	Broj elemenata	Napomene
Hrvatska	2001.	općina ili grad	547	
Austrija (dio)	2001.	statistička subregija	99	
Bosna i Hercegovina	1991.	okrug	100	1
Italija (dio)	2001.	općina ili grad	1563	2
Mađarska (dio)	2001.	statistička regija	40	3
Slovenija	2002.	okrug	58	
Crna Gora	2003.	statistička regija	21	
Srbija	2002.	okrug	91	
Rumunjska	2002.	statistička regija	9	3
Ukupno			2528	

Podaci o populacijama naselja preuzeti su iz popisa stanovništva, a zemljopisne koordinate sa zemljopisnih karata.

Za Hrvatsku su primijenjeni statistički podaci za svako pa i najmanje naselje, a isto je učinjeno za dio Italije koji se nalazi na jadranskoj strani Apenina. Ostatak Italije je zanemaren jer je predaleko da bi pridonio svjetlosnom onečišćenju na području Republike Hrvatske.

Dijelovi susjednih zemalja, koji su hrvatskoj granici bliži od 200 km, obrađeni su na jednostavniji način od RH. Za Sloveniju i Srbiju uzeti su statistički podaci za okruge, a za ostale zemlje podaci za veća područja, tzv. statističke regije. U svim je takvim slučajevima cjelokupna populacija područja pridružena najvećem naselju u njemu. Ovo pojednostavljenje ne mijenja znatno rezultate jer doprinos pojedinih područja svjetlini noćnoga neba u zenitu ovisi samo o udaljenosti motritelja od toga područja.

Pri izvođenju modela obrađivano se područje pokriva mrežom točaka čiji razmak odgovara rezoluciji modela. Radi jednostavnosti formira se mreža u kojoj su koordinate točaka određene njihovim zemljopisnim koordinatama, pazeći pritom da razmak susjednih točaka mreže bude jednak zadanoj rezoluciji. U ovoj se obradi koristilo rezolucijom od 2 km. Upotreba zemljopisnih koordinata omogućava laganu usporedbu i preklapanje sa zemljopisnim kartama.

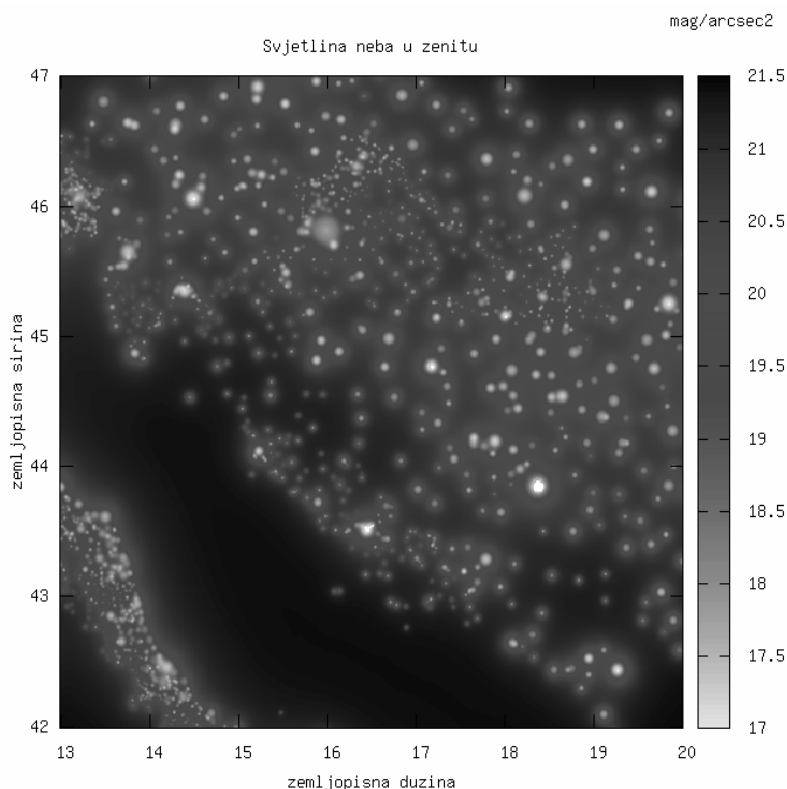
Račun se odvija postupno, točku po točku mreže. Za svaku točku redom se računa doprinos svih naselja u bazi, pri čemu je rezultirajuće povećanje svjetline neba suma svih doprinosa. Doprinosi se računaju u linearnim fotometrijskim jedinicama (cd/m^2), a pretvorba u astronomsku skalu, ako je potrebna, provodi se nakon što su svi doprinosi zbrojeni. Ukupnom zbroju treba još dodati

prirodnu svjetlinu noćnoga neba. Razlog je u tome što je astronomska skala svjetline logaritamska, pa se pojedini doprinosi u njoj ne mogu jednostavno zbrajati. U računu udaljenosti rabi se model sferne Zemlje jer ispravci na eliptičnost u takvim računima nisu značajni. Također se uzima da su sva naselja na razini mora i zanemaruje se utjecaj reljefa, kao što je to već prije spomenuto. Ako neka točka mreže pada unutar jednoga od naselja iz baze, doprinos toga naselja računa se za njegov rub i onda povećava do središta naselja do faktora 2. To je nešto manje od faktora 2,5 kojim su se koristili Albers i Duriscoe [23], ali bolje odgovara mjerenjima svjetline neba koja su u nekoliko slučajeva napravljena SQM uređajem [19]. U proračunu je nadalje uzeto da je visinska skala aerosola 4 km [23].

Model pretpostavlja je da je konstanta proporcionalnosti c_o za sva naselja ista. Njezin se iznos mijenjao sve dok nije dobiveno najbolje slaganje s terenskim mjerenjima svjetline noćnoga neba. Konačna je vrijednost konstante proporcionalnosti, dobivena ovim postupkom, 36 cd/m^2 po stanovniku. Sasvim je jasno da konstanta proporcionalnosti nije ista za sva naselja, a posebno za naselja u različitim zemljopisnim okruženjima i državama, no variranje njezine vrijednosti, za svako naselje posebno, bilo je izvan mogućnosti obrade za ovaj model. I svi drugi autori koji su se koristili Walkerovim zakonom u svojim su modelima postupali na isti način.

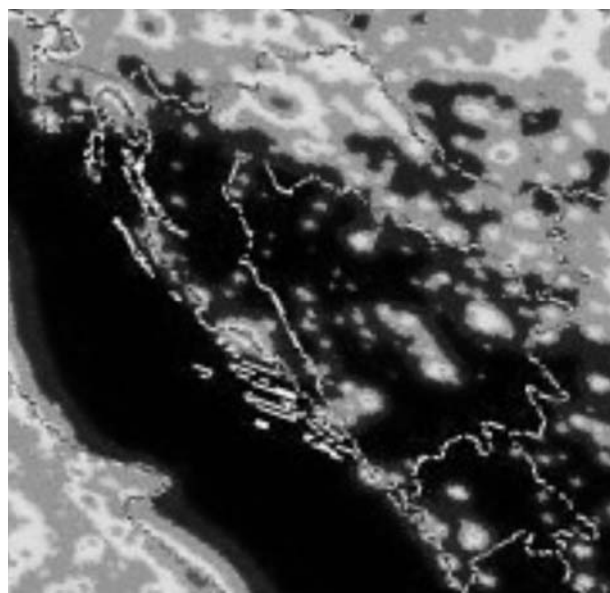
4 Rezultati modela

Predviđanja modela grafički su prikazana na slici 1. Kao što se može vidjeti, cijelo područje RH barem je malo svjetlosno onečišćeno, s izuzetkom nekoliko izoliranih područja u unutrašnjosti te najizoliranijih jadranskih otoka. Ovi se rezultati dobro slažu s predviđanjima Cinzana i



Slika 1. Svjetlina noćnoga neba iznad RH određena je opisanim modelom. Za prirodnu svjetlinu noćnog neba uzeta je vrijednost od 21,9 mag/arcsec². Karta je kodirana u tonovima sivoga: crno odgovara prirodnom nebu, a bijelo svijetlom nebu u središtu velikih gradova

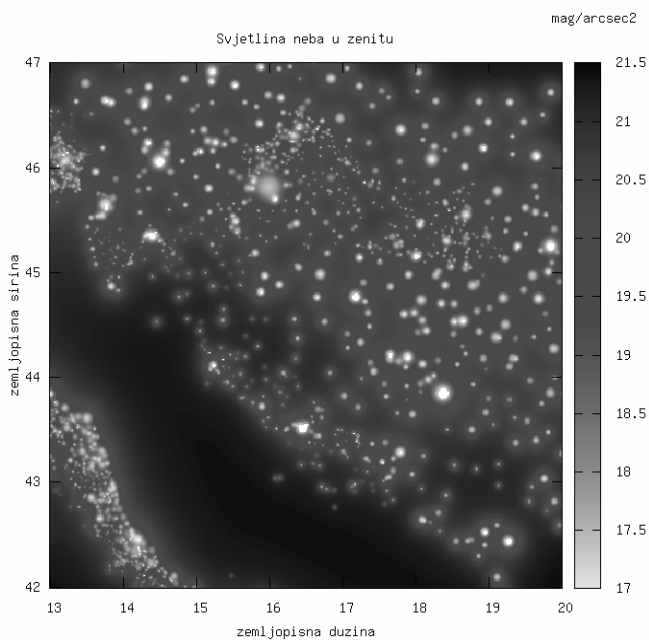
drugih [16] (slika 2.) koja su dobivena na osnovi satelitskih slika, s time da je rezolucija njihovih karata znatno lošija od rezolucije ovdje primijenjenogaa modela.



Slika 2. Karta svjetline noćnoga neba dobivena na osnovi analize satelitskih slika. Karta je napravljena za godinu 1998. [16]. Izvorna je karta kodirana u skali lažnih boja

Detaljnija usporedba rezultata upotrijebljenoga modela i karte koju su izradili Cinzano i drugi pokazuje da potonji model potcjenjuje povećanje svjetline noćnoga neba u ruralnim područjima. Razlog je vjerojatno u pretpostavljenom omjeru količine svjetla koje se emitira prema gore i svjetla koje se širi pod malim kutovima prema horizontali. Cinzano i drugi koristili su se podacima razvijenih zemalja EU u kojima se rabe moderne svjetiljke koje za danu svjetlosnu snagu, proizvode znatno manje svjetlosnoga onečišćenja od svjetiljki koje se rabe u RH. To donekle objašnjava podudarnost konstante proporcionalnosti određene ovdje primijenjenim modelom (36 cd/m²) i one koju je odredio Walker (40 cd/m²) u SAD-u 70-ih godina. Nadalje, rabljene skale svjetline neba nisu međusobno potpuno podudarne jer ona kojom su se koristili Cinzano i drugi ima veći korak pa se malo povećanje svjetline iznad prirodne razine u ovdje uporabljenim modelu lakše uočava.

Rezultati ove usporedbe, zajedno s izmjenjenim vrijednostima svjetline noćnog neba, sažeti su u tablici 3. Mjerenja su napravljena SQM uređajem, za svaku lokaciju u nekoliko različitih noći, a u tablicu je unesen najbolji rezultat (najtamnije nebo).



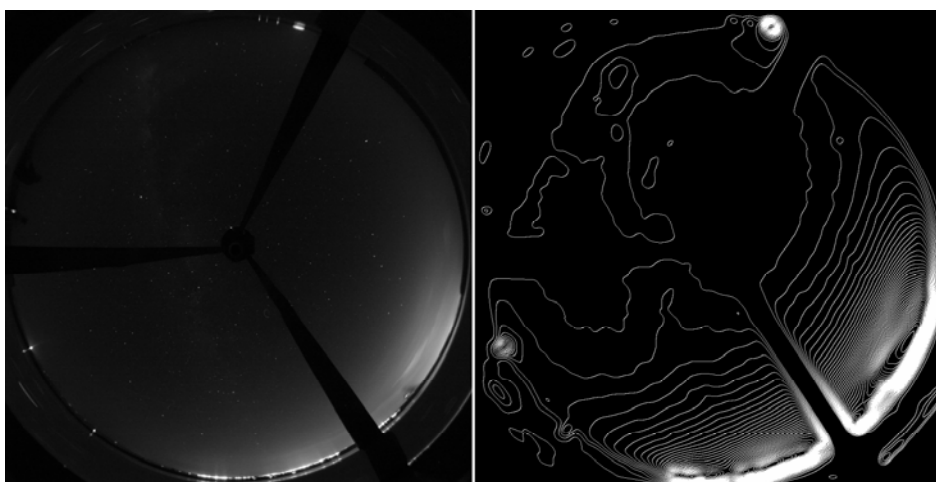
Slika 3. Predviđanje svjetline noćnoga neba iznad Republike Hrvatske za godinu 2020., uz pretpostavku 50-postotnoga povećanja snage umjetne rasvjete u deset godina

Tablica 3. Usporedba predviđanja modela i terenskih mjerenja za nekoliko lokacija u RH. Komentari: 1 - SQM se za vrijeme mjerenja morao zaštititi od izravnoga svjetla uličnih svjetiljki pa je izmjerena vrijednost netočna. 2 - obzor je povišen pa je dobiveni rezultat bolji nego što bi bio da je obzor nezaklonjen. Predviđanja Cinzanova modela samo su približna zbog male rezolucije objavljenе karte.

	Mjerenje (SQM uređaj)	Naš model	Lokacija	Komentar
Japetić - vrh	20,8	20,4	20,5	
Japetić - kamenolom	21,1	20,4	20,5	2
Kanfana	20,8	19,5	20,5	1
Korenica	21,3	20,9	21,5	
Lastovo	21,8	21,7	21,5	
Merenje	20,3	19,8	19,5	
Novigrad Podravski	20,9	20,4	19,5	
Petrova Gora - spomenik	21,6	21,4	21,5	
Premantura	19,8	19,9	21,0	
Pula - stara zvjezdarnica	18,8	18,0	19,5	1
rt Kamenjak	21,0	20,9	21,0	
Savičenta	21,0	20,9	21,0	
Tičan	21,1	20,9	20,5	
Vela Luka - rub	21,3	20,9	21,5	
Višnjani	20,7	19,5	20,5	1
Vodnjan	19,3	19,1	20,5	1

Model omogućava i predviđanje stanja u budućnosti. Neke statistike pokazuju da je godišnji porast količine svjetla koju proizvodi umjetna rasvjeta u EU, oko 6% na godinu [13].

Uz takvo povećanje model u idućih deset godina predviđa znatno povećanje svjetlosnoga onečišćenja na cijelom području RH, a postojeća područja koja još imaju prirodno tamno nebo uvelike će se smanjiti ili potpuno nestati (slika 3.).



Slika 4. All-sky fotografija cijeloga nebeskog svoda (lijevo) i izofote svjetlosnog onečišćenja dobivene iz nje (desno); svaka izofota odgovara povećanju svjetline od 20 % prema svjetlini u zenitu

5 Primjer analize jedne lokacije

Kao što je već prije spomenuto, pojedine se lokacije mogu karakterizirati na nekoliko načina. Najjednostavnije je mjerenje svjetline noćnoga neba u zenitu uz pomoć SQM instrumenta, što je trenutačno sustavno učinjeno za dvadesetak lokacija na području RH, a rezultati su izloženi u tablici 3. Mjerenje je vrlo jednostavno i kratkotrajno, no radi mogućih promjena svjetline noćnoga neba zbog različitih meteoroloških uvjeta mjerenja je potrebno ponavljati više puta, i to po mogućnosti u svim godišnjim dobima, pa je prikupljanje kvalitetnih podataka ovom metodom dugotrajan postupak. Tako se danas raspolaže kvalitetnim podacima samo za lokacije amaterskih zvjezdarnica ili motriteljskih mjesta amaterskih astronomskih društava, koja su autori u proteklih sedam, osam godina redovito posjećivali.

Analiza raspodjele svjetline preko cijeloga nebeskog svoda nešto je složenija. Ona ovisi o rasporedu većih naselja oko same lokacije i njihove udaljenosti od nje. Promjene atmosferskih uvjeta (uz pretpostavku jednostrukoga raspršivanja svjetla) proporcionalno mijenja svjetlinu cijeloga nebeskog svoda, pri čemu relativna raspodjela osvijetljenosti ostaje praktički nepromijenjena. To znači da se ova analiza može napraviti u jednoj noći, naravno uz uvjet da je noć potpuno vedra i bez mjesečine te da su atmosferski uvjeti blizu standardnima, a to se može procijeniti iz atmosferske vidljivosti u večeri koja prethodi toj noći, a mogu se iskoristiti i podaci o vidljivosti iz prognoza DHMZ-a.

Ako su ti preduvjeti zadovoljeni, uz upotrebu all-sky kamere ili ribljega oka, načini se nekoliko snimaka cijeloga nebeskog svoda digitalnom kamerom, vremenski podjednako raspoređenih preko cijele noći. Ne raspolaže li se ovim specijalnim objektivima, moguće je napraviti i mozaik snimaka običnim, po mogućnosti široko-

kutnim, objektivom. Mozaik treba pokrivati cijeli nebeski svod s preklapima dovoljnim za spajanje pojedinih slika u mozaičnu sliku cijeloga nebeskog svoda. U oba se slučaja potrebno koristiti sirovim formatom zapisa slika (tzv. *raw format*) i raditi sve standardne ispravke slike koje se i inače rade kod znanstvene upotrebe digitalnih ili CCD kamera (oduzimanje tamne slike i ispravljanje zasjenjenja). Iz tako obrađene slike mogu se onda dobiti izofote ili svjetlina neba kodirana u lažnim bojama koja služi za dokumentiranje stanja pojedinih lokacija.

Primjer jedne takve analize dan je na slici 4. Kod slika cijelog nebeskog svoda zenit je u središtu slike, a udaljenost od središta slike prema rubu proporcionalna je zenitnoj daljini. Rub slike prikazuje obzor. Slika je snimljena na rtu Kamenjak kod Pule. Svjetlosno onečišćenje grada Pule očigledno je uz desni i donji rub slike, a suprotna strana neba je prirodno čista jer je na strani otvorenog mora. Na toj se strani vidi i Kumova slama koja prolazi preko cijele slike. Tamni krug u središtu slike je kamera koju na njezinom mjestu iznad zrcala *all-sky* kamere drže tri noge koje se također vide na slici. Snimke učinjene *fish-eye* lećom imaju tu prednost da je kamera iza leće i cijeli svod je vidljiv, no radi se samo o estetskom nedostatku slike kod *all-sky* kamere jer je dio neba zaklonjen tronošcem i kamerom malen.

6 Zakonska regulativa u RH

Problematika svjetlosnoga onečišćenja je nova i hrvatska je zakonska regulativa na tom području jako ograničena. Trenutačno se samo zasljepljivanje umjetnom rasvjetom spominje u čl. 15. Zakona o sigurnosti prometa na cestama [26] čiji prvi stavak citiramo:

"(1) Na cesti se ne smiju postavljati ploče, znakovi, svjetla, stupovi ili drugi slični predmeti kojima se zaklanja ili smanjuje vidljivost postavljenih prometnih znakova, ili koji svojim oblikom, bojom, izgledom ili mjestom postavljanja oponašaju neki prometni znak, ili slične na neki prometni znak, ili zasljepljuju sudionike u prometu, ili odvrćaju njihovu pozornost u mjeri koja može biti opasna za sigurnost prometa."

U stavkama 2., 3. i 4. istoga članka propisuju se kazne za nepridržavanje odredaba iz stavka 1. Nažalost, u praksi se ovaj članak gotovo i ne provodi.

Svjetlosno onečišćenje navedeno je i u Zakonu o zaštiti okoliša [3] čiji članak 31. glasi:

- "(1) Svjetlosno onečišćenje je promjena razine prirodne svjetlosti u noćnim uvjetima uzrokovana unošenjem svjetlosti proizvedene ljudskim djelovanjem.
- (2) Zaštita od svjetlosnog onečišćenja obuhvaća mjere zaštite od nepotrebnih, nekorisnih ili štetnih emisija

svjetlosti u prostor u zoni i izvan zone koju je potrebno osvijetliti te mjere zaštite noćnog neba od prekomjernog osvijetljenja.

- (3) Zaštita od svjetlosnog onečišćenja određuje se na temelju zdravstvenih, bioloških, ekonomskih, kulturoloških, pravnih, sigurnosnih, astronomskih i drugih standarda."

Iako je na ovaj način definiran problem svjetlosnoga onečišćenja, ne postoje nikakve upute o provođenju niti su propisane sankcije za kršenje odredaba ovoga članka pa je on praktički neprovediv. Trenutačno je u toku pisanje prijedloga zakona o svjetlosnom onečišćenju, koji bi trebao ukloniti spomenute nedostatke, no on još nije ušao u zakonodavnu proceduru.

7 Zaključci

Opisana je primjena statističkoga modela svjetlosnoga onečišćenja temeljenoga na Walkerovu zakonu, uz dodatni ispravak za zakrivljenost Zemljine površine, i na statističkim podacima o populaciji pojedinih naselja. Model predviđa povećanje svjetline noćnog neba izazvano umjetnom rasvjetom. Dobiveni rezultati dobro se slažu s terenskim mjerenjima, što je omogućilo da se odredi srednja konstanta proporcionalnosti c_0 . Dobivena se vrijednost od 36 cd/m^2 po stanovniku nažalost prilično velika, što pokazuje mogućnost poboljšanja javne rasvjete i smanjenja rasipanja električne energije. Model se može upotrijebiti za procjenu utjecaja novih naselja ili povećanja postojećih naselja na svjetlosno onečišćenje njihove okoline, a koji će vjerojatno u skoroj budućnosti postati obvezatni dio studija utjecaja na okoliš.

Posebna pozornost mora se posvetiti velikim izvorima umjetnoga svjetla, koja nisu obuhvaćena popisom stanovništva, kao što su veliki industrijski pogoni, skladišta, trgovački centri, sportske građevine i slično. To je zapravo jednostavno jer se oni za potrebe modeliranja mogu zamijeniti "naseljem" s brojem stanovnika koji odgovara ukupnoj svjetlosnoj emisiji građevine podijeljenoj s konstantom proporcionalnosti i polumjerom koji odgovara polumjeru kruga opisanoga oko razmatrane građevine.

Rezultati modeliranja pokazuju da je Republika Hrvatska kao cjelina ozbiljno svjetlosno onečišćena. Područja koja još posjeduju prirodnu svjetlinu noćnog neba su malena i izolirana, uglavnom smještena na otvorenom Jadranskom moru, uključujući i nekoliko područja u Lici i Gorskom kotaru. Ova mjesta još uvijek imaju noćno nebo tamnije od 21 mag/arcsec^2 . Nadalje, ekstrapolacija podataka u budućnost pokazuje da će se već za desetak godina stanje znatno pogoršati.

Zahvale

Autori se zahvaljuju Zvezdarnici Višnjan i Znanstveno-edukacijskom centru Višnjan na potpori pri izvođenju ovog projekta. Dio opreme osigurao je Rudarsko-geološko-naftni fakultet sa znanstvenih projekata 0195052: "XUV zračenje tranzijentnih plazmi" i 195-000000-2233: "Erozija i klizišta kao geohardni događaj".

LITERATURA

- [1] IDA: <http://www.darksky.org/mc/page.do?sitePageId=61045&orgId=idsapristupljeno> 18.11.2010.
- [2] Narisada, K., Schreuder, D.: *Light Pollution Handbook*, Springer 2004.
- [3] *Zakon o zaštiti okoliša*, NN 110/2007, čl. 31.
- [4] Peltier, L. C.: *Starlight Nigts*, Harper&Row, New York 1965, reprinted Sky Publishing Corporation, Cambridge, Mass. 1999, p. 224
- [5] Walker, M., F.: *The California site survey*, Publications of the astronomical society of Pacific, 82 (1970), 672-698.
- [6] Berry, R., L., *Light pollution in southern Ontario*, J. Royal Astron. Soc. Canada 70 (1970), 97-115.
- [7] Treanor, P., J.: *A simple propagation law for artificial night-sky illumination*, The Observatory, 93 (1973), 117-120.
- [8] Walker, M., F.: *Light pollution in California and Arizona*, Publications of the astronomical society of Pacific, 85 (1973), 508-519.
- [9] Walker, M., F.: *The effects of urban lighting on the brightness of the night sky*, Publications of the astronomical society of Pacific, 89 (1977), 405-409.
- [10] Garstang, R.H.: *Model for artificial night-sky illumination*, Publications of the astronomical society of Pacific 98 (1986), 364-375.
- [11] Aube, M., Franchomme-Fosse, L., Robert-Staehler, P., Houle, V.: *Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: toward a night time aerosol optical depth retrieval method*, Proc SPIE, Vol 5890, 2005.
- [12] Yocke, M., A., Hogo, H., Henderson, D.: *A mathematical model for predicting night-sky glow*, Publications of the astronomical society of Pacific, 98 (1986), 889-893.
- [13] Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., Baugh, K.E.: *Mapping the artificial sky brightness in Europe from DMSP satellite measurements: the situation of the night sky in Italy in the last quarter of century*, Poster presented at the XLIII Meeting of the Italian Astronomical Society, astro-ph/9905340 .
- [14] Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., Baugh, K.E.: *The artificial sky brightness in Europe derived from DMSP satellite data*, in Preserving the Astronomical Sky, IAU Symposium 196, Cohen R.J. & Sullivan W.T. (eds.), ASP Conf. Series, 95-102 (2001). Proceedings of the Symposium held in the United Nations Vienna International Conference Centre in conjunction with UNISPACE II (12-16 July 1999).
- [15] Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., Baugh, K.E.: *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite operational linescan system measurements*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 318 (2000), 641-657.
- [16] Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D.: *The first world atlas of artificial night sky brightness*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 328 (2001), 689-701.
- [17] Cinzano, P., Elvidge, C.D.: *Night sky brightness at sites from DMSP-OLS satellite measurements*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 353 (2004), 1107-1116.
- [18] National Geophysical Data Center (USA), stranice DMSP satelita: <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>, pristupljeno 18.11.2010.
- [19] Stranica proizvođača Sky Quality Metera: <http://unihedron.com/projects/darksky/> pristupljeno 5.11.2010.
- [20] Andreić, Ž. and Radić, N.: *All-sky camera with a concave mirror*, Appl. Opt. 35, 149-153 (1996).
- [21] Schur, C. *Experiments with all-sky photography*, Sky and Telescope 63 (1982), 621-624.
- [22] Skansi, R.: *Svjetlozagađenje - ekonomski i ekološki problem*, Energija 54 (2005), 429-440.
- [23] Albers, S., Duriscoe, D.: *Modeling light pollution from population data and implications for national park service lands*, The George Wright forum, Vol 18 (2001), 56-68.
- [24] Walker, A. and Schwarz, H. E., *Night Sky Brightness at Cerro Pachon*, Cerro Tololo Inter-American Observatory, http://www.ctio.noao.edu/site/pachon_sky/ pristupljeno 7.11.2010.
- [25] Patat, F., *UBVRI night sky brightness during sunspot maximum at ESO-Paranal*, Astronomy and Astrophysics Vol 400 (2003), p.1183-1198.
- [26] Garstang, R.H.: *Night-sky brightness at observatories and sites*, Publications of the astronomical society of Pacific 101 (1989), p. 306-329.
- [27] *Zakon o sigurnosti prometa na cestama*, NN 67/2008, čl. 15