

**DIGITALNA KARTA SREDNJE GODIŠNJE SUME GLOBALNOG SUNČEVA  
ZRAČENJA I MODEL PRORAČUNA GLOBALNOG SUNČEVA ZRAČENJA NA  
NAGNUTE, RAZLIČITO ORIJENTIRANE PLOHE**

**Digital Map of the Mean Annual Global Solar Radiation Sum and Calculation Model  
for Global Solar Radiation on Inclined, Variously Oriented Surfaces**

MELITA PERČEC TADIĆ

Državni hidrometeorološki zavod  
Grič 3, 10 000 Zagreb, Hrvatska  
melita.percec@cirrus.dhz.hr

*Primljeno 19. studenog 2004., u konačnom obliku 5. svibnja 2005.*

**Sažetak:** U radu je predstavljena digitalna karta srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu za razdoblje 1961–1980. Linearni regresijski model primijenjen je pri uspostavljanju veze između spomenute varijable i srednje godišnje temperature zraka na meteorološkoj postaji te nadmorske visine postaje. Koeficijent determinacije bio je zadovoljavajućih 0.87. Preostala prostorna varijanca zračenja smatra se u skladu s geostatističkim metodama prostorne analize podataka – lokalnim odstupanjem od prostornog srednjaka koji je definiran regresijskom jednadžbom. Daljnji postupak sastoji se od interpolacije tih odstupanja na cijelo područje analize te korekcije preliminarne analize dobivene regresijskom jednadžbom. U skladu s rasponom vrijednosti od 1.1 do 1.6 MWhm<sup>-2</sup>, na području Hrvatske definirano je pet zona srednjih godišnjih suma globalnog Sunčeva zračenja. U kontinentalnom su dijelu Hrvatske srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja koje padne na horizontalnu plohu manje na zapadu, prvenstveno zbog veće naoblake u dolini Drave, te na području istočno od obronaka Medvednice i Kalnika. Niske su vrijednosti također u Zagorju i na Samoborskom gorju, te na vrhovima planina Gorskog kotara i Like. U Istri, Hrvatskom primorju i Dalmaciji srednje godišnje sume povećavaju se duž obale, od sjeverozapada prema jugoistoku. Na digitalnoj karti u kontinentalnoj Hrvatskoj možemo zamijetiti dvije, a uz obalu tri zone srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja. U sklopu Geografskog Informacijskog Sustava (GIS), ovdje prezentirana karta može se koristiti za direktan proračun parametara koji ovise o srednjoj godišnjoj sumi globalnog Sunčeva zračenja. U drugom su dijelu rada primjenom fizikalnog modela zračenja proračunate srednje mjesečne sume globalnog Sunčeva zračenja na nagnute plohe orijentirane na S, SE, SW, E, W, NE, NW i N.

**Ključne riječi:** digitalna karta, globalno Sunčevo zračenje, regresijska analiza, kriging, GIS, nagnuta ploha, orijentacija plohe

**Abstract:** This paper presents a digital map of the mean annual global solar radiation on a horizontal plane, for the period 1961–1980. A linear regression model has been used to describe the relationship between this variable, the mean annual temperature and the weather station altitude. The coefficient of determination was 0.87. The remaining spatial variation of the radiation was treated, according to geostatistical methods as a local difference from the spatial average resulting from the regression analysis. Further steps included the interpolation of those differences into the entire area of the analysis and correction of the preliminary field. According to the interval of values (from 1.1 to 1.6 MWhm<sup>-2</sup>) five classes of the mean annual sum of global solar radiation have been defined on the territory of Croatia. The western continental part of Croatia receives less global solar radiation on a horizontal surface than the eastern continental part, primarily because of more cloudiness in the valley of the Drava River and east of the Medvednica and Kalnik mountains. Low values are also found in the regions of the Zagorje and Samobor hills and on the tops of mountains in the regions of Gorski Kotar and Lika. In the regions of Istra, Hrvatsko primorje and Dalmacija, radiation gets stronger along the coast, from

northwest to southeast. Two classes of the mean annual sum of global solar radiation can be seen in the continental part of Croatia and three in the maritime part. The digital map presented can be used as part of the Geographical Information System (GIS) for direct calculation of the various parameters related to the annual sum of global solar radiation. In the second part of the article, the physical model of radiation has been used to calculate the average monthly sums of global solar radiation on inclined surfaces oriented to S, SE, SW, E, W, NE, NW and N.

**Key words:** digital map, global solar radiation, regression analysis, kriging, GIS, inclined surface, orientation of the surface

## 1. UVOD

Mjerenja globalnog Sunčeva zračenja u Hrvatskoj započela su 1949. godine na opservatoriju Zagreb-Grič, u nadležnosti Državnog hidrometeorološkog zavoda. Mjerenja su bila neređovita pa se početkom stalnih mjerenja kod nas može smatrati godina 1964. Podacima globalnog Sunčeva zračenja općenito je pridavana mala pažnja. Tako je 1983. godine mjerenja obavljalo osam postaja, dok su od 1989. godine mjerenja globalnog Sunčeva zračenja potpuno obustavljena. Mreža postaja u nadležnosti Državnog hidrometeorološkog zavoda počinje se ponovno formirati 2003. godine. Međutim i tako malobrojna i rijetka mjerenja mogu se korištenjem regresijske, te novije metode geostatističke analize podataka, iskoristiti za proračun dozračene Sunčeve energije na području cijele Hrvatske, za izradu digitalne karte srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja kao i za proračun dozračene energije na nagnute plohe. U posljednjem slučaju važno je poznavanje fizikalnih modela za proračun energije zračenja na nagnutu pihu, kao i njihovih ograničenja.

Proračun globalnog Sunčeva zračenja za područje Hrvatske, za lokacije gdje nije bilo mjerenja, temelji se na uvažavanju veze između globalnog Sunčeva zračenja i trajanja sisanja Sunca, tj. insolacije. Te su veze uspostavljene na temelju mjerenja globalnog Sunčeva zračenja u desetogodišnjem razdoblju 1970–1979. na šest postaja u Hrvatskoj kao i na pet postaja s drugih područja bivše SFR Jugoslavije (Žibrat i Gajić-Čapka, 1986) te proračuna relativne insolacije. Relativna insolacija definirana je kao omjer izmjerenog srednjeg mjesečnog trajanja sisanja Sunca ( $s_{mm}$ ) i mogućeg srednjeg mjesečnog trajanja sisanja Sunca ( $S_{mm}$ ). Na temelju veze uspostavljene između globalnog Sunčeva zračenja ( $H_{s,g,mm}$ ) i relativne insolacije ( $s_{mm}/S_{mm}$ ) na tih 11 postaja izračunati su koeficijenti  $a$  i  $b$  u jednadžbi 1.

$$H_{s,g,mm} = H_{s,g,mm}(\text{extraterrestrial}) \cdot \left( a + b \cdot \frac{s_{mm}}{S_{mm}} \right) \quad (1)$$

Ti koeficijenti interpolirani su za područje čitave Hrvatske, a zatim je proračunato srednje mjesečno globalno Sunčevo zračenje na preostalim 125 postaja na području Hrvatske koje su raspolagale podacima o insolaciji. Proračun potencijalno mogućeg srednjeg mjesečnog globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu, tj. ekstraterestičkog ( $H_{s,g,mm}(\text{extraterrestrial})$ ), detaljno je opisan u 3. poglavlju (jedn. 11).

Vrijednosti insolacije za 131 postaju u Hrvatskoj dobivene su na temelju modificirane prostorne razdiobe insolacije (Poje i dr., 1984). Niti taj parametar ne mjeri se na svim tim postajama, već je dobiven na temelju regresijske veze između insolacije i naoblake ( $N_{mm}$ ) uspostavljene na podacima s 37 postaja. Nakon interpolacije dobivenih koeficijenata  $c$  i  $d$  u jednadžbi 2 određena je vrijednost relativne insolacije za preostale 94 postaje u analizi.

$$s_{mm} = c + d \cdot N_{mm} \quad (2)$$

Relativna insolacija proračunata je za 20-godišnje razdoblje 1961–1980. Usporedbom veze relativne insolacije i globalnog Sunčeva zračenja na postajama Zagreb-Maksimir (kontinentalni dio) i Split-Marjan (primorski dio) za razdoblja 1970–1979. i 1961–1980. pokazano je da se odnos ta dva elementa nije bitno promijenio s obzirom na ta razdoblja, te je zaključeno da se isto može pretpostaviti i za ostale postaje. To je omogućilo da se podaci globalnog Sunčeva zračenja dobiveni iz kraćeg 10-godišnjeg razdoblja reduciraju na 20-godišnje i takvi su korišteni i u okviru ovog rada.

Tako gusta mreža postaja s proračunatim globalnim Sunčevim zračenjem omogućila je izradu karata srednjeg mjesečnog i godišnjeg globalnog Sunčeva zračenja za razdoblje 1961–1980. za područje Hrvatske (RHMZ SRH, 1986; Žibrat i Gajić-Čapka, 1986).

Mjerenja globalnog Sunčeva zračenja na nagnute plohe različitih orijentacija za područje Hrvatske ne postoje. Stoga se srednje mjesečno globalno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu ( $H_{s,g,ic,mm}$ ) računa pomoću fizikalnih modela na temelju izmjenjenog ili proračunatog zračenja na horizontalnu plohu ( $H_{s,g,mm}$ ) iz podataka 29 postaja na teritoriju Hrvatske. Dosadašnji publicirani rezultati za područje Hrvatske uglavnom se odnose na plohe južne orijentacije. Tako se u radu Penzara (1978) mogu vidjeti krivulje dnevnih hodova globalnog Sunčeva zračenja, po mjesecima, na različito nagnute plohe, ali samo južno orijentirane. Proračunati su hodovi za Zagreb, za slučaj vedrog vremena i prosječno mutne i vlažne atmosfere. Slično je, u obliku izopleta, prikazano i globalno Sunčevo zračenje koje primaju okomita i ploha nagnuta pod kutem od  $45^\circ$ , obje okrenute na jug, ovisno o dobu dana i godine (Penzar, 1977). U publikaciji KUEN<sub>ZGRADA</sub> (1998), u čijoj izradi je sudjelovao Državni hidrometeorološki zavod, dani su podaci o iznosima pojedinih komponenti globalnog Sunčeva zračenja na 15 postaja, također za plohe južne orijentacije i nekoliko različitih nagiba. Najveća pažnja problemu je posvećena u studiji IRB-a (Institut R. Bošković, 1986) gdje je osim proračuna zračenja na južno orijentirane nagnute plohe, dana metoda za proračun zračenja i na nagnute plohe drugih orijentacija. Metoda je detaljno opisana u radu Desnice i dr. (1986).

## 2. DIGITALNA KARTA SREDNJE GODIŠNJE SUME GLOBALNOG SUNČEVA ZRAČENJA

U okviru ovog rada izrađena je nova, digitalna karta, srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu za razdoblje 1961–1980. (Prilog 1) uz uvažavanje digitalnog modela terena (DMT) i karte srednje godišnje temperature zraka. Karta je izrađena s rezolucijom 700 m u skladu s rezolucijom digitalnog modela terena (GISDATA, 1997) i karte srednje godišnje temperature zraka (Zaninović i dr., 2005). Osnovna svrha takva pri-

kaza jest procjena količine zračenja i na prostora na kojima ono nije mjereno. Daljnje primjene vezane su uz procjene isplativosti upotrebe Sunčeve energije kao alternativnog oblika energije. U sklopu GIS-a karta u digitalnom obliku može se koristiti za direktan proračun meteoroloških parametara koji ovise o srednjoj godišnjoj sumi globalnog Sunčeva zračenja ili iz nje izvedenih veličina, kao što su, npr. prosječna temperatura tla, vlažnost tla, vlažnost zraka i sl. (Fu and Rich, 2002). To je osobito korisno ako se radi o nekom meteorološkom elementu koji se mjeri na rijetkoj mreži postaja, a taj je element istovremeno signifikantno koreliran (zavisan) s globalnim Sunčevim zračenjem, tj. moguće je uspostaviti regresijsku ili čak funkcionalnu vezu između njih. Tada karta globalnog Sunčeva zračenja služi kao preliminarno polje (background field) pri interpolaciji zavisnog meteorološkog elementa, čime se dobiva karta bolje rezolucije nego što bi bilo moguće interpolacijom samog tog elementa. Osim toga, većina meteoroloških elemenata ovisi o topografiji, a ona je direktno uključena u model za izradu digitalne karte srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja, pa tako i u interpolirana polja. U skladu s vrijednostima godišnjih suma globalnog Sunčeva zračenja na teritoriju Hrvatske definirano je pet zona zračenja (tab. 1) unutar raspona od 1.1 do 1.6 MWhm<sup>-2</sup> (3961–5400 MJm<sup>-2</sup>) na godinu s intervalom od 0.1 MWhm<sup>-2</sup> (360 MJm<sup>-2</sup>). Izuzetak je Komiža na otoku Visu, gdje se može očekivati i nešto veća dozračena energija od 1.6 MWhm<sup>-2</sup> godišnje, ali zbog lokalnog karaktera nije formirana još jedna zona, nego je Komiža pridružena zoni V. Na karti (Prilog 1) srednja godišnja suma globalnog Sunčeva zračenja prikazana je u MJm<sup>-2</sup> s intervalom od 360 MJm<sup>-2</sup>, a tablica 1 omogućuje laku usporedbu nove s već postojećom kartom srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja (RHMZ SRH, 1986; Žibrat i Gajić-Čapka, 1986).

Prilikom izrade digitalne karte, uz podatak o srednjoj godišnjoj sumi globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu, korišteni su i srednja godišnja temperatura zraka ( $\theta_{ym}$ ) te nadmorska visina postaje ( $H$ ). Uspostavljena je linearna veza između tih elementa i globalnog Sunčeva zračenja na temelju podataka sa 119 postaja:

Tablica 1. Zone srednjih godišnjih suma globalnog Sunčeva zračenja s pripadnim rasponima vrijednosti izraženima u  $MWhm^{-2}$  i u  $MJm^{-2}$  godišnje.

Table 1. Value ranges of Mean Annual Global Solar Radiation Sums expressed in units of  $MWhm^{-2}$  and  $MJm^{-2}$  per year.

ZONA	$H_{s,g,y}$ [ $MWhm^{-2}$ ]	$H_{s,g,y}$ [ $MJm^{-2}$ ]
I	1.1-1.2	3961-4320
II	1.2-1.3	4321-4680
III	1.3-1.4	4681-5040
IV	1.4-1.5	5041-5400
V	1.5-1.6	5401-5760

$$H_{s,g,y} [MWh/m^2] = 0.630815 + 0.056289^\circ C^{-1} \cdot \theta_{ym} + (0.0283/100m) \cdot H \quad (3)$$

uz koeficijent determinacije od 0.87. U sklopu GIS-a gornja se jednadžba primjenjuje na čitavo analizirano područje izravno na kartu srednje godišnje temperature zraka i DMT te se dobiva preliminarno polje srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja. 13% preostale varijance zračenja smatra se u skladu s geostatističkim metodama prostorne analize podataka (Cressie, 1993) lokalnim odstupanjem od prostornog srednjaka definiranog gornjom jednadžbom. Ta odstupanja definiraju se kao razlike na postajama izmjerenih i jednadžbom predviđenih vrijednosti, te se daljnji korak u određivanju prostorne raspodjele zračenja u Hrvatskoj sastoji od interpolacije tih odstupanja na cijelo područje analize. Za interpolaciju odstupanja odabrana je metoda kriginga, korištena i pri izradi digitalne karte srednje godišnje temperature zraka kao i srednje godišnje količine oborine (Gajić-Čapka i dr., 2003), gdje je metoda i detaljno opisana. Konačno se interpolirano polje odstupanja dodaje preliminarnom polju i rezultat je digitalna karta srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja za Hrvatsku. Za sve operacije s digitalnim kartama korišten je programski paket Ilwis (Ilwis 3.0 Academic, 2001).

### 3. GLOBALNO SUNČEVO ZRAČENJE NA NAGNUTE, RAZLIČITO ORIJENTIRANE PLOHE

Mjerenja globalnog (ukupnog) Sunčeva zračenja na nagnute plohe za područje Hrvatske ne postoje, a i u svijetu su rijetka. Stoga se srednje mjesečno globalno Sunčevo zračenje na nagnute plohe ( $H_{s,g,ic,mm}$ ) računa pomoću fizikalnog modela koji sadrži izmjereno ili proračunato zračenje na horizontalnu plohu ( $H_{s,g,mm}$ ). Proračun je proveden za 29 postaja na području Hrvatske (tab. 2). Dosadašnji rezultati bili su ograničeni na južno orijentirane nagnute plohe, dok je ovdje proračun izveden za plohe orijentirane na S, SE, SW, E, W, NE, NW i N. Dalje je opisani fizikalni model moguće koristiti na svakoj lokaciji na kojoj postoji mjerenje ili proračun globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnoj plohi.

Za pojedinu postaju srednja godišnja suma globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu računa se sumiranjem umnoška srednjih mjesečnih vrijednosti ( $H_{s,g,mm}$ ) s brojem dana u mjesecu ( $d_m$ ), tj. sumiranjem mjesečnih suma ( $H_{s,g,m}$ ) (jedn. 4).

$$H_{s,g,y} = \sum_{m=1}^{12} d_m \cdot H_{s,g,mm} = \sum_{m=1}^{12} H_{s,g,m} \quad (4)$$

Srednja godišnja suma globalnog Sunčeva zračenja ( $H_{s,g,y}$ ) na tim postajama jest  $4833 MJm^{-2}$ . U godišnjem hodu srednje mjesečne sume globalnog Sunčeva zračenja, minimum u prosincu iznosi  $112 MJm^{-2}$ , a maksimum u srpnju  $699 MJm^{-2}$  (tab. 2 i sl. 1).

Za proračun srednjeg mjesečnog globalnog (ukupnog) Sunčeva zračenja na nagnute plohe ( $H_{s,g,ic,mm}$ ) koristi se jednadžba 5.

$$H_{s,g,ic,mm} = R \cdot H_{s,g,mm} \quad (5)$$

Najpoznatija relacija za izračunavanje koeficijenta  $R$  jest Liu–Jordanova relacija (jedn. 6), gdje prvi član definira udio direktnog Sunčeva zračenja koje dolazi na nagnutu plohu, drugi član daje udio difuznog, a treći reflektiranog zračenja na nagnutu plohu. Direktno Sunčevo zračenje računa se kao razlika ukupnog i difuznog, dok je reflektirano proporcionalno glo-

Tablica 2. Srednje mjesečne sume globalnog Sunčeva zračenja ( $H_{s,g,m}$  [ $\text{MJm}^{-2}$ ]) i srednja godišnja suma ( $H_{s,g,y}$  [ $\text{MJm}^{-2}$ ]) izmjerene na horizontalnoj plohi.

Table 2. Mean Monthly Global Solar Radiation Sums ( $H_{s,g,m}$  [ $\text{MJm}^{-2}$ ]) and Mean Annual Sum ( $H_{s,g,y}$  [ $\text{MJm}^{-2}$ ]) measured on a horizontal plane.

postaja	h[m]	$\lambda$ [°]	$\lambda$ [min]	$\phi$ [°]	$\phi$ [min]	$H_{s,g,m}$ (MJ/m <sup>2</sup> )												$H_{s,g,y}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BJELOVAR	141	16	51	45	55	129	191	356	481	590	611	664	573	435	272	131	86	4519
BRESTOVAC-BELJE	91	18	44	45	42	127	187	343	463	588	603	643	569	416	269	131	90	4429
DUBROVNIK	52	18	5	42	39	189	257	417	528	680	758	783	692	517	365	205	165	5557
ĐURĐEVAC	121	17	4	46	3	129	192	352	485	612	626	660	578	431	271	138	94	4567
GOSPIĆ	564	15	23	44	33	123	176	345	453	609	640	687	629	421	271	137	96	4589
HVAR	20	16	26	43	10	192	270	439	562	700	782	807	691	511	382	210	162	5705
KARLOVAC	112	15	33	45	30	115	175	340	461	612	652	676	574	427	268	125	87	4512
KNIN	234	16	12	44	2	164	248	407	519	655	710	714	644	467	341	181	138	5190
KRIŽEVCI	155	16	33	46	2	116	181	334	472	570	584	599	498	369	256	126	69	4175
MALI LOŠINJ	53	14	29	44	32	156	251	411	570	693	744	760	657	484	329	178	126	5360
OGULIN	328	15	14	45	16	122	179	358	458	604	631	687	593	433	263	146	102	4576
OSIJEK	89	18	44	45	32	131	195	362	482	602	617	662	577	401	288	135	95	4544
PAZIN	291	13	56	45	14	134	235	387	518	639	678	712	590	446	299	150	116	4906
POŽEGA	152	17	41	45	20	142	204	357	489	613	621	664	581	437	286	147	103	4643
PULA	43	13	51	44	52	144	242	396	550	679	716	740	632	467	317	162	122	5165
RJEKA	120	14	27	45	20	144	225	360	491	626	661	705	584	432	302	154	122	4807
ROVINJ	20	13	38	45	7	143	244	403	550	682	715	740	627	471	319	162	123	5178
SENJ	26	14	54	45	0	144	230	375	508	638	679	721	604	453	308	153	118	4931
SINJ	308	16	40	43	43	157	242	393	512	633	688	698	628	447	317	176	134	5025
SISAK	98	16	22	45	30	116	173	345	460	619	652	667	574	421	260	125	86	4499
SKRAD	675	14	55	45	25	126	185	358	470	584	637	686	580	453	278	147	113	4617
SLAVONSKI BROT	88	18	0	45	10	128	192	346	474	609	633	653	571	427	278	134	90	4535
SPLIT MARJAN	122	16	26	43	31	191	267	424	532	677	750	777	665	501	369	207	161	5522
STUBIČKE TOPLICE	168	15	56	45	59	116	179	334	448	573	620	658	554	409	266	134	87	4378
ŠIBENIK	77	15	55	43	44	181	263	437	563	694	745	770	661	505	372	204	156	5552
VARAŽDIN	167	16	23	46	18	123	187	341	464	578	613	637	551	419	266	134	95	4410
ZADAR	5	15	13	44	8	169	249	413	535	682	741	763	655	485	348	190	133	5362
ZAGREB-GRIČ	157	15	59	45	49	108	164	329	456	593	629	671	561	421	259	125	81	4398
ZAGREB-MAKSIMIR	123	16	2	45	49	117	183	336	470	607	639	670	570	415	269	131	87	4494

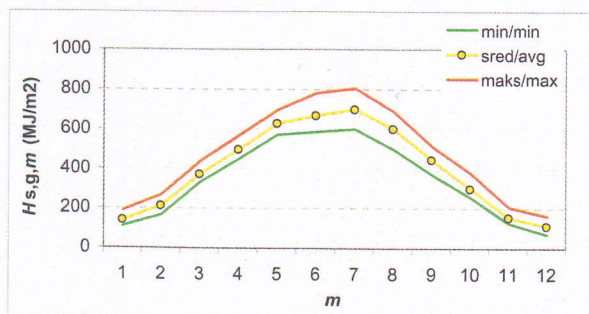
balnom ovisno o albedu podloge ( $\rho$ ) Nagib plohe ( $\beta$ ) definiran je kao kut između normale na horizontalnu i normale na nagnutu plohu. Osim toga za svaku se nagnutu plohu definira i njena orijentacija ( $\alpha$ ) u odnosu na jug.

$$R = \left( 1 - \left( \frac{H_{s,d}}{H_{s,g}} \right)_{mm} \right) \cdot R_{B,mm} + \left( \frac{H_{s,d}}{H_{s,g}} \right)_{mm} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (6)$$

$R_{B,mm}$  (jedn. 7) jest mjesečni srednjak omjera kosinusa kuteva upada Sunčevih zraka na nagnutu i horizontalnu plohu. Kut upada Sunčevih zraka na nagnutu plohu definiran je smjerom Sunčevih zraka i normale na plohu, a za horizontalnu plohu zenitnim kutem.

$$R_{B,mm} = (1/d_m) \cdot \sum_{d=1}^{d_m} R_{B,d} \quad (7)$$

$$R_{B,d} = [(\cos \beta \sin \delta \sin \phi - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha)(\omega_{ss} - \omega_{sr}) + (\cos \phi \cos \delta \cos \beta + \cos \delta \cos \alpha \sin \phi \sin \beta)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - (\cos \delta \sin \beta \sin \alpha) \cdot (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr})] / [2(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta)] \quad (8)$$



Slika 1. Godišnji hod srednje mjesečne sume globalnog Sunčeva zračenja ( $H_{s,g,m}$ ) na području Hrvatske (sred) te minimalne (min) i maksimalne (maks) vrijednosti.

Figure 1. Annual course of Mean Monthly Global Solar Radiation Sums ( $H_{s,g,m}$ ) on the territory of Croatia (avg) along with minimum (min) and maximum (max) values.

U jednadžbi 8 je  $\omega_{ss}$  satni kut zalaska, a  $\omega_{sr}$  satni kut izlaska Sunca na nagnutu plohu, dok je  $\omega_s$  satni kut zalaska Sunca na horizontalnu plohu (Klein, 1977). Pri proračunu trajanja sijanja Sunca na nagnute plohe orijentirane na NE ili NW te posebno na N postoje odstupanja jer formule za proračun satnog kuta izlaska i zalaska prvenstveno vrijede za plohe orijentirane od zapada preko juga do istoka (Klein, 1977). Razlog odstupanja jest u pojavi višestrukih izlazaka i zalazaka Sunca na plohe orijentirane od zapada preko sjevera do istoka.

Nadalje je za izračunavanje koeficijenta  $R$  potrebno odrediti omjer difuznog ( $H_{s,d}$ ) i globalnog zračenja ( $H_{s,g}$ ). Uglavnom se za definiranje omjera difuznog i globalnog zračenja koristi polinom trećeg stupnja s konstantama ( $c_0, c_1, \dots, c_3$ ) koje su određene empirički na temelju malobrojnih mjerenja difuznog i globalnog zračenja (jedn. 9). Ovdje su korištene konstante iz Europskog atlasa Sunčeva zračenja (ESRA, 2000) prema radu Czeplaka (1996). Tamo su konstante definirane za tri pojasa zemljopisnih širina i ovdje su korištene konstante za pojas zemljopisnih širina  $\phi \leq 52^\circ N$  (tab. 3).

$$\left( \frac{H_{s,d}}{H_{s,g}} \right)_{mm} = c_0 + c_1 \cdot k_{T,mm} + c_2 \cdot k_{T,mm}^2 + c_3 \cdot k_{T,mm}^3 \quad (9)$$

Varijabla  $k_{T,mm}$  definirana je kao omjer izmjenjenog srednjeg mjesečnog globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu ( $H_{s,g,mm}$ ) i potencijalno mogućeg, tj. ekstraterestičkog ( $H_{s,g,mm}(\text{extraterrestrial})$ ) i naziva se srednjim indeksom prozirnosti (jedn. 10).

Tablica 3. Koeficijenti u jednadžbi 9.

Table 3. Coefficients in Equation 9.

mjesec ( $m$ )	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
I,II,XI,XII	1.032	-0.694	-1.771	1.562
III,IV	1.049	-0.822	-1.250	1.124
V,VI,VII,VIII	0.998	-0.583	-1.392	0.995
IX,X	1.019	-0.874	-0.964	0.909

Tablica 4. Srednje mjesečne sume i srednja godišnja suma globalnog Sunčeva zračenja na nagnute plohe raznih orijentacija ( $H_{s,g,ic}$  [ $MJm^{-2}$ ]) za postaju Zagreb-Maksimir.

Table 4. Mean Monthly Sums and Mean Annual Sum of Global Solar Radiation for tilted, variously oriented surfaces ( $H_{s,g,ic}$  [ $MJm^{-2}$ ]) for the Zagreb-Maksimir weather station.

GLOBALNO SUNČEVO ZRAČENJE ( $MJ/m^2$ )												
$H_{s,g,ic}$		orijentacija						orijentacija				
nagib [°]	mjesec	S	SE, SW	E, W	NE, NW	N	mjesec	S	SE, SW	E, W	NE, NW	N
0	I	117	117	117	117	117	II	183	183	183	183	183
15		145	136	117	98	85		220	209	183	155	139
30		166	150	116	85	76		246	226	181	133	104
45		180	156	114	71	71		260	233	176	115	98
60		184	156	107	65	65		262	229	167	92	90
75		180	150	98	58	58		251	216	153	82	82
90		166	135	87	51	51		227	193	136	73	73
0		III	336	336	336	336		336	IV	470	470	470
15	376		364	335	299	281	495	488		465	437	423
30	398		379	328	262	217	498	490		455	394	356
45	403		379	317	232	167	480	475		434	350	278
60	388		364	297	200	153	440	443		404	312	204
75	356		334	271	152	140	381	395		365	261	181
90	307		290	238	125	125	309	336		319	185	163
0	V		607	607	607	607	607	VI		639	639	639
15		612	610	600	584	571	632		634	632	623	611
30		593	597	581	539	503	603		612	610	581	545
45		550	565	551	483	413	550		572	576	524	454
60		485	513	509	430	309	478		514	530	465	347
75		405	448	456	376	229	392		444	474	409	237
90		315	373	396	290	206	299		365	410	327	214
0		VII	670	670	670	670	670		VII	570	570	570
15	668		670	662	647	634	591	586		565	536	521
30	642		651	641	599	559	587	584		550	487	444
45	589		612	606	538	459	557	561		525	432	349
60	516		552	560	477	340	502	519		488	384	247
75	424		479	502	420	234	429	459		440	328	205
90	324		395	435	328	214	339	386		383	239	186
0	IX		415	415	415	415	415	X		269	269	269
15		460	447	413	370	350	323		306	269	228	204
30		484	464	406	324	270	359		331	267	192	140
45		484	462	391	284	190	379		341	260	166	125
60		459	441	368	248	161	379		336	247	131	116
75		414	402	336	189	148	360		315	227	106	106
90		349	348	295	136	135	324		280	201	96	96
0		XI	131	131	131	131	131		XII	87	87	87
15	160		151	131	109	96	106	99		87	74	65
30	183		165	130	94	81	119	108		86	65	61
45	197		173	126	79	77	128	113		84	57	57
60	201		172	120	70	70	132	113		78	52	52
75	195		163	110	64	64	128	107		71	47	47
90	180		148	97	56	56	119	97		64	41	41
0	GOD		4494	4494	4494	4494	4494					
15		4787	4700	4459	4161	3981						
30		4878	4758	4351	3755	3356						
45		4756	4643	4160	3331	2737						
60		4427	4351	3875	2926	2154						
75		3916	3910	3504	2492	1730						
90		3258	3346	3061	1947	1561						

$$k_{T,mm} = \frac{H_{s,g,mm}}{H_{s,g,mm}(extraterrestrial)} \quad (10)$$

Ekstraterestričko zračenje određeno je lokacijom, tj zemljopisnom širinom postaje ( $\phi$ ), danom u godini ( $n$ ) te satnim kutem zalaska Sunca ( $\omega_s$ ). Za svaki mjesec računa se srednjak iz srednjih dnevnih vrijednosti koje se dobivaju prema jedn. 11.

$$H_{s,g,d}(extraterrestrial) = \frac{24[h]}{\pi} I_0 (1 + 0.03344 \cdot \cos(n \frac{360}{365})) \cdot (\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s)) \quad (11)$$

gdje je  $I_0$  Sunčeva konstanta ( $I_0=1367 \text{ Wm}^{-2}$ ), tj. intenzitet Sunčeva zračenja koje padne u jedinici vremena na okomito orijentiranu jediničnu površinu na gornjoj granici atmosfere, kada je Zemlja na srednjoj udaljenosti od Sunca.

Proračun za nagnute plohe proveden je za svakih  $15^\circ$  nagiba do  $90^\circ$  te za orijentacije S, SE, SW, E, W, NE, NW i N. U radu su dane izračunate vrijednosti za Zagreb-Maksimir (tab. 4).

#### 4. ZAKLJUČAK

Analiza podataka srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja te digitalne karte srednje godišnje sume globalnog Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu pokazuje da je u kontinentalnom dijelu Hrvatske globalno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu manje na zapadu, prvenstveno zbog veće naoblake u dolini Drave, te na području od istočnih obronaka Medvednice i Kalnika do Križevaca. Srednja godišnja suma najniža je u Križevcima ( $4175 \text{ MJm}^{-2}$ ), a najviša u Požegi ( $4643 \text{ MJm}^{-2}$ ), što je razlika od  $468 \text{ MJm}^{-2}$  godišnje. Niske su vrijednosti također u Zagorju i na Samoborskom gorju, te na vrhovima planina Gorskog kotara i Like. U Istri, Hrvatskom primorju i Dalmaciji zračenje se povećava od sjeverozapada prema jugoistoku s minimumom u Rijeci ( $4807 \text{ MJm}^{-2}$ ), a maksimumom u Hvaru ( $5705 \text{ MJm}^{-2}$ ), što je razlika od  $898 \text{ MJm}^{-2}$  na godinu, prvenstveno zbog većeg raspona zemljopisnih širina u usporedbi s unutrašnjošću Hrvatske.

Tako na karti u kontinentalnoj Hrvatskoj možemo zamijetiti dvije, a uz obalu tri zone globalnog Sunčeva zračenja. Prva primjena karte bilo je grupiranje lokacija na području Hrvatske s istim srednjim godišnjim sumama globalnog Sunčeva zračenja u okviru meteorološke studije namijenjene projektiranju energetski efikasne toplinske zaštite zgrada (DHMZ, 2004). U odnosu na dosadašnju kartu prednost nove digitalne karte jest u mogućnosti izravnog proračuna parametara koji ovise o srednjoj godišnjoj sumi globalnog Sunčeva zračenja.

Dosadašnji publicirani rezultati vezani uz zračenje na nagnute plohe odnosili su se uglavnom na plohe južne orijentacije ili različito orijentirane zidove (za što se koristi nešto pojednostavljeni fizikalni model za proračun). U sklopu ovog istraživanja proračun je proveden za plohe nagiba od  $15^\circ$  do  $90^\circ$  s korakom od  $15^\circ$  orijentirane na S, SE, SW, E, W, NE, NW i N. Proračunato je zračenje na lokacijama navedenim u tablici 2, a u tablici 4 nalazi se proračun za lokaciju Zagreb-Maksimir. Moguće je prema tom fizikalnom modelu i programu provesti proračun i za svaku lokaciju s poznatim globalnim Sunčevim zračenjem na horizontalnoj plohi.

#### LITERATURA

- Cressie, N., 1993: *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and sons, inc., 900 pp.
- Czeplak, G., 1996: Modified polynomial Erbs coefficients for calculating mean diffuse solar radiation. European Solar Radiation Atlas project, Contract JOU2-CT93-305, *DWD Report*, Regional Consulting Office Hamburg, 6 pp.
- DHMZ, 2004: Meteorološka podloga za pravilnik o uštedi energije i toplinskoj zaštiti kod zgrada. Zagreb, 211 str.
- Desnica, U.V., B. G. Petrović i D. Desnica, 1986: Calculation of monthly average daily insolation on tilted, variously oriented surfaces using analitically weighted  $R_b$  factors. *Solar Energy*, **37**, No 2, 81-90.
- ESRA European Solar Radiation Atlas, 2000, Ecole des Mines de Paris.
- Fu, P. and P. M. Rich, 2002: A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, **37**, 25-35.



- Gajić-Čapka, M., M. Perčec Tadić i M. Patarčić, 2003: Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske. *Hrv. meteor. čas.*, **38**, 21–34.
- GISDATA, 1997: Digitalni atlas Republike Hrvatske 1:100 000.
- Ilwis 3.0 Academic, 2001: The Integrated Land and Water Information System. Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede.
- Institut Ruder Bošković, 1986: Studija o tehničkim mogućnostima i ekonomičnosti preorijentacije potrošača s tekućih goriva na Sunčevu energiju u SR Hrvatskoj. IRB, Zagreb, 33–55.
- Klein, S. A., 1977: Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, **19**, 325–329.
- KUEN\_ZGRADA, 1998: Program energetske efikasnosti u zgradarstvu, Prethodni rezultati i buduće aktivnosti. Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, 152 str.
- Penzar, I., 1977: Aktinometrijski podaci potrebni za iskorištavanje sunčeve energije. *2. konf. o tehnološkom razvoju SR Hrvatske*, Poreč, 21–23. studenoga 1977, 1–9.
- Penzar, I., 1978: O sunčevoj energiji u vezi sa projektiranjem heliotehničkih uređaja. *Klimatizacija-grejanje-hladenje*, **2**, 47–52.
- Poje, D., Z. Žibrat i M. Gajić-Čapka, 1984: Osnovne karakteristike naoblake i insolacije na području SR Hrvatske. *Rasprave*, **19**, DHMZ, Zagreb, 49–74.
- RHMZ SRH, 1986: Meteorološki parametri potrebni za iskorištavanje Sunčeve energije u SR Hrvatskoj. III dio - Globalno, difuzno i direktno zračenje, RHMZ CMI, Zagreb (nepublicirano).
- Zaninović, K., M. Perčec Tadić i L. Srnec, 2005: Digitalna godišnja temperaturna karta Hrvatske. *Hrv. meteor. čas.*, **39**, 51–58.
- Žibrat, Z. i M. Gajić-Čapka, 1986: Globalno zračenje na području SR Hrvatske. *Rasprave*, **21**, DHMZ, Zagreb, 47–58.



Državni hidrometeorološki zavod  
Republika Hrvatska

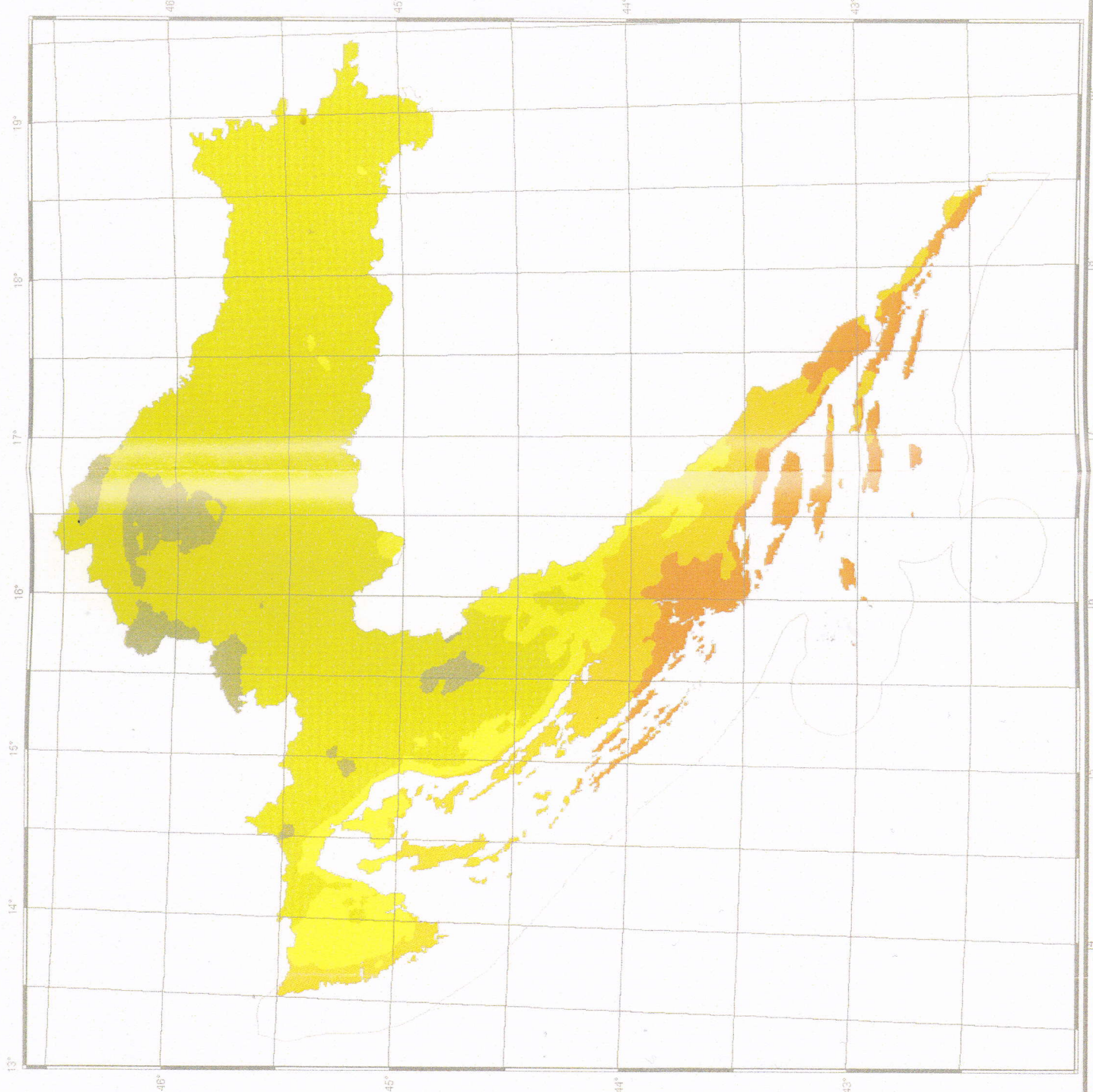
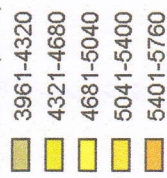
## Srednja godišnja suma globalnog Sunčeva zračenja

Razdoblje: 1961-1980.

Mean Annual Global Solar  
Radiation Sum

Period: 1961-1980

ZRAČENJE (MJ/m<sup>2</sup>)



utori: Melita Perčec Tadić, dipl. ing.  
dr. sc. Marijana Gajić-Čapka, dipl. ing.  
mr. sc. Ksenija Zanihović, dipl. ing.

Zagreb, 2004.