ОДРЕЂИВАЊЕ ИНТЕНЗИТЕТА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА НА ПОВРШИНЕ НА ЗЕМЉИ

DETERMINATION OF THE EARTH SURFACE SOLAR RADIATION INTENSITY

Бојан Луковић, дипл. инж., и Душан Гордић, дипл. инж.,
Машински факултет, Крагујевац

Приликом пројектовања система за експлоатацију сунчеве енергије, неопходно је познавати интензитет расположиве енергије по јединици површине. Статистичком анализом експерименталних података, могуће је добити релације за одређивање интензитета зрачења на површине на земљи, при чему је пожељно обухватити што више релевантних фактора, као што су: географска координата места, доба године и дана, временске прилике, квалитет атмосфере, да ли је у питању градска средина и колико је она загађена итд. Тако се добијају уопштене релације, које се, са задовољавајућом тачношћу, могу користити за све локације и у свим условима. На основу таквог математичког модела, урађен је компјутерски програм за одређивање интензитета зрачења на површине на земљи. Аутори дају и комплетан листинг програма.

During designing a solar exploitation system, it is necessary to know the quantity of available energy per surface. It is possible to get relations for evaluating the quantity of the solar radiation on the earth's surface by statistical analysis of the experimental data. But it is desirable to include as many relevant factors as possible, such as: the geographical coordinates of place, the season of year, the period of day, the weather conditions, the quality of atmosphere, whether it is an urban environment and how much it is polluted etc. In that way, the generalized relations can be obtained, which can be used with satisfactory precision for all locations and in all conditions.

Кључне речи: *интензитет сунчевог зрачења; математички модел; компјутерски програм одређивања интензитета зрачења*
Key words: *intensity of solar radiation; mathematical model; computer program of solar radiation intensity determination*

1. Увод

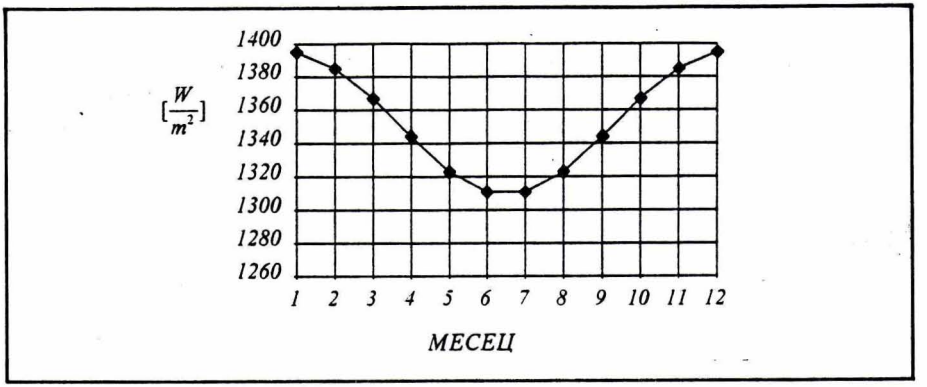
Целокупна енергија на Земљи, изузимајући нуклеарну и геотермалну, потиче од Сунца. Износ енергије коју Земља прима од Сунца у периоду од само петнаест дана је једнака енергији коју могу да дају преостале резерве нафте и угља у свету. С друге стране, ова енергија је неисцрпна и еколошки чиста, па је све већа употреба соларних колектора и фотонапонских ћелија у експлоатацији овог вида енергије оправдана и пожељна.

При пројектовању уређаја за коришћење соларне енергије, неопходно је претходно одредити интензитет сунчевог зрачења на површину земље.

2. Теоријске основе

Како се, по Кеплеровом закону, Земља креће по елипсоидној путањи, са

Сунцем у једној од жижа, то се растојање Земље од Сунца мења током године, постижући минимум 3. јануара и максимум 4. јула. Услед тога, вредност сунчевог зрачења у горњим слојевима атмосфере варира за ±3% (слика 1). На слици се види да до атмосфере зими долази веће зрачење него лети.



Слика 1. Промена интензитета зрачења у зависности од доба године

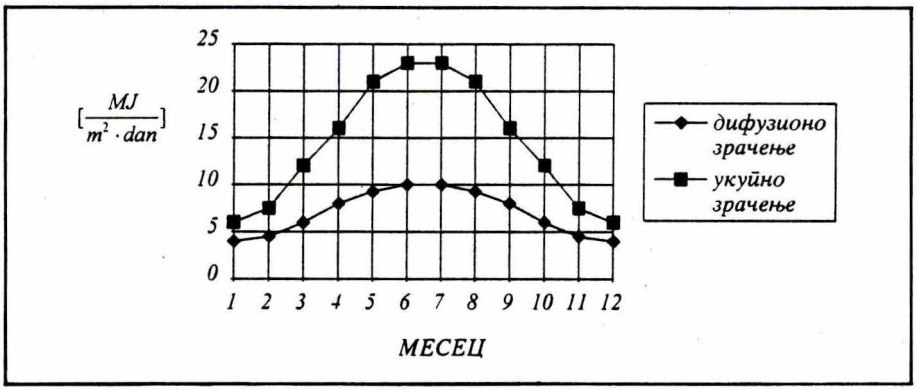
Испитивања која је вршио C.G. Abbot показују да постоје додатне варијације у интензитету сунчевог зрачења од око 2–3%, које се јављају са периодом од 22 године и 9 месеци, што одговара периоду Сунчевог магнетног поља, односно двоструком периоду Сунчевих пега. Ова претпоставка није у потпуности потврђена, јер су у време испитивања вршене нуклеарне пробе, које су могле да утичу на добијене податке.

Сунчево зрачење на површину Земље се разликује од оног на уласку у Земљину атмосферу. Један део енергије бива апсорбован гасовима на путу кроз атмосферу, што зависи од дужине пута који Сунчеви зраци пређу кроз атмосферу и квалитета атмосфере. Како је пут Сунчевих зрака кроз атмосферу знатно мањи лети, то је укупан ефекат соларне енергије већи лети него зими (слика 2). Квалитет атмосфере подразумева садржај гасова (посебно водене паре, O_3, O_2 и CO_2), прашине и дима. Укупно сунчево зрачење (глобално зрачење) које доспева на површину Земље се састоји из директног и дифузионог зрачења. Директно зрачење представља компоненту глобалног зрачења, које долази директно по линији. Други део укупног зрачења се приликом проласка Сунчевих зрака кроз атмосферу расипа због наиласка на честице воде, прашине и других аерозагађења (слика 3).

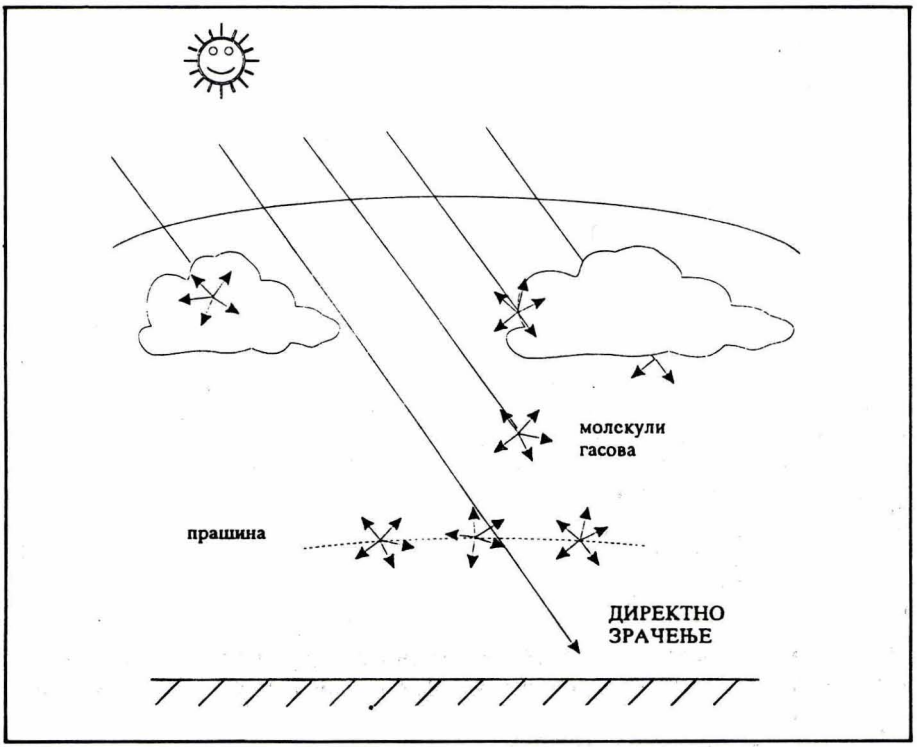
Удео директног зрачења у укупном зрачењу је већи у време ведрих дана, док је у облачним данима готово целокупно зрачење дифузног карактера.

Вредности директног и дифузионог зрачења се значајно мењају од места до места, што зависи од тога да ли је у питању градска средина и колико је она заґађена.

Још један утицај атмосферског времена на глобално зрачење може се

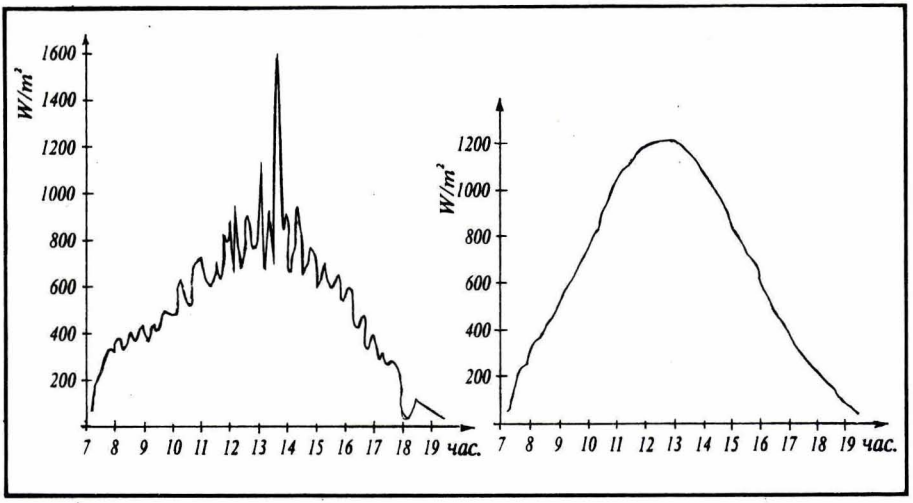


Слика 2. Вредност глобалног, директног и дифузног зрачења у зависности од доба године за географску ширину 44°



Слика 3. Расипање зрачења на директно и дифузно

сагледати на слици 4, где су приказани интензитети глобалног зрачења у функцији времена за два узастопна дана на истом месту. Први дан је био прилично облачан, са кишом око 18 h, а следећи је био прилично ведар, са неколико облака. Највећа вредност зрачења од око 1200 W/m^2 после 14 h



Слика 4. Глобално зрачење мерено 13. и 14. маја

првог дана је за 30% већа од зрачења које се може очекивати ведрог дана, што је последица рефлексије од облака. Овако неочекивано висока вредност постоји врло кратко време.

3. Математички модел

Сређивањем мерених вредности, дошло се до закључка да се зависност односа глобалног зрачења на површини од једног квадратног метра на Земљи и изван атмосфере у функцији односа јасних сунчаних сати и дужине дана растура, како је приказано на слици 5. A. Ångström у свом делу "Solar and Terrestrial Radiation", 1924. године, предлаже једначину за процену глобалног зрачења, која се данас користи у мало погоднијем облику, који је предложио J. A. Prescott у *Evaporation from Water Surface in Relation to Solar Radiation*, 1940. године:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \frac{S}{Z} \qquad (1)$$

где су:

H – дневно глобално зрачење на површини од једног m^2 на земљи,
H_0 – дневно глобално зрачење на површини од једног m^2 изван атмосфере,
a, b – бездимензионе константе,
S – број јасних сунчаних сати током дана,
Z – дужина дана од изласка до заласка сунца.

Интензитет дневног глобалног зрачења на површини од једног m^2 изван атмосфере може се одредити према релацији коју је предложио W. D. Sellers, у *Physical Climatology*, 1965. године:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \cdot$$
$$\cdot \left(\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin t_{za} + t_{za} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta\right) \qquad (2)$$

где су:

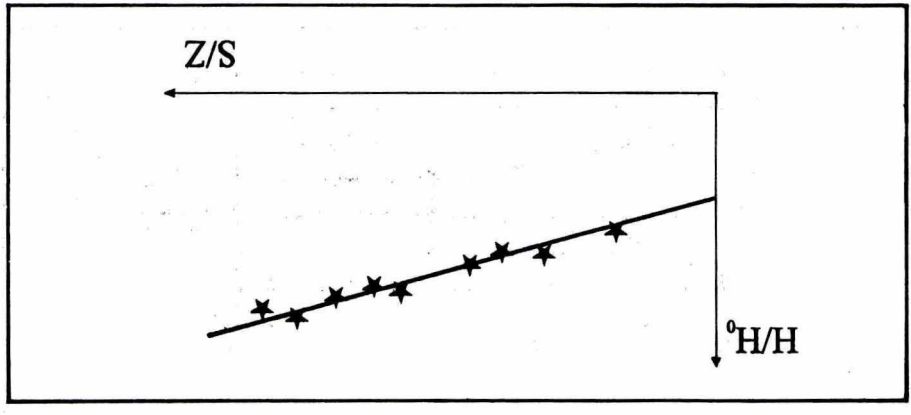
$I_0 = 1353\ W/m^2$ – соларна константа,
n [–] – редни број дана у години (за 31. јануар n = 31, за 1. фебруар n = 32 итд.),
φ [°] – географска ширина места за који се одређује зрачење,
δ [°] – деклинацијски угао,
t [°] – часовни угао сунца.

Израз у првој загради узима у обзир промену растојања између Земље и Сунца у току године.

Како је соларна константа $I_0 = 1353\ W/m^2$, а тражи се интензитет глобалног зрачења изнад атмосфере по дану, то једначину (2) треба поможити са 3600, одакле се добија:

$$H_0 = 37{,}21 \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \cdot$$
$$\cdot \left(\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin t_{za} + t_{za} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta\right) \left[\frac{MJ}{m^2 \cdot dan}\right] \qquad (3)$$

Бездимензиони кофицијенти *a* и *b* су одређивани мерењем зрачења и броја јасних сунчаних сати током дана за одређено место. Тада се те вредности за коефицијенте *a* и *b* могу користити за процену глобалног зрачења и за остала места, која имају сличне географске и климатске услове. Међу-



Слика 5. Зависност односа глобалног зрачења на површини Земље и на врху атмосфере у функцији односа јасних сунчаних сати и дужине дана

тим, и тада долази до значајних одступања, што је довело до потребе за универзалном формулом, која би обухватала што више фактора, и која би се могла користити свуда у свету. J. Glover и J. D. G. McUlloch у *The Empirical Relation Between Solar Radiation and Hour of Bright Sunshine*, 1958, претпостављају да се за северне географске ширине мање од 60° коефицијент *b* може сматрати константним, а коефицијент *a* је функција географске ширине:

$$a = 0{,}29 \cdot \cos\varphi \tag{4}$$

$$b = 0{,}52 \tag{5}$$

Frére у *Estudio Agroclimatilogico de la zona ondina*, 1975, полази од друге претпоставке, по којој коефицијенти *a* и *b* зависе од просечног горишњег односа броја јасних сунчаних сати и дужине дана према слици 6.

Најбоље резултате дају једначине које је предложио K. K. Gopinathen 1988:

$$a = -0{,}309 + 0{,}539 \cdot \cos\varphi - 0{,}0693 \cdot h + 0{,}29 \cdot \frac{S}{Z}, \tag{6}$$

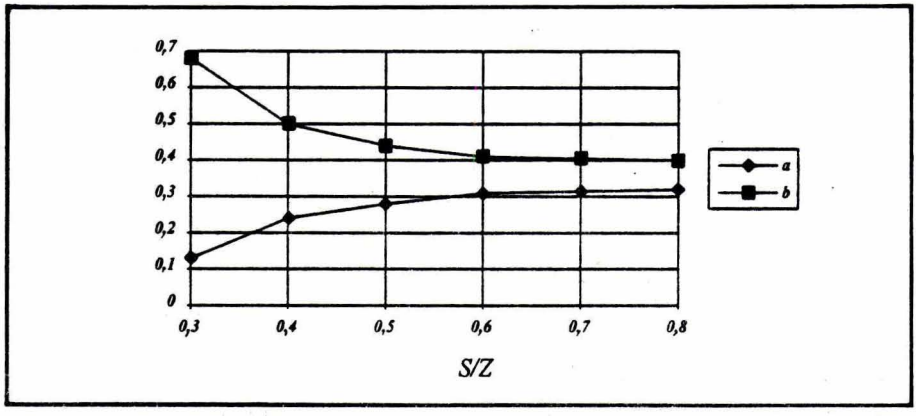
$$b = 1{,}527 - 1{,}027 \cdot \cos\varphi - 0{,}0926 \cdot h - 0{,}359 \cdot \frac{S}{Z} \tag{7}$$

где је h надморска висина у km.

Најчешће се за дужину дана узима број јасних сати, што представља период када је угао соларне алтитуде већи или једнак 5°:

$$z = \frac{2}{15} \cdot \arccos\left(\frac{\cos 85^{o} - \sin\varphi \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta}\right). \tag{8}$$

Да би се одредио удео директног и дифузног зрачења, B. Y. H. Lui и R. C.



Слика 6. Коефицијенти а и б у зависности од просечног годишњег односа броја јасних сунчаних сати и дужине дана према Фререу

Jordan у *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Radiation*, 1960. године су претпоставили релације:

$$\frac{H_d}{H} = 0{,}974 + 0{,}693 \cdot \frac{H}{H_0} - 6{,}067 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 +$$

$$+ 6{,}416 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 1{,}931 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^4 \qquad (9)$$

$$H_h = H - H_d. \qquad (10)$$

Релације важе за однос дневних зрачења, али се у приближним прорачунима могу користити и за однос тенутних зрачења.

Коефицијенти у једначини (9) варирају од места до места, али се због недостатка експерименталних резултата најчешће узимају према B. Y. H. Luiu и R. C. Jordanu.

Како је најчешће у инжењерској примени потребно имати зрачење сваког сата, одређује се екстратерестријално зрачење у произвољном тренутку (одређеним часовним углом t [8]):

$$H_0 = I_0 \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \cdot$$

$$\cdot \left(\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos t\right) \qquad (11)$$

Однос часовне и дневне радијације се може одредити на основу формуле коју су предложили M. Collares-Pereira и A. Rabl у "*The Average Distribution of Solar Radiation*", 1979. год.:

$$\frac{H'}{H} = \left(a1 + b1 \cdot \cos t\right) \cdot \frac{H_0'}{H_0}, \qquad (12)$$

где су:

$$a1 = 0{,}409 + 0{,}5016 * \sin\left(t_{za} - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$b1 = 0{,}6609 + 0{,}4767 * \sin\left(t_{za} - \frac{\pi}{3}\right). \qquad (13)$$

4. Закључак

Применом наведених једначина за произвољну локацију, за коју не постоје експериментали подаци добијени мерењем интензитета зрачења, добијају се врло задовољавајући резултати за инжењерске потребе прорачуна у соларној техници. Користећи изнети математички модел, урађен је компјутерски програм на програмском језику C++ који одређује интензитет глобалног, директног и дифузног зрачења на хоризонталној површини земље за произвољно место у свету. Листинг програма је у прилогу.

Литература

[1] **Thekaekara, Mathew P.:** *Solar Irradiance, Total and Spectra,* Solar Energy Engineering, edited by A.A. M. Sayigh, Academic Press Inc, 1977.

[2] **Sayigh, A.A.:** *Solar Energy Availability, Prediction from Climatological Data*, Solar Energy Engineering, edited by A. A. M. Sayigh, Academic Press Inc, 1977.

[3] **Јамбић, М.:** *Соларни уређаји,* Техничка књига, Београд, 1987.

[4] **Flocas, A. A.:** *Estimation and Prediction of Global Solar Radiation over Greece*, Solar Energy, Volume 24, Number 1, 1980.

[5] **Neuwirth, F.:** *The Estimation of Global and Sky Radiation in Austria*, Solar Energy, Volume 24, Number 5, 1980.

[6] **Hay, John E.:** *Calculation of Monthly Mean Solar Radiation for Horizontal and Inclined Surfacester*, Solar Energy, Volume 23, Number 4, 1979.

[7] **Gopinathan, K. K.:** *A General Formula for Computing the Coefficients of the Correlation Connecting Global Solar Radiation to Sunshine Duration*, Solar Energy, Volume 41, Number 6, 1988.

[8] **Suehrche, H., McCormick, P. G.:** *The Distribution of Average Instantaneous Terrestrial Solar Radiation Over the Day*, Solar Energy, Volume 42, Number 4, 1989.

ПРИЛОГ

```
// PROGRAM ZA ODREDJIVANJE ZRACENJA NA POVRSINI NA ZEMLJI,
// B. Lukovic, D. Gordic, 1995.
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
void main ()
{
float hh,H,hd,hb,Hkh,h0,a1,b1,oms,a,b,Hd,Hb,H0,t,z1,fi,rad,delta,hm,s;
int day,month,n;
clrscr();
printf("\nUnesi datum odredjivanja zracenja [dan i mesec]: ");
scanf("%d %d",&day,&month);
printf("\nUnesi casovni ugao posmatranog mesta u posmatranom trenutku [stepen]: ");
scanf("%f",&t);
rad=M_PI/180; /* koeficijent za pretvaranje stepeni u radijane */
t=t*rad;  /* pretvaranje u radijane */
printf("\nUnesi ugao deklinacije posmatranog mesta posmatranog dana [stepen]: ");
scanf("%f",&delta);
delta=delta*rad; /* pretvaranje u radijane */
printf("\nUnesi geografsku sirinu mesta fi [stepen] ");
scanf("%f",&fi);
fi=fi*rad;  /* pretvaranje u radijane */
printf("\nUnesi ugao zalaska sunca oms [h] ");
```

```
scanf("%f",&oms);
oms=oms*M_PI/12;  /* pretvaranje u radijane */
printf("\nUnesi nadmorsku visinu mesta [m]: ");
scanf("%f",&hm);
hm=hm/1000; /* u izrazima figurise hm u [km] */
/* Odredjivanje jasne duzine dana z1 [h] */
if (-tan(delta)*tan(fi)<-1)
    {
    z1=24;   /* polarni dan */
    }
else
 if (-tan(delta)*tan(fi)>1)
    {
    z1=0;   /* polarna noc */
    }
 else
  {
  z1=acos((cos(85*M_PI/180)-sin(fi)*sin(delta))/(cos(fi)*cos(delta)))/7.5*180/M_PI;
  }
printf("\nUnesi broj jasnih suncanih sati tokom dana ");
printf("\nNAPOMENA: broj jasnih suncanih sati je uvek manji od duzine cistog");
printf("\n         dana (za beta > 5 stepeni) koja iznosi %f [h]: ",z1);
scanf("%f",&s);  /* unosenje broja jasnih suncanih sati s [h] */
/* odredjivanje bezdimezionalnih koef. a i b:
K.K. Gopinathan, formula for computing the
coefficients a-b, Lesoto, Solar Energy 41, pp 499-507,1988 */
a=-0.309+0.539*cos(fi)-0.0693*hm+0.29*s/z1;
b=1.527-1.027*cos(fi)+0.0926*hm-0.359*s/z1;
/* odredjivanje rednog broja dana u godini (n) */
switch(month)
   {
   case 1  :n=day;
                    break;
   case 2  :n=31+day;
                    break;
   case 3  :n=59+day;
                    break;
   case 4  :n=90+day;
                    break;
   case 5  :n=120+day;
                    break;
   case 6  :n=151+day;
                    break;
   case 7  :n=181+day;
                    break;
   case 8  :n=212+day;
                    break;
   case 9  :n=243+day;
                    break;
   case 10 :n=273+day;
                    break;
```

```
  case 11 :n=304+day;
                break;
  case 12 :n=334+day;
                break;
  }
/* odredjivanje odnosa H/H0: A.Angstrom, Solar and terrestrial radiation, 1924 */
Hkh=a+b*s/z1;
/* odredjivanje dnevnog zracenja po jedinici povrsi na vrhu atmosfere:
W.D. Sellers, Phisical Climatology, Chicago 1965. */
h0=37.21*(1+0.033*cos(360*n/365*M_PI/180))*(cos(fi)*cos(delta)*sin(oms)+oms*sin(fi)*sin(delta));
hh=h0*Hkh; /* odredjivanje dnevnog zracenja po jedinici povrsi na Zemlji */
a1=0.409+0.5016*sin(oms-M_PI/3);
b1=0.6609-0.4767*sin(oms-M_PI/3);
H0=h0*pow(10,6)/3600*M_PI/24*(cos(t)-cos(oms))/(sin(oms)-oms*cos(oms));
/* odredjivanje casovnog zracenja po jedinici povrsine na vrhu atmosfere:
H. Suehrche, P.G. McCormick, The Distribution of Average Instantaneous
Terrestrial Solar Radiation over the Day, 1989 */
H=hh*(a1+b1*cos(t))*H0/h0;
/* odredjivanje casovnog zracenja po jedinici povrsi na Zemlji */
Hd=H*(0.974+0.693*Hkh-6.067*pow(Hkh,2)+6.416*pow(Hkh,3)-1.931*pow(Hkh,4));
hd=hh*(0.974+0.693*Hkh-6.067*pow(Hkh,2)+6.416*pow(Hkh,3)-1.931*pow(Hkh,4));
/* odredjivanje casovnog difuzionog zracenja: B.Y.H. Lui, R.C. Jordan,
The interrelationship and characteristic distribution of direct,
diffuse and total radiation, 1960 */
Hb=H-Hd;  /* odredjivanje casovnog direktnog zracenja */
hb=hh-hd;  /* odredjivanje srednjeg dnevnog direktnog zracenja */
/* restrikcija za slucaj da je noc */
if (t*12/M_PI>oms || t*12*M_PI<-oms)
{
Hb=Hd=H=H0=0.;
}
printf("\nglobalno zracenje: H= %f [W/m2]",H);
printf("\ndifuziono zracenje: Hd= %f [W/m2]",Hd);
printf("\ndirektno zracenje: Hb= %f [W/m2]",Hb);
printf("\n\nsrednje dnevno globalno zracenje: h= %f [W/m2]",hh*277.78/z1);
printf("\nsrednje dnevno difuziono zracenje: hd= %f [W/m2]",hd*277.78/z1);
printf("\nsrednje dnevno direktno zracenje: hb= %f [W/m2]",hb*277.78/z1);
getch();
}
```