

Moderiranje Sunčevog zračenja u urbanom okolišu

Peša, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:883078>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Krešimir Peša

**MODELIRANJE SUNČEVOG ZRAČENJA U URBANOM
OKOLIŠU**

Diplomski rad

Rijeka, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo

Urbano inženjerstvo

Računalno modeliranje

Krešimir Peša

0114025906

Moderiranje Sunčevog zračenja u urbanom okolišu

Rijeka, veljača 2020.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad..

Rijeka, veljača 2020.

Krešimir Peša:

ZAHVALA

Veliko hvala mentoru prof.dr.sc. Ivici Kožaru na susretljivosti, pruženoj pomoći, savjetima i mentorstvu, bez čije pomoći ovaj rad nikada ne bi bio priveden kraju.

Posebnu zahvalu upućujem i svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na njihovoj velikoj podršci tijekom studiranja.

SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog rada je modelirati Sunčevo zračenje na području Trsata u gradu Rijeci. U prvom poglavlju opisan je i proveden postupak za određivanje pozicije Sunca u odnosu na promatranu točku na Zemlji. Proračun za određivanje pozicije Sunca proveden je u računalnom programu Mathcad po uzoru na algoritam za određivanje Sunčevog zračenja (SPA) koji je detaljnije opisan u [6]. Poznavanje pozicije Sunca u bilo kojem vremenskom razdoblju tijekom dana presudno je za određivanje dužine i smjera sjene građevine, te je postupak prikazan u sljedećem poglavlju. Prema simulacijama u računalnom programu Mathcad su na posljetku prikazani rezultati kretanja sjene građevine kroz dan.

Ključne riječi: Sunčevo zračenje, azimut, Mathcad, sjena, modeliranje

ABSTRACT

The main goal of this master thesis is modeling of solar radiation in the Trsat area of the city of Rijeka. First chapter describes and demonstrates a procedure for determining the position of the Sun from an observer's point of view. Calculation for determining position of the Sun was calculated in computer program Mathcad using the solar position algorithm for solar radiation applications described in [6]. In second chapter after determination of Sun position at any given time of day, shadow direction and size of the certain building are determined. At the end of master thesis graphical results of shadow movement during the day are presented.

Key words: sun radiation, azimuth, Mathcad, shadow, modeling

SADRŽAJ

SAŽETAK

ABSTRACT

1. UVOD	1
2. ODREĐIVANJE POZICIJE SUNCA.....	2
2.1. Julijanski dan.....	3
2.2. Zemljina heliocentrična dužina, širina i vektor	5
2.3. Geocentrična dužina i širina	6
2.4. Dužina i nagib nutacija	6
2.5. Nagib ekliptike	9
2.6. Aberacija heliocentričnog radijus-vektora Zemlje	9
2.7. Prividna longituda Sunca.....	9
2.8. Sideralno vrijeme u Greenwich-u	9
2.9. Rektascenzija	10
2.9.1. Geocentrična rektascenzija.....	10
2.9.2. Topocentrična rektascenzija	11
2.10. Deklinacija	11
2.10.1. Satni kut.....	12
2.10.2. Topocentrična deklinacija Sunca	12
2.10.3. Topocentrični satni kut	12
2.11. Zenit	13
2.12. Azimut.....	13
3. IZRAČUN SJENA GRAĐEVINA.....	14
4. ZAKLJUČAK.....	17
TABLICE	18
LITERATURA.....	29

1. UVOD

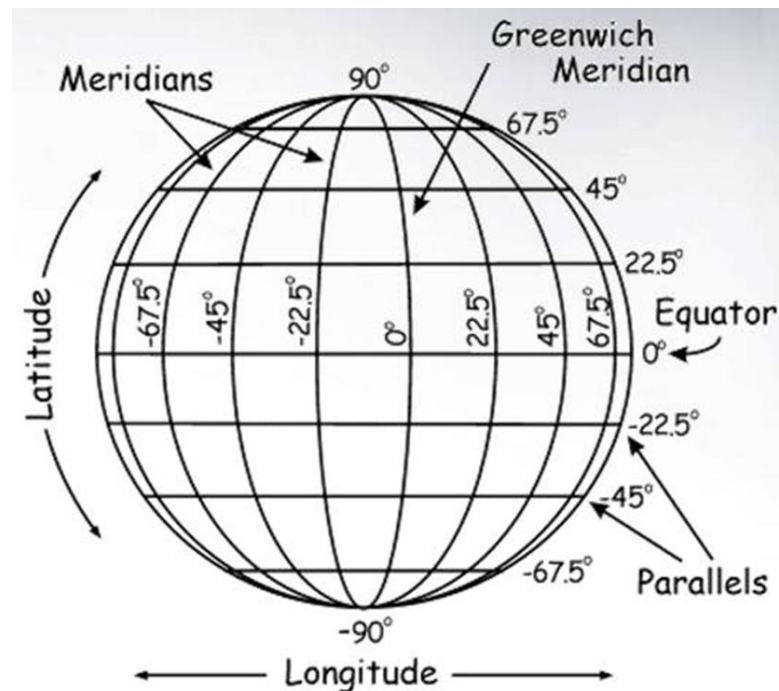
Sunčeva energija najveći je izvor energije na Zemlji. Sve je veći interes za korištenje obnovljivih izvora energije među kojima se nalazi i Sunčeva energija. Mnoge su prednosti Sunčeve svjetlosti u graditeljstvu ukoliko je ona predviđena i pravilno isporučena, osobito u smislu potrošnje energije, te prisutnosti dovoljno svjetlosti u određenom prostoru uz što veću iskorištenost Sunčeve energije koja je besplatan resurs koji treba u potpunosti iskoristiti. Nedovoljna izloženost Sunčevoj svjetlosti u prostorijama uzrokuje potrebu za postavljenjem umjetne rasvjete i dodatnim zagrijavanjem prostorija, dok prevelika prisutnost svjetlosti uzrokuje potrebu za dodatnim hlađenjem prostorija što dovodi do potrošnje električne energije.

Projektiranje urbanističkih prostora koji su u stanju pronaći balans između količine svjetlosti tijekom godine uz što manju prisutnost refleksije i sjena koje čine susjedne građevine problem je s kojim se svakodnevno susreću arhitekti i urbanisti. Kako bi se pronašla što bolja ravnoteža između izloženosti prostora svjetlosti i smanjila nepotrebna potrošnja električne energije u ovom radu je provedena analiza dnevne Sunčeve svjetlosti i sjena u računalnom programu Mathcad za područje grada Rijeke točnije Trsata.

2. ODREĐIVANJE POZICIJE SUNCA

Mnogo je čimbenika koje treba uzeti u obzir prilikom modeliranja Sunčevog zračenja u urbanom okolišu poput položaja i visine zgrade, kut elevacije, kuta azimuta Sunca i slično. Za početak modeliranja potrebno je prenijeti pozicije ulica i zgrada iz računalnog programa Google Earth u matematički alat Mathcad.

Pozicije ulica i zgrada opisane su zemljopisnim koordinatama. Zemljopisne koordinate su točke koje određuju položaj na Zemljinoj površini. Dijele na zemljopisnu širinu (latitude) i dužinu (longitude), te se izražavaju u stupnjevima. Zemljopisna širina definirana je kao negativna za točke južno, a pozitivna za točke sjeverno od ekvatora i iznosi od 0° do 90° dok zemljopisna dužina ima vrijednost od 0° do 180° te je definirana kao negativna zapadno i pozitivna istočno od nultog meridijana (Slika 1).

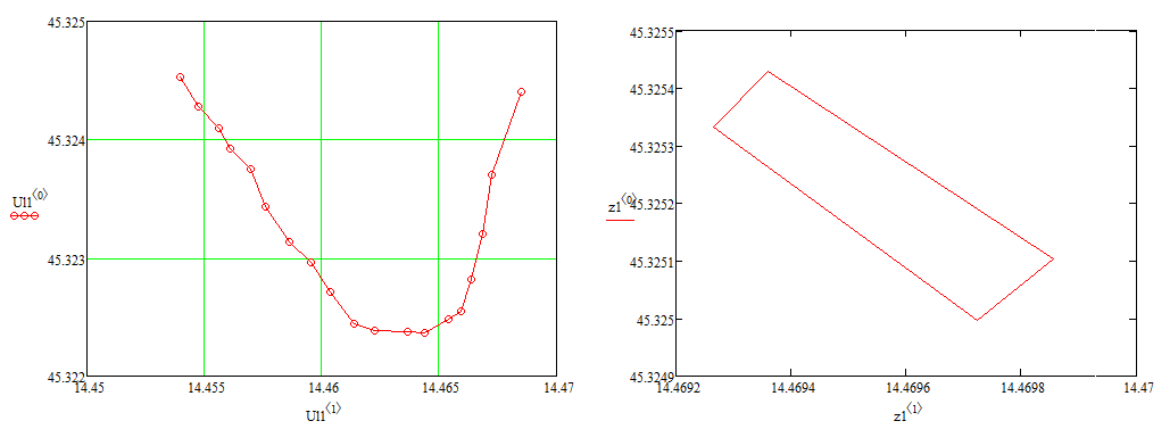


Slika 1: Prikaz Zemljopisne širine i dužine [1]

Nakon prebacivanja podataka o koordinatama ulica i zgrada u Mathcad potrebno je odrediti matematički algoritam za izračunavanje pozicije Sunca. Na *slici 2* prikazan je opseg ulica i zgrada uzet u obzir prilikom modeliranja, dok *slika 3* prikazuje primjer jedne ulice i zgrade prenesen u računalni alat Mathcad.



Slika 2: Prikaz obuhvata ulica i građevina za modeliranje



Slika 3: Prikaz ulice i zgrade prenesene u računalni program Mathcad

Sunce neprestano mijenja svoj položaj, te kut upada Sunčevih zraka na Zemljinu površinu varira tokom dana, stoga je od presudnog značaja poznavanje pozicije Sunca na bilo kojoj zemljopisnoj koordinati u određenom razdoblju dana.

2.1. Julijanski dan

Prije nego krenemo s izračunom pozicije Sunca potrebno je izračunati Julijanski datum (JD), Julijanski dan efemeride (JDE), Julijansko stoljeće (JC), Julijansko stoljeće efemeride (JCE) i Julijanski milenij efemeride (JME), Julijanski datum (JD) je sustav odbrojanja vremena u danima od datuma definiranog kao početni dan koji je 1. siječnja 4713. prije Krista.

$$JD = INT(365,25(GODINA + 4716)) + INT(30.6001(MJESEC + 1)) + DAN + B - 1524.5 \quad (1.)$$

Gdje je:

- INT predstavlja cijeli broj (npr. 7.8=7, 4.2=4 ,...itd.),
- GODINA predstavlja željenu godinu(npr. 2010, 2011...itd.) ,
- MJESEC određeni mjesec u godini (npr. 1 za siječanj, 2 za veljaču,... itd.) no ukoliko MJESEC iznosi 1 ili 2 formula se mijenja tako da se zamijeni GODINA = GODINA - 1 i MJESEC = MJESEC +12 ,
- DAN predstavlja dan u mjesecu izražen kao decimalna vrijednost (npr. drugi dan u mjesecu u 12:30:30 po univerzalnom vremenu iznosi 2.521180556)
- B za gregorijanski kalendar iznosi 2-INT(GODINA/100)+INT((GODINA/100)/4) dok je za julijanski kalendar B=0.

Julijanski dan efemeride (JDE)

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (2.)$$

Julijansko stoljeće (JC), Julijansko stoljeće efemeride (JCE)

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (3.)$$

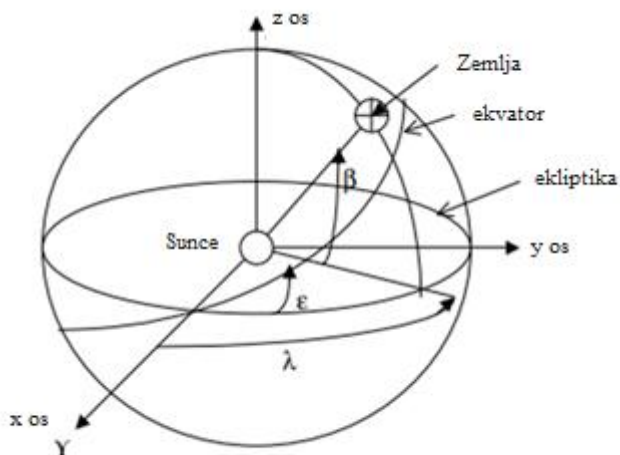
$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (4.)$$

Julijanski milenij efemeride (JME)

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (5.)$$

2.2. Zemljina heliocentrična dužina, širina i vektor

Prilikom računanja heliocentričnih koordinata položaj planeta se promatra s odnosu na Sunce (slika 4).



Slika 4: Heliocentrični sustav [2]

$$L0_i = A_i * \cos (B_i + C_i * JME) \quad (6.)$$

- i predstavlja i -ti red za $L0$ u tablici 1.
- A_i , B_i , C_i su vrijednosti i -tog reda za A , B , C stupac u tablici 1.

Izračunavamo $L0$ u radijanima:

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i \quad (7.)$$

gdje je n broj redova za izraz $L0$ u tablici 1., te se isti postupak ponavlja za izraze $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ i $L5$.

Zemljina heliocentrična dužina

$$L = \frac{L0 + L1 * JME + L2 * JME^2 + L3 * JME^3 + L4 * JME^4 + L5 * JME^5}{10^8} \quad (8.)$$

Rezultat je u stupnjevima i potrebno ga je preračunati u radijane, te je ograničen na vrijednost od 0° do 360°. Heliocentrična dužina (B) i vektor (R) se računaju na isti način zamjenom izraza L sa izrazom B odnosno R.

2.3. Geocentrična dužina i širina

Kod geocentričnog sustava Zemlja se nalazi u središtu dok se Sunce okreće oko nje. Kad promatramo geocentrični sustav iz Zemlje kao referentne točke Sunce se okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu dok se kod heliocentričnog sustava Sunce nalazi u središtu te se Zemlja kreće u smjeru kazaljke na satu, stoga heliocentričnu dužinu preračunavamo u geocentričnu (θ) zbrajanjem heliocentričnoj dužini 180 stupnjeva.

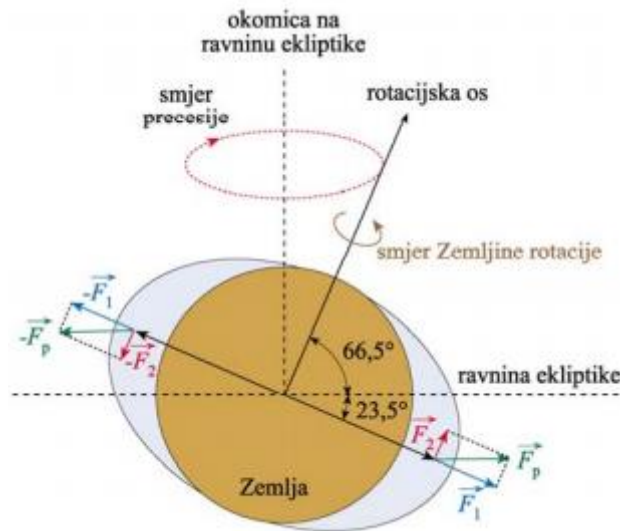
$$\theta = l + 180 \quad (9.)$$

Vrijednost geocentrične dužina se ograničava na kut od 0° do 360°. Geocentrična širina (β) jednaka je negativnoj vrijednosti heliocentrične širine.

$$\beta = -B \quad (10.)$$

2.4. Dužina i nagib nutacija

Neprestana rotacija Zemlje oko svoje rotacijske osi u prostoru tijekom vremena i djelovanje gravitacijskih sila tijela Sunčevog sustava, ponajviše Mjeseca i Sunca, nazivamo precesijsko-nutacijsko gibanje.



Slika 5: Precesijsko-nutacijsko gibanje [3]

Nutacija predstavlja osciliranje tj. pojavu nabora nebeskih polova oko njihovog srednjeg položaja i dijeli se na komponente po nagibu i dužini. Ponajprije je potrebno izračunati elongaciju Mjeseca od Sunca (X_0) izraženu u stupnjevima.

$$X_0 = 297.85036 + 445267.111480 * JCE - 0.0019142 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (11.)$$

Zatim izračunavamo anomaliju Sunca (X_1), anomaliju Mjeseca (X_2), Mjesečev argument širine (X_3) i dužinu uzlaznog čvora Mjesečeve orbite na ekliptici (X_4).

$$X_1 = 357.52772 + 35999.050340 * JCE - 0.0001603 * JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (12.)$$

$$X_2 = 134.96298 + 477198.867398 * JCE + 0.0086972 * JCE^2 - \frac{JCE^3}{56250} \quad (13.)$$

$$X_3 = 93.27191 + 483202.017538 * JCE - 0.0036825 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (14.)$$

$$X_4 = 125.04452 - 1934.136261 * JCE + 0.0020708 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000} \quad (15.)$$

Pomoću izračunatih izraza možemo odrediti $\Delta\psi_i$ i $\Delta\varepsilon_i$:

$$\Delta\psi_i = (a_i * b_i * JCE) * \sin \left(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j} \right) \quad (16.)$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i * d_i * JCE) * \cos \left(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j} \right) \quad (17.)$$

gdje su a_i , b_i , c_i , d_i vrijednosti i -tog stupca u tablici 2, X_j je j -ti X izračunat u jednadžbama, dok $Y_{i,y}$ predstavlja vrijednost i -tog reda i j -tog stupca u tablici 2. za varijablu Y

Možemo odrediti dužinu (ψ) i nagib nutacije (ε) izražene u stupnjevima iz formule :

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000} \quad (18.)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (19.)$$

gdje je n broj redova u *tablici 2*.

2.5. Nagib ekliptike

Ravnina kojom Zemlja putuje oko Sunca naziva se ravnina ekliptike. Nagib ravnine kojom se kreće Zemlja i ostali planeti Sunčevog sustava prema ravnini ekliptike je vrlo malen, te je izračun kut nagiba izrazito bitan kako bi se mogao opisati položaj unutar Sučeva sustava.

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 = & 84381.448 - 4680.93 \left(\frac{JME}{10}\right) - 155 \left(\frac{JME}{10}\right)^2 + \\ & 1999.25 \left(\frac{JME}{10}\right)^3 - 51.38 \left(\frac{JME}{10}\right)^4 - 249.67 \left(\frac{JME}{10}\right)^5 - \\ & 39.05 \left(\frac{JME}{10}\right)^6 + 7.12 \left(\frac{JME}{10}\right)^7 + 27.87 \left(\frac{JME}{10}\right)^8 + \\ & 5.79 \left(\frac{JME}{10}\right)^9 + 2.45 \left(\frac{JME}{10}\right)^{10}\end{aligned}\quad (20.)$$

Nagib ekliptike ε (stupnjevi):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (21.)$$

2.6. Aberacija heliocentričnog radijus-vektora Zemlje

Aberacija se javlja kad se opažani položaj nebeskog tijela ne podudara sa stvarnim te je potrebno provesti korekciju

$$\Delta\tau = -\frac{20.4898}{3600 * R} \quad (22.)$$

2.7. Prividna longituda Sunca

Prividna longituda Sunca određuje se kao zbroj geocentrične dužine, nagiba nutacije i aberacije heliocentričnog radijus-vektora Zemlje

$$\lambda = \theta + \Delta\psi + \Delta\tau \quad (23.)$$

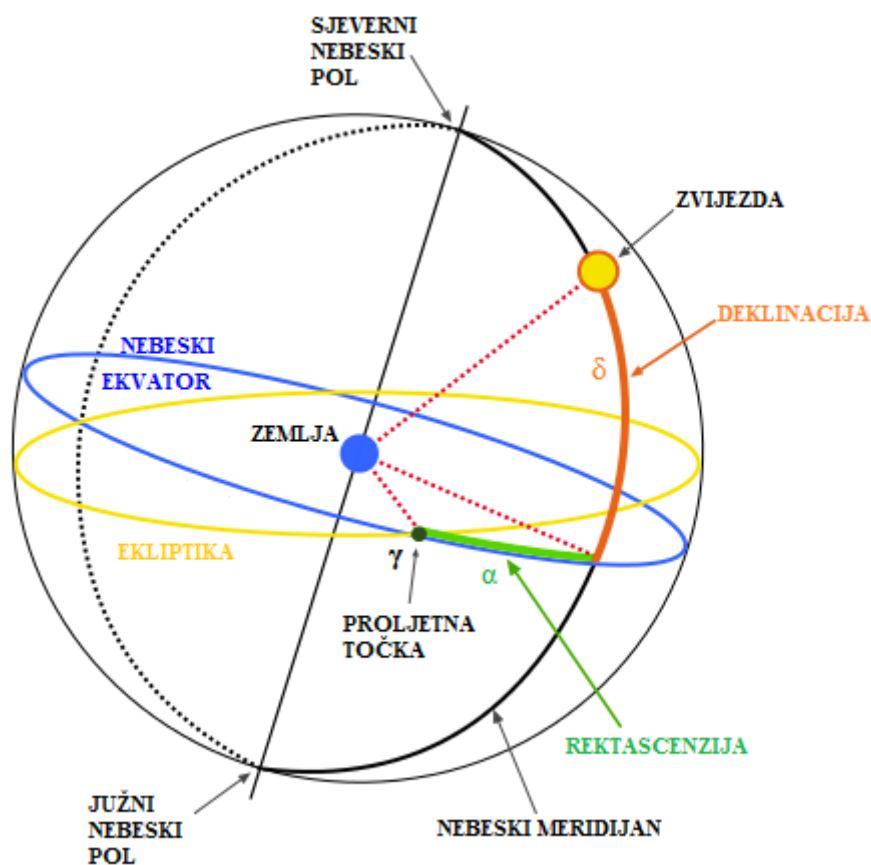
2.8. Sideralno vrijeme u Greenwich-u

$$\begin{aligned}v_0 = & 280.46061837 + 360.98564736629 * (JD - 2451545) + \\ & 0.000387933 * JC^2 - \frac{JC^3}{38710000}\end{aligned}\quad (24.)$$

$$v = v_0 + \Delta\psi * \cos(\varepsilon) \quad (25.)$$

2.9. Rektascenzija

Rektascenzija je kut mjeran po nebeskom ekvatoru te označava udaljenost između proljetne točke (presjecište ekliptike i nebeskog ekvatora) i satne kružnice promatranog tijela. Dijeli se na topocentričnu i geocentričnu rektascenziju. Kod geocentrične se u središtu koordinatnog sustava nalazi Zemlja, dok se kod topocentrične rektascenzije u točki promatranja nalazi Sunce.



Slika 6: Nebeski ekvatorski koordinatni sustav[4]

2.9.1. Geocentrična rektascenzija

$$\alpha = \text{Arc tan } 2 \left(\frac{\sin \lambda * \cos \varepsilon - \tan \beta * \sin \varepsilon}{\cos \lambda} \right) \quad (26.)$$

2.9.2. Topocentrična rektascenzija

Ponajprije je potrebno odrediti ekvatorijalnu horizontalnu paralaksu Sunca

$$\xi = \frac{8.794}{3600 * R} \quad (27.)$$

Zatim izračunavamo izraze u , x i y :

$$u = \text{Arc tan}(0.99664719 * \tan \phi) \quad (28.)$$

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} * \cos \phi \quad (29.)$$

$$y = 0.99664719 \sin u + \frac{E}{6378140} * \sin \phi \quad (30.)$$

gdje je broj 0.99664719 jednak $1-f$, a izraz f predstavlja koeficijent spljoštenosti Zemlje. ϕ je oznaka za geocentričnu širinu promatrane točke na Zemljinoj površini.

Paralaksa na rektascenziju

$$\Delta\alpha = \text{Arc tan} 2 \left(\frac{-x * \sin \xi * \sin H}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H} \right) \quad (31.)$$

Topocentrična rektascenzija izražena u stupnjevima:

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (32.)$$

2.10. Deklinacija

Deklinacija je kut kojim se određuje udaljenost središta Sunca od nebeskog ekvatora. Negativne je vrijednosti kad se Sunce nalazi južno od ekvatora a pozitivne kad je Sunce sjeverno od ekvatora, te je izražen u stupnjevima.

$$\delta = \text{Arc sin}(\sin \beta * \cos \varepsilon + \cos \beta * \sin \varepsilon * \sin \lambda) \quad (33.)$$

2.10.1. Satni kut

Satni kut predstavlja kut između ravnine nebeskog meridijana i ravnine satnog kruga nebeskog tijela.

$$H = \nu + \sigma - \alpha \quad (34.)$$

Gdje σ predstavlja geografsku dužinu promatrane točke na Zemlji. Kut se određuje kao pozitivan prema istoku, te negativan prema zapadu.

2.10.2. Topocentrična deklinacija Sunca

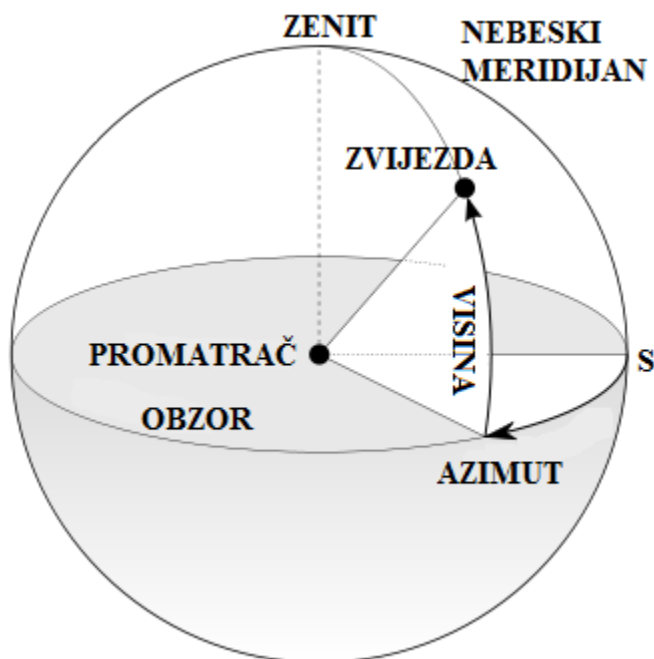
$$\delta' = \text{Arc tan } 2 * \left(\frac{(\sin \delta - y * \sin \xi) * \cos \Delta\alpha}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H} \right) \quad (35.)$$

2.10.3. Topocentrični satni kut

$$H' = H - \Delta\alpha \quad (36.)$$

2.11. Zenit

Zenit je točka koja se nalazi okomito od ravnine promatrača točno iznad točke promatrača.



Slika 7: Prikaz kutova azimuta i zenita [5]

Kut elevacije Sunca (stupnjevi):

$$e_0 = \text{Arc sin}(\sin \phi * \sin \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos H') \quad (37.)$$

Zenit:

$$\theta = 90 - e_0 \quad (38.)$$

2.12. Azimut

Azimut je kut koji se mjeri od točke promatrača, te se nalazi između ravnine koja prolazi kroz točku promatrača i vertikalne ravnine koja prolazi nebeskim polovima. Za potrebe solarne radijacije azimut se mjeri od istoka prema sjeveru, te je izražen u stupnjevima.

Topocentrični kut astronomskog azimuta:

$$\Gamma = \text{Arc tan } 2 \left(\frac{\sin H'}{\cos H' * \sin \phi - \tan \delta * \cos \phi} \right) \quad (39.)$$

Topocentrični kut azimuta za potrebe solarne radijacije:

$$\Phi = \Gamma + 180 \quad (40.)$$

3. IZRAČUN SJENA GRAĐEVINA

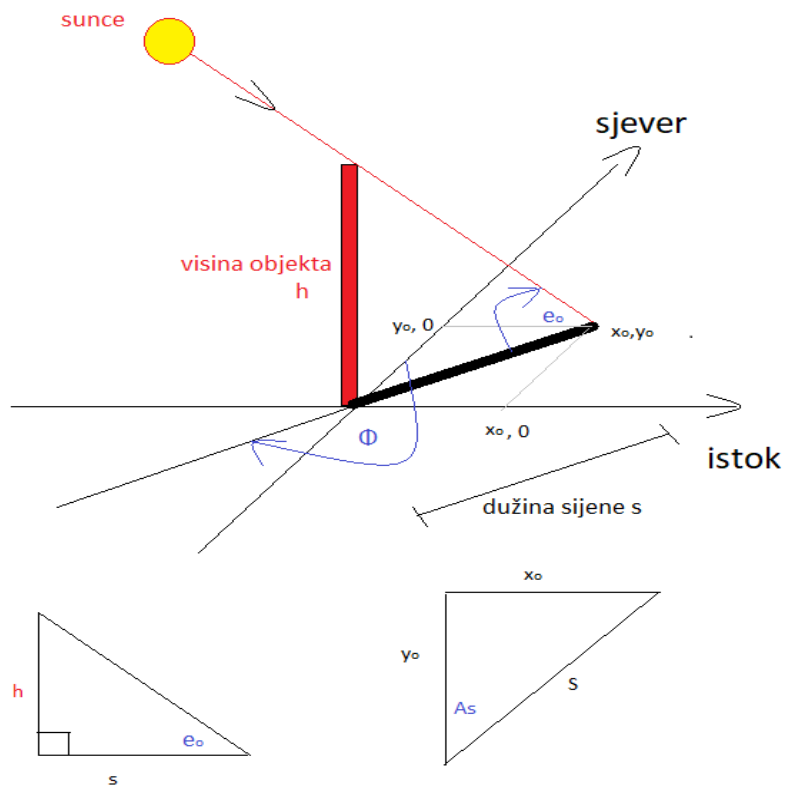
Nakon što je određen položaj Sunca u koordinatnom sustavu, izračunavamo duljinu sjena za odabrane građevine. Duljina sjene je izračunata za prvi dan svakog godišnjeg doba (solsticij i ekvinocij) za poziciju Sunca u vremenskom razdoblju od 8, 12 i 16 sati. Duljine sjena su izračunate u metrima pomoću formule:

$$s = \frac{h}{\tan(e_0)} \quad (41.)$$

gdje izraz h predstavlja visinu građevine, dok je izraz e_0 kut elevacije Sunca u određenom razdoblju dana. Također je potrebno odrediti koordinate sjene (x_0, y_0) :

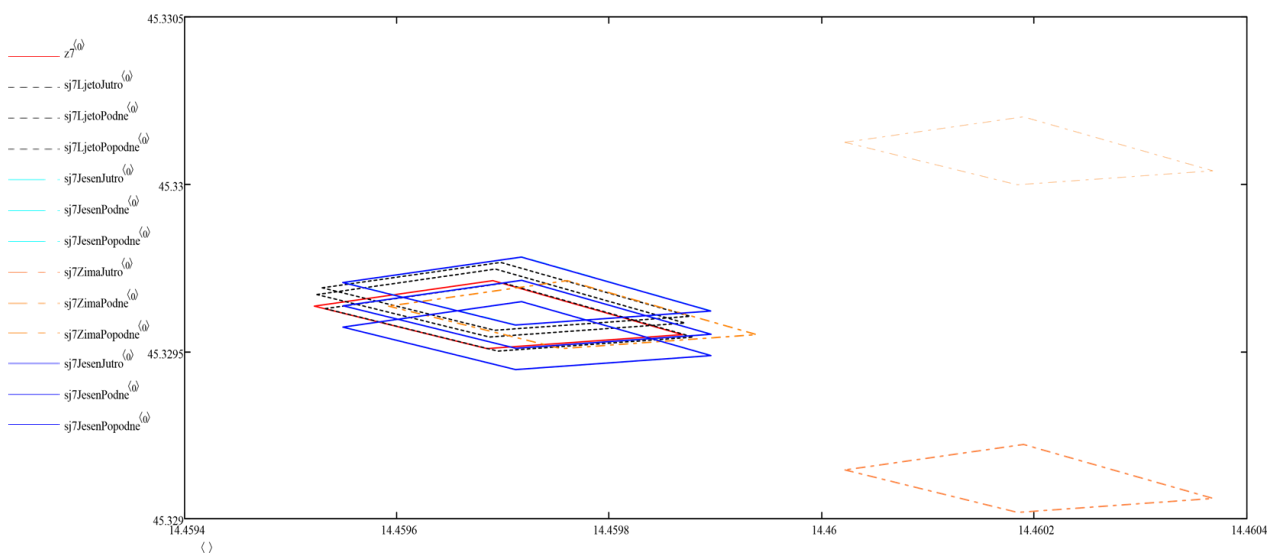
$$x_0 = h * \frac{\sin(As)}{\tan(e_0)} \quad (42.)$$

$$y_0 = h * \frac{\cos(As)}{\tan(e_0)} \quad (43.)$$



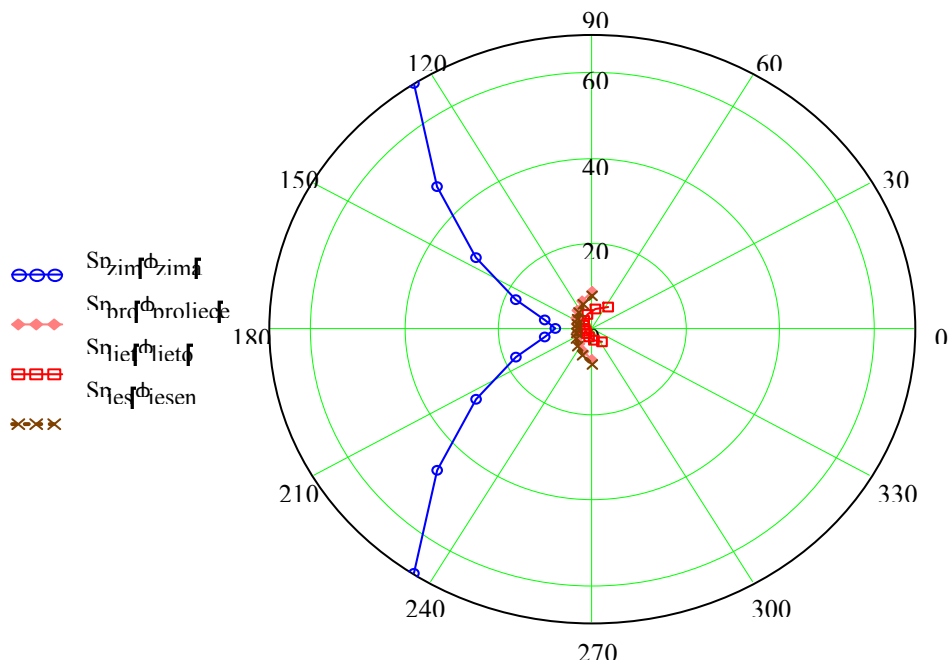
Slika 8: Grafika za izračun sjene građevine

Na posljertku dobivamo konačan prikaz dužine sjene odabrane građevine kroz godinu prikazan na slici 9.

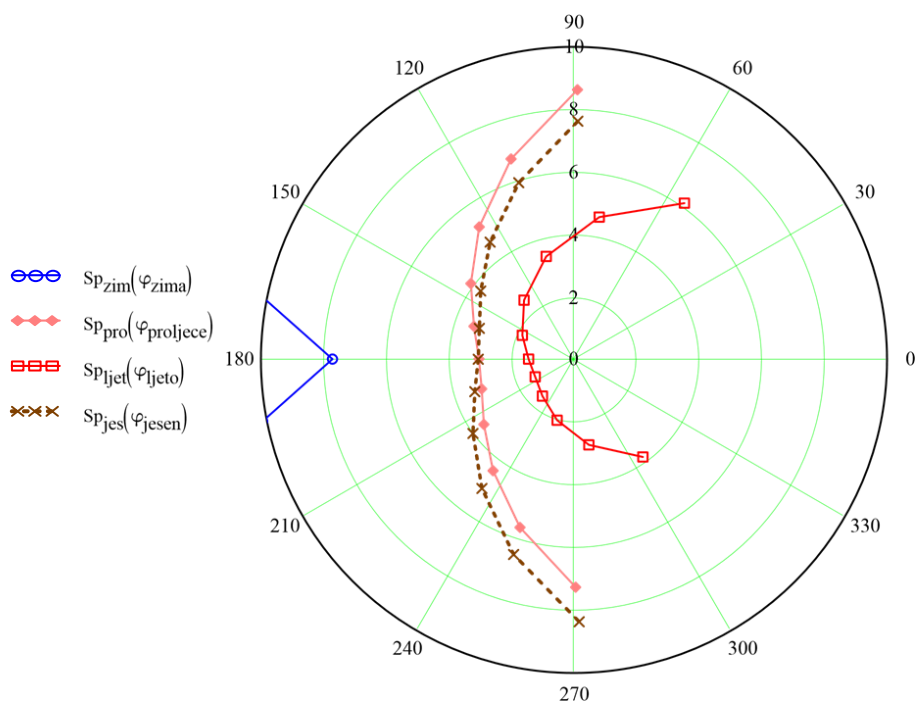


Slika 9: Kretanje sjene građevine kroz godinu

Kako bi što bolje shvatili kretanje sjene tokom dana rezultati su prebačeni u polarni koordinatni sustav, gdje se promatrani objekt nalazi u ishodištu koordinatnog sustava dok se sjena određena u različitim godišnjim razdobljima „kreće“ oko građevine.



Slika 10: Kretanje sjene građevine kroz godinu prikazano u polarnom koordinatnom sustavu



Slika 11: Kretanje sjene građevine kroz godinu prikazano u polarnom koordinatnom sustavu

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je modelirati Sunčevo zračenje u urbanom okolišu. Uz pomoć računalnog programa Mathcad određen je smjer i dužina sjene odabranih građevina na području Trsata. Položaj i dužina sjene modelirani su primjenom matematičkih jednadžbi u stvarnom vremenu.

Utvrđeno je i da promjenjivi položaj Sunca oko Zemljine osi tokom godine utječe na dužinu sjene kao i lokacija i visina građevine koje Sunce tokom dana obasjava. Kontinuiranim praćenjem prividnog gibanja i poznavanjem položaja Sunca tokom dana možemo najbolje planirati sustave za iskorištavanje Sunčeve energije. Jedan od bitnih faktora kod predviđanja i optimalnog iskorištavanja Sunčeve svjetlosti u urbanim područjima je i ekonomski. Racionalno iskorištavanje Sunčeve svjetlosti može dovesti do značajnih ušteda prilikom zagrijavanja i hlađenja prostora, te je adekvatna osvjetljenost prostorije kroz dan bitna za ugodan boravak ljudi kao i za njihovo psihičko i fizičko zdravlje. Ukoliko se prilikom izrade novih zgrada u susjedstvu ne provede solarna analiza sav trud uložen u realizaciju energetske učinkovitosti postojeće zgrade može se narušiti, stoga bi ovakve analize zbog svoje preciznosti i jednostavnosti trebalo uzeti u razmatranje prilikom projektiranja novih zgrada.

TABLICE

Tablica 1. Zemljini periodični uvjeti

Izraz	Red	A	B	C
<i>L0</i>	0	175347046	0	0
	1	3341656	4.6692568	6283.07585
	2	34894	4.6261	12566.1517
	3	3497	2.7441	5753.3849
	4	3418	2.8289	3.5231
	5	3136	3.6277	77713.7715
	6	2676	4.4181	7860.4194
	7	2343	6.1352	3930.2097
	8	1324	0.7425	11506.7698
	9	1273	2.0371	529.691
	10	1199	1.1096	1577.3435
	11	990	5.233	5884.927
	12	902	2.045	26.298
	13	857	3.508	398.149
	14	780	1.179	5223.694
	15	753	2.533	5507.553
	16	505	4.583	18849.228
	17	492	4.205	775.523
	18	357	2.92	0.067
	19	317	5.849	11790.629
	20	284	1.899	796.298
	21	271	0.315	10977.079

	22	243	0.345	5486.778
	23	206	4.806	2544.314
	24	205	1.869	5573.143
	25	202	2.458	6069.777
	26	156	0.833	213.299
	27	132	3.411	2942.463
	28	126	1.083	20.775
	29	115	0.645	0.98
	30	103	0.636	4694.003
	31	102	0.976	15720.839
	32	102	4.267	7.114
	33	99	6.21	2146.17
	34	98	0.68	155.42
	35	86	5.98	161000.69
	36	85	1.3	6275.96
	37	85	3.67	71430.7
	38	80	1.81	17260.15
	39	79	3.04	12036.46
	40	75	1.76	5088.63
	41	74	3.5	3154.69
	42	74	4.68	801.82
	43	70	0.83	9437.76
	44	62	3.98	8827.39
	45	61	1.82	7084.9

	46	57	2.78	6286.6
	47	56	4.39	14143.5
	48	56	3.47	6279.55
	49	52	0.19	12139.55
	50	52	1.33	1748.02
	51	51	0.28	5856.48
	52	49	0.49	1194.45
	53	41	5.37	8429.24
	54	41	2.4	19651.05
	55	39	6.17	10447.39
	56	37	6.04	10213.29
	57	37	2.57	1059.38
	58	36	1.71	2352.87
	59	36	1.78	6812.77
	60	33	0.59	17789.85
	61	30	0.44	83996.85
	62	30	2.74	1349.87
	63	25	3.16	4690.48
<i>L1</i>	0	628331966747	0	0
	1	206059	2.678235	6283.07585
	2	4303	2.6351	12566.1517
	3	425	1.59	3.523
	4	119	5.796	26.298
	5	109	2.966	1577.344

	6	93	2.59	18849.23
	7	72	1.14	529.69
	8	68	1.87	398.15
	9	67	4.41	5507.55
	10	59	2.89	5223.69
	11	56	2.17	155.42
	12	45	0.4	796.3
	13	36	0.47	775.52
	14	29	2.65	7.11
	15	21	5.34	0.98
	16	19	1.85	5486.78
	17	19	4.97	213.3
	18	17	2.99	6275.96
	19	16	0.03	2544.31
	20	16	1.43	2146.17
	21	15	1.21	10977.08
	22	12	2.83	1748.02
	23	12	3.26	5088.63
	24	12	5.27	1194.45
	25	12	2.08	4694
	26	11	0.77	553.57
	27	10	1.3	6286.6
	28	10	4.24	1349.87
	29	9	2.7	242.73

	30	9	5.64	951.72
	31	8	5.3	2352.87
	32	6	2.65	9437.76
	33	6	4.67	4690.48
L2	0	52919	0	0
	1	8720	1.0721	6283.0758
	2	309	0.867	12566.152
	3	27	0.05	3.52
	4	16	5.19	26.3
	5	16	3.68	155.42
	6	10	0.76	18849.23
	7	9	2.06	77713.77
	8	7	0.83	775.52
	9	5	4.66	1577.34
	10	4	1.03	7.11
	11	4	3.44	5573.14
	12	3	5.14	796.3
	13	3	6.05	5507.55
	14	3	1.19	242.73
	15	3	6.12	529.69
	16	3	0.31	398.15
	17	3	2.28	553.57
	18	2	4.38	5223.69
	19	2	3.75	0.98

<i>L3</i>	0	289	5.844	6283.076
	1	3 5	0	0
	2	17	5.49	12566.15
	3	3	5.2	155.42
	4	1	4.72	3.52
	5	1	5.3	18849.23
	6	1	5.97	242.73
<i>L4</i>	0	114	3.142	0
	1	8	4.13	6283.08
	2	1	3.84	12566.15
<i>L5</i>	0	1	3.14	0
<i>B0</i>	0	280	3.199	84334.662
	1	102	5.422	5507.553
	2	80	3.88	5223.69
	3	44	3.7	2352.87
	4	32	4	1577.34
<i>B1</i>	0	9	3.9	5507.55
	1	6	1.73	5223.69
<i>R0</i>	0	100013989	0	0
	1	1670700	3.0984635	6283.07585
	2	13956	3.05525	12566.1517
	3	3084	5.1985	77713.7715
	4	1628	1.1739	5753.3849
	5	1576	2.8469	7860.4194
	6	925	5.453	11506.77

	7	542	4.564	3930.21
	8	472	3.661	5884.927
	9	346	0.964	5507.553
	10	329	5.9	5223.694
	11	307	0.299	5573.143
	12	243	4.273	11790.629
	13	212	5.847	1577.344
	14	186	5.022	10977.079
	15	175	3.012	18849.228
	16	110	5.055	5486.778
	17	98	0.89	6069.78
	18	86	5.69	15720.84
	19	86	1.27	161000.69
	20	65	0.27	17260.15
	21	63	0.92	529.69
	22	57	2.01	83996.85
	23	56	5.24	71430.7
	24	49	3.25	2544.31
	25	47	2.58	775.52
	26	45	5.54	9437.76
	27	43	6.01	6275.96
	28	39	5.36	4694
	29	38	2.39	8827.39
	30	37	0.83	19651.05

	31	37	4.9	12139.55
	32	36	1.67	12036.46
	33	35	1.84	2942.46
	34	33	0.24	7084.9
	35	32	0.18	5088.63
	36	32	1.78	398.15
	37	28	1.21	6286.6
	38	28	1.9	6279.55
	39	26	4.59	10447.39
<i>R1</i>	0	103019	1.10749	6283.07585
	1	1721	1.0644	12566.1517
	2	702	3.142	0
	3	32	1.02	18849.23
	4	31	2.84	5507.55
	5	25	1.32	5223.69
	6	18	1.42	1577.34
	7	10	5.91	10977.08
	8	9	1.42	6275.96
	9	9	0.27	5486.78
<i>R2</i>	0	4359	5.7846	6283.0758
	1	124	5.579	12566.152
	2	12	3.14	0
	3	9	3.63	77713.77
	4	6	1.87	5573.14

	5	3	5.47	18849.23
R3	0	145	4.273	6283.076
	1	7	3.92	12566.15
R4	0	4	2.56	6283.08

Tablica 2. Periodični uvjeti za dužinu i nagib nutacija

Koeficijenti za varijablu Y					Koeficijenti za $\Delta\psi$		Koeficijenti za $\Delta\varepsilon$	
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	a	b	c	d
0	0	0	0	1	-171996	-174.2	92025	8.9
-2	0	0	2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1
0	0	0	2	2	-2274	-0.2	977	-0.5
0	0	0	0	2	2062	0.2	-895	0.5
0	1	0	0	0	1426	-3.4	54	-0.1
0	0	1	0	0	7 12	0.1	-7	
-2	1	0	2	2	-517	1.2	224	-0.6
0	0	0	2	1	-386	-0.4	200	
0	0	1	2	2	-301		129	-0.1
-2	-1	0	2	2	217	-0.5	-95	0.3
-2	0	1	0	0	-1 58			
-2	0	0	2	1	129	0.1	-70	
0	0	-1	2	2	1 23		-53	
2	0	0	0	0	6 3			
0	0	1	0	1	63	0.1	-33	

2	0	-1	2	2	-5 9		26	
0	0	-1	0	1	-5 8	-0.1	32	
0	0	1	2	1	-5 1		27	
-2	0	2	0	0	4 8			
0	0	-2	2	1	4 6		-24	
2	0	0	2	2	-3 8		16	
0	0	2	2	2	-3 1		13	
0	0	2	0	0	2 9			
-2	0	1	2	2	2 9		-12	
0	0	0	2	0	2 6			
-2	0	0	2	0	-2 2			
0	0	-1	2	1	2 1		-10	
0	2	0	0	0	1 7	-0.1		
2	0	-1	0	1	1 6		-8	
-2	2	0	2	2	-1 6	0.1	7	
0	1	0	0	1	-1 5		9	
-2	0	1	0	1	-1 3		7	
0	-1	0	0	1	-1 2		6	
0	0	2	-2	0	1 1			
2	0	-1	2	1	-1 0		5	
2	0	1	2	2	- 8		3	
0	1	0	2	2	7		-3	
-2	1	1	0	0	- 7			
0	-1	0	2	2	-7		3	

2	0	0	2	1	-7		3	
2	0	1	0	0	6			
-2	0	2	2	2	6		-3	
-2	0	1	2	1	6		-3	
2	0	-2	0	1	-6		3	
2	0	0	0	1	-6		3	
0	-1	1	0	0	5			
-2	-1	0	2	1	-5		3	
-2	0	0	0	1	-5		3	
0	0	2	2	1	-5		3	
-2	0	2	0	1	4			
-2	1	0	2	1	4			
0	0	1	-2	0	4			
-1	0	1	0	0	-4			
-2	1	0	0	0	-4			
1	0	0	0	0	-4			
0	0	1	2	0	3			
0	0	-2	2	2	-3			
-1	-1	1	0	0	-3			
0	1	1	0	0	-3			
0	-1	1	2	2	-3			
2	-1	-1	2	2	-3			
0	0	3	2	2	-3			
2	-1	0	2	2	-3			

LITERATURA

- [1] http://gis.humboldt.edu/OLM/Courses/old/GSP_101/01_IntroAndReivew/Presentation/Latitude_and_Longitude.html, pristup 10.2.2020.
- [2] Yim, J.R.; Crassidis, J.; Junkins, J. Autonomous orbit navigation of interplanetary spacecraft. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. Paper 2000, 2000–3936.
- [3] Vladis Vujnović : "Astronomija", Školska knjiga, 1989.
- [4] https://hr.wikipedia.org/wiki/Nebeski_ekvatorski_koordinatni_sustav, pristup 5.2.2020
- [5] https://hr.wikipedia.org/wiki/Horizontski_koordinatni_sustav, pristup 5.2.2020
- [6] Reda, I.; Andreas, A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised). NREL/TP-560-34302. Golden (Colorado). Sol. Energy 2008, 76, 577–589.