

Mjerenje gibanja koronalnog izbacivanja

Tomislav Donđivić

Mentor: dr.sc. Dejan Vinković

ZAVRŠNI RAD

Split, Rujan 2011.

Odsjek za fiziku
Prirodoslovno-matematički fakultet
Sveučilište u Splitu



Sažetak

Tema ovog rada je mjerenje brzine koronalnog izbacivanja korištenjem slika koje je snimio teleskop LASCO na NASA-inom satelitu SOHO. Brzine su računate za nekoliko smjerova te su nacrtani pripadni grafovi i vektorsko polje brzina. Rezultati pokazuju da su brzine koronalnog izbačaja konstantne te veće od brzine oslobođanja za Sunce.

Sadržaj

Popis slika	4
Popis tablica	6
1.....	U
vod	7
1.1. Sunčeve oluje	8
1.2. Koronalni izbačaji	9
1.3. Posljedice za Zemlju	10
2. Odabir koronalnog izbačaja i postupak obrade	11
3. Mjerenja	12
3.1. Udaljenost koronalnog izbačaja	12
3.2. Brzine koronalnog izbačaja	18
3.2.1. Brzine za smjer A	18
3.2.2. Brzine za smjer B	19
3.2.3. Brzine za smjer C	20
3.2.4. Brzine za smjer D	21
3.2.5. Brzine za smjer E	22
3.2.6. Brzine za smjer F	23
3.2.7. Brzine za smjer G	24
3.2.8. Brzine za smjer H	25
3.3. Grafovi	26
4. Graf vektorskog polja brzina	35
5. Diskusija	37
6. Zaključak	38
Popis literature	39
Dodatak 1.	40
Dodatak 2.	41

Popis slika

Slika 1. UV-slika Sunca snimljene sa ESA/NASA Solar and Heliospheric observatory	8
Slika 2. Koronalni izbačaj (CME) SOHO/NASA/ESA	9
Slika 3. Skica za izračunavanje vrijednost piksela u kilometrima	11
Slika 4. Skica prve točka na smjeru A	12
Slika 5. Prikaz druge točke smjera A i njezinih pripadnih pogrešaka '-p' i '+p'	13
Slika 6. Prikaz grafa sjaja za drugu točku smjera A	13
Slika 7. Prikaz svih smjerova korištenih u ovom radu.	14
Slika 8. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer A	26
Slika 9. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer A	27
Slika 10. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer B	27
Slika 11. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer B	28
Slika 12. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer C	28
Slika 13. Slika 10. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer C	29
Slika 14. Slika 11. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer D	29
Slika 15. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer D	30
Slika 16. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer E	30
Slika 17. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer E	31

Slika 18. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer F	31
Slika 19. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer F	32
Slika 20. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer G	32
Slika 21. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer G	33
Slika 22. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer H	33
Slika 23. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer H	34
Slika 24. Skica za izračun kuteva pojedinih smjerova	35
Slika 25. Graf vektorskog polja brzina. U ishodištu je središte Sunca na koordinatama 256,270, x os je x koordinata, y os je y koordinata	36

Popis tablica

Tablica 1. Vrijednosti kuteva smjerova	14
Tablica 2. Udaljenosti točaka od središta Sunca u pikselima. Oznake '-p' i '+p' označavaju pripadne greške za udaljenost koronalnog izbačaja 'p'	15
Tablica 3. Udaljenosti točaka od središta Sunca u kilometrima. Oznake '-p' i '+p' označavaju pripadne greške za udaljenost koronalnog izbačaja 'p'. (S = smjer, T = točka)	16
Tablica 4. Koordinate točaka na pojedinim smjerovima	17
Tablica 5. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer A ...	18
Tablica 6. Brzine za pojedine točke na smjeru A	19
Tablica 7. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer B ...	19
Tablica 8. Brzine za pojedine točke na smjeru B	19
Tablica 9. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer C ...	20
Tablica 10. Brzine za pojedine točke na smjeru C	20
Tablica 11. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer D ..	21
Tablica 12. Brzine za pojedine točke na smjeru D	21
Tablica 13. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer E ..	22
Tablica 14. Brzine za pojedine točke na smjeru E	22
Tablica 15. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer F ...	23
Tablica 16. Brzine za pojedine točke na smjeru F	23
Tablica 17. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer G ..	24
Tablica 18. Brzine za pojedine točke na smjeru G	24
Tablica 19. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer H ..	25
Tablica 20. Brzine za pojedine točke na smjeru H	25

1. Uvod

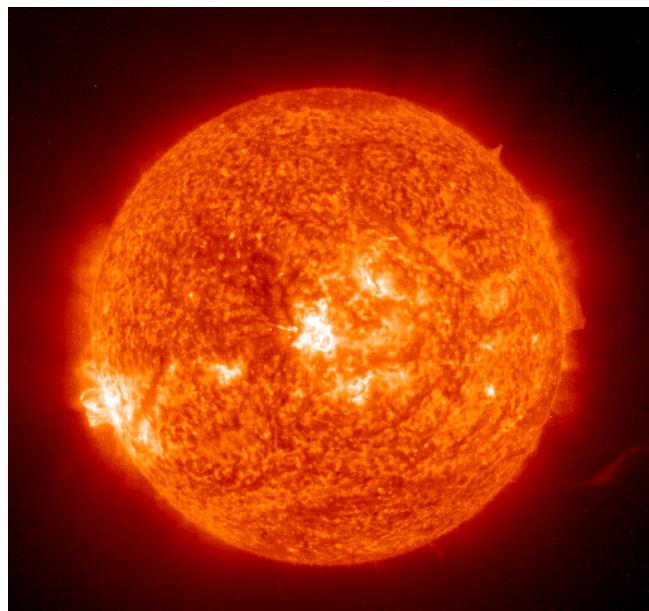
Cilj ovog završnog rada je mjerenje brzine gibanja koronalnog izbacivanja koristeći se podacima sa SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) satelita [1]. Koronalno izbacivanje mase (CME) [4] je eksplozivni događaj na Suncu kojim se izbacuje plazma, a nedavna znanstvena istraživanja pokazala su da je pojava magnetske rekonekcije odgovorna za njihov nastanak. Magnetska rekonekcija se događa kada se promjene magnetske linije dva magnetska polja koji imaju suprotan smjer i kad se povežu zajedno te se tada oslobođi energija iz osnovnog magnetskog polja u unutrašnjosti Sunca. U fizici, plazma je ionizirani plin i zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra se posebnim agregatnim stanjem. Koronalno izbacivanje mase oslobađa ogromne količine plazme (sastavljene od elektrona i protona, ali i manjih količina težih elemenata kao npr. helij, kisik, željezo...) i elektromagnetskog zračenja u prostor iznad Sunčeve površine, a promatra sa koronografom, specijalnim teleskopom koji blokira Sunčev disk u svrhu proučavanja Sunčeve atmosfere. Na SOHO satelitu nalazi ih se nekoliko, a podaci u ovom radu su korišteni s LASCO teleskopa (Large Angle and Spectrometric Coronograph) [7]. Frekvencija CME-ova ovisi o sunčevim pjegama. U solarnom minimumu (vremenu najmanje Sunčeve aktivnosti) zabilježi se jedan CME tjedno, a u solarnom maksimumu zabilježi ih se 2 do 3 po danu.

Koronalna izbacivanja uočena su tek ulaskom u svemirsko doba i prvim lansiranjima satelita. Najraniji dokaz ovih dinamičnih događaja dao je koronograf na 7th Orbiting Solar Observatory (OSO 7) satelitu u rasponu od 1971. do 1973. Godine. Lansiranjem SOHO satelita 1995. godine, CME-ovi se svakodnevno prate [5].

U ovom radu mjerena je brzina CME-a koji se zbio 18.8.2010. godine.

1.1. Sunčeve oluje

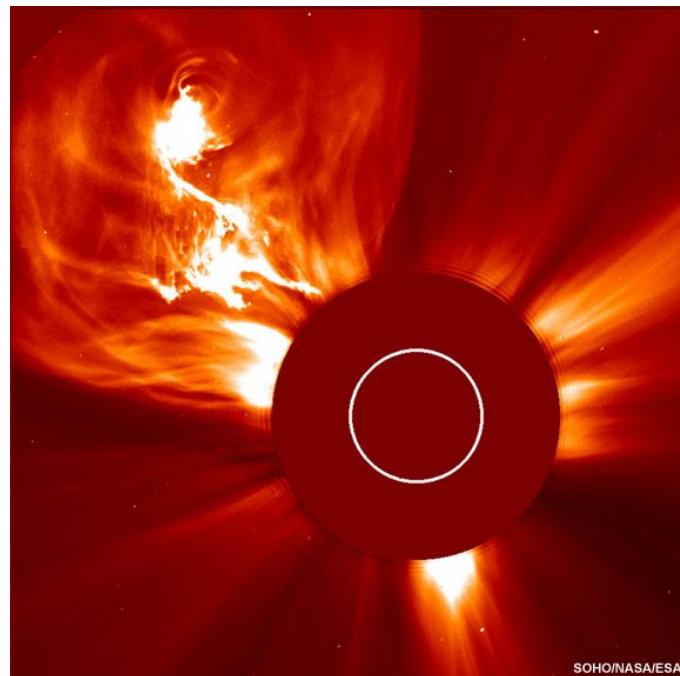
Sunce posjeduje magnetsko polje koje je u prosjeku dva puta jače od Zemljinog, a najsnažnija polja mogu biti i do 4000 puta snažnija od Zemljinog. Zahvaljujući magnetografu zabilježena su jaka magnetska polja u Sunčevim pjegama čije su vrijednosti dosezale 0,4 Tesla [6]. Ustanovljeno je da pjege nastaju kao posljedica koncentriranja jakih magnetskih polja koja sprječavaju miješanje plina čime je spriječen pritok topline. Zbog toga su Sunčeve pjege hladnija mjesta u odnosu na ostala na Suncu. U tako jakim magnetskim poljima pohranjena je ogromna energija, a u određenim situacijama ona može biti oslobođenja prilikom čega dolazi do Sunčevih oluja (Slika 1.).



Slika 1. UV-slika Sunca snimljena pomoću ESA/NASA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) satelita (slika preuzeta od ESA/NASA [8])

1.2. Koronalni izbačaji

U Sunčeve olje ubrajamo Sunčeve bljeskove i eruptivne izbačaje poznate pod nazivom koronalni izbačaji mase (Slika 2.). Ti izbačaji su najdinamičnije pojave u Sunčevu atmosferi, a značajne su jer utječu na međuplanetarni prostor, pa tako i na Zemljinu magnetosferu. Koronalna erupcija je proces u kojem se pohranjena energija oslobođa u obliku kinetičke energije velike mase plazme koja biva izbačena u međuplanetarni prostor velikim brzinama. Radi se o velikim količinama plazme ($>10^{13}$ kg) i velikim brzinama (reda veličine 1000 km/s) [6]. Naziv koronalni izbačaj označava proces u atmosferi Sunca koji vodi do izbačaja plazme i pridruženog magnetskog toka u međuplanetarni prostor. Prvi udarni val erupcije na svom putu ubrzava čestice (protone i elektrone) te nastaje tok visoko-energetskih čestica koje stiže na Zemlju za otprilike 30 - 60 minuta dok je koronalnim izbačajima potrebno 1 do 5 dana da prođu udaljenost od Sunca do Zemlje, ovisno o njihovoj početnoj brzini.



Slika 2. Koronalni izbačaj (CME) SOHO/NASA/ESA (slika preuzeta sa space.com [9])

Koronalni izbačaji opažaju se koronografima, specijalnim teleskopima koji blokiraju Sunčev disk i daju nam dvodimenzionalnu projekciju erupcije. Koronalni izbačaji poprimaju različite morfološke oblike, ali većina ih ima trodijelnu strukturu - putujući svjetli luk kojeg slijede tamna šupljina i eruptivna prominencija, a ovise i o Sunčevom 11-godišnjem ciklusu. Tijekom minimuma broj izbačaja je rijedak, svega nekoliko na tjedan, za razliku od maksimuma kada se zabilježi desetak izbačaja na dan.

Izbačaji se mogu opisati i na sljedeći način. U magnetskoj strukturi koja postoji na Suncu stvaraju se zatvorene petlje magnetskog polja čija nožišta su vezana uz neko aktivno područje. Diferencijalna rotacija Sunca (različiti dijelovi Sunca rotiraju različitim brzinama) i konvektivna gibanja (usmjereni strujanja fluida, topliji se giba prema hladnjem) pomiču nožišta silnica inducirajući električne struje i tako unoseći slobodnu energiju u sustav petlji. Dolazi do gubitka ravnoteže, petlje se naglo šire i nastaje koronalni izbačaj. Koji se točno procesi odvijaju unutar samog izbačaja još uvijek nije istraženo i poznato.

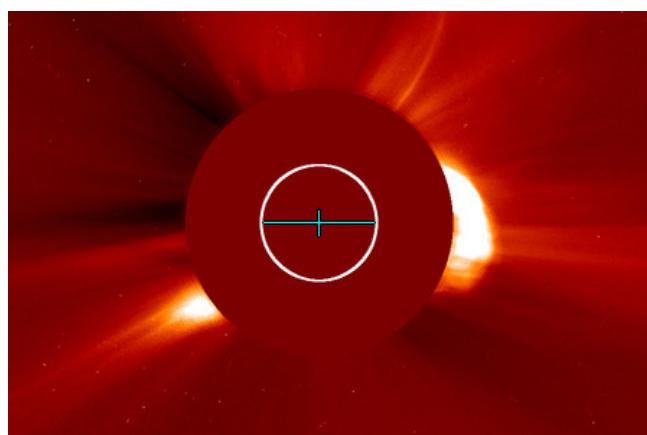
1.3. Posljedice za Zemlju

Nakon erupcije magnetoplazma pristiže do Zemlje. Interakcije magnetskog oblaka sa magnetskim poljem Zemlje vrlo su burne i dolazi do pojave geomagnetskih oluja, tj. privremenog ometanja Zemljine magnetosfere. Posljedice geomagnetskih oluja mogu se očitovati u ometanju rada sistema kao GPS, komunikacijskih satelita, električnih mreža i dalekovoda. Prilikom prespajanja magnetskih silnica nabijenim česticama visokih energija otvara se prolaz u magnetsko polje Zemlje i one se zadržavaju u polarnim područjima gdje tvore polarnu svjetlost [4].

2. Odabir koronalnog izbačaja i postupak obrade

U ovom radu brzine koronalnog izbačaja mjerene su za događaj koji se zbio 18.8.2010. godine. Korišteno je 5 različitih slika koje su slikane u razmaku 12 minuta počevši od 5:48 sati ujutro (Dodatak 1.). Odabrano je 8 različitih smjerova izbačaja kako bi se dobilo više raznovrsnijih vrijednosti brzina. Smjerovi su označeni slovima A,B,C,D,E,F,G i H. Slike su obrađene u Subaru Image Processor Makali i programu ([3]) u kojem se lako mogu označiti koordinate točaka kroz koje su crte povučene. Početna točka svih crta je središte Sunca koje se na slikama nalazi na koordinatama (257,260). Na svakoj slici za pojedini smjer označena su mjesta i koordinate točke gdje se nalazi vrh koronalnog izbačaja. Svaka crta sadrži 5 točaka, osim crte A koja sadrži 4 točke. Udaljenosti vrha koronalnog izbačaja na svakoj crti od središta Sunca izraženo je u pikselima i kilometrima. Za svaku točku zabilježene su tri udaljenosti od Sunca kako bi dobili interval i uzeli u obzir moguću pogrešku prilikom određivanja vrha koronalnog izbačaja. Međusobnim oduzimanjem udaljenosti točaka na pojedinoj crti dobili smo put koji je koronalni izbačaj prešao za 12 minuta. Dijeljeći pređeni put sa vremenom dobili smo brzinu izbačaja u pojedinoj točki.

Udaljenost se mjerila u pikselima. Svaki piksel odgovara određenoj udaljenosti u stvarnosti izraženoj u kilometrima. Promjer Sunca u stvarnosti iznosi $1,4 \times 10^6$ kilometara. Promjer Sunca na slici iznosi 76 piksela. Vrijednost jednog piksela u kilometrima dobije se dijeleći promjer Sunca u stvarnosti sa promjerom Sunca na slici, pa je tako jedan piksel jednak $1,8421 \times 10^4$ kilometara. Na slici vodoravna plava crta označava promjer Sunca koji iznosi 76 piksela, a okomita središte Sunca (Slika 3.).



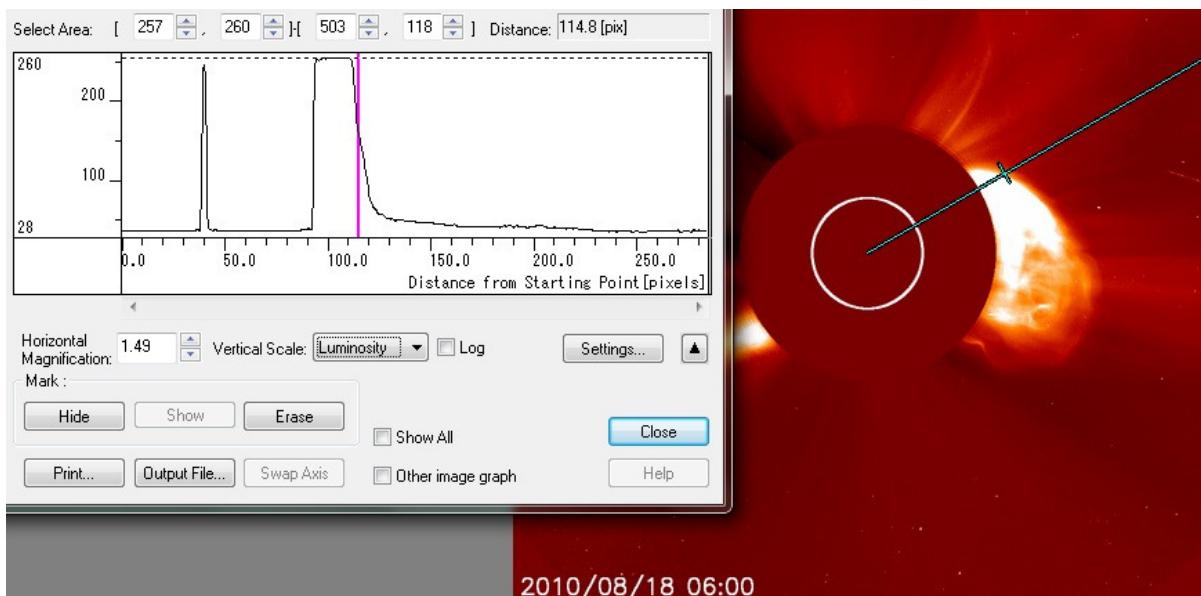
Slika 3. Skica za izračunavanje vrijednost piksela u kilometrima na način opisan poviše slike

3. Mjerenja

U ovom poglavlju nalaze se izmjereni podaci udaljenosti koronalnog izbačaja od Sunca u svakoj točki i brzine izbačaja u svakoj točki za sve smjerove (Slika 7.) te grafovi ovisnosti udaljenosti i brzine o vremenu.

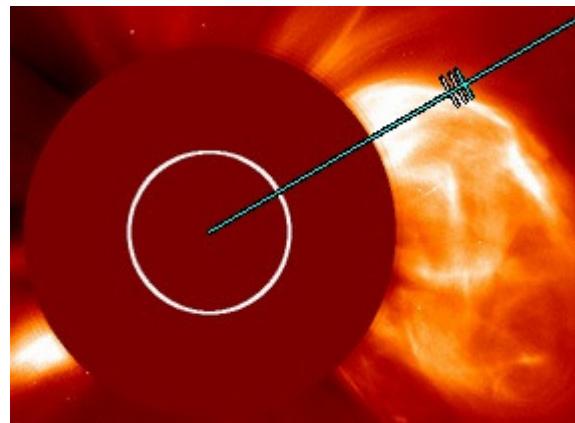
3.1. Udaljenost koronalnog izbačaja

Na smjeru A pokazat ćemo kako se mjerila udaljenost koronalnog izbačaja. Točke kroz koje prolazi smjer A su središte Sunca (257,260) i točka (503,118). Na smjeru A se nalaze 4 točke koje označavaju vrh koronalnog izbačaja. Koordinate prve točke su (356,203), a nalazi se na udaljenosti od 114,8 piksela od središta Sunca. (Slika 4.).

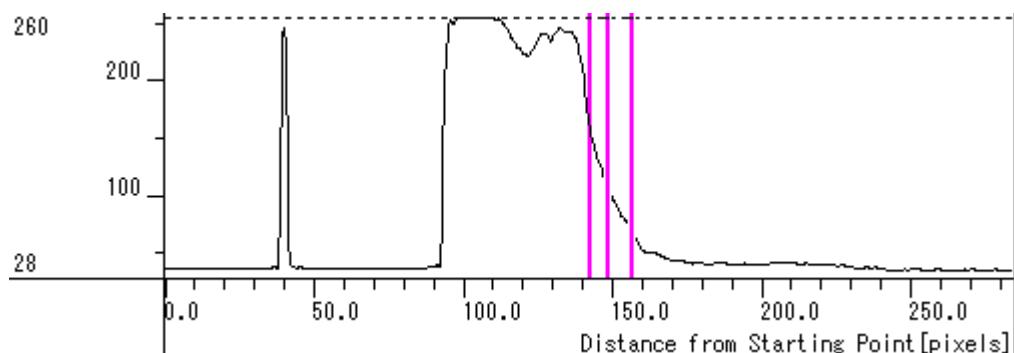


Slika 4. Skica prve točka na smjeru A. Plava crta označava smjera A, a mala okomita plava crtica na smjeru označava vrh izbačaja (prvu točku) na tom smjeru. Subaru Image Processor: Makali`i [3] program automatski izračunava udaljenost okomite plave crte od središta Sunca preko definiranih koordinata središta Sunca i koordinate gdje se vrh koronalnog izbačaja nalazi (okomita plava crta). Analogno kao za smjer A i prvu točku udaljenost se računa za sve ostale smjerove i točke vrha koronalnog izbačaja na njima

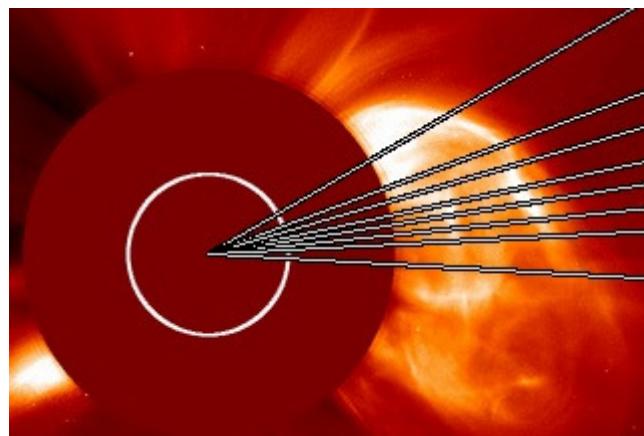
Uz udaljenosti na vrhu koronalnog izbačaja očitane pomoću programa Subaru Image Processor: Makali`i [3], na isti način smo dobili i pripadne greške uvezvi '-p' – minimalnu udaljenost i '+p' – maksimalnu udaljenost (Slika 5.). Pripadne pogreške se određuju iz grafa koji prikazuje sjaj (koronalni izbačaj ima intezivan sjaj u odnosu na okolni dio gdje ga nema) kojeg dobijemo kada konstruiramo smjerove. Pošto graf sjaja opada, na njemu izaberemo dodatne dvije točke kako bi dobili '-p' i '+p' udaljenosti (Slika 6.).



Slika 5. Prikaz druge točke smjera A i njezinih pripadnih pogrešaka '-p' i '+p'



Slika 6. Prikaz grafa sjaja za drugu točku smjera A na kojoj su rozim okomitim linijama označene minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti



Slika 7. Prikaz svih smjerova korištenih u ovom radu. Smjerovi redom su: A,B,D,C,E,F,G i H

Tablica 1. Vrijednosti kuteva smjerova u odnosu na referentni smjer. Za referentni smjer definiran je novi smjer koji prolazi točkama 257,260 (središte Sunca) i 356,260. U poglavljju 4. opisan je način određivanja kuteva smjerova (Slika 24.)

Smjer	Smjer A	Smjer B	Smjer C	Smjer D	Smjer E	Smjer F	Smjer G	Smjer H
Kut ($^{\circ}$)	30	20	12	16	9	6	3	3 20'

Tablica 2. Udaljenosti točaka od središta Sunca u pikselima. Oznake '-p' i '+p' označavaju pripadne greške za udaljenost koronalnog izbačaja 'p'

SMJER	TOČKA	-p	p	+p	SMJER	TOČKA	-p	p	+p
A	1	112,8	114,8	120,1	E	1	112,0	113,9	121,1
	2	139,0	143,0	147,7		2	136,7	140,4	150,6
	3	171,1	175,2	183,9		3	170,5	175,9	184,9
	4	204,7	208,0	210,1		4	206,0	209,6	225,9
B	1	101,3	104,4	112,7	F	5	239,2	243,4	255,2
	2	125,3	129,1	133,5		1	113,7	115,5	121,4
	3	158,9	163,9	170,3		2	137,5	141,7	154,2
	4	192,4	198,7	201,3		3	175,0	187,5	186,9
	5	222,8	228,5	236,0		4	209,3	211,9	223,8
C	1	109,7	112,7	120,0	G	5	243,5	247,0	251,8
	2	135,8	137,0	144,2		1	113,1	116,7	125,0
	3	166,1	177,6	187,3		2	137,5	145,8	160,2
	4	200,6	203,6	213,3		3	172,6	189,3	197,0
	5	225,5	235,8	241,8		4	213,1	217,3	226,8
D	1	106,2	108,0	117,3	H	5	244,6	250,6	252,3
	2	130,2	133,3	142,0		1	116,7	120,2	127,4
	3	160,0	168,5	175,3		2	145,8	159,5	170,2
	4	198,8	207,4	208,6		3	188,7	199,4	211,9
	5	234,0	241,4	248,8		4	226,2	232,7	242,9
						5	244,6	252,4	254,0

Tablica 3. Udaljenosti točaka od središta Sunca u kilometrima. Oznake '-p' i '+p' označavaju pripadne greške za udaljenost koronalnog izbačaja 'p'. (S = smjer, T = točka)

S	T	-p	p	+p	S	T	-p	p	+p
A	1	2077891,62	2114733,67	2210523,03	E	1	2063154,81	2098154,74	2230786,12
	2	2560522,48	2634206,57	2720785,39		2	2518154,12	2586311,91	2774206,36
	3	3151837,38	3227363,58	3387626,49		3	3140784,76	3240258,29	3406047,52
	4	3770783,82	3831573,20	3870257,35		4	3794731,15	3861046,84	4161309,54
B	1	1866049,83	1947102,34	2076049,51	F	5	4406309,18	4483677,48	4701045,58
	2	2308154,43	2378154,32	2459206,83		1	2094470,54	2127628,38	2236312,43
	3	2927100,87	3019205,99	3137100,55		2	2532890,94	2610259,24	2840522,05
	4	3544205,21	3660257,68	3708152,33		3	3223679,38	3453942,18	3442889,57
	5	4104204,37	4209204,23	4347361,90		4	3855520,53	3903415,19	4122625,39
C	1	2020786,44	2076049,58	2210523,10	G	5	4485519,59	4549993,17	4638414,09
	2	2501575,2	2523680,45	2656311,80		1	2083417,93	2149733,61	2302628,12
	3	3059732,25	3271574,04	3450257,98		2	2532890,94	2685785,44	2951048,20
	4	3695257,62	3750520,69	3929204,63		3	3179468,92	3487100,03	3628941,92
	5	4153941,14	4343677,69	4454203,84		4	3925520,43	4002888,73	4177888,47
D	1	1956312,86	1989470,7	2160786,23	H	5	4505782,72	4616308,86	4647624,60
	2	2398417,46	2455522,63	2615785,55		1	2149733,62	2214207,20	2346838,58
	3	2947364	3103942,71	3229205,68		2	2685785,45	2938153,48	3135258,45
	4	3662099,77	3820520,58	3842625,81		3	3476047,42	3673152,38	3903415,19
	5	4310519,85	4446835,43	4583151,02		4	4166835,86	4286572,51	4474466,97
						5	4505782,72	4649466,71	4678940,35

Tablica 4. X i Y koordinate točaka na pojedinim smjerovima

SMJER	TOČKA	X koordinata	Y koordinata	SMJER	TOČKA	X koordinata	Y koordinata
A	1	356	203	E	1	369	242
	2	381	189		2	395	238
	3	408	173		3	431	232
	4	436	156		4	464	227
B	1	356	223		5	497	222
	2	377	215	F	1	372	248
	3	411	203		2	398	245
	4	443	191		3	443	241
	5	471	181		4	468	238
C	1	367	237		5	503	234
	2	391	232	G	1	373	254
	3	431	223		2	403	252
	4	456	218		3	446	250
	5	487	211		4	474	249
D	1	361	230		5	507	247
	2	385	223	H	1	377	267
	3	419	213		2	416	269
	4	456	202		3	456	271
	5	489	193		4	489	273
					5	509	274

3.2. Brzine koronalnog izbačaja

Nakon što smo u prethodnom poglavlju dobili udaljenosti vrha koronalnog izbačaja na svakoj slici u razmaku od 12 minuta za svaki smjer, možemo izračunati pripadne brzine u pojedinim točkama. Brzine se računaju tako da se udaljenost koju je koronalni izbačaj prešao podijeli sa vremenom, a to je 12 minuta. Udaljenost koju je izbačaj prešao računamo tako da za svaku točku (počevši od točke 2) oduzmemos vrijednost udaljenosti prethodne točke. (Na primjer, ako je u točki 2 udaljenost 120 piksela, a na točki 1 100 piksela, udaljenost koju je prešao izbačaj je 20 piksela). Brzinu računamo za točke na svih 8 smjerova, uključujući i za njihove pripadne greške.

Srednja udaljenost dviju točaka označena je sa ' p ', maksimalna udaljenost sa ' $+p$ ', a minimalna sa ' $-p$ '. Maksimalna udaljenost dvije točke se dobije oduzimanjem maksimalne udaljenosti jedne točke i najmanje udaljenosti njoj prethodne točke. (Na primjer, ako je ' $+p$ ' udaljenost točke 2 na smjeru A 100 piksela, a ' $-p$ ' udaljenost točke 1 iznosi 70 piksela, tada maksimalna udaljenost iznosi 30 piksela). Minimalna udaljenost se dobiva na sličan način oduzimanjem ' $-p$ ' udaljenosti neke točke od ' $+p$ ' udaljenosti njoj prethodne točke.

3.2.1. Mjerenja brzina za smjer A

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer A nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 5.

Tablica 5. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer A

Točke (km)	$-p$	Točke (km)	p	Točke (km)	$+p$
$-p_4 - p_3+$	383157,32	$p_4 - p_3$	604209,62	$+p_4 - p_3-$	718419,975
$-p_3 - p_2+$	431051,985	$p_3 - p_2$	593157,005	$+p_3 - p_2-$	827104,0225
$-p_2 - p_1+$	349999,475	$p_2 - p_1$	519472,905	$+p_2 - p_1-$	642893,7725

Dijeleći vrijednosti iz tablice 5. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 6.). Brzina v_1 je brzina u točki 2, v_2 u točki 3, a v_3 u točki 4.

Tablica 6. Brzine za pojedine točke na smjeru A

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v_3	532,162944	v_3	839,180028	v_3	997,805521
v_2	598,683313	v_2	823,829174	v_2	1148,75559
v_1	486,110382	v_1	721,490146	v_1	892,908017

3.2.2. Mjerenja brzina za smjer B

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer B nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 7.

Tablica 7. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer A

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	396052	p5 - p4	548946,545	+p5 - p4-	803156,69
-p4 - p3+	407104,7	p4 - p3	641051,67	+p4 - p3-	781051,46
-p3 - p2+	467894	p3 - p2	641051,67	+p3 - p2-	828946,125
-p2 - p1+	232104,9	p2 - p1	431051,985	+p2 - p1-	593157,005

Dijeleći vrijednosti iz tablice 7. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 8.). Brzina v_1 je brzina u točki 2, v_2 u točki 3, v_3 u točki 4, a v_4 u točki 5.

Tablica 8. Brzine za pojedine točke na smjeru B

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v_4	550,0723	v_4	762,425757	v_4	1115,495403
v_3	565,4231	v_3	890,349542	v_3	1084,793694
v_2	649,8528	v_2	890,349542	v_2	1151,314063
v_1	322,3679	v_1	598,683313	v_1	823,8291736

3.2.3. Mjerenja brzina za smjer C

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer C nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 9.

Tablica 9. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer C

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	224736,5	p5 - p4	593157,005	+p5 - p4-	758946,23
-p4 - p3+	244999,6	p4 - p3	478946,65	+p4 - p3-	869472,38
-p3 - p2+	403420,4	p3 - p2	747893,615	+p3 - p2-	948682,7875
-p2 - p1+	291052,2	p2 - p1	447630,908	+p2 - p1-	635525,3625

Dijeleći vrijednosti iz tablice 9. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 10.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 10. Brzine za pojedine točke na smjeru C

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	312,134	v4	823,829174	v4	1054,091986
v3	340,2773	v3	665,203681	v3	1207,600528
v2	560,3062	v2	1038,74113	v2	1317,614983
v1	404,2392	v1	621,709594	v1	882,6741146

3.2.4. Mjerenja brzina za smjer D

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer D nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 11.

Tablica 11. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer D

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	467894	p5 - p4	626314,85	+p5 - p4-	921051,25
-p4 - p3+	432894,1	p4 - p3	716577,873	+p4 - p3-	895261,815
-p3 - p2+	331578,5	p3 - p2	648420,08	+p3 - p2-	830788,2275
-p2 - p1+	237631,2	p2 - p1	466051,933	+p2 - p1-	659472,695

Dijeleći vrijednosti iz tablice 11. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 12.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 12. Brzine za pojedine točke na smjeru D

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	649,8528	v4	869,881736	v4	1279,237847
v3	601,2418	v3	995,247045	v3	1243,419188
v2	460,5256	v2	900,583444	v2	1153,872538
v1	330,0434	v1	647,294351	v1	915,9342986

3.2.5. Mjerenja brzina za smjer E

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer E nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 13.

Tablica 13. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer E

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	244999,6	p5 - p4	622630,645	+p5 - p4-	906314,43
-p4 - p3+	388683,6	p4 - p3	620788,543	+p4 - p3-	1020524,785
-p3 - p2+	366578,4	p3 - p2	653946,388	+p3 - p2-	887893,405
-p2 - p1+	287368	p2 - p1	488157,163	+p2 - p1-	711051,565

Dijeleći vrijednosti iz tablice 13. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 14.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 14. Brzine za pojedine točke na smjeru E

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	340,2773	v4	864,764785	v4	1258,770042
v3	539,8384	v3	862,206309	v3	1417,395535
v2	509,1367	v2	908,258872	v2	1233,185285
v1	399,1222	v1	677,996059	v1	987,5716181

3.2.6. Mjerenja brzina za smjer F

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer F nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 15.

Tablica 15. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer F

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	362894,2	p5 - p4	646577,978	+p5 - p4-	782893,5625
-p4 - p3+	412631	p4 - p3	449473,01	+p4 - p3-	898946,02
-p3 - p2+	383157,3	p3 - p2	843682,945	+p3 - p2-	909998,635
-p2 - p1+	296578,5	p2 - p1	482630,855	+p2 - p1-	746051,5125

Dijeleći vrijednosti iz tablice 15. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 16.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 16. Brzine za pojedine točke na smjeru F

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	504,0197	v4	898,024969	v4	1087,35217
v3	573,0986	v3	624,268069	v3	1248,536139
v2	532,1629	v2	1171,78187	v2	1263,886993
v1	411,9146	v1	670,320632	v1	1036,182656

3.2.7. Mjerenja brzina za smjer G

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer G nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 17.

Tablica 17. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer G

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	327894,2	p5 - p4	613420,133	+p5 - p4-	722104,18
-p4 - p3+	296578,5	p4 - p3	515788,7	+p4 - p3-	998419,555
-p3 - p2+	228420,7	p3 - p2	801314,588	+p3 - p2-	1096050,988
-p2 - p1+	230262,8	p2 - p1	536051,828	+p2 - p1-	867630,2775

Dijeleći vrijednosti iz tablice 17. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 18.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 18. Brzine za pojedine točke na smjeru G

Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	455,4087	v4	851,972406	v4	1002,922472
v3	411,9146	v3	716,373194	v3	1386,693826
v2	317,251	v2	1112,93693	v2	1522,293038
v1	319,8095	v1	744,516427	v1	1205,042052

3.2.8. Mjerenja brzina za smjer H

Podaci za udaljenost koronalnog izbačaja u kilometrima za smjer H nalaze se u tablici 3. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka nalaze se u tablici 19.

Tablica 19. Minimalne, srednje i maksimalne udaljenosti dviju točaka za smjer H

Točke (km)	-p	Točke (km)	p	Točke (km)	+p
-p5 - p4+	31315,74	p5 - p4	362894,193	+p5 - p4-	512104,495
-p4 - p3+	263420,7	p4 - p3	613420,133	+p4 - p3-	998419,555
-p3 - p2+	340789	p3 - p2	734998,898	+p3 - p2-	1217629,753
-p2 - p1+	338946,9	p2 - p1	723946,283	+p2 - p1-	985524,8375

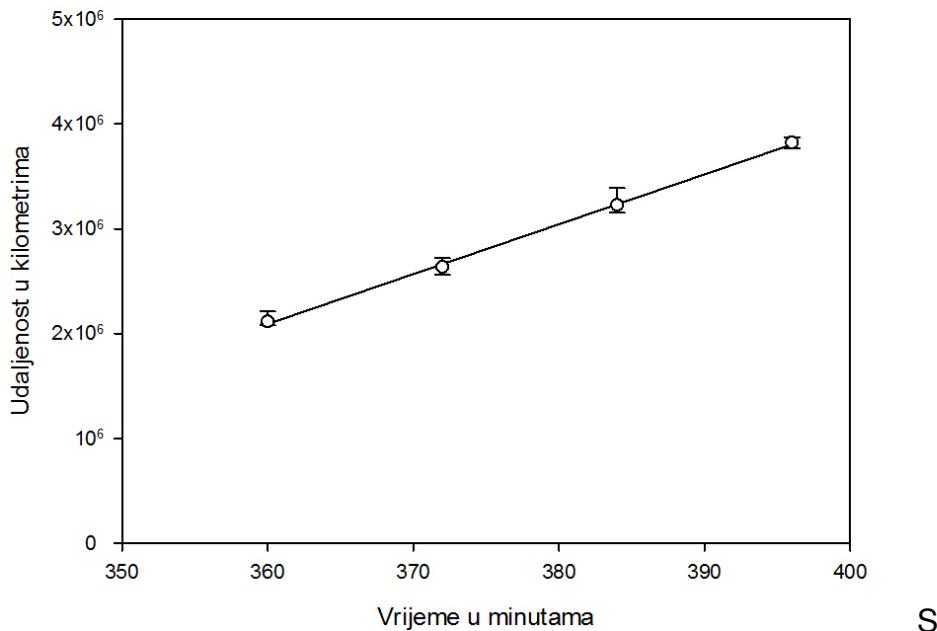
Dijeleći vrijednosti iz tablice 19. sa vremenom od 12 minuta (720 sekundi) dobivamo brzine u pojedinim točkama (Tablica 20.). Brzina v1 je brzina u točki 2, v2 u točki 3, v3 u točki 4, a v4 u točki 5.

Tablica 20. Brzine za pojedine točke na smjeru H

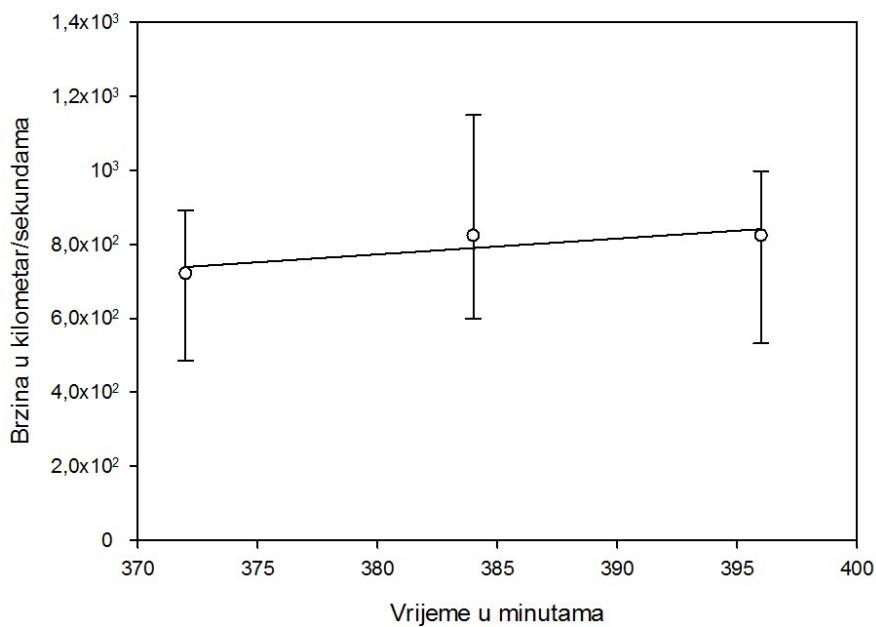
Brzine (km/s)	-v	Brzine (km/s)	v	Brzine (km/s)	+v
v4	43,49409	v4	504,019712	v4	711,2562431
v3	365,862	v3	851,972406	v3	1386,693826
v2	473,318	v2	1020,8318	v2	1691,152434
v1	470,7595	v1	1005,48095	v1	1368,784497

3.3 Grafovi

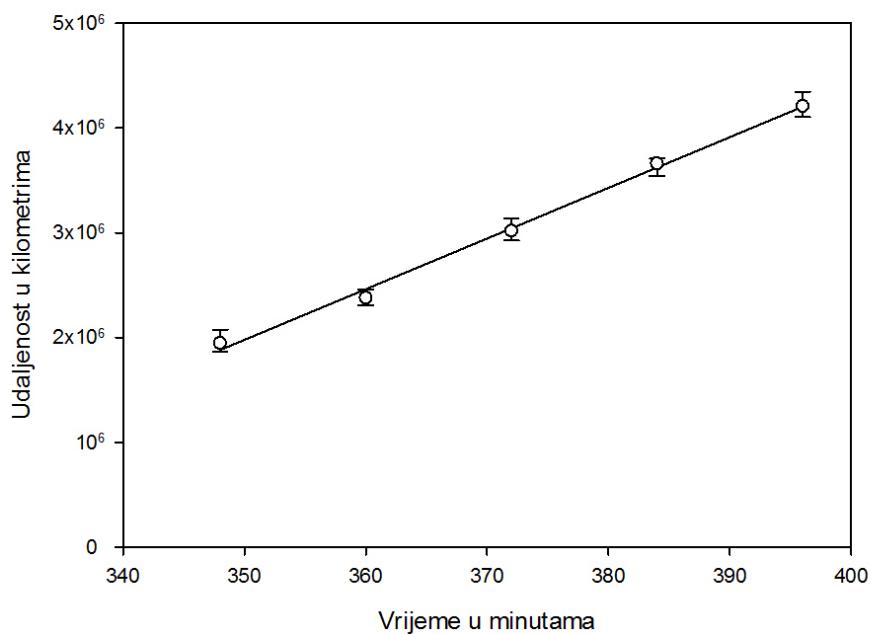
Prikaz grafova ovisnosti vremena o položaju i brzini za svaki pojedini smjer preko kojih vidimo kako se izbačaj udaljavao od Sunca i brzinu koju je postizao. Za izradu grafova korišten je SigmaPlot program ([2]).



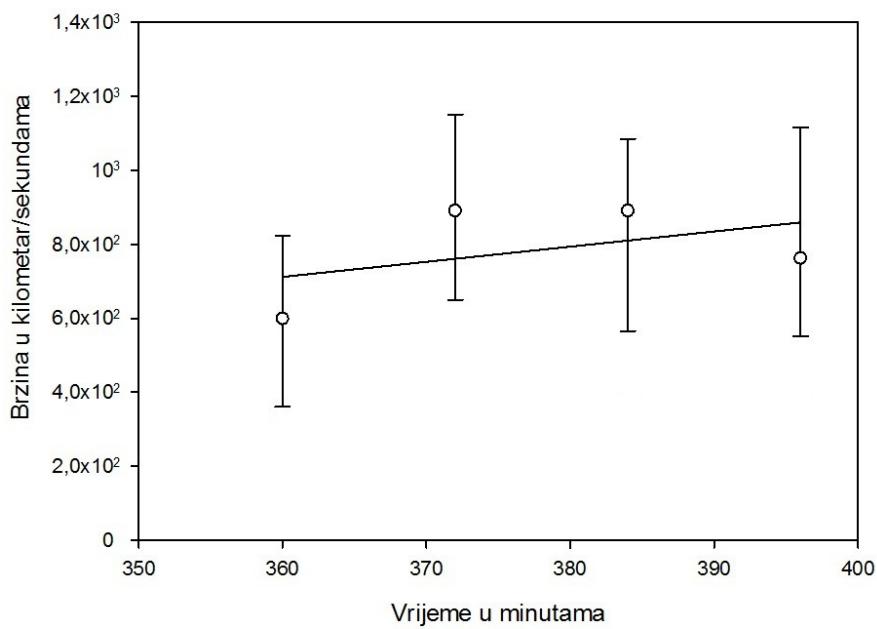
Slika 8. Graf prikazuje ovisnost vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer A. X os prikazuje vrijeme u minutama koje je prošlo od ponoći dana u kojem je slika snimljena (6:00 ujutro = 360 minuta), a Y os prikazuje koliko daleko se izbačaj nalazi od Sunca u pojedinom trenutku vremena. Vertikalne linije prikazuju pripadnu pogrešku u mjeranjima. Isto vrijedi i za sve ostale grafove koji prikazuju ovisnost udaljenosti i vremena



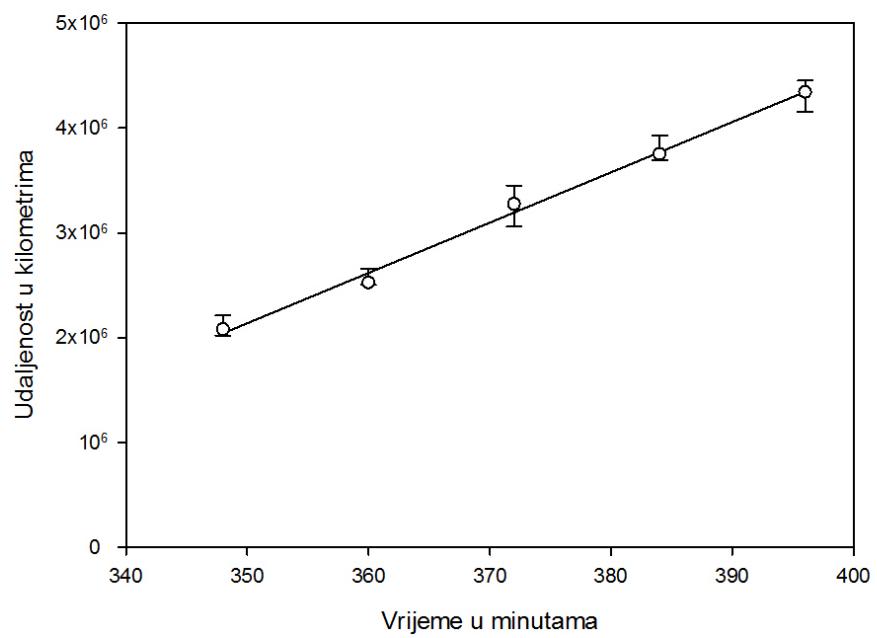
Slika 9. Graf ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer A. X os prikazuje vrijeme u minutama koje je prošlo od ponoći dana u kojem je slika snimljena (6:00 ujutro = 360 minuta), a Y os prikazuje iznos brzine u kilometar/sekundama. Vertikalne linije prikazuju pripadnu pogrešku u mjerjenjima. Isto vrijedi i za sve ostale grafove koji prikazuju ovisnost brzine i vremena



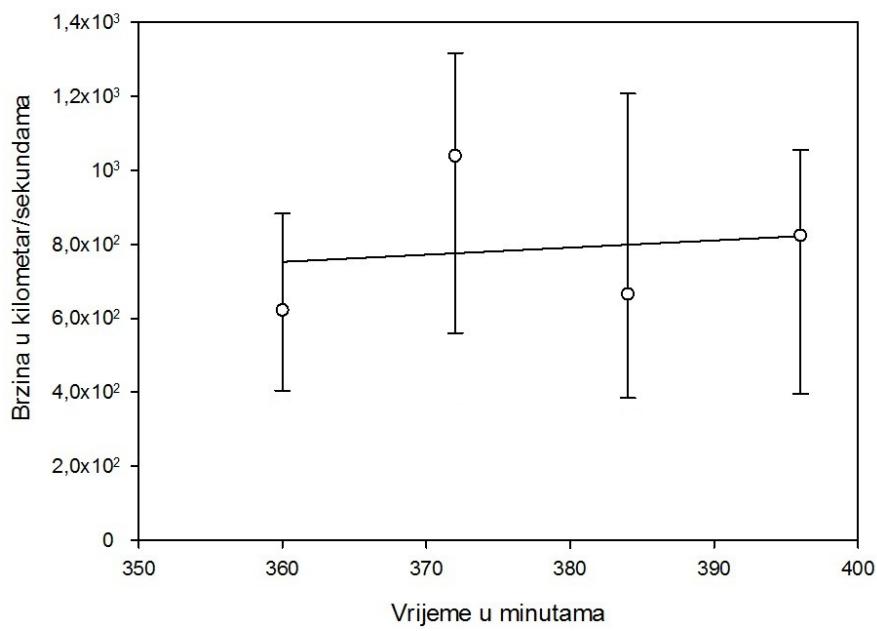
Slika 10. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer B



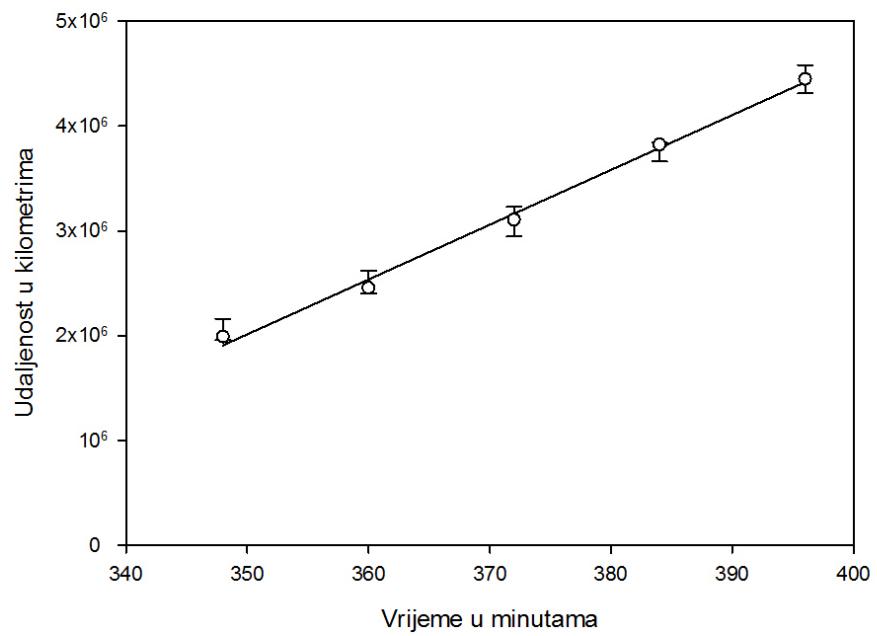
Slika 11. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer B



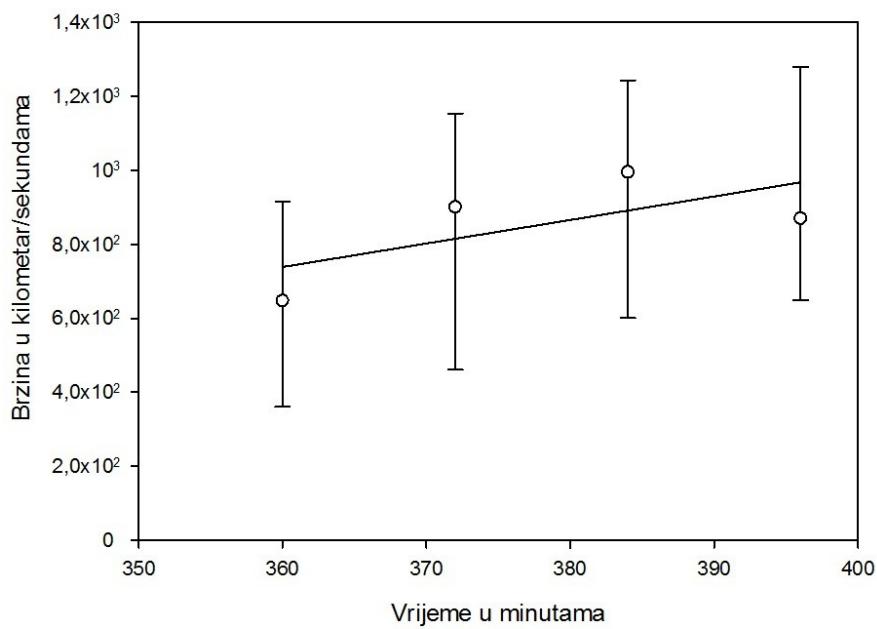
Slika 12. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer C



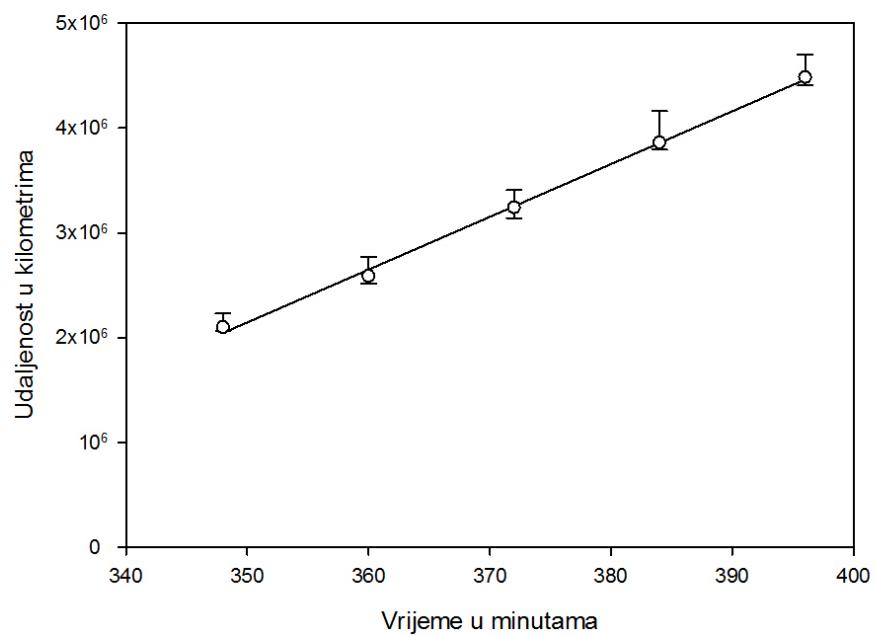
Slika 13. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer C



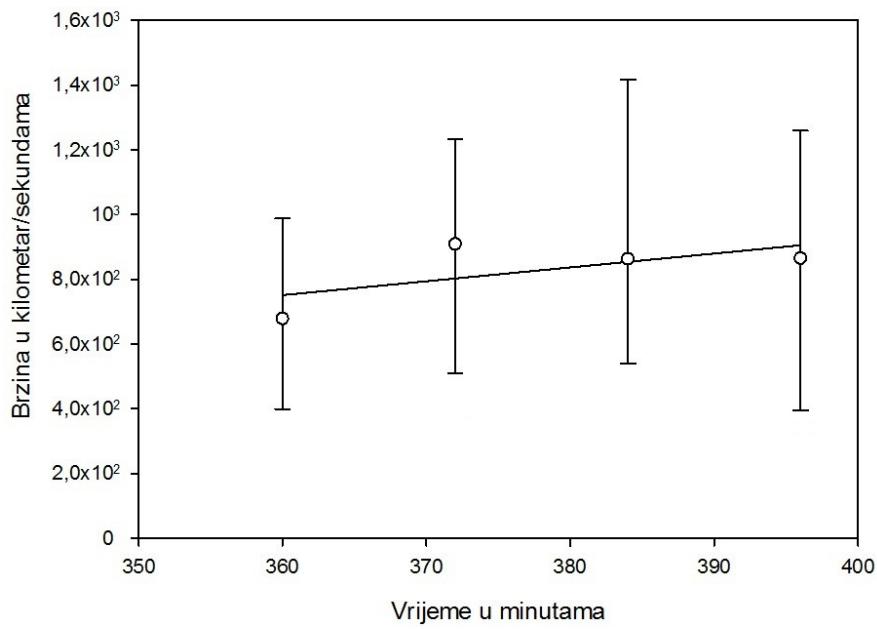
Slika 14. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer D



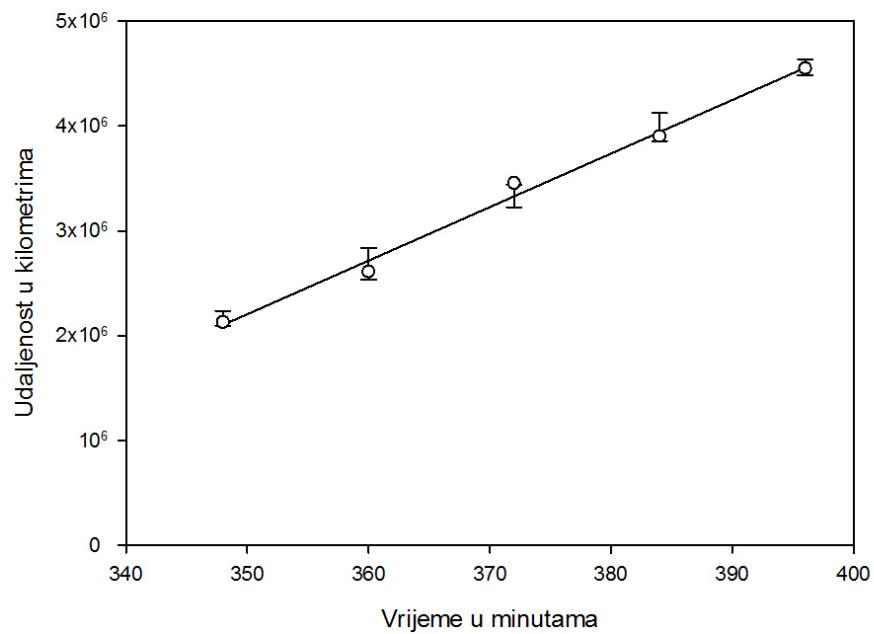
Slika 15. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer D



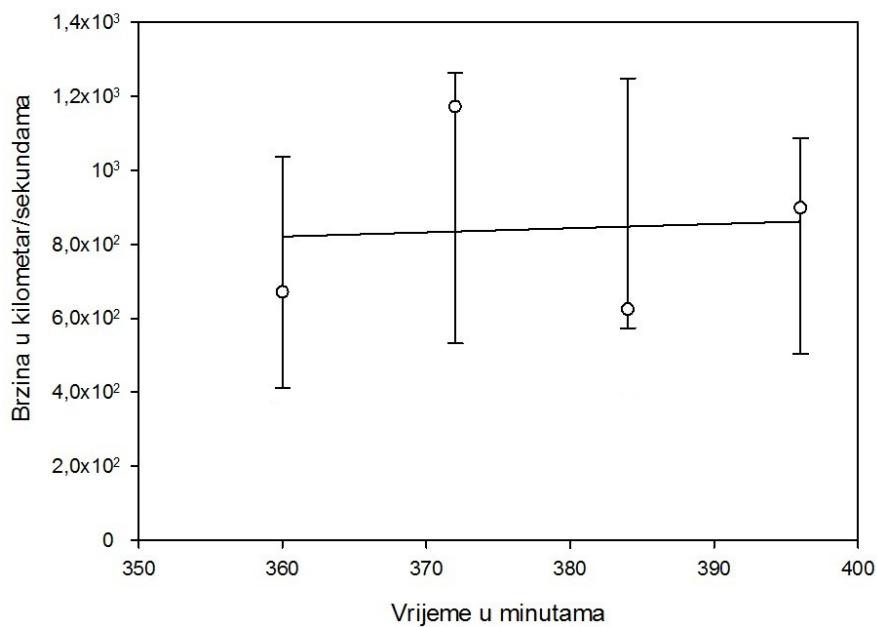
Slika 16. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer E



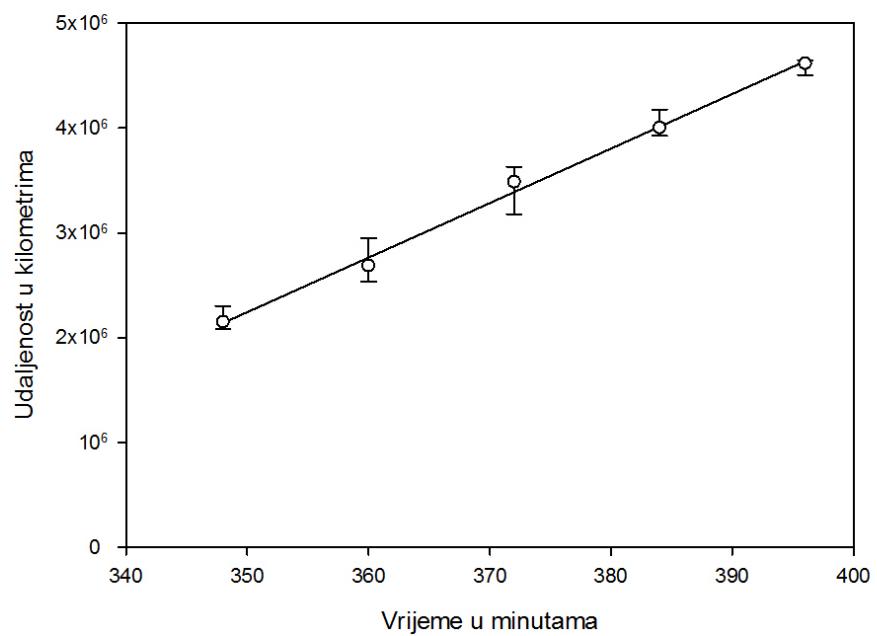
Slika 17. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer E



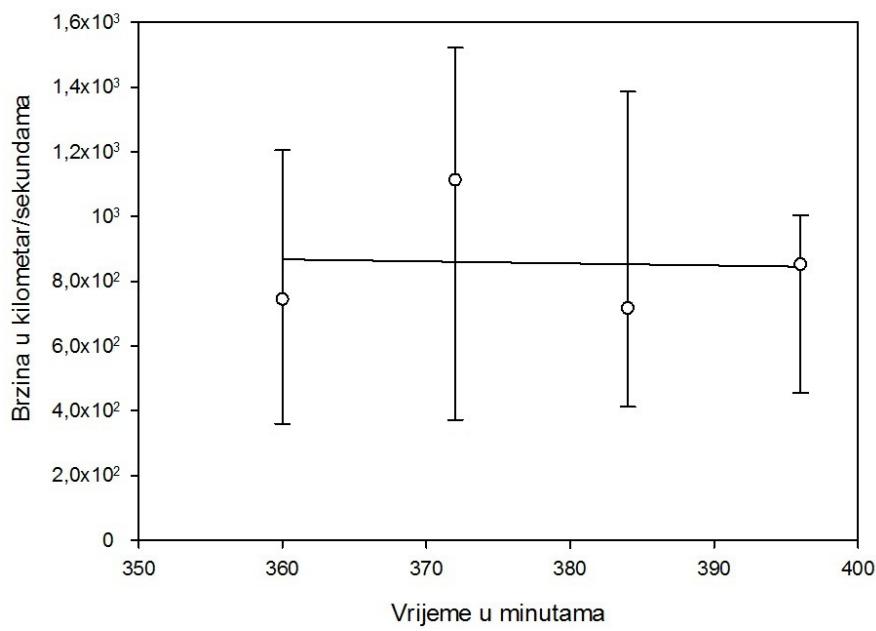
Slika 18. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer F



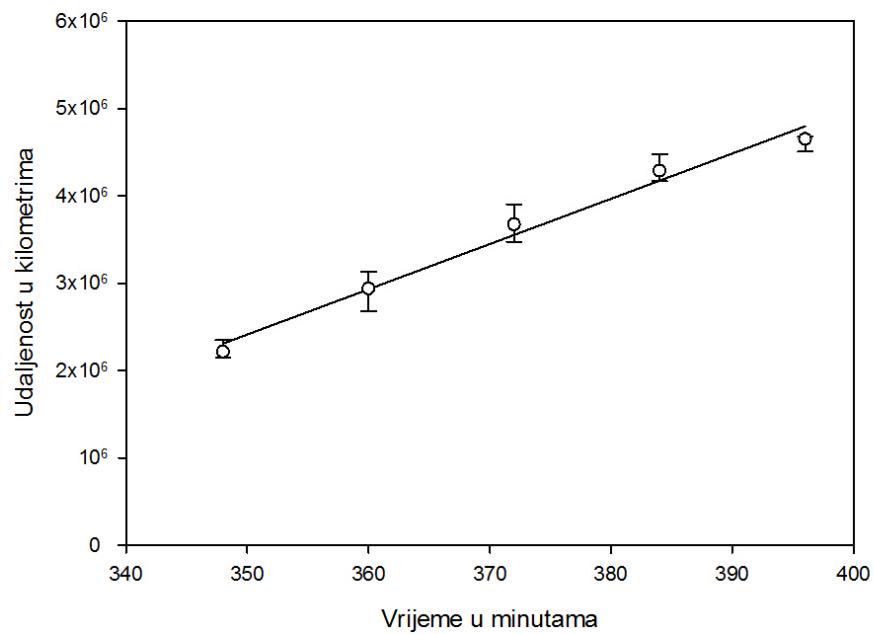
Slika 19. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer F



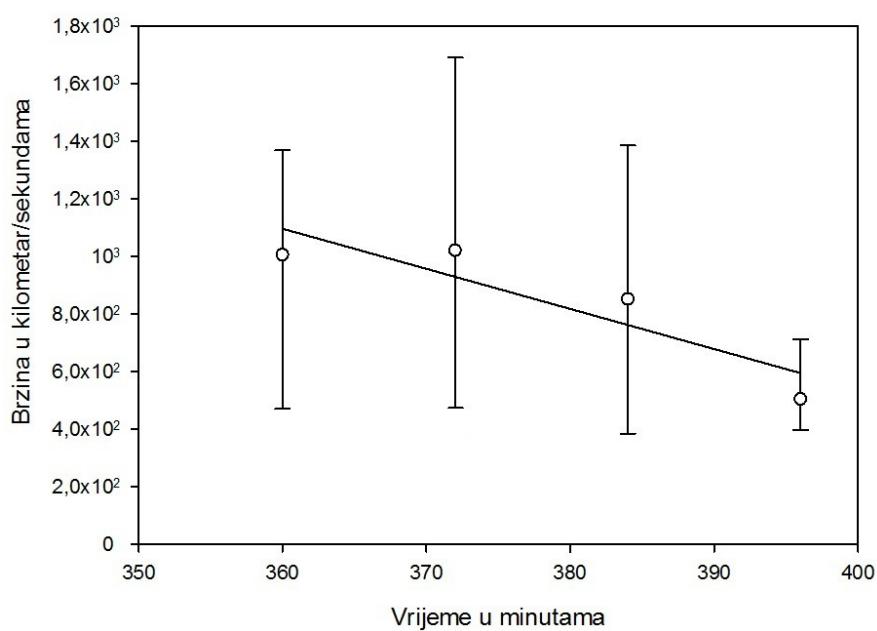
Slika 20. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer G



Slika 21. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer G



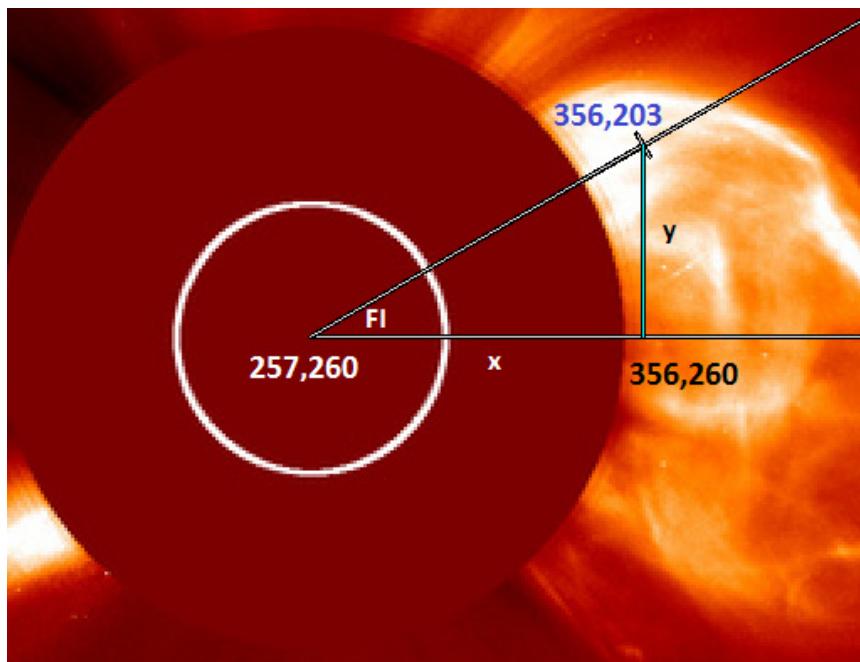
Slika 22. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i udaljenosti vrha koronalnog izbačaja od središta Sunca za smjer H



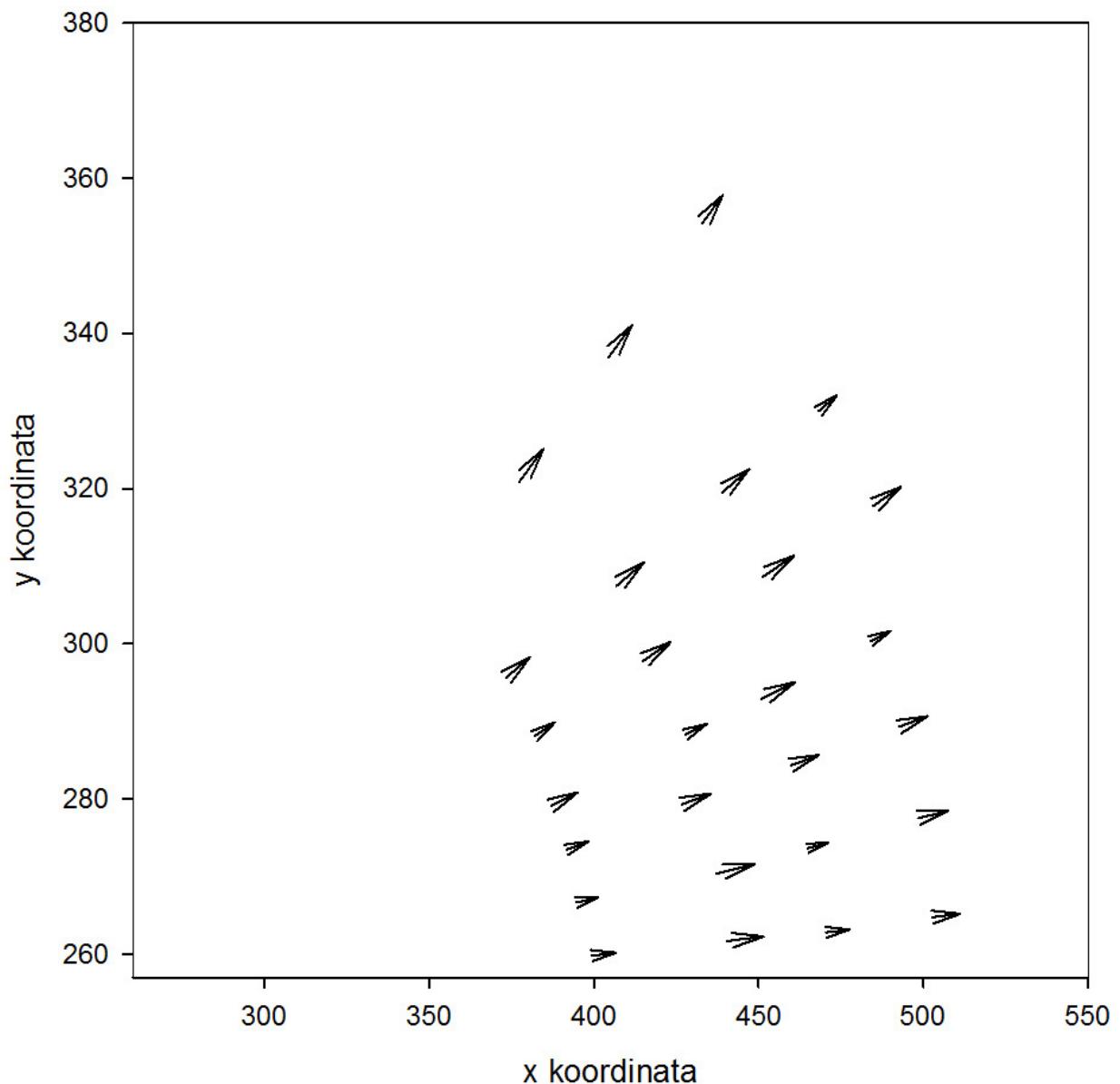
Slika 23. Graf (s pripadnim greškama) ovisnosti vremena i brzine koronalnog izbačaja za smjer H

4. Graf vektorskog polja brzina

Da bi nacrtali graf vektorskog polja brzina moramo izračunati pod kojim kutom se nalaze različiti smjerovi (A,B,C,D,E,F,G,H). Za referentni smjer definiran je novi smjer koji prolazi točkama 257,260 (središte Sunca) i 356,260. Prva točka na smjeru A nalazi se na koordinati 356,203. Da bi izračunali kut služimo se formulom za tangens kuta: $\operatorname{tg}(FI) = y/x$. U slučaju ispod (Slika 24.) računali smo pod kojim kutem je smjer A u odnosu na novi smjer. Y vrijednost dobije se oduzimanjem y koordinate početne i krajnje točke dužine čije su koordinate 356,203 i 356,260, a X koordinata dobije se oduzimanjem x koordinate početne i krajnje točke dužine čije su koordinate 257,260 i 356,260. U ovom slučaju $y = 260 - 203 = 57$, $x = 356 - 257 = 99$. Kut $FI = \operatorname{arctg}(0.5757)$, $FI = 30^\circ$. Smjer A je pod kutom od 30 stupnjeva. U tablici se nalaze vrijednosti kuteva za ostale smjerove (Tablica 1.). Koristeći program SigmaPlot [2] nacrtali smo graf vektorskog polja (Slika 25.).



Slika 24. Skica za izračun kuteva pojedinih smjerova. Kutevi se računaju prema načinu opisanom poviše slike



Slika 25. Graf vektorskog polja brzina. U ishodištu je središte Sunca na koordinatama (256,270), x os je x koordinata, a y os je y koordinata točke na pojedinom smjeru koja predstavlja vektor brzine. Graf je izrađen u SigmaPlot [2] programu koristeći 'Vector plot' tip grafa za koji su potrebne x i y koordinate točaka, nagib (kut) smjera na kojem su točke u odnosu na neki prethodno definirani referentni smjer te magnituda vektora (iznos brzine).

5. Diskusija

Koronalni izbačaji su masivni eksplozivni događaji na Suncu prilikom čega se izbacuje velika količina plazme – ioniziranog plina [4]. Uočeno je da se prilikom maksimuma sunčeve aktivnosti magnetsko polje Sunca pojačava. Tada su sunčevi bljeskovi i koronalni izbačaji mnogo češći i spektakularniji.

U Dodatku 2. izračunata je brzina oslobađanja za Sunce koja iznosi 617,5 km/s. Brzine koje smo dobili mjerjenjem na nekim mjestima dosežu vrijednosti od preko 1100 km/s što uvelike prelazi graničnu brzinu oslobađanja. To znači da koronalni izbačaji imaju dovoljno veliku brzinu da 'pobjegnu' gravitacijskom polju Sunca što dokazuje i njihov dolazak do Zemlje prilikom čega mogu uzrokovati poteškoće sa telekomunikacijskim satelitima ili izazvati spektakularnu pojavu polarne svjetlosti.

Maksimalna izmjerena brzina zapisana u SOHO/LASCO katalogu [7] za 18.8.2010. godine iznosi 1471 km/s, a maksimalna brzina dobivena u ovom radu iznosi 1171,78 km/s. Uspoređujući te dvije brzine, vidimo da su mjerena u ovom radu približno točna. Razlog zbog kojeg veće maksimalne brzine nisu izračunate može se prepisati malom broju izbranih smjerova i točaka na pojedinom smjeru.

Grafovi prikazuju ovisnost udaljenosti koronalnog izbačaja o vremenu te brzine izbačaja u pojedinoj točki vremena. Kod grafova koji prikazuju ovisnost udaljenosti izbačaja od Sunca i vremena vidi se da se udaljenost izbačaja povećava u vremenu, što je i logično jer se izbačaj udaljava od Sunca. Grafovi ovisnosti brzine i vremena pokazuju da je brzina približno konstantna. Uzmimo za primjer graf ovisnosti brzine i vremena za smjer A (Slika 9.). Vidimo da su greške proračuna velike, a crta koja povezuje točke je približno vodoravna, što može ukazivati na konstantnost brzine koronalnog izbačaja. Trenutna znanja o kinematici izbačaja govore da u početku izbačaj ima period velike akceleraciju koji traje sve dok se ne postigne neka brzina koja je zatim približno konstantna cijelo vrijeme [10].

6. Zaključak

U ovom radu mjerila se brzina koronalnog izbacivanja koji se zbio 18.8.2010. godine koristeći se podacima sa SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) satelita [1].

Na raspolaganju je 5 slika (Dodatak 1.) koje je teleskop LASCO snimio u razmaku 12 minuta počevši od 5:48 sati ujutro. Slike su obrađene u programu 'Subaru Image Processor Makali' [3] gdje su izračunate koordinate točaka i udaljenost od središta Sunca za 8 različitih smjerova izbačaja. Udaljenosti su izračunate u pikselima, a također je izračunato kolika je vrijednost 1 piksela u kilometrima (Slika 3.), pa su se udaljenosti mogle prikazati u kilometrima. Podaci, kao i njihove pripadne greške, su zabilježeni u tablicama u 'Excelu'. Iz tih podataka, dijeleći prijeđeni put izbačaja za određeno vrijeme, su izračunate brzine i u programu 'SigmaPlot' [2] konstruirani su pripadni grafovi položaja, brzine i vremena i vektorskog polja brzina.

Rezultati dobiveni u radu približno točno se podudaraju s rezultatima u SOHO katalogu [7], a nepostizanje vrijednosti kao u katalogu se može prepisati malom broju uzetih smjerova i točaka na njima. Grafovi ovisnosti udaljenosti o vremenu prikazuju kako se izbačaj udaljava od Sunca, a grafovi brzine i vremena prikazuju približno konstantnu brzinu gibanja koronalnog izbacivanja.

Popis literature

[1] Solar and Heliospheric Observatory Homepage

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

[2] SigmaPlot - Scientific Data Analysis and Graphing Software

<http://www.sigmaplot.com/products/sigmaplot/>

[3] Subaru Image Processor: Makalii

<http://www.nao.ac.jp/E/Education/Makalii/index.html>

[4] Coronal mass ejection - wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal_mass_ejection

[5] Solar Science CME

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml>

[6] Solar Interactions on Earth

http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/cosmicengine/sun_earth.html

[7] SOHO/LASCO CME catalog

http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2010_08/univ2010_08.html

[8] NASA Science News

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/23oct_superstorm/

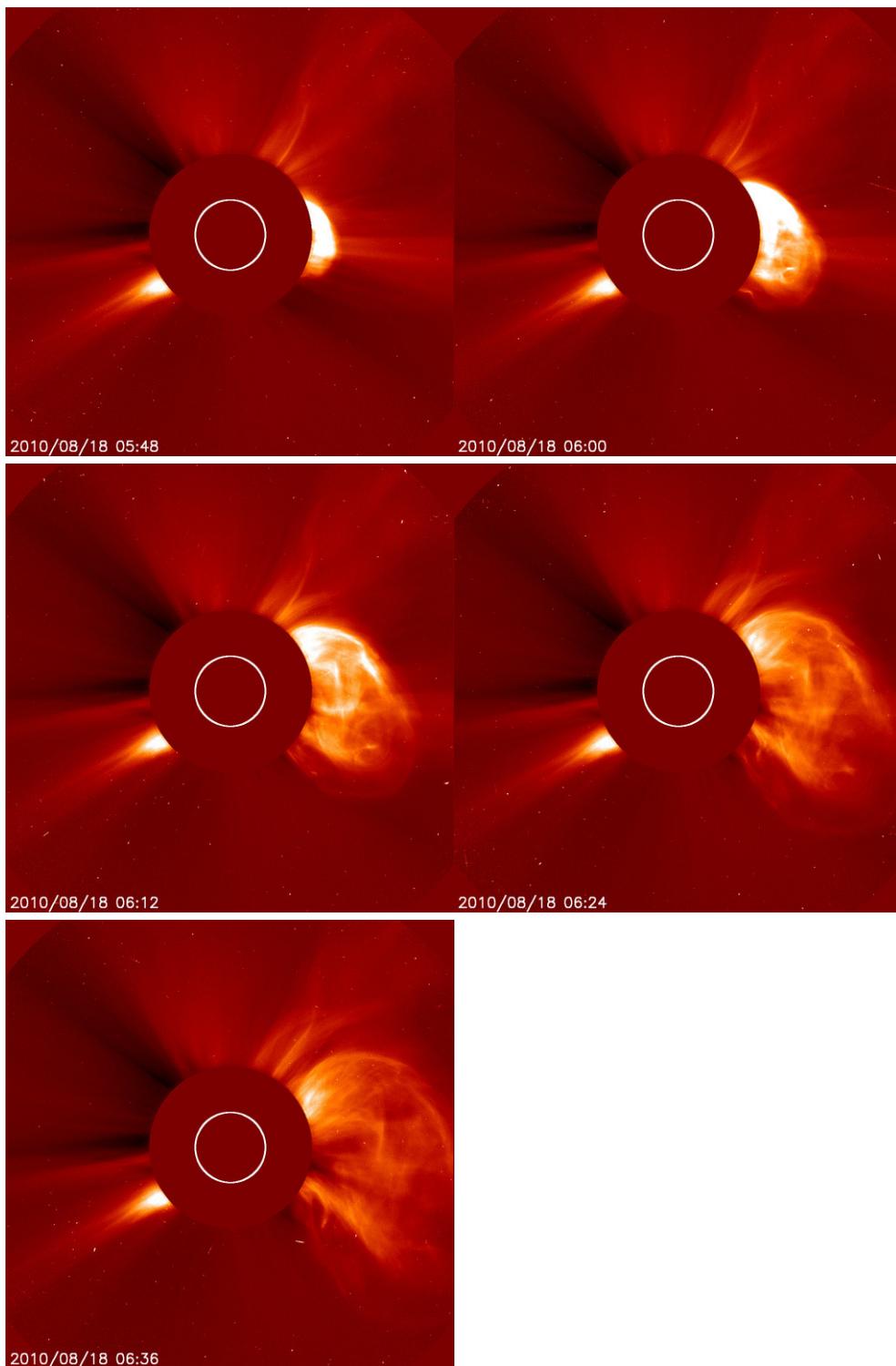
[9] Space.com

<http://www.space.com/8154-mars-space-storm-forecasts.html>

[10] Universetoday.com

<http://www.universetoday.com/59230/coronal-mass-ejections/>

Dodatak 1. Korištene slike koronalnog izbačaja



Dodatak 2. Brzina oslobađanja za Sunce

Brzina oslobađanja je minimalna brzina koju neki objekt mora imati da bi se mogao po želji daleko udaljiti od izvora gravitacijskog polja, a ne pasti natrag u njega ili ostati u orbiti. Često se kaže da je brzina oslobađanja ona koja je potrebna da se objekt "oslobodi" gravitacijskog polja, u ovom slučaju Sunca.

Brzina oslobađanja se računa prema jednostavnoj formuli: $v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$, gdje je v
brzina oslobađanja, G gravitacijska konstanta, M masa Sunca, a r polumjer.

Za Sunce brzina oslobađanja iznosi 617,5 km/s.