

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Bernarda Boček

Utjecaj Sunčeve aktivnosti na Zemljino atmosfersko električno polje

Diplomski rad

Voditelj diplomskog rada: Antun Marki

Zagreb, 2011.

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Antunu Markiju na vodstvu, pomoći, strpljenju te uloženom trudu i vremenu pri izradi diplomskog rada.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vladisu Vujnoviću na savjetima i komentarima.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Giuliani Verbanac što me potaknula da svoj interes za aeronomiju pretočim u izradu diplomskog rada na području atmosferskog električnog polja.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijska podloga	
2.1. Ionizacija u atmosferi	3
2.1.1. Porijeklo iona	3
2.1.2. Sastav iona	4
2.2. Električna vodljivost niže i srednje atmosfere	6
2.3. Mjerenje vodljivosti	8
2.4. Električno polje i struja	9
2.5. Mjerenje električnog polja	12
3. Sunčeva aktivnost	
3.1. Sunce	13
3.2. F10,7	14
4. Mjerne postaje i instrumenti	
4.1. Atmosfersko električno polje	15
4.2. Radio tok F10,7	16
5. Metode obrade podataka	
5.1. Podaci	17
5.2. Metoda	17
6. Rezultati	
6.1. Analiza rezultata	20
6.1.1. Korelacije između F10,7 i parametara atmosferskog električnog polja	20
6.1.2. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja	21
6.1.3. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja i Carnegie krivulje za odabrane godine	24
6.1.4. Korelacija EP-C i VO-C za zimu i ljeto	28
6.2. Diskusija rezultata	29
7. Zaključak	33
8. Popis literature	34
9. Prilog	36

1. Uvod

Početkom istraživanja i znanosti o atmosferskom elektricitetu smatra se eksperiment Benjamina Franklina iz 1752. "izvlačenje munja iz oblaka" pomoću zmaja. Louis Guillaume Le Monnier bio je jedan od prvih u istraživanju i otkrivanju atmosferskog elektriciteta u području lijepog vremena. Postavio je drveni štap na čijem vrhu se nalazila zašiljena željezna šipka. Željezna žica pričvršćena na tu šipku ulazila je u zgradu bez okolnih kontakata i na drugom kraju bila je povezana s rastegnutom svilenom niti. Le Monnier je uvidio da elektrizirana željezna žica privlači čestice prašine. Tom metodom je prvi opazio da se efekti iskrenja mogu postići čak i u uvjetima lijepog vremena. Uveo je i novu metodu postizanja elektrizacije pomoću rastegnute žice bez dodirnih točaka s usmjerenim/zašiljenim vodičem. U modernoj tehnologiji, to bi se ponašalo kao slabi kolektor koji polako skuplja potencijal iz svoje okoline.

Prvi razmatrani napredak je napravio Horace-Benedict de Saussure (1779.) koji je uveo nekoliko novih metoda mjerenja. De Saussure je konstruirao elektrometar koji se sastoji od dvije kugle od bazgine jezgre obješene na srebrne žice unutar staklene posude s metalnom zaštitom. Kada se kugle nabiju na isti polaritet odbijaju se jedna od druge i udaljenost među kuglama je mjera električnog intenziteta od izvora stavljenog u kontakt sa srebrnim žicama. Podizanjem i spuštanjem antene povezane s elektrometrom, de Saussure je pokazao da se električni potencijal u atmosferi povećava s visinom. De Saussure je shvatio da je elektrostatski naboj induciran na njegovim antenama uzrokovan pozitivnim statičkim nabojem u atmosferi iznad. Također je vjerovao da je prvi koji je otkrio sistematsku godišnju promjenu polja lijepog vremena. (Chalmers, 1967.)

Na početku ovog stoljeća otkriveno je da ioni uzrokuju vodljivost atmosfere i bile su potrebne nove teorije koje bi objasnile kako se održava naboj u sustavu zemlja-atmosfera. Predloženo je da Zemljina rotacija u vlastitom magnetskom polju može proizvesti magnetni efekt koji bi pokretao električni krug lijepog vremena ili da bi evaporacija vode sa Zemljine površine mogla nabiti Zemlju negativno, a vodena para atmosferu pozitivno pomoću nekog nepoznatog procesa. Danas, iako pitanje ostaje otvoreno, postoje primarno dvije teorije koje se bave problemom porijekla električnog polja lijepog vremena. Jedna je teorija zatvorenog kruga koja dokazuje da grmljavinske oluje na cijeloj Zemlji održavaju električno polje u sustavu zemlja-ionosfera. Druga teorija promatra elektrokemijski efekt kao mehanizam nabijanja gdje

su negativni atmosferski ioni privučeni na Zemljinu površinu, a pozitivni ioni zaostaju u okolnoj atmosferi (Wahlin, 1989.). Količina naboja proizvedena svim grmljavinskim olujama na Zemlji u bilo kojem trenutku je dostatna za nadopunu naboja lijepog vremena i varijacije polja lijepog vremena kao funkciju univerzalnog vremena (UTC)**.

Prije svemirskih programa, visina dostupna za in situ eksperimente bila je ograničena visinom koju su mogli doseći baloni (oko 30 km). Budući da su opažanja pokazala blago eksponencijalni porast električne vodljivosti zraka s visinom, bilo je razumno pretpostaviti da se radi o električnom ekvipotencijalnom sloju – elektrosferi, za koji se smatra da postoji iznad 40–60 km. Taj električni ekvipotencijalni sloj se ponaša kao gornja ploča velikog sfernog kondenzatora, čija je donja ploča Zemljina površina. Područje između te dvije granice je konvencionalno područje atmosferskog elektriciteta (Chalmers, 1967.; Israel, 1970.; Dolezalek i Reiter, 1977.).

U ovom radu proučavali su se parametri Zemljinog atmosferskog električnog polja: električno polje, električna vodljivost i srednja gustoća struje. Podaci za električno polje i vodljivost preuzeti su iz biltena Results of Atmospheric Electricity and Meteorological Observations 'Stanislaw Kalinowski' Geophysical Observatory at Swider koje je izdao Geofizički institut Poljske akademije znanosti. Mjerenja su obavljena na Opservatoriju Swider, Poljska ($\varphi=52^{\circ} 07' N$, $\lambda=21^{\circ} 15' E$, $h=100$ m). Raspon podataka obuhvaća vremensko razdoblje od 1994. do 2005. godine.

Cilj ovog rada je odrediti utjecaj Sunčeve aktivnosti na Zemljino atmosfersko električno polje. Za te potrebe, kao mjera Sunčeve aktivnosti, odabran je F 10,7, radio tok na valnoj duljini 10,7 cm. Podaci za F 10,7 su objavljeni na internet stranici <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solardataservices.html>, a mjerenja su obavljena radio teleskopom blizu Pentictona, British Columbia, Canada ($\varphi=49^{\circ} 19' N$, $\lambda=119^{\circ} 37' W$, $h=545$ m).

** UTC (Universal Time Coordinated)

2. Teorijska podloga

2.1. Ionizacija u atmosferi

2.1.1. Porijeklo iona

Zemljina kora sadrži i radioaktivni materijal, uglavnom uran, torij i njihove produkte radioaktivnog raspada. Beta i gama zrake, koje emitira tlo, mogu ionizirati molekule zraka u prvim nekoliko metara iznad tla. Plin radon, jedan od produkata raspada uranija 238, može doseći veće visine (do 100 m iznad tla) prije nego se raspadne na polonij. Raspad radona na polonij praćen je emitiranjem alfa čestica. Prema tome radon je glavni izvor ionizacije u prvim 100 m iznad tla nad kontinentima. Brzina produkcije ionizacije na tlu je reda $\Pi = 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Radioaktivnost iznad oceana je nekoliko redova veličine manja nego nad kontinentalnom korom i manje značajna kao izvor ionizacije.

Drugi veliki izvor ionizacije je galaktičko kozmičko zračenje. Brzina produkcije ionizacije zbog kozmičkih zraka ima maksimum oko $\Pi = 4 - 5 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ u umjerenim širinama na oko 15 km visine i smanjuje se na $\Pi = 10^6 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ na razini mora. Te brzine se smanjuju za faktor 2 na ekvatoru. Opažena je 20%-tna varijacija u proizvodnji iona s maksimumom brzine ionizacije tijekom minimuma Sunčevih pjega. Brzina ionizacije je osjetljiva na meteorološke uvjete, kao i na Sunčevu aktivnost.

Sunčeve x-zrake i ekstremno ultraljubičasto (UVX) zračenje su glavni izvori ionizacije iznad 60–70 km visine. Njihova brzina ionizacije ovisi o geografskoj širini, dobu dana, godišnjem dobu i Sunčevoj aktivnosti. Drugi izvori ionizacije u tom visinskom području su sporadične pojave visokoenergetskih elektrona i protona porijeklom od magnetosfere i Sunca. Tijekom jako intenzivnih Sunčevih bljeskova, protoni Sunčevih kozmičkih zraka mogu jako povećati produkciju iona do visine od 15 km.

2.1.2. Sastav iona

Izvori ionizacije razdvajaju molekule neutralnog zraka na ione i elektrone. Ioni su primarno jednostruko nabijeni. U nižoj i srednjoj atmosferi elektroni su pričvršćeni za neutralne molekule i formiraju negativne ione.

Pozitivni i negativni ioni formiraju molekulske klastere preko hidratacijskog procesa unutar nekoliko mikrosekundi. Stabilan klaster tvori 10–12 molekula. Ovi ioni nazvani su malim ionima. Primjeri takvih malih iona su $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$, $\text{CO}_4^-(\text{H}_2\text{O})_n$, s $n \cong 4-8$, ovise o sadržaju vodene pare u zraku. Mali ioni nestaju ili međusobnom rekombinacijom ili adsorpcijom na čestice aerosola, dakle formiraju relativno velike ione dugog života. Veliki ili Langevinovi ioni su veće mase i polumjera te znatno smanjene pokretljivosti. Mogu nastati i direktnom ionizacijom, na primjer raspršivanjem vodenih kapljica kod vodopada, udaranjem valova o morsku obalu, kidanjem kapljica pri jakim uzlaznim zračnim strujama u grmljavinskom oblaku i kod plamena izgaranjem materije, naročito kod šumskih požara. Srednji ioni se po veličini nalaze između malih i velikih iona. Nastaju pretežno u industrijskim predjelima gdje je atmosfera onečišćena česticama sumporne kiseline.

Za opis ioniziranih čestica bitan je njihov tip, veličina (definirana polumjerom r) i pokretljivost, μ . Vrijedi relacija:

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (1)$$

gdje je E (V m^{-1}) jakost električnog polja, a v (m s^{-1}) postignuta brzina čestice u tom polju.

Tablica 1. Nazivi i pokretljivost iona (Ganza, 1972.)

Naziv	Polumjer r (nm)	Pokretljivost μ ($10^{-4} \text{ m}^2 (\text{V s})^{-1}$)
Mali ioni	<6,6	$\geq 1,0$
Manji srednji ioni	6,6 do 78	$1,0 > \mu \geq 0,01$
Veći srednji ioni	78 do 250	$0,01 \geq \mu \geq 0,001$
Veliki ili Langevinovi ioni	250 do 570	$0,001 \geq \mu \geq 0,00025$
Ultra veliki ioni	>570 (do $r = 10^{-5} \text{ cm}$)	$\mu < 0,00025$

Slobodni elektroni i mali ioni su pretežno negativni i zbog male mase su vrlo pokretljivi i najviše doprinose električnoj vodljivosti zraka. Srednji i veliki ioni znatno manje doprinose vodljivosti zraka, iako mogu biti značajni u nekim efektima prostornog naboja.

Pri razmatranju problema rekombinacije nije dovoljno promatrati samo međusobnu neutralizaciju malih iona. Treba uzeti u obzir da spajanjem malih i velikih iona suprotnih predznaka dolazi do gubitka ionskog para te slučajeve u kojima ne dolazi do rekombinacije, ali mogu znatno utjecati na vodljivost atmosfere npr. kada se mali ion spoji s kondenzacijskom jezgrom ili drugom većom česticom. To predstavlja umanjenje broja malih iona, ali i gubitak za vodljivost, jer zbog smanjene pokretljivosti takva čestica više ne sudjeluje u procesu vođenja. Uzevši u obzir navedene slučajeve, broj malih iona možemo odrediti iz jednadžbe rekombinacije:

$$dn/dt = I - \alpha n^2 - \beta n_a n, \quad (2)$$

gdje je n broj malih iona u jedinici volumena, I brzina produkcije ionizacije, α koeficijent rekombinacije, β koeficijent pričvršćenja i n_a broj čestica aerosola u jedinici volumena. Jednadžbom (2) unaprijed je pretpostavljeno da su brojevi pozitivnih i negativnih iona približno jednaki, što je dobra aproksimacija na svim visinama.

Vrijednosti α i β u troposferi su reda veličine: $\alpha = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Broj čestica aerosola u jedinici volumena je jako varijabilan, jer ovisi o orografiji, meteorološkim uvjetima i o antropogenom onečišćenju. Tipične vrijednosti na tlu su $n_a = 10^{10} \text{ m}^{-3}$ nad kopnom i $n_a = 10^9 \text{ m}^{-3}$ nad oceanom. Srednji broj malih iona je ugrubo jednak iznad kopna i oceana ($n_a = 10^8 - 10^9 \text{ m}^{-3}$), jer je manja brzina ionizacije iznad oceana kompenzirana manjim gubitkom zbog manje koncentracije aerosola na tom području. (Israel, 1970.)

Vodena para postaje manje bitna na visinama iznad 70–80 km. Prema tome klasteri iona su većinom zamijenjeni jednostruko nabijenim pozitivnim ionima kao O^+ , NO^+ , O_2^+ , na većim visinama H^+ ionima i elektronima. Sunčevo UVX zračenje ($\lambda < 0.12 \mu\text{m}$) je odgovorno za formiranje različitih ionosferskih slojeva s maksimumom broja elektrona reda veličine $n = 10^{12} \text{ m}^{-3}$ unutar ionosferskog F2 sloja na oko 250 km visine. Dominantni ion u tom visinskom rasponu je O^+ .

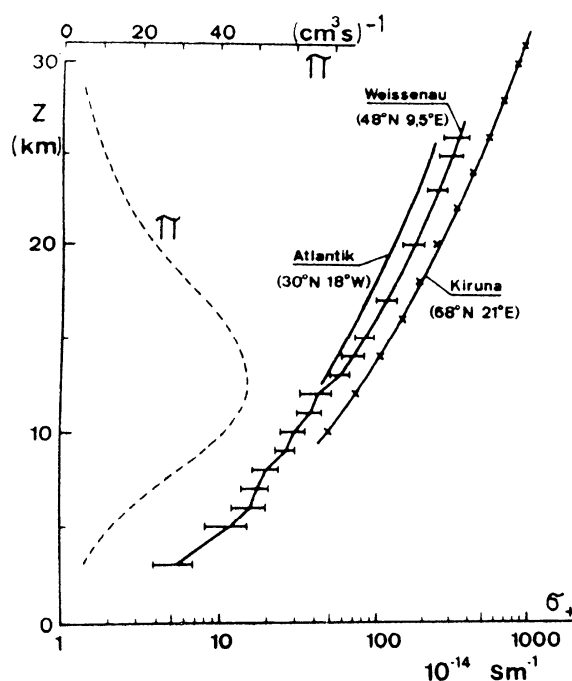
2.2. Električna vodljivost niže i srednje atmosfere

Pozitivne i negativne ione u atmosferi ubrzava električno polje u suprotnim smjerovima. Tijekom njihova gibanja oni se sudaraju s neutralnim česticama. Njihova sposobnost kretanja kroz neutralni plin opisana je pokretljivošću k , koja ovisi o gustoći broja molekule neutralnog zraka. Pokretljivost iona povećava se s visinom obrnuto proporcionalno gotovo eksponencijalnom smanjenju gustoće zraka. Na nivou tla pokretljivost pozitivnih malih iona je oko $k_+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 (\text{V s})^{-1}$ i nešto veća za negativne male ione. Pokretljivost velikih iona je nekoliko redova veličine manja.

Električna vodljivost atmosfere ispod 70 km visine je izotropna. Ovisi o produktu broja iona i pokretljivosti:

$$\sigma = \sigma_+ + \sigma_- = e n (k_+ + k_-), \quad (3)$$

gdje je $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ elementarni električni naboj. Mali pozitivni i negativni ioni doprinose približno jednako električnoj vodljivosti.



Slika 1. Promatrana pozitivna električna vodljivost σ_+ s obzirom na male pozitivne ione na tri različite geografske širine iz balonskih mjerenja i brzina produkcije ionizacije Π u odnosu na visinu (prema Volland, 1984).

Slika 1. prikazuje električnu vodljivost određenu malim pozitivnim ionima u ovisnosti o visini na tri različite geografske širine. Budući da broj iona malo varira s visinom, povećanje pokretljivosti iona je odgovorno za gotovo eksponencijalni rast

σ_+ s visinom. Povećanje vodljivosti s povećanjem geografske širine može se pripisati povećanju broja iona s geografskom širinom. Ovisnost geografskih širina o intenzitetu kozmičkih zraka također može se povezati s brojem iona. Tijekom pojačane Sunčeve aktivnosti, vodljivost srednje atmosfere može porasti za faktor 10.

Srednja visinska ovisnost otpornosti atmosfere, ρ , koja je definirana kao $1/\sigma$, može se analitički opisati formulom:

$$\rho(z) = 1/\sigma(z) = \sum_{i=1}^3 \rho_i \exp(-\alpha_i z) \quad (4)$$

(z u km, ρ u Ω m, ρ_i i α_i tablica 2.1.).

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata parametara globalnog električnog kruga koji aproksimiraju prosječne uvjete u umjerenim širinama i na visinama ispod 60 km (prema Volland, 1984.)

i	=	1	2	3	4
α_i (km^{-1})		4.527	0.375	0.121	
ρ_i ($10^{12} \Omega\text{m}$)		46.9	22.2	5.9	75.0
E_i (V/m)		93.8	44.4	11.8	150.0
Φ_i (kV)		20.7	118.4	97.5	236.6
Γ_i ($10^{15} \Omega\text{m}^2$)		10.4	59.2	48.8	118.4
q_i (10^{-12}C/m^3)		3.76	0.147	0.013	3.92

Formula vrijedi za umjerene širine ispod 60 km visine unutar područja lijepog vremena, izvan grmljavinskih oluja ili oblačnih područja.

Iz jednadžbe (4) slijedi da je vrijednost σ na razini mora

$$\sigma_A = 1/\rho(0) = 1,33 \cdot 10^{-14} \text{ S m}^{-1}. \quad (5)$$

Opažena električna vodljivost može nepravilno varirati za više od faktora 10, naročito unutar atmosferskog graničnog sloja u prvih nekoliko kilometara iznad tla, no također i u stratosferskim visinama.

Integriranjem jednadžbe (4) po visini, dobivamo stupčanu otpornost između razine mora i visine z ($z < 100$ km) :

$$\Gamma = \int_0^z \rho dz = \sum_{i=1}^3 \Gamma_i [1 - \exp(-\alpha_i z)], \quad (6)$$

gdje je $\Gamma_i = \rho_i / \alpha_i$ iz tablice 2.1. Stupčana otpornost između razine mora i ionosfere ($z = 100$ km) je tada

$$\Gamma_A = \sum_{i=1}^3 \Gamma_i = 1,18 \cdot 10^{17} \Omega \text{ m}^2. \quad (7)$$

Stupčana otpornost je manja iznad planina. Ukupni otpor atmosfere :

$$R_A = \Gamma_A / F_E \cong 230 \Omega, \quad (8)$$

gdje je $F_E = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ ploština Zemljine površine.

2.3. Mjerenje vodljivosti

Električna vodljivost je veličina kojom opisujemo sposobnost tvari da provodi električnu struju. Ako neki vodič postavimo na potencijalnu razliku, uspostaviti će se tok pokretnih naboja, dakle električna struja. Vodljivost definiramo kao:

$$\sigma = \frac{j}{E}, \quad (9)$$

gdje je j gustoća strujne, a E jakost električnog polja. Električna vodljivost je recipročna veličina električnoj otpornosti, a mjerna jedinica je $(\Omega \text{ m})^{-1}$.

Za praktične svrhe električna vodljivost se mjeri tako da se neko tijelo (rasapno tijelo)* nabije na određeni potencijal te se mjeri pad potencijala u jedinici vremena. Rasapno tijelo je pričvršćeno neposredno na elektrometar tako da se razlika potencijala očitava direktno. Pad potencijala pratimo prema Coulombovom zakonu, koji kaže da je gubitak naboja Q nekog tijela proporcionalan ukupnom naboju tog tijela:

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ. \quad (10)$$

To je idealizacija, no u ovom slučaju je naboj razmješten i na rasapnom tijelu i na elektrometru, dok je gubitak tog naboja proporcionalan samo onom dijelu naboja koji se nalazi na rasapnom tijelu:

$$\frac{dQ_t}{dt} + \frac{dQ_e}{dt} = -aQ_t, \quad (11)$$

gdje je Q_t naboj na rasapnom tijelu, a Q_e naboj na elektrometru. Uvođenjem potencijala umjesto naboja (potencijal se mjeri, a naboj ne) po izrazu $Q = V \cdot C$ (C je kapacitet) te sređivanjem jednadžbe dolazimo do konačnog izraza za vodljivost:

$$\sigma = \frac{1}{4\pi t} \frac{C_t + C_e}{C_t} \ln \frac{V_0}{V}. \quad (12)$$

* Rasapno tijelo je tijelo na kojem se mjeri pad potencijala.

gdje su V_0 i V početni i konačni potencijal, C_t i C_ε kapaciteti rasapnog tijela i elektrometra, t vrijeme.

2.4. Električno polje i struje

U područjima s lijepim vremenom, daleko od područja s grmljavinskim nevremenom, može se izmjeriti gustoća struje usmjerena prema dolje, reda veličine

$$j_z = 2 \cdot 10^{-12} \text{ A m}^{-2}$$

za koju se vjeruje da ju pokreće globalna grmljavinska aktivnost. Ta gustoća struje je iznenađujuće konstantna s visinom (Volarić i Vujić, 2006.). Budući da je zrak električki vodljiv, struja je praćena električnim poljem reda veličine $E_z = -100 \text{ V m}^{-1}$ na tlu, a usmjereno je prema dolje. Ohmov zakon tada zahtjeva da

$$E_z = \rho j_z, \quad (13)$$

i jer je $j_z = \text{const.}$, $|E_z|$ mora padati s visinom kao specifični otpor ρ .

Iz toga proizlazi:

$$E_z = -\sum_{i=1}^3 E_i \exp(-\alpha_i z), \quad (14)$$

uz $E_i = |j_z| \rho_i$. Integracijom po visini dobivamo električni potencijal Φ između tla i visine z :

$$\Phi = \int_0^z E_z dz = -\Gamma j_z = \sum_{i=1}^3 \Phi_i [1 - \exp(-\alpha_i z)], \quad (15)$$

uz Γ iz (6) i $\Phi_i = |j_z| \Gamma_i$ iz tablice 2. Ovdje je nulti potencijal definiran pri tlu ($\Phi_i(0) = 0$). Srednji potencijal između tla i ionosfere, zvan električni potencijal, je:

$$\Phi_A = -\Gamma_A j_z = 240 \text{ kV}, \quad (16)$$

varirajući između 180 i 400 kV. Totalna električna struja u područjima lijepog vremena je:

$$j_A = -\Phi_A / R_A = -1 \text{ kA}. \quad (17)$$

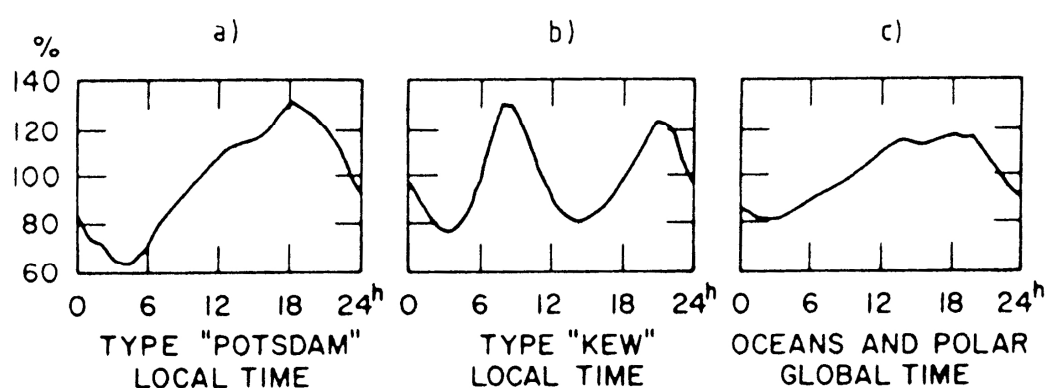
Kvazistatično električno polje na površini Zemlje uvijek je ortogonalno na tlo. To pokazuje da se Zemljina površina ponaša kao električni ekvipotencijalni sloj za kvazi-kontinuirana električna polja.

Na oceanskim i polarnim postajama mjere se uglavnom ovisnosti E_z i j_z o svjetskom vremenu s maksimalnim amplitudama oko 18:00 UTC. Prosječni stupčani

otpor Γ_A iznad tih postaja je gotovo konstantan tako da se ta ovisnost svjetskog vremena odnosi na vremensku varijaciju izvora Φ_A , za koji se vjeruje da je grmljavinska aktivnost.

Stupčani otpor u planinskim područjima je manji nego na razini mora. Dakle, konstantni potencijal u bilo kojem trenutku će proizvesti veću gustoću električne struje u planinskom području nego na razini mora.

Na kontinentalnim postajama, promatraju se dvije vrste ovisnosti lokalnog vremena o E_z , dnevne varijacije (diurnal) i poludnevne varijacije (semidiurnal).



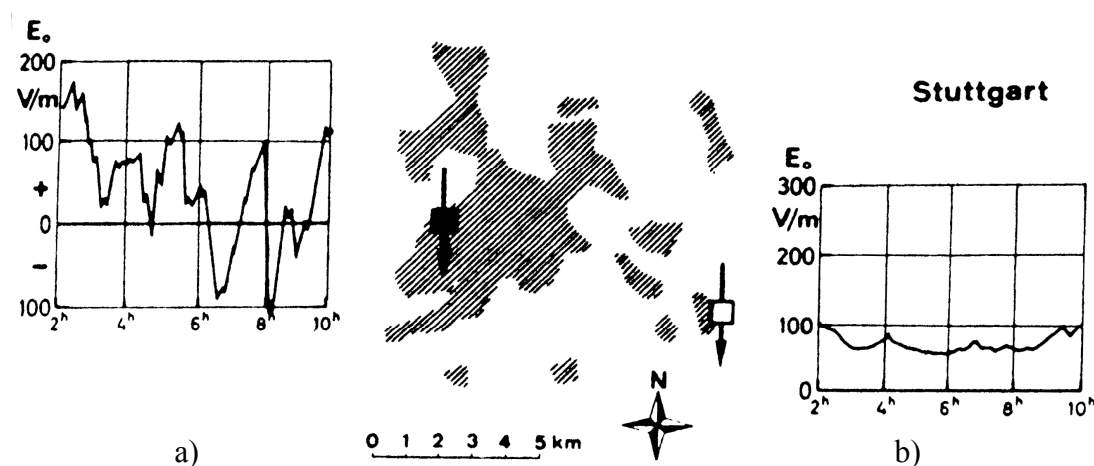
Slika 2. Tri glavna tipa dnevne varijacije vertikalnog električnog polja lijepog vremena na tlu. Tipovi (a) i (b) su kontinentalni, ovise o lokalnom vremenu. Tip (c) je oceanski i ovisi o svjetskom vremenu (prema Volland, 1984.).

Dnevna varijacija tipa (a) na slici 2. se javlja na većini stanica pretežno zimi, dok poludnevna varijacija tipa (b) generalno dominira ljeti. Ipak neke postaje, većinom u gradovima, mjere varijacije tipa (b) tijekom cijele godine, a druge, pretežno u ruralnim područjima, imaju samo dnevne varijacije tipa (a). Tip (b) je ograničen na ravnine i nestaje nekoliko desetaka metara iznad tla gdje je opažen vidljiv prijelaz na varijacije tipa (a).

Ovisnost E_z o lokalnom vremenu na kontinentalnim postajama je iznenađujuće slična varijaciji tlaka vodene pare. Varijacija tlaka vodene pare tipa (a) se zove maritimna dnevna varijacija i javlja se kada god tlo evapotranspiracijom osigurava kontinuiranu i dovoljnu količinu vodene pare. Tlak vodene pare će tada približno pratiti dnevnu temperaturnu krivulju, mijenjajući tako odnos malih spram velikih iona, a time i stupčani otpor unutar atmosferskog graničnog sloja. Varijacija tlaka vodene pare tipa (b) proizlazi iz dnevne komponente s dodatnim efektom konvekcije. Tijekom ljeta konvekcija s maksimumom u podne može reducirati sadržaj vodene pare blizu tla, na taj način previše kompenzira/nadoknađuje efekt evapotranspiracije

tijekom dana. Dani s ponašanjem električnog polja kao na slici 2. se zovu dani lijepog vremena u geoelektričnom smislu.

Magla, sumaglica ili kiša, također i antropogeno onečišćenje, sadržajno mogu promijeniti električnu vodljivost blizu tla. Simultani individualni zapisi jakosti polja mogu se jako razlikovati čak i za okolne postaje.



Slika 3. Antropogeni utjecaj na vertikalno električno polje pri tlu. Simultana mjerenja na dvije postaje istočno i zapadno od Stuttgarta, Njemačka. Postaja zapadno od grada nalazi se u industrijskoj zoni (a), dok je postaja istočno od grada smještena u ruralnom području (b). (Volland, 1984.)

Slika 3. prikazuje antropogene utjecaje na električno polje na nivou tla unutar industrijskog područja (a), međutim postaja u okolnom ruralnom području (b) prikazuje polje lijepog vremena.

Velike vulkanske erupcije, koje izbacuju pepeo i plinove u atmosferu, mogu drastično povećati sadržaj aerosola u sredini atmosfere na nekoliko godina. Tijekom ovih događaja električna vodljivost se smanjuje, a globalni električni potencijal se povećava. Tijekom pojava većih Sunčevih bljeskova, pojačan intenzitet Sunčevih kozmičkih zraka može višesatno povećati električnu vodljivost na visini iznad 15 km. Usto može i proizvesti kratkotrajno poništenje vertikalnog električnog polja unutar sredini atmosfere.

2.5. Mjerenje električnog polja

Za mjerenje električnog polja postoje dva načina:

- 1.) mjerenje potencijala nekog vodiča koji nakon nekog vremena poprimi potencijal okoline i
- 2.) mjerenje naboja koji električno polje influencijom stvori u nekom vodiču.

Za svaki od ovih načina razrađen je čitav niz specijaliziranih metoda koje se uglavnom razlikuju samo po tome kako se postiže električka ravnoteža s okolinom. Princip je sljedeći: dio uređaja koji poprima potencijal okoline zove se potencijalna sonda ili kolektor. Isprva se u tu svrhu koristio običan vodič poput antene, ali je vrijeme uspostavljanja potencijala okoline bilo vrlo dugo. Da bi se taj nedostatak uklonio trebalo je na neki način omogućiti vodiču brže poprimanje potencijala okoline. To je postignuto ionizacijom zraka u blizini kolektora pomoću plamena ili raspršivača za vodu. Mehanički kolektor, koji povremeno kratko spaja elektrometar, također se koristi za odvođenje naboja izazvanih influencijom. Najbolji rezultati postižu se korištenjem radioaktivnih sonde s alfa-zračenjem.

Ako je kućište elektrometra priključeno na zemlju onda uređaj pokazuje neposrednu potencijalnu razliku između visine sonde i zemlje. Elektrometar može biti baždaren odmah u voltima ili se očitava preko baždarnog dijagrama. Pogreške koje se kod mjerenja mogu pojaviti ne odnose se na princip mjerenja, već na praktičnu izvedbu, pogotovo uzevši u obzir teškoće prilikom postizanja dobrih izolacijskih uvjeta u svim vremenskim prilikama.

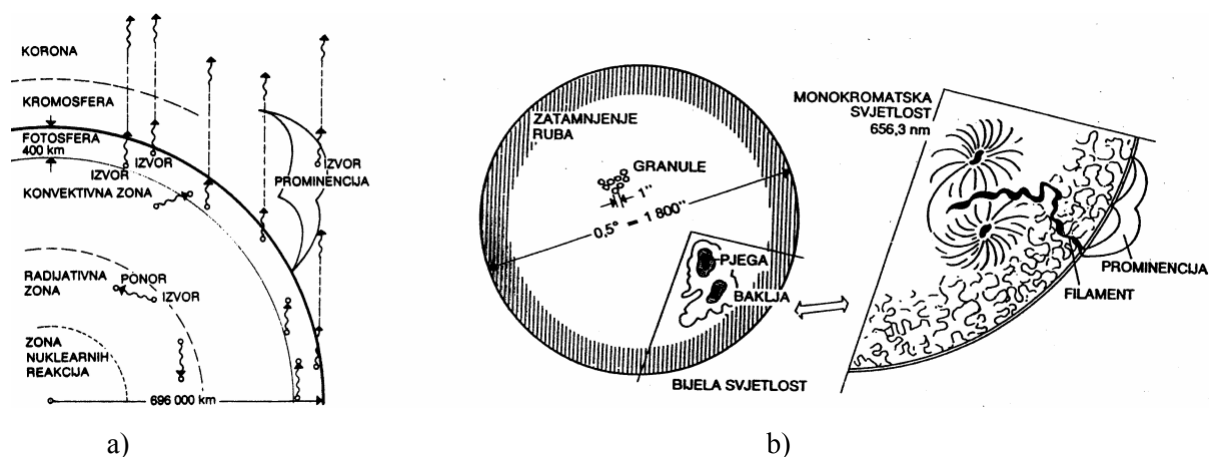
Jedan od načina za mjerenje električnog polja je i sistem koji se sastoji od para metalnih kvadranta, izoliranih od zemlje, ali međusobno spojenih, koji su postavljeni ispod uzemljenog rotirajućeg diska koji ima dvije šupljine oblika kvadranta. Disk rotira konstantnom kutnom brzinom. Tijekom jednog okreta diska i jedan i drugi kvadrant je dvaput potpuno izložen električnom polju, a zatim potpuno zaklonjen od polja.

3. Sunčeva aktivnost

3.1. Sunce

Dimenzije, masa, gravitacijsko polje i temperatura su neki od parametara kojima se Sunce razlikuje od planeta u Sunčevom sustavu. Polumjer Sunca iznosi 0,696 milijuna km, a Sunčev disk se sa Zemlje vidi pod kutom od 32' (0,545°). Sunce je oblika kugle, ali se ne vrti poput čvrste kugle, nego mu je rotacija diferencijalna. Os rotacije otklonjena je od normale na ravninu Zemljine staze za 7,2°. Zvezdani period vrtnje ekvatora iznosi $P = 25$ d, dok je sinodički period $S = 27$ d. U intervalima sinodičkog perioda Sunčeva aktivnost ima utjecaj na Zemlju.

Unutrašnjost Sunca sastoji se od zone nuklearnih reakcija (izvor energije), radijativne zone i konvektivne zone, koja se proteže sve do fotosfere. U fotosferi se mogu uočiti granule (konvektivni elementi), pjega i baklje (svijetla područja u kojima se obnavljaju pjega). Iznad fotosfere nalaze se kromosfera i korona.



Slika 4. a) Presjek kroz Sunce, b) pojave vidljive u bijeloj i monokromatskoj svjetlosti. (Vujnović, 2010).

Pjega su pokazatelj aktivnosti Sunca. Pojavljuju se u pojasu heliografskih širina od 5° do 45° sjeverno i južno od ekvatora. Širina na kojoj se se u neko doba vidi najviše pjega ovisi o vremenu unutar ciklusa aktivnosti. Brojnost pjega i aktivnost Sunca opisuje se međunarodnim brojem Sunčevih pjega;

$$R = k(10g + f) \quad , \quad (18)$$

gdje je f broj pojedinačnih pjega, g broj grupa pjega, a k statistička težina opažackog mjesta. Buduća aktivnost Sunca prognozira se prema pravilnostima u ponašanju relativnog broja pjega. Prosječno trajanje ciklusa iznosi 10,66 godina. Svaki ciklus

ima različito trajanje, a otkako se prati (u posljednjih dva i pol stoljeća): najkraći je trajao 9 godina (2. Sunčev ciklus, 1766.-1775.), a najduži 12,6 godina (23. Sunčev ciklus, 1996.-2008.)^{**}.

Kao mjera Sunčeve aktivnosti koriste se i promjene u emisiji infracrvenog zračenja sa Sunca na valnoj duljini od 10,7 cm.

3.2. F10,7

Sunce emitira radio energiju sa sporo promjenljivim intenzitetom. Taj radio tok potječe iz viših slojeva Sunčeve kromosfere i nižih slojeva korone. Postepeno se mijenja iz dana u dan sukladno promjeni broja grupa pjega na Sunčevom disku.

Strukturu Sunčeve korone, koja ima temperaturu od nekoliko milijuna kelvina, znanstvenici promatraju pomoću radio valova. Sunčeve radio emisije na različitim frekvencijama omogućavaju opažanje zračenja iz različitih visina atmosfere. Što je niža frekvencija, to je veća visina izvora zračenja. Frekvencija, kao i gustoća elektrona, jednoliko opada prema van: 245 MHz potječe iz visokog dijela korone, dok 15 400 MHz potječe iz nižeg dijela korone. Emisija 5 MHz odgovara visini oko 10 Sunčevih radijusa.

Radio erupcije su povezane sa Sunčevim bljeskovima. Kašnjenje različitih radio frekvencija na Zemlji, tijekom tih erupcija, događa se zbog gibanja izvora prema van. Erupcije mogu imati temperature 10^{12} K. Velike erupcije traju 10 do 20 minuta u prosjeku.

Dnevni radio tok frekvencije 2800 MHz (odnosno valne duljine 10,7 cm) visoko korelira s dnevnim brojem Sunčevih pjega i ta dva seta podataka se koriste naizmjenice. Radio valovi 10,7 cm, odgovaraju istim uvjetima koji proizvode i promjene u vidljivom i rendgenskom području valnih duljina.

^{**} Podaci preuzeti s http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle

4. Mjerne postaje i instrumenti

4.1. Atmosfersko električno polje

Mjerenja su obavljena na Geofizičkom opservatoriju "Stanislaw Kalinowski" Poljske Akademije znanosti, u Swideru. Dostupni podaci objavljeni u biltenima Poljske Akademije znanosti obuhvaćaju vremensko razdoblje od 1994. do 2006. godine.

Swider se nalazi oko 25 km JJI od Varšave i 2,5 km SSZ od grada Otwock. U blizini postaje nema velike industrije te prevladavaju kuće veličine vile. Ograđeni teritorij Opservatorija, površine oko 7 ha, obrastao je borovima i listopadnim drvećem sa nekoliko čistina. Jedna od tih čistina, površine oko 1 ha, lokacija je postaje za meteorologiju i atmosferski elektricitet. Mala ulica Brzozowa, s malo prometa, nalazi se blizu Opservatorija, u smjeru JJZ. Dvije zgrade Opservatorija nalaze se na rubu čistine: zgrada administracije i paviljon za mjerenja.

Instrumenti za mjerenje i snimanje atmosferskog elektriciteta uglavnom se nalaze u paviljonu i djelomično na čistini, dok se meteorološka mjerenja obavljaju u meteorološkoj kućici i meteorološkom krugu. Parametri atmosferskog elektriciteta su električno polje (EP), pozitivna električna vodljivost (VO) i srednja gustoća struje (SG). Električno polje i vodljivost su mjerene veličine dok je srednja gustoća struje izračunata prema relaciji (9).

Jakost električnog polja se mjeri pomoću dva identična elektronička aparata koji rade neovisno jedan od drugoga. Svaki se sastoji od radioaktivnog kolektora smještenog na metalnu šipku, koja je izolirana i posebnog dinamičkog elektrometra. Elektrometri su unutar odvojenih metalnih kućišta kako bi bili zaštićeni od štetnih vremenskih utjecaja. Dodatno su grijani kako bi se zadržala visoka otpornost izolatora. Svaki sandučić s elektrometrom montiran je na metalnu cijev. Jedan kolektor je postavljen na 200 cm iznad tla, a drugi na 230 cm. Razlike potencijala između kolektora i Zemljine površine se pojačavaju elektrometrom i prenose ukopanim kablovima na digitalni zapisnik.

Aparatura za mjerenje električne vodljivosti pozitivnog polariteta sastoji se od Gerdienovog aparata za mjerenje električne vodljivosti s električnim baterijama, elektrometra i zapisnika. Gerdienov aparat za mjerenje električne vodljivosti se nalazi u odvojenoj ciglenoj kućici udaljenoj 3 metra od mjernog paviljona. Elektrometar je

smješten u mjernom paviljonu i spojen je s Gerdienovim aparatom putem ukopanih visokootpornih kablova.

4.2. Radio tok F10,7

Dnevna mjerenja integrirane emisije Sunčevog diska na 2800 MHz (valna duljina 10,7 cm) obavljaju se u National Research Council of Canada od 1947. godine. Do 31. svibnja 1991. opažanja su obavljana u Algonquin Radio Observatory, kraj Ottawe. Između 1990. i 1991. program je prebačen u Dominion Radio Astrophysical Observatory, kraj Pentictona, British Columbia. Od 1. lipnja 1991. podaci su prikupljani na toj lokaciji.

Točna mjerenja toka na 10,7 cm valne duljine su izvršena u lokalno podne (20:00 UTC). Monitori toka imaju 1,8 m paraboloidalne antene koje su jednako osjetljive na sve točke Sunčevog diska. U računanju toka na 10,7 cm pretpostavljeno je da integrirana emisija sa Sunčevog diska na toj valnoj duljini nema linearne polarizacije. Vrijednosti toka su izražene u jedinicama s.f.u. ($1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

Podaci su tabelirani u dva oblika: 'opaženi tok' i 'prilagođeni tok'. 'Opaženi tok' je mjereni tok reduciran na konstantnu udaljenost između Zemlje i Sunca, odnosno na jednu astronomsku jedinicu. Vrijednosti 'opaženog toka' su korisne u fizici ionosfere i drugim terestričkim posljedicama Sunčeve aktivnosti. *

* Podaci i opis mjerenja su preuzeti s
<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=102827&s=4&d=8,22,9>

5. Metode obrade podataka

5.1. Podaci

U ovom radu analizirani su podaci parametara atmosferskog električnog polja (EP, VO, SG) u uvjetima lijepog vremena i parametra Sunčeve aktivnosti radio tok (F10,7) u razdoblju od 1994. do 2006. godine. Uvjeti lijepog vremena određeni su prema kriteriju da u razdoblju mjerenja nije bilo sljedećih (meteoroloških) pojava: kiša, rosulja, snijeg, magla, lokalno ili udaljeno grmljavinsko nevrijeme, niska naoblaka veća od 1/3, brzina vjetera veća od 6 m s^{-1} , te vrijednost električnog polja negativna ili veća od 1000 V m^{-1} .

Analizirano vremensko razdoblje se djelomično poklapa sa 23. Sunčevim ciklusom, koji je počeo u svibnju 1996. godine, a završio minimumom u rujnu 2008. godine. Iako 1994. i 1995. godina pripadaju 22. Sunčevom ciklusu, uključene su u ukupnu analizu da bi imali duži vremenski niz za korelaciju i linearnu regresiju.

5.2. Metoda

Za utvrđivanje veze između Carnegie krivulje, električnog polja, vodljivosti i srednje gustoće struje korištena je korelacijska analiza. Traži se koeficijent korelacije koji predstavlja najvjerojatniju korelaciju između vremenskih nizova. Korelacijskom analizom će se utvrditi koliko dobro dnevne varijacije električnog polja oponašaju Carnegie krivulju.

Neka su $x(t)$ i $y(t)$ vremenski nizovi mjerenja parametara atmosferskog električnog polja čije se vrijednosti neprekidno mijenjaju u vremenu t . Traži se koeficijent korelacije R koji predstavlja mjeru linearne zavisnosti između $x(t)$ i $y(t)$. Koeficijent korelacije poprima vrijednosti $-1 < R < 1$, gdje je -1 savršena negativna, a 1 savršena pozitivna korelacija između podataka, dok vrijednost 0 ukazuje na nepostojanje korelacije.

Za utvrđivanje postojanja/nepostojanja veze između parametara atmosferskog električnog polja i parametra Sunčeve aktivnosti, F10,7, također je korištena korelacijska analiza. U ovom slučaju osim koeficijenta korelacije između vremenskih nizova, traži se i pravac regresije koji najbolje opisuje linearnu vezu između podataka. Pokušati će se ustanoviti da li postoji vremenski pomak u odgovoru parametara atmosferskog električnog polja, dakle traži se korelacija $x(t)$ i $y(t + dt)$.

Neka su $\{x_t\}_{t=1,n}$ i $\{y_t\}_{t=1,n}$ vremenski nizovi srednjih mjesečnih vrijednosti, a vremenski korak iznosi $dt = 1$ mjesec. Tada je koeficijent korelacije $R(k)$ s vremenskim pomakom $\Delta t = k \cdot dt$ mjera linearne zavisnosti između vrijednosti x_t i vrijednosti $y_{t+\Delta t}$ koja nastupa Δt vremena nakon x_t :

$$R(k) = \frac{(n-k) \sum_{t=1}^{n-k} x_t y_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} x_t \sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k}}{\sqrt{\left((n-k) \sum_{t=1}^{n-k} x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-k} x_t \right)^2 \right) \left((n-k) \sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k}^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k} \right)^2 \right)}}, k = 0, 1, \dots, n-1$$

Za negativne vremenske pomake Δt , $R(k)$ je:

$$R(k) = \frac{(n+k) \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} y_t - \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} \sum_{t=1}^{n+k} y_t}{\sqrt{\left((n+k) \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k}^2 - \left(\sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} \right)^2 \right) \left((n+k) \sum_{t=1}^{n+k} y_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n+k} y_t \right)^2 \right)}}, k = -1, \dots, -(n-1)$$

Vrijednosti $R(k)$ dobivene za različite vremenske pomake Δt čine korelacijsku funkciju $R(\Delta t)$ iz koje se može očitati vremenski pomak Δt pri kojem je koeficijent korelacije najveći. Taj vremenski pomak predstavlja vremenski odgovor atmosferskog električnog polja na varijacije Sunčeve aktivnosti. Što je Δt veći, to je manje parova $(x_t, y_{t+\Delta t})$ za računanje koeficijenata korelacije $R(k)$ zbog čega funkcija $R(\Delta t)$ postaje nepouzdana i može proizvesti lažne korelacije između podataka. Zbog te činjenice gledane su vrijednosti funkcije korelacije $R(\Delta t)$ za $\Delta t = \pm 36$ mjeseci.

Nakon što je ustanovljeno postojanje korelacije između nizova podataka i vremenski pomak Δt pri kojem postoji najbolja korelacija, slijedi povezivanje vremenski pomaknutih nizova $x(t)$ i $y(t+\Delta t)$ nekom funkcijom koja bi omogućila da se iz zadane vrijednosti jedne varijable izračuna druga.

Neka su $\{x_t\}_{t=1,n-\Delta t}$ i $\{y_t\}_{t=1+\Delta t,n}$ vremenski pomaknuti nizovi srednjih mjesečnih vrijednosti parametra Sunčeve aktivnosti i parametara atmosferskog električnog polja gdje je Δt vremenski pomak za najbolju korelaciju. Pretpostavljena je linearna veza između podataka te se traži pravac regresije u obliku: $y(t') = a \cdot x(t) + b$, gdje je t' pomaknuto vrijeme ($t' = t + \Delta t$). Skup mjerenih podataka sastoji se od $n - \Delta t$ vremenski pomaknutih parova x_t i $y_{t'}$, tj parova (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n - \Delta t$. Jednadžba regresije za mjerene vrijednosti x_t i $y_{t'}$ tada glasi:

$$y_i = ax_i + b + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n - \Delta t$$

gdje su ε_i odstupanja mjerenih vrijednosti y_i od predviđenih vrijednosti $a \cdot x_i + b$

$$\varepsilon_i = y_i - (ax_i + b), \quad i = 1, \dots, n - \Delta t$$

Najvjerojatniji pravac regresije nalazi se metodom najmanjih kvadrata gdje se traže koeficijenti pravca regresije a i b koji minimaliziraju sumu kvadrata odstupanja $\sum \varepsilon_i^2$,

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^{n-\Delta t} [y_i - (ax_i + b)]^2 = \sum_{i=1}^{n-\Delta t} \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$$

Suma kvadrata odstupanja je minimalna kada vrijedi,

$$\frac{\partial f(a, b)}{\partial a} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial f(a, b)}{\partial b} = 0$$

Uz te uvjete dobiveni su koeficijenti pravca regresije a i b ,

$$a = \frac{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2} \quad \text{i} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i - \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i y_i}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2}$$

Pravac regresije je prilično tolerantan za mala odstupanja između podataka i linije, dok pri većim odstupanjima dolazi do znatnog prilagođavanja linije zbog čega je linearna regresija neotporna na velika odstupanja.

Nepouzdanost koeficijenata pravca regresije a i b su,

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{(n - \Delta t - 2)} \left[\frac{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i \right)^2}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2} - a^2 \right]} \quad \text{i} \quad M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2}{n - \Delta t}}$$

Postupak je proveden na originalnim vremenskim nizovima.

6. Rezultati

6.1. Analiza rezultata

Rezultati korelacijske analize za radio tok F10,7 prikazani su u tablicama 3.–7., gdje su a i b koeficijenti pravca regresije, R koeficijent korelacije i Δt vremenski pomak za najbolju korelaciju. Na slikama 5. i 6. prikazani su grafovi rasapa podataka za najbolju korelaciju sa pripadnim pravicima regresije, koeficijentima korelacije i vremenskim pomacima.

6.1.1. Korelacije između F10,7 i parametara atmosferskog električnog polja

Koeficijenti korelacije radio toka (F) sa električnim poljem (EP), pozitivnom vodljivošću (VO) i srednjom gustoćom struje (SG) prikazani u tablici 1. ukazuju na slabu korelaciju. Najveći koeficijenti korelacije nađeni su za F sa EP ($R = -0,38$, za $\Delta t = 32$ mjeseca) i F s VO ($R = 0,29$, za $\Delta t = 32$ mjeseca). Najmanji koeficijent korelacije ($R = 0,14$) uz najmanji vremenski pomak nađen je za SG.

Tablica 3. Korelacija između F10,7 i parametara atmosferskog električnog polja

	a	b	R	Δt
F-EP	-0,49	334,38	-0,38	32
F-VO	-0,051	17,75	0,29	32
F-SG	$-6,2 \times 10^{-6}$	0,63	0,14	9

Na slici 5. prikazani su grafovi rasapa za vremenski pomaknute nizove F i parametre atmosferskog električnog polja s označenim pravicima linearne regresije, koeficijentima korelacije i vremenskim pomakom. Na grafu rasapa F-EP (slika 5.a) uočena je negativna linearna veza između podataka. Iako je rasap podataka velik, većina podataka je unutar područja omeđenog pravicima $EP = a \cdot F + 200 \text{ V m}^{-1}$ i $EP = a \cdot F + 350 \text{ V m}^{-1}$. Nagib pravca regresije je mali pa EP ne ovisi direktno o F. Rasap podataka na grafu F-VO (slika 5.b) je manji nego kod F-EP. Koeficijent korelacije je manji, no vremenski pomak je isti. Na slici 5.c vidljivo je da F-SG ima najveći rasap podataka, a koeficijent korelacije je najmanji. Nagibi pravca regresije su

u svim vezama mali, što znači da je mali dio ovisnosti parametara atmosferskog električnog polja o F opisan linearnom vezom.

Mogući uzrok loših korelacija s radio tokom je mali broj podataka u danima s lijepim vremenom zbog čega srednje vrijednosti parametara atmosferskog elektriciteta korištene u analizi nisu potpuni odraz ponašanja na promjene radio toka.

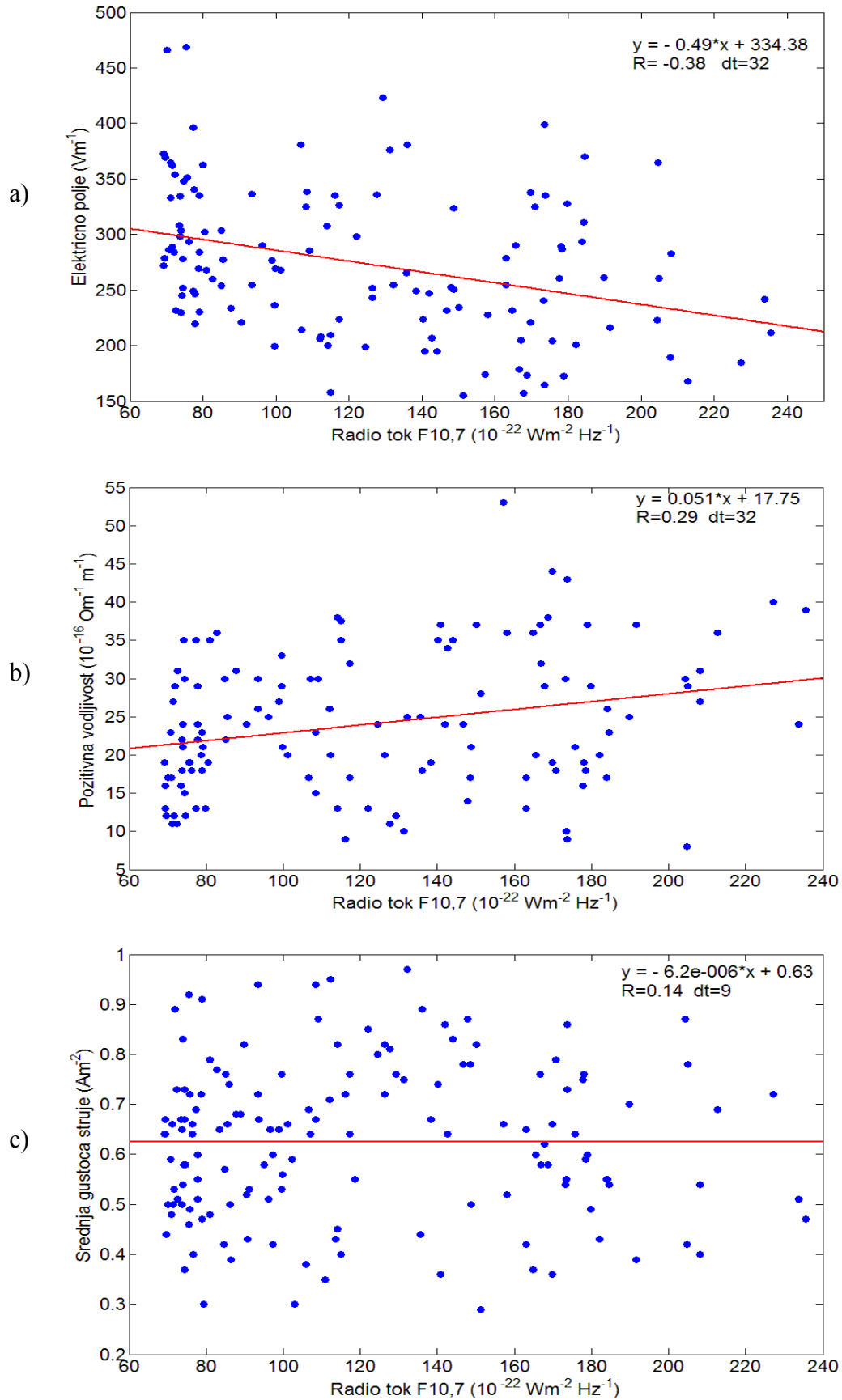
6.1.2. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja

U ispitivanoj vezi između parametara atmosferskog električnog polja (tablica 4.) najveći koeficijent korelacije ($R = -0,71$) nađen je između EP i VO za vremenski pomak $\Delta t = 0$ mjeseci. Koeficijent korelacije VO sa SG pokazuje pozitivnu korelaciju ($R = 0,67$) za vremenski pomak $\Delta t = 0$ mjeseci, a nešto manji koeficijent korelacije EP sa SG nađen je uz vremenski pomak $\Delta t = 31$ mjesec.

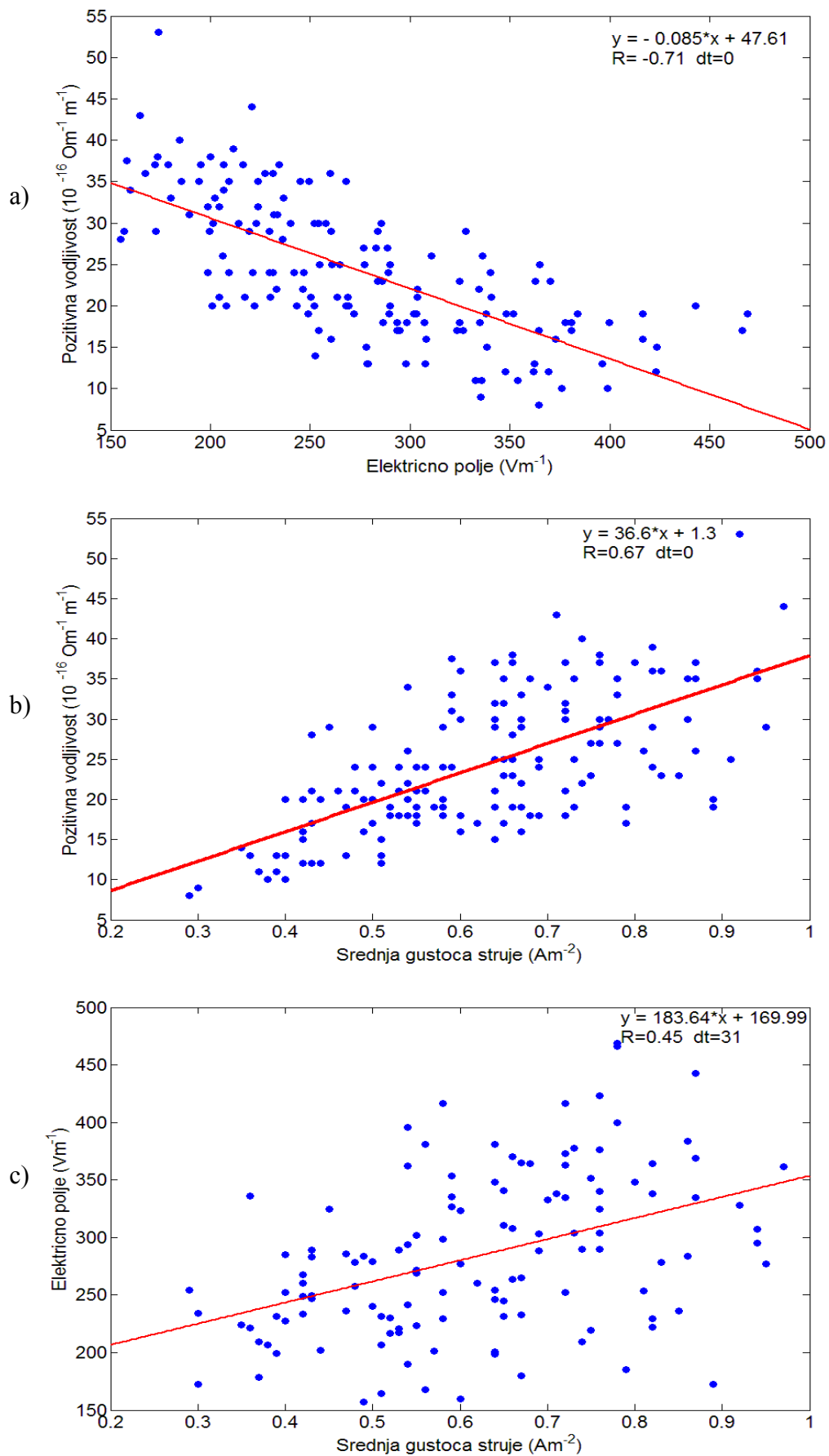
Tablica 4. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja

	a	b	R	Δt
EP-VO	-0,085	47,61	-0,71	0
EP-SG	183,64	169,99	0,45	31
VO-SG	36,62	1,30	0,67	0

Na slici 6. prikazani su grafovi rasapa vremenski pomaknutih nizova EP, VO i SG sa označenim pravcima linearne regresije, koeficijentima korelacije i vremenskim pomacima. Grafovi rasapa otkrivaju približno linearnu vezu između VO i SG te nešto slabiju linearnu vezu između EP i SG dok se u vezi EP-VO može uočiti jaka negativna linearna veza. Na grafu EP-VO (slika 6.a) vidljivo je da se s porastom vrijednosti EP smanjuje VO i obratno. Negativni koeficijent korelacije za EP-VO u skladu je s očekivanjima. Graf rasapa VO-SG (slika 6.b) prikazuje linearnu vezu VO sa SG. Najveći rasap podataka uočen je na grafu EP-SG (slika 6.c), za tu vezu nađen je nešto manji koeficijent korelacije uz vremenski pomak $\Delta t = 31$ mjesec. Mogući uzrok takve korelacije sa vremenskim pomakom je globalna grmljavinska aktivnost, za koju se smatra da pokreće SG (Harrison i Aplin, 2003.).



Slika 5. Vremenski pomaknute korelacije: a) F-EP, b) F-VO, c) F-SG



Slika 6. Vremenski pomaknute korelacije: a) EP-VO, b) SG-VO, c) SG-EP

6.1.3. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja i Carengie krivulje za odabrane godine

Za korelacijsku analizu električnog polja i vodljivosti sa Carnegie krivuljom odabrane su godine 1996., 2000., 2002. i 2005. Raspon podataka nije pokrio cijeli Sunčev ciklus pa, da bi imali dvije godine u minimumu i dvije godine u maksimumu, u analizu je uključena i 2005. godina jer je najbliže drugom minimumu, a 2006. godina nije jer nema dana s lijepim vremenom u zimi.

Za korelacijsku analizu odabrana su četiri dana za svaku godinu tako da svaki dan pripada jednom godišnjem dobu. Tablica 5. prikazuje koeficijente korelacije za dvije godine u minimumu i dvije godine u maksimumu Sunčeve aktivnosti. Korelacijskom analizom ustanovljeno je da najveće koeficijente korelacije imaju dani koji predstavljaju zimu i jesen. Ti dani imaju dnevni hod najsličniji Carnegie krivulji. Dani proljeća i ljeta imaju manje koeficijente korelacije, a neki i negativne. To može upućivati na višeperiodični dnevni hod, što je i u skladu sa očekivanjima. Slike 6.–9. prikazuju dane u kojima su koeficijenti korelacije za EP-C, VO-C i EP-VO najmanji.

Tablica 5. Korelacije između parametara atmosferskog električnog polja i Carnegie krivulje

	1996.				2005.			
Datum	12.1.	7.4.	24.8.	12.11.	17.1.	4.4.	1.9.	7.10.
EP/C	0,96	0,45	0,40	0,54	0,89	-0,13	0,62	0,89
VO/C	-0,75	-0,19	0,47	0,24	-0,71	0,49	0,11	0,12
EP/VO	-0,67	0,28	-0,14	0,31	-0,75	-0,65	-0,42	-0,01
SG/EP	0,63	0,76	0,80	0,99	0,35	0,08	0,89	0,61
SG/VO	0,10	0,83	0,48	0,41	0,33	0,69	0,01	0,77

	2000.				2002.			
Datum	17.2.	3.5.	18.8.	21.10.	17.3.	3.4.	3.9.	15.11.
EP/C	0,66	-0,14	-0,17	0,71	0,45	0,70	0,64	0,83
VO/C	-0,53	0,26	-0,01	-0,46	-0,28	-0,30	-0,65	-0,70
EP/VO	-0,81	-0,88	-0,49	-0,23	-0,50	-0,84	-0,72	-0,35
SG/EP	-0,59	-0,39	0,83	0,50	0,78	-0,46	0,78	0,54
SG/VO	0,92	0,74	0,06	0,73	0,14	0,86	-0,15	0,59

Za kontinentalnu mjernu postaju poput ove očekuje se određena sličnost sa Carnegie krivuljom, ali i određena varijabilnost s obzirom na kontinentalnost i lokalne

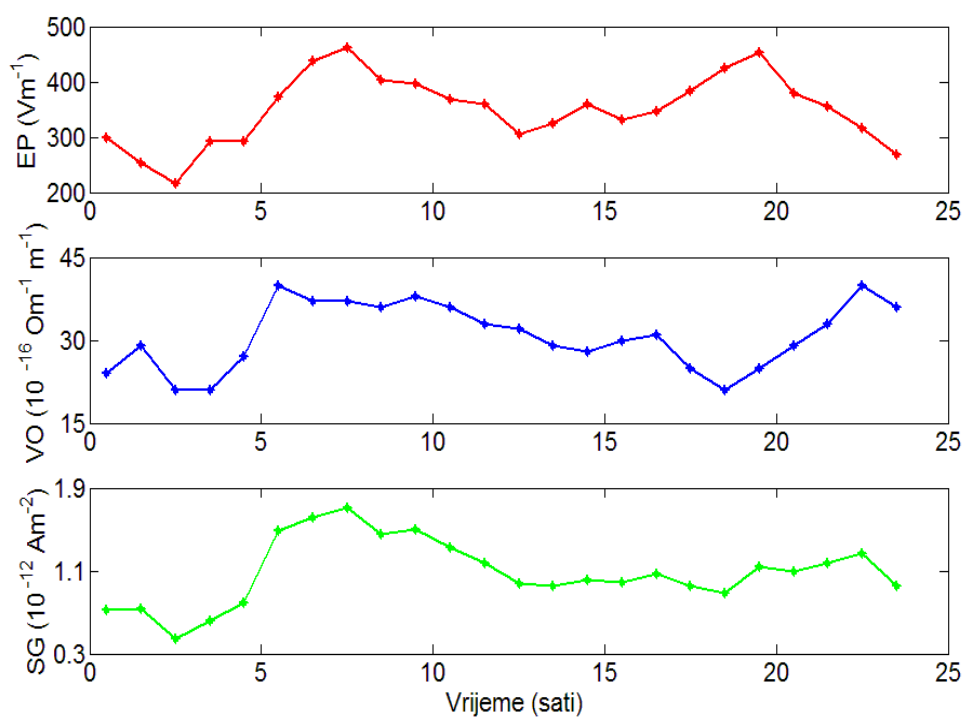
utjecaje. Na slici 6. prikazane su dnevne varijacije EP, VO i SG na dan 7.travnja1996. EP ima dvoperiodični dnevni hod sa dva maksimuma (oko 8 h i 20 h). Za sva tri parametra jutarnji minimum nastupa između 2 h i 3 h. Smatra se da je to uzrok manjim koeficijentima korelacije parametara sa Carnegie. SG jako dobro korelira sa VO, što se vidi po obliku krivulje.

Slika 7. prikazuje dnevne varijacije EP, VO i SG na dan 4.travnja 2005. Koeficijent korelacije EP-C ($R = -0,13$) ukazuje na slabu vezu tih parametara dok VO-C ima nešto bolju ($R = 0,49$). SG pokazuje najbolju vezu sa VO ($R = 0,69$) što se vidi po obliku krivulje, nastupu minimuma (oko 6 h) i maksimuma (oko 16 h).

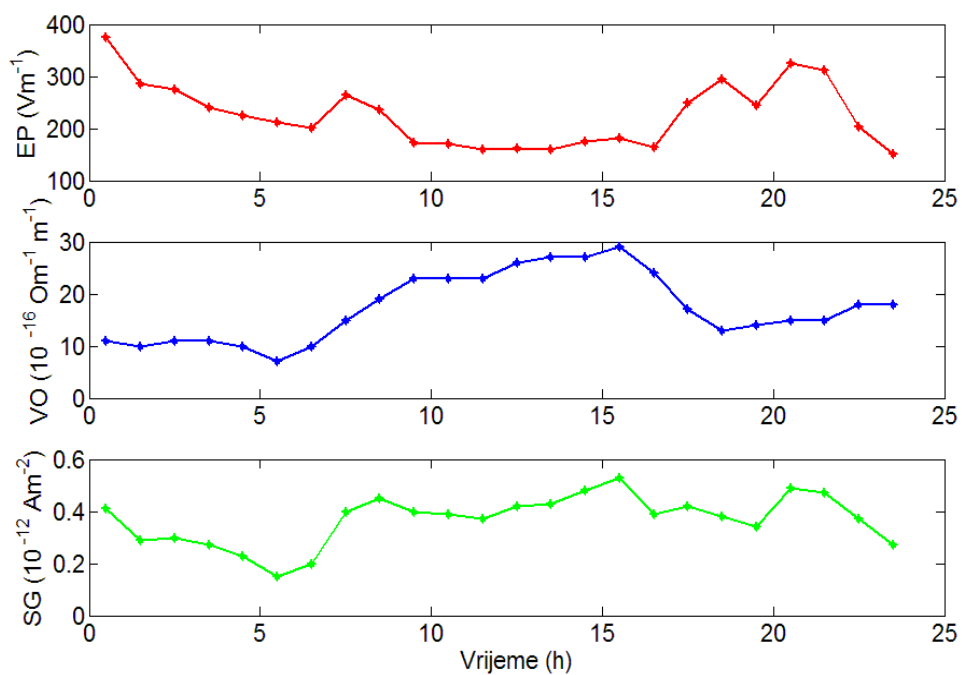
Iz 2000. godine prikazana su dva dana sa najmanjim koeficijentima korelacije. Na dan 3.svibnja (slika 8.) EP ima slabije izražen dvoperiodični hod ($R = -0,14$), a VO sa nešto većim koeficijentom korelacije ima jednoperiodični hod bez izraženog nastupa minimuma i maksimuma. Najveće koeficijente korelacije imaju EP-VO ($R = -0,88$) i SG-VO ($R = 0,74$).

Za ljetni dan 18.kolovoza2000. najveći koeficijenti korelacije nađeni za EP-VO ($R = -0,49$) i SG-EP ($R = 0,83$). Dnevne varijacije EP i SG (slika 9.) imaju jednoperiodični hod s minimumom oko 3 h i maksimumom oko 6 h. Takav dnevni hod, iako je jednoperiodičan, ne poklapa se sa Carnegie krivuljom pa su i koeficijenti korelacije mali. VO pokazuje dvoperiodičan dnevni hod sa nastupom prvog minimuma i maksimuma kao kod SG. Drugi minimum je nastupio oko 18 h, a maksimum oko 20 h.

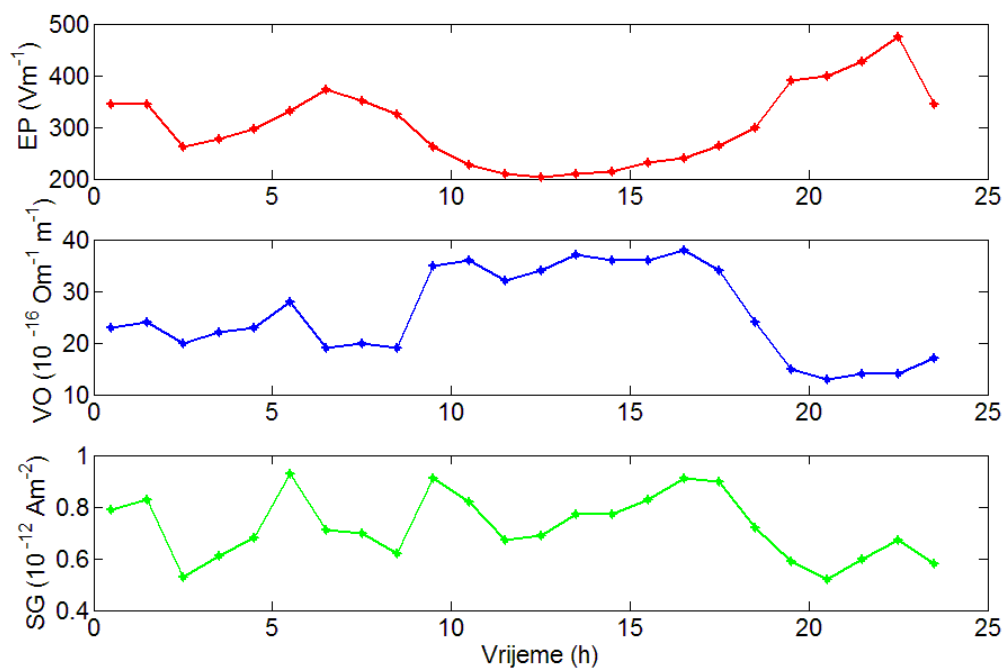
Dani koji nisu detaljnije analizirani prikazani su na slikama 12.–23. u prilogu.



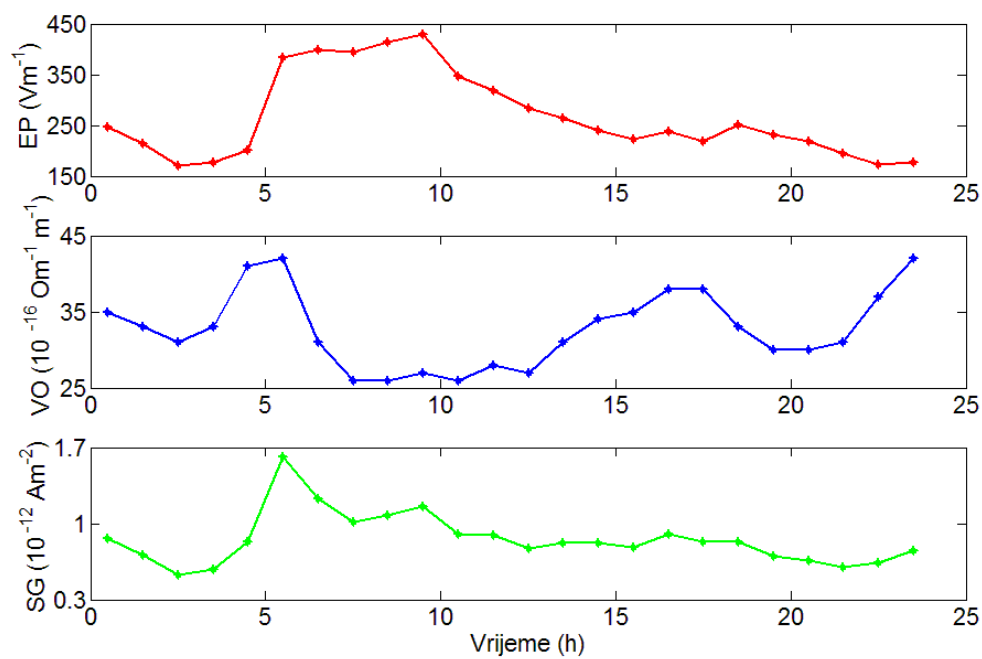
Slika 6. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 7.travnja1996.



Slika 7. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 4.travnja2005.



Slika 8. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 3.svibnja2000.



Slika 9. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 18.kolovoza2000.

6.1.4. Korelacija EP–C i VO–C za zimu i ljeto

U tablici 6. prikazani su koeficijenti korelacije EP-C i VO-C za zimu i ljeto. Vrijednosti EP i VO su tromjesečne srednje vrijednosti: zima (Pro-Sij-Velj) i ljeto (Lip-Srp-Kol).

Tablica 6. Koeficijenti korelacije EP-Car i VO-Car po godišnjim dobima

Godina	EP		VO	
	Zima-Car.	Ljeto-Car.	Zima-Car.	Ljeto-Car.
1994	0,85	0,04	-0,43	0,03
1995	0,84	0,14	-0,58	-0,39
1996	0,80	0,44	-0,80	0,70
1997	0,53	0,04	0,06	0,72
1998	0,88	0,27	-0,20	0,73
1999	0,92	0,07	-0,88	0,62
2000	0,90	-0,08	-0,80	0,74
2001	0,86	0,06	-0,76	0,70
2002	0,87	0,35	-0,71	0,70
2003	0,83	0,13	-0,51	0,67
2004	0,88	-0,12	-0,58	0,52
2005	0,82	0,15	0,002	0,62
2006	0,93	0,05	-0,43	0,71

Najveće koeficijente korelacije tijekom vremenskog razdoblja 1994.–2006. ima ispitana veza EP Zima-Car. Vrijednosti koeficijenata korelacije kreću se $0,80 < R < 0,92$ uz iznimku 1997. godine kada je $R = 0,53$. Uzrok tome bi mogao biti odgovor električnog polja na minimum Sunčeve aktivnosti iz 1996., no ispitivano vremensko razdoblje ne obuhvaća idući minimum Sunčeve aktivnosti, pa se to ne može i potvrditi.

Najmanje koeficijente korelacije tijekom vremenskog razdoblja 1994.–2006. ima ispitana veza Ljeto-Car. Vrijednosti koeficijenata kreću se $0,04 < R < 0,44$. Slaba

korelacija je uzrokovana lokalnim električnim generatorima (grmljavinsko nevrijeme) koji su posebno aktivni tijekom ljetnih mjeseci te su podaci 'kontaminirani' lokalnim utjecajima što ujedno prekriva globalnu komponentu, (Harrisson i Marcz, 2003.).

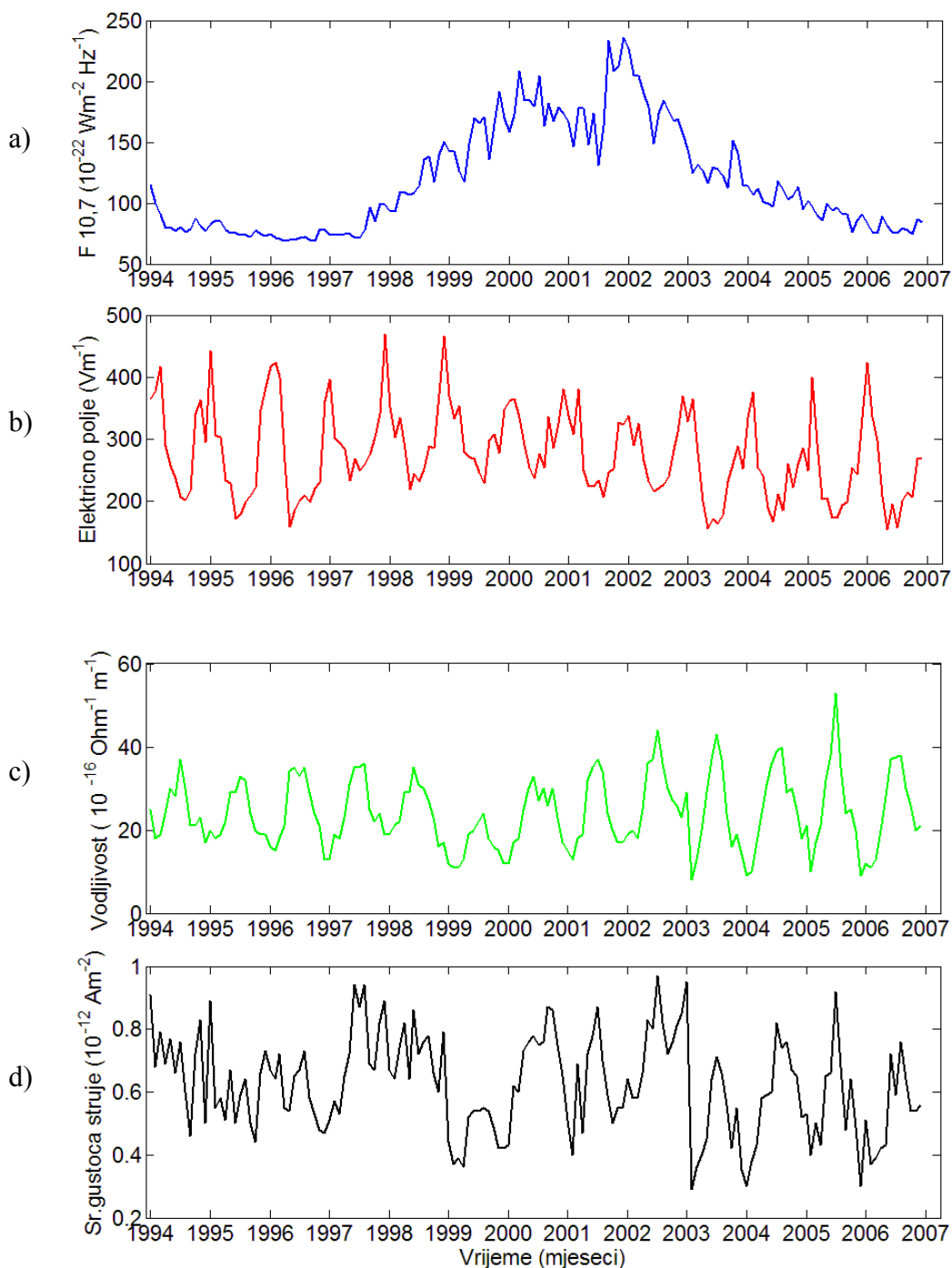
6.2. Diskusija rezultata

Rezultati za F10,7: Ispitivanjem povezanosti utjecaja Sunčeve aktivnosti na Zemljino atmosfersko električno polje ustanovljeno je da postoji linearna veza uz vremenski pomak $\Delta t = 32$ mjeseca. Pretpostavlja se da promjene radio toka na valnoj duljini 10,7 cm nemaju direktan utjecaj na parametre atmosferskog električnog polja. Daljnjim istraživanjem otkriven je mogući indirektan utjecaj Sunčeve aktivnosti na EP i VO, koji se očituje u godišnjim amplitudama. U tablici 7. prikazane su godišnje amplitude za EP, VO i SG. Za sva tri parametra u 1999. godini amplitude su puno manje nego u ranijim godinama te nakon te godine godišnje amplitude se povećavaju.

Tablica 7. Godišnje amplitude električnog polja (EP), vodljivosti (VO) i srednje gustoće struje (SGS)

Godina	EP (V m ⁻¹)	VO 10 ⁻¹⁶ (Ω m) ⁻¹	SG (A m ⁻²)
1994	215	19	0,46
1995	270	15	0,44
1996	264	20	0,26
1997	163	23	0,43
1998	247	19	0,27
1999	139	13	0,18
2000	144	22	0,44
2001	174	24	0,48
2002	154	27	0,41
2003	207	35	0,65
2004	208	31	0,54
2005	226	44	0,61
2006	268	27	0,39

Na slici 10. a)-d) prikazani su srednje mjesečne vrijednosti F10,7, EP, VO i SG u vremenskom razdoblju 1994.-2006. Uočena je opisana promjenjivost godišnjih amplituda (slike 10.b-d). Minimalne amplitude u 1999. godini donekle potvrđuju vremenski pomak određen korelacijskom analizom. Analizom većeg vremenskog razdoblja i više postaja moglo bi se utvrditi da li je rezultat korelacije i minimalna amplituda stvarno posljedica utjecaja Sunčeve aktivnosti ili se radi o terestričkoj komponenti (lokalnoj ili globalnoj).

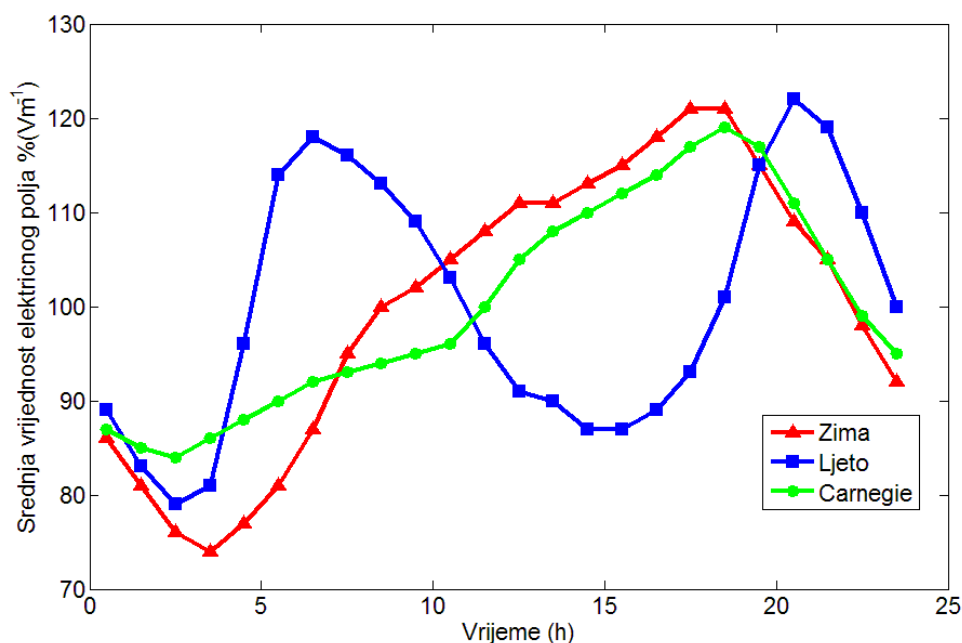


Slika 10. Vremenski nizovi podataka za razdoblje 1994. –2006. godine

Rezultati sezonske analize: Korelacijska analiza je pokazala da su najveći koeficijenti korelacije EP-C u zimskim i jesenskim danima, a najmanji u proljetnim i ljetnim. Za razliku od EP, koeficijenti korelacije VO-C su pokazali veću varijabilnost, koja je varirala za svaku godinu i godišnje doba. Smatra se da je uzrok tome neki lokalni utjecaj koji nije otkriven u ovoj analizi.

Slična analiza primijenjena je na srednje mjesečne vrijednosti EP i VO za zimu i ljeto. Odabrana su ta godišnja doba da bi se utvrdilo jesu li zimski dani pokazali lokalnu varijaciju električnog polja ili globalnu. Očekivano najveća je korelacija između EP zime i Carnegie krivulje, a najmanja između EP ljeta i Carnegie.

Na slici 11. prikazano je električno polje usrednjeno u vremenskom razdoblju 1994.–2006. za zimu, ljeto i Carnegie u postotcima srednje vrijednosti EP. Zima s najvećim koeficijentom korelacije ima jednoperiodični hod, a ljeto s najmanjim koeficijentom korelacije dvoperiodični dnevni hod.



Slika 11. Zima, ljeto i Carnegie u postotcima srednje vrijednosti EP.

S druge strane, VO zima-Carnegie ima najveće negativne, a VO ljeto-Carnegie najveće pozitivne koeficijente korelacije. Može se zaključiti da vodljivost ima jednoperiodičan dnevni hod i ljeti i zimi, uz napomenu da zimi prvo nastupa maksimum (obrnuto proporcionalno Carnegie krivulji).

Iako je korelacijskom analizom dokazana negativna linearna veza EP-VO, gledajući sezonski ne može se primijeniti ista zakonitost u ponašanju tih parametara.

7. Zaključak

Cilj ovog rada bio je utvrditi utjecaj Sunčeve aktivnosti na Zemljino atmosfersko električno polje. Sunčeva aktivnost se povećava i smanjuje tijekom 11-godišnjeg ciklusa. Za indikator Sunčeve aktivnosti odabran je radio tok na valnoj duljini 10,7 cm (F10,7). Smatra se da radio tok ima prednost nad međunarodnim brojem Sunčevih pjega jer su njegova mjerenja objektivna i mogu se obavljati u bilo kojim meteorološkim uvjetima (Hathaway, 2010). Zemljino atmosfersko električno polje opisano je pomoću tri parametra: jakost električnog polja (EP), vodljivost (VO) i srednja gustoća struje (SG). Da bi se lakše uočilo utjecaj Sunčeve aktivnosti te isključio utjecaj grmljavinske aktivnosti na Zemlji, atmosfersko električno polje se proučavalo samo u uvjetima lijepog vremena.

Ispitivanje veze F10,7 i parametara atmosferskog električnog polja dovelo je do zaključka da postoji slaba linearna veza koja je uočena uz vremenski pomak od 32 mjeseca. Smatra se da postoji indirektan utjecaj Sunčeve aktivnosti koji se očituje u godišnjim amplitudama EP i VO. Minimum Sunčeve aktivnosti nastupio je 1996. godine, a najmanje godišnje amplitude EP i VO uočene su 1999. godine. Na većem vremenskom nizu moglo bi se utvrditi da li se radi o indirektnom utjecaju Sunčeve aktivnosti ili o lokalnom terestričkom utjecaju.

Tijekom godine jakost atmosferskog električnog polja se pravilno mijenja pokazujući izrazitu godišnju oscilaciju. Kao i kod dnevne oscilaciju, preklapaju se dva utjecaja: globalni i lokalni. Globalni utjecaj djeluje istovremeno na cijeloj Zemlji. Lokalni utjecaj, u suglasnosti sa izmjenama godišnjih doba, uvjetuje suprotan oblik godišnje oscilacije na sjevernoj hemisferi od one na južnoj hemisferi (Volarić, 2004.). Sezonska analiza pokazala je da na postaji Opservatorija, električno polje ima jednoperiodičan dnevni hod zimi, a ljeti dvoperiodičan. Slična analiza provedena za pozitivnu vodljivost, pokazala je da se vodljivost zimi spram električnog polja odnosi obrnuto proporcionalno i ima jednoperiodičan dnevni hod, dok ljeti slijedi dnevni hod Carnegie krivulje. Sezonskom analizom utvrđeno je da globalna komponenta ima veći utjecaj zimi, a lokalna komponenta ljeti.

Istraživanja globalnog električnog kruga su jako uznapredovala u posljednjih 50 godina. Proučavanje utjecaja Sunčeve aktivnosti na globalni električni krug, zasada postavlja više pitanja nego što ima odgovora, posebno na području atmosferskog električnog polja. Prepoznato je da je globalni električni krug jedini parametar koji se može povezati sa klimatskim promjenama, a da se može mjeriti na jednoj lokaciji i

dati globalne informacije (Rycroft, 2000.). Daljnje istraživanje moguće poveznice između parametra Sunčeve aktivnosti i atmosferskog električnog polja, moglo bi dati odgovore na neka od tih pitanja.

8. Popis literature:

- Chalmers, J. A. (1967): *Atmospheric Electricity*, Pergamon Press, Oxford.
- Dolezalek, H. i Reiter, R. (1977): *Electrical Processes in Atmospheres*, Steinkopff, Darmstadt.
- Ganza, K. (1972): Diplomski rad: Neka osnovna svojstva atmosfere pri pojedinim vremenskim stanjima, Zagreb, 50.
- Harrison, R. i Aplin K. (2003): *Atmospheric Electricity: Ions in the Atmosphere, Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Elsevier Sciences, 733-738.
- Harrison, R. i Marcz, F. (2003): Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagycenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew, *Annales Geophysicae* , **21**, 2193–2200.
- Hathaway, D.H. (2010): The Solar cycle, *Living Reviews in Solar Physics*, **7**, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>
- Israel, H.: *Atmospheric Electricity*, Vol. 1, Israel Program for Scientific Translations, National Scientific Foundation, Washington DC, 1970.
- Rycroft, M.J., Israelsson, S. i Price, C. (2000): The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **62**, 1563-1576.
- Volarić, B. (2004): Električna svojstva atmosfere, *Hrvatski meteorološki časopis*, **39**, Zagreb, 83-102.
- Volarić, B. i Vujić, E. (2006): Osnove atmosferskog elektriciteta, *Matematičko-fizički list*, **224**, Zagreb, 214-222.
- Volland, H.(1984): *Atmospheric Electrodynamics*, Springer-Verlag, Berlin
- Vujnović, V. (2010): *Astronomija 2*, Školska knjiga, Zagreb
- Wahlin, L. (1989): *Atmospheric Electrostatics*, Colutron Research Corporation, Boulder, Colorado, USA

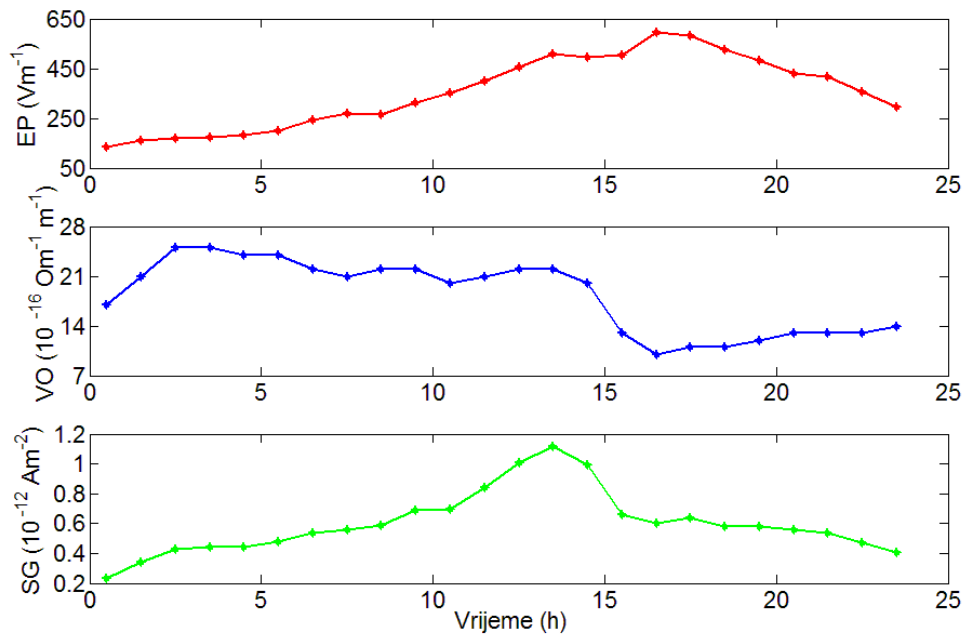
<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solardataservices.html>

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

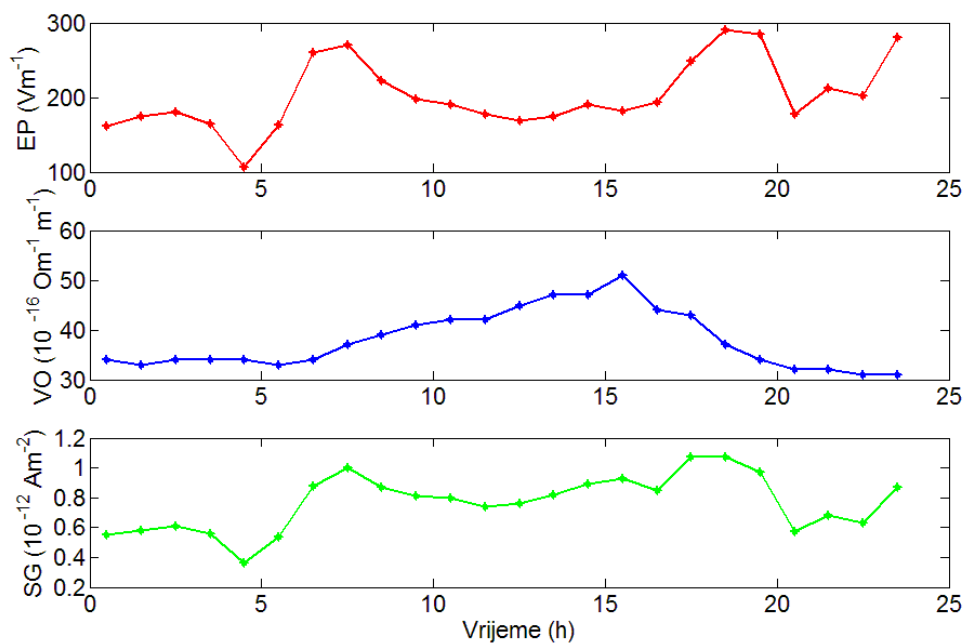
Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences; Results of Atmospheric Electricity and Meteorological Observations, S. Kalinowski Geophysical Observatory at Swider, 1994.-2005.

9. Prilog

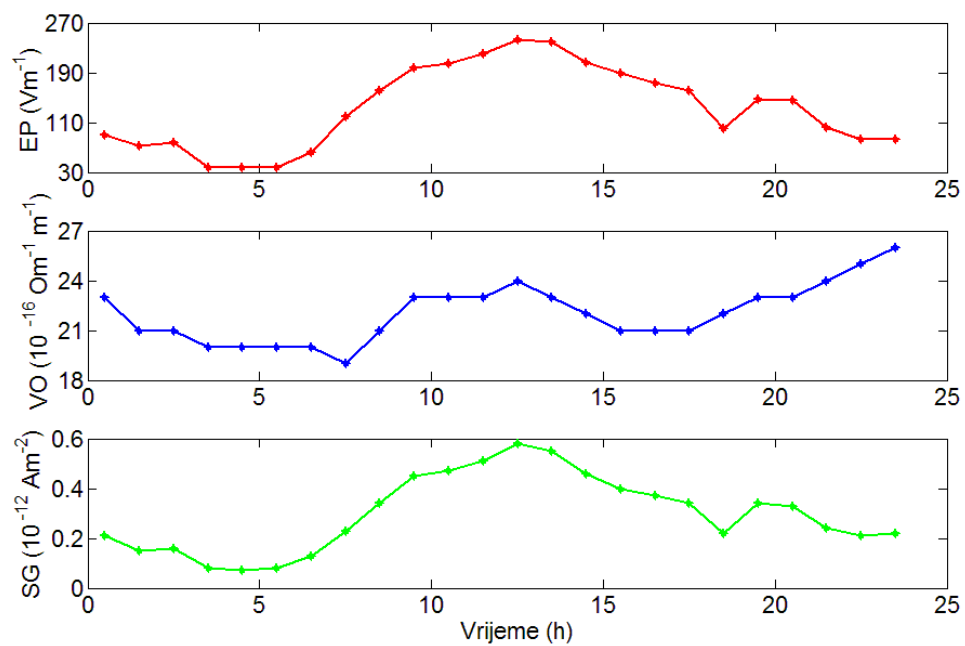
Na slikama 12.-23. prikazane su dnevne varijacije parametara EP, VO i SG u danima koji nisu bili detaljnije analizirani u radu.



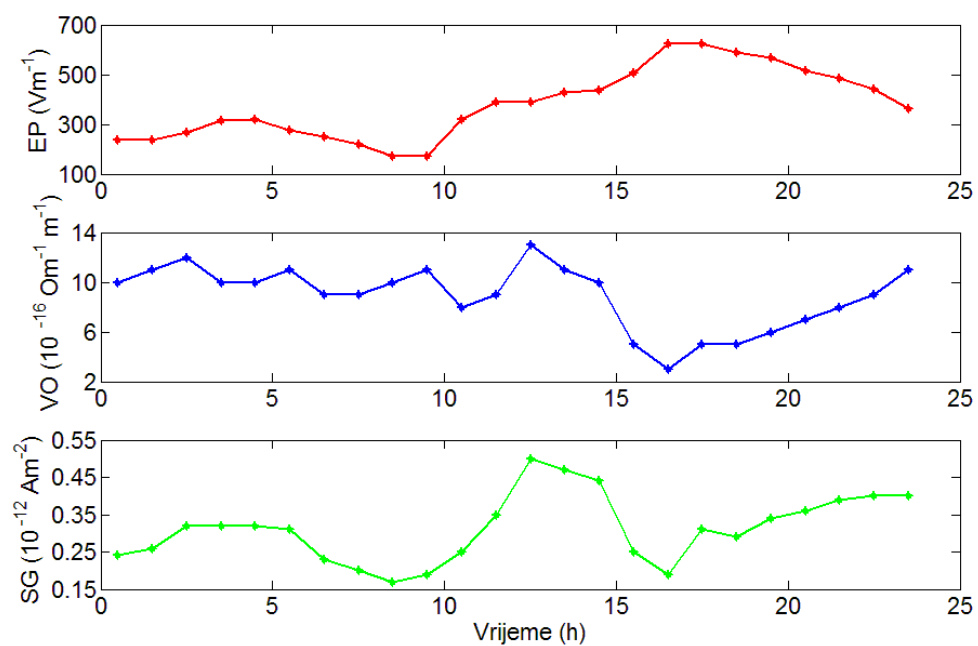
Slika 12. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 12.siječnja1996.



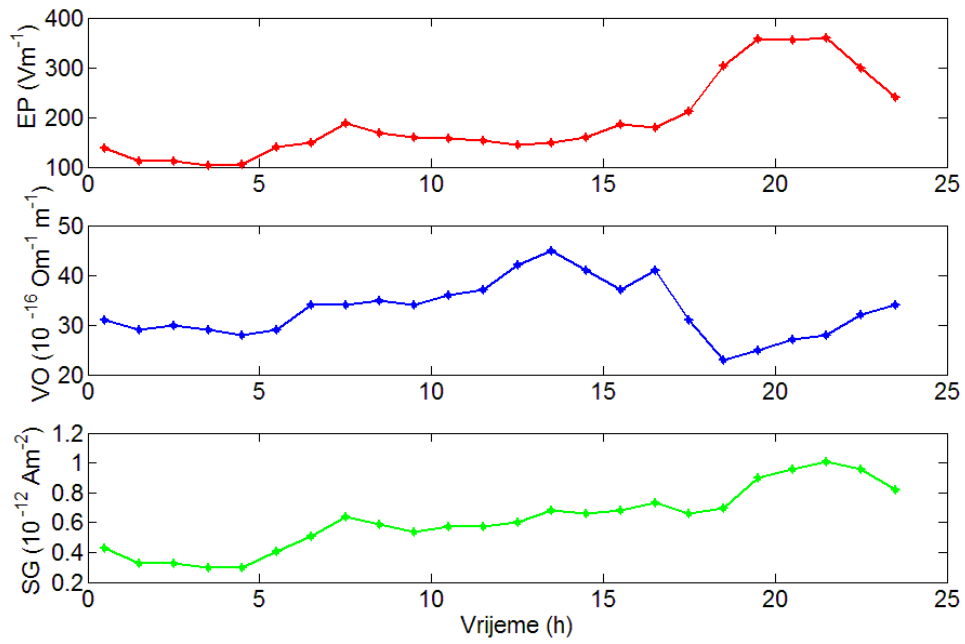
Slika 13. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 24.kolovoza1996.



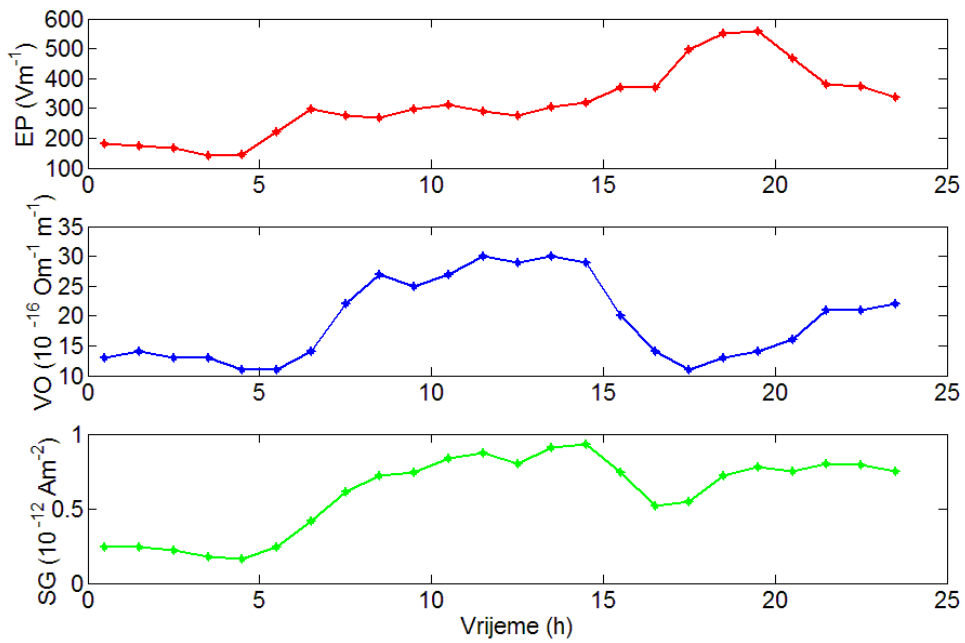
Slika 14. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 12.studenog1996.



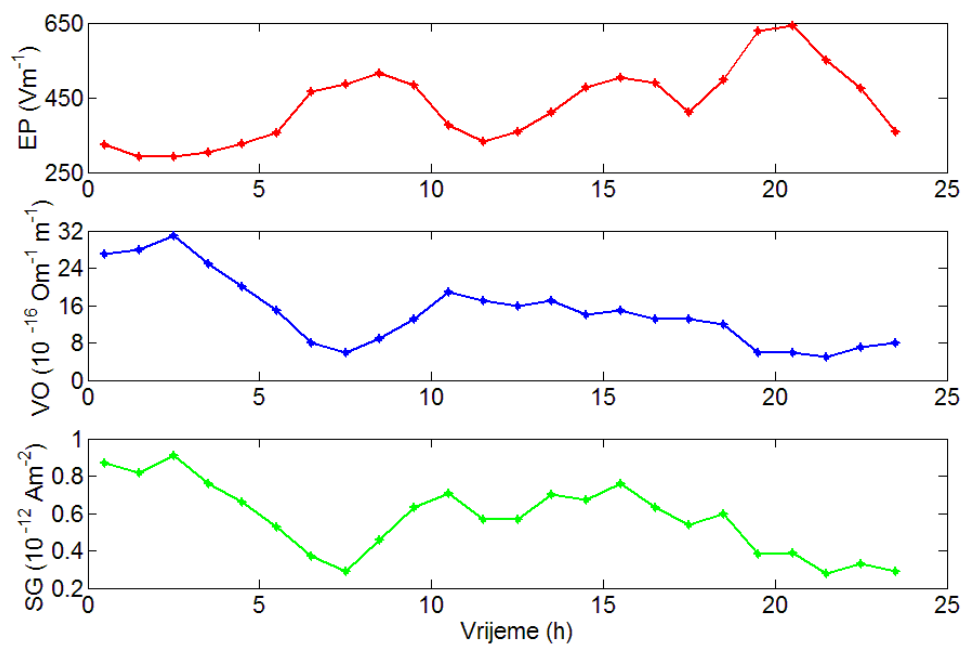
Slika 15. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 17.siječnja2005.



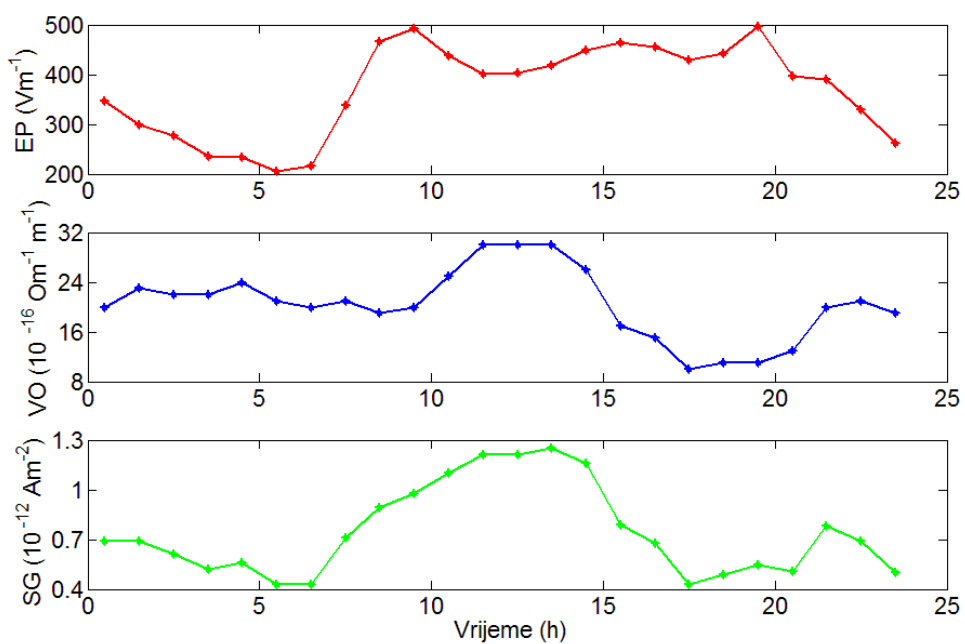
Slika 16. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 1.rujna2005.



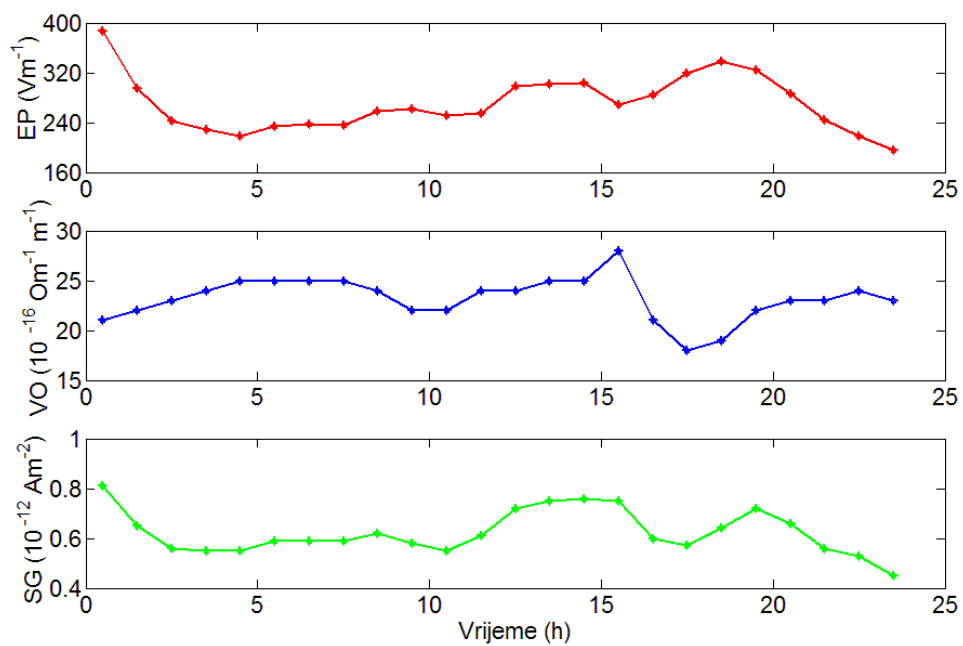
Slika 17. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 7.listopada2005.



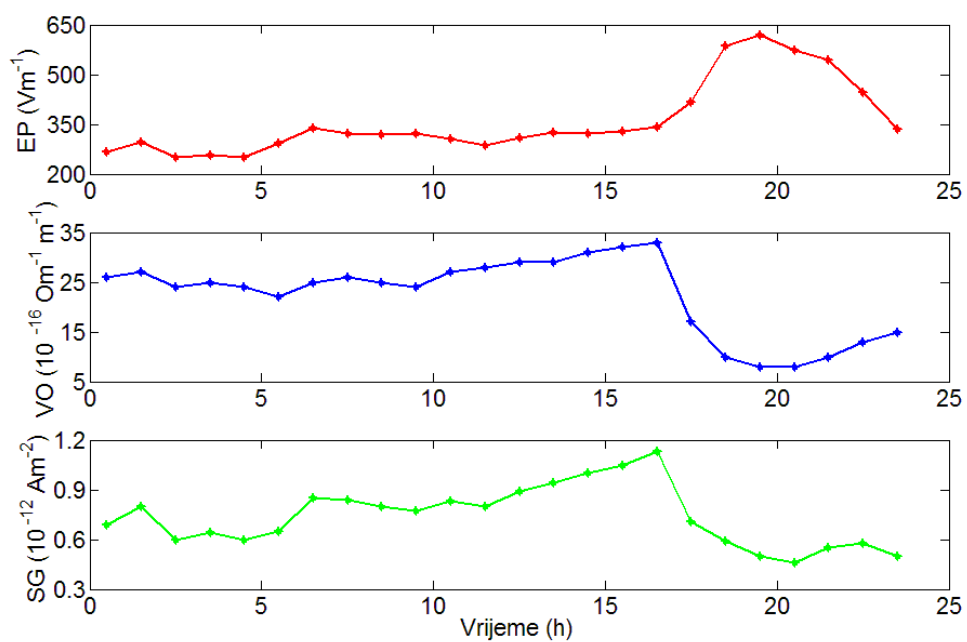
Slika 18. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 17.veljače2000.



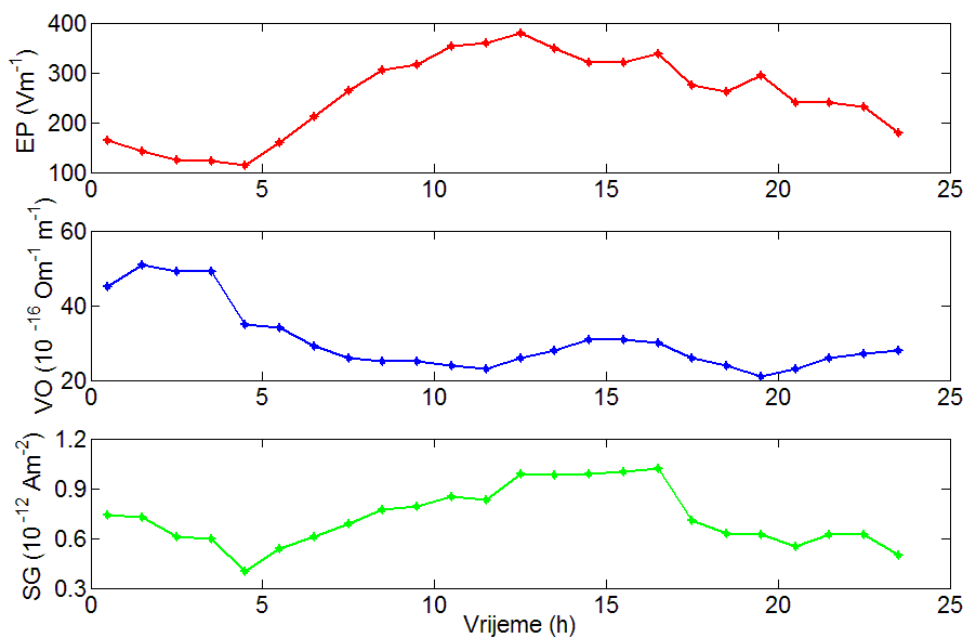
Slika 19. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 21.listopada2000.



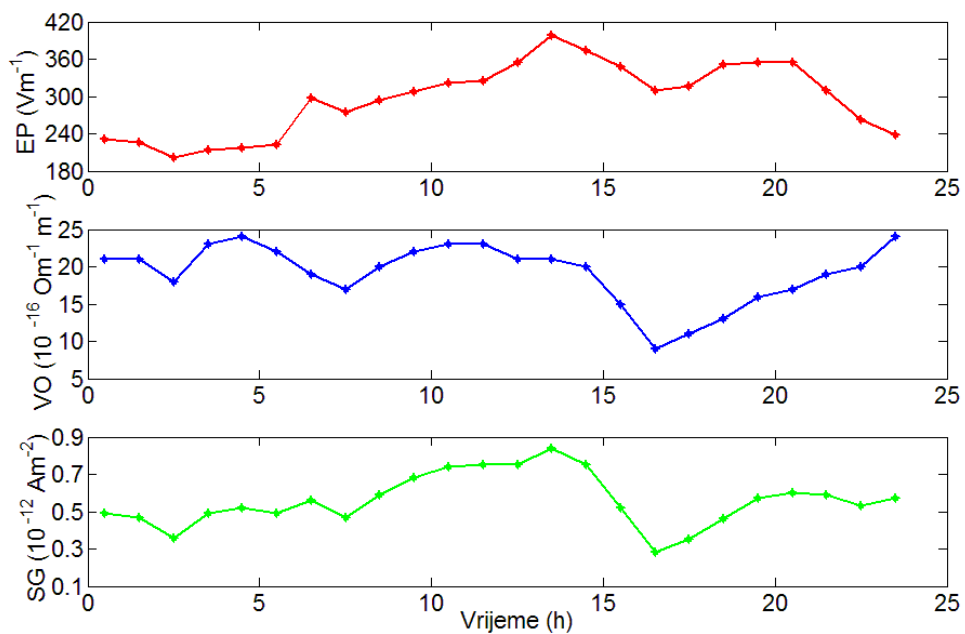
Slika 20. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 17.ožujka2002.



Slika 21. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 3.travnja2002.



Slika 22. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 3.rujna2002.



Slika 23. Dnevna varijacija EP, VO, SG na dan 15.studenog2002.