

Dr Nemanja Kovačević

ATMOSFERSKI ELEKTRICITET

Beograd,
2021.

SADRŽAJ

PREDGOVOR.....	9
1. ATMOSFERSKI JONI.....	11
1.1 Klasifikacija atmosferskih jona	11
1.2 Veza pokretljivosti jona i provodnosti vazduha.....	15
1.3 Izvori atmosferskih jona	16
1.4. Jednačina kontinuiteta atmosferskih malih jona	21
2. ELEKTRIČNO POLJE ATMOSFERE.....	23
2.1 Kratak istorijat ispitivanja električnog polja u atmosferi.....	23
2.2 Električno polje lepog vremena	25
2.3 Model globalnog strujnog kola u atmosferi	30
2.4 Električna struktura atmosfere	37
2.4.1 Troposfera	37
2.4.2 Stratosfera	39
2.4.3 Mezosfera	40
2.4.4 Jonosfera i magnetosfera	40
3. ELEKTRICITET U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA.....	45
3.1 Metodologija dobijanja strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima	46
3.2 Idealizovani modeli strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima.....	47
3.2.1 Normalna električna struktura	48
3.2.2 Inverzna električna struktura	49
3.3 Savremeni model strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima	50
3.3.1 Raspodela naelektrisanja u konvektivnoj oblasti grmljavinskih oblaka	50
3.3.2 Raspodela naelektrisanja u nakovnju grmljavinskih oblaka.....	53
3.3.3 Raspodela naelektrisanja u stratiformnoj oblasti grmljavinskih oblaka	54
3.4 Razvoj električne strukture grmljavinskih oblaka sa vremenom	56
3.4.1 Razvoj električne strukture u ranoj fazi.....	56
3.4.2 Razvoj električne strukture u fazi gašenja.....	59
3.5 Tok električne struje kod grmljavinskih oblaka.....	61
4. ELEKTRICITET U NEGRMLJAVINSKIM OBLACIMA	67
4.1 Naelektrisanje kod nepadavinskih oblaka.....	67
4.1.1 Stratokumulus.....	69
4.1.2 Stratus.....	71
4.1.3 Altostratus	72
4.1.4 Altokumulus	72
4.1.5 Kumulus	73
4.1.6 Cirus	74

4.2 Naelektrisanje kod zimskih nimbostratusa	74
4.3 Sumarne karakteristike negrmljavinskih oblaka	78
5. NAELEKTRISAVANJE GRMLJAVINSKIH OBLAKA.....	81
5.1 Uslovi koje treba da obezbede mehanizmi naelektrisavanja.....	81
5.2 Naelektrisavanje u ranom stadijumu života oblaka	83
5.2.1 Naelektrisavanje difuzijom jona.....	83
5.2.2 Naelektrisavanje kretanjem jona u električnom polju	85
5.3 Konvektivno naelektrisavanje.....	86
5.4 Mehanizmi neinduktivnog naelektrisavanja oblaka.....	88
5.4.1 Termoelektrični efekat	88
5.4.2 Vorkman–Rejnoldsov efekat	90
5.4.3 Naelektrisavanje kontaktnim potencijalom	91
5.4.4 Naelektrisavanje rasprskavanjem kapi	93
5.4.5 Naelektrisavanje zbog sekundarne produkcije leda.....	93
5.4.6 Naelektrisavanje zbog depozicionog rasta leda.....	95
5.4.7 Naelektrisavanje mehanizmom dislokacije	96
5.4.8 Naelektrisavanje topljenjem krupe	96
5.5 Mehanizmi induktivnog naelektrisavanja oblaka	97
5.5.1 Naelektrisavanje selektivnim prikupljanjem jona	98
5.5.2 Naelektrisavanje rasprskavanjem kapi	100
5.5.3 Naelektrisavanje sudaranjem polarizovanih hidrometeora.....	101
5.6 Sumarni prikaz mehanizama naelektrisavanja oblaka	105
6. FENOMENOLOGIJA MUNJA.....	107
6.1 Vrste električnih pražnjenja.....	107
6.2 Prostorna raspodela gustine munja po mesecu i godini	110
6.3 Veza gustine munja oblak–tlo i dana sa grmljavinom	117
6.4 Čestina unutaroblacijskih munja i munja oblak–tlo u zavisnosti od lokacije	120
6.5 Aktivnost munja u individualnim olujama i veza sa meteorološkim veličinama.....	122
7. ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA.....	125
7.1 Električno pražnjenje između oblaka i tla.....	125
7.1.1 Raspad električnog polja u vazduhu i preliminarni udar	128
7.1.2 Stepenasti predvodnik	131
7.1.3 Proces vezivanja.....	135
7.1.4 Povratni udar	137
7.1.5 Streličasti predvodnik.....	138
7.1.6 Kontinuirana struja i M–komponente	140
7.1.7 J– i K–strimeri	141
7.2 Električna pražnjenja bez kontakta sa podlogom.....	143
7.3 Pozitivna električna pražnjenja oblak–tlo	147
7.4 Nagore usmerena električna pražnjenja inicirana od visokih objekata	152

7.4.1 Nagore usmerene munje negativnog polariteta	153
7.4.2 Nagore usmerene munje pozitivnog polariteta	154
7.5 Bipolarna električna pražnjenja	155
7.6 Loptasta munja	157
7.6.1 Neke teorije o nastanku laptaste munje.....	160
7.7 Još neka neobična električna pražnjenja	163
7.7.1 Električna pražnjenja od vulkanskih erupcija.....	165
7.7.2 Električna pražnjenja od zemljotresa.....	166
7.7.3 Nuklearna električna pražnjenja	166
7.8 Električna pražnjenja u srednjoj i gornjoj atmosferi	167
7.8.1 Plavi mlazevi i plavi starteri.....	168
7.8.2 Crveni vilenjaci i svetleći prstenovi	169
8. KORONA PRAŽNJENJE.....	171
8.1 Iniciranje korone.....	171
8.2 Pozitivna i negativna korona.....	174
8.3 Tačkasto pražnjenje u vazduhu.....	176
8.3.1 Uticaj vetra na tačkasto pražnjenje	177
8.3.2 Tačkasto pražnjenje i odgovarajuće prostorno nanelektrisanje ispod grmljavinskih oblaka .	178
8.3.3 Tačkasto pražnjenje iznad vodenih površina	179
8.3.4 Tačkasto pražnjenje na hidrometeorima.....	179
9. GROM.....	181
9.1 Osmatranja i merenja groma	181
9.1.1 Udaljenost izvora groma i vreme trajanja grmljavine	182
9.1.2 Maksimalna udaljenost do koje se može čuti grom.....	183
9.1.3 Natpritisak i zvučna energija	184
9.1.4 Spektar frekvencija.....	185
9.2 Mehanizmi stvaranja groma.....	186
9.2.1 Zvučni grom	186
9.2.2 Infrazvučni grom	189
9.3 Širenje goma.....	190
10. UTICAJ ELEKTRIČNIH EFEKATA NA MIKROFIZIKU GRMLJAVINSKIH OBLAKA.....	191
10.1 Uticaj na nukleaciju oblačnih kapljica i kristala leda.....	191
10.2 Uticaj na rast kristala leda difuzijom	193
10.3 Deformacija i rasprskavanje kapi zbog električnog polja	194
10.4 Uticaj na terminalne brzine kapi	198
10.5 Uticaj na rast hidrometeora prikupljanjem.....	199
10.6 Ispiranje aerosolnih čestica.....	203
10.7 Pojačavanje padavina usled električnih pražnjenja.....	205

10.8 Efekti električnih pražnjenja na hemiju atmosfere	206
11. NUMERIČKO MODELOVANJE ELEKTRIČNIH PROCESA U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA.....	211
11.1 Kratak istorijat numeričkog modelovanja električnih procesa u grmljavinskim oblacima	211
11.2 Parametrizacija atmosferskih malih jona	215
11.3 Jednačina kontinuiteta nanelektrisanja u modelima grmljavinskih oblaka	221
11.4 Parametrizacija neinduktivnog nanelektrisavanja.....	224
11.4.1 TAK šema	225
11.4.2 GZ šema	226
11.4.3 S91 šema	227
11.4.4 Šeme zasnovane na brzini injenja.....	227
11.4.4.1 SP98 šema	229
11.4.4.2 RR šema	230
11.5 Parametrizacija induktivnog nanelektrisavanja	232
11.6 Parametrizacija električnih pražnjenja	234
12. OPASNOSTI I SISTEMI ZAŠTITE OD ELEKTRIČNIH PRAŽNJENJA.....	243
12.1 Opasnosti po ljude i životinje	243
12.1.1 Statistika smrtnih ishoda i povreda usled električnih pražnjenja.....	243
12.1.2 Električni aspekti.....	246
12.1.3 Medicinski aspekti.....	248
12.2 Saveti za ličnu bezbednost od električnih pražnjenja	250
12.3 Veličine povezane sa oštećenjima objekata od munja	251
12.4 Sistemi zaštite od električnih pražnjenja.....	252
12.4.1 Konvencionalni sistemi zaštite	254
12.4.1.1 Uzemljenje kod konvencionalnih sistema zaštite.....	254
12.4.2 Nekonvencionalni sistemi zaštite	259
12.4.2.1 Eliminacija električnih pražnjenja.....	259
12.4.2.2 Rana emisija strimera.....	262
12.5 Okidanje električnih pražnjenja	263
Dodatak A Mesta sa najvećom srednjom godišnjom gustinom munja	267
Dodatak B Skraćenice	269
Dodatak C Sistem jedinica.....	271
Dodatak D Simboli	273
Dodatak E Fizičke konstante	279
Literatura.....	281
Indeks	325

PREDGOVOR

Elektricitet u atmosferi je jedna od prirodnih pojava koja je uvek fascinirala čoveka od kada je počeo da razmišlja o prirodi koja ga okružuje. Prve i najspektakularnije prirodne pojave koje je zapazio bila su električna pražnjenja u vidu linijskih munja, kojima su često pripisivana natprirodna svojstva. Ipak, prošlo je mnogo vremena dok nije naučnim metodom otkriveno da su munje posledica nanelektrisanja u atmosferi. Osnovni uzrok atmosferskog elektriciteta je postojanje i neprekidno stvaranje atmosferskih jona. Atmosferski elektricitet postoji uvek i bilo gde, u manjoj ili većoj meri. U snažnim grmljavinskim, kumulonimbusnim oblacima, dolazi do najprijetnijeg stvaranja i razdvajanja nanelektrisanja, međudelovanjem oblačnih i padavinskih elemenata, koje se neutrališe munjama. Pored toga i drugi rodovi oblaka mogu generisati neke količine nanelektrisanja. Zatim, oblasti koje su daleko od grmljavinskih oblaka imaju slabo ali postojano električno polje, poznato kao električno polje lepog vremena, a koje je održano neprekidnim postojanjem kumulonimbusnih oblaka u ekvatorijalnim i tropskim oblastima, čime kumulonibusi predstavljaju džinovske baterije u atmosferi Zemlje.

Ova knjiga predstavlja sveobuhvatan prikaz nanelektrisanja u atmosferi i raznovrsnih električnih fenomena koji su posledica atmosferskog elektriciteta. Uz fascinantna pražnjenja u vidu linijskih munja, postoje i mnoge druge pojave koje su uzrok električnih pražnjenja: atmosferski joni, električno polje u atmosferi, struktura nanelektrisanja oblaka, korona pražnjenje itd. Predstavljeni su i razni, do sada predloženi mehanizmi nanelektrisanja grmljavinskih oblaka. Takođe, prikazan je i uticaj električnih pojava na mikrofiziku grmljavinskih oblaka, pojava groma kao posledica naglog širenja vrućeg kanala munje, date razne šeme numeričkog modelovanja nanelektrisanja u oblacima, kao i opasnost i sistemi zaštite od električnih pražnjenja.

Prevashodna namena ove knjige je da studentima master studija meteorologije na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu posluži kao udžbenik za predmet Atmosferski elektricitet. Poslednjih pet poglavlja bi mogla poslužiti kao literatura za predmet Atmosferski elektricitet – odabrana poglavlja, na doktorskim studijama na istom fakultetu. Pored svoje osnovne namene, knjiga može biti od interesa i široj čitalačkoj publici, svima onima koji žele da se upoznaju ili prodube znanja o raznovrsnim električnim pojavama koje se događaju u atmosferi planete Zemlje.

Na kraju, autor se zahvaljuje na saradnji recenzentima prof. dr Dejanu Jancu i prof. dr Vladanu Vučkoviću na detaljnem iščitavanju teksta i korisnim sugestijama, Dragomiru Bulatoviću na konačnom uobičavanju teksta i sređivanju slika, kao i studentima master studija na intervencijama prilikom nastanka ovog udžbenika.

U Beogradu, juna 2021. god.

Nemanja Kovačević

ATMOSFERSKI JONI

U ovom poglavlju ćemo se upoznati sa jonima u atmosferi, njihovom klasifikacijom, kao i procesima kojima nastaju i/ili nestaju. Potom će se nešto reći o jednačini kontinuiteta atmosferskih jona.

1.1 Klasifikacija atmosferskih jona

Atmosferski joni su glavni razlog postojanja električnog polja u atmosferi. U njihovom odsustvu električno polje ne bi postojalo, verovatno ne bi bilo grmljavinskih oblaka i električnih pražnjenja; ukratko, verovatno ne bi postojao bilo kakav fenomen električnih procesa u atmosferi.

Definiciju jona i proces jonizacije neutralnih molekula je 1834. godine prvi dao Majkl Faradej (engl. Michael Faraday, 1791–1867). Jon je entitet koji čini ili pojedinačni nanelektrisani atom, ili nanelektrisani molekul. Proces nastanka jona naziva se jonizacija. To je pojava kada neutralni atom dobija ili gubi elektron u svojoj poslednjoj elektronskoj ljusci. Time do tada neutralni atom i/ili molekul postaje negativno ili pozitivno nanelektrisan, u zavisnosti da li dobija ili gubi valentni elektron u spoljnoj elektronskoj ljusci. Tako, atomi (ili molekuli) kojima je uzet elektron procesom jonizacije postaju pozitivno nanelektrisani, tj. postaju pozitivni joni, dok oni koji su dobili elektron, imaju višak negativnog nanelektrisanja pa postaju negativni joni. Elektroni koji se slobodno kreću van atoma se nazivaju

slobodni elektroni. Dakle, najgrublja podela jona bi bila po znaku viška naelektrisanja koje nose, tj. na pozitivne (tzv. katjone) i negativne jone (ili anjone).

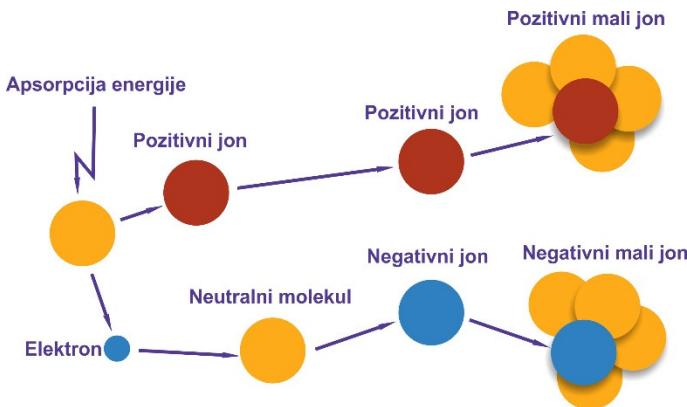
Koncept pozitivnih i negativnih jona u atmosferi kao nosilaca naelektrisanja prvi put je upotrebljen da bi se objasnila električna provodnost vazduha (Elster i Geitel, 1899). Pionirske studije (Ebert, 1901; Langevin, 1905) su takođe bile rani doprinosi izučavanja atmosferskih jona.

Postoji nekoliko parametara kojima se opisuju atmosferski joni. U te parametre spadaju: masa m i prečnik jona d , gustina jonske materije ρ , naelektrisanje koje nose q_e i pokretljivost jona μ (Hirsikko i dr., 2011).

Pokretljivost jona μ (u $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, ili češće $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) definiše se kao odnos brzine kretanja jona v u električnom polju (tzv. drift jona) i jačine električnog polja E (u Vm^{-1}), tj.

$$\mu = \frac{v}{E}. \quad (1.1)$$

Tradicionalno se, na osnovu prečnika ili njihove pokretljivosti, joni mogu klasifikovati na male, lake ili brze jone ($d \approx 1 \text{ nm}$), srednje jone ($2 < d < 6 \text{ nm}$) i velike, spore ili Lanževinove jone ($d > 6 \text{ nm}$) (Aplin, 2000). Klasificujući ih preko pokretljivosti, mali joni imaju pokretljivost u opsegu $0,5\text{--}3,2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, a srednji znatno nižu: $0,034\text{--}0,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Veliki joni su znatno slabije pokretljivosti, u rasponu od $0,00087 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ do $0,034 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Hörrak i dr., 2000).



Slika 1.1 Šematski prikaz proizvodnje pozitivnih i negativnih malih jona iz neutralnog molekula (prema Aplin, 2000).

Po novoj klasifikaciji (Hörrak i dr., 2000), joni se mogu podeliti na tzv. klastere jona i aerosolne jone. Naime, od elektroneutralnog atoma i/ili molekula, procesom ionizacije nastaje slobodni elektron i pozitivni ion. Ovi entiteti nazivaju se i primarni joni. Slobodni elektron biva jako brzo (reda veličine $1 \mu\text{s}$) privučen

ELEKTRICITET U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA

U ovom poglavlju bavićemo se naelektrisanjem grmljavinskih, kumulonimbusnih oblaka.

Rod oblaka kumulonimbus (lat. Cumulonimbus, skr. Cb) je teški, gusti oblak, sa znatnim vertikalnim razmerama u obliku planine ili ogromnih kula. Barem jedan njegov gornji deo je obično gladak, vlaknast, ili prugast i gotovo uvek spljošten; ovaj gornji deo se često širi u obliku nakovnja ili ogromne perjanice. Ispod baze ovog oblaka, koja je obično mračna, mogu se često naći niski, iskidani oblaci, spojeni sa njim ili ne i padavine ponekad u obliku virge (WMO, 1975).

Kumulonimbus je oblak iz koga grmi, pada grad i velike količine padavina kiše u vidu pljuskova. Naziva se i grmljavinsko–gradonosni oblak, oluja, ili nepogoda. To je najsnažniji oblak u atmosferi u pogledu dinamike, ali i električnih pojava koje uvek proizvodi. Kumulonimbus je jedini rod oblaka iz koga se javljaju snažna električna pražnjenja u vidu linijskih munja, a koja su posledica najintenzivnijih električnih polja koja se u atmosferi Zemlje mogu stvoriti. Ovde se neće govoriti o uzrocima koji dovode do nastanka elektriciteta u njima, to će biti razmatrano u *Poglavlju 5*, nego će se analizirati struktura naelektrisanja, kao i njen razvoj sa vremenom.

3.1 Metodologija dobijanja strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima

Dobijanje strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima zasniva se na indirektnim merenjima jačine električnog polja. Merenja jačine električnog polja mogu biti daljinska ili direktna. Daljinska merenja, pomoću instrumenata na tlu ili pomoću satelita, posebno su korisna za ispitivanje električnih efekata većih razmara. Posebno su važna za ispitivanje električnih pražnjenja u vidu munja, kao i mezosferskih električnih pojava, u koje spadaju crveni vilenjaci (engl. red sprites), zbog optičkih i elektromagnetskih emisija (Stolzenburg i Marshall, 2008).

Neposredne, direktne tehnike merenja električnih veličina uključuju korišćenje aviona, raketa, ili balona (Winn i Moore, 1971; Byrne i dr., 1989; Weinheimer i dr., 1991; Willett i dr., 1993; Mo i dr., 2003). Neposredna merenja balonima, raketama, ili pomoću instrumenata na avionima koji se probijaju kroz oblake, jako su važna za dobijanje detaljnijih informacija o električnoj strukturi kumulonimbusnih oblaka. Merenja balonima su se pokazala kao najefikasnija tehnika direktnih merenja raznih veličina u grmljavinskim oblacima. Razlog leži u njihovoj jednostavnosti, ekonomičnosti, kao i relativno kratkom vremenu prodiranja kroz oblake. Stoga su oni često preovlađujuće sredstvo za ova merenja. Takođe, vertikalni profili električnih promenljivih se mogu dovesti u direktnu vezu sa vertikalnim profilima drugih bitnih veličina, kao što su temperatura i razne mikrofizičke veličine koje karakterišu oblake.

Znajući jačinu električnog polja u grmljavinskim oblacima moguće je dobiti gustinu naelektrisanja na osnovu Gausovog zakona koji je u obliku:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (3.1)$$

gde je ρ zapreminska gustina naelektrisanja (u Cm^{-3}), dok je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuma definisana ranije. S obzirom da je u grmljavinskim oblacima obično preovlađujuća vertikalna komponenta električnog polja, zaključujemo da je i divergencija u istom pravcu dominantna. Stoga, možemo zapreminsku gustinu naelektrisanja odrediti iz (Stolzenburg i dr., 1998a):

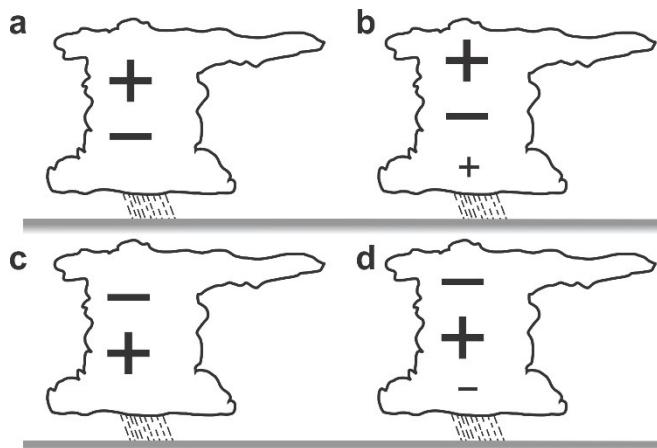
$$\rho = \epsilon_0 \frac{\Delta E_z}{\Delta z}, \quad (3.2)$$

gde je ΔE_z promena jačine električnog polja na vertikalnom rastojanju Δz . Ove dve veličine se dobijaju merenjima pomoću instrumenata koje nose sondažni baloni.

Ova aproksimacija je gruba, ali ovde nije namera da se dobiju precizne vrednosti zapreminske gustine naelektrisanja već, pre svega, polaritet naelektrisanih oblasti grmljavinskih oblaka. Stolzenburg i dr. (1998b) sugerisu da je aproksimacija prilično dobra za horizontalne razmere do 5 km. Više sondažnih balona, koji mere na različitim mestima i u različitim etapama života grmljavinskog oblaka, mogu dati detaljnije informacije o prostornoj i vremenskoj promeni raznih električnih veličina (jačina električnog polja, električna provodnost, naelektrisanje hidrometeora itd.).

3.2 Idealizovani modeli strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima

Na *Slici 3.1* možemo videti neke idealizovane, tradicionalne modele strukture naelektrisanja u grmljavinskom oblaku. Idealizovani model strukture naelektrisanja u grmljavinskim oblacima može biti opisan kao dipolarni (*Slika 3.1a, c*), ili tripolarni (*Slika 3.1b, d*), u zavisnosti da li postoje dva, odnosno tri centra naelektrisanja oba znaka, respektivno. Pored toga, struktura naelektrisanja može biti normalna (*Slika 3.1a, b*), ili inverzna (*Slika 3.1c, d*). Ta klasifikacija zavisi od toga da li je glavni centar u srednjem delu grmljavinskog oblaka naelektrisan negativno (*Slika 3.1a, b*), ili pozitivno (*Slika 3.1c, d*).



Slika 3.1: Idealizovani model strukture naelektrisanja grmljavinskog oblaka: (a) normalni dipolarni model koji sadrži gornji pozitivni centar i donji negativni centar; (b) normalni tripolarni model koji pored gornjeg pozitivnog i glavnog negativnog centra sadrži i donji, manji pozitivni centar naelektrisanja; (c) inverzni dipolarni model koji sadrži gornji negativni i donji pozitivni centar naelektrisanja; (d) inverzni tripolarni model koji pored gornjeg negativnog i glavnog pozitivnog centra, sadrži i donji, manji negativni centar naelektrisanja (prema Kuhlman i dr., 2006).

6

FENOMENOLOGIJA MUNJA

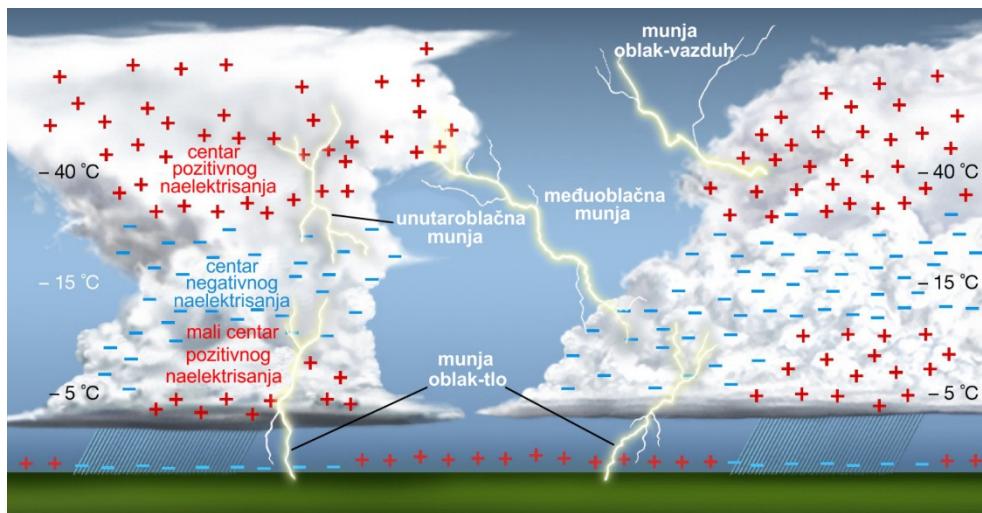
Pod pojmom fenomenologija munja podrazumevamo čestinu pojava električnih pražnjenja u obliku munja. Razmatraćemo maksimume i srednje vrednosti gustine munja, izražene u njihovom broju po jediničnoj površini, kao i promene ovih veličina u zavisnosti od mesta i vrste oluje. Prvo ćemo dati kratak opis i vrste električnih pražnjenja u atmosferi Zemlje, a potom detaljnije analizirati fenomenologiju ili statistiku munja.

6.1 Vrste električnih pražnjenja

Električna pražnjenja u vidu munja su kratkotrajna, vidljiva i nagla pražnjenja atmosferskog elektriciteta usled njegovog nagomilavanja u oblačnom vazduhu. Drugim rečima, nastaju usled stvaranja razlike potencijala u grmljavinskim oblacima – kumulonimbusima, koja postane toliko velika da savlada otpor vazduha, tj. da dođe do dielektričnog sloma vazduha. Ova pojava je povezana sa snažnim bljeskom (munja, svetlica) obično u vidu izlomljene linije (linijska munja) koju prati snažni zvučni udar – grom. O fizici električnih pražnjenja govoriće se u *Poglavlju 7*, dok će o gromu, kao akustičnoj pojavi, biti reči u *Poglavlju 9*.

Električna pražnjenja nastaju razdvajanjem nanelektrisanja u kumulonimbusnim, grmljavinsko–gradonosnim oblacima, pri čemu razlika potencijala postane veoma velika da dođe do pražnjenja nanelektrisanja. Mehanizme nanelektrisanja grmljavinskih oblaka opisali smo u *Poglavlju 5*. Električno pražnjenje se dešava

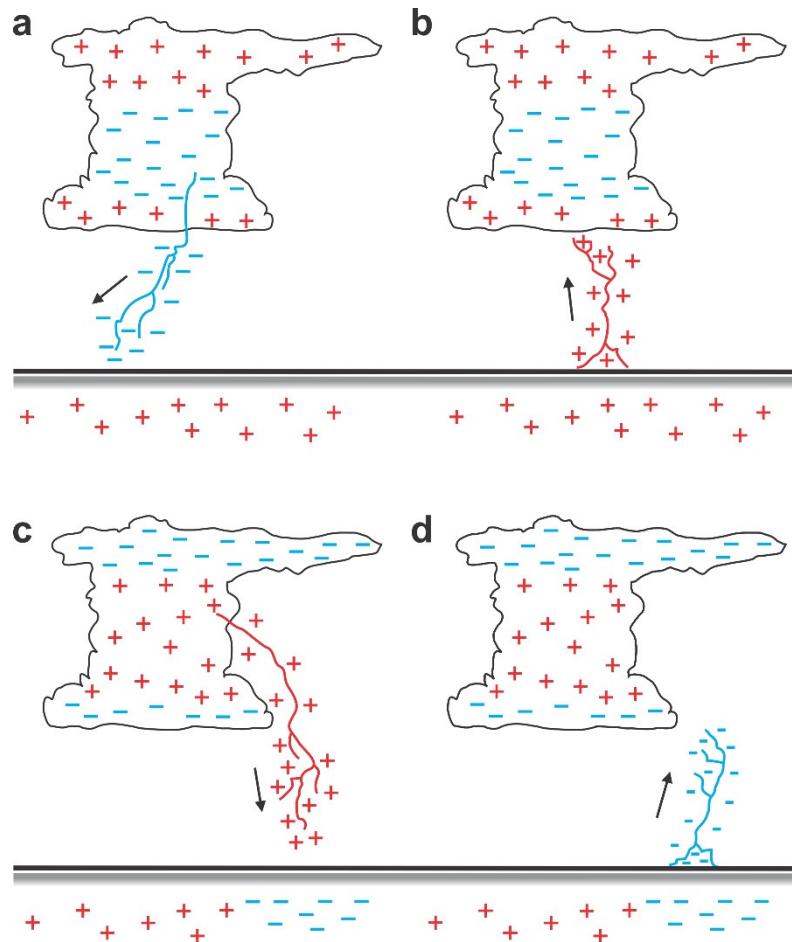
između centara nanelektrisanja suprotnog polariteta, te možemo, na osnovu lokacija datih centara razlikovati: unutaroblačna električna pražnjenja (unutaroblačne munje), električna pražnjenja između oblaka i tla (munje oblak–tlo), međuoblačna pražnjenja (munje oblak–oblak), kao i električna pražnjenja u vazduhu, ili vazdušna električna pražnjenja (munje oblak–vazduh). Na *Slici 6.1* možemo videti šematski prikaz svih mogućih električnih pražnjenja u vidu linijske munje kao najčešće pojave.



Slika 6.1: Šematski prikaz električnih pražnjenja u vidu linijske munje pri normalnoj tripolarnoj električnoj strukturi.

Postoje četiri vrste električnih pražnjenja između oblaka i tla (Berger, 1978; Rakov, 2007). To su: 1) nadole usmereno pražnjenje negativnog polariteta (*Slika 6.2a*); 2) nagore usmereno pražnjenje negativnog polariteta (*Slika 6.2b*); 3) nadole usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta (*Slika 6.2c*) i 4) nagore usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta (*Slika 6.2d*). Nadole usmereno električno pražnjenje znači da se početni proces obrazovanja munje dešava unutar grmljavinskog oblaka i dalje se prostire nadole ka tlu. Suprotno je za nagore usmereno električno pražnjenje. Pojam negativnog i pozitivnog polariteta odnosi se na efektivni prenos datog nanelektrisanja ka tlu, tj. snižavanje oblačnog nanelektrisanja transportom ka podlozi. Preko 90% svih električnih pražnjenja oblak–tlo su ona negativnog polariteta, usmerenog nadole ka tlu (Uman, 2001; Rakov, 2003; 2007) pri postojanju normalne tripolarne električne strukture (videti *Poglavlje 3*). Smatra se da manje od 10% svih električnih pražnjenja između oblaka i tla su nadole usmerena pozitivna električna pražnjenja (*Slika 6.2c*). Nagore usmerena električna pražnjenja (*Slika 6.2b, d*) javljaju se retko i inicirana su od jako visokih objekata na tlu (preko 100 m), kao što su radio-tornjevi, višespratnice, antene, ili predmeti srednje visine koji su postavljeni na vrhovima planina (Rakov, 2007). Ove četiri vrste električnih pražnjenja između oblaka i tla su unipolarna električna pražnjenja, tj.

njima se u tlu prenosi nanelektrisanje istog znaka. Pored unipolarnih munja postoje i bipolarna električna pražnjenja, pri kojima se naizmenično prenose pozitivno i negativno nanelektrisanje u tlu. Negativna električna pražnjenja oblak–tlo se dešavaju između glavnog negativnog centra nanelektrisanja i pozitivno nanelektrisanog tla ispod grmljavinskog oblaka. Unutaroblačna munja se dešava prilikom pražnjenja između dva gornja centra nanelektrisanja suprotnog polariteta. Slično, međuoblačna električna pražnjenja se dešavaju između dva suprotno nanelektrisana dela dva susedna oblaka. Konačno, munje oblak–vazduh, ili vazdušna električna pražnjenja se dešavaju prilikom prenosa nanelektrisanja iz oblaka u vedru sredinu.



Slika 6.2: Četiri vrste unipolarnih električnih pražnjenja oblak–tlo kojima se smanjuje oblačno nanelektrisanje prenosom ka tlu: (a) nadole usmereno pražnjenje negativnog polariteta; (b) nagore usmereno pražnjenje negativnog polariteta; (c) nadole usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta i (d) nagore usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta. Ovde je prikazan samo jedan predvodnik (lider). Takođe, prikazan je pravac prenosa i znak nanelektrisanja kojim se efektivno snižava oblačno nanelektrisanje (prema Berger, 1978; Rakov, 2007).

ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA

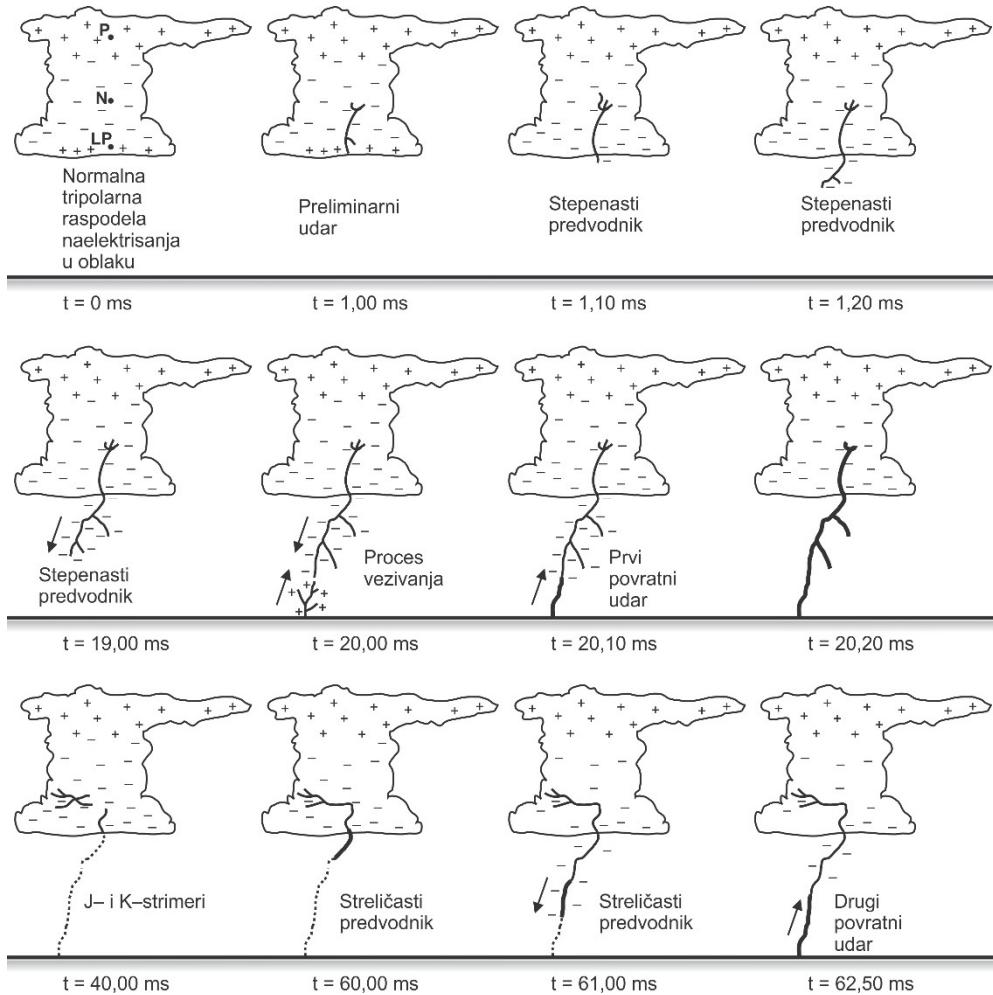
U ovom poglavlju govorićemo o fizici električnih pražnjenja koja nastaju u grmljavinskim oblacima. Naime, ono što se vidi kao svetljenje ili treperenje munje je usled nesposobnosti ljudskog oka da razluči postojanje mnogo raznovrsnijih i finijih procesa koji traju jako kratko i svi zajedno čine električno pražnjenje između oblaka i tla. Ovde će se detaljno analizirati razni procesi koji čine električna pražnjenja negativnog polariteta, koja su najčešća pražnjenja između oblaka i tla. Pored ovih električnih pražnjenja, biće reči i o unutaroblačnim munjama, kao i redim pojavama loptastih munja, pozitivnih i bipolarnih električnih pražnjenja, kao i kratkoživećih, ali fascinantnih svetlećih električnih pojava iznad troposfere – plavih mlazeva i crvenih vilenjaka.

7.1 Električno pražnjenje između oblaka i tla

Kao što smo već rekli u *Poglavlju 6*, oko 75% svih električnih pražnjenja u grmljavinskim oblacima nema vezu sa podlogom, dok oko 25% munja su električna pražnjenja između oblaka i tla (Rakov, 2013). U prvu grupu spadaju unutaroblačna, međuoblačna i pražnjenja oblak–vazduh, zajedničkim imenom nazvana oblačna pražnjenja. Mi ćemo se ovde detaljno posvetiti električnim pražnjenjima između oblaka i tla, zato što su ona zaslužna za održavanje globalne

električne struje između Zemlje i jonosfere i što mogu pričiniti velike materijalne štete, izazvati šumske požare, čak dovesti i do gubitaka ljudskih života. U ovom delu mi govorimo o linijskim munjama, za razliku od loptastih munja, kao ređim električnim pojavama koje ćemo kasnije opisati.

Spomenuli smo već da od svih električnih pražnjenja oblak–tlo preko 90% su ona negativnog polariteta, dok manje od 10% otpada na pozitivna električna pražnjenja (Uman, 2001; Rakov, 2003, 2007, 2013). Zato ćemo u ovom delu detaljnije analizirati raznovrsne i finije procese vezane za električna pražnjenja negativnog polariteta između oblaka i tla.



Slika 7.1: Različiti procesi od kojih se sastoji jedna munja oblak–tlo negativnog polariteta sastavljeni od dva udara. Prikazana vremena su gruba, pokazuju tipičnu procenu trajanja datih procesa, kao i vremenske intervale između njih, npr. $t = 0$ s i $t = 1$ ms označava početak i kraj preliminarnog udara (prema Rakov, 2013).

12

OPASNOSTI I SISTEMI ZAŠTITE OD ELEKTRIČNIH PRAŽNJENJA

Ovo poglavlje je posvećeno opasnostima od električnih pražnjenja, kao i načinima zaštite od ovog vida opasnog vremena.

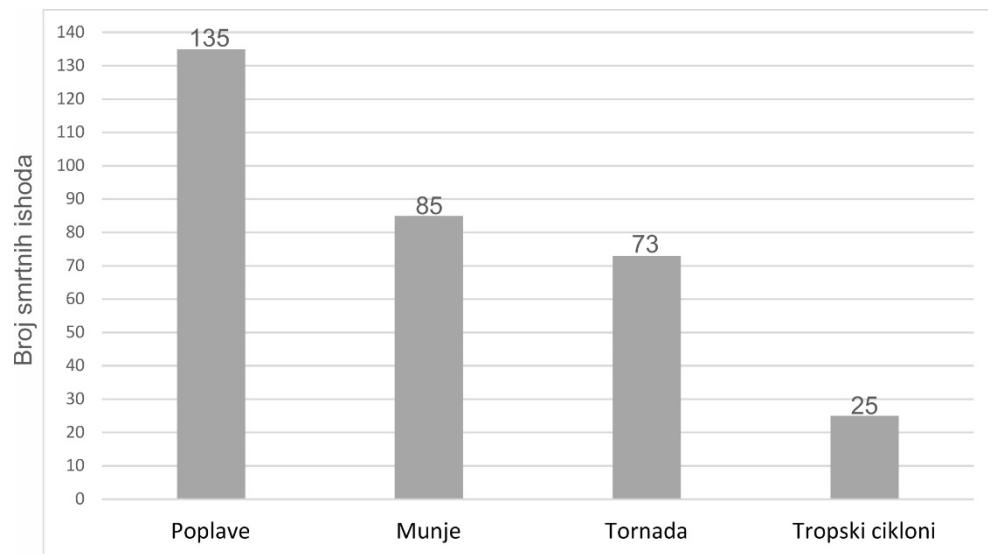
12.1 Opasnosti po ljude i životinje

U ovom delu ćemo navesti statistiku smrtnih ishoda i povreda ljudi zbog električnih pražnjenja oblak–tlo. Pored toga, govorićemo o električnim i medicinskim efektima na ljudsko telo, da bi na kraju bili dati saveti o ličnoj zaštiti ljudi tokom grmljavinskih oluja.

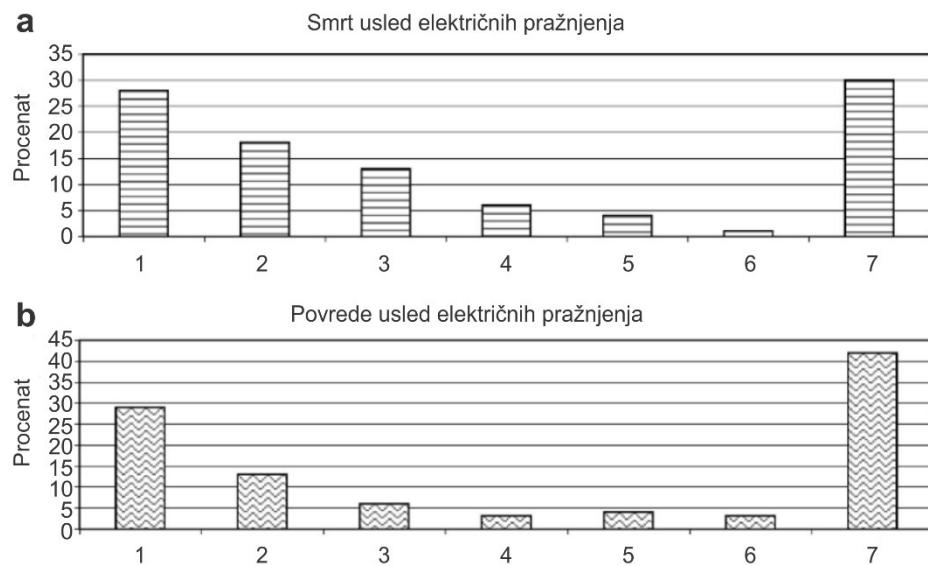
12.1.1 Statistika smrtnih ishoda i povreda usled električnih pražnjenja

Studija američke meteorološke agencije NOAA (engl. National Oceanic and Atmospheric Administration) pod nazivom „*Storm Data*“ prikupila je podatke o smrtnim slučajevima i povredama ljudi usled nekih meteoroloških i hidroloških pojava uglavnom koristeći vesti iz novina. Postoje četiri fenomena koji prosečno

godišnje usmrte najviše ljudi i to su: poplave, električna pražnjenja, tornada i tropski cikloni (Rakov i Uman, 2003).



Slika 12.1: Srednji godišnji broj smrtnih slučajeva iz „*Storm Data*“ studije agencije NOAA u periodu 1966–1995. godine u SAD (prema Rakov i Uman, 2003).



Slika 12.2: Lokacije smrtnih slučajeva (a) i povreda (b) usled električnih pražnjenja oblak-tlo: 1) Otvorena polja, parkovi itd.; 2) Ispod krošnji drveća; 3) Na čamcima prilikom vožnje ili pecanja; 4) Na golf terenima; 5) Blizu teške mehanizacije, građevinarstvo, poljoprivreda itd.; 6) U blizini telefona, radija, elektronike itd.; 7) Različita mesta ili nepoznato (prema Rakov i Uman, 2003).