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 unutaroblačnih 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 loptaste 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 naelektrisanje 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 groma 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 naelektrisanja u modelima grmljavinskih oblaka 221

11.4 Parametrizacija neinduktivnog naelektrisavanja 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 naelektrisavanja 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 naelektrisanja 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 najprimetnijeg stvaranja i razdvajanja naelektrisanja, međudelovanjem oblačnih i padavinskih elemenata, koje se neutrališe munjama. Pored toga i drugi rodovi oblaka mogu generisati neke količine naelektrisanja. 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 kumulonimbusi predstavljaju džinovske baterije u atmosferi Zemlje.

Ova knjiga predstavlja sveobuhvatan prikaz naelektrisanja 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 naelektrisanja oblaka, korona pražnjenje itd. Predstavljeni su i razni, do sada predloženi mehanizmi naelektrisavanja 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 naelektrisanja 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 detaljnom iščitavanju teksta i korisnim sugestijama, Dragomiru Bulatoviću na konačnom uobličavanju teksta i sređivanju slika, kao i studentima master studija na intervencijama prilikom nastanka ovog udžbenika.

U Beogradu, juna 2021. god. *Nemanja Kovačević*

1

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 naelektrisani atom, ili naelektrisani 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 naelektrisan, 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 naelektrisani, tj. postaju pozitivni joni, dok oni koji su dobili elektron, imaju višak negativnog naelektrisanja 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).

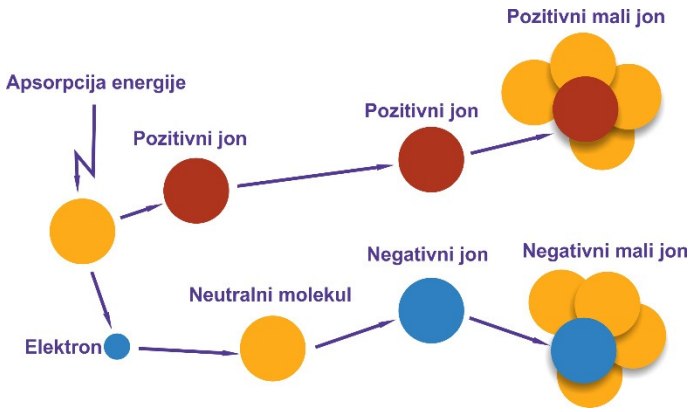
Koncept pozitivnih i negativnih jona u atmosferi kao nosilaca naelektrisanja prvi put je upotrebljen da bi se objasnila električna provodnost vazduha (Elster i Geitel, 1899). Pionirske studije (Ebert, 1901; Langevin, 1905) su takođe bile rani doprinosi izučavanja atmosferskih jona.

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

$$\mu = \frac{v}{E}. \tag{1.1}$$

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



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

Po novoj klasifikaciji (Hõrrak i dr., 2000), joni se mogu podeliti na tzv. klastere jona i aerosolne jone. Naime, od elektroneutralnog atoma i/ili molekula, procesom jonizacije nastaje slobodni elektron i pozitivni jon. Ovi entiteti nazivaju se i primarni joni. Slobodni elektron biva jako brzo (reda veličine 1 μs) privučen

3

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 razmera. 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 elektromagnetnih 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:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \tag{3.1}$$

gde je ρ zapreminska gustina naelektrisanja (u Cm^{-3}), dok je ε_0 dielektrična konstanta vakuuma 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):

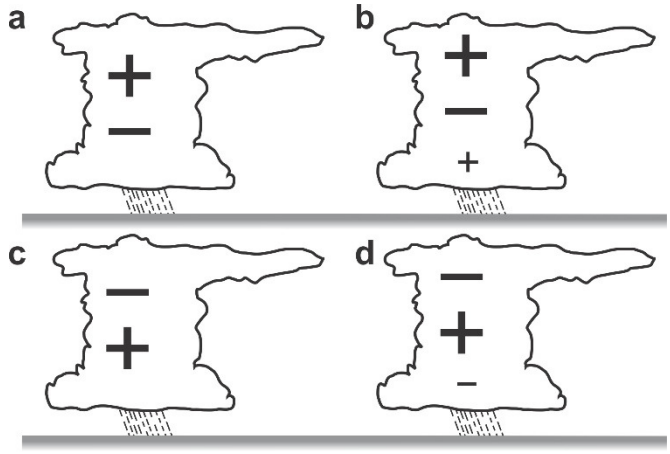
$$\rho = \varepsilon_0 \frac{\Delta E_z}{\Delta z}, \tag{3.2}$$

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) sugerišu 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* 3.1*a*, *c*), ili tripolarni (*Slika* 3.1*b*, *d*), u zavisnosti da li postoje dva, odnosno tri centra naelektrisanja oba znaka, respektivno. Pored toga, struktura naelektrisanja može biti normalna (*Slika* 3.1*a*, *b*), ili inverzna (*Slika* 3.1*c*, *d*). Ta klasifikacija zavisi od toga da li je glavni centar u srednjem delu grmljavinskog oblaka naelektrisan negativno (*Slika* 3.1*a*, *b*), ili pozitivno (*Slika* 3.1*c*, *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

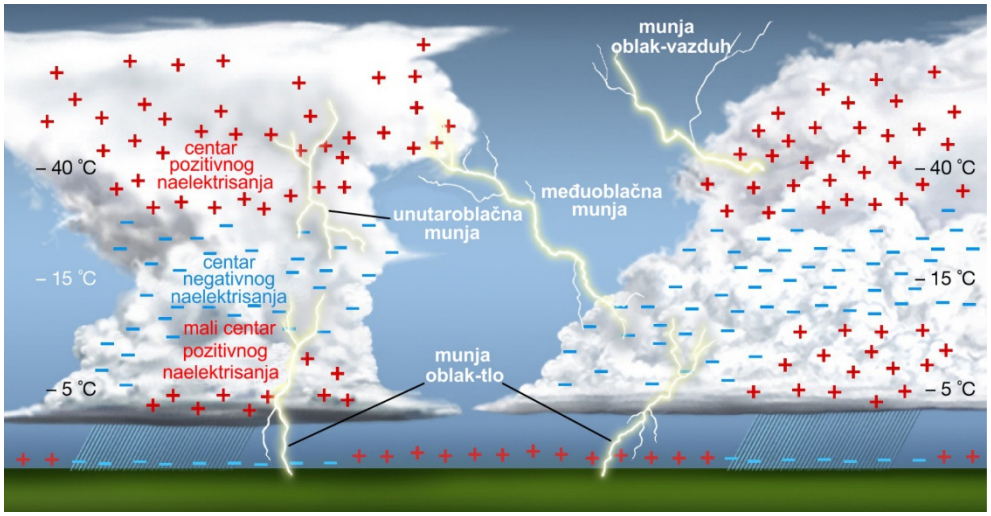
Pod pojmom fenomenologija munja podrazumevamo čestinu pojava električnih pražnjenja u obliku munja, Razmatraćemo maksimume i srednje vrednosti gustine munja, izražene u njihovom broju po jediničnoj površini, kao i promene ovih veličina u zavisnosti od mesta i vrste oluje. Prvo ćemo dati kratak opis i 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 naelektrisanja u kumulonimbusnim, grmljavinsko–gradonosnim oblacima, pri čemu razlika potencijala postane veoma velika da dođe do pražnjenja naelektrisanja. Mehanizme naelektrisavanja grmljavinskih oblaka opisali smo u *Poglavlju* 5. Električno pražnjenje se dešava

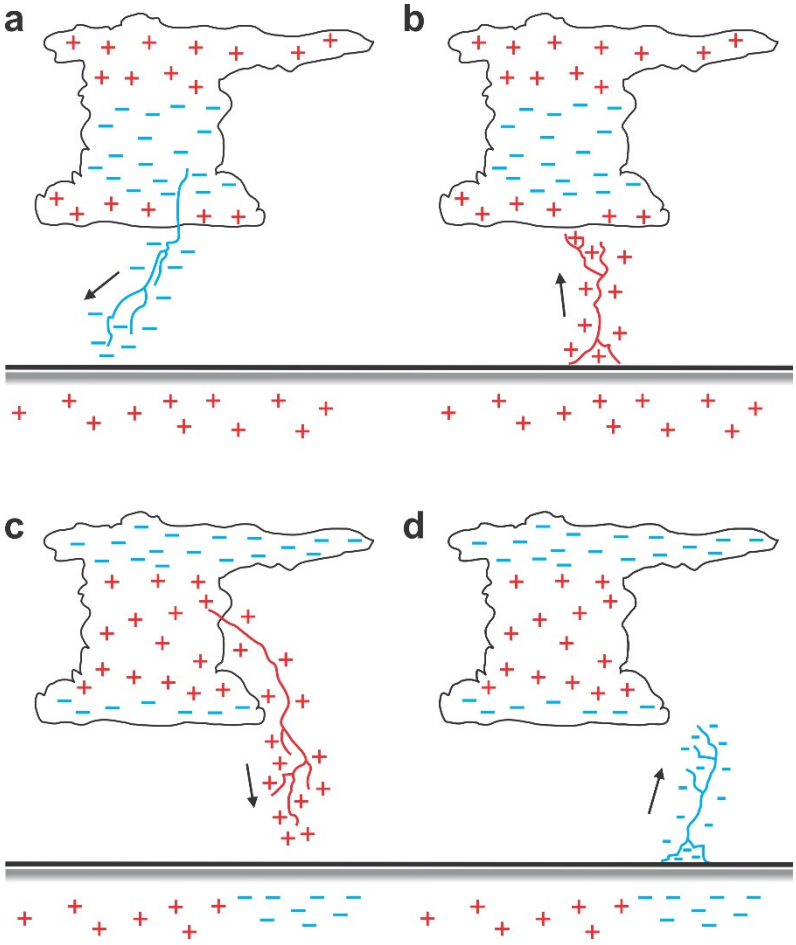
između centara naelektrisanja suprotnog polariteta, te možemo, na osnovu lokacija datih centara razlikovati: unutaroblačna električna pražnjenja (unutaroblačne munje), električna pražnjenja između oblaka i tla (munje oblak–tlo), međuoblačna pražnjenja (munje oblak–oblak), kao i električna pražnjenja 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* 6.2*a*); 2) nagore usmereno pražnjenje negativnog polariteta (*Slika* 6.2*b*); 3) nadole usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta (*Slika* 6.2*c*) i 4) nagore usmereno pražnjenje pozitivnog polariteta (*Slika* 6.2*d*). 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 naelektrisanja ka tlu, tj. snižavanje oblačnog naelektrisanja 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* 6.2*c*). Nagore usmerena električna pražnjenja (*Slika* 6.2*b*, *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 tlo prenosi naelektrisanje istog znaka. Pored unipolarnih munja postoje i bipolarna električna pražnjenja, pri kojima se naizmenično prenose pozitivno i negativno naelektrisanje u tlo. Negativna električna pražnjenja oblak–tlo se dešavaju između glavnog negativnog centra naelektrisanja i pozitivno naelektrisanog tla ispod grmljavinskog oblaka. Unutaroblačna munja se dešava prilikom pražnjenja između dva gornja centra naelektrisanja suprotnog polariteta. Slično, međuoblačna električna pražnjenja se dešavaju između dva suprotno naelektrisana dela dva susedna oblaka. Konačno, munje oblak–vazduh, ili vazdušna električna pražnjenja se dešavaju prilikom prenosa naelektrisanja iz oblaka u vedru sredinu.



Slika 6.2: Četiri vrste unipolarnih električnih pražnjenja oblak–tlo kojima se smanjuje oblačno naelektrisanje 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 naelektrisanja kojim se efektivno snižava oblačno naelektrisanje (prema Berger, 1978; Rakov, 2007).

7

ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA U GRMLJAVINSKIM OBLACIMA

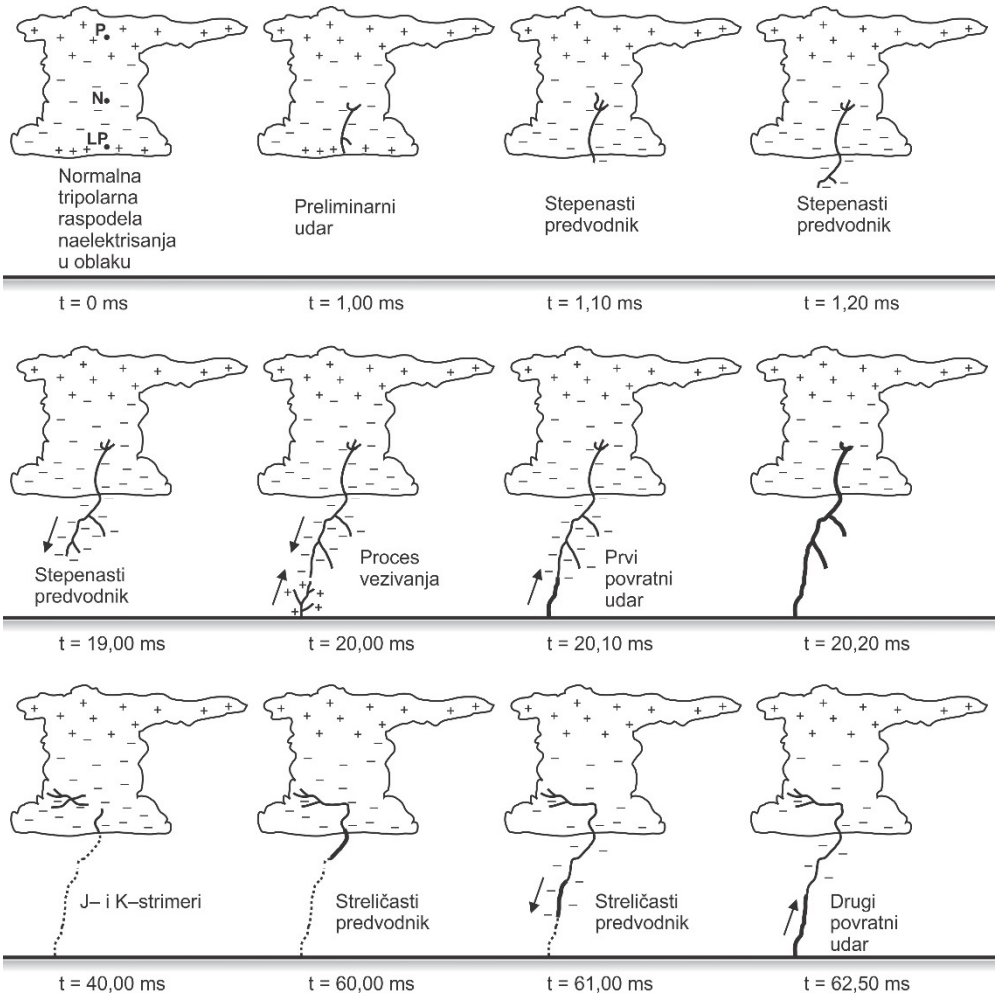
U ovom poglavlju govorićemo o fizici električnih pražnjenja koja nastaju u grmljavinskim oblacima. Naime, ono što se vidi kao svetljenje ili treperenje munje je usled nesposobnosti ljudskog oka da razluči postojanje mnogo raznovrsnijih i finijih procesa koji traju jako kratko i svi zajedno čine električno 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 ređim 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 sastavljena 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.

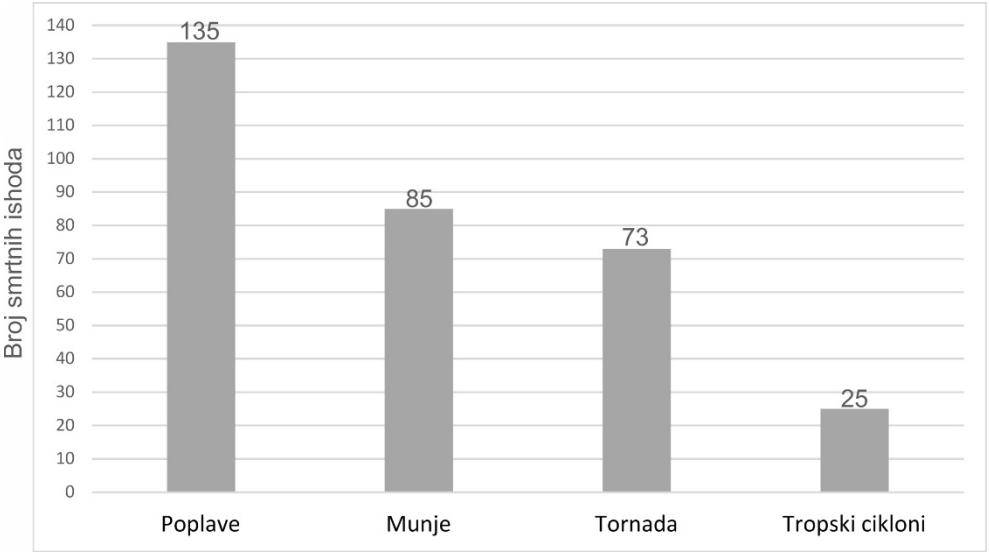
12.1 Opasnosti po ljude i životinje

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.

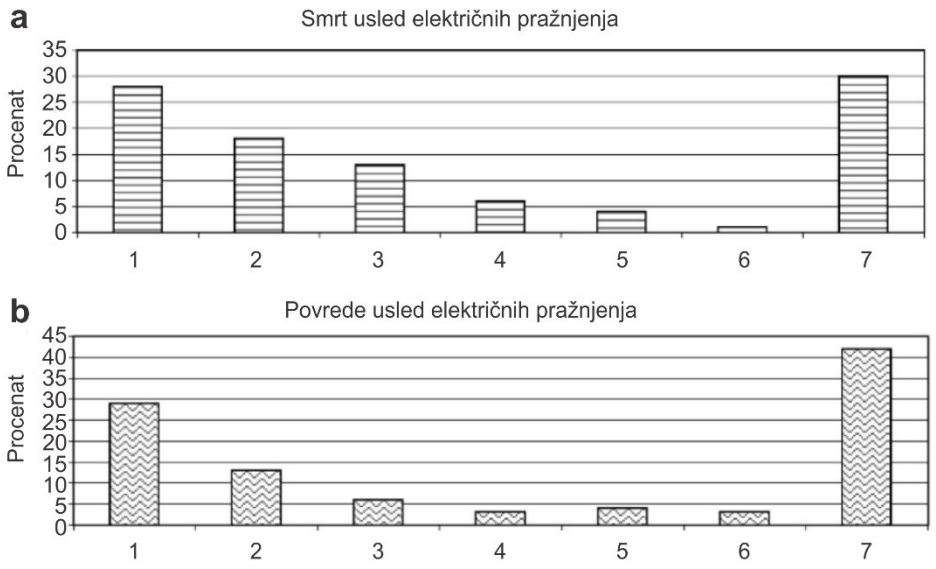
12.1.1 Statistika smrtnih ishoda i povreda usled električnih pražnjenja

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).