

Poglavlje 2

Nastanak grmljavinske aktivnosti

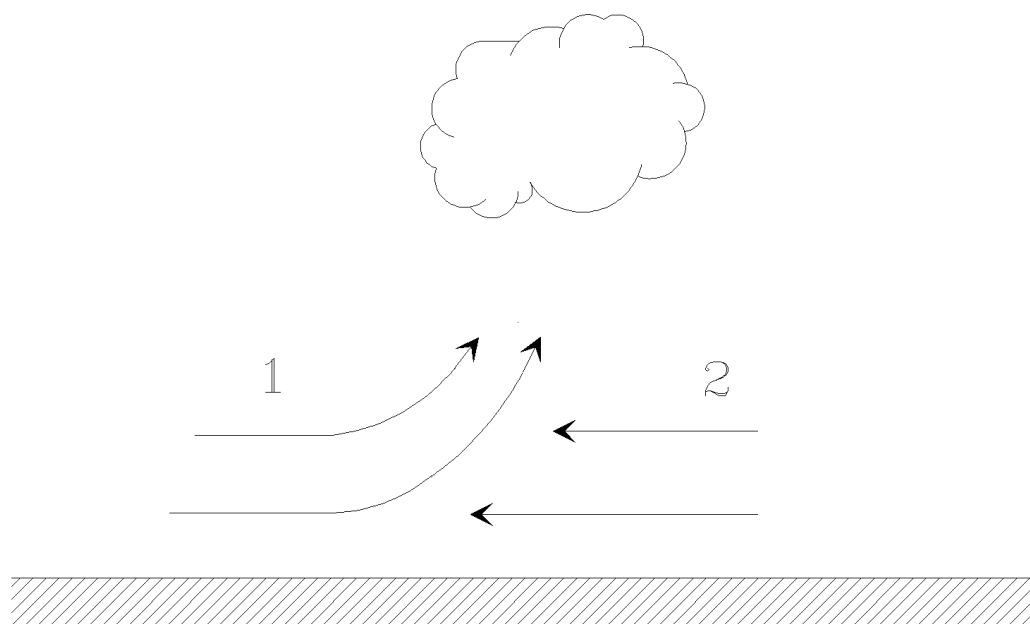
2.1 Uslovi za nastanak grmljavinske aktivnosti

Jedan od uslova za nastanak grmljavinskih oblaka je uzlazno strujanje toplog vazduha koji je zasićen vodenom parom. Do nestabilnosti vazduha koja je praćena uzlaznim strujanjem dolazi pri meteorološkim prilikama kod kojih se javlja veliki temperaturni pad u prizemnim slojevima atmosfere u odnosu na jako zagrejanu zemljinu površinu. U ovakvim slučajevima dolazi do nestabilnosti donjeg sloja atmosfere i do intenzivnog strujanja toplog vazduha naviše.

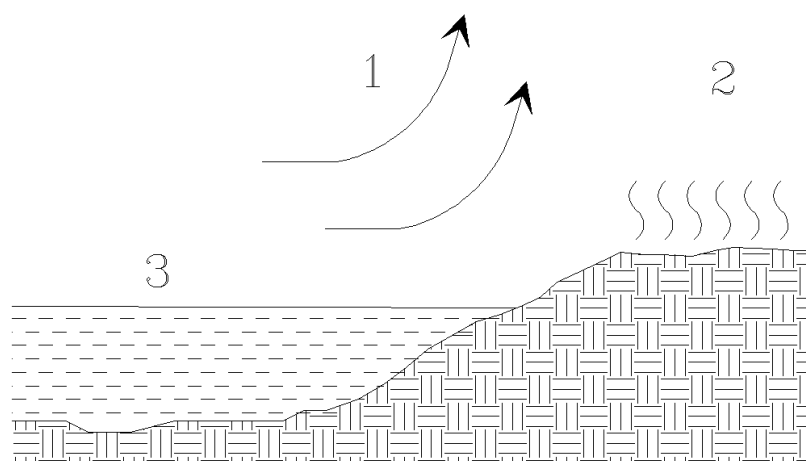
Proces najčešće nastaje u prolećnim i letnjim mesecima kada je u ranim popodnevним časovima zagrevanje tla i vazduha neposredno uz tlo najintenzivnije. U tom slučaju gustina donjeg sloja vazduha opada i postoji mogućnost nastanka tople uzlazne struje vlažnog vazduha.

Moguće je formiranje grmljavinskih oblaka pri sudaru toplih i vlažnih vazdušnih masa sa hladnim masama, što se naziva **frontom**. Tada se može dogoditi da topla vazдушna struja dobije vertikalnu komponentu kretanja što dovodi do uzlaznog strujanja vazduha kao na slici 2.1. Hladna vazдушna struja se probija ispod tople struje podižući topli vazduh naviše. Obrazovanje fronta je karakteristično za ravničarske predele.

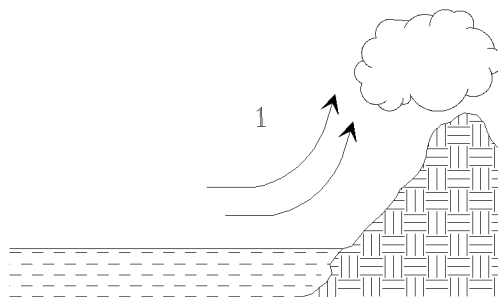
Ovakav proces može da dovede i do zimskih grmljavinskih aktivnosti. Takav slučaj se često sreće u severnom delu Atlantskog okeana u toku zimskih meseci kada se hladan arktički vazduh meša sa toplim vazduhom usled Golske struje [3]. U toplom priobalnom pojasu često nakon sunčanog zalaska dolazi do strujanja vazduha sa mora ka kopnu. Kako je tlo usled sunčevog zračenja zagrejano, vlažan vazduh sa mora počinje iznad kopna da struji naviše, kao na slici 2.2.



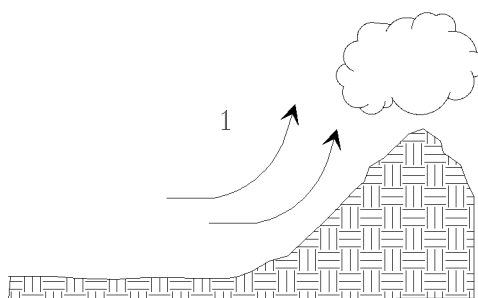
Slika 2.1: Formiranje fronta sukobom toplih i hladnih vazdušnih masa, 1) topla vlažna vazдушna struja, 2) hladna vazдушna struja



Slika 2.2: Uzlazna strujanja usled lokalnog zagrevanja tla, 1) topla vlažna vazдушna struja, 2) topla površina kopna, 3) more



Slika 2.3: Uzlazna strujanja usled primorskog reljefa, 1) topla vazдушna struja



Slika 2.4: Uzlazna strujanja usled kopnenog reljefa, 1) topla vazдушna struja

U planinskim predelima do uzlaznih strujanja toplog vlažnog vazduha dolazi usled usmeravanja horizontalne struje vazduha naviše. Ovakve pojave su naročito česte kada se planinski lanac proteže u priobalnom pojasu. Proces nastanka ovakvog uzlaznog strujanja prikazan je na slici 2.3 u priobalnom pojasu, a na slici 2.4 na kopnu.

Drugi važan uslov za nastanak grmljavinskog oblaka je postojanje određene količine vodene pare u toploj struji vazduha. Smatra se da je neophodna koncentracija od 7 g vodene pare na 1 kg suvog vazduha da bi u toku toplog perioda nastala grmljavinska aktivnost, mada je u toku zimskih meseci potrebna količina vodene pare u 1 kg suvog vazduha znatno manja [3].

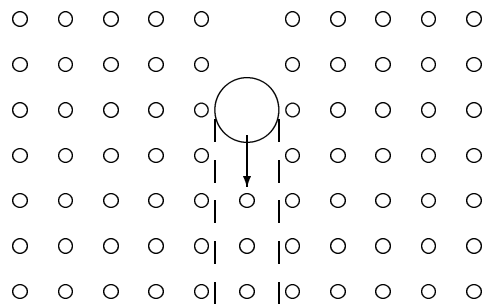
2.2 Nastajanje oblaka

Topao vlažan vazduh podignut vazdušnom strujom se hladi zbog adijabatskog širenja usled smanjenja atmosferskog pritiska, što dovodi do kondenzacije vlage u vidu mikroskopskih kapljica. Ustanovljeno je da je za proces kondenzacije neophodna čvrsta čestica oko koje se kondenzuje vlaga. U idealno čistoj atmosferi može se sadržaj vlage povećati nekoliko puta od količine neophodne za potpuno zasićenje, a da ne dodje do procesa kondenzacije [4].

U atmosferi uvek postoje mikroskopske čestice veličine od $0,01\ \mu\text{m}$ do $10\ \mu\text{m}$, oko kojih se obrazuju vodene kapljice. Čestice oko kojih se vrši kondenzacija nazivaju se **jezgrima**. Ove čestice nastaju podizanjem najsitnije prašine sa tla ili kao produkt sagorevanja u vidu sitnih čestica čadji koje mogu dospeti u visoke slojeve atmosfere. Jezgra mogu nastati i iz čestica soli nastalih isparavanjem vodenih kapljica iznad mora i okeana. Da bi jezgro učestvovalo u formiranju kapljica, ono mora biti higroskopno. Oko jezgra se formiraju vodene kapljice oblaka čija se veličina kreće od $1\ \mu\text{m}$ do $100\ \mu\text{m}$, mada se najčešće sreću kapljice veličine $10\text{--}20\ \mu\text{m}$. Tipični oblaci sadrže oko 200 kapljica oblaka u $1\ \text{cm}^3$. Kapljice oblaka mogu lagano da padaju, da lebde ili da se kreću naviše u zavisnosti da li prevladava sila zemljine teže ili uzlazno strujanje vazduha.

Na velikim visinama se obrazuju ledeni kristali oblaka oko mikroskopskih jezgara. Igličasti ledeni kristali nastaju na temperaturi od oko -5°C , a ledeni kristali u obliku pločica na temperaturi od -15°C do -20°C .

U oblaku se formiraju kišne kapi čije su dimenzije znatno veće od kapljica oblaka. Nastanak kišnih kapi tumači se na dva načina. U slučaju tople sredine, kišne kapi nastaju zbog postojanja kapljica oblaka različite veličine. Veće kapljice oblaka pod uticajem zemljine teže padaju brže od manjih kapljica, sudarajući se i sjedinjavajući se sa njima na svom putu ka zemlji, kao na slici 2.5 [4].



Slika 2.5: Formiranje kišnih kapi

Može se smatrati da će se kišne kapi sjединiti sa većinom kapljica oblaka koje im se nalaze na putu naniže koji je označen na slici 2.5 crtkanom linijom. Kišna kap će biti utoliko veća, ukoliko prelazi duži put kroz oblak, jer se u tom slučaju sudara sa većim brojem mikroskopskih kapljica oblaka.

Drugi način nastanka kišnih kapi je kada je oblak formiran na temperaturi ispod nule. U tom slučaju postoje u oblaku ledeni kristali oblaka i vodene kapljice oblaka koje još nisu

stigle da se zamrznu. Proces isparavanja postoji i na temperaturama ispod nule, ali je znatno slabije izražen kod ledenih kristala nego kod vodenih kapljica oblaka zbog jačih međumolekularnih sila kod kristala leda u odnosu na vodu u tečnom agregatnom stanju. Kapljice oblaka isparavaju da bi se direktnim zaledjivanjem vodena para taložila na kristalićima leda. Zbog toga se kapljice oblaka postepeno smanjuju, dok ledeni kristali rastu.

Ledeni kristali padaju i pri tome se mogu topiti ukoliko je vazduh u donjim slojevima topliji. U tom slučaju se javlja kiša. Ukoliko je vazduh u donjim slojevima atmosfere hladan, padavine će se javljati u obliku snega.

2.3 Vrste oblaka

Prema Howard-ovoj klasifikaciji [4], oblaci se prema svom spoljašnjem obliku mogu podeliti u tri osnovne grupe.

- Stratusi su ravnomerno rasporedjeni oblaci u obliku ravnih slojeva na velikoj površini iznad zemlje.
- Kumulusi su odvojene manje mase oblaka koje se razvijaju vertikalno uz veoma izraženu turbulenciju, ponekad dostižući vrlo velike visine. Za njih su karakteristična jaka uzlazna strujanja vazduha.
- Cirusi su oblaci formirani od ledenih kristala na velikim visinama. Imaju vlaknast ili paperjast oblik.

Pored ove tri osnovne grupe postoje i podgrupe kada oblak ima zajedničke osobine za dve grupe. Ukoliko se obrazuje oblak koji je široko rasprostrt, ali sa valovitom površinom tako da ima oblik više kumulusa, tada se takav oblak naziva strato - kumulusom. Ime oblaka zavisi i od visine na kojoj se oblak pojavljuje. Visinski oblaci u obliku stratusa nazivaju se cirostratusi. Oblaci u obliku stratusa na srednjim visinama (od 2000 m do 6000 m) nazivaju se alto-stratusima. Ukoliko se javljaju padavine iz stratusa, tada se takav oblak naziva nimbo-stratusom. Ukoliko se javljaju padavine iz kumulusa, tada se takav oblak naziva kumulo-nimbusom.

2.4 Nastanak naelektrisanja u oblacima

Mehanizam razdvajanja naelektrisanja u oblacima nije potpuno razjašnjen, ali se pretpostavlja da vrlo važnu ulogu u nastanku grmljavinske aktivnosti imaju atmosferske padavine.

Grmljavinska aktivnost karakteristična je za kumulo-nimbuse, a u znatno manjoj meri za nimbo-stratus kod kojih su brzine vazдушnih strujanja znatno manje. Ukoliko se dogodi da do intenzivne atmosferske električne aktivnosti dodje kod oblaka bez padavina, tada ustvari dolazi do obrazovanja kišnih kapljica unutar oblaka koje padaju naniže, ali usled intenzivnog isparavanja kišne kapljice ne stižu do površine zemlje. Način razdvajanja naelektrisanja u oblacima bio je izazov za proučavanje od trenutka kada je dokazana električna priroda grmljavinske aktivnosti do danas. Kao posledica toga nastao je veliki broj teorija koje objašnjavaju razdvajanje naelektrisanih čestica.

Osnovne činjenice u svim teorijama su zajedničke [6].

1. U gornjem delu oblaka, na temperaturama ispod tačke mržnjenja (od $-10^{\circ}C$ do $-30^{\circ}C$) sakupljaju se pozitivna opterećenja.
2. U nižim slojevima oblaka sakupljaju se negativna opterećenja.
3. Proces razdvajanja naelektrisanja je vezan za padavine (u obliku kristala leda ili vodenih kapljica).

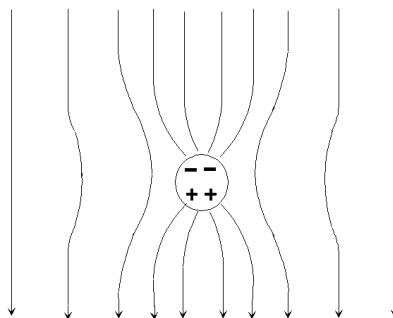
Na ovom mestu će biti opisane tri najpoznatije teorije:

- Wilson-ova,
- Simpson-ova,
- Workman-nova.

2.4.1 Wilson-ova teorija

Jedna od najpoznatijih teorija (prvi put publikovana 1929 godine) objašnjava nastanak naelektrisanih čestica u oblaku interakcijom kapljica vode sa slobodnim jonima koji se nalaze u atmosferi [6]. U atmosferi između jonosfere i zemlje postoji stalno električno polje (električno polje lepog vremena) sa orijentacijom kao na slici 2.6. Ono se kreće u granicama od 1 V/cm na površini zemlje do 0,02 V/cm na visini od oko 1000 m. Usled dejstva električnog polja dolazi do elektrostatičke indukcije na kapljicama vode, tako da gornji deo kapljice postaje negativno naelektrisan, a donji pozitivno, kao na slici 2.6.

Ukoliko bi kapljica mirovala, slobodni negativni joni bi bili privučeni na donju površinu kapljice, a slobodni pozitivni joni na gornju. Ako kapljica pada dovoljnom brzinom, samo negativni joni će biti privučeni donjom površinom kapljice, dok pozitivni joni neće moći da



Slika 2.6: Naelektrisavanje kapljice u električnom polju

stignu kapljicu, te će kapljica biti pretežno negativno naelektrisana, dok će višak pozitivnih jona da se penje naviše usled uzlazne struje vazduha. Sitne vodene kapljice koje nemaju dovoljnu brzinu će privući višak pozitivnih jona i dobiti pozitivno naelektrisanje.

Na taj način sitne vodene kapljice u gornjim slojevima oblaka postaju pozitivno naelektrisane, a krupnije kapljice koje padaju većom brzinom u donje slojeve oblaka negativno naelektrisane [8].

Glavne zamerke Wilson-ovoj teoriji su sledeće:

- Proces naelektrisavanja se objašnjava na vodenim kapljicama, iako je ustanovljeno da se najintenzivniji procesi naelektrisavanja odvijaju na temperaturama ispod tačke mržnjenja.
- Pretpostavka da je stalno prisutno polje lepog vremena sa usvojenom orijentacijom kao na slici 2.6 važi samo za početak odvijanja procesa. Kasnije se stvara polje suprotne orijentacije znatno većeg intenziteta usled prostornog naelektrisanja oblaka zbog razdvajanja opterećenja.

2.4.2 Simpson-ova teorija

Simpson tumači nastanak naelektrisanja u oblacima na dva različita načina u višim i nižim slojevima oblaka.

U nižim slojevima oblaka, ispod temperature mržnjenja, razdvajanje naelektrisanja se objašnjava sudarom neutralne kapljice sa uzlaznom turbulentnom strujom vazduha. Veće kapi se u sudaru sa vazduhom rasprskavaju u sitne pozitivne kapljice, koje se odvajaju od negativno naelektrisanog vazduha. Ovaj efekat se naziva "vodopadnim naelektrisavan-

jem” [9], koji je laboratorijski reprodukovan još 1892 god. U zavisnosti od brzine uzlaznog strujanja vazduha i veličine kapljica može se dogoditi da pozitivne kapljice padaju naniže, zadržavaju se u mestu ili se penju naviše.

U gornjim slojevima oblaka, ispod tačke mržnjenja, nastanak naelektrisanja u oblaku se tumači sudarima ledenih kristala. Pri sudaru ledeni kristali postaju negativno naelektrisani, a ostatak vazduha postaje pozitivno opterećen.

U [6] se tumači naelektrisavanje ledenih kristala njihovom različitom provodnošću. Veće čestice, često u obliku vlažnih pahulja, imaju temperaturu nekoliko stepeni iznad temperature okolnog vazduha. Ledeni kristali, nastali direktnom sublimacijom vodene pare, su manjih dimenzija, imaju temperaturu okoline i odlikuju se manjom provodljivošću od vlažnih pahulja nastalih zaledjivanjem vodenih kapljica. Pri sudaru dve ledene čestice različitih provodnosti, ona koja je provodljivija će postati negativno naelektrisana. To se tumači prirodom električne provodljivosti leda kretanjem pozitivnih jona, koji mogu lakše da napuste električni provodljiviju česticu pri sudaru sa drugom česticom, ostavljajući napuštenu česticu negativnom.

Smatra se da je tačka mržnjenja ispod -10°C , pa je granica koja određuje način nastanka naelektrisanja u oblacima upravo visina na kojoj vlada ova temperatura.

U [8] su opisani rezultati istraživanja raspodele naelektrisanja u oblacima pomoću balona, koji su upravo potvrdili obe teorije.

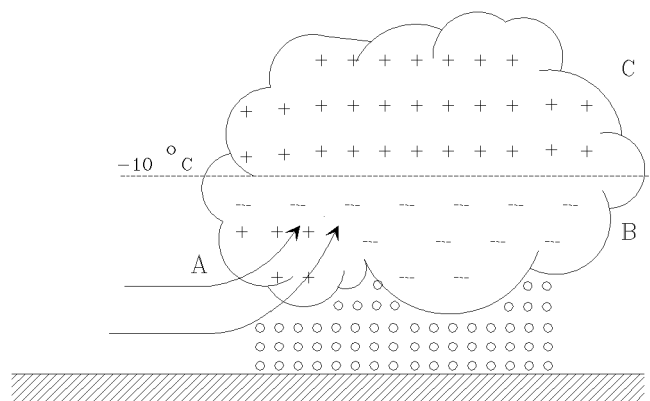
Na velikim visinama ispod tačke zamrzavanja nalaze se pozitivna naelektrisanja, dok negativno naelektrisani kristali leda padaju naniže, formirajući osnovnu masu oblaka koja je negativno naelektrisana.

U podnožju oblaka ponekad se nalaze nagomilane pozitivne kapljice koje mogu da padaju na zemlju u vidu pozitivne kiše ili da se zadrže na dnu oblaka u slučaju dovoljno jakog uzlaznog strujanja vazduha.

Na slici 2.7 šematski je prikazana struktura oblaka prema rezultatima istraživanja Simpson-a.

Sa slike 2.7 se može uočiti da jako uzlazno strujanje vazduha dovodi do razdvajanja pozitivnih kapi (oblast A) i negativnog vazduha oduvanog naviše (oblast B). Pozitivne kapi se mogu zadržati u oblasti A ili padati kao pozitivna kiša. Pozitivne kapljice koje se nošene vetrom penju naviše, rekombinuju se sa negativnim naelektrisanjem u oblasti B i kao neutralne kapljice padaju dok se ponovo ne naelektrišu u sudaru sa uzlaznom vazdušnom strujom.

U oblasti C nalaze se pozitivna naelektrisanja nastala u sudarima ledenih kristala u



Slika 2.7: Naelektrisanja u oblaku prema Simpson-u

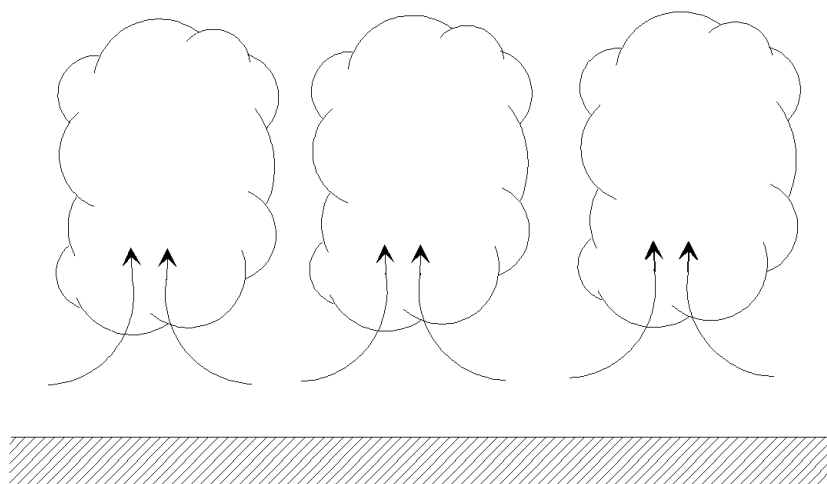
kojima veći i provodljiviji kristali postaju negativni i padaju naniže u oblast B. Od ledenih kristalića se kondenzacijom mogu obrazovati krupnije kapi negativne kiše koja pada na zemlju.

Može se smatrati da olujni oblaci obrazuju dipol čija visina zavisi od visine zone u kojoj je temperatura oko -10°C [9].

2.4.3 Workman-ova teorija

Workman-ova teorija se neznatno razlikuje od prethodnih teorija. Mehanizam razdvajanja naelektrisanja objašnjava se sudarima čestica leda sa kišnim kapljicama ohladjenim ispod tačke mržnjenja koje još nisu stigle da se pretvore u led. U sudaru sa kristalom leda deo kapljice se zaledi na površini ledenog kristala, dok ostatak ne može da se zaledi zbog sadržane latentne toplote topljenja, već se rasprskava u pozitivne kapljice, ostavljajući negativno naelektrisane ledene kristale da padaju naniže. Kada ledeni kristali padnu u oblast u kojoj vlada temperatura iznad temperature topljenja (0°C), dolazi do njihovog topljenja. U slučaju sudara sa sitnim kapljicama oblaka, one preuzimaju deo negativnog naelektrisanja, penju se na veće visine i obrazuju negativne ledene kristale. Na taj način samo deo naelektrisanja pada na zemlju u vidu negativne kiše, a znatno veći deo ostaje u oblaku u obliku negativnih ledenih kristala. Po Workman-ovoj teoriji olujni oblak se sastoji iz više ćelija, prečnika do 1 km , koje imaju sopstvenu uzlaznu struju vazduha u kojoj se događa proces razdvajanja opterećenja. Pri atmosferskim pražnjenjima sa više uzastopnih udara dolazi do zajedničkog pražnjenja više susednih ćelija. Do pražnjenja u oblacima može doći i između pojedinih ćelija.

Na slici 2.8 prikazana je skica obrazovanja olujnog oblaka iz više ćelija [3].



Slika 2.8: Obrazovanje ćelija prema Workman-ovoj teoriji