

Oluje na moru

Rožmarić, Tom

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:988783>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

TOM ROŽMARIĆ

OLUJE NA MORU

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**OLUJE NA MORU
SEA STORMS**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Pomorska meteorologija i oceanologija

Mentor: doc. dr. sc. Tatjana Ivošević

Student: Tom Rožmarić

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079130

Rijeka, rujan 2023.

Student: Tom Rožmarić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079130

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

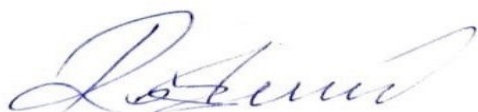
OLUJE NA MORU

izradio/la samostalno pod mentorstvom

doc. dr. sc. Tatjane Ivošević

U radu sam primijenio metodologiju izrade znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Tom Rožmarić

Student: Tom Rožmarić

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079130

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



Tom Rožmarić

SAŽETAK

Završnim radom istražuje se fenomen oluja na moru, fokusirajući se na razvoj olujnih oblaka, njihovih karakteristika i popratnih pojava. Analizirana je dinamika atmosferskog kruženja, s osvrtom na njihov utjecaj na razvoj tropskih i izvantropskih ciklona. Također, rad opisuje promjene atmosferskog tlaka i temperature kao glavne generatore morskih oluja. Uz oluje i olujne oblake, razrađene su i određene pojave koje nastaju u olujnim nevremenima. Radom se najviše prikazuje problematika tropskih ciklona, razornih po čovjeka i imovinu. Istaknut je utjecaj ciklona na plovidbu te preporuke za postupanje ako se brod nađe na njihovoj putanji.

Ključne riječi: olujni oblak, atmosferski čimbenici, ciklone, tropski ciklon, popratne pojave, detektiranje oluja, plovidba

SUMMARY

This thesis delves into a comprehensive examination of sea storms, with a specific focus on the development of storm clouds, their characteristics, and associated phenomena. It involves an analysis of the dynamics of atmospheric circulation and its influence on the formation of both tropical and extratropical cyclones. Furthermore, the study investigates variations in atmospheric pressure and temperature, as they serve as the primary catalysts for storm formation. In addition to exploring storms and storm clouds themselves, this research addresses various phenomena occurring during and following stormy weather. The paper primarily centers on tropical cyclones, which play a pivotal role in the Earth's atmosphere but pose significant threats to both people and property. Additionally, the impact of cyclones on navigation is discussed, along with recommended actions for ships caught in their path.

Keywords: storm cloud, atmospheric factors, cyclones, tropical cyclone, accompanying phenomena, storm detection, navigation

SADRŽAJ

SAŽETAK	II
SUMMARY	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD	1
2. OLUJNI OBLAK	2
2.1. NASTANAK OLUJNOG OBLAKA	3
2.1.1. <i>Uvjeti za nastanak olujnog oblaka</i>	4
2.2. USTROJSTVO OLUJNOG OBLAKA	7
2.2.1. <i>Faze olujnog oblaka</i>	7
2.2.2. <i>Jednoćelijski olujni oblak</i>	11
2.2.3. <i>Višećelijski olujni oblak</i>	11
2.2.4. <i>Superćelijski olujni oblak</i>	14
2.3. VRTLOŽNA GIBANJA ZRAKA	17
2.3.1. <i>Pijavice</i>	17
2.3.2. <i>Propad</i>	21
2.4. ELEKTRIČNA PRAŽNENJA.....	23
2.4.1. <i>Elektrifikacija oblaka</i>	23
2.4.2. <i>Stvaranje električnih polja</i>	24
2.4.3. <i>Munje</i>	25
3. ATMOSFERSKI ČIMBENICI OLUJA	27
3.1. POLARNA FRONTA	27
3.2. INTERTROPSKA ZONA KONVERGENCIJE	28
3.3. ZRAČNE MASE I ATMOSFERSKE FRONTE	30
3.4. CIKLONE I ANTICIKLONE	31
4. EKSTRATROPSKE OLUJE	33
4.1. CIKLONE UMJERENIH ŠIRINA.....	33
4.2. CIKLOGENEZA	33
4.3. INTENZITET I VELIČINA CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA.....	34
4.4. SEZONE I PODRUČJA NASTANKA CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA.....	36
4.5. VREMENSKI UVJETI KOD CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA.....	37

5. OLUJE U TROPIMA	38
5.1. RAZVOJ I DEFINICIJE TROPSKIH CIKLONA	40
5.1.1. <i>Tropski poremećaj</i>	40
5.1.2. <i>Tropska depresija</i>	40
5.1.3. <i>Tropska oluja</i>	41
5.1.4. <i>Tropski ciklon</i>	42
5.2. PODJELA, PODRUČJA DJELOVANJA I SEZONE CIKLONA	43
5.2.1. <i>Podjela i područja djelovanja ciklona</i>	43
5.2.2. <i>Sezone ciklona</i>	45
5.3. ANATOMIJA CIKLONA	45
5.4. FORMIRANJE I RASPAD CIKLONA	47
5.5. ATMOSFERSKI TOPLINSKI MOTOR	49
5.5.1. <i>Stvaranje i unos goriva u ciklon</i>	49
5.5.2. <i>Ispust zraka iz ciklona</i>	50
5.6. KRETANJE CIKLONA	51
5.7. POPRATNE OCEANSKE POJAVE	53
5.8. NAJRAZORNJI CIKLONI U POVIJESTI.....	57
5.9. EL NIÑO I LA NIÑA TE UTJECAJ NA OLUJE	59
6. DETEKCIJA OLUJA	60
6.1. METEOROLOŠKI RADARI.....	60
6.2. SATELITI.....	61
7. PLOVIDBA KROZ OLUJU - CIKLON.....	62
7.1. BUYS BALLOTOV ZAKON	63
8. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA	65
KAZALO KRATICA.....	68
POPIS GRAFIKONA	68
POPIS TABLICA	70

1. UVOD

Poznavanje meteoroloških elemenata, načina na koji zajednički djeluju i posljedica koje nose za sobom spada među najbitnije odlike uspješnog navigacijskog poduhvata. More je oduvijek izazovno okruženje koje podliježe konstantnim ili iznenadnim promjenama, a nevrijeme na moru jedan je od ključnih faktora koji predstavljaju rizik po sigurnost broda, posade, putnika i tereta. Oluje su kompleksne meteorološke pojave koje se često razvijaju brzo i mogu imati ozbiljne posljedice. Razumijevanje uzroka, dinamike i karakteristika oluja izuzetno je važno kako bi se omogućilo pravovremeno postupanje i adekvatno planiranje pomorskih aktivnosti.

Ovim radom opisuje se tematika oluja na moru, s posebnim naglaskom na njihov nastanak, elemente, razvoj, klasifikaciju i popratne pojave. Kroz pregled relevantnih meteoroloških pojmova i teorija, cilj je pružiti uvid u mehanizme nastanka oluja i nevremena te identificirati čimbenike koji doprinose njihovoj intenzivnosti i trajanju.

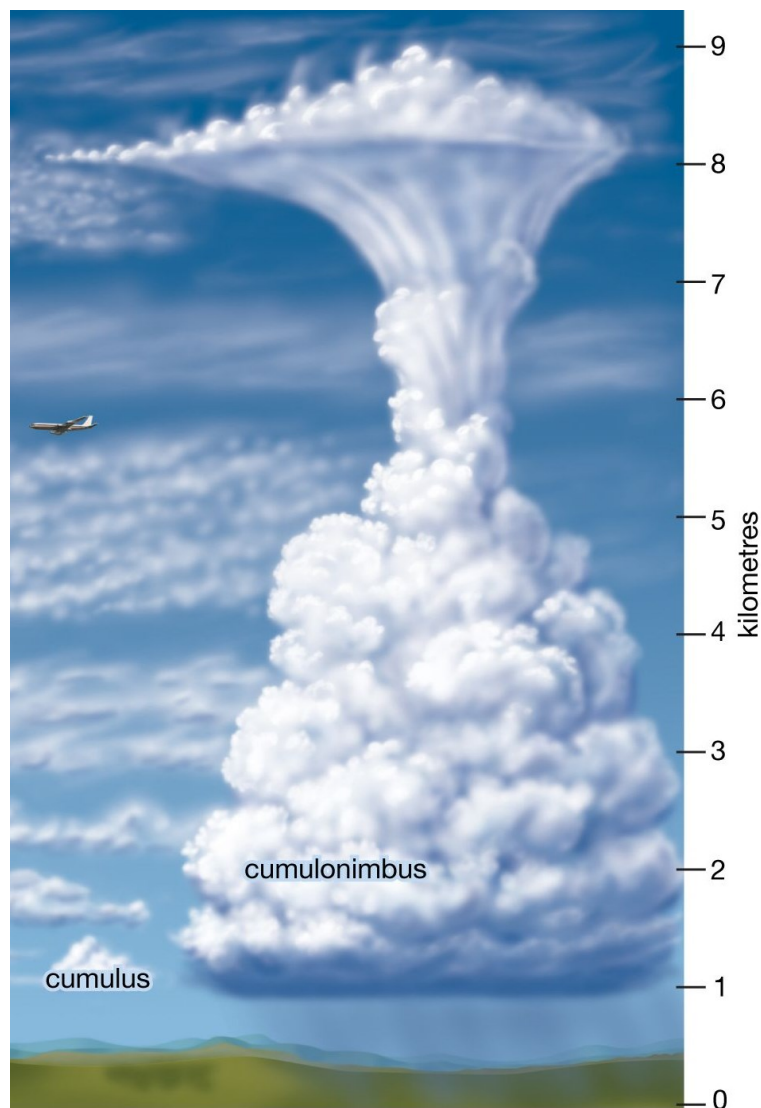
Oluje se općenito mogu razlikovati na više načina, s obzirom na područje nastanka, s obzirom na uzročne fizikalne procese poput promjene atmosferskog tlaka i promjene temperature. No u svojoj srži, one su prilično slične, više ili manje razorne, s više ili manje oborina koje nastaju, s više ili manje jakim vjetrovima, ali ono najbitnije, svim olujama prethode olujni oblaci. Zbog toga, istraživanje započinje od osnova razvoja olujnih oblaka, vrsta olujnih oblaka te popratnih pojava.

Nadalje, za razumijevanje procesa nastanka oluje, nužno je poznavati mehanizme koji se odvijaju u atmosferi, a zaslužni su za stvaranje preduvjeta za daljnji razvoj meteoroloških pojava.

Rad se najviše fokusira na problematiku ciklonalnih pojava iznad morskih područja - tropskih i izvantropskih ciklona, kao najintenzivnijih oblika oluja. Kao jedan od ciljeva bio je prikazati, što je cjelovitije moguće, općenit pregled čimbenika koji utječu na olujne nepogode, te poslužiti kao pomoć zainteresiranim čitateljima u razumijevanju morskih oluja.

2. OLUJNI OBLAK

Kako bi se mogle razraditi vrste i tipovi oluja, potrebno je najprije razmotriti olujni oblak. „Olujni oblak, *Cumulonimbus*, *Cb* najznačajniji je tip oblaka koji se pojavljuje u atmosferi, goleme energije (nekoliko atomskih bombi) i uzročnik mnogih procesa.“ [1.p.172.] Opisuje se kao težak i gust oblak, sa značajnim vertikalnim usponom, u obliku planine ili ogromnih tornjeva. Barem djelomično, njegov je gornji dio obično gladak, ili vlaknast ili isprugan, i gotovo uvijek spljošten; ovaj dio se često širi u obliku nakovnja ili goleme perjanice. Pod podnicom ovog oblaka, koja je često vrlo tamna, nerijetko se nalaze niski, raščupani oblaci, stopljeni s njom ili ne. [2] Olujni oblak prikazan je na slici 1.



Slika 1. Cumulonimbus

<https://www.britannica.com/science/climate-meteorology/Cloud-types>

Karakteristike cumulonimbusa (sl.1):

- **podnica:** prosječno 400-1000 m,
- **debljina:** zimi $z = (3-5)$ km, ljeti $z = (8-10)$ km, (ponekad $z > 15$ km)
- **sastav:**
 - **u donjem dijelu:** vodene kapi
 - **u srednjem dijelu:** vodene kapljice, snježni kristali i led,
 - **u gornjem dijelu:** ledeni kristali i nešto prehladnih kapljica,
- **električne pojave:** munje i grmljavina,
- **oborine:** virga, pljuskovi kiše, snijeg, solike, sutuča i tuča [1.p.172.]

2.1. NASTANAK OLUJNOG OBLAKA

Cumulonimbusi se razvijaju iz Cumulusa, odijeljenih i gustih oblaka koji se često nazivaju „ovčicama“. Cumulusi se uglavnom razvijaju za topla ljetna jutra, a do poslijepodneva mogu postati mnogo širi i deblji, vertikalno razvijeni. Kada rastući cumulus dobije oblik cvjetače, on postaje *cumulus congestus*, cumulus s kulom. Najčešće je to jedan veliki oblak, no ponekad više njih sraste u jedan, dostižući visinu visokih oblaka ($z > 7$ km), kao što je prikazano na slici 2. Oborina koja pada iz kumulusa congestusa uvijek je kiša.



Slika 2. Cumulus congestus na visini visokih oblaka

<https://theweatherprediction.com/habyhints2/556/>

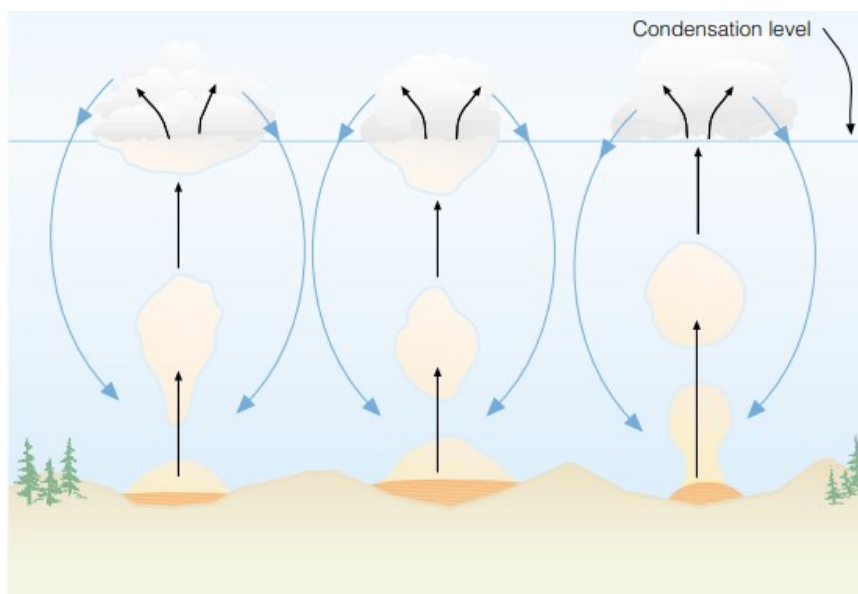
Ako cumulus congestus nastavi okomito rasti, razvija se u divovski cumulonimbus.

2.1.1. Uvjeti za nastanak olujnog oblaka

Oluje se obično razvijaju u toplijim mjesecima kalendarske godine, ali mogu se pojaviti i u bilo koje doba. Najprije, u blizini tla se mora nalaziti puno vlažnog zraka. To je čest slučaj u dolinama i u podnožju planina, gdje zrak konstanto kruži tijekom dana, djelomično orografski tjeran prema gore. Ljeti, osim što je topliji zrak, i tlo je izloženo jačem zagrijavanju, a samim time i apsorpciji toplinske energije.

Ugrijano tlo grije zrak nad tim tлом te zrak postaje topliji, rjeđi i lakši od okolnog. Stoga se ugrijani zrak počinje udizati, a na njegovo mjesto premješta se okolni hladniji i teži zrak. Ako promatramo vertikalnu cirkulaciju zraka, onda se topliji i lakši zrak podiže prema gore, a hladniji i teži spušta prema tlu. U donjem sloju atmosfere, tj. u troposferi, temperatura se zraka najčešće smanjuje s visinom, što se opisuje *vertikalnim temperaturnim gradijentom, koji se razlikuje ovisno o nezasićenosti (10 °C/km) ili zasićenosti zraka (5 °C/km)*. Takav prijenos topline zraka naziva se **konvekcija zraka** ili **termičko dizanje/spuštanje zraka**. Kako se topao zrak podiže i hladi, vodena para kondenzira, stvarajući tako vodeni oblak u prisustvu jezgri kondenzacije poput čestica morske soli ili zagađenja. Podnica takvog oblaka nalazi se na kondenzacijskoj razini. Proces je prikazan na slici 3.

Slika 3. Proces nastanka oblaka (termika)

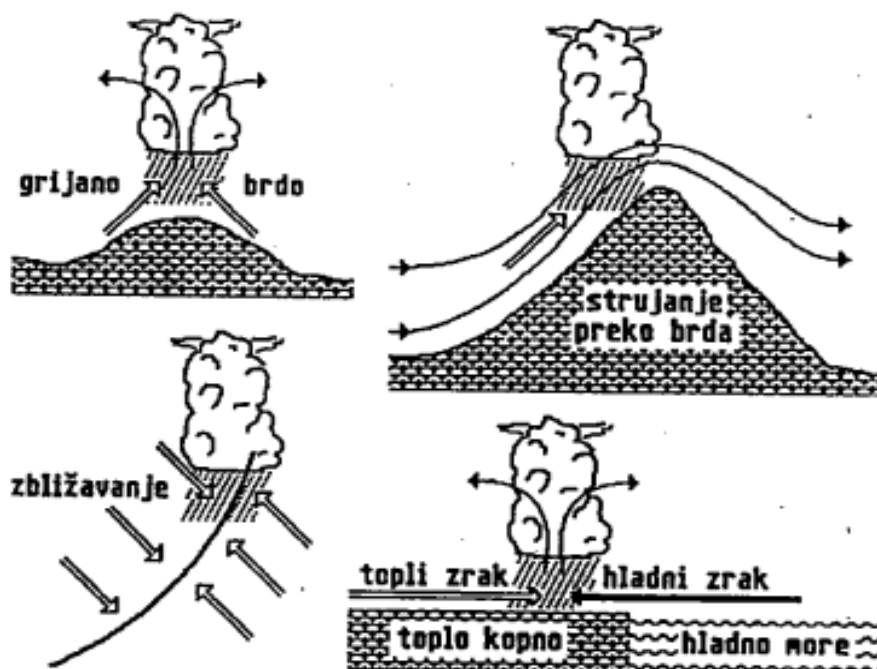


(C.D.Ahrens, 2001., *Essentials of meteorology, an invitation to the atmosphere*, 3rd edition, Brooks/Cole/Thomson Learning)

2.1.1.1. Načini podizanja zraka

Konvekcijska strujanja zraka mogu biti spora (laminarna) pa nastaju **konvekcijske struje**, te jača i brža (turbulentna) gdje nastaju turbulentne struje i **termici (termički ili turbulentni baloni)**. Turbulentna strujanja nastaju kad brzina gibanja zraka prelazi graničnu brzinu gibanja zraka te svaka čestica struje osim srednje brzine struje ima i dodatnu brzinu koja utječe na nepravilno vrtložno strujanje. Posljedica turbulentnih strujanja zraka je nastanak olujnih oblaka, cumulonimbusa. Nakon što brzina struje prestigne kritičnu brzinu, konvekcijska struja se raspada u dijelove te nastaju ćelijske formacije, tzv. „baloni“. Ti baloni se nastavljaju gibati sve više velikim brzinama te kao posljedica nastaju razmjerno uski, i uspravno razvijeni oblaci – cumulonimbusi.

Na slici 4. prikazani su tipovi udizanja zračnih masa, slika gore lijevo prikazuje nastanak oblaka termičkim udizanjem, slika gore desno prikazuje orografsko podizanje zraka, slika dolje lijevo prikazuje proces podizanja zraka uslijed konvergencije zraka, a slika dolje desno proces sudara dviju zračnih masa na fronti i uzdizanje toplije zračne mase.



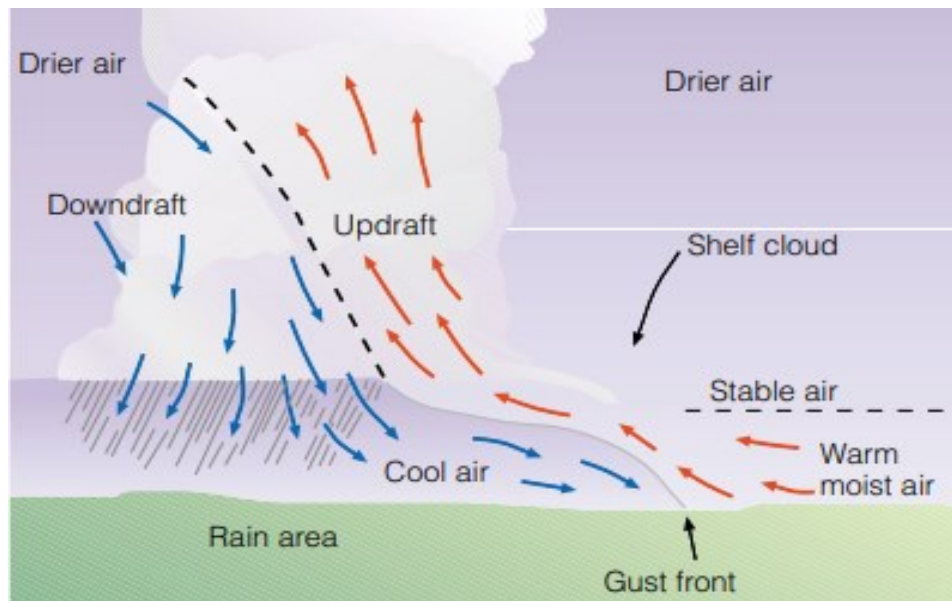
Slika 4. Podizanje zraka zbog konvekcije, orografije, konvergencije i frontalnih sustava

(Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

Prisilno udizanje zračne mase događa se kad je zrak prisiljen preći neku orografsku prepreku kao što je brdo ili planina. Također, podizanje zraka događa se pri konvergenciji zraka tj, pri približavanju zračnih masa kad pri sudaru zračnih masa, zrak se mora gibati uvis, ili pri frontalnim procesima kad hladnija zračna masa uvis istiskuje toplu. Ako se dvije zračne mase s velikim temperaturnim razlikama i dovoljno vlage sudare na frontalnoj plohi, topli zrak giba se prema gore te se stvaraju konvekcijski oblaci s velikim uspravnim brzinama. [1.p.303.]

2.1.1.2. Kretanja zračnih struja u olujnom oblaku

Olujni oblak je trodimenzionalne građe. Međutim, zbog jednostavnosti razmatrat će se dvodimenzionalni oblik oblaka. Na slici 5. u x,z ravnini, oblak se giba slijeva udesno, u smjeru puhanja vjetrova. Zbog jakih vjetrova u višim slojevima cijeli je olujni sustav nagnut. Na prednjoj strani oblaka (desna strana na slici) nalazi se konvekcijska struja, topao i vlažan zrak, koja ide prema njemu. Topli zrak prelazi preko hladnog jer je nestabilan i stvara se uzlazna struja u oblaku (*updraft*). Na skici je uzlazna struja označena crvenim strelicama. Topao i vlažan zrak ispred oblaka ulazi u sastav oblaka te je gorivo za razvoj oluje. Ta se topla struja uzdiže sve do vrha oblaka gdje ima vodoravni smjer kretanja i izlazi iz oblaka također s njegove prednje strane. Ako u okolnoj atmosferi nema previše jakog strujanja, struja može poprimiti i suprotan smjer izlaženja na stražnjoj strani oblaka. Upravo zbog nagiba oblaka, uzlazna struja održava svoju snagu puno duže, što rezultira jakim olujom. Daljnjim dizanjem toplog zraka, zrak se hladi i kondenzira.. Silazna struja (*downdraft*), na skici označena plavim strelicama, nastaje u srednjim slojevima troposfere, na visini oko 5 km, u hladnom zraku, kada čestice padalina postanu preteške i počinju padati. Iz troposfere ulazi u oblak ispod uzlazne struje, iz koje vodene kapi povlače za sobom prema dolje te nastaje kiša i tuča. Kako se oblak giba, tako u oblak iz srednje troposfere ulazi još hladnog i suhog zraka koji sudjeluje u silaznom gibanju. Tako padajući hladni zrak, kada stigne na površinu Zemlje, tvori kupolu hladnog zraka. Ta se kupola širi, i na granici s okolnim zrakom stvara se **udarna fronta** (*gust front*) hladnog zraka. Ta fronta s prednje se strane oblaka susreće s uzlaznom frontom, podvlači se ispod nje, i tako dodatno pojačava dizanje zraka. Takvim međudjelovanjem, silazna i uzlazna strujanja uzajamno si pomažu te nastaje svojevrsan samoodrživi sustav, odnosno snažan i dugotrajan olujni oblak. [1.p.304.]

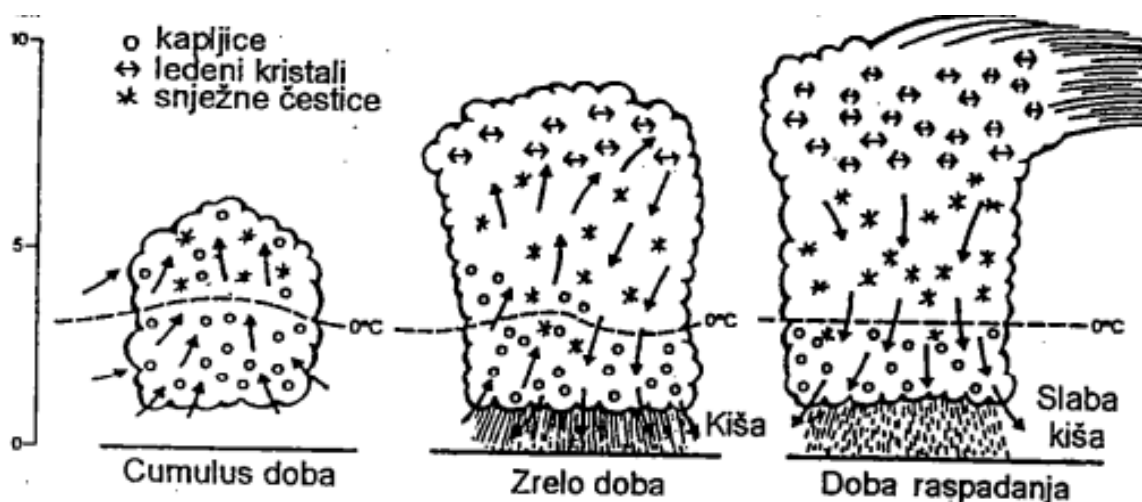


Slika 5. Pojednostavljeni model kretanja zračnih struja u olujnom oblaku.
 (C.D.Ahrens, 2001., *Essentials of meteorology, an invitation to the atmosphere*, 3rd edition,
 Brooks/Cole/Thomson Learning)

2.2. USTROJSTVO OLUJNOG OBLAKA

2.2.1. Faze olujnog oblaka

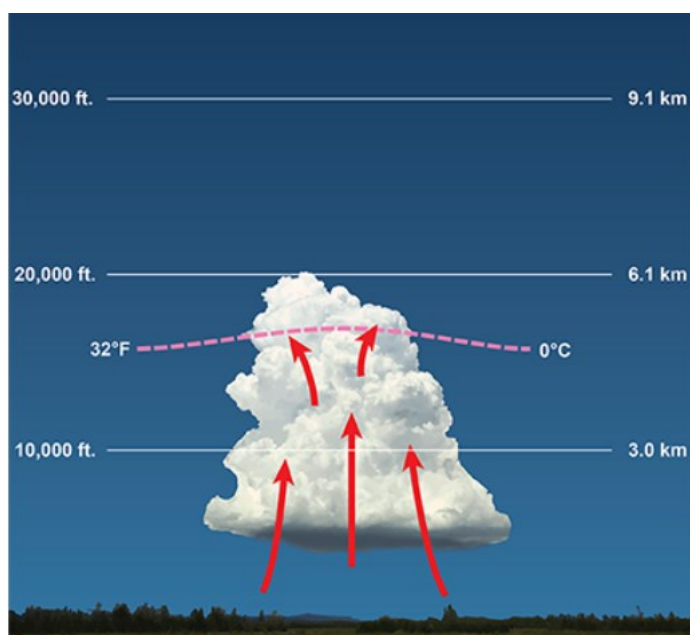
Olujni oblaci se, kao što je navedeno u odlomku 2.1.1.1., sastoje od ćelija te mogu biti jednoćelijski, višećelijski i superćelijski. Ćelija je područje koje sadrži uzlaznu i silaznu struju. Mogu se raspoznati ako se cumulonimbus promatra iz daljine, odnosno njegovi izboji (tornjevi). Svaka ćelija, kao i cjelokupni oblak, prolazi kroz 3 faze razvoja, od početne faze gdje postoji samo uzlazno gibanje zraka, preko zrele faze, u kojoj se pojavljuje silazno strujanje, uz moguće oborine, sve do završne faze raspadanja gdje uzlazne sile budu prevladane.



Slika 6. Faze razvoja olujnog oblaka

(Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

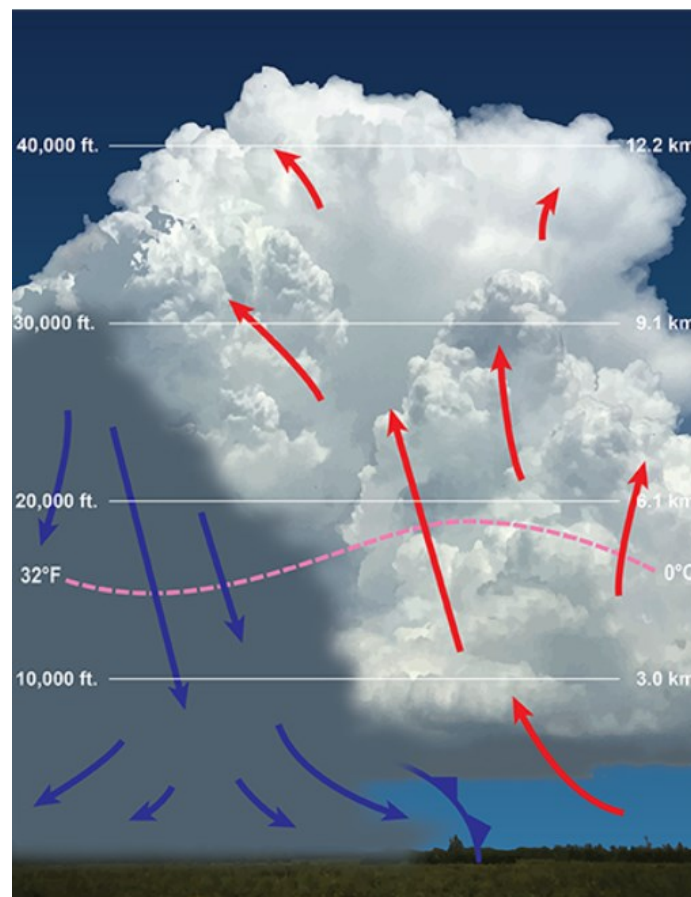
U prvoj fazi razvoja (sl. 6) olujnog oblaka, **cumulus dobu**, javljaju se uzlazna strujanja (na slici 7. označene su crvene strelice) koja prenose topao zrak uvis. U srednjem se dijelu oblaka vodene kapljice smrzavaju. Sudarima ledenih kristala, kristali rastu. Kako se kondenzacijom vodene pare oslobađa **latentna toplina isparavanja** [6], **izoterme** (na slici 7. isprekidana linija roze boje) su ispupčene jer je na istoj visini u oblaku veća temperatura od okolnog zraka. Oblak u ovom dobu postiže visinu do 6 kilometara.



Slika 7. Cumulus doba olujnog oblaka

<https://www.noaa.gov/jetstream/thunderstorms/life-cycle-of-thunderstorm>

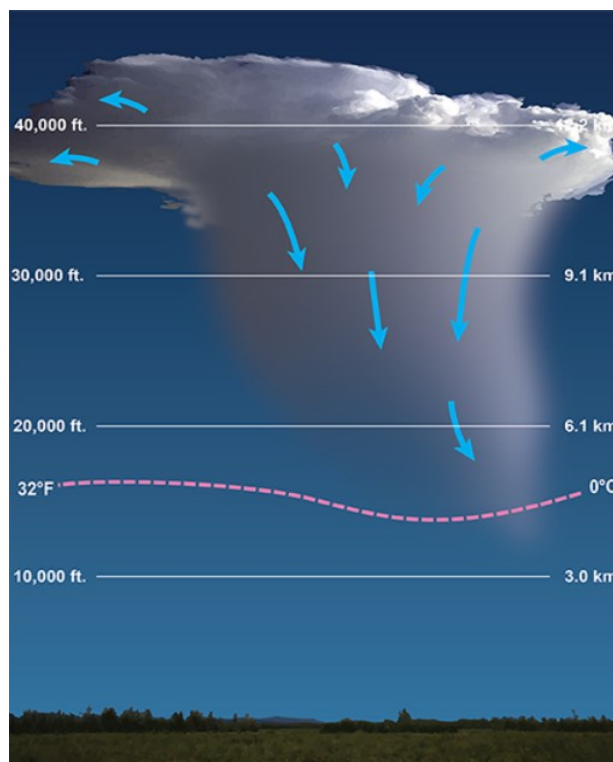
Drugi stadij razvoja, **zrelo doba**, faza je u kojoj se pojavljuju i silazna strujanja, na slici 8. označena plavim strelicama. Također, prije navedeni kristali leda i kapljice vode počinju padati, ponekad sve do podnice oblaka. Ako je oblak jako razvijen, ti meteori mogu vratiti u više slojeva zbog pojačanih uzlaznih strujanja, na slici 8. označena crvenim strelicama. Taj se proces može ponavljati nekoliko puta. Izoterma je ispupčena u području uzlaznih struja jer je temperatura u oblaku veća nego okolni zrak na istoj visini zbog oslobođene latentne topline, dok je u području silazne struje ona udubljena jer se latentna toplina preuzima za grijanje kristalića leda. Oblak postaje najrazvijeniji u trenutku kada gornji dio oblaka postane hladniji od okolnog zraka stvarajući stabilnu atmosferu, što uzrokuje pojavu jakih silaznih struja. Tada se javljaju oborine poput kiše i, tuče te se javljaju grmljavine i munje. Do električnih iskri u oblaku dolazi uslijed različitih naboja kristalića leda i kapljica vode. Olujni oblak u ovom, ujedno i najopasnijem, dobu doseže visinu od 8 do 16 kilometara.



Slika 8. Zrela faza olujnog oblaka

<https://www.noaa.gov/jetstream/thunderstorms/life-cycle-of-thunderstorm>

U završnoj fazi, **fazi raspadanja**, postoje pljuskovite oborine i učestala električna pražnjenja. Oblak se troši, raspada te gubi svoje jasne obrise. Spuštajući zrak hladi se trošenjem latentne topline na isparavanje kapi vode i otapanja čestica leda, te se ispod oblaka slijeva u cjelinu i putuje dalje, tako izazivajući nove olujne nepogode. Tako izlazeći vjetar i slabe oborine na kraju iza sebe ostavljaju samo ostatak vrha nakovnja Cumulonimbusa. [1.p.306.]



Slika 9. Faze raspadanja olujnog oblaka

<https://www.noaa.gov/jetstream/thunderstorms/life-cycle-of-thunderstorm>

Nadalje, struktura olujnih oblaka dijeli se u tri osnovne skupine: jednoćelijski, višećelijski i superćelijski, dodatni oblik je i olujna pruga. Ovakve strukture mnogo su lakše raspoznavljive pomoću radara, o kojem će biti više riječi u narednim poglavljima.

„Prije pregleda tipova olujnih oblaka, važno je naglasiti da se prave grmljavinske oluje ne uklapaju uvijek uredno u navedene kategorije. Istraživanja su pokazala da je najosnovnija razlika u tipovima oluja upravo između superćelija i ostalih, takozvanih "običnih" ćelija.“ [7]

2.2.2. Jednoćelijski olujni oblak

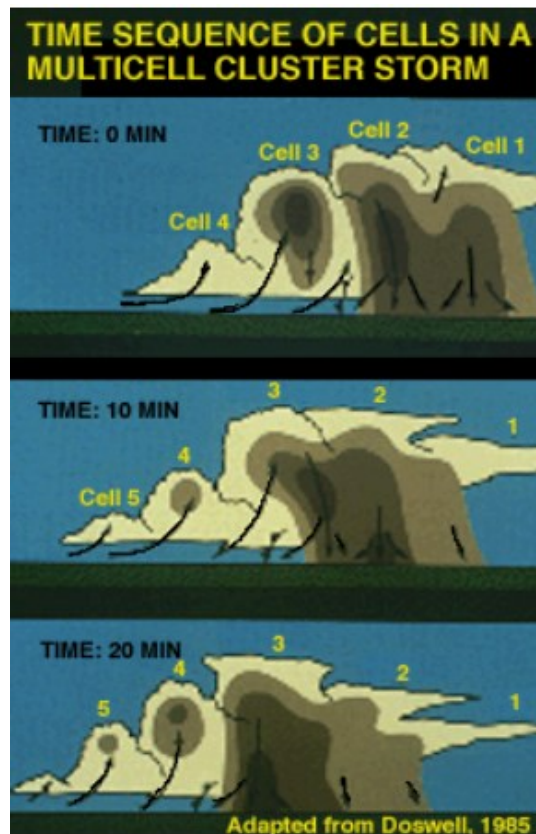
Jednoćelijski oblak stvoren je od samo jedne konvekcijske ćelije u atmosferi. Većina takvih oluja je kratkog vijeka, traju oko sat vremena, a nazivaju se još i „običnim grmljavinskim olujama“. Svi dosadašnji opisani primjeri su jednoćelijski oblaci.

2.2.3. Višećelijski olujni oblak

Višećelijski oblak sastoji se od skupine ćelija koje se kreću kao jedna jedinica, a svaka od njih nalazi se u različitoj fazi životnog ciklusa. Ovakva struktura oblaka naziva se još i **višećelijski klaster** (*multicell cluster*). Kako se višećelijski klaster razvija, izmjenjuju se ćelije koje postaju najdominantnije. Nove ćelije imaju tendenciju formiranja uzduž strane ruba oblaka gdje je izraženo uzlazno strujanje, zrele ćelije smještene su u središtu, dok se ćelije koje su u fazi raspadanja nalaze u području silaznih strujanja.

Ovi se oblaci obično protežu od 30 do 50 km u širinu. Promjer pojedine ćelije je od 3 do 5 km. Svakih 5 do 10 minuta razvija se nova ćelija te traje od 30 do 45 min, a raste brzinom 10 do 15 m/s. Višećelijski oblak traje do nekoliko sati. Slika 10. prikazuje razvoj višećelijskog oblaka:

- a) u početnom vremenu $t = 0$ min ćelija 1 se raspada, a ćelija 2 sazrijeva i postaje dominantna,
- b) u vremenskom intervalu $\Delta t = 10$ min, ćelija 2 ispušta najviše oborina i slabi, a ćelija 3 jača te dominira,
- c) za $\Delta t = 20$ min ćelija 3 se raspada, a ćelija 4 raste i dominira.



Slika 10. Vremenski slijed razvoja ćelija u višćelijskom oblaku

[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/clstr/cyc.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/clstr/cyc.xml)

Sljedeća fotografija prikazuje višćelijski klaster (sl. 11), s radarskim prikazom.



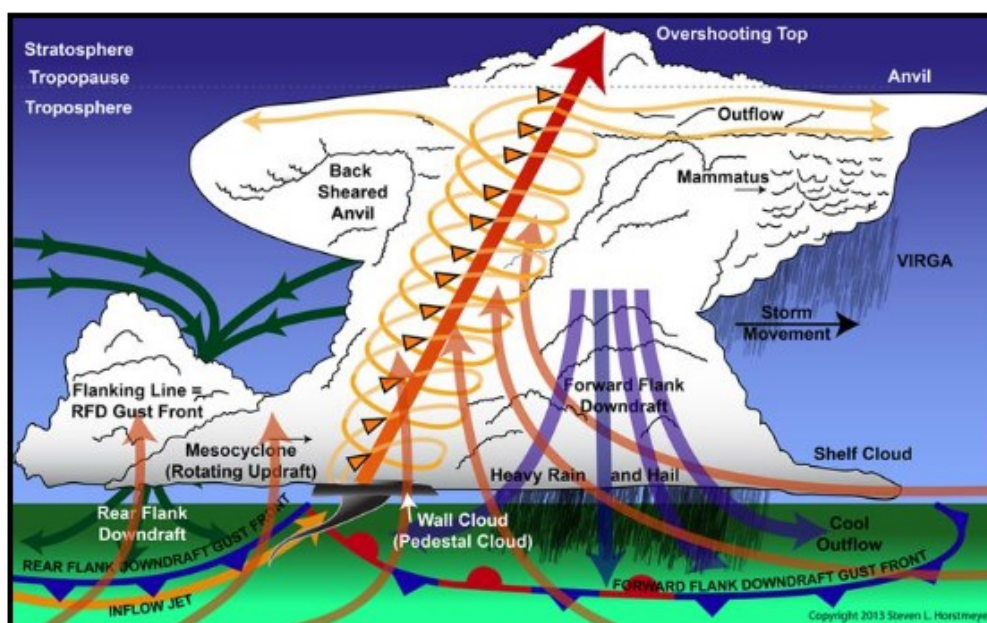
Slika 11. Višćelijski oblak s radarskim prikazom

[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/clstr/cyc.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/clstr/cyc.xml)

Alan Moller, NOAA / NWSFO

2.2.4. Superćelijski olujni oblak

Superćelijski oblak (sl. 13) definiran je kao grmljavinska oluja s dubokim rotirajućim uzlaznim strujanjem (**mezociklonom**). Glavna razlika između superćelijskih i višećelijskih oluja, osim više sjedinjenih ćelija, je zapravo element rotacije u superćelijama. Uzlazna se strujanja stapaju u glavno rotirajuće uzlazno strujanje i zatim eksplodiraju vertikalno uvis. Dakle, ne dolazi do razvijanja odvojenih ćelija oluje kao kod višećelijskih oblaka.

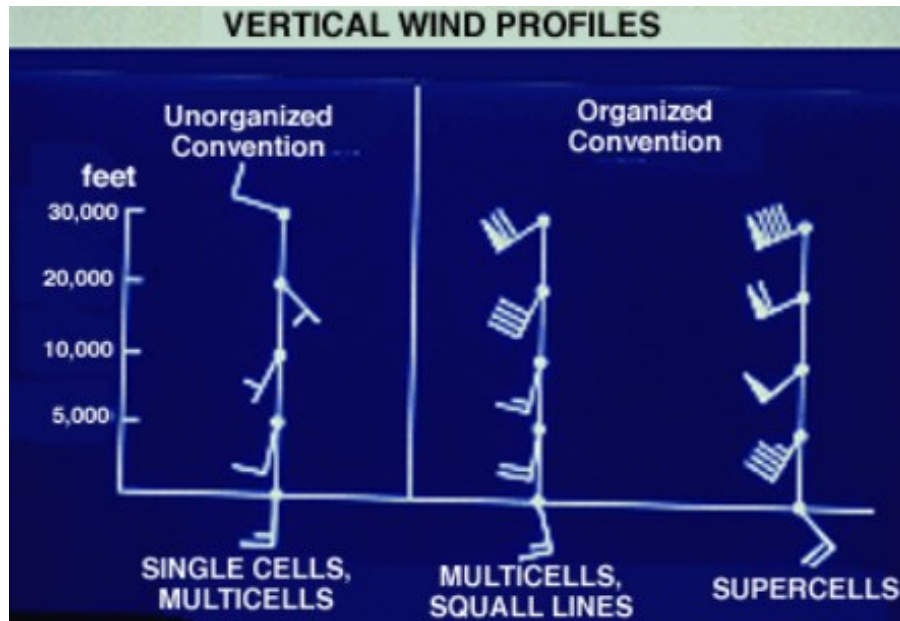


Slika 13. Ustrojstvo superćelijskog oblaka

https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/thunderstorm_stuff/Thunderstorms/thunderstorms.htm

Na slici 13. koja prikazuje „anatomiju“ superćelijskog oblaka, jasno je prikazan i mezociklon (spiralna struktura označena narančastom bojom), a direktno ispod njega je područje u kojem se može pojaviti tornado. S lijeve, stražnje strane oblaka se nalazi dio bočne linije silaznih strujanja (*Rear Flank Downdraft*), i pripadajuće udarne fronte koja pomaže dizanju toplog zraka koji ulazi u oblak. S desne strane, pored mezociklone, nalazi se veliko područje prednjih silaznih strujanja velike jačine, u tom području dolazi do jakih padalina (jaka kiša, velika zrna tuče). Ispod oblaka, sudaraju se udarna fronta silaznih strujanja i uzlazna strujanja kojima vjetar usisava topao zrak ispred sebe, tvoreći tako okludiranu frontu. Hladni se zrak podvlači ispod toplog, i tako dodatno pojačava uzlazna gibanja. U gornjem desnom kutu, kod nakovnja oblaka, nalazi se područje izlaska zračne struje (*outflow*), u ovom se području mogu javiti mammatus oblaci i virga.

Uz prije navedene sastojke potrebne za razvoj olujnog oblaka, kod superćelijskog oblaka jako je bitna i komponenta **smicanja vjetra**, tj. promjene smjera puhanja s visinom, što u biti omogućava da se stvori navedeni mezociklon. Smicanje vjetra (sl. 14) čini da se zrak u oblaku počne rotirati, stvarajući silan vortex prema vrhu oblaka.

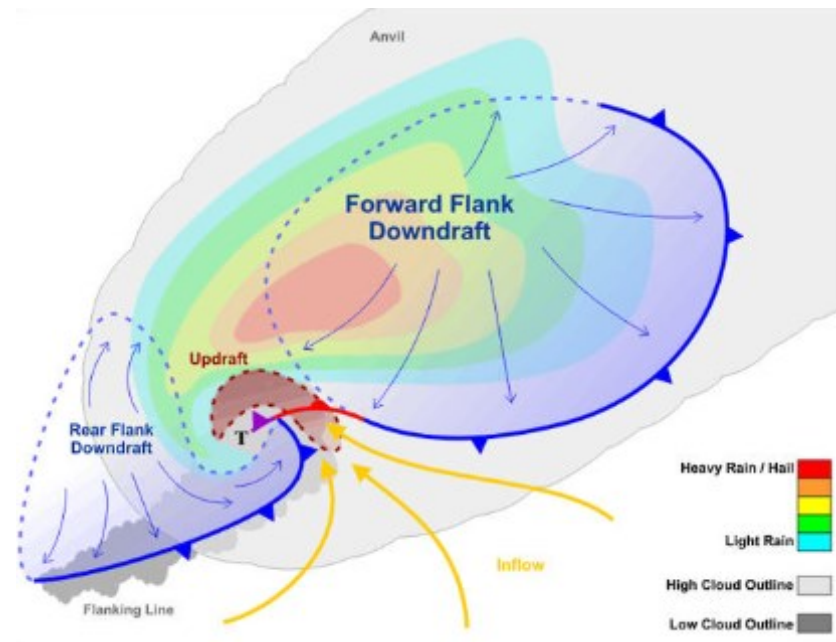


Slika 14. Smicanje vjetra

<http://ww2010.atmos.uiuc.edu/%28Gh%29/guides/mtr/svr/comp/wind/cnvt.rxml>

Slika 14. prikazuje dijagrame vjetrova u vertikalnoj ravnini. Na jednom vertikalnom pravcu smjer vjetra se mijenja, ali se razlikuju dva tipa konvekcije s obzirom na promjenu brzine i smjera vjetra. Kod neorganizirane konvekcije, smjer i brzina vjetra se mijenjaju bez ustaljenog pravila, dok se kod organizirane konvekcije, brzina vjetra obično s porastom visine povećava, a smjer se pravilno mijenja bez skokova npr, s istočnog u zapadni smjer. Kod jednoćelijskih i ponekad višećelijskih oluja javlja se tzv. neorganizirani tip konvekcije zraka. Takve su oluje, zbog slabijih i nestalnih vjetrova kaotične i nepredvidive u smislu trajanja i prognoziranja, no nemaju razoran učinak. S druge strane, kod organiziranog tipa konvekcije zraka, odnosno sustava gdje postoji smicanje vjetra, situacija je suprotna. Smicanje postoji i kod višećelijskih, no kod superćelijskih oluja ono je najizraženije, što pokazuju i oznake brzina vjetrova u desnom grafu (supercells). Jačina vjetra pojačava se s brzinom, te je u nižim slojevima, kod podnice oblaka, vjetar ima brzinu 10-20 čvorova, a u višim slojevima i pri izlazu iz oblaka vjetar može prelaziti i brzine od 100 čvorova.

Superćelijski oblak (sl.15) najopasniji je tip oblaka zbog ekstremnog vremena koje stvara.
[9]



Slika 15. Horizontalni presjek superćelije

https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/thunderstorm_stuff/Thunderstorms/thunderstorms.htm

Slika 15. predstavlja horizontalni presjek superćelijskog olujnog oblaka na visini nekoliko kilometara. Na toj visini odraz oblaka ima oblik kuke. Slijeva se vidi stražnji dio oblaka sa silaznim strujama i udarnom frontom. Na srednjem dijelu vidljivo je područje ulaženja zraka i uzlaznih strujanja koji stvaraju mezociklonu. U tom dijelu, u “središtu kuke”, ispod mezociklona, nastaju tornada. Ovo područje također se naziva bezodrazno radarsko područje. S desne, prednje strane vidljivo je glavno područje silaznih struja i najviše padalina, čije je područje obojano crvenom bojom. To je područje ujedno i područje najveće radarske odražljivosti.



Slika 16. Superćelijski oblak

<https://www.9news.com.au/national/supercell-storms-what-they-are-what-you-need-to-know/503910ac-3dfb-4fa0-bb8b-61f4f793662>

2.3. VRTLOŽNA GIBANJA ZRAKA

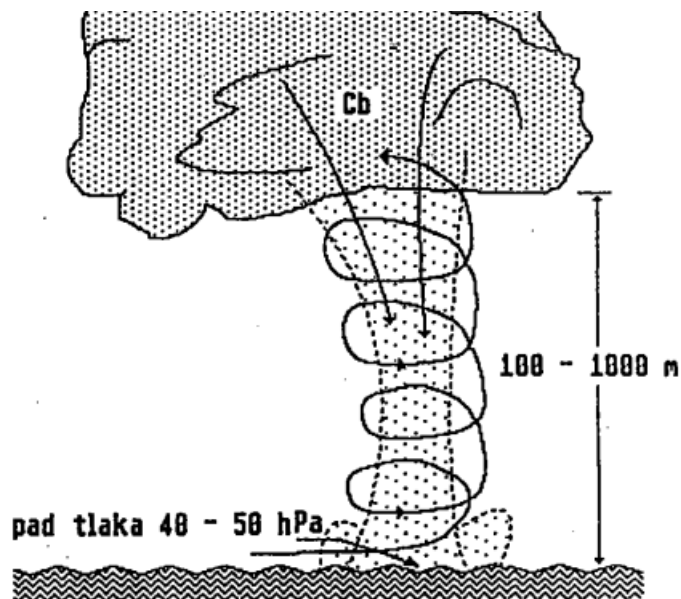
Iako su veća vrtložna gibanja zraka karakteristično svojstvo ciklona i anticiklona, ona mogu nastati i na drugim mjestima i u različitim vremenskim uvjetima. Stoga se u ovome poglavlju govori o vrtložnim gibanjima u smislu pijavica i tornada.

2.3.1. Pijavice

Pijavice se opisuju kao zračni vrtlozi uspravne osi, razmjerno malih dimenzija, primjera nekoliko metara do nekoliko stotina metara. Dosta česte pojavnosti, u umjerenim širinama javljaju se većinom u ljetnim mjesecima. Prema veličini dijele se na male i velike pijavice. Prema površini iznad koje nastaju dijele se na vodene (morske) i kopnene.

2.3.1.1. Male pijavice

Male pijavice promjera su od 2 do 50 metara, a visine od 5 do 100 metara, a u nekim pustinjским krajevima dosežu visine do 1000 metara. U srednjim širinama su kratkotrajne. Razvijaju se uvis, od tla prema gore, kao posljedica nestabilnog zraka pri tlu s velikim temperaturnim razlikama uzrokovanih jakim Sunčevim zračenjem. Naglo dizanje toplog zraka za sobom povlači bočno pritjecanje zraka koje formira vrtlog. U unutrašnjosti nastale cijevi područje je pada tlaka i spuštanja zraka, a vanjski rubovi imaju spiralno dizanje zraka.



Slika 17. Pijavica

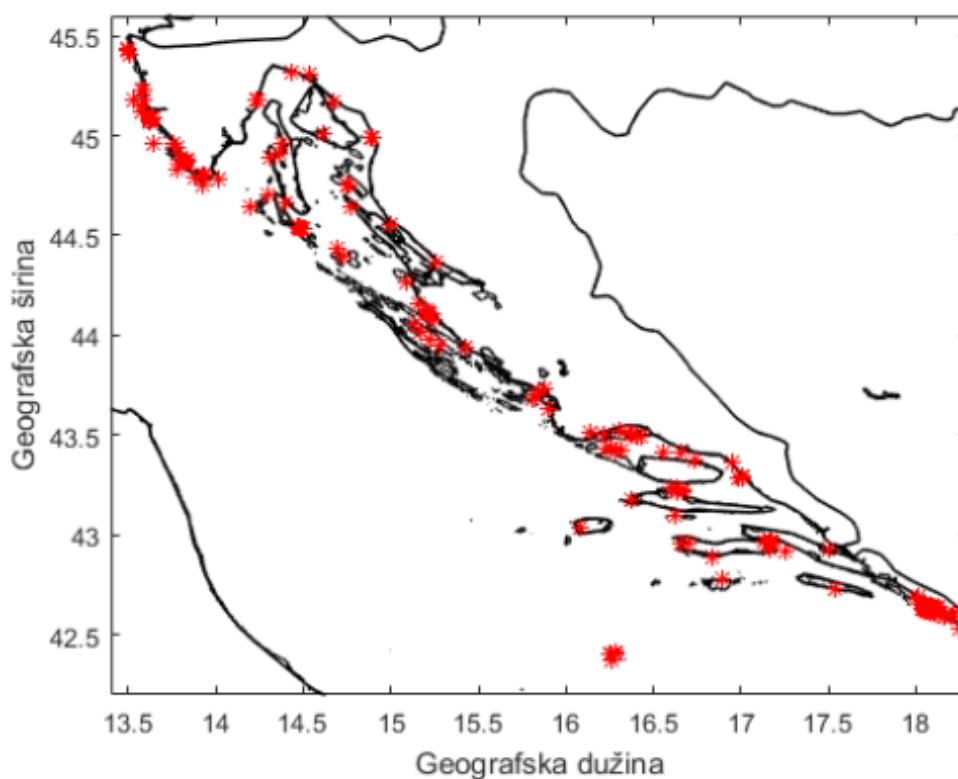
(Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

2.3.1.2. Velike pijavice

Velike pijavice imaju ustrojstvo slično malima, javljaju se kod jakih oluja u jako razvijenim kumulonimbusima, s jednom ili više cijevi. Promjera su od 20 do 100 metara, a visine od 100 do 1000 metara. Traju duže no male pijavice te traju između 10 minuta i 2 sata. Razvijaju se prema tlu iz donjih slojeva kumulonimbusa, najčešće nad toplim područjima, uglavnom morima. Velike pijavice imaju ciklonsku vrtložnost. Velikih su obodnih brzina (od 150 do 300 km/h). Vjetar velike obodne brzine u pijavici može načiniti velike štete u pomorstvu te ugroziti ljudske živote.

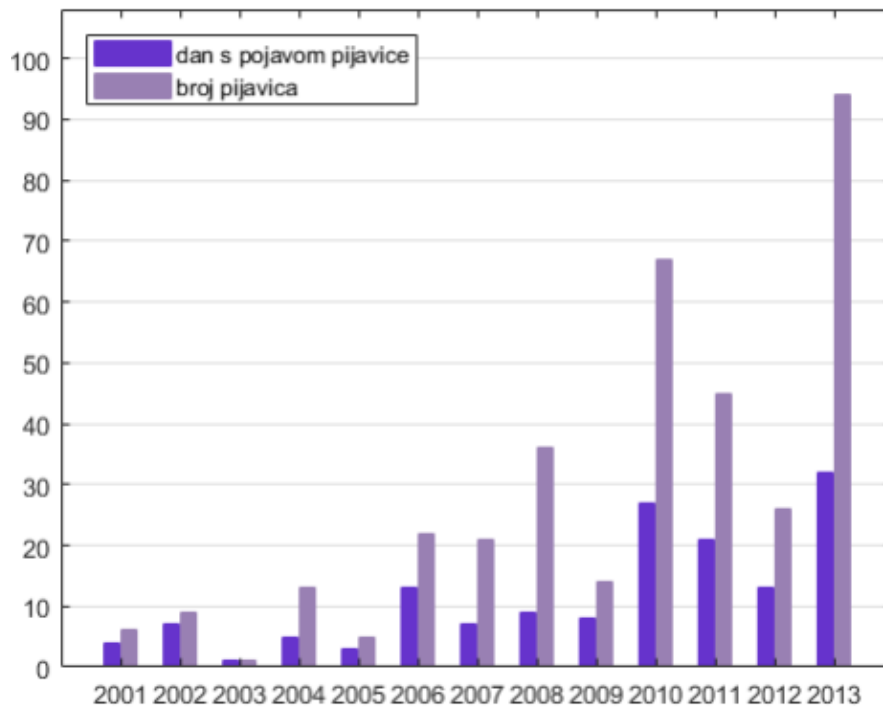
U Sredozemlju se godišnje pojavi oko 120 pijavica, te većinom nastaju u kasnu jesen kad je vodena površina vlažnija i toplija. U Europi se najčešće pojavljuju na Balkanu, jugu Rusije, u Ukrajini i ponekad u srednjoj Europi. [1.p.150.]

U Jadranskom moru, u razdoblju od 2001. do 2013. godine, uočeno je 359 pijavica (Sl. 18), također zabilježen je i njihov porast tokom godina. [38]



Slika 18. Približne lokacije uočenih pijavica u razdoblju 2001.- 2013.

(Renko T., 2018., *Pijavice na Jadranu: učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet)



Slika 19. Broj pijavica i dana s pojavom pijavica duž hrvatske obale Jadranskog mora u razdoblju 2001. – 2013.

(Renko T., 2018., *Pijavice na Jadranu: učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet)

U vrtložna gibanja spadaju i pojave tornada (sl.20) što čini oluje na kopnu i nije tema ovog rada.



Slika 20. Tornado

<https://www.accuweather.com/en/severe-weather/10-tornado-facts-you-might-not-know/350390>

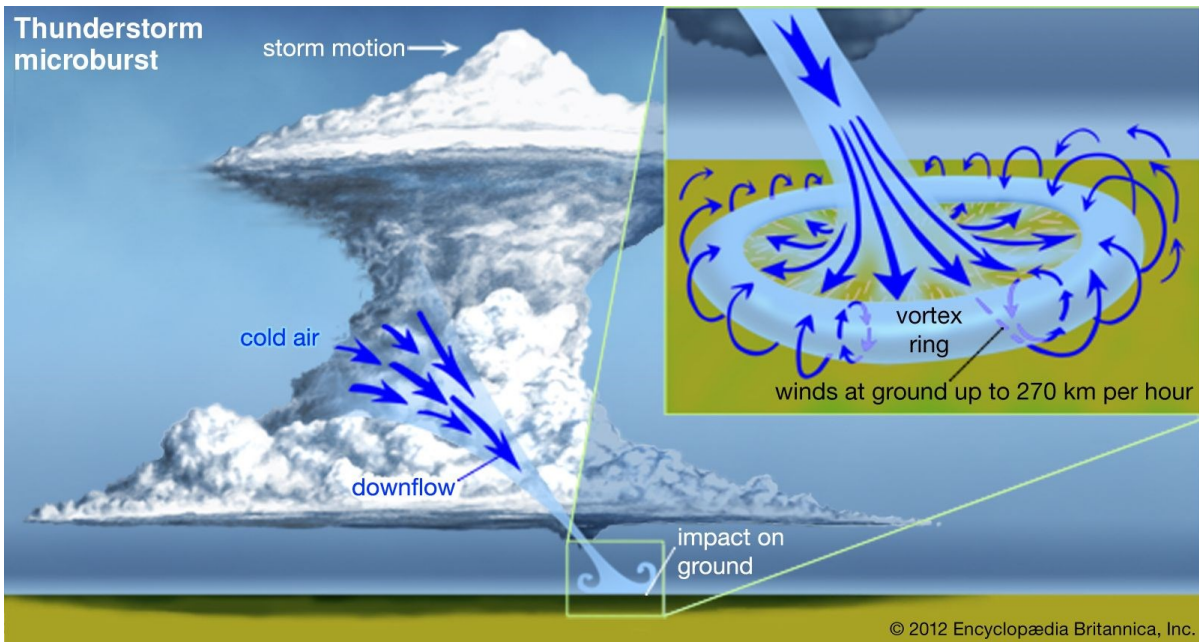
2.3.2. Propad

Iz središta kumulonimbusa ponekad se može javiti intenzivno silazno strujanje hladnog zraka – **propad (downburst)**. Propad manjih razmjera, reda veličine kumulonimbusa, promjera 1 – 4 km, naziva se **mikropropad**. Takvo strujanje zraka ima brzine do 270 km/h. Makropropad je silazno strujanje brzina do 215 km/h i u promjeru veće od 4 km. Traje od 5 minuta do pola sata, a najjači je u prvih 5 minuta kada struja zahvati podlogu. Najjači udari vjetra traju od 2 do 4 minute. Pri Zemljinoj površini silazna struja se razdvaja u dvije grane (dva glavna vrtloga) suprotnog smjera koje mogu izazvati goleme štete. Šteta od propada nad šumom je prikazana na slici 21. Postoji mokri i suhi propad. Kada se oluja formira u mokrom, vlažnom okruženju, propad će biti popraćen intenzivnom oborinom na tlu. Ako se oluja formira u suhom okruženju, uglavnom (cumulus congestus oblaci), oborina ispari prije nego što stigne do tla (virga), a propad na tlo stiže kao suhi zrak. [1.p.311.] Na slici 22 prikazan je prsten kružnog gibanja zraka uz tlo prilikom silaska struje na tlo,



Slika 21. Posljedica propada

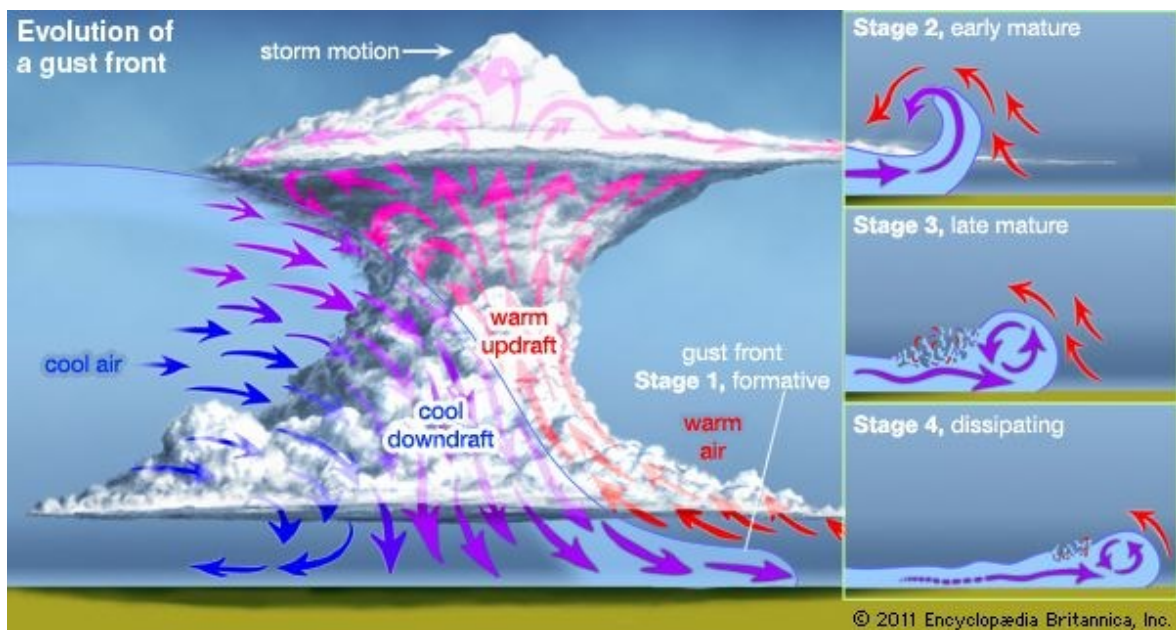
<https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/wind/types/>



Slika 22. Propad i prsten kružnog gibanja pri tlu
<https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Supercell-storms>

2.3.3.1 Udarna fronta

Kao posljedica propada nastaju jaki udari vjetra - **udarne fronte (gust fronts)** koje postižu brzine do 100 km/h pa i do 220 km/h. Javljaju se obično 25 - 35 km ispred razvijenog kumulonimbusa, s izraženim propadom ili ispred olujne pruge. [1.p.150.]



Slika 23. Razvoj udarne fronte
<https://kids.britannica.com/students/assembly/view/19393>

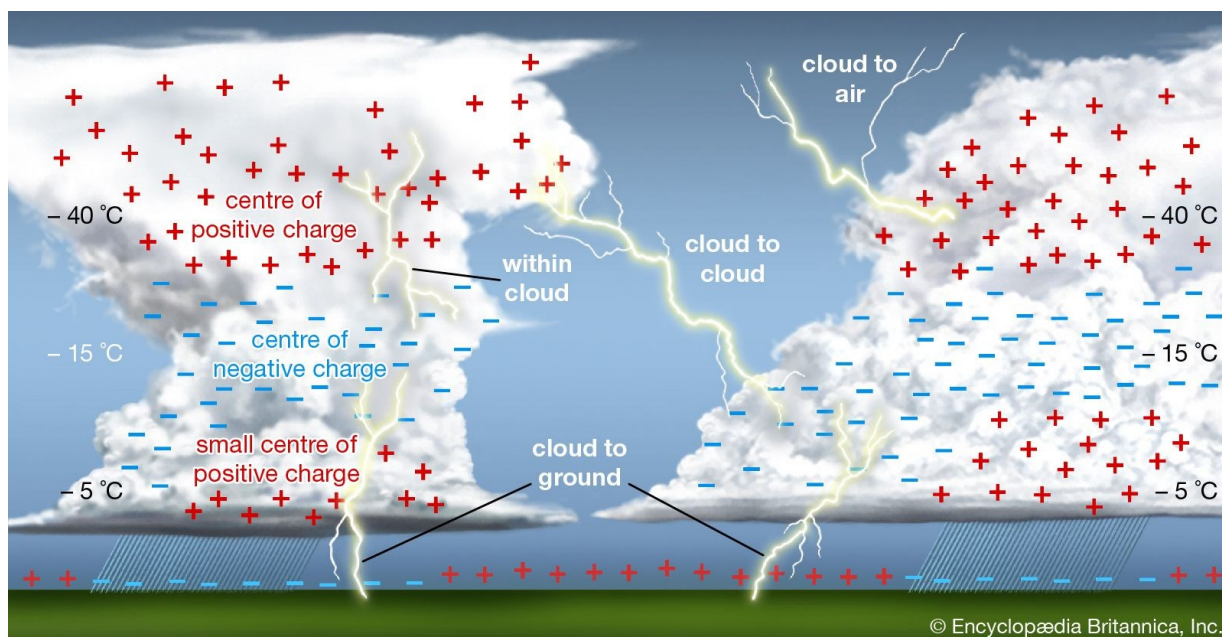
2.4. ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA

2.4.1. Elektrifikacija oblaka

Usljed djelovanja Sunčevog i kozmičkog zračenja, međudjelovanja molekula zraka i raznih procesa prijenosa topline, u atmosferi se stvaraju električno nabijene čestice i električna polja. Za suhog vremena postoje slabe električne struje koje imaju tendenciju kretanja od ionosfere (pozitivan naboj) do Zemljine površine (negativni naboj). U vlažnijim uvjetima jačina električne struje raste. Najveće snage električnih polja javljaju se u kumulonimbusima s pljuskovitim i jakim oborinama. [1. p.312-313]

2.4.1.1. Razdvajanje naboja

Iako se uzroci procesa stvaranja naboja u oblacima još uvijek proučavaju, znanost se uglavnom slaže oko nekih koncepata nastanka. Grmljavina se oluji javlja u središnjem dijelu, u području jakog uzlaznog strujanja, pri temperaturama od -15°C do -25°C . Ondje niske temperature i brze uzlazne zračne struje proizvode.



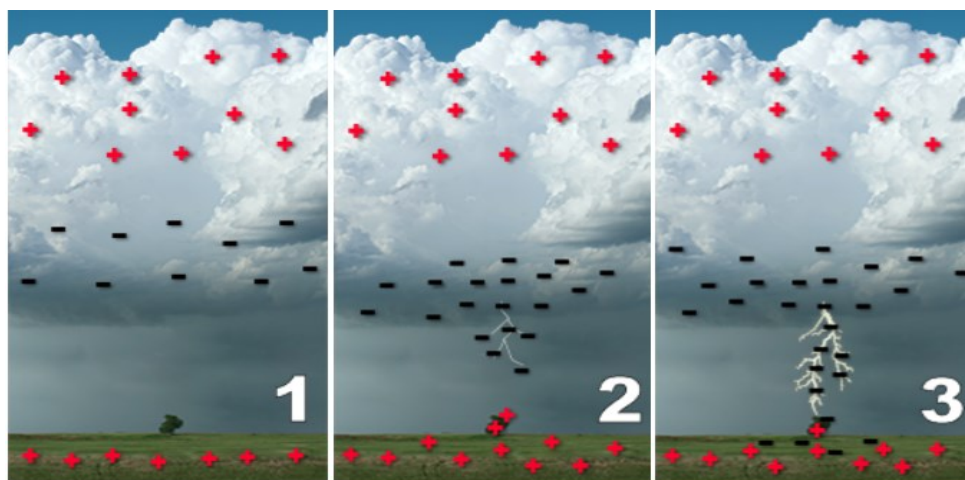
Slika 24. Prikaz dva jednostavna izolirana olujna oblaka (standardni tripolni model) i vrste munja koje nastaju

<https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification>

Pothlađene kapljice vode, manje i veće kristale leda. Uzlazno strujanje nosi te pothlađene kapljice vode i kristaliće leda prema gore. Dok veći kristalići leda ovisno o veličini lebde ili padaju prema dolje. Pri padanju tih oborinskih čestica stvara se sila trenja između zraka i čestica te se javlja **polarizacija električnog naboja**. Molekule vode se polariziraju te krupnije kapljice postaju pozitivnog, a sitnije negativnog naboja. S kristalićima leda situacija je obrnuta, veći kristalići poprimaju negativan, a manji pozitivan naboj. Uzlazna struja odvaja s obzirom na visinu krupnije i teže od sitnijih i lakših naboja. Rezultat je pozitivno nabijen gornji dio olujnog oblaka, a srednji i donji dijelovi postaju negativno nabijeni. Također, donji dio oblaka, ispod područja negativnog, ima i „sekundarni centar“ pozitivnog el. naboja, koji nastaje zbog izbijanja naboja iz Zemljine površine i sudara različitih vrsta oborinskih čestica na temperaturama višim od 0°C. Proces razdvajanja električnog naboja prikazan je na standardnom tripolnom modelu olujnog oblaka (slika 24.) [10]

2.4.2. Stvaranje električnih polja

Kako se pozitivni i negativni naboji u oblaku što više međusobno razdvajaju, količina naboja ostaje sve veća, te se između njih stvara se sve jače električno polje. Granica između pozitivnih viših i negativnih nižih otprilike je na izotermi od -10°C. Atmosfera je vrlo dobar izolator koji sprečava električni tok, tako da se mora skupiti ogromna količina naboja prije nego dođe do pražnjenja naboja iz oblaka. Mora se stvoriti električni put za naboj pa se negativan naboj približava pozitivnom tlu. Kad se naboji sretnu, nastat će električni luk.



Slika 25. Prikaz električnog pražnjenja oblak – Zemljina površina

<https://www.noaa.gov/jetstream/lightning/how-lightning-is-created>

Kad razlika električnog potencijala dovoljno naraste, i pređe kritičnu vrijednost, nastaje **električno pražnjenje – munja**. U vedrom zraku, kritična vrijednost iznosi 3 MV m^{-1} , u oblaku pada na oko 1 MV m^{-1} . Munja sadržava razliku potencijala oko 400 MV m^{-1} . Električno pražnjenje praćeno je svjetlosnim bljeskom ili **sijevanjem** i zvučnim praskom ili **grmljenjem**. Zajednički naziv za ove dvije pojave je **grmljavina**.

2.4.3. Munje

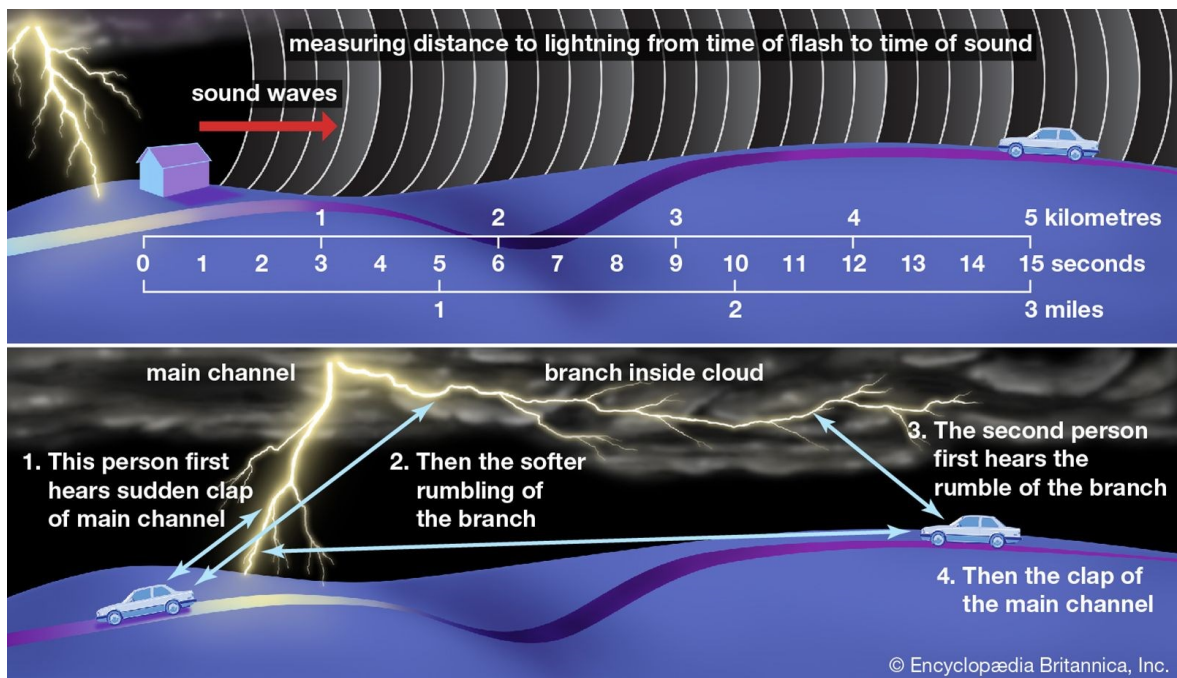
Munja započinje kratkim predpražnjenjem koje stvara kanal pražnjenja (*leader*). Može se javiti unutar oblaka, npr. između vrha i podnice oblaka, između dva oblaka, između oblaka i atmosfere te između oblaka i Zemljine površine. Ako se radi o zadnjem slučaju, pražnjenju između oblaka i Zemljine površine, pojava se naziva **grom**. Munja je razgranata električna iskra promjera od nekoliko do 50 cm, duljine od 2 do 3 km, najviše do 20 km. Nastaje između izoterma 0°C i -8°C a najčešće su na visinama između 300 m i 6 000 m. Električni napon munje je iznimno velik, iznosi i više milijuna volti prosječno oko 10^9V , struje 10 do 110 kA, a trajanje kratkotrajno, od 0,01 s do 2 s.

Grmljenje je zvuk koja slijedi munju. Nastaje naglim širenjem i stezanjem zraka zbog vrlo jakog zagrijavanja unutar kanala, tako tvoreći zvuk sličan eksploziji. Kada dođe do pražnjenja, promatrač će prvo vidjeti bljesak, a zatim i grmljavinu. Razlog leži u puno većoj brzini širenja svjetlosti u odnosu na brzinu širenja zvuka.

Postoji nepisano pravilo ako promatrač broji sekunde između bljeska i grmljavine, a zatim to vrijeme podijeli s 3, može procijeniti na kolikoj se udaljenosti od njega dogodio grom. Naime, procjenjuje se da zvuk za 3 sekunde pređe 1 km. Slika 26. prikazuje širenje zvuka.

Primjer: Brzina zvuka u zraku je 340 m/s te je za put od 1 km potrebno je 2,94 s

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1000 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 2,94 \text{ s}$$



Slika 26. Mjerenje udaljenosti do munje protokom vremena između bljeska i grmljenja

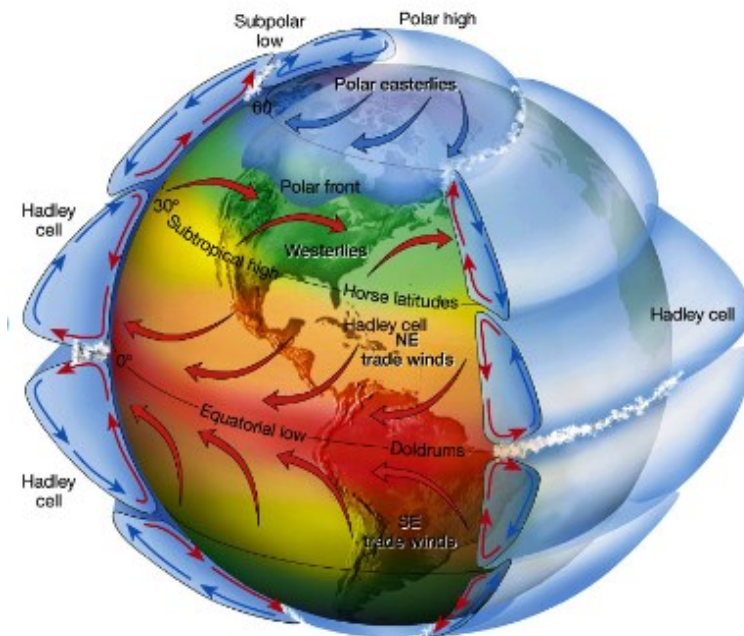
<https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Supercell-storms#ref732804>

3. ATMOSFERSKI ČIMBENICI OLUJA

3.1. POLARNA FRONTA

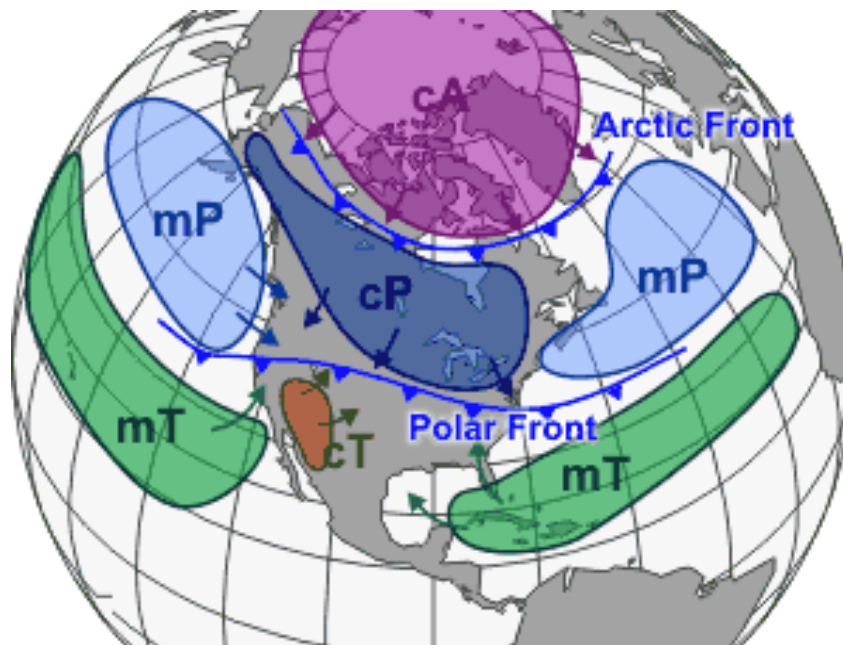
Polarna fronta je spoj između Ferrellovih i Polarnih ćelija - prijelazno područje koje odvaja topliji tropski zrak od hladnijeg polarnog zraka u srednjim geografskim širinama (sl. 27). Ovo područje ima velik temperaturni gradijent, pa stoga služi kao rezervoar potencijalne energije koja se može pretvoriti u kinetičku energiju potrebnu za razvoj izvantropskih ciklona. Polarna fronta nalazi se bliže površini Zemlje, dok iznad nje, na visinama teče polarna mlazna struja. Vremenski uvjeti na mjestu susretanja ove dvije zračne mase vrlo je promjenjivo i utječe na veće dijelove Sjeverne Amerike i Europe (sl. 28).

Teorija polarne fronte nalaže da se ekstratropski cikloni srednje geografske širine formiraju na granicama između toplog i hladnog zraka. O teoriji polarne fronte govorit će se više u poglavlju o ciklogenezi. [34]



Slika 27. Položaj polarne fronte u troćelijskim modelu općeg atmosferskog kruženja (60° N)

<http://www.meteo.psu.edu/wjs1/Meteo3/Html/generalcirc.htm>



Slika 28. Prikaz polarne fronte i zračnih masa s kojima graniči

https://en.wikipedia.org/wiki/Arctic_front

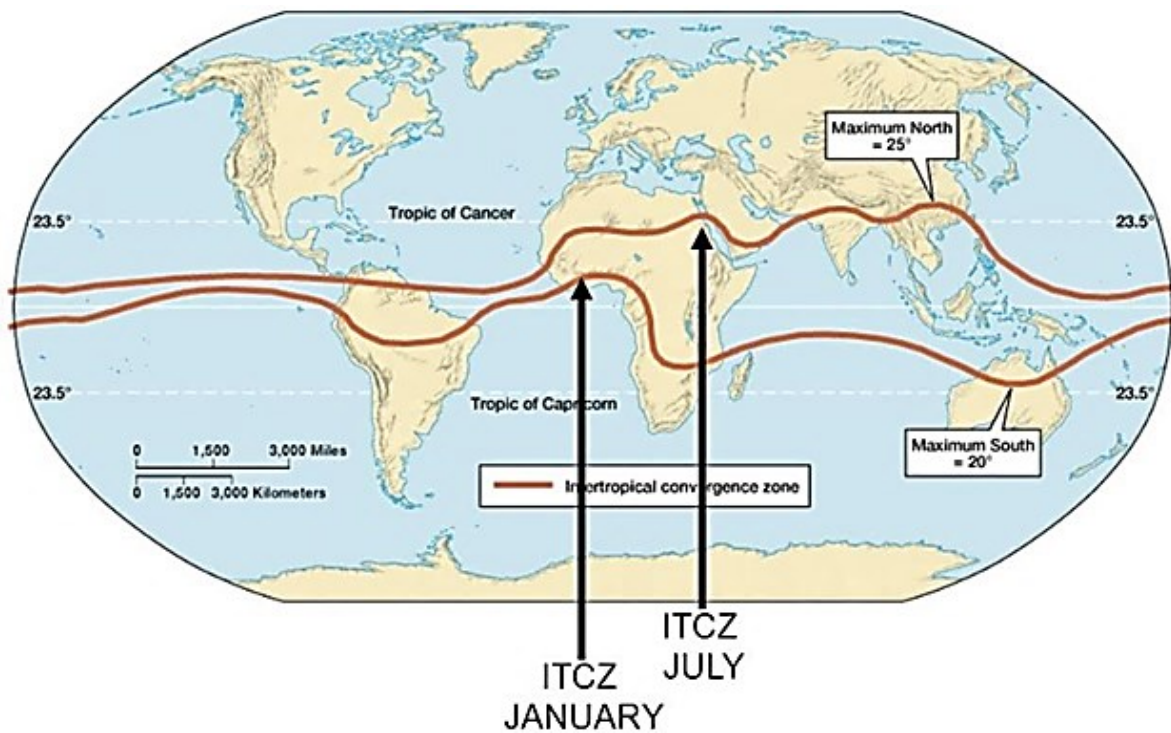
3.2. INTERTROPSKA ZONA KONVERGENCIJE

Na otprilike 5° N/S, za područja iznad mora, pasati se spuštaju i konvergiraju, tvoreći zonu konstantnog niskog tlaka još nazvanu **Intertropska zona konvergencije (Inter-Tropical Convergence Zone - ITCZ)**. Karakteriziraju je konstantni i snažni procesi konvekcije, stvarajući intenzivne i velike grmljavinske oluje nad velikim područjima. ITCZ zona mijenja svoj položaj tijekom godine, i to značajnije iznad kopna jer se brže zagrijava, a stalnija je iznad morskih površina. Na satelitskim snimkama (Slika 29.) vidljiva je kao pojas bijelih oblaka (kroz središte slike). Upravo je ta zona kolijevka većine razornih tropskih oluja. [16]



Slika 29. Satelitska snimka ITZC

<https://skybrary.aero/articles/inter-tropical-convergence-zone-itcz>



Slika 30. Položaj ITCZ u siječnju i srpnju

<https://siddhartha01writes.medium.com/intertropical-convergence-zone-itcz-7de592bbd7ef>

3.3. ZRAČNE MASE I ATMOSFERSKE FRONTE

Zbog lakšeg razumijevanja nastanka oluja bitno je spomenuti kako zračne mase i atmosferske fronte utječu na olujnih pojava.

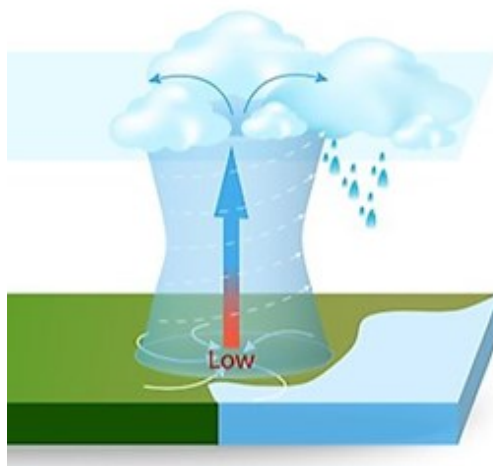
Na području ekvatora nalaze uglavnom samo maritimne ekvatorijalne zračne mase, mase vlažnog i toplog zraka koji je preduvjet za stvaranje tropskih ciklona. U srednjim geografskim širinama dolazi do susretanja morskih tropskih i morskih polarnih masa, odnosno područja susretanja hladnog i toplog zraka. Zbog tih procesa ova su područja kolijevke ciklona umjerenih geografskih širina.

Kao ključni elementi u dinamici atmosferskih sustava, atmosferske fronte označavaju područja susretanja zračnih masa s različitim svojstvima, kao što su temperatura, vlažnost, stabilnost i gustoća zraka.

Hladna Fronta uzrokuje brzo vertikalno uzdizanje zraka, samim time i stvaranje oblaka i intenzivnih oborina. Nakon prolaska fronte dolazi period snižene temperature i manje vlažnog zraka. **Topla fronta** nastaje na granici tople zračne mase, koja kada stigne u dodir s hladnom također rezultira formiranjem oblaka i oborina. Ona često donosi dugotrajne, obično manje intenzivne oborine te vlažni zrak. **Okludirana fronta** dovodi do podizanja tople zračne mase iznad dvije hladnije zračne mase te nastaje kao završna faza razvoja ciklone. **Stacionarna fronta**, zbog stagnacije zračnih masa iznad nekog područja može rezultirati dugotrajnim oborinama duž fronte, često u obliku slojevitih oblaka. [1.p.242.]

3.4. CIKLONE I ANTICIKLONE

Ciklona (sl. 31) se definira kao zračni vrtlog niskog tlaka, nižeg od 1013 hPa. Karakterizira je stalno vrtložno strujanje zraka gdje fronta hladne stabilne zračne mase dostiže frontu toplog i nestabilnog zraka. Zbog značajnih temperaturnih razlika, najviše na frontama, u cikloni se kondenziraju velike količine vlage, te nastaju jake naoblake i padaline. Zbog Coriolisove sile, na sjevernoj hemisferi zrak se u cikloni kreće protusatno, a na južnoj satno. Brzina kretanja ciklonalnog sustava može doseći i 60 čvorova. Proces nastanka ciklone, **ciklogeneza** opisan je u poglavlju 6. Ekstratropske oluje.



Slika 31. Ciklona

<https://www.worldatlas.com/articles/what-is-an-anticyclone.html>

Anticiklone su područja visokog tlaka u kojima zrak divergencijom silazi i pripisuje im se uglavnom lijepo i stabilno vrijeme pa nisu tema ovoga rada.

Ocean je burna prirodna sila, sposobna stvoriti oluje neobuzdanih snaga. Razlika tlakova stoji kao glavni čimbenik za nastanak oluje, no postoji još neophodnih sastojaka o kojima će se nadalje pričati. Oceanske oluje klasificiraju se prema intenzitetu i trajanju, što omogućuje učinkovitije praćenje i kategorizaciju. Najintenzivnije, najveće i najpoznatije oluje nastaju u toplim tropskim područjima, i to su tropski cikloni gdje se zbog naglih promjena tlakova stvaraju izraziti vjetrovi. Također, izvantropske oluje (ciklone srednjih širina), iako rijetko postižu snage vjetra usporedivu s tropskim ciklonima, imaju često mnogo rašireniji utjecaj, utječući na dijelove obala dužina i do 1500 kilometara.

Oluju, kao grmljavinsku nepogodu, uz jaki razvoj konvekcijske naoblake, prate nagle promjene temperature i tlaka zraka, jaki udari vjetra, jaka uzlazna, silazna i vrtložna strujanja zraka, pljuskovite oborine, tuča i smanjena vidljivost, električna pražnjenja te druge pojave kao npr. turbulencije, zaleđivanje i razne oceanske pojave, zbog čega je plovidba znatno ugrožena te se izdaju posebna upozorenja. [1.p.490.]

Oluje nastale unutar zračnih masa su razbacane, a frontalne oluje protežu se u prugama ponekad dugim stotinama kilometara i teško ih je zaobići. Na toplijim morima i oceanima javljaju se olujne pruge i vrtložni vjetrovni sustavi - pijavice, dok se tornado pojavljuje uglavnom na kopnu i ugrožava promet unutarnjim vodama. Olujni procesi na kontinentu i unutarnjim vodama stvaraju se uglavnom u poslijepodnevnim satima, a na moru većinom tijekom noći ili jutra. [1.p.490.]

Poteškoće uzrokovane olujom za posadu i brod vrlo su velike, a geografska širina na kojoj se oluja javlja određuje kakvi će se uvjeti stvarati. U visokim širinama, uz pojavu jakog vjetra, niske naoblake s oborinama (obično snijeg), loše vidljivosti (manje od 0,5 NM) i niskih temperatura, javljaju se dodatne oceanske pojave kao visoki valovi (vjetrovni ili valovi mrtvog mora) te led na moru i advekcijske magle koje mogu sakrivati ledenjake.

U nižim širinama situacija je drugačija u pogledu ciklonalne opasnosti. Osnovna razlika u odnosu na visoke geografske širine je što nema leda na moru. No pojava ciklona stvara najveću prijetnju i opasnost za plovidbu, te ga treba izbjegavati koliko god je moguće, ili, u nemogućnosti izbjegavanja poduzeti odgovarajuće sigurnosne postupke. [1.p.490.]

4. EKSTRATROPSKE OLUJE

4.1. CIKLONE UMJERENIH ŠIRINA

Ciklone su važne za opće atmosfersko kruženje jer služe kao mehanizam za prijenos energije kroz umjereni pojas. Zbog toga se smatraju jednim od glavnih klimatskih karakteristika umjerenoga pojasa.

Ciklone umjerenih širina još se nazivaju i izvantropske ciklone, umjerene ciklone, frontalne ciklone i valne ciklone. Nazivi su također ponekad složeni s obzirom na podrijetlo prevladavajućih vjetrova u oluji: **Nor'easter** (Northeasters, sjeveroistočni vjetar) ili **So'easter** (Southeasters, jugoistočni vjetar). Javljaju se na 35°- 65° geografske širine na obje hemisfere i povezane su s obilnim padalinama, snažnim vjetrovima i velikom razinom mora i valova. Obično nastaju iznad oceanskog bazena u blizini gornjih troposferskih mlaznih struja, pretvorbom iz tropskih u ekstrasropske ciklone ili kao rezultat strujanja preko planina. [35]

4.2. CIKLOGENEZA

Ciklona se najbolje razvija nad morima i oceanima srednjih širina. Zbog utjecaja reljefa na kopnu pojedine faze razvoja se ne mogu ostvariti. Ciklone se najčešće kreću istočno, brzinom od 30 do 40 km/h, no brzine mogu biti mnogo veće, osobito u prvom stadiju razvoja (80 do 100 km/h).

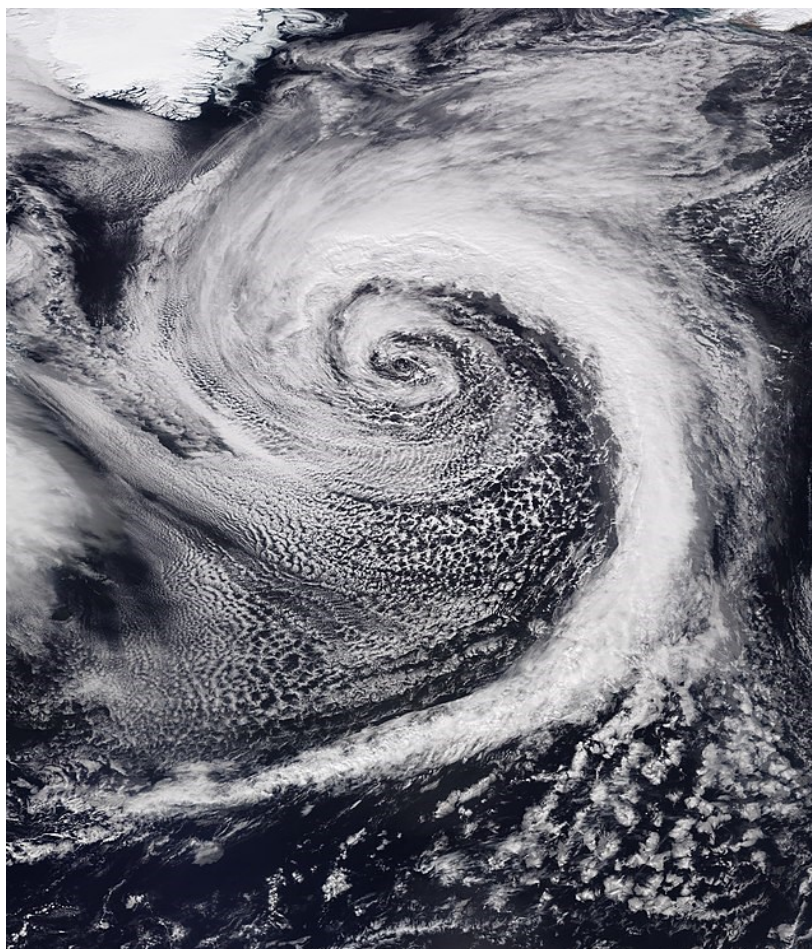
Ciklone se mogu razviti na razne načine. Razvitak se najviše veže uz frontalne poremećaje, no ciklone se stvaraju i u područjima gdje se fronte nisu razvile (nefrontalna ciklona), također ciklone se ne razvijaju samo u prizemlju već i u višim slojevima troposfere.

Ciklogeneza frontalne ciklone se temelji na Teoriji polarnog vala, norveškog fizičara J. Bjerknesa(1918.). „*Ciklona se proučava kao nestabilni val u **polarnoj fronti**, odnosno poremećaj čija se amplituda vremenom povećava.*“ [1.p.260.] Odnosno, ciklona nastaje kao nastavak odvajanja Rossbyjevog vala.

4.3. INTENZITET I VELIČINA CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA

Ciklone umjerenih širina su asimetrične i imaju oblik obrnutog slova "V". Protežu se oko 500 do 600 km, a iznad Sjeverne Amerike mogu se protezati i više od 2000 km u širinu. Visine su od 8 do 11 km.

Izvantrropske ciklone (sl. 32) mogu donijeti blago vrijeme s malo kiše i površinskim vjetrovima od 15-30 km/h, ili mogu biti hladne i opasne s olujnom kišom i vjetrovima većim od 119 km/h. Obale duž Sjevernog i Srednjeg Atlantika mogu doživjeti više od 20 izvantrropskih oluja svake godine. Ove zimske vremenske prilike poznate su po tome što proizvode jak snijeg, kišu i goleme valove koji se obrušavaju na atlantske plaže i često uzrokuju eroziju plaža i strukturna oštećenja. Često prije nego što se plaža oporavi od izvantrropske oluje, udarit će još jedna. [35]

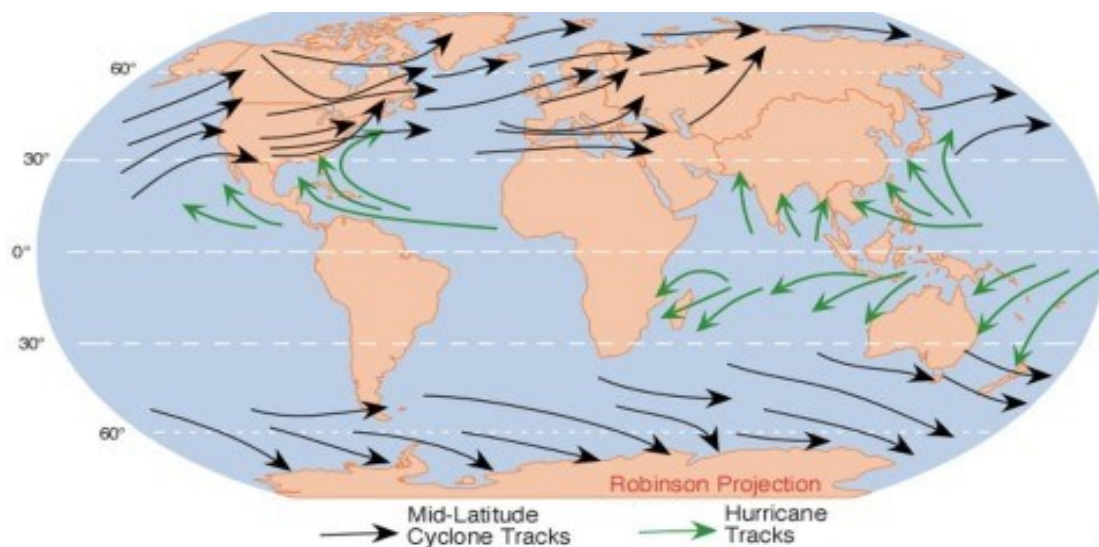


Slika 32. Satelitska snimka ciklone umjerenih širina
https://en.wikipedia.org/wiki/Extratropical_cyclone

Slika 32. prikazuje satelitsku snimku ekstrasropske ciklone. Ciklogenetski procesi ne mogu se najbolje vidjeti i objasniti na realnom prikazu jer svaka oluja ima svoje varijacije. Vidljiv je spiralni oblik. Najdeblja spirala je područje toplog zraka, iza kojeg se vidi priljev hladnog zraka iz gornjeg lijevog ugla. Točkasta i isprekidana naoblaka u sektoru između su zasebni kumulonibusi, područja lokaliziranih oluja.

4.4. SEZONE I PODRUČJA NASTANKA CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA

Izvantropske ciklone, zbog najvećih temperaturnih razlika, najčešće se javljaju zimi, u kasnu jesen i rano proljeće. Tijekom ljeta, staze ciklona pomiču se prema sjeveru. Putanje su zabilježene i izvan 65° N/S na obje hemisfere. Javljaju se u SAD-u i Kanadi, u pojasu koji se proteže od Islanda do Barentsovog mora i nastavlja preko Rusije i Sibira, nad Baltičkim morem, u Sredozemnom bazenu koji se proteže do Rusije, čak i do Indije zimi i u područjima antarktičke frontalne zone (sl. 33). [35]

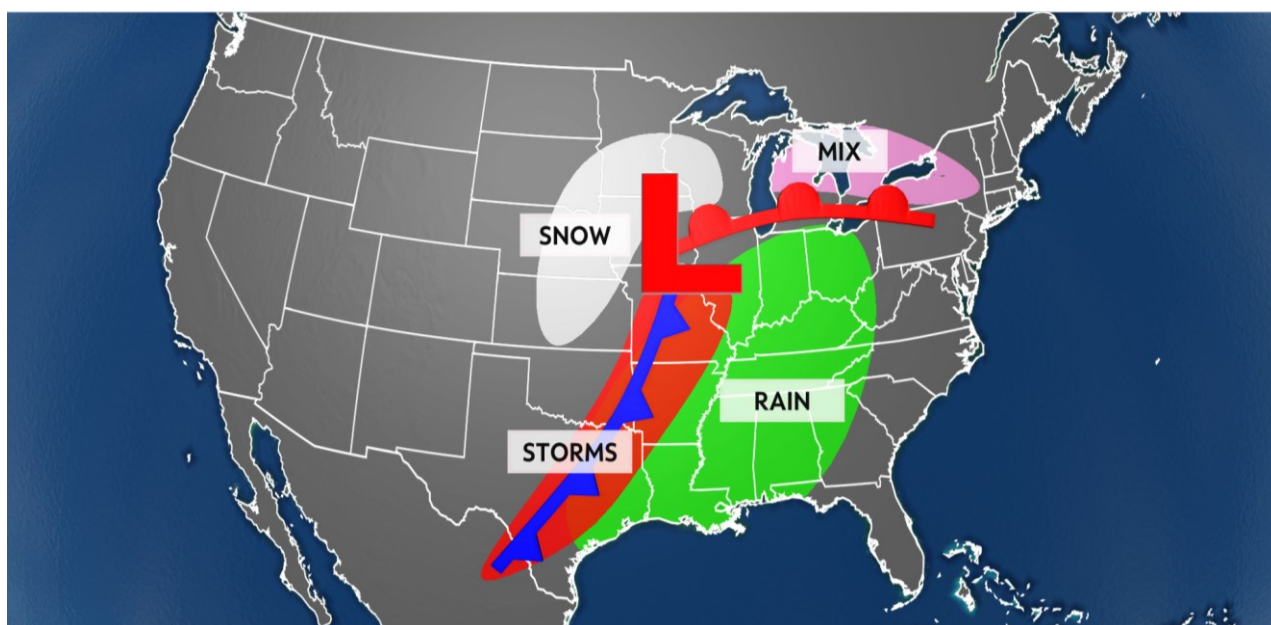


Slika 33. Područja javljanja ciklona umjerenih širina

<https://www.pmfias.com/temperate-cyclones-extra-tropical-cyclones-mid-latitude-cyclones-frontal-cyclones-geography-upsc-ias>

4.5. VREMENSKI UVJETI KOD CIKLONA UMJERENIH ŠIRINA

Približavanje umjerene ciklone obilježeno je padom temperature, padom tlaka, promjenama brzine i smjera vjetra i aureolom oko Sunca i Mjeseca te tankim velom cirusnih oblaka. Nadalje, nastaje lagana rosulja koja prelazi u jak pljusak. Ti se uvjeti mijenjaju dolaskom tople fronte koja zaustavlja pad tlaka i slijedi porast temperature. Oborine prestaju i prevladava vedro vrijeme do dolaska hladne fronte anticiklonalnog karaktera koja uzrokuje pad temperature, donosi naoblaku i oborine s grmljavinom. Nakon toga, ponovo dolazi vedro vrijeme. Umjerene ciklone stvaraju više oborina kada se kreću sporije i postoji velika razlika u količini oborina i temperaturi između prednjeg i stražnjeg dijela ciklone. Umjerene ciklone uglavnom su praćene anticiklonama. [35]



Slika 34. Zone padalina u cikloni umjerenih širina

<https://spectrumnews1.com/ky/louisville/weather/2020/11/08/the-formation-of-mid-latitude-cyclones-explained>

5. OLUJE U TROPIMA

Tropske oluje su brzo rotirajuće oluje koje se stvaraju iznad toplih tropskih oceana (uglavnom sjeverno i južno između 5° i 30° odakle koriste energiju za razvoj, a u središtu je niski tlak. Promjer potpuno razvijenih oluja (cikloni) obično iznosi oko 200 do 500 km, pa čak do 1000 ili više km. Tropska oluja donosi vrlo jake vjetrove, jake kiše, visoke olujne valove i obalne poplave. Razorna snaga povećava se s jačinom oluje. Vjetrovi pušu protusatno na sjevernoj hemisferi i u satno na južnoj hemisferi. [20]

Tropske oluje World Meteorological Organization (WMO) kategorizira po jačini vjetra i to redom:

Tablica 1. Kategorizacija tropskih oluja po jačini vjetra

KATEGORIJE TROPSKIH OLUJA	j / Bf	v / kn	v / (km/h)
Tropska depresija	< 7	28-33	51-61
Tropska oluja	8 – 9	34 – 47	63 – 88
Jaka tropska oluja	10 – 11	48 – 63	89 – 117
Tropski ciklon	≥ 12	≥64	≥118

Izvor: pripremio student prema podacima Svjetske meteorološke organizacije
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-riskreduction/tropical-cyclones>

Tropski cikloni iznad određene jačine dobivaju imena zbog interesa javne sigurnosti, odnosno lakšeg praćenja.

Saffir-Simpsonova skala razvrstava tropske ciklone u pet kategorija (1-5) na temelju maksimalne stalne brzine vjetra. Veliki cikloni (koji se nazivaju i intenzivni cikloni) spadaju u kategorije 3, 4 i 5 na ljestvici. Superciklon doseže kategoriju 4 ili 5 na Saffir-Simpsonovoj ljestvici:

Tablica 2. Kategorizacija tropskih ciklona po Saffir-Simpsonovoj ljestvici

KATEGORIJA	ŠTETA	BRZINA VJETRA	TLAK ZRAKA	UČINAK
1	Opasne štete	33-42 m/s 64-82 kn 119-153 km/h	oko 980 hPa	Ciklon oštećuje krovove kuća i njihovih konstrukcija, lomi grane i čupa stabla s plitkim korijenjem, oštećuje dalekovode
2	Iznimne štete	43-49 m/s 154-177 km/h 83-95 kn	979-965 hPa	Ciklon značajno ošteće zgrade, čupa veća stabla na mnogo većim područjima i uništava električne mreže
3	Razorne štete	50—58 m/s 178-208 km/h 96-112 kn	964-945 hPa	Ciklon skida krovove s kuća i uzrokuje druga strukturalna oštećenja zgrada, čupa stabla i blokira ceste, oštećeni ili uništeni dalekovodi
4	Katastrofalna oštećenja	58-70 m/s 209-251 km/h 113-136 kn	944-920 hPa	Ciklon ozbiljno oštećuje kuće, gubitak velikog dijela strukture (krov, zidovi), čupa stabla, ruši strujne stupove
5	Katastrofalna oštećenja	70+ m/s 252+ km/h 137+ kn	Ispod 920 hPa	Ciklon u potpunosti uništava velik broj kuća, lomi i pomiče drveće te uzrokuje potpuni gubitak električne energije i mreže

Izvor: pripremio student prema podacima Windy.com i NOAA

<https://windy.app/blog/saffir-simpson-hurricane-wind-scale.html>

U sljedećim poglavljima pojedinačno će se razmotriti osnovne karakteristike tropskih oluja, odnosno stadiji razvoja od najslabijih poremećaja do najjačih ciklona. Oluja dobiva naziv ciklon tek kada postigne određenu brzinu vjetra (64 čvora).



Slika 35. Vrste tropskih oluja

<https://www.gpb.org/blogs/talking-storm/2012/05/28/tropical-disturbances-depressions-and-storms-oh-my>

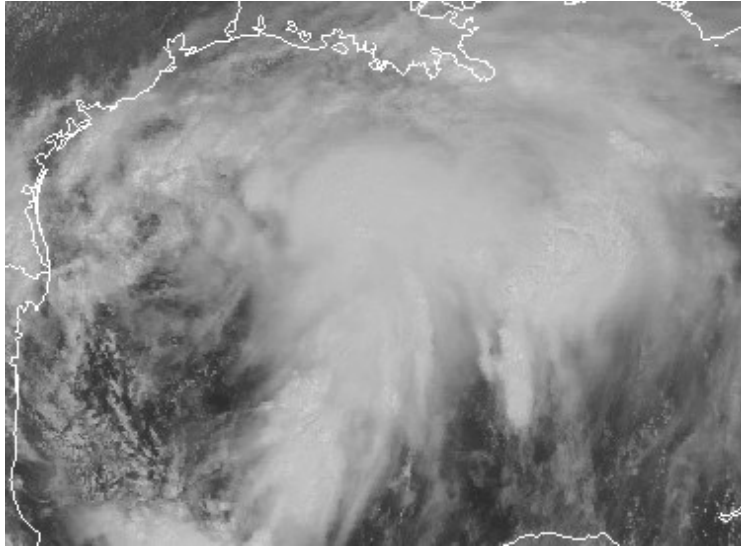
5.1. RAZVOJ I DEFINICIJE TROPSKIH CIKLONA

5.1.1. Tropski poremećaj

Kao prva faza razvoja tropske oluje javlja se **tropski poremećaj (Tropical Disturbance)**, sustav organizirane konvekcije, općenito 160 – 500 km u promjeru. Ne spada u kategorije tropskih oluja jer je zbog nestalnosti zraka onemogućeno stvaranje vrtložnog gibanja. Potječe iz tropskih ili subtropskih područja, Razvija se bez hladne fronte, koja odlikuje ciklone srednjih širina. Traju 24 sata ili više. Vjetrovi nisu jaki i nema zatvorenih izobara kao kod jačih tropskih oluja. Na radarskim snimkama tropski poremećaji izgledaju kao neorganizirani klasteri olujnih oblaka. Ovisno o atmosferskim uvjetima, poremećaji mogu oslabiti ili pojačati i konačno prerasti u tropsku depresiju. [17.p.503.] [18]

5.1.2. Tropska depresija

U sljedećoj fazi, poremećaj postaje **tropska depresija (Tropical Depression)**. Karakterizira je jedna ili više zatvorenih izobara i vidljivo vrtložno gibanje na površini. Na satelitskim snimkama vidljivo je kako kod tropskih depresija postoji određena količina organizacije. Umjesto spiralnog izgleda sličnog ciklonima, tropske depresije izgledaju kao pojedinačne grmljavinske oluje grupirane u klastere (slika 36.). Najveća stalna brzina površinskog vjetra je 33 čvora. Ako se uvjeti zadovolje, depresija može prerasti u tropsku oluju. [18]



Slika 36. Tropska depresija

[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/hurr/stages/td.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/hurr/stages/td.rxml)

5.1.3. Tropska oluja

Tropska oluja definirana je kao oluja u kojoj se najveća stalna brzina površinskog vjetra (američki standard mjerenja od 1 minute) kreće između 34 do 63 čvora. Atmosferski tlak u središtu pada na 998-1 000 hPa. Tropska oluja, pri ovim brzinama vjetra poprima jasno vidljiv ciklonski oblik, s većom organizacijom naoblake i znatnim oborinama. Iako još uvijek nisu cikloni, tropske oluje mogu prouzrokovati razorne učinke i štete na kopnu upravo zbog obilnih oborina, jakih vjetrova i poplava koje prouzrokuju. [18]

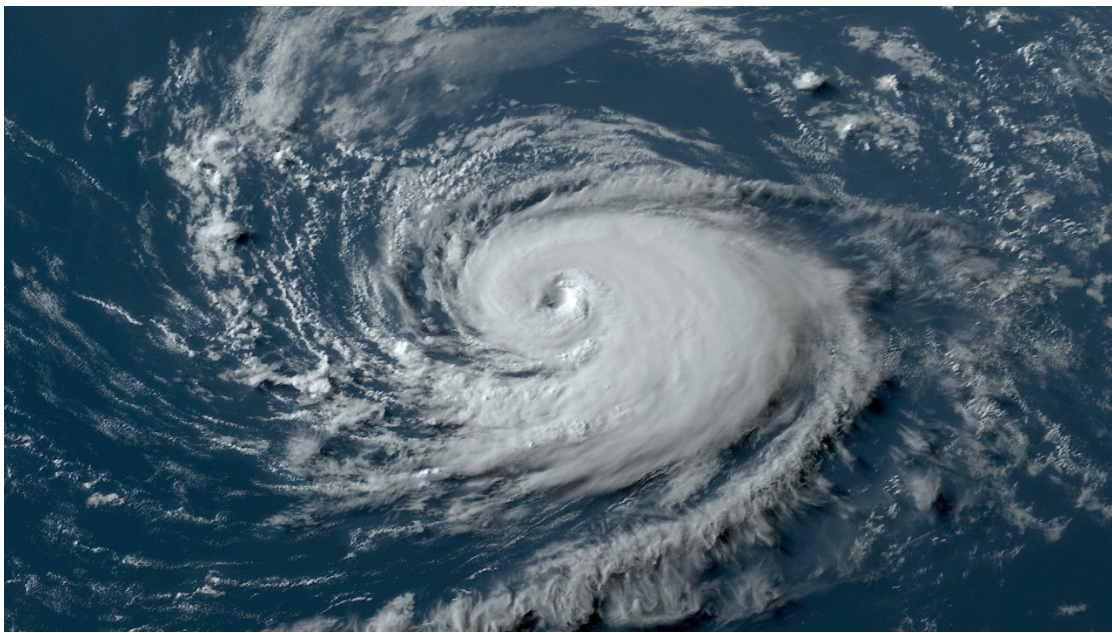


Slika 37. Tropska oluja Hilary, 16. kolovoza 2023.

<https://www.eastbaytimes.com/2023/08/17/storm-hilary-threatens-to-strike-southern-california-next-week/>

5.1.4. Tropski ciklon

Konačno, atmosferski tlak nastavlja padati, stigne na otprilike 980 hPa, vjetrovi pojačavaju, a tropska oluja postaje **tropski ciklon**. Granica između tropske oluje i ciklona je kada trajna brzina vjetra postigne 64 čvora, a izobare su brojne, uske i zatvorene. Oko jezgre razvija se izražena rotacija, ta jezgra (ciklonsko oko) ujedno je i glavna karakteristika ciklona. Ove oluje mogu proizvesti opasne vjetrove, jake kiše i poplave, što sve može dovesti do ogromne materijalne štete i gubitaka života. „Tijekom proteklih 50 godina, 1 942 katastrofe pripisane su tropskim ciklonima, koji su ubili 779 324 ljudi i prouzročili 1 407,6 milijardi američkih dolara ekonomskih gubitaka – u prosjeku 43 smrtna slučaja i 78 milijuna američkih dolara štete svaki dan.“ [19]



Slika 38. Satelitska slika uragana Don, 22. srpnja 2023.

<https://www.noaa.gov/news-release/noaa-forecasters-increase-atlantic-hurricane-season-prediction-to-above-normal>

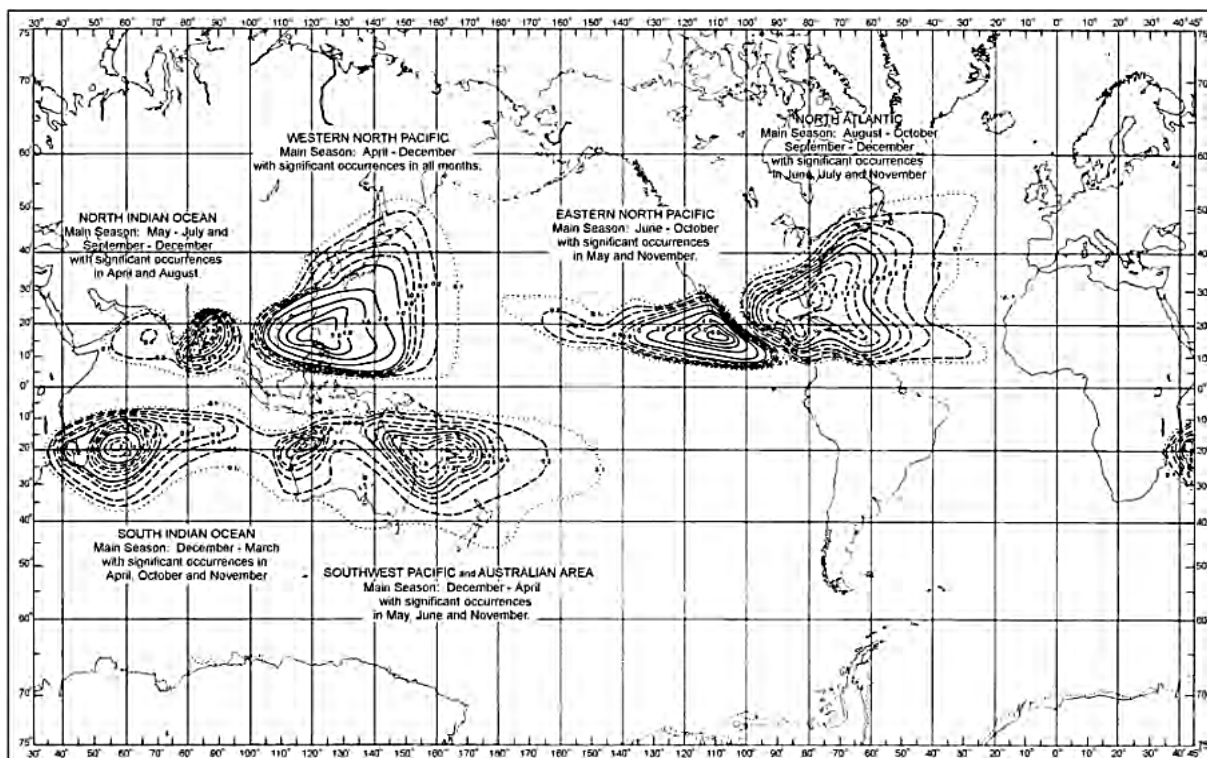
5.2. PODJELA, PODRUČJA DJELOVANJA I SEZONE CIKLONA

5.2.1. Podjela i područja djelovanja ciklona

Tropski cikloni javljaju se na šest područja na Zemlji, četiri na sjevernoj hemisferi i dva na južnoj hemisferi, kao što je prikazano na slici 39. Nazivi po kojima su tropski cikloni poznati variraju s područjem:

- **Uragan** – Sjeverni Atlantik, Karipsko more, Meksički zaljev, istočni i središnji Tih ocean
- **Tajfun** – zapadni Tih ocean, Žuto more, istočno i južno Kinesko more
- **Ciklon** – Indijski ocean
- **Orkane** – Madagaskar, Mauricijus
- **Baguio** - Filipini
- **Cordonazo** – Meksiko
- **Taino** - Haiti
- **Willywily** - Australija

Tropski cikloni nisu uočeni na jugu Atlantika ili u Južnom Pacifiku istočno od 140° W. [17]



Slika 39. Regije u kojima se pojavljuju tropski cikloni

(Bowditch N., LL.D., 2002., *The American practical navigator, an epitome of navigation*, National imagery and mapping agency, Bethesda, Maryland)

U svijetu se u prosjeku godišnje pojavi oko 40 silovitih tropskih oluja i oko 40 tropskih ciklona orkanske jačine. Broj tropskih ciklona mijenja se iz godine u godinu, bez posebnog uzorka. Najviše ciklona javlja se u ljetnim mjesecima, a iznimka je sjeverni Indijski ocean, gdje se cikloni uglavnom javljaju prije i poslije ljetnog monsuna. Cikloni se javljaju na zemljopisnim širinama od 5° do 30° N te na istim širinama na južnoj hemisferi.

Većina razvijenih ciklona nastaje na sjevernoj polutki (72%):

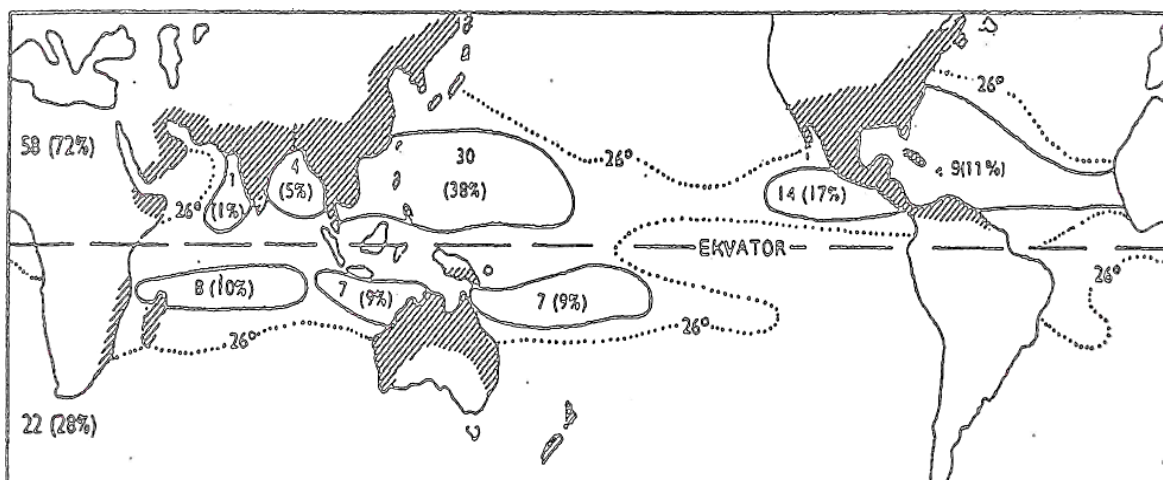
- zapadni sjeverni Tih ocean (istočnoazijska mora) (38% ciklona)
- istočni sjeverni Tih ocean (17% ciklona)
- Sjeverni Atlantik (11% ciklona)
- Bengalski zaljev (5% ciklona)
- Arapsko more (1% ciklona)

Na južnoj polutki brojnost ciklona je manja (28%):

- zapadni južni Indijski ocean (otočje Mauricijus) (10% ciklona)
- istočni južni Indijski ocean (9% ciklona)
- zapadni južni Tih ocean (9% ciklona)

Razlozi manjeg broja ciklona na južnoj polutki su:

1. sjeverniji položaj intertropske zone konvergencije (na južnom Atlantiku)
2. jaka uspravna smicanja zraka (južni Atlantik, južni Tih ocean)
3. niže temperature oceana (južni Tih ocean istočno od 140° W)



Slika 40. Područja i učestalost ciklona, broj i postotak. Kopna zahvaćena ciklonama su šrafirana. Izoterma temperature mora 26 C, točkasto

(Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

5.2.2. Sezone ciklona

Sezone ciklona prikazane su u tablici 3. Uvidom u tablicu vidljivo je da su sezone različite na različitim dijelovima oceana te da nema pravila upravo iz razloga što je nekoliko parametara uzrok nastanku ciklona, a ne samo povoljna temperatura mora.

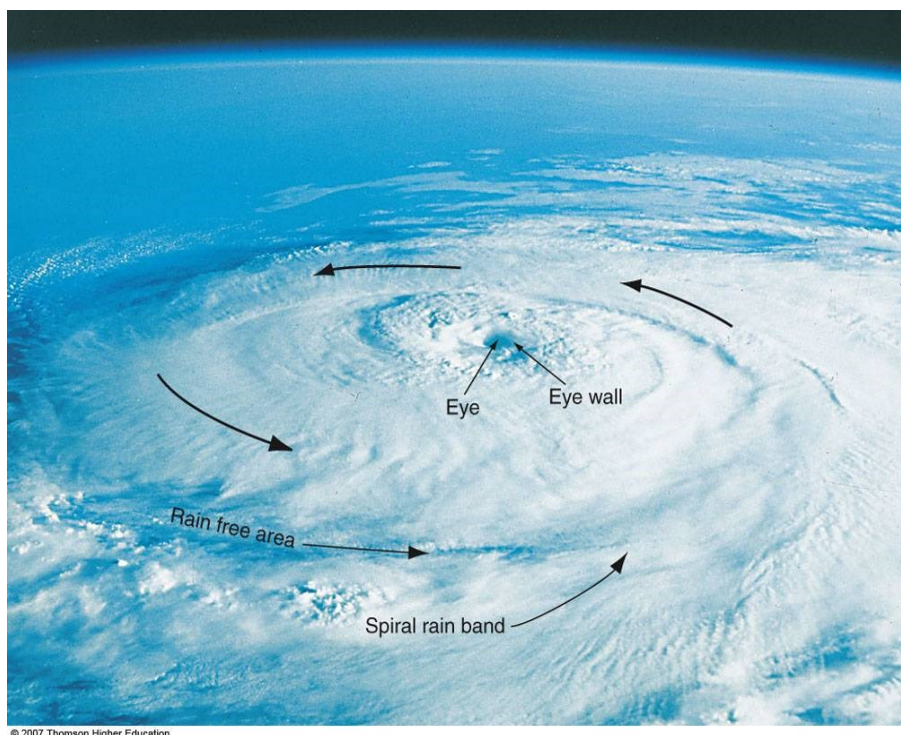
Tablica 3. Nomenklatura i sezone ciklona po regijama

Regija	Lokalni naziv	Sezona	Najgori mjeseci *po brzini vjetra*
Sjeverni Atlantik	Uragan	Od lipnja do studenog	Rujan
Južni Atlantik	Izrazito rijetko		
Arapsko more	Ciklon	Od travnja do srpnja i Od rujna do siječnja	Promjena monsunu: svibanj i lipanj, listopad i studeni
Bengalski zaljev	Ciklon	Od travnja do prosinca, ali su zabilježeni u svim mjesecima	Lipanj, srpanj, listopad i studeni
Sjeverni zapadni Pacifik i Kinesko more	Tajfun (Baguios na Filipinima)	Svi mjeseci (uglavnom od srpnja do studenog)	Srpanj, kolovoz i rujan
Sjeverni istočni Pacifik	Uragan	Od lipnja do studenog	Rujan
Zapadni južni Pacifik	Uragan	Od prosinca do travnja	Siječanj, veljača i ožujak
Južni Indijski ocean	Ciklon	Od studenog do travnja	Siječanj i veljača
Sjeverozapad Australije	Ciklon/Willy Willy	Od prosinca do travnja	Siječanj i veljača

Izvor: Izradio student prema podacima iz izvora: (Cornish M., Ives E., 2009., *Reeds Maritime Meteorology, 3rd edition*, Adlard Coles Nautical, London)

5.3. ANATOMIJA CIKLONA

Ciklon je intenzivna oluja tropskog podrijetla, s trajnim vjetrovima bržim od 64 čvora. Širine su u prosjeku 500 km - 600 km, ali moguće i do 1000 ili više km. U središtu su vidljivi isprekidani oblaci – **ciklonsko oko (Eye)** koje može biti širine 8 - 200 km. U oku ciklona je mirno vrijeme, uglavnom slabi vjetrovi, a naoblaka je isprekidana. Površinski tlak je vrlo nizak, oko 980 hPa pa do 920 hPa.



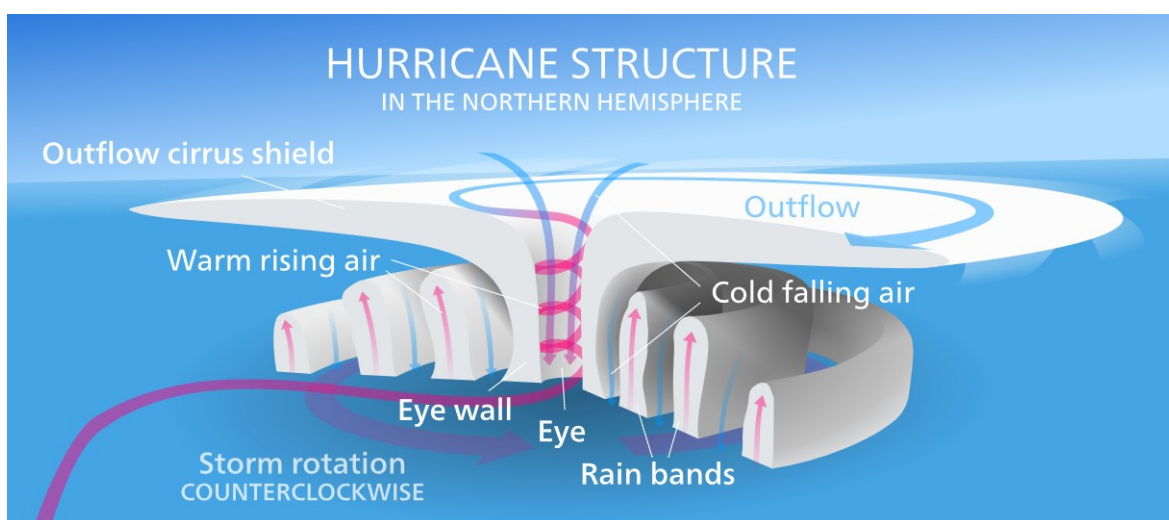
Slika 41. Sastavnice ciklona, spiralne kišne trake, zid ciklonskog oka, ciklonsko oko
<http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/fall10/atmo336/lectures/sec2/hurricanes.html>

Oblaci se redaju u **spiralne kišne trake (kišne pojaseve, Spiral rain bands)** koje se vrte prema središtu oluje, gdje se omotavaju oko ciklonskog oka. Površinski vjetrovi ubrzavaju prilikom konvergencije prema središtu oluje. Uz ciklonsko oko se nalazi **zid ciklonskog oka (Eye wall)**, prsten intenzivnih grmljavinskih oluja koje se vrte oko središta oluje, a protežu se gotovo 15 km iznad razine mora. Vrhovi oblaka u području zida oka se uzdižu iznad ostalih oblaka. Područje zida oka ima najviše oborina, a to je ujedno i područje najjačih vjetrova. Svi dijelovi ciklona prikazani su na slici 42.

Svi jaki tropski cikloni sastoje se od sljedećih komponenti:

- **Nizak atm. tlak (Low Pressure)** – tlakovi zabilježeni u središtima tropskih ciklona koji se javljaju na razini mora među najnižima su.
- **Topla jezgra (Warm core)** – zbog okomitog raspoređivanja uspinjuće topline oko središta oluje. Unutrašnjost ciklona uvijek je toplija od vanjske okoline.
- **Ciklonsko oko (Eye)** – Središte oluje, područje uzdizanja toplog, i spuštanja hladnog zraka. Vrijeme u središtu je mirnije i bez oblaka, no more može biti burno.

- **Zid ciklonskog oka (Eye wall)** – kružni pojas intenzivne konvekcije zraka i vjetrova koji neposredno okružuju oko. Ima najteže uvjete u tropskom ciklonu. Intenzivne ciklone pokazuju periodične zamjene zida oka, u kojima se stvaraju vanjske stijenke oka kako bi zamijenile unutarnje.
- **Kišni pojasevi (Rain bands)** – područja niske razine konvergencije zraka, područje jake kiše i uzlaznog kretanja zraka. Mogu se protezati stotinama kilometara od središta oluje.
- **Izlaz zraka (Outflow)** – anticiklonalna rotacija na vrhu ciklona. Na površini Zemlje, vjetrovi su jaki i ciklonalni, zatim slabe s visinom i na izlazu dobiju anticiklonalni karakter.



Slika 42. Bočni presjek ciklona

<https://www.e-education.psu.edu/earth107/node/1045>

5.4. FORMIRANJE I RASPAD CIKLONA

Nastanak tropskih ciklona još uvijek je tema intenzivnog znanstvenog istraživanja. No ipak, neophodni čimbenici koji uvjetuju razvoj ciklona su utvrđeni:

Cikloni nastaju iznad tropskih mora gdje su vjetrovi slabi, vlažnost visoka, a površinska temperatura mora minimalno 26,5°C ili više. Štoviše, toplina mora mora zahvatiti dubinu do minimalno 50 m, pa sve do 200 m kako bi formiranje ciklona moglo početi.

Nastanak ciklona pokreće oslobađanje latentne topline zbog kondenzacije vodene pare iz zraka. Da bi se formirao, ciklon mora imati stalan dovod energije u vidu latentne topline zbog kondenzacije vodene pare iz toplog i vlažnog zraka. Površinski zrak s dovoljno energije za stvaranje ciklona postoji samo iznad mora i oceana s temperaturom većom od 26,5 °C. Nadalje, atmosfera iznad oluje koja se razvija mora biti nestabilna, tj. temperatura okolnog zraka mora biti niža od zraka u oluji što utječe na konvekciju i brzo opadanje temperature s porastom nadmorske visine. Ovo svojstvo atmosfere, kao što je već navedeno, općenito pogoduje stvaranju grmljavinske oluje.

Cikloni se ne razvijaju unutar 4° N/S jer je Coriolisov efekt unutar ovog područja zanemariv.

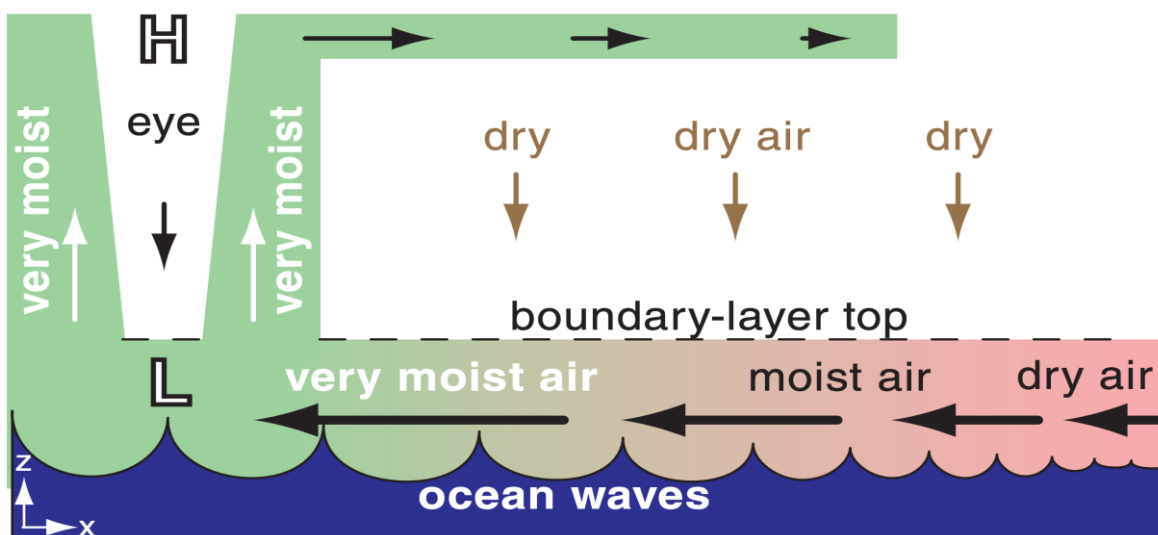
Konačno, ciklon se neće formirati ako postoji značajno smicanje vjetra. Ciklon postaje jači sve dok je zrak na vrhu koji izlazi iz ciklona brži od zraka koji ulazi u ciklon na dnu. Kada ciklon stigne u područje hladnije vode ili iznad velike kopnene mase on se raspada zbog nedostatka izvora. Područje gdje ciklon prvi puta dodiruje kopno se naziva *landfall*. Ciklon će također oslabiti ako se preseli u područje jakog vertikalnog smicanja vjetra. [24]

5.5. ATMOSFERSKI TOPLINSKI MOTOR

Znanost danas ciklon opisuje kao **jednostavni atmosferski toplinski stroj**. Ciklon ima **usisni sustav** (atmosferski granični sloj) koji uvlači gorivo (topao, vlažan zrak), **motor** (grmljavinske oluje) koji pretvara toplinu u mehaničku energiju (vjetrovi i valovi) i **ispušni sustav** (oborinske padaline za ispuštanje vode i izlazno strujanje kod nakovnja za ispuštanje zraka) za potrošeno gorivo. **Granični sloj** opisan je kao „*najniži sloj atmosfere, obično do 1 km visine, gdje se osjeća veliki utjecaj trenja od Zemljine površine i objekata na njoj, naročito utjecaj na ponašanje vjetra u tom sloju.*“ [22]

5.5.1. Stvaranje i unos goriva u ciklon

U srednjim geografskim širinama grmljavinske oluje mogu trajati satima, dok tropski cikloni mogu trajati i tjednima. Postavlja se pitanje zbog čega cikloni traju duže. Glavni razlog je taj što obične, izvantropske oluje koriste topao i vlažan zrak samo iz obližnjeg graničnog sloja, a nakon što se to obližnje gorivo potroši, oluje nestaju.



Slika 43. Usisni sustav pri dnu tropskog ciklona

[https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-)

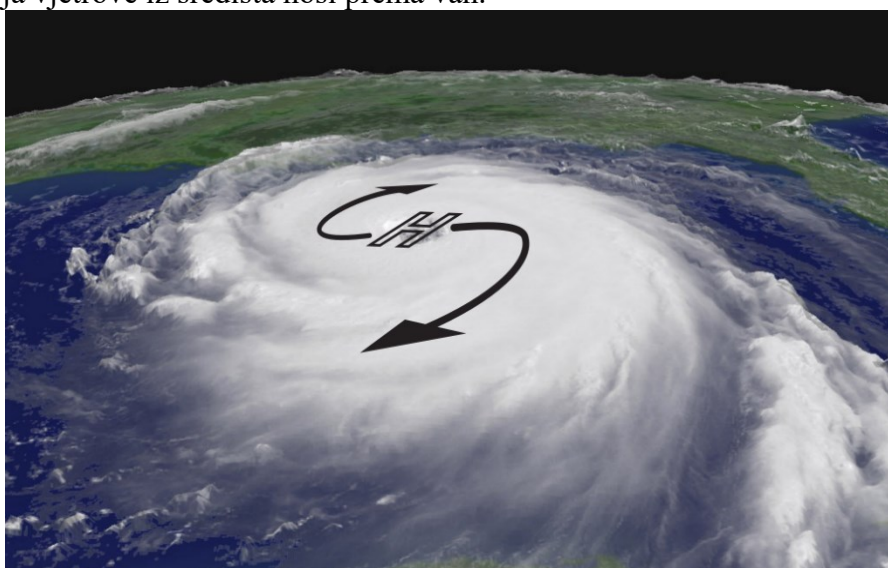
Međutim, tropski cikloni stvaraju vlastito gorivo - topli vlažni zrak iz graničnog sloja. To se odvija uz pomoć brzih površinskih vjetrova koji stvaraju velike oceanske valove. Ti se valovi zatim lome i pjene, što omogućuje brzo isparavanje morske vode uvis te učinkovit

prijenos topline s površine oceana na zrak. Kako vjetrovi graničnog sloja ubrzavaju prema području niskog tlaka, tako uzrokuju veće oceanske valove koji zatim dodaju više vlage (svijetlo zelena boja – visoka vlažnost) zraku koji ulazi (deblje strelice)(Slika 43.). Kada ovaj zrak stigne do ciklonskog zida, njegova je temperatura gotovo jednaka temperaturi površine mora i relativna vlažnost gotovo 100%. Naime, **tropski cikloni izvlače toplinu iz oceana**. Ocean je golemi spremnik topline koji upija sunčevu svjetlost cijelo ljeto i ranu jesen. To je razlog zašto su za tropske ciklone potrebne visoke temperature morske površine.

5.5.2. Ispust zraka iz ciklona

Velika količina ulaznog zraka iz graničnog sloja dobra je i loša za tropski ciklon. To je dobro jer ovaj zrak nosi potrebnu toplinu za oluju. Loše je jer također donosi i ogromne količine drugih molekula zraka (dušik, kisik) u jezgru oluje. Ako bi se te molekule zraka nakupile u središtu oluje, njihova bi težina uzrokovala porast tlaka zraka na razini mora, a poznato je kako je konstantan nizak tlak neophodan za održavanje snage ciklona.

Međutim, tropski cikloni mogu trajati tjednima. Dakle, mora postojati mehanizam koji uklanja višak zraka i topline iz jezgre tropskog ciklona. To su jaki izlazni vjetrovi na nakovnjevima oluje pri vrhu zida. Ovaj odljev postoji zbog anticiklonske vrtnje na vrhu oblaka koja vjetrove iz središta nosi prema van.

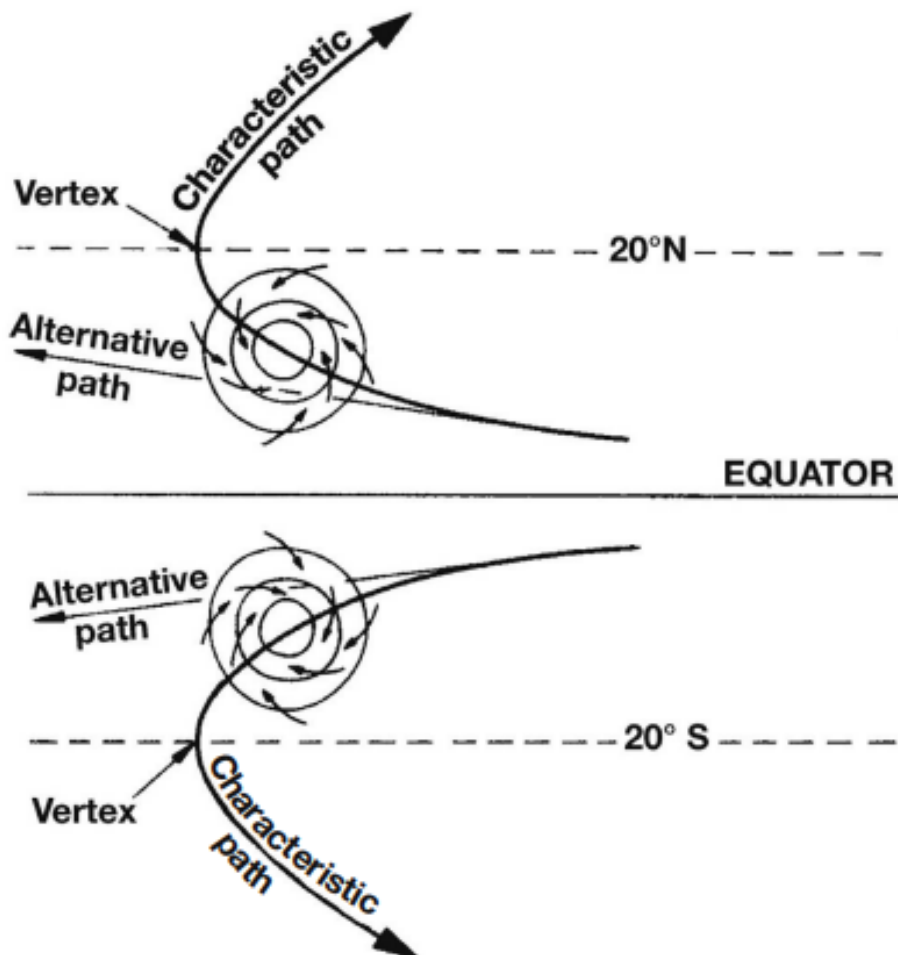


Slika 44. Anticiklonski sustav izlaznih vjetrova u ciklonu

[https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-)

5.6. KRETANJE CIKLONA

Nakon formiranja, tropski ciklon kreće se prema zapadu, a zatim mijenja smjer prema sjeverozapadu, na sjevernoj hemisferi, ili jugozapadu, na južnoj hemisferi. Na oko 20° N/S dodatno zakreće, mijenjajući smjer prema sjeveroistoku na sjevernoj i jugoistoku na južnoj hemisferi. Najzapadnija točka krivulje kretanja naziva se vrh ili vertex (Slika 45.). Ovaj obrazac kretanja nije pravilan. Putanje ciklona se znatno razlikuju i ovise o općem rasporedu trenutnih atmosferskih tlakova u područjima kretanja. Cikloni imaju tendenciju prolaženja uz susjedne subtropske anticiklone. Ako je dovoljno jako, područje visokog tlaka može uzrokovati promjenu putanje ciklona, jer anticiklona blokira put ciklonu. Cikloni se najčešće gibaju zapadnim rubom subtropskog ciklona.

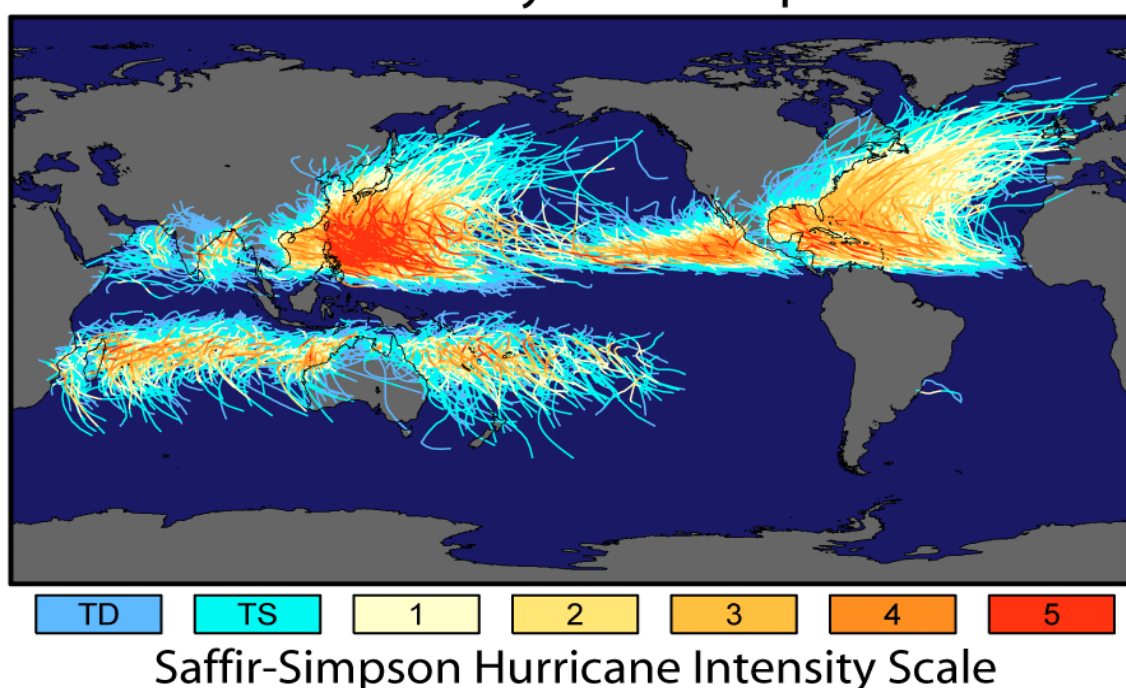


Slika 45. Skretanje ciklona na hemisferama

(Cornish M., Ives E., 2009., *Reeds Maritime Meteorology, 3rd edition*, Adlard Coles Nautical, London)

Uz istočnu obalu Sjeverne Amerike i istočnu obalu Azije postoje velike sličnosti u položaju putanja ciklona, najviše zbog skoro identičnog usmjerenja obala i položaja subtropskih anticiklona. Nadalje, cikloni Meksičkog zaljeva i Karipskog mora te cikloni sjevernog Indijskog oceana, zbog oblika reljefa nad kojim se gibaju, imaju kratke staze koje često završavaju na kopnu, uzrokujući tako ljudske žrtve i velike štete. (Slika 46.) [1.p.349.] [18.p.110.]

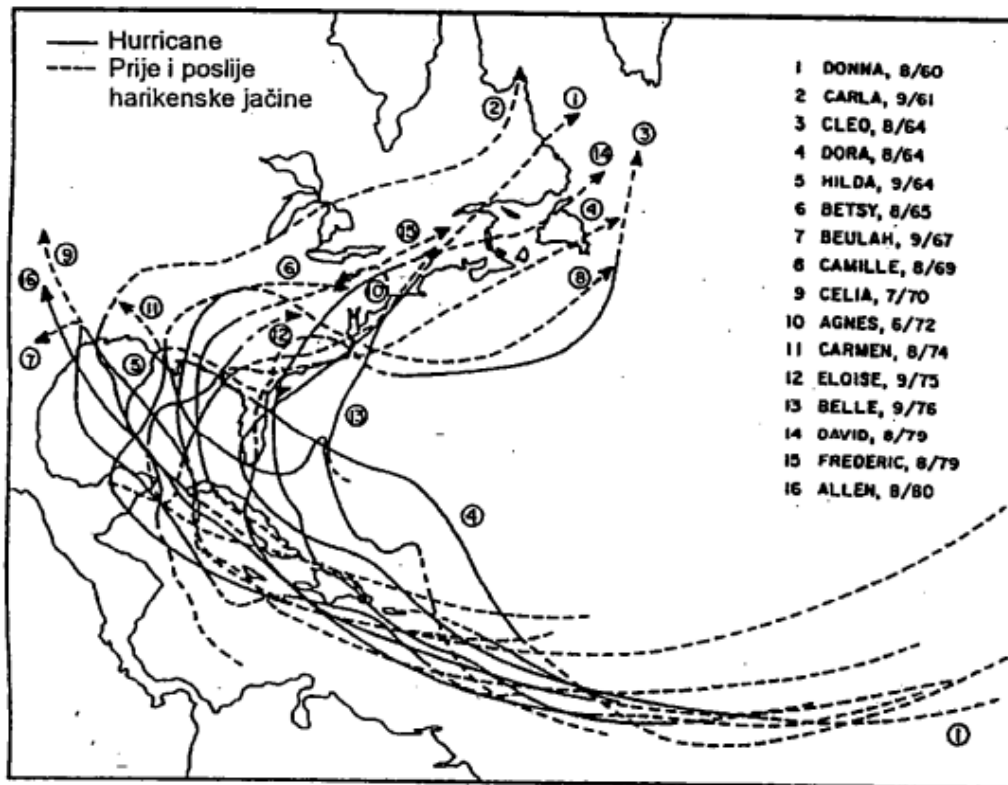
Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Slika 46. Putanje i jačine tropskih ciklona u zadnjih 150 godina

<https://earthobservatory.nasa.gov/images/7079/historic-tropical-cyclone-tracks>

Staze pojedinih ciklona međusobno se jako razlikuju (sl. 46, sl. 47), a ponekad tvore i razne oblike petlji, što otežava jedan od najvažnijih zadataka tropske meteorologije - prognozu gibanja. Pri prognoziranju staza i mjesta dodira ciklona s kopnom vrlo je važno poznavanje mjesnih zemljopisnih i klimatskih osobitosti određenog područja.

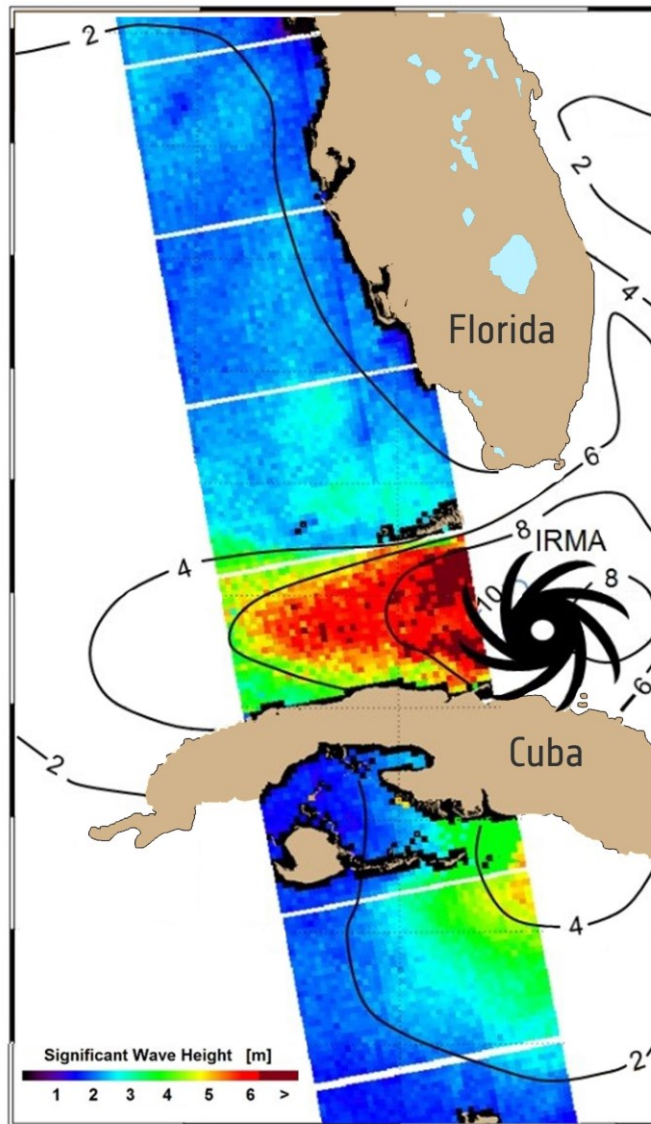


Slika 47. Staze ciklona u zapadnom Atlantiku tijekom 1960-80. (NOAA, 1981.)

(Gelo B., 2010. *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

5.7. POPRATNE OCEANSKE POJAVE

Cikloni uzrokuju razne oceanološke pojave opasne po plovidbu. Pojave i procesi nastali međudjelovanjem atmosfere i hidrosfere su najbitniji, npr. opasni vjetrovni valovi, olujni uspori i poplave, izuzetno jake oborine, itd. Ostali sporedni utjecaji (vjetrovne struje, morske mijene, seši i drugo) mogu dodatno pojačati te učinke te pridonijeti stvaranju raznolikosti gibanja morske vode.



Slika 48. Signifikantna visina valova, uragan Irma, 2017.

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/10/Wave_height_during_Hurricane_Irma

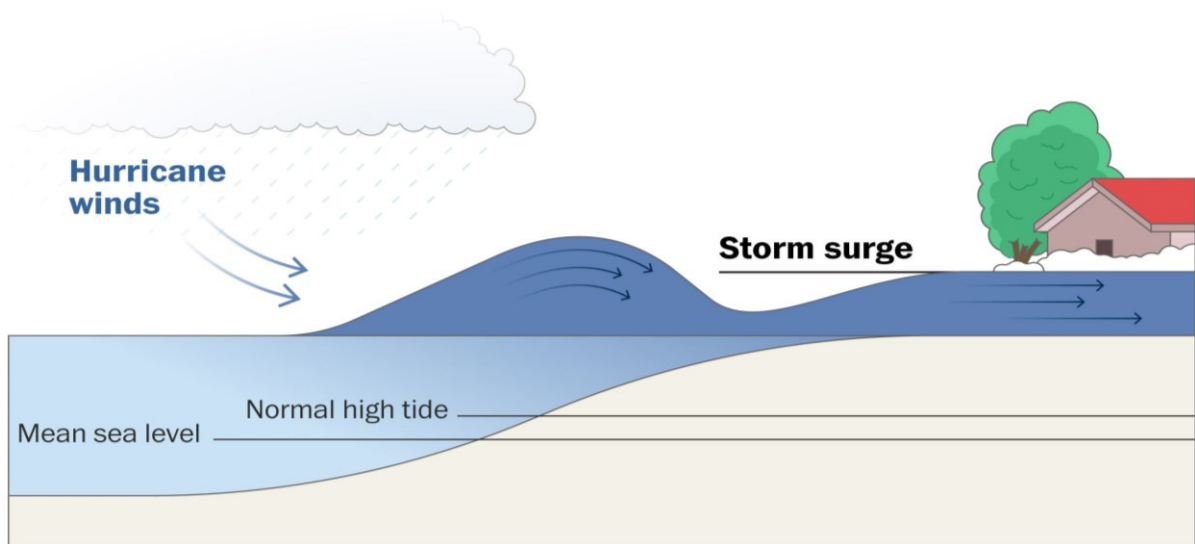
U ovom slučaju, najvažniji su **površinski vjetrovni valovi (Wind waves)**. Uzrokuje ih jak vjetar na morskoj površini potpomognut smanjenjem atmosferskog tlaka. To su valovi živog mora i valovi mrtvog mora. **Valovi živog mora** imaju razmjerno male periode i valne duljine bitno manje od dubine mora ($z > 200$ m). Za razvoj živog mora važna je brzina vjetra, njegovo trajanje i **razgon (fetch)**, tj. prostor nad kojim vjetar puše. Za najveće valove potreban je razgon preko 1100 NM, uz višednevni vjetar od 60 kn. **Valovi mrtvog mora (swell)** nastaju uglavnom po prestanku puhanja vjetra, te se javljaju prije ili poslije nailaska ciklona. Ovi valovi imaju razmjerno velike periode i valne duljine od više stotina metara, te putuju u svim smjerovima od središta ciklona, brzinom 17 do 21 m/s (1500 - 1800 km/dan)

i prevaljuju velike udaljenosti oko 3500 km. Napredujući brzinom nekoliko puta većom od brzine premještanja središta ciklona, valovi su jedan od prvih predznaka ciklona. Valovi ciklona su jedna od najrazornijih prirodnih pojava. Sagleda li se da 1 m³ morske vode ima masu preko 1000 kg, točnije 1023 kg. Kada dođe do loma vala samo od 1 m³ brzine oko 25 m/s u 1 sekundi se stvara golema se rušilačka snaga reda veličine 0,3 MW.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{\Delta E}{t} = \frac{mv^2}{2t} = \frac{1023 \text{ kg} \cdot 625 \text{ ms}^{-2}}{2 \text{ s}} = 319687,5 \text{ W} = 0,3 \text{ MW}$$

Ako se uzme volumen od 100 m³ mora, govori se o snazi od 30 MW. Takvi valovi mogu uništiti brodove i stotine kilometara obale, a pritom ih prati jedinstven zvuk nalik na tutnjavu.

Olujni uspor/val (storm surge) je podizanje srednje razine mora, slika 49. Dok je ciklon daleko od obale, razina mora se podiže od 1 do 1.5 m iznad srednje razine, no približavanjem središta ciklona ka obali, razina može poraste i preko 10 m. Olujni val je izraženiji ako središte ciklona prilazi obali okomito. Olujni uspor zahvaća stotine kilometara obale, a nastaje kao posljedica ukupnog djelovanja snažnih vjetrova na more, tj. gomilanjem vodene mase valovima natjerane na obalu, a tek djelomično (oko 5%) nastaje zbog djelovanja atmosferskog tlaka. Smanjenje atmosferskog tlaka za ≈ 1 hPa uzrokuje dizanje razine vode za oko 1 cm, što znači da u izuzetno jakim ciklonima razine vode može narasti 0.5 do 1 m samo zbog niskog tlaka zraka. Olujni uspori, kao dio ciklona, uzrokuju **poplave** i **bujice** sa značajnim materijalnim štetama i gubitkom života. Najsmrtonosniji zabilježeni olujni val nastao je u ciklonu Bholu iz 1970. godine, gdje je poginulo oko 500 000 ljudi. Olujni uspor s najvišom prijavljenom razinom mora dogodio se u sjevernoj Australiji 1899. godine tijekom ciklona. Točna visina još je neizvjesna, no navodno da je prelazila 13 metara. [1.p.355.] [25]



Slika 49. Olujni uspor

<https://www.washingtonpost.com/weather/2022/09/26/what-is-storm-surge/>

Olujni uspor dogodio se najesen na našoj obali kad su obale bile poplavljene (sl.50 sl.51). Ciklona je uzrokovala pad tlaka, djelovanje Mjeseca uzrokovalo je plimu što je bio dodatni učinak. Olujni uspori su prirodne katastrofe koje ostavljaju materijalnu štetu.



Slika 50. Olujni uspor na Hvaru dana 22. studenoga 2022.

<https://www.morski.hr/znanstvenica-s-instituta-za-oceanografiju-u-utorak-se-na-obali-dogodio-olujni-uspor-bit-ce-sve-cesci/>



Slika 51. Olujni uspor u Bakru 22.studeni 2022.

<https://www.morski.hr/znanstvenica-s-instituta-za-oceanografiju-u-utorak-se-na-obali-dogodio-olujni-uspor-bit-ce-sve-cesci/>

Iznimno, ciklon ponekad može uzrokovati i **tornado** prilikom nailaska vrtloga na kopno. Ciklonski tornado uglavnom je nevidljiv zbog gomile oborina i naoblaka.

Vjetrovi ciklonskih snaga mogu uništiti zgrade i infrastrukturu, srušiti drveće i dalekovode. Najintenzivniji vjetrovi su u blizini središta oluje, ali ne i u središtu. Kako se oluja približava kopnu, vjetrovi slabe. Ako je ciklon snažan, vjetrovi mogu zahvatiti i 200 kilometara u unutrašnjost plitke obale. Bitno je istaknuti da što se oluja brže kreće, to će orkanski vjetrovi zahvatiti veću unutrašnjost kopna ili plitke obale.

5.8. NAJRAZORNIJI CIKLONI U POVIJESTI

Najrazorniji ciklon prema podacima WMO bio je 1970. godine u Bangladešu sa 300 000 ljudskih žrtava (Tbl. 4). Najrazorniji uragan prema ukupnoj materijalnoj šteti je uragan Katrina iz 2005. godine sa štetom od 163 milijarde američkih dolara.

Tablica 4. Najrazorniji cikloni po stradanjima kroz povijest

	Naziv oluje	Godina	Država	Broj ljudskih žrtava
1	Ciklon	1970	Bangladeš	300 000
2	Ciklon Gorky	1991	Bangladeš	138 866
3	Ciklon Nargis	2008	Myanmar	138 366
4	Ciklon	1985	Bangladeš	15 000
5	Uragan Mitch	1998	Honduras	14 600

Izvor: Izradio student prema podacima Svjetske meteorološke organizacije, <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones/Notable-tcs>

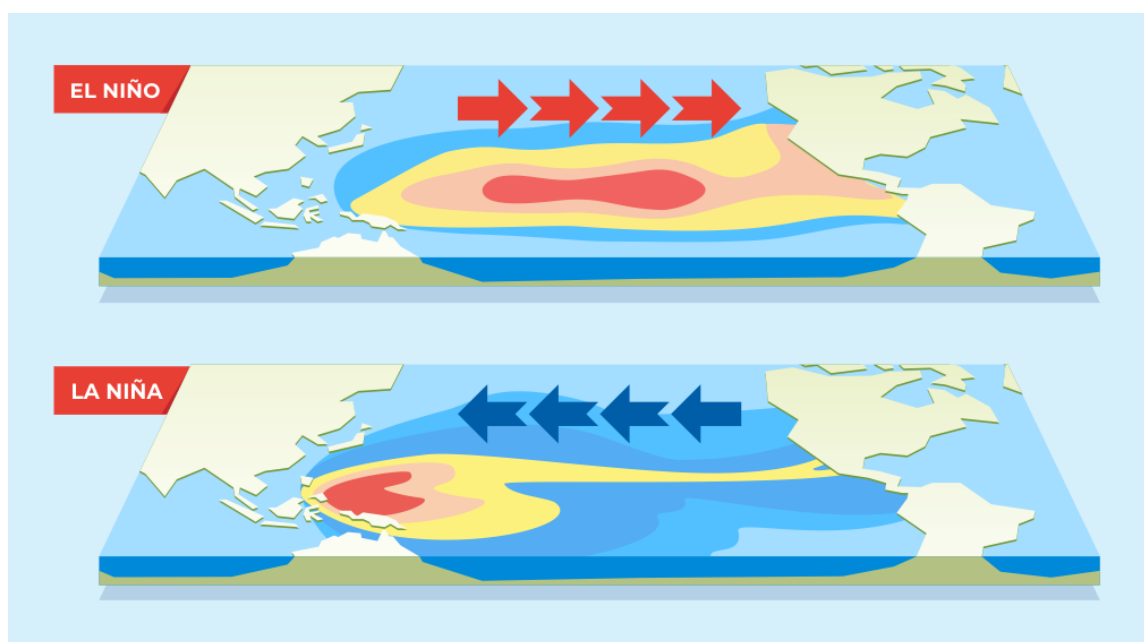
Tablica 5. Najrazorniji cikloni po novčanim štetama kroz povijest

	Naziv oluje	Godina	Država	Štete u milijardama US\$
1	Uragan Katrina	2005	SAD	163,61
2	Uragan Harvey	2017	SAD	96,94
3	Uragan Maria	2017	Puerto Rico	69,39
4	Uragan Irma	2017	SAD	58,16
5	Uragan Sandy	2012	SAD	54,47

Izvor: Izradio student prema podacima Svjetske meteorološke organizacije, <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones/Notable-tcs>

5.9. EL NIÑO I LA NIÑA TE UTJECAJ NA OLUJE

Kada u Tihom oceanu postoje normalni uvjeti, pasati pušu prema zapadu duž ekvatora, noseći toplu vodu iz Južne Amerike prema Aziji. Da zamijeni toplu vodu, hladna voda se diže iz dubina u uzlaznom strujanja. El Niño i La Niña dva su suprotna klimatska obrasca koja narušavaju te normalne uvjete. Znanstvenici ove pojave nazivaju ciklusom **El Niño-južne oscilacije (ENSO, El Niño Southern Oscillation)**. Periodi El Niña i La Niñe obično traju 9 do 12 mjeseci, a ponekad mogu trajati i godinama. Procesi El Niño i La Niña javljaju se u prosjeku svake 2 do 7 godina, ali se ne događaju redovito. El Niño se uglavnom javlja češće nego La Niña. El Niño utječe na obrasce atmosferske cirkulacije, što znači da općenito uzrokuje više tropskih oluja u tropskom Pacifiku, ali manje u tropskom Atlantiku, uključujući južni dio SAD-a. Tijekom perioda La Niñe obično je obrnuto. [39]



Slika 52. El Niño i La Niña

<https://thecolumn.ahacentre.org/insight/vol-66-getting-to-know-el-nino-la-nina/>

6. DETEKCIJA OLUJA

„Nacionalna meteorološka služba (SAD) koristi kombinaciju radara, satelita, detektiranja munja i površinskih promatranja, uključujući izvješća dobrovoljnih promatrača za otkrivanje i praćenje loših vremenskih uvjeta.“ [40]

6.1. METEOROLOŠKI RADARI

Radar se u meteorologiji koristi za praćenje naoblaka i oborina, njihovog intenziteta i smjera kretanja. WSR-88D (Weather Surveillance Radar - 1988 Doppler) novi je radarski sustav za praćenje olujnih pojava. Sposobnost novih radara da otkriju kretanje radarskih ciljeva (npr. kiše) prema ili od radara (izvedeno iz "Dopplerovog efekta") omogućuje praćenje rotacije uzlaznih strujanja grmljavinske oluje, a ponekad i razvoja tornadičke cirkulacije. Snažni radarski odjeci superćelijskih oluja (rotacija oluje) omogućuju prognoziranje, odnosno izdavanje upozorenja za tornado do 20 minuta prije nego što se spusti na površinu.

Kao i svaka tehnologija, radari imaju svoja ograničenja. Radarske zrake ne mogu vidjeti kroz planine, što znači npr. neotkrivene vremenske prilike na dnu doline između planinskih lanaca. Zbog zakrivljenosti Zemlje radarska zraka se diže u prostiranju te ne uzrokuje donji dio olujnih oblaka. Organizacije kompenziraju te nedostatke pomoću obučениh promatrača vremena koji pomažu popuniti praznine i pružiti istinite informacije s terena. [40]



Slika 53. WSR-88D radar

<https://en.wikipedia.org/wiki/NEXRAD>

6.2. SATELITI

Geostacionarni sateliti i sateliti u polarnoj orbiti omogućuju meteorolozima promatranje razvoja oblaka i vremenskih sustava. Izuzetno su korisni za praćenje meteoroloških sustava u oceanskim područjima gdje nema radara i gdje se vrši samo nekoliko površinskih promatranja. Na primjer, sateliti uvelike poboljšavaju uspješnost detektiranja stvaranja i kretanja tropskih ciklona iznad tropskih mora. Sateliti također pomažu meteorolozima praćenje kretanja zračnih masa te predviđati moguće oluje. Uzorci snimljenih oblaka također daju podatke o snazi i kretanju mlaznih struja značajnih za razvoj oluja.

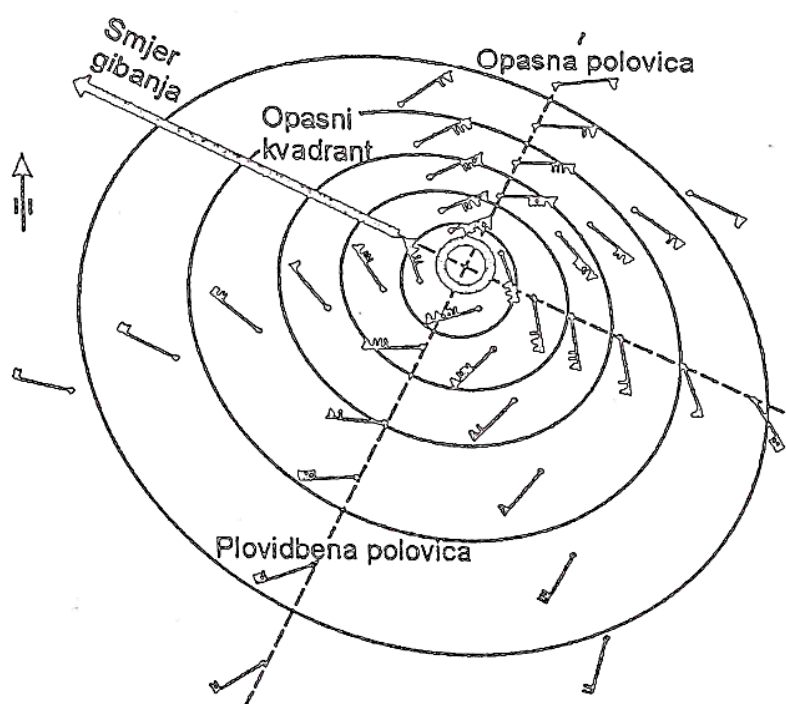
Iako pružaju mnogo informacija, sateliti također imaju svoja ograničenja. Satelit snima oblak odozgo, ali ne detektira što se formiralo ispod njega (npr. tornado). Jake grmljavinske oluje i tornada mogu se razviti i nestati prilično brzo. Čak i ako satelitska slika ukazuje na jaku oluju, vremenska kašnjenje prijema satelitske slike može biti 15 do 30 minuta, što je ponekad nedovoljno za pravovremeno obavještanje o nastanku oluje. Na slici 54. prikazan je satelit „Global Precipitation Measurement Core Observatory“, lansiran 2014., a jedan je od satelita s naprednijim radarskim mogućnostima. [40] [41]



Slika 54. Satelit „Global Precipitation Measurement Core Observatory“
<https://edition.cnn.com/2021/09/30/world/us-weather-satellite-deal-scn/index.html>

7. PLOVIDBA KROZ OLUJU - CIKLON

Na sjevernoj polutki, najveće brzine vjetra u ciklonu su na njegovoj desnoj polovici, obično u desnom stražnjem kvadrantu, slika 55. Vjetrovi brzina većih od 60 kn u desnoj polovici upućuju da se ovdje nalaze i najveći valovi. Taj se dio ciklona zato zove **opasna polovica (dangerous semicircle)**. Lijeva polovica, kao manje opasna, naziva se **plovidbena polovica (navigable semicircle)**. Vjetrovi u lijevom stražnjem kvadrantu pušu suprotno gibanju ciklona te su zato slabiji, trajanje i razgon su manji te daju manju visinu valova.



Slika 55. Prizemno polje vjetra i smjer gibanja ciklona; podjela na kvadrante

(Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar)

Stražnji desni kvadrant, u odnosu na druge kvadrante, ima jače vjetrove jer se duže razvijaju i imaju veći razgon, a pušu u smjeru gibanja ciklona. U prednjem desnom kvadrantu ciklona nalaze se najveći valovi jer putuju u smjeru napredovanja ciklona i imaju veću brzinu napredovanja u odnosu na ciklon. Valovi mogu postići visine i do 20 m, i to je razlog što se taj dio ciklona zove **opasni kvadrant (dangerous quadrant)**.

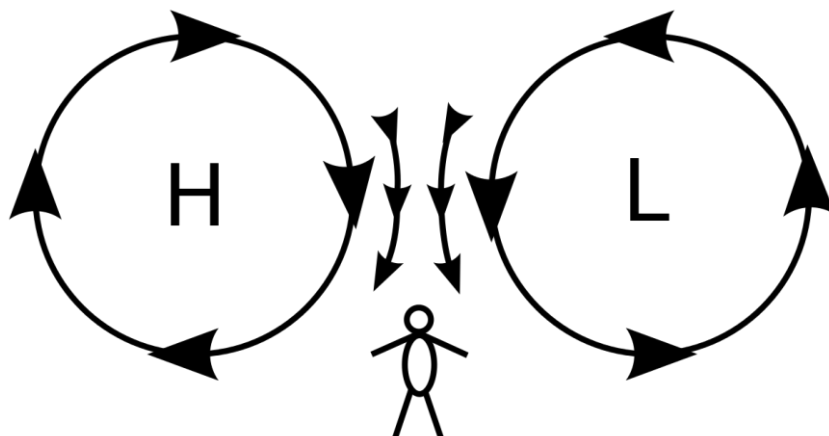
Takvi valovi na Atlantiku imaju visine do 12 m, a na Tihom oceanu oko 14 m. Kad vjetar promijeni smjer i brzinu, stvaraju se novi valovi koji interferiraju sa starima, pa visina valova poraste i doseže 17 m na Atlantiku i do 18 m na Tihom oceanu.

Opća pravila za plovidbu brodom u blizini tropskog ciklona nalažu izbjegavati ih ako je ikako moguće i ne prelaziti njihovu prognoziranu putanju. Onima koji putuju kroz opasni kvadrant savjetuje se da postave vjetar na desnu stranu pramca i plove što je brže moguće. Brodovima koji se kreću kroz sigurni kvadrant savjetuje se da zadrže pravi vjetar na desnoj strani krme i plove što je brže moguće. [1.p.530.]

7.1. BUYS BALLOTOV ZAKON

U meteorologiji, Buys Ballotov zakon govori da: „**Na sjevernoj hemisferi, ako osoba stoji leđima okrenuta vjetru, ima područje niskog atmosferskog tlaka s lijeve strane, a visokog s desne strane.**“ To je zato što vjetar putuje protusatno oko zona niskog tlaka na sjevernoj hemisferi. To je približno točno u višim geografskim širinama sjeverne hemisfere, a obrnuto je na južnoj hemisferi. Zakon prestaje vrijediti bliže ekvatoru zbog slabije Coriolisove sile koja na njega utječe.

Verzija koju su učili mornarički kadeti u Drugom svjetskom ratu glasi: "Na sjevernoj hemisferi, ako okrenete leđa vjetru, centar niskog tlaka bit će s vaše lijeve strane i nešto prema naprijed." (Aerologija za pilote, McGraw-Hill, 1943., str. 43). [41]



Slika 56. Buys Ballotov zakon, strelice u sredini prikazuju smjer vjetra

https://en.wikipedia.org/wiki/Buys_Ballot%27s_law

8. ZAKLJUČAK

Oluje su kompleksne atmosferske pojave, a poznavanje mehanizama i procesa koji im prethode ključno je za razumijevanje dinamike samih olujnih i popratnih pojava. Zbog tog razloga, u radu se najprije govorilo o samom olujnom oblaku kao prvim stupnjem olujnog nevremena. Nadalje, objašnjene su varijacije rasta olujnog oblaka, odnosno njihovo grupiranje u veće olujne sustave, također i pojavu popratnih pojava kao što su vrtložna gibanja i električna pražnjenja. U sljedećem poglavlju rad se bavi atmosferskim čimbenicima koji globalno utječu na stvaranje oluja. Budući da se oluje razlikuju podrijetlom nastanka, podijeljene su na tropske i oluje umjerenih i viših širina. Najrazornije oluje su uragani, tj. tropski cikloni, te su najopširnije objašnjeni. U posebnim poglavljima objašnjeni su još načini detektiranja olujnog nevremena te su spomenuti i postupci koje brod mora poduzeti ako se nađe u olujnom ciklonu.

Tema oluja na moru neiscrpno je područje za učenje i istraživanje, te je gotovo nemoguće spomenuti sve procese u realnim situacijama kao što su morske oluje. Međutim, dani su uzroci i preduvjeti nastanka oluja, putovi kretanja oluja, itd. tako da su opisani čimbenici poput olujnih oblaka ili popratnih pojava oluja kao temelji za daljnje istraživanje. U budućim radovima moguće se više posvetiti točno određenim olujama poput onih koje su navedene pod najrazornijima u povijesti praćenja oluja, te s posebnim utjecajem na navigaciju prije, tijekom i nakon prolaska oluje.

LITERATURA

1. Gelo B., 2010., *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, Zadar
2. <https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulonimbus-cb.html> (Weilbach 1880. - Formes des nuages en Europe septentrionale. *Annales du Bureau Central Météorologique de France*, 1(B): 11–40.) (pristupljeno: 25.7.2023.)
3. <https://www.britannica.com/science/climate-meteorology/Cloud-types> Tipovi oblaka (pristupljeno: 25.7.2023.)
4. <https://blogs.northcountrypublicradio.org/allin/2015/05/03/the-anatomy-of-thunderstorms/> The anatomy of thunderstorms, by Abagael Giles on May 3rd, 2015. (pristupljeno: 25.7.2023.)
5. <https://www.noaa.gov/jetstream/thunderstorms/life-cycle-of-thunderstorm> Life cycle of a thunderstorm (pristupljeno: 26.7.2023.)
6. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69251> Hrvatska enciklopedija – latentna toplina (pristupljeno: 26.7.2023.)
7. [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/home.rxml) WW2010, University of Illinois, Types of thunderstorms (single cell, multicell clusters, multicell lines and supercells) (pristupljeno: 26.7.2023.)
8. <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=MESO> NOAA Glossary – Mesocyclone (pristupljeno: 26.7.2023.)
9. <http://ww2010.atmos.uiuc.edu/%28Gh%29/guides/mtr/svr/comp/wind/cnvt.rxml> WW2010, University of Illinois, Wind Shear, organized and unorganized convection (pristupljeno: 28.7.2023.)
10. <https://www.noaa.gov/jetstream/lightning/how-lightning-is-created> How lightning is created (pristupljeno: 28.7.2023.)
11. <https://www.weather.gov/safety/lightning-science-electrification> Understanding lightning: Thunderstorm electrification (pristupljeno: 28.7.2023.)
12. <https://www.noaa.gov/jetstream/global/global-atmospheric-circulations> Global atmospheric circulation (pristupljeno: 3.8.2023.)
13. <https://www.rmets.org/metmatters/global-atmospheric-circulation> Global atmospheric circulation (pristupljeno: 3.8.2023.)
14. <https://www.worldatlas.com/oceans/what-is-the-coriolis-effect.html> What is the coriolis effect? (pristupljeno: 3.8.2023.)

15. <https://sites.google.com/view/geografija1/klima/op%C4%87a-cirkulacija-atmosfera> Cirkulacija atmosfere- ITCZ (pristupljeno: 4.8.2023.)
16. <https://skybrary.aero/articles/inter-tropical-convergence-zone-itcz> Inter-Tropical Convergence zone (pristupljeno: 4.8.2023.)
17. Bowditch N., LL.D., 2002., *The American practical navigator, an epitome of navigation*, National imagery and mapping agency, Bethesda, Maryland
18. Cornish M., Ives E., 2009., *Reeds Maritime Meteorology, 3rd edition*, Adlard Coles Nautical, London
19. <https://www.gpb.org/blogs/talking-storm/2012/05/28/tropical-disturbances-depressions-and-storms-oh-my> Tropical Disturbances, Depressions, and Storms: Oh My! (pristupljeno: 6.8.2023.)
20. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones> Tropical cyclones (pristupljeno: 4.8.2023.)
21. <https://public.wmo.int/en/bulletin/tropical-cyclones-warmer-climate> Tropical cyclones in a warmer climate (pristupljeno: 6.8.2023.)
22. <https://www.vrijeme.net/pojmovnik/granicni-sloj> Granični sloj (pristupljeno: 6.8.2023.)
23. [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/16%3A_Tropical_Cyclones/16.04%3A_Section_5-) Thermodynamics of Tropical Cyclones (pristupljeno: 6.8.2023.)
24. <http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/fall10/atmo336/lectures/sec2/hurricanes.html> Tropical cyclones and hurricanes (pristupljeno: 6.8.2023.)
25. <https://www.e-education.psu.edu/earth107/node/1046> Historic storm surge records (pristupljeno: 9.8.2023.)
26. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones/Notable-tcs> Notable tropical cyclones (pristupljeno: 9.8.2023.)
27. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=67440> Zračna masa (pristupljeno: 10.8.2023.)
28. <https://www.britannica.com/science/jet-stream> Jet streams (pristupljeno: 15.8.2023.)
29. <https://www.noaa.gov/jetstream/global/jet-stream> Global jet stream (pristupljeno: 15.8.2023.)
30. <https://scijinks.gov/jet-stream/> What is a jet stream? (pristupljeno: 15.8.2023.)
31. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/rossby-wave.html> What is a Rossby wave? (pristupljeno: 17.8.2023.)
32. <https://www.manitobacooperator.ca/weather/weather-school-globs-of-cold-air-and-rossby-waves/> Weather school: Globes of cold air and Rossby waves (pristupljeno: 17.8.2023.)
33. <https://www.britannica.com/science/polar-front> Polar front (pristupljeno: 17.8.2023.)

34. <https://www.pmfias.com/temperate-cyclones-extra-tropical-cyclones-mid-latitude-cyclones-frontal-cyclones-geography-upsc-ias/> Temperate Cyclones (Mid Latitude Cyclone or Extratropical cyclones or Frontal Cyclones) (pristupljeno: 20.8.2023.)
35. <http://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/atmo/chapter/chapter-13-extratropical-cyclones/> ATMOSPHERIC PROCESSES AND PHENOMENA: Chapter 13: Extratropical Cyclones (pristupljeno: 20.8.2023.)
36. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html> What are El Niño and La Niña? (pristupljeno: 24.8.2023.)
37. Renko T., 2018., *Pijavice na Jadranu: učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet
38. <https://www.bbc.com/news/science-environment-64192508> What are El Niño and La Niña, and how do they change the weather? (pristupljeno: 5.9.2023.)
39. https://www.weather.gov/otx/Thunderstorms_and_Severe_Weather_Spotting Thunderstorms and Severe Weather Spotting (pristupljeno: 5.9.2023.)
40. <https://edition.cnn.com/2021/09/30/world/us-weather-satellite-deal-scni/index.html> US inks \$20 million deal to launch high-tech weather satellites in space (pristupljeno: 5.9.2023.)
41. <https://www.britannica.com/science/Buys-Ballots-Law> Buys Ballot's law (pristupljeno: 5.9.2023.)

- Slika 20. Tornado
- Slika 21. Posljedica propada
- Slika 22. Propad i prsten kružnog gibanja pri tlu
- Slika 23. Razvoj udarne fronte
- Slika 24. Prikaz dva jednostavna izolirana olujna oblaka (standardni tripolni model) i vrste munja koje nastaju
- Slika 25. Prikaz električnog pražnjenja oblak – Zemljina površina
- Slika 26. Mjerenje udaljenosti do munje protokom vremena između bljeska i grmljenja
- Slika 27. Položaj polarne fronte u troćelijskim modelu općeg atmosferskog kruženja (60° N)
- Slika 28. Prikaz polarne fronte i zračnih masa s kojima graniči
- Slika 29. Satelitska snimka ITZC
- Slika 30. Položaj ITCZ u siječnju i srpnju
- Slika 31. Ciklona i anticiklona
- Slika 32. Satelitska snimka ciklone umjerenih širina
- Slika 33. Područja javljanja ciklona umjerenih širina
- Slika 34. Zone padalina u ciklonu umjerenih širina
- Slika 35. Vrste tropskih oluja
- Slika 36. Tropska depresija
- Slika 37. Tropska oluja Hilary, 16. kolovoza 2023.
- Slika 38. Satelitska slika uragana Don, 22. srpnja 2023.
- Slika 39. Regije u kojima se pojavljuju tropski cikloni
- Slika 40. Područja i učestalost ciklona, broj i postotak. Kopna zahvaćena ciklonama su šrafirana. Izoterma temperature mora 26° C, točkasto
- Slika 41. Sastavnice ciklona, spiralne kišne trake, zid ciklonskog oka, ciklonsko oko
- Slika 42. Bočni presjek ciklona
- Slika 43. Usisni sustav pri dnu tropskog ciklona
- Slika 44. Anticiklonski sustav izlaznih vjetrova u ciklonu

Slika 45. Skretanje ciklona na hemisferama

Slika 46. Putanje i jačine tropskih ciklona u zadnjih 150 godina

Slika 47. Staze ciklona u zapadnom Atlantiku tijekom 1960-80. (NOAA, 1981.)

Slika 48. Signifikantna visina valova, uragan Irma, 2017.

Slika 49. Olujni uspor

Slika 50. Olujni uspor na Hvaru dana 22. studenoga 2022.

Slika 51. Olujni uspor u Bakru 22.studeni 2022.

Slika 52. El Niño i La Niña

Slika 53. WSR-88D radar

Slika 54. Satelit „Global Precipitation Measurement Core Observatory“

Slika 55. Prizemno polje vjetra i smjer gibanja ciklona; podjela na kvadrante

Slika 56. Buys Ballotov zakon, strelice u sredini prikazuju smjer vjetra

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kategorizacija tropskih oluja po jačini vjetra

Tablica 2. Kategorizacija tropskih ciklona po Saffir-Simpsonovoj ljestvici

Tablica 3. Nomenklatura i sezone ciklona po regijama

Tablica 4. Najrazorniji cikloni po stradanjima kroz povijest

Tablica 5. Najrazorniji cikloni po novčanim štetama kroz povijest