

Glava 3

Vetar

Kretanje vazduha od jednog na drugo mesto je istovremeno horizontalno i vertikalno. Pri tome preovladava horizontalno u odnosu na vertikalno kretanje, izuzimajući neke turbulentne fenomene i konvektivne procese. Pod terminom vetar, ovde će se podrazumevati samo horizontalno kretanje vazduha dok će vertikalno kretanje vazduha biti diskutovano u narednoj glavi.

U prethodnim glavama su pominjane fizičke veličine za čije je kvantitativno opisivanje bio potreban samo jedan broj (temperatura, pritisak, gustina) koje su prema tome skalarne veličine. Kad je reč o vetru kao pojavi u atmosferi, za njegovo potpuno opisivanje je potrebno, osim intenziteta znati i pravac i smer. Intenzitet se pri tome obično zadaje u m/s ili km/h a pravac i smer zadavanjem strane sveta sa koje duva (tako recimo zapadni vetar duva sa zapada ka istoku). Fizička veličina kojom opisujemo precizno vetar je prema tome njegova brzina koja, kao što je poznato, predstavlja tipičnu vektorsku veličinu.

3.1 Nastanak vetra

Vetar nastaje promenom stanja kretanja delova atmosfere. Promene stanja kretanja, prema Njutnovim zakonima mehanike izazivaju sile čije delovanje je opisano pre svega preko prva dva Njutnova zakona koji se ovde mogu prikazati u nešto izmenjenoj formi:

- Svaki delić vazduha ostaje u stanju mirovanja ili ravnomernog pravolinijskog kretanja dokle god pod dejstvom neke sile ne bude prinuđen da promeni to svoje stanje;

- Promena količine kretanja delića vazduha je srazmerna rezultujućoj sili koja deluje na njega i vrši se u pravcu delovanja sile.

U uprošćenoj formi (uz pretpostavku da se masa delića vazduha ne menja sa vremenom), drugi zakon se može prikazati preko formule $m\vec{a} = \vec{F}$, gde je istaknuto da su i ubrzanje delića vazduha i rezultujuća sila vektorske veličine.

Imajući u vidu rečeno, da bi se došlo do odgovora na pitanje kako nastaje vetar, treba zapravo odgovoriti na pitanja: koje sile deluju na vazduh i šta uzrokuje nastanak tih sila.

Sile koje koje direktno doprinose stvaranju vetra su:

- gradijentna sila pritiska,
- Koriolisova sila ili sila devijacije,
- sila trenja i
- centifugalna sila.

U nastavku ovog odeljka biće podrobno objašnjeni uzroci i daće se opisi pobrojanih sila kako bi se dao odgovor i na drugo pitanje.

3.1.1 Gradijentna sila pritiska

Pod gradijentom neke fizičke veličine podrazumeva se količnik razlike njenih vrednosti u dve prostorne tačke podeljen njihovim rastojanjem. Ukoliko je reč o pritisku, kao što je dobro poznato iz mehanike fluida, usled razlike u pritiscima između dve tačke u prostoru će doći do strujanja fluida iz tačke u kojoj je pritisak veći u onu u kojoj je manji. Stoga se, radi potpunije informacije o kretanju delova fluida, gradijentu pripisuje vektorski karakter na sledeći način. Gradijent pritiska ima pravac paralelan sa pravcem duž koga se menja pritisak, smer mu se poklapa sa smerom smanjenja pritiska, dok mu je intenzitet jednak promeni pritiska na zadatom (jediničnom) rastojanju.¹

Veza između gradijentna pritiska i kretanja vazduha se jasno vidi ako se ima u vidu da se vazduh uvek nalazi pod nekim pritiskom. Na primer, u normalno napumpanoj automobilskoj gumi pritisak je uvek veći unutra nego spolja. Na rastojanju koje je jednako debljini zida gume postoji gradijent pritiska. Što je guma više napumpana gradijent pritiska je veći. Ako se guma probuši, vazduh iz nje počinje da struji (kreće se sa nekim ubrzanjem) napolje. Što je gradijent preko zida gume veći, biće veće ubrzanje delića vazduha tj. intenzivnije njihovo strujanje. Strujanje će prestati kada se pritisci sa jedne i druge strane gume izjednače, odnosno, kada gradijent

¹Iako je definicija gradijenta uvedena na primeru pritiska, on se može uvesti kod bilo koje veličine. Podsetimo se da je kod analize promene temperature sa visinom u nižim slojevima atmosfere odnos $\Delta T/\Delta z$ upravo predstavljao gradijent temperature. U fizici se takođe obrađuje difuzija koja nastaje usled razlike u koncentracijama neke supstance duž nekog pravca, odnosno usled postajanja njenog gradijenta.

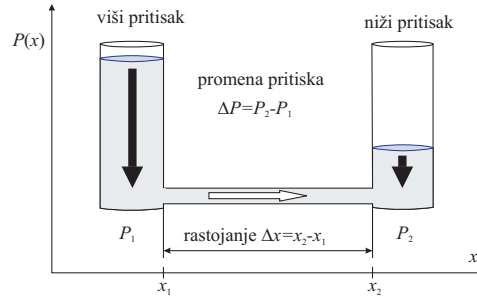
pritiska postane jednak nuli. Sila koja dovodi do kretanja vazduha usled postojanja gradijenta pritiska naziva se gradijentna sila pritiska pri čemu je očigledno ova sila paralelna sa gradijentom pritiska. Očigledna primer za stvaranje sile ovog tipa može da posluži i neki drugi fluid, npr. voda kao što je prikazao na slici 3.1.

Gradijentna sila pritiska F_x koja u ovom slučaju deluje duž x -ose je očigledno srazmerna veličini promene pritiska duž ove ose, $\frac{P_1 - P_2}{x_2 - x_1} = -\frac{\Delta P}{\Delta x}$.

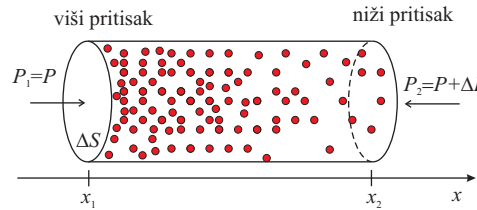
Na analogan način delići vazduha u atmosferi dobijaju ubrzanje usmereno od mesta visokog ka mestima niskog pritiska po delovanjem gradijentne sile pritiska. Pošto je vetar po definiciji horizontalno kretanje vazduha (posledica sile koje deluju horizontalno), dovoljno je posmatrati samo horizontalnu komponentu gradijentne sile pritiska. Pri tome, postoji i vertikalna komponenta gradijentne sile pritiska (vertikalna gradijentna sila) nastala opadanjem pritiska sa povećanjem visine.

Sila koja deluje na vazdušne mase usled razlike u pritiscima ΔP (slika 3.2) je upravo proporcionalna toj razlici, tj. važi $F_x \sim \Delta P$. Preciznije rečeno, ukoliko je $\Delta P < 0$, tj. pritisak opada duž ove ose, sila će biti zadata izrazom

$$F_x = -\Delta P \Delta S,$$



Slika 3.1: Gradijent pritiska usled razlike visine vode u dva rezervoara.



Slika 3.2: Gradijent pritiska u vazduhu.

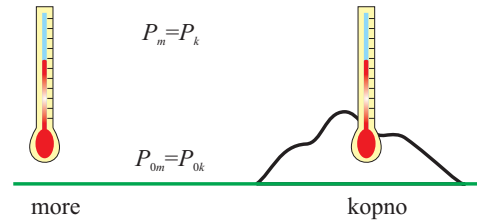
gde predznak definiše smer delovanja sile. Ukoliko je promena pritiska pozitivna, tj. pritisak P_2 veći od pritiska P_1 , sila će, prema ovom izrazu, delovati u negativnom smeru x -ose. Ubrzanje koje pri tome dobiju delići vazduha u posmatranom cilindru, će biti $a_P = F_x/m$, gde je indeksom P istaknuto da je reč o ubrzanju koje se stiče usled razlike u pritiscima a m je masa vazduha u cilindru koja iznosi $\rho \Delta S \Delta x$ (ρ je gustina vazduha). Na taj način je ubrzanje koje stiču delići vazduha zadato izrazom

$$a_P = \frac{F_x}{m} = -\frac{\Delta P \Delta S}{\rho \Delta S \Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta x}. \quad (3.1)$$

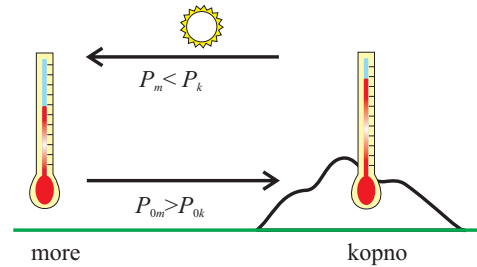
Iz ovog izraza se vidi da ono zaista zavisi od gradijenta pritiska duž posmatranog pravca pa se zato i odgovarajuća sila i ubrzanje zovu gradijentna sila pritiska odnosno ubrzanje.²

Značaj horizontalne gradijentne sile je u tome što je ona početni uzrok vetra, dok npr. Koriolisova sila i sila trenja zahtevaju postojanje kretanja pre nego što počnu da deluju.³ Pošto je gradijentna sila suštinska za kretanje vazduha, važno je znati kako ona nastaje. Na slici 3.3 je prikazano stanje u atmosferi mirnog jutra neposredno pre izlaska Sunca kada je temperatura kopna jednaka temperaturi mora. Na bilo kojoj visini, merenoj od nivoa mora, iznad kopna i iznad mora pritisak je isti. U toj situaciji ne postoji horizontalni gradijent pritiska, odnosno, nema kretanja vazduha preko obale od kopna prema moru ili obrnuto.

Podizanjem Sunca počinje grejanje tla. Tom prilikom temperatura kopna brže raste od temperature mora, jer kopno ima manji specifični toplotni kapacitet od vode. Iz tog razloga temperatura vazduha iznad kopna postaje viša nego iznad mora, što dovodi do stvaranja horizontalnog gradijenta temperature. Toplije kopno zagreva okolni (gornji) vazduh provođenjem i konvekcijom. Rezultat toga je da stub vazduha iznad kopna postaje ređi, zbog čega se podiže. Time se masa vazduha iznad kopna proširila na viši nivo, nego što se ekvivalentna masa proširila u hlad-



Slika 3.3: Pritisak na nivou mora i na bilo kojoj visini je jednak i iznad mora (P_m) i iznad kopna (P_k).



Slika 3.4: Pritisak na nivou mora je manji iznad kopna dok je na visini veći iznad kopna nego iznad mora.

²Iako je izraz dobijen za situaciju u kojoj se pritisak menja duž jednog pravca, ovaj izraz se može direktno generalizovati u izraz $\vec{a}_P = -\frac{1}{\rho} \nabla P$ koji važi u najopštijem slučaju. U ovom izrazu je sa ∇ označena operacija koja kada se izvrši nad veličinom koja se nalazi iza oznake daje njen gradijent.

³Kada je reč o centrifugalnoj sili ona postoji i kada nema inicijalnog kretanja vazduha s obzirom na to da je njen uzrok rotacija Zemlje oko sopstvene ose.

nijem stubu vazduha iznad mora. Zbog toga će se na nekoj visini uspostaviti takav horizontalni gradijent pritiska koji topliji vazduh iznad kopna počinje da pokreće ka mestu sa nižim pritiskom iznad mora (gornja strela), kao što se vidi na slici 3.4. Dalje, čim je masa u toplijem stubu krenula u gornje delove, gustina tog stuba (merena pri tlu) se smanjila, a pritisak iznad kopna je počeo da pada. To je stvorilo drugi horizontalni gradijent pritiska između vazdušnih stubova pri tlu, tako da hladniji vazduh iznad mora počinje da se kreće ka nižem pritisku iznad kopna (donja strela). Dakle, stvaranjem temperaturske razlike između dve lokacije, gde je vazduh u početku mirovao, dolazi do kretanja vazduha u istom pravcu i suprotnim smerovima na visini i u blizini površine Zemlje.

3.1.2 Koriolisova sila i centrifugalna sila

Kao što je dobro poznato naša planeta se ne nalazi niti u stanju mirovanja niti uniformnog pravolinijskog kretanja. Ukoliko kad to kažemo imamo u vidu njenu rotaciju oko sopstvene ose, onda, u skladu sa prvim Njutnovim zakonom, to znači da na svako telo koje se nalazi na njoj i koje prati njeno takvo kretanje, mora da deluje neka sila koja će ga primoravati na to. Za tela koja su u čvrstoj vezi sa planetom (drveće, stene na površini, ...) ili mogu da se kreću po njoj koristeći za to silu trenja između nogu i podloge, činjenica da se nalaze na telu koje se kreće ubrzano⁴ nema uticaj jer ih Zemlja, usled veze sa njima, primorava da je prate u takvom kretanju. Međutim, tela koja nisu u čvrstoj vezi sa Zemljom, a to su fluidi (vazduh u atmosferi i voda u hidrosferi), osećaju posledice ubrzanog kretanja Zemlje odnosno referentnog sistema vezanog za nju tako što se javljaju posledice na njihove putanje. U ubrzanim referentnim sistemima naime se javljaju inercijalne sile⁵ koje izazivaju ubrzanja kod tela.

Analiza pokazuje da na tela koja se nalaze na Zemlji, zbog njene rotacije oko sopstvene ose postoje dve sile. Jedna se zove centrifugalna i ona postoji i kada telo miruje u odnosu na površinu Zemlje i kada se kreće a druga koja postoji samo ako se telo kreće se naziva Koriolisova. Centrifugalna sila će biti obrađena kasnije a sada ćemo se prvo pozabaviti Koriolisovom silom.

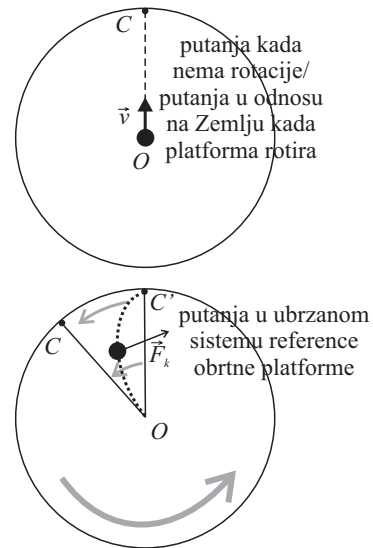
⁴Podsetimo se da uvek kada se brzina menja, bilo po intenzitetu, bilo po pravcu ili smeru, postoji ubrzanje. Tako kod uniformne rotacije Zemlje, brzina se ne menja po intenzitetu već po pravcu.

⁵Tipične inercijalne sile osećamo kada se nalazimo u automobilu koji menja svoju brzinu, koči ili ubrzava a odgovarajuće inercijalne sile su u takvim situacijama, kao što nam iskustvo govori, uvek suprotno usmerene od smera promene brzine automobila. Kada on koči naše telo teži da nastavi kretanje pa se po inerciji naginje napred a kada automobil ubrzava to ubrzanje nas "lepi" za sedišta.

Koriolisova sila

Koriolisova sila je posledica delovanja rotacije Zemlje na tela (recimo deliće vazduha) koje se *kreću* u odnosu na površinu Zemlje. Dobila je naziv prema naučniku Gasparu Koriolisu koji je tokom devetnaestog veka dao opštu definiciju ove sile. Radi jednostavnosti razmotrićemo efekte pri kretanju po platformi koja rotira oko ose koja prolazi pod pravim uglom kroz njen centar (slika 3.5). Pretpostavimo da se nalazimo u centru platforme i da smo zakotrljali bilijarsku kuglu usmerenu iz centra (tačka O) ka njenom obodu (tačka C platforme). Kugla će se u odnosu na Zemlju kretati po pravoj liniji, tj. neko ko bi stajao kraj platforme bi uočio da, u odnosu na njega, kugla ima pravolinijsku putanju. Ukoliko pretpostavimo da kugla pri kretanju može da ostavlja neki trag po platformi, usled njene rotacije putanja kugle bi bila zakrivljena na stranu suprotnu od smera rotacije. Kugla bi i sa stanovišta platforme u početku bila usmerena ka tački C ali bi se ta tačka pomerala brže (jer raspolaže većom perifernom brzinom od kugle) pri rotaciji i na kraju bi kugla došla u tačku C' . Osoba koja stoji pored platforme vidi da se kugla kreće po pravoj liniji a da se platforma pri tome izmiče ispod nje. Neko ko bi se nalazio na platformi bi sa druge strane, zaostajanje kugle za platformom, tj. zakrivljavanje njene putanje morao da objasni delovanjem neke sile. Ova sila koja se javlja u rotirajućim sistemima reference i deluje na tela koja se *kreću* u njima se naziva Koriolisova sila.

Do kvantitativnog izraza za ovu silu se može doći detaljnijim razmatranjem opisanog kretanja. Neka je posmatrano telo neki čovek koji se kreće iz tačke A duž poluprečnika rotirajuće platforme uniformnom brzinom v u odnosu na nju pri čemu nema proklizavanja između njegovih donova i rotirajuće platforme. Za vreme Δt on će, mereno na platformi, preći deo put $\Delta l = AB = v\Delta t$. Za ovo vreme u nepokretnom sistemu reference poluprečnik OC , usled uniformne rotacije ugaonom brzinom $\omega = \text{const}$, će se pomeriti za ugao $\Delta\varphi = \omega\Delta t$. Gledano iz nepokretnog sistema reference jasno je da



Slika 3.5: Skretanje tela usled delovanja Koriolisove sile na obrtnoj platformi.

će se čovek pomeriti iz tačke A u tačku D . Objašnjenje međutim nije tako jednostavno.

Gledano iz nepokretnog sistema reference, čovek uzima učešće u dva kretanja: u kretanju u odnosu na disk brzinom v i kretanju zajedno sa diskom koji se obrće. Periferijska brzina obrtanja delova diska je različita za različita mesta na disku. Neka njena vrednost u tački A iznosi v_p . Mirujući u odnosu na disk, odnosno rotirajući zajedno sa njim, čovek bi, gledano iz nepokretnog sistema reference, prešao luk AA' i došao u tačku A' . Krećući se pak istovremeno brzinom v_p i brzinom v (njihovim vektorskim zbirom $\vec{v} + \vec{v}_p$) on bi došao u tačku B' (jer je $AB = A'B'$). U realnosti čovek dolazi u tačku D . Razlog je što njegova periferijska brzina raste pri udaljavanju od centra platforme duž poluprečnika jer između njegovih donova i platforme nema proklizavanja. Prema tome, telo krećući se duž poluprečnika neprekidno menja svoju brzinu u odnosu na nepokretan sistem koordinata - ono se kreće *ubrzan*. Vrednost tog ubrzanja se može lako odrediti na osnovu dodatnog pređenog puta $\Delta s = B'D$ koji je telo prešlo za posmatrani interval vremena Δt . Prema slici 3.6 se vidi da je $\Delta s = A'B'\Delta\varphi$, ili, pošto je $A'B' = \Delta l$,

$$\Delta s = \omega v(\Delta t)^2.$$

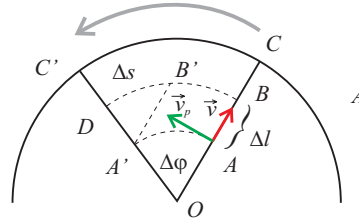
Prema tome, dodatni put raste proporcionalno kvadratu vremena kretanja Δt . Pošto se radi o ravnomerno ubrzanom kretanju mora da važi takođe i

$$\Delta s = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2. \quad (3.2)$$

Upoređivanjem ova dva izraza se vidi da je ubrzanje koje doživljava telo jednako

$$a = 2v\omega. \quad (3.3)$$

To ubrzanje ima pravac normalan na relativnu brzinu v , i u našem slučaju smer ulevo. Da bi se telu saopštilo to ubrzanje, na njega mora delovati sila istog pravca i smera, intenziteta $F = ma$, gde je m masa tela. Takvo kretanje tela u ovom slučaju obezbeđuje sila trenja koja ne dozvoljava proklizavanje tela po disku. sila trenja Ako ne bi bilo te sile telo bi, u sistemu reference vezanom za disk koji se obrće, odstupilo od pravolinijskog (sa



Slika 3.6: Skretanje tela usled delovanja Koriolisove sile na obrtnoj platformi.

stanovišta diska) kretanja duž radijusa diska. Sila intenziteta jednak sili F , ali suprotno usmerena od nje, delovaće prema Trećem Njutnovom zakonu na veze koje drže telo (đonove obuće) da se kreće duž poluprečnika diska. Ukoliko bi te veze nestale (đonovi postali klizavi), ostala bi samo sila reakcije koja bi telo terala na kretanje u suprotnu stranu. Reč je upravo o Koriolisovoj sili koja je posledica kretanja tela u ubrzanom sistemu reference. Njen intenzitet je $F_k = ma = 2mv\omega$. Relativno lako se pokazuje da se Koriolisova sila ispoljava i u situacijama kada se telo kreće po kružnoj putanji čiji je centar na osi obrtanja i da, u oba slučaja važi opšti izraz

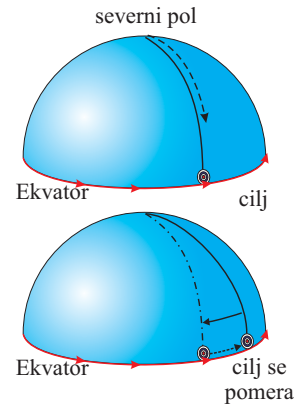
$$\vec{F}_k = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}, \quad (3.4)$$

gde je \times označen vektorski proizvod vektora relativne brzine i ugaone brzine. Pri tome se smatra da vektor ugaone brzine ima pravac ose rotacije a da mu se smer određuje po pravilu desnog zavrtnja. Po ovom pravilu, vektor ugaone brzine pri rotaciji prikazanoj na slici 3.6 bio bio na osi rotacije i usmeren od ravni papira prema nama.

Eksperimentom se lako pokazuje a vidi se i iz formula (3.2) i (3.3) da zakrivljenost isprekidane linije raste, kako usled porasta brzine obrtanja table, tako i usled porasta brzine kretanja tela na tabli. Zakrivljenost pitanje je pri tome to veća što je duže vreme kretanja tela po rotirajućoj platformi. Takođe, može se ustanoviti da suprotna rotacija stvara suprotnu zakrivljenost putanje u slučaju istog smera kretanja kao i da promena smera kretanja po tabli, pri nepromenjenom smeru rotacije, menja smer zakrivljenja.

Delovanje Koriolisove sile na Zemlji se odvija po istim principima kao i kod obrtne table. Međutim, zbog Zemljine složenije geometrije i ovo delovanje je nešto složenije. U svrhu razumevanja delovanja Koriolisove sile zgodno je smatrati rotirajuću platformu na slici 3.5 projekcijom severne

hemisfere na ravan gledano iz vazduha iznad severnog pola. U tom slučaju naime rotacija Zemlje sa zapada na sever upravo odgovara rotaciji prikazanoj na ovoj slici. Pri tome, zaključci koji se dobijaju će ostati u važnosti i na južnoj hemisferi uz promenu pravca skretanja usled promene orijentacije vektora ugaone brzine tj. drugačijeg smera rotacije južne hemisfere gledano sa južnog pola. Tako vazduh koji se kreće recimo od severnog pola ka ekvatoru (slika 3.7) će, težeći da zadrži originalni pravac kretanja, gledano sa



Slika 3.7: Koriolisovo skretanje na Severnoj hemisferi.

Zemlje doživeti skretanje koje se, kao što smo videli, objašnjava delovanjem Koriolisove sile na njega.

Analiza pokazuje da će izraz koji opisuje Koriolisovu silu (3.4) ostati i dalje u važnosti jer će sada vrednost ove sile biti zadata izrazom

$$F_k = 2mv\omega \sin \varphi, \quad (3.5)$$

gde je sa φ označena geografska širina trenutnog položaja tela. Čitaoci upoznati sa smislom vektorskog proizvoda koji se pojavljuje u izrazu (3.4) će u ovom izrazu prepoznati upravo njegovu brojčanu vrednost.

Jako je važno da se znanja o Koriolisovoj sili pravilno primene na zbiivanja u stvarnoj atmosferi. Zato ćemo sva naša dosadašnja znanja o ovoj sili sistematizovati u vidu nekoliko pravila. Njima će biti pridodate još neke važne činjenice, koje nisu mogle da se uoče tokom eksperimenta sa obrtnom tablom. Ove činjenice se mogu formulisati kroz sledeća pravila.

1. Koriolisova sila deluje samo na tela u pokretu. Na tela koja miruju ova sila ne deluje.

2. Koriolisova sila je direktno proporcionalna brzini tela. Ona linearno jača porastom brzine. Važi i obrnuto.

3. Intenzitet Koriolisove sile raste sa $\sin \varphi$, gde je φ geografska širina. Drugim rečima, sa porastom geografske širine njen intenzitet raste. Tako, Koriolisova sila na

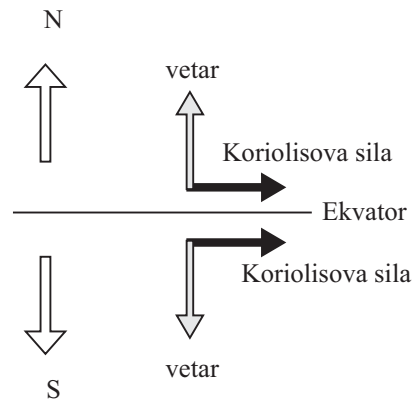
- ekvatoru je jednaka nuli (ukoliko se kretanje odvija duž meridijana)

- severnom i južnom polu je najveća.⁶ Kao što pokazuje slika 3.8 vektor Koriolisove sile je uvek normalan na vektor

vetra, pa

- na severnoj hemisferi deluje desno od smera kretanja, a
- na južnoj hemisferi deluje levo od smera kretanja.

Koriolisova sila ima značaja i u navigaciji. Slično, kao što se za termičku cirkulaciju velikih razmera mora uzeti u obzir i rotacija Zemlje, tako se u navigaciji za kretanja aviona preko velikih rastojanja zahteva korekcija zbog uticaja Koriolisove sile.



Slika 3.8: Delovanje Koriolisove sile na severnoj i južnoj hemisferi.

⁶Koriolisova sila severno i južno od ekvatora na geografskim širinama $\varphi = 30^\circ$ ima polovinu vrednosti sa polova jer je $\sin \varphi = 1/2$ u tom slučaju.

Centrifugalna sila

Centrifugalna sila je, kao što je već rečeno, još jedna posledica Zemljine dnevne rotacije. Njen intenzitet je zadat relacijom (1.1) a kako rastojanje r od ose rotacije raste od pola prema ekvatoru (sa smanjenjem stepena širine) centrifugalna sila ima maksimum na ekvatoru. Ona je po pravcu ortogonalna na osu rotacije a smer joj je "od ose rotacije". Sabirajući se vektorski sa silom teže \vec{F}_g , ona menja pravac delovanja težine tela \vec{Q} (slika 3.9) koja, usled postojanja centrifugalne sile, nije usmerena ka centru Zemlje.

Sa slike 3.9 je intenzitet centrifugalne sile za telo čija je geografska širina φ

$$F_{cf} = m\omega^2 R \cos \varphi, \quad (3.6)$$

odakle se i vidi da je njena maksimalna vrednost za tela koja se nalaze na ekvatoru ($\varphi = 0$) dok je na polu ($\varphi = \pi/2$) centrifugalna sila jednaka nuli.

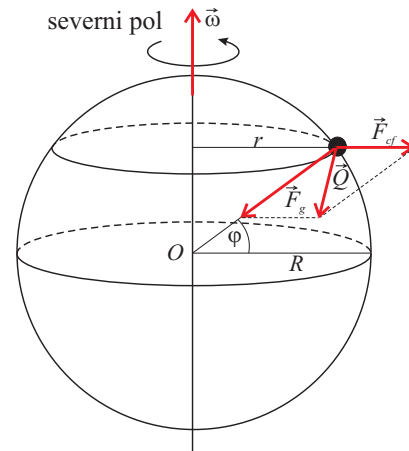
Procena značaja centrifugalne i Koriolisove sile

U slučaju centrifugalne sile koja deluje na neko telo mase m , njen odnos silom teže mg na ekvatoru (gde centrifugalna sila ima maksimalnu vrednost) je

$$\frac{m\omega^2 R}{mg} = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600}\right)^2 \cdot 6,37 \times 10^6}{9,81} \approx 0,003 = 3 \cdot 10^{-3}.$$

Centrifugalna sila na ekvatoru, gde je maksimalna, je prema tome skoro zanemarljiva u poređenju sa gravitacionom silom. Međutim, centrifugalna sila nije jedina posledica rotacije jer postoji i Koriolisova sila.

Ubrzanje koje izaziva Koriolisova sila nema takav pravac da umanjuje vrednost gravitacionog ubrzanja jer deluje pod pravim uglom u odnosu na njega. Pokazaće se da je i ovo ubrzanje jako malo ali ukoliko ono deluje u toku dovoljno dugog (reda veličine sata) perioda vremena, njegov efekat se akumulira i ne može se zanemariti kod tela koja dugo vremena provedu krećući se kroz fluid, ili za same delove fluida, na površini Zemlje. Za struje u okeanima i vetrove u atmosferi, koji imaju praktično beskonačno vreme



Slika 3.9: Uticaj dnevne rotacije Zemlje na težinu tela.

kretanja, Koriolisova sila je značajna, jer ima takozvani *geostrofski* uticaj na njih. Tako na primer za Golfsku struju na geografskoj širini $\varphi = 38^\circ$ i za brzinu $v = 1$ m/s se dobija

$$a_k = 2\omega v \sin \varphi = 2 \left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600 \text{ s}} \right) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \sin 38^\circ \approx 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Nakon jednog sata kretanja, lateralno skretanje Golfske struje iznosi

$$\Delta s = \frac{1}{2} a_c \Delta t^2 \approx \frac{1}{2} \left(10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (3600 \text{ s})^2 \approx 650 \text{ m}.$$

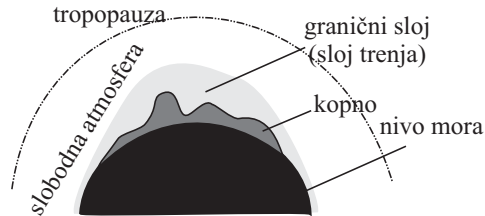
Iz prehodnih izraza se vidi i da je odnos Koriolisovog ubrzanja i ubrzanja Zemljine teže $\frac{a_k}{g} \approx = \frac{10^{-4}}{9,81} \approx 10^{-5}$.

3.1.3 Sila trenja

Prema opštoj definiciji sila trenja predstavlja otpor relativnom kretanju dva tela kada se dodiruju. Tako, sila trenja u atmosferi može da se javlja kao:

- površinsko (spoljašnje) trenje nastalo usled dodira vazduha koji se kreće i tla, ili
- unutrašnje (viskozno) trenje nastalo usled relativnog pomeranja jednih delića (slojeva) vazduha u odnosu na druge.

Prilikom kretanja prizemni vazduh nailazi na razne prepreke. Dolazeći sa njima u dodir predaje tlu deo svoje kinetičke energije. Na taj način kinetička energija vazduha prelazi u kinetičku energiju predmeta na Zemljinoj površini ili u toplotnu energiju tla i vazduha. Svi ovi prelasci su u vezi sa silom površinskog trenja. Pri tome, kao što je poznato, sila površinskog trenja je istog pravca a suprotnog smera u odnosu na strujanje vetra i raste sa porastom brzine njegovog strujanja.



Slika 3.10: Sloj trenja i slobodna atmosfera.

Hrapavost podloge je drugi značajan faktor koji određuje silu površinskog trenja. Što je podloga hrapavija sila trenja se pojačava. Tako je ova sila veća iznad planinskih masiva nego iznad okeanskih (morskih) površina. Sila površinskog trenja opada porastom visine, tim brže što je zemljina podloga ravnija. Sloj atmosfere u kome se oseća njeno delovanje neuporedivo je deblji iznad planinskih masiva (npr. 2000 - 3 000 metara), nego iznad okeana

(npr. 100 m). U meteorologiji je sloj atmosfere u kome se oseća uticaj sile spoljašnjeg trenja poznat pod nazivom **sloj trenja**, dok se deo atmosfere u kojoj sila trenja nema uticaja naziva **slobodna atmosfera** (slika 3.10).

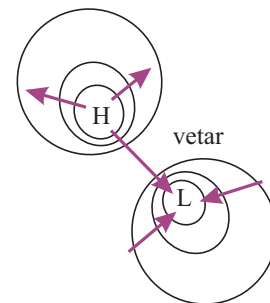
Sila unutrašnjeg trenja je izazvana toplotnim kretanjem molekula vazduha; kako zbog sudara čestica iz slojeva vazduha različitih brzina, tako i prelazom čestica iz jednog sloja u drugi. Tom prilikom se javljaju sile koje imaju za posledicu ubrzanje jednih čestica/slojeva i usporenje drugih čestica/slojeva vazduha. Povećanjem temperature povećava se toplotno kretanje čestica vazduha, što izaziva povećanje unutrašnjeg trenja. Kako atmosfera prima najveći deo toplote od podloge prizemni sloj atmosfere je najzagrejaniji. Zbog toga je u ovom sloju unutrašnja sila trenja veća nego u višim slojevima atmosfere. Pored sila trenja, u prizemnom sloju atmosfere prisutni su i procesi intenzivnog transporta toplote, vodene pare, jezgara kondenzacije, raznih polutanata, itd. Pošto oni imaju uzroke u interakciji između tla i atmosfere nazivaju se **prizemni procesi**. Sloj troposfere u kome se dešavaju prizemni procesi naziva se **granični sloj** (slika 3.10). U prvoj aproksimaciji se može smatrati da su granični sloj i sloj trenja podudarni. Stoga se pod slobodnom atmosferom podrazumevaju delovi atmosfere u kojima nema prizemnih procesa.

3.2 Modeli vetra

Vetar je uvek posledica delovanja sila koje, tokom vremena, menjaju međusobni odnos, čime daju vrlo promenjive doprinose ukupnom kretanju vazduha. Modeli vetra se upravo razlikuju po tome koje sile se smatraju dominantnim pri njegovom nastanku.

3.2.1 Geostrofski vetar

Ukoliko se razmatra nastanak vetra u gornjim slojevima atmosfere, iznad sloja trenja, spoljašnje trenje ne postoji a unutrašnje između delića vazduha je moguće zanemariti. U tom slučaju su, na velikoj skali, bitne jedino Koriolisova sila i gradijentna sila pritiska. U situaciji u kojoj su one u potpunosti izbalansirane, čime je strujanje vazduha

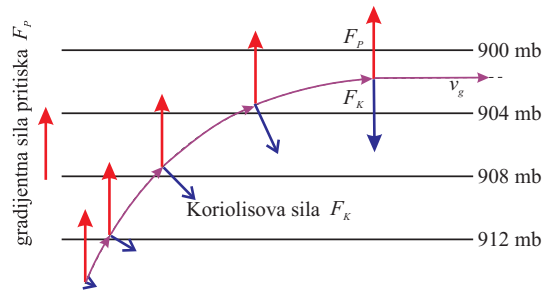


Slika 3.11: Vetar na nerotirajućoj Zemlji nastaje usled delovanja gradijentne sile pritiska.

postalo uniformno, se kaže da postoji geostrofska⁷ ravnoteža.

Naime, ukoliko Zemlja ne bi rotirala, kretanje vazdušnih masa bi bilo izazivano jedino razlikom pritiska, tj. delovanjem gradijentne sile pritiska. Vazduh bi se pri tome kretao od mesta višeg pritiska ka mestu gde je pritisak niži, tj. pod pravim uglom na izobare (slika 3.11 na kojoj su zatvorenim linijama prikazane izobare).

Posledica rotacije Zemlje je delovanje Koriolisove sile na deliće vazduha koji se nalaze u stanju kretanja. Ta sila je uvek usmerena pod pravim uglom u odnosu na brzinu delova vazduha i izaziva njihovo skretanje. Na slici 3.12 je prikazano sumarno delovanje gradijentne sile pritiska i Koriolisove sile na deo vazduha koji se inicijalno kretao pod



Slika 3.12: Efekat rezultujućeg delovanja gradijentne sile pritiska i Koriolisove sile na vazduh.

pravim uglom u odnosu na izobare na severnoj polulopti. Koriolisova sila deluje pod pravim uglom u odnosu na brzinu vazduha a intenzitet joj raste sa rastom brzine. Iz tog razloga ova sila izaziva sve veće skretanje pravca kretanja delića vazduha. U određenom momentu će Koriolisova sila postati jednaka gradijentnoj sili po intenzitetu a biće istog pravca a suprotnog smera sa njom. Od tog trenutka nema promene brzine vetra ni po pravcu ni po intenzitetu a sa slike se vidi da to odgovara situaciji u kojoj vetar duva paralelno sa izobarama.

Uspostavljeno kretanje vazduha se zove geostrofski vetar. Obzirom na jednakost sila koje ga izazivaju važiće

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta x} = 2mv_g\omega \sin \varphi,$$

odakle se za brzinu kretanja geostrofskog vetra dobija

$$v_g = \frac{1}{2\rho m\omega \sin \varphi} \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

⁷Naziv je kovanica reči "geo" i "strophos" pri čemu druga reč označava okretanje. U kontekstu upotrebljenom u ovoj oblasti označava kretanje povezano sa fiktivnom (inercijalnom) silom koja je posledica rotacije Zemlje.

Tako, geostrofski balans se može desiti samo kada vetar već duva. Važno je znati da su u atmosferi uz proces geostrofskog podešavanja, istovremeno prisutni i procesi koji sprečavaju uspostavljanje geostrofske ravnoteže, ili je narušavaju, ako je ona već uspostavljena. Na primer, u takve procese spadaju termička konvekcija i turbulencija nastala delovanjem sile površinskog trenja. Kao što se zna, Koriolisova sila zavisi od brzine vetra i geografske širine. Teoretski posmatrano geostrofskog vetra sigurno nema samo na ekvatoru, jer tamo ne može da se pojavi Koriolisova sila. Međutim, u praksi se smatra da u pojasu 15° severno i južno od ekvatora ne postoji geostrofski vetar, jer je vrednost Koriolisove sile u ovom pojasu zanemarljivo mala. Na drugoj strani, smanjenje uticaja Koriolisove sile bliže ekvatoru znači da je za određeni gradijent pritiska vetar jači bliže ekvatoru, nego bliže polovima. Na primer, za isti gradijent pritiska u slobodnoj atmosferi, brzina vetra u oblasti Sredozemnog mora je veća nego iznad srednje Evrope. U kakvom su međusobnom položaju vektori vetra, gradijentne sile i Koriolisove sile u polju pritiska u odnosu na neki krećući delić vazduha na severnoj i južnoj hemisferi u slučaju kada je uspostavljena geostrofska ravnoteža, šematski je prikazano na Slici 4.14. Osnovne karakteristike geostrofskog vetra mogu se sumirati u sledećim pravilima.

1. Strujanje vazduha (putanja delića) je uvek paralelno izobarama (izohipsama), tako da se na severnoj hemisferi nizak pritisak nalazi sleva u odnosu na smer vetra, dok je na južnoj hemisferi nizak pritisak na desnoj strani. Ovo pravilo je u meteorološkoj praksi i literaturi poznato kao Bejs-Balotov (Buys-Ballot) zakon: ako vetar duva u lea osmatrača, nizak vazdušni pritisak leži sleva na severnoj hemisferi. Navedeni zakon je dobio naziv prema jednom od naučnika koji je sredinom prošlog veka otkrio odnos između vetra i atmosferskog pritiska.

2. Brzina vetra se povećava usled povećavanja gradijenta pritiska. 3. Za isti gradijent pritiska u oblastima bližim ekvatoru brzina vetra je veća nego iznad regiona bližih polovima. Na kraju, podsetimo se da geostrofski balans ne može biti uspostavljen na razmerama kretanja gde se javljaju vetrovi s mora i kopna, planinski i dolinski vetrovi, grmljavinske nepogode, tornada itd. U takvim slučajevima gradijentna sila pritiska je mnogo veća od Koriolisove sile.

Glava 4

Hidrosfera

Ukupna zapremina vode na Zemlji je oko 1284 (milliona kubnih kilometara) a od toga se 97% zapremine nalazi u okeanima. Ukoliko bi sva količina vode bila ravnomerno raspoređena po površini Zemlje (tako da je njena dubina na svim mestima ista) dubina vodenog omotača bi iznosila 2,8 km. Oko 2.25% ukupne količine vode na Zemlji je zarobljeno u polarnim kapama i u glečerima dok je oko 0.75% u zemljištu, jezerima i rekama, a svega oko 0.035% u atmosferi. Predstava o tome koliko je ova količina se lakše stiče iz sledećeg primera: ukoliko bi se sva vodena para iz atmosfere odjednom pretvorila u kišu, ukupne padavine (u proseku na površini zemlje) bi dale vodeni talog debljine oko 3 cm. Sa druge strane merenja pokazuju da je godišnji prosek padavina svega 90-100 cm a za to je odgovoran hidrološki ciklus.



Slika 4.1: Sva voda na Zemlji prikazana kao lopta poluprečnika oko 700 km (97% je slana voda).

4.1 Karakteristike vode

Na našoj planeti postoji život jer se ona nalazi u oblasti u solarnom sistemu u kojoj se temperatura i pritisak kreću u takvim intervalima da je moguća egzistencija vode u tečnom stanju. Kako je voda svuda prisutna na Zemlji, između ostalog pokriva oko 2/3 njene površine, ne bi bilo besmisleno zvati je "Voda" umesto "Zemlja". Na žalost većina vode nije pitka, od prilike

samo 1% vode je dobra za piće i ta količina nije ravnomerno raspoređena. Postoje oblasti koje su izuzetno vlažne i koje imaju probleme sa viškom vode a postoje i pustinjski regioni sa velikim deficitom ove supstance.

Voda je od velike važnosti za sva živa bića. Život je i počeo u vodi, odnosno u okeanima pre oko 2600 miliona godina. Mnoge biljke i životinje i danas mogu da žive jedino u vodi. Ljudska tela sadrže oko 70% vode. Voda je veoma važna za prenos hemijskih supstanci između ćelije i njene okoline.

Tačka mržnjenja i tačka isparavanja (100°C) vode se mnogo razlikuju od onih kod drugih supstanci. Obe temperature su naime neočekivano visoke, kao što se može videti iz tabele 3.1.

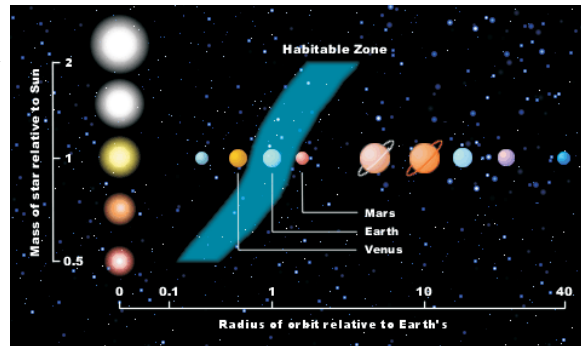
jedinjenje	molekularna masa [g/mol]	tačka topljenja [$^{\circ}\text{C}$]	tačka ključanja [$^{\circ}\text{C}$]	opseg temperature [$^{\circ}\text{C}$]
H_2O	18	0	100	100
H_2S	34	-85	-60	25
H_2Se	81	-66	-41	25
H_2Te	129,6	-49	-2	47
H_2Po	212	raspada se	raspada se	

Tabela 4.1: Neke osobine vode i drugih jedinjenja.

Takođe je opseg temperature u kojoj je voda u tečnom agregatnom stanju neočekivano veliki. Za sve ove (kao i za mnoge druge) neobične karakteristike vode, odgovorna je vodonična veza.

Ovaj opseg temperature, u kome je voda u tečnom stanju, definiše "prsten života" u solarnom sistemu, tj. deo solarnog sistema gde život zasnovan na vodi može da postoji. Venera i Merkur su previše topli, dok su Jupiter, Saturn i ostale udaljenije planete previše hladne, da bi voda postojala u tečnom stanju.

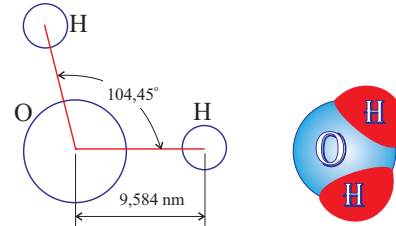
Gustina vode je najveća na 4°C . Led I (postoji bar 10 faza leda) je otvorene strukture, koji se drži zajedno vodoničnim vezama, i manje je gus-



Slika 4.2: Zona nastanjivosti.

tine od tečne vode. Inače većina drugih tečnosti ima najveću gustinu na tački mržnjenja. Na temperaturi mržnjenja u vodi počnu da se stvaraju ledeni molekularni klasteri koji imaju manju gustinu od tečne faze vode jer su molekuli u ledu manje kompaktno pakovani. Posledica ovakve prirode vode je da se ona leđi od površine prema dnu što ima ogromne implikacije na preživljavanje riba i vodozemaca tokom zime.

U ledu četiri vodonične veze oko svakog molekula vode održavaju molekule vode u pravilnom geometrijskom rasporedu čime nastaje kristalna rešetka. U vodi, zbog toplotnog kretanja, vodonične veze se neprekidno stvaraju i raskidaju pa ima molekula i sa manje od četiri veze. Takvi molekuli ne moraju da budu u pravilnom rasporedu pa mogu da ispuce i šupljine koje postoje u pravilnom rasporedu u kristalu. Zbog toga raste broj molekula po jedinici zapremine pa je i gustina tečne vode u odnosu na led.



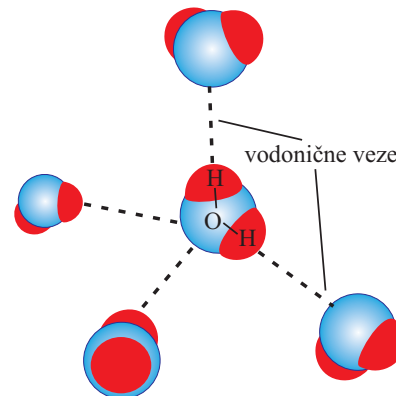
Slika 4.3: Molekul vode.

Voda ima najveći specifičnu toplotnu kapacitivnost među tečnostima.¹ Posledica ovako velike toplotne kapacitivnosti je da je voda dobar rezervoar toplote. Na taj način i svetski okeani utiču na osobine klime.

Voda ima i najveću latentnu toplotu isparavanja.² Latentna toplota isparavanja igra veoma važnu ulogu u formiranju oblaka i oluja i u velikoj meri utiče na dinamiku atmosfere.

Najveći joj je takođe i koeficijent toplotnog provodđenja (ako se izuzmu tečni metali).³ To znači da voda nije naročito dobar izolator. Zato i osećamo hladnoću dok plivamo i zato nam je hladnije u vlažnoj odeći.

Voda ima veću dielektričnu konstantnu od skoro svih supstanci. Prisjetimo se da se ova veličina pojavljuje u imeniocu izraza za Kulonov zakon. Ve-



Slika 4.4: Vodonične veze u vodi.

¹Za etil alkohol iznosi oko $2,5 \times 10^3$ J/(kg K), dok je za živu $1,3 \times 10^2$ J/(kg K).

²Za etil alkohol je oko $0,86 \times 10^6$ J/kg, dok je za živu $0,3 \times 10^6$ J/kg.

³Koeficijent toplotnog provodđenja vode je $5,95 \times 10^{-5}$ W/(m K), etil alkohola oko $1,78 \times 10^{-5}$ W/(m K), dok je za živu 8×10^{-4} W/(m K).

lika dielektrična konstanta znači manju silu između naelektrisanih jona u vodenom rastvoru tako da soli koje su disosovale u vodi teže da ostanu u ovakvom stanju. Rezultat toga je da je voda skoro univerzalan rastvarač, što je od velike važnosti za, pre svega, hemijske procese u atmosferi i okeanima.

Koeficijent površinskog napona je veći od svih tečnosti sem žive. Jedna od konsekvenci toga je dobro zadržavanje vode u zemljištu. Usled toga su i kišne kapi skoro sferične, prečnika do 1 mm.

4.2 Hidrološki ciklus

Ciklus kruženja vode u prirodi predstavlja postojanje i kretanje vode na, u i iznad tla. Voda na planeti je u stalnom kretanju i uvek u drugim vidovima, od tečnog stanja do vodene pare i leda i nazad. Ciklus kruženja vode u prirodi postoji milijardama godina i sav život na Zemlji zavisi upravo od njega; bez kruženja vode, naša planeta bi predstavljala prilično nepodesno mesto za život.

Hidrološki ciklus nema početnu tacku, ali se u njegovom objašnjavanju mora poći od negde, recimo od okeana. Sunce, koje upravlja kruženjem vode u prirodi, zagreva vodu u okeanima. Jedan njen deo isparava i kao vodena para dospeva u vazduh. Evaporacija (isparavanje) se odvija i u slatkodvodnim jezerima i rekama. Sa kopna, u okviru evapotranspiracije,

voda se oslobadja iz biljaka i zemljišta, i takođe u vidu vodene pare prelazi u vazduh. Mali deo vode u atmosferi potiče od sublimacije, gde se sneg i led direktno preobraćaju u vodenu paru, potpuno preskočivši fazu topljenja. Sublimacija se javlja češće u određenim vremenskim uslovima, kao što je niska relativna vlažnost i suvi vetrovi. Javlja se češće na višim nadmorskim visinama, gde je vazdušni pritisak manji nego na nižim.

Topao, vlažan vazduh se podiže, širi (pod sniženim pritiskom u višim slojevima atmosfere) i hladi se. Vodena para se u višim delovima atmosfere



Slika 4.5: Hidrološki ciklus.

kondenzuje i nastaju oblaci.

Vazdušne struje nose oblake oko planete, pri čemu se delovi oblaka sudaraju, uvećavaju i tako nastaju padavine. Većina padavina pada u okeane (prekrivaju 75% površine planete). Jedan deo padavina je u vidu snega i može se nakupljati u vidu ledenih kapa i glečera. Sneg se u toplijim regionima često otapa na proleće, a nastala voda je poznata kao snežni oticaj. Dok se veći deo padavina vraća ponovo u okeane, jedan deo dospeva u kopno, gde, usled gravitacije, teče po površini kao površinsko oticanje. Deo površinskog oticaja odlazi u reke i kreće se kao rečni tok prema okeanima, dok se jedan deo akumulira kao slatka voda u jezerima i rekama. Ne dospeva sav oticaj u površinska vodna tela - veći deo prodire u zemljište (infiltracija). Od toga, deo dospeva u duboke slojeve, obnavljajući akvifere (zasićene stene ispod površine terena), koji sadrže ogromne količine podzemnih voda u dugim vremenskim periodima.

Neke podzemne vode ostaju blizu površine terena i mogu se proceđivati nazad u površinska vodna tela (i okean) u vidu pražnjenja podzemnih voda, a neke nalaze otvore na površini terena i pojavljuju se u vidu slatkovodnih izvora. Vremenom, ova voda nastavlja da se kreće, pri čemu dospeva i do okeana, gde se ciklus kruženja završava i počinje.

Brzina cirkulacije vode unutar hidrološkog ciklusa je veoma velika. Kako je ukupna masa vode u atmosferi konstantna, padavine su uravnotežene isparavanjima. Merenja i poređenja svih protoka pokazuju da je prosečno vreme tokom kojeg se molekuli vode nalaze u atmosferi oko 10 dana.

4.3 Vodena para u atmosferi

U atmosferi postoji svakog momenta oko $1,24 \times 10^{16}$ kg vodene pare. Kada bi ona sva pala u obliku kiše na tlo, to bi odgovaralo sloju vode debljine oko 24 mm. Srednja godišnja količina padavina (kiša, sneg, rosa, ...) po celoj površini Zemlje iznosi oko $3,96 \times 10^{17}$ kg (što odgovara sloju debljine oko 780 mm). To znači da se celokupna prisutna količina vode u atmosferi u proseku zameni $780/24 \sim 32$ puta tokom godine, odnosno svakih 11 dana.

Kako je latentna toplota isparavanja vode $L_i = 2,4 \times 10^6$ J/kg, prosečna količina solarne energija koja se utroši na isparavanje iznosi

$$\frac{3,96 \times 10^{17} \cdot 2,4 \times 10^6}{265 \cdot 24 \cdot 3600} \approx 3 \times 10^{13} \text{ kW},$$

što čini oko 30% ukupne energije apsorbovane sa Sunca ($\sim 10^{14}$ kW).

Vodena para se podiže uvis sa površine Zemlje konvektivnim i turbulentnim strujanjima koja se odvijaju u donjim slojevima njene atmosfere.

Pri tome, koncentracija vodene pare u atmosferi, u proseku, opada sa visinom. U celini gledano, tropski regioni su izvori vodene pare dok su polovni "ponori".

Pri podizanju vodene pare ona se širi i hladi i usled toga kondenzuje dajući oblake i kapi kiše, pri čemu se oslobađa latentna toplota. Iz tog razloga je vodena para važna za transfer energije sa površine Zemlje do viših slojeva atmosfere. Na globalnoj skali kretanje vazdušnih masa koje sadrže vodenu paru od ekvatora ka polovima, prenosi veliku količinu toplote iz tropskih regiona ka višim geografskim širinama.

Voda ima veliki uticaj na procese u atmosferi. Glavne oblasti njenog uticaja su:

- Termodinamički procesi u atmosferi (kroz kondenzaciju i isparavanje)
- Formiranje oblaka koji utiču na planetarni albedo i padavine
- Prečišćavanje atmosfere unutar oblaka (vezivanjem supstanci za kapi vode unutar oblaka, ukoliko je reč o higroskopnim aerosolima), ispiranja (uklanjanje aerosoli i razlaganje rastvorljivih atmosferskih gasova koji bivaју zarobljeni kapima kiše dok padaju)
- Hemijski procesi u atmosferi (kao rastvarač supstanci koje dalje učestvuju u hemijskim reakcijama)
- Apsorpcija zračenja jer je voda važana gas staklene bašte.

4.3.1 Fazne transformacije vode

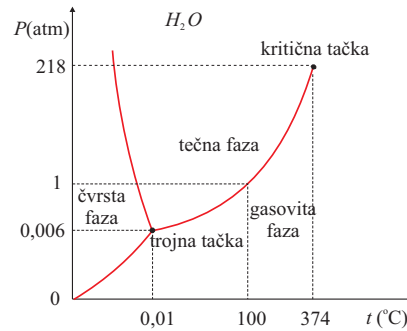
Vodena para postoji u vazduhu na bilo kojoj temperaturi jer se isparavanje svake tečnosti vrši na bilo kojoj temperaturi. Pri tome naravno brzina isparavanja (izražena recimo preko mase tečnosti koja u jedinici vremena pređe iz tečnog u gasovito stanje) raste sa temperaturom. Isparavanje se objašnjava time što kod tečnosti, kao i kod gasova, molekuli imaju različite energije, i veće i manje od srednje vrednosti energije, čija je vrednost određena temperaturom tečnosti T . To znači da na svakoj temperaturi u tečnosti postoje tako brzi molekuli koji pri dolasku na površinu tečnosti mogu da savladaju privlačenje susednih molekula i probivši se kroz površinski sloj napuste tečnost. Što je temperatura tečnosti viša, to je veći broj brzih molekula, i prema tome, brže se vrši isparavanje.⁴

⁴Pri isparavanju tečnost napuštaju brzi molekuli, i pri tome troše jedan deo svoje energije za vršenje rada protiv sila molekulskog privlačenja koje ih drže u tečnosti. Usled toga opada srednja energija molekula koji ostaju u tečnosti pa se ona isparavanjem hladi. Obrnuto, pri kondenzovanju pare u tečnost, njeni molekuli se privlače, usled čega raste njihova brzina, pa, prema tome, i kinetička energija a time i temperatura tečnosti.

Latentna toplota topljenja (toplota potrebna da se prevede 1 kg leda u vodu bez promene njene temperature) iznosi 334 kJ/kg. Latentna toplota isparavanja (toplota potrebna da se 1 kg vode prevede u gasovito stanje bez promene njene temperature) iznosi 2 300 kJ/kg. Da je reč o velikoj količini toplote vidi se iz sledećeg razmatranja. Pošto je je za suv vazduh $C_P \approx 1000$ J/(K kg), toplotom koja je jednaka latentnoj toploti isparavanja je moguće zagrejati 1 kg vodene pare tako da promeni temperaturu za 2 300 K.

Toplota isparavanja troši se na rade koji vrše molekuli pri prolasku kroz površinski sloj tečnosti, i na rad koji je u vezi sa povećanjem specifične zapremine supstance V_0 pri njenom prelazu iz tečnog u gasovito stanje.

Na slici 4.6 je prikazan fazni dijagram za vodu. Pune linije između faza sadrže tačke u kojima su faze u ravnoteži. Npr. na 1,00 atm tačka ključanja vode je 100°C. Sa povećanjem pritiska temperatura ključanja raste ravnomerno do 374°C na pritisku od 218 atm. Ova kriva se završava u *kritičnoj tački*, s obzirom na to da na višim temperaturama tečna faza ne može da postoji bez obzira na vrednost pritiska. Na sličan način, kriva između oblasti u kojima je materija u čvrstoj i tečnoj fazi daje temperaturu topljenja (očvršćavanja) za različite pritiske. Na primer, tačka topljenja vode je 0°C na pritisku od 1 atm, kao što i znamo iz svakodnevnog iskustva. Grafik takođe pokazuje da je (na datoj temperaturi) za prelazak iz čvrste u tečnu fazu, i obratno, dovoljna promena samo pritiska.⁵



Slika 4.6: Pojednostavljeni fazni dijagram za vodu. Podela na osama nije linearna.

Interesantno je da na nižim pritiscima voda ne postoji u tečnoj fazi već ili u čvrstom ili gasovitom stanju (na svim pritiscima ispod 0,006 atm). Direktna fazna transformacija između čvrstog i gasovitog stanja se naziva **sublimacija**.⁶ Sve tri krive linije na faznom dijagramu se sreću u jednoj tački koja se naziva **trojna tačka** jer su u njoj sve tri faze u ravnoteži. Za vodu trojna tačka se nalazi na 273,16 K.

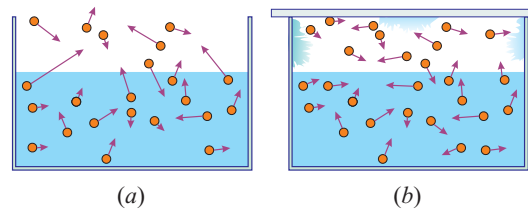
Bilo da je voda u tečnom bilo da je u čvrstom stanju, na svakoj tem-

⁵Grudva snega se topi u rukama usled povećanja pritiska.

⁶Sublimacija se sreće u prirodi kada delovi snežnog pokrivača direktno iz čvrste faze prelaze u gas. Takođe se odvija u frižiderima sa automatskim odmrzavanjem, u industriji hrane koja se zamrzava na suv način, u dezodoransima u čvrstom agregatnom stanju, ...

peraturi iznad sebe stvaraju paru jer u površinskom sloju uvek postoje neki molekuli dovoljne energije da pređu u gasovitu fazu (slika 4.7 (a)). Nemaju međutim svi molekuli gasne faze dovoljno energije da ostanu slobodni već neki bivaju privučeni molekulima vode i ponovo kondenzovani. Ukoliko se posuda u kojoj se nalazi voda zatvori (slika 4.7 (b)), isparavanje se nastavlja, povećava se pritisak pare a time i kondenzacija, sve dok molekula pare ne bude dovoljno da kondenzacija potpuno uravnoteži isparavanje. Kada se postigne ravnoteža, gustina pare je konstantna a time i njen pritisak. Para koja je u stanju dinamičke ravnoteže sa svojom tečnošću ili kristalom (čvrstom fazom) naziva se *zasićena para*, a njen pritisak *napon pare*. Kada se vodena para pomeša sa vazduhom pod uslovima opisane ravnoteže on je zasićen vodenom parom.

Količina vodene pare u atmosferi je ograničena pritiskom njene zasićene pare a on je u vezi sa temperaturom tako što u vazduhu više temperature može da se nađe veća količina vodene pare. Ukoliko se vazduh zasićen vodenom parom ohladi višak vodene pare (u odnosu na novi-niži pritisak zasićene pare) se kondenzuje uz oslobađanje latentne toplote kondenzovanja koja je jednaka latentnoj toploti isparavanja po brojčanoj vrednosti.



Slika 4.7: Fazne transformacije u otvorenoj i zatvorenoj posudi.

Veza latentne toplote kondenzovanja/isparavanja, parcijalnog pritiska vodene pare i temperature je data Klauzijus-Klapejronovom jednačinom

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\lambda}{RT^2}P, \quad \frac{dP}{dT} = \frac{\lambda}{RT^2}P, \quad (4.1)$$

koja određuje vrednost parcijalnog pritiska pare bilo koje supstance koja je u ravnoteži sa njenom kondenzovanom fazom. U ovoj relaciji je λ latentna toplota isparavanja u kJ/mol. Latentna toplota se obično definiše po jedinici mase (u oznaci L_i) i zadaje u jedinicama kJ/kg, što znači da je $L_i M = \lambda$ gde je M molekulska masa. Često se, preko uvedenih veličina, definiše i tzv. specifična gasna konstanta vodene pare izrazom $R_{sv} = R/M$ gde indeks s označava da se radi o zasićenoj vodenoj pari (zasićenje-*saturation*) a v da

je reč o vodi.⁷ Rešavanjem jednačine (4.1) dobija se

$$P_s = P_s^0 e^{-\frac{\lambda}{R}[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}]} = P_s^0 e^{-\frac{L_v}{R_s}[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}]}.$$
 (4.2)

U ovom izrazu je sa P_s^0 označen parcijalni pritisak zasićene pare pri standardnim uslovima (298,15 K i pritisak vazduha od jedne atmosfere). Važno je uočiti da ova jednačina pokazuje da parcijalni pritisak zasićene vodene pare u velikoj meri zavisi od temperature; zagrejan vazduh može da sadrži mnogo više vodene pare od hladnog vazduha. Npr. u tropskim krajevima (temperature vazduha 25 °C) parcijalni pritisak vodene pare je 32 mb; na polovima (temperatura -20 °C) parcijalni pritisak iznosi svega 1,2 mb.

Na slici 4.8 je prikazana zavisnost (4.2). Količina vodene pare u vazduhu je prikazana tako što je kilogram vazduha zasićenog vodenom parom na datoj temperaturi na nivou mora kondenzovan i usut u menzuru.

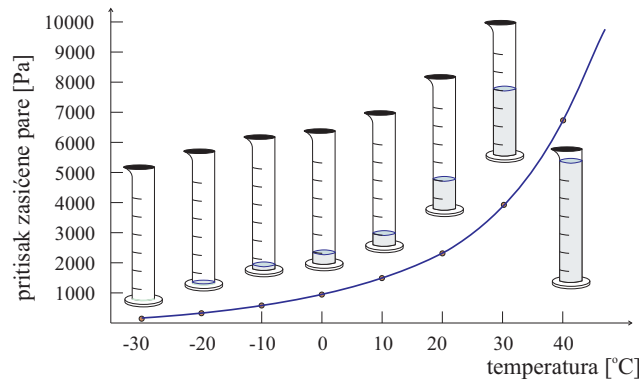
Količina vodene pare u atmosferi može da se izrazi i na nešto drugačiji način. Tako se definiše i specifična vlažnost q relacijom

$$q = \frac{m_v}{m} = \frac{\rho_v}{\rho},$$
 (4.3)

gde je m_v masa vodene pare u posmatranoj količini vazduha mase m . Sa ρ_v i ρ su označene gustine vodene paru u vazduhu i vazduha. Jednakost odnosa masa i gustina u gornjem izrazu sledi iz činjenice da je zapremina ista u oba slučaja. Na osnovu jednačina idealnog gasnog stanja, napisanih za vodenu paru i vazduh, dobija se $\rho_v = \frac{P_v}{R_{sv}}$ i $\rho = \frac{P}{R_s T}$. Odavde se dobija

$$q = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{P_v M_v}{P M}.$$
 (4.4)

⁷Takođe, kada je reč isključivo o vodi, parcijalni pritisak P se označava često slovom ne vodene pare slovom e_s .



Slika 4.8: Pritisak zasićene pare kao funkcija temperature.

Obično je moguće ignorisati uticaj vodene pare na prosečnu molarnu masu vazduha \bar{M} , tako da ona iznosi 28,96. Odavde sledi da je specifična vlažnost zasićenja $q_s = \frac{P_{vs}M_v}{PM}$. Potrebno je primetiti da iako pritisak pare zasićenja ne zavisi od atmosferskog pritiska, specifična vlažnost zasićenja zavisi.

Drugi način izražavanja količine vodene pare u vazduhu je preko njegove relativne vlažnosti W . Ova veličina, obično se izražava u procentima, predstavlja odnos parcijalnog pritiska vode u atmosferi prema pritisku zasićene pare na datoj temperaturi

$$W = \frac{\rho_v}{\rho_{sv}} = \frac{P_v}{P_{vs}}. \quad (4.5)$$

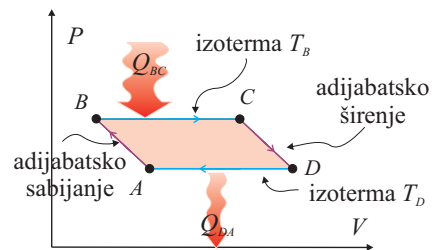
Količina vodene pare u atmosferi, tj. relativna vlažnost atmosfere, se određuje najčešće preko tačke rose. Određivanje tačke rose se vrši na ohlađenim površinama. Vazduh u kontaktu sa ovim površinama se hladi na konstantnoj temperaturi sve dok ne dostigne zasićenje i počne da se taloži rosa. Temperatura na kojoj se vrši ovaj proces se naziva tačka rose T_d . Kako se količina pare u vazduhu nije menjala dok nije dostignuta tačka rose, pritisak je takođe ostao konstantan a parcijalni pritisak vode mora takođe biti konstantan tokom procesa hlađenja. Prema tome je $P_v(T) = P_{sv}(T_d)$. Odavde je relativna vlažnost $W = P_s(T_d)/P_s(T)$.

U osnovi postoje tri tipa zasićenja vazduha vodenom parom: povećanje količine vodene pare u vazduhu, sniženje temperature vazduha i mešanje hladnog vazduha sa toplim vlažnim vazduhom.

Procenjuje se da je zapremina vode u atmosferi u bilo kom trenutku oko 12 900 kubnih kilometara. To znači da kada bi se odjednom sva voda iz atmosfere sručila na Zemlju u vidu kiše, prekrila bi površinu kopna vodom dubokom 2,5 centimetara.

4.3.2 Izvođenje Klauzijus-Klapejronove jednačine

Do Klauzijus-Klapejronove jednačine se može doći na osnovu posmatranja jednog termodinamičkog ciklusa Karnoovog tipa u kome je radni fluid dvofazni sistem koji se sastoji iz tečnosti i njene zasićene pare koji se nalaze u cilindru sa pokretnim klipom. Pošto je pritisak zasićene pare jednoznačno određen njenom temperaturom (vidi fazni dijagram,



Slika 4.9: Karnoov ciklus u dvofaznom sistemu.

slika 4.6), u takvom sistemu su izoterme $T = \text{const.}$ istovremeno i izobare $P = \text{const.}$ Na $P-V$ dijagramu izoterme će stoga biti horizontalne prave linije.

Neka je početno stanje dvofaznog sistema na slici 4.9 prikazano tačkom A u kome se u cilindru nalazi mešavina (zapremine V_A) tečnosti i njene zasićene pare na pritisku P_A . Ukoliko se malo pritisne klip cilindra, tako da se zapremina smeše smanji na V_B , sistem će doživeti adijabatska sabijanje. Usled toga će temperatura smeše porasti a ona će od zasićene postati nezasićena. To znači da će, da bi smeša ponovo bila zasićena, i time opet došla u ravnotežno stanje, doći do isparavanja određene količine tečnosti. U toku tog procesa, koji se odvija na konstantnoj temperaturi, a time i konstantnom pritisku zasićene pare, gušća tečnost (mala količina nje) biva zamenjena njenom ređom parom. Time, tokom dolaska u ravnotežno stanje, sistemu se poveća zapremina izotermiski/izobarno do neke zapremine V_C .

U procesu $B-C$ se odvija isparavanje. Isparavanje je praćeno hlađenjem sistema, odnosno okoline u kojoj se on nalazi. Toplota se pri tome troši na raskidanje među molekularnih veza u tečnosti da bi došlo do njihovog prelaska u gasnu fazu. Toplota koja je potrebna da se to izvrši u sistem ulazi iz okoline i ona iznosi Q_{BC} .

Neka je sada ravnoteža poremenćena adijabatskim širenjem do zapremine V_D , tako da se temperatura i pritisak pare dovedu na početne vrednosti koje je on imao u tački A . Sistem opet nije u ravnoteži jer je količina molekula u pari veća nego što je inače na toj temperaturi pa dolazi do njenog kondenzovanja. Taj proces je izoterman, odnosno odvija se bez promene pritiska zasićene pare. U procesu kondenzacije se oslobađa količina toplote Q_{DA} kojom se zagreva okolina.

S obzirom na to da su procesi u sistemu reverzibilni (Karnoov ciklus), ukupna promena entropije je jednaka nuli (promena entropije u procesu je jednaka zbiru odnosa razmenjenih količina toplote i temperaturatura na kojima se to odvijalo $\Delta S = \sum Q/T$), odakle sledi relacija

$$\frac{Q_{BC}}{T_B} = \frac{Q_{DA}}{T_D}. \quad (4.6)$$

Rad pri Karnoovom ciklusu je jednak razlici toplota Q_{BC} i Q_{DA} , odnosno

$$A = Q_{BC} - Q_{DA} = Q_{BC} \frac{T_B - T_D}{T_B} = \frac{Q_{BC}}{T_B} \Delta T. \quad (4.7)$$

Sa druge strane rad u ciklusu je jednak površini koju on omeđuje. U ovom

slučaju to je površina paralelograma

$$A = (V_D - V_A)(P_B - P_A) = (V_D - V_A)\Delta P. \quad (4.8)$$

Izjednačavanjem desnih strana prethodne dve jednačine i njihovim sređivanjem, dobija se Klauzijus -Klapejronova jednačina

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{Q_{BC}}{T_B(V_D - V_A)}, \quad \frac{dP}{dT} = \frac{Q_{BC}}{T_B(V_D - V_A)}, \quad (4.9)$$

koja je prikazana i preko konačnih promena veličina ΔP i ΔT a i preko beskonačno malih promena dP i dT . Ova relacija seobično se prikazuje u uprošćenijoj varijanti koja se sastoji u sledećem. Neka se u cilindru nalazi 1 kg vode (u obe faze). U tom slučaju će količina toplote Q_{BC} biti tačno jednaka toploti isparavanja L_i odnosno latentnoj toploti isparavanja. Neka je u stanju D sva supstanca u obliku vodene pare dok je u stanju A sva u tečnoj fazi. Obzirom na značajnu razliku u gustinama ove dve faze, važiće $V_D \gg V_A$, tako da se V_A može zanemariti a za V_D staviti da je prosto jednako V . To znači da gornja relacija poprima oblik

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{L_i}{Tv}, \quad \frac{dP}{dT} = \frac{L_i}{Tv}, \quad (4.10)$$

gde je sa v označena zapremina jedinice mase ($v = V/m$).

Ukoliko se pretpostavi da za paru važi jednačina idealnog gasnog stanja $Pv = RT/M$, prethodna jednačina postaje

$$\frac{dP}{dT} = \frac{ML_i}{RT^2}P, \quad (4.11)$$

što se, nakon smene $L_l = \lambda$, svodi na jednačinu (4.1).

Hlađenje atmosfere

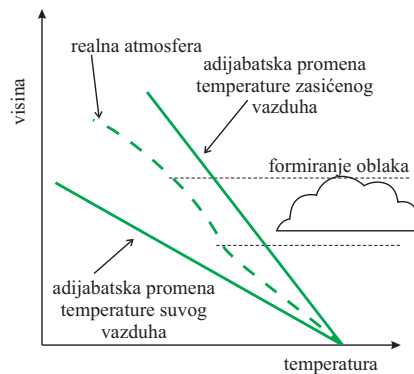
Rosa i mraz predstavljaju rezultat kondenzacije ili sublimacije vodene pare na čvrstim površinama (naročito na tlu). Čvrste površine zrače toplotu tokom noći, hladeći se (i hladeći vazduh neposredno iznad njih) do temperatura ispod pritiska zasićene pare. Hlađenje se javlja na konstantnom parcijalnom pritisku vodene pare sve do trenutka kada je dostignut pritisak zasićene pare. Postoje dva važna slučaja. Prvo, vazduh će postati zasićen sa mogućnošću prelaska u led i ova temperatura se naziva tačka zamrzavanja T_z . Zamrzavanje se neće uvek desiti jer ovaj proces zahteva odgovarajuću površinu da bi se formirao led. Stoga se hlađenje može nastaviti sve dok

vazduh ne postane zasićen sa mogućnošću prelaska u vodu. Ova temperatura se naziva tačka rose T_d . Kondenzacija se javlja u vidu mikroskopskih kapi koje se formiraju na centrima kondenzacije (na primer na aerosolima u atmosferi). Ovo rezultira maglom. Kako se kapi formiraju, one mogu da zrače toplotu (ponašaju se kao crna tela). Vazduh se ipak više zagreva usled oslobađanja latentne toplote kondenzovanja prilikom stvaranja magle. Efekat je taj, da je brzina hlađenja ispod tačke rose manja, nego iznad tačke rose.

4.4 Formiranje oblaka

Kao što je rečeno, količina vodene pare u atmosferi zavisi od temperature atmosfere. Topliji vazduh može da primi više vode u obliku pare dok se u hladnijem vazduhu ona kondenzuje. Sem toga, u vlažnijem vazduhu se javlja vertikalna konvekcija⁸ pri kojoj se on hladi adijabatski što izaziva kondenzovanje vodene pare i stvaranje oblaka. Prema tome, vlažan vazduh, je nestabilan i podložan konvektivnom kretanju koje u konačnom dovodi do formiranja oblaka i uslova za stvaranje oluja.

Kada se vodena para kondenzuje oslobađa se energija jednaka latentnoj toploti isparavanja/kondenzovanja. Ova toplota zagreva vazduh pa se, usled toga, vlažan vazduh ne hladi jednako brzo kao suv pri podizanju u više slojeve atmosfere (slika 4.10). Proračuni pokazuju da u slučaju vazduha zasićenog vodenom parom, brzina adijabatskog opadanja temperature sa visinom iznosi oko 6,5 K/km. U realnosti, prava brzina opadanja temperature se nalazi između vrednosti za suv i vazduh zasićen vodenom parom i zavisiće od količine vodene pare u vazduhu.

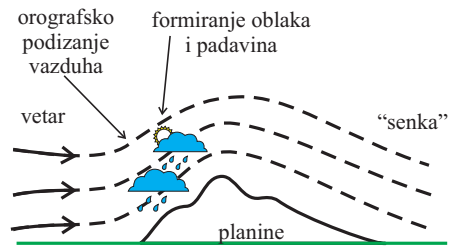


Slika 4.10: Promena temperature atmosfere sa visinom i formiranje oblaka.

⁸Suv vazduh se sastoji od: 78% azota (N_2) molekularne mase 28; 21% kiseonika (O_2) molekularne mase 32; 0,9% argona (Ar), itd. tako da je srednja molekularna masa suvog vazduha 29. Ukoliko se molekuli vodene pare (H_2O), molekularne mase 18, nađu u toj smeši, njena srednja masa će opasti. Na taj način je na istoj temperaturi i pritisku, vazduh veće vlažnosti redi od suvog vazduha.

Razmotrimo dodatno vertikalno kretanje vazduha sa vodenom parom. Pretpostavimo da je određena zapremina vazduha koju posmatramo, u momentu kada je počela da se kreće naviše, bila nezasićena vodenom parom. Pri podizanju se hladi a dok relativni odnos molekula vode i ostalih molekula u njemu ostaje isti raste mu relativna vlažnost jer hladniji vazduh ima niži pritisak zasićene pare. Kad relativna vlažnost dostigne 100% odigrava se kondenzacija usled koje se formiraju oblaci. Premat tome oblaci se formiraju uvek kada je: vazduh dovoljno vlažan i kada vertikalni temperaturski gradijent u njemu prevazilazi ranije izračunatu vrednost Γ .

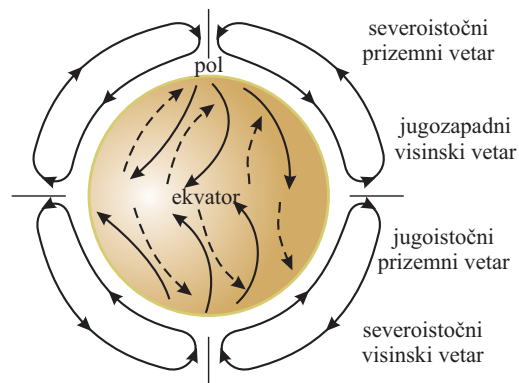
Vazduh ne mora da se kreće u vis samo usled konvektivnih kretanja, već to kretanje može da bude izazvano i takozvanim orografskim podizanjem izazvano reljefom (slika 4.11), koje takođe dovodi do kondenzovanja vodene pare, formiranja oblaka i padavina. Pri tome se padavine formiraju na vetrovitj strani planine dok je zavetrina u svojevrsnoj ki šnoj "senki". Orografska podizanje vazduha ima lokalni uticaj na klimu a ovaj uticaj može da bude i šireg značaja ukoliko je planinski region dovoljno veliki.



Slika 4.11: Orografska podizanje vazduha.

4.5 Globalna cirkulacija u atmosferi

Kao što je ranije napomenuto, usled sfernog oblika Zemlje i njene stabilne rotacije oko jedne ose, oblasti na ekvatoru dobijaju veću količinu solarno zračenje od polarnih regiona. Jedan od razloga je što na ekvatoru zračenje na Zemlju nailazi pod pravim uglom dok na polove pada praktično tangencijalno a drugi što je albedo Zemlje mnogo veći na polovima nego na ekvatoru. Ostale oblasti se pri tome nalaze



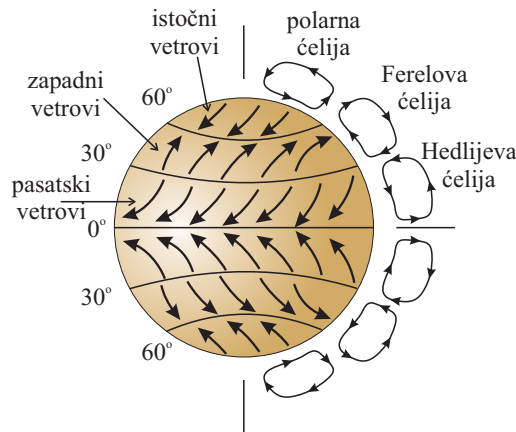
Slika 4.12: Hedlijeva cirkulaciona ćelija.

između ova dva krajnja slučaja.

Da bi se lakše razumela opšta cirkulacija koja se ovom prilikom uspostavlja u atmosferi, zgodno je da se krene od uprošćenog modela ove pojave. To znači da treba pretpostaviti da je Zemlja glatka lopta bez ispupčenja, svuda jednakog sastava površine i da u atmosferi i između nje i površine Zemlje. Neka takva idealizovana Zemlja rotira na uobičajen način (sa zapada na istok) ali mnogo sporije nego realna Zemlja. U tom slučaju se formira jednostavna konvektivna struja vazduha koji se na ekvatoru podiže a na polovima pada. Drugim rečima uspostavlja se globalna cirkulaciona petlja u atmosferi koja u konačnom prenosi toplotnu energiju od ekvatora ka polovima. Ova globalna cirkulaciona petlja nosi naziv *Hedlijeva petlja/ćelija*.⁹ Hedlijeva cirkulaciona ćelija je globalna jer se odvija na rastojanju od oko 20 000 km a vreme potrebno da se obavi iznosi oko godinu dana.

Obzirom na sporu rotaciju Zemlje globalna cirkulaciona petlja je značajno modifikovana Koriolisovom silom. Stoga njen prizemni deo na Severnoj hemisferi skreće u desnu stranu i postaje severoistočni. Na Južnoj hemisferi prizemni vetar skreće u levu stranu i postaje južnoistočni. Visinski vetar skreće u suprotnom smeru.

Neka sada Zemlja rotira uobičajenom brzinom tako da napravi jedan obrt za 24 sata. Rezultujući cirkulacioni vetar postaje još uvrnutiji i realniji a velika cirkulaciona ćelija se lomi na tri (slika 4.13).



Slika 4.13: Tri cirkulacione ćelije i njihov vertikalna struktura.

- Hedlijeva ćelija je pri tome u stvari ograničena na oblast između 0 i 30° severne geografske širine gde se ćelija zatvara i vazduh vraća ka tlu.

- U širinama između 30° i 60° severne geografske širine usled posebnih temperaturnih uslova javlja se nova *Ferelova ćelija* u kojoj je rotacija

⁹Džordž Hedli (1685-1768) je bio engleski advokat amater meteorolog koji je predložio ovaj mehanizam globalne cirkulacije koji, između ostalog dovodi do pasata koji su od vitalne važnosti za plovidbu jedrenjacima.

suprotno usmerena u odnosu na Hedlijevu.

- U višim širinama razvija se *polarna ćelija* u kojoj je smer cirkulacije vazduha isti kao u Hedlijevoj ćeliji.

Ove tri ćelije stvaraju važne i poznate karakteristike prizemnog vetra koje su prikazane na slici 4.13. Ove ćelije, prema tome, obezbeđuju stalne:

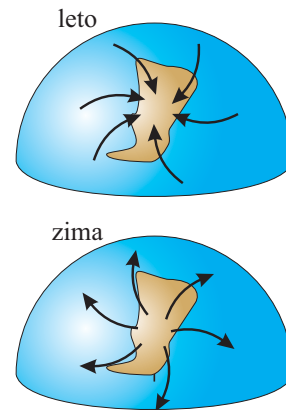
- severoistočne vetrove između Ekvatora i 30° severne geografske širine poznate kao *trgovački vetrovi* ili *pasatski vetrovi*,
- preovlađujuće *zapadne vetrove* između 30° i 60°, i
- *polarne istočne vetrove* severno od 60°.

Monsunska cirkulacija

Do sada se analiza odnosila na slučaj idealizovane opšte cirkulacije na idealizovanoj planeti koja ima homogenu površinu. U realnosti na površini Zemlje postoje okeani i kontinenti što ima dodatni uticaj na cirkulaciju vazduha. Pod monsunom se podrazumeva makrorazmerni model vetra koji trpi sezonsku promenu pravca. Tako prizemni vetar u vlažnom monsunu tokom leta duva od okeana ka kontinentu, dok suvi monsun duva suprotno, od kontinenta ka okean. Gruba mera za razmer monsunu je oko 10 000 km ili oko veličine kontinenta. Da bi razumeli kako monsun radi, poslužićemo se takođe idealizovanom situacijom u kojoj ćemo ignorisati uticaj opšte cirkulacije.

Usled različitih specifičnih toplotnih kapacitivnosti, tokom leta je kontinent mnogo topliji nego okolni okean dok je zimi obrnuto. Iz tog razloga preko leta vlažni okeanski vetrovi duvaju prema unutrašnjosti kontinenta. Obzirom na veliku skalu na kojoj se taj proces odvija od značaja je i rotacija Zemlje oko ose, odnosno Koriolisova sila kao posledica toga. Ova sila utiče da se iznad kopna preko leta stvori spirala vetra koja ima smer obrnut od kazaljke na časovniku (slika 4.14).

Tokom zime slika je obrnuta. Kontinent brže gubi toplotu od okeana (voda je u toplotnom smislu inertnija zbog veće specifične toplotne kapacitivnosti) pa je usled toga hladnije. Stoga zimi hladan i suv vetar duva sa kopna prema moru u obliku spirale kao kazaljka na časovniku. Na Južnoj hemisferi situacija je obrnuta.



Slika 4.14: Monsunska sezonska cirkulacija.

Na realnoj Zemlji, monsunaska cirkulacija je upletena u globalnu cirkulaciju koja je većih razmera. Kontinentalni su različitih veličina, oblika i smešteni su na različitim geografskim širinama. Usled toga se monsoni javljaju samo u nekim regionima (Jugoistočna Azija) a jedva su приметni u drugim regionima (Evropa).