

OSNOVNI POJMOVI O ATMOSFERI

2

U ovom poglavlju saznaćete koji gasovi čine atmosferu, šta su to gasovi staklene bašte i zašto su važni za radijacioni i topotni bilans sistema Zemlja–atmosfera. Naučićeće zbog čega i gde se javljaju ozonske rupe, kao i kako se menjaju temperatura, pritisak i gustina vazduha sa visinom u atmosferi.

Atmosfera je gasoviti omotač koji okružuje Zemlju. Kada bi Zemljinu kuglu sveli na dimenzije jabuke, debljina atmosfere bila bi manja od debljine kore jabuke. Masa atmosfere čini tek milioniti deo ukupne mase Zemlje. Iako se atmosfera prostire stotinama kilometara od Zemljine površine, skoro 99% mase atmosfere nalazi se u prvih 30 km, dok se gornja granica atmosfere ne može tačno utvrditi.

Bez atmosfere nebo bi bilo crne, a Sunce bele boje. Ne bi bilo oblaka, padavina, vetra. Noću bi bilo veoma hladno, a danju jako vruće. Ne bi postojala jezera, ni okeani. Vatra ne bi gorela i vladala bi potpuna tišina, bez i jednog jedinog zvuka. Bez atmosfere ne bi bilo života na Zemlji, bar ne onakvog kakvog mi danas poznajemo. Smatra se da na drugim planetama Sunčevog sistema nema uslova za više forme života, između ostalog i zbog sastava njihovih atmosfera. Tako npr. oko Venere, najtoplje planete Sunčevog sistema, nalazi se debeli sloj atmosfere koji se u najvećoj meri sastoji od ugljen-dioksida (preko 90%), pa su prosečne temperature veoma visoke (oko 450°C). Na Marsu, čija se atmosfera takođe sastoji uglavnom od ugljen-dioksida, temperature su znatno niže nego na Zemlji (-60°C), jer je sloj atmosfere koji okružuje ovu planetu veoma tanak.

2.1 Sastav atmosfere

Sastav atmosfere se menjao od nastanka Zemlje do danas. Sadašnja atmosfera se sastoji uglavnom od azota (78%) i kiseonika (21%), koji čine ukupno 99% svog vazduha. Preostali deo čine argon (skoro 1%) i drugi plemeniti gasovi (neon, helijum, kripton, ksenon), vodonik i tzv. gasovi staklene bašte. Procentualna zastupljenost sastojaka svog vazduha data je u tabeli 2.1.

Koncentracija azota i kiseonika ima praktično konstantnu vrednost do oko 85 km, što znači da postoji balans između potrošnje i proizvodnje ovih gasova.

Azot iz atmosfere koriste bakterije iz zemljišta, a oslobađa se raspadom organskih materija. Biljke ne mogu da koriste azot direktno iz vazduha, već samo preko pomenutih bakterija, fiksatora azota. Pri električnim pražnjenjima u atmosferi, takođe, nastaju nitriti iz elementarnog azota, koje biljke mogu koristiti kada putem padavina dospeju u zemljište, ali to je manje značajan način snabdevanja biljaka azotom. Azot iz atmosfere se troši i pri proizvodnji, u prvom redu, azotnih đubriva, zatim eksploziva i još nekih proizvoda.

Kiseonik se oslobađa u procesu fotosinteze, koji se odvija kako na kopnu, tako i u okeanima. Troši se pri

Tabela 2.1 Sastav suvog vazduha blizu površine Zemlje (do oko 85 km visine)

Gas	Heminski znak	Zapremski sadržaj u suvom vazduhu
Azot	N ₂	78,084%
Kiseonik	O ₂	20,947%
Argon	Ar	0,934% 99,998%
Ugljen-dioksid	CO ₂	0,033%
Neon	Ne	18,20 ppm*
Helijum	He	5,20 ppm
Kripton	Kr	1,10 ppm
Metan	CH ₄	2,00 ppm
Sumpor-dioksid	SO ₂	1,00 ppm
Vodonik	H ₂	0,50 ppm
Azot (I)-oksid	N ₂ O	0,50 ppm
Ksenon	Xe	0,09 ppm
Ozon	O ₃	0,07 ppm
Azot-dioksid	NO ₂	0,02 ppm
Jod	I ₂	0,01 ppm
Ugljen-monoksid	CO	u tragovima
Amonijak	NH ₃	u tragovima

*ppm – (eng. parts per million) – milioniti delovi (10^{-6})

Izvor: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//atmos/atmos_intro.htm

raspadu organske materije i u procesima oksidacije i disanja.

Gasovi staklene baštne, čija je koncentracija veoma mala i promenjiva u atmosferi, obeleženi su mašnim slovima u tabelama 2.1 i 2.2. Iako su zastupljeni u veoma malim količinama u atmosferi, gasovi staklene baštne značajno utiču na njen radijacioni i topotni bilans. Ovi gasovi u velikoj meri propuštaju kratkotolisno Sunčevu zračenje, a apsorbuju gotovo sve dugotolasno Zemljino zračenje. Atmosfera emituje, kao i površina Zemlje, dugotolasno zračenje, a deo tog zračenja je usmeren ka Zemlji. Zbog ovog dodatnog zagrevanja površine Zemlje od strane atmosfere, koje se naziva **efekat staklene baštne**, temperatura na površini Zemlje je znatno viša nego što bi bila da nema atmosferu tj. gasova staklene baštne, odnosno kada bi jedini izvor topote za površinu Zemlje bilo Sunčevu

zračenje. Doprinos koji ima neki gas u ukupnom efektu staklene baštne se procenjuje na osnovu njegovog sadržaja u vazduhu i potencijala globalnog zagrevanja (GWP – eng. Global Warming Potential), koji uključuje njegovu sposobnost da apsorbuje zračenje kao i vreme zadržavanja u atmosferi.

Većina gasova staklene baštne, kao što su vodena para, ugljen-dioksid, metan i azot(I)-oksid su prirodnog porekla, mada na njihov sadržaj u atmosferi može da utiče i čovek. Izuzetak je vodena para, jer je njen glavni izvor isparavanje sa površine mora i okeana, pa na sadržaj vodene pare u atmosferi čovek ne može direktno da utiče. Koncentracija gasova staklene baštne raste usled različitih ljudskih aktivnosti. Od početka industrijske revolucije 1750. godine, koncentracija ugljen-dioksid je porasla za 40%, metana za 250% a azot(I)-oksida za 20%. Postoje i gasovi staklene baštne koje je stvorio čovek i koji nemaju izvore u prirodi, kao što su: hloro-fluoro-ugljenici (CFCs), hloro-fluoro-ugljovodonici (HCFCs), fluoro-ugljovodonici (HFCs), bromo-hloro-fluoro-ugljenici (BCFC), perfluoro-ugljovodonici (PFCs), sumpor-heksafluorid (SF₆) itd. Ovi gasovi koji sadrže fluor, tzv. F-gasovi, imaju znatno veći potencijal globalnog zagrevanja od ostalih gasova staklene baštne, pa i veoma male koncentracije mogu značajno da utiču na povećanje temperature. Većina F-gasova ima dug život u atmosferi i rasprostire se na velika rastojanja od mesta emisije, a mogu se razgraditi samo u visokim slojevima atmosfere pod dejstvom Sunčevog zračenja.

Vodena para predstavlja najvažniji sastojak atmosfere sa meteorološkog stanovišta. Pored toga što se transformiše u kišu, sneg i ostale hidrometeore, vodena para ima i veoma značajnu energetsku ulogu zbog latentne topote koja se troši ili oslobođa pri promenama agregatnog stanja vode. Takođe, vodena para je gas koji najviše doprinosi efektu staklene baštne. Sadržaj vodene pare u vazduhu je veoma promenljiv u prostoru i vremenu i u velikoj meri zavisi od temperaturе vazduha. Najviše vodene pare u vazduhu ima pri visinom. Što je temperatura vazduha viša, to atmosfera može da sadrži više vodene pare pre nego što dođe do kondenzacije. Sadržaj vodene pare u vazduhu se kreće od gotovo 0% u polarnim regionima do 4% u toplim tropskim krajevima. Prosečna vrednost sadrž

Tabela 2.2 Sastav prizemnog sloja atmosfere u prisustvu vodene pare

Izvor: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//atmos/atmos_intro.htm

Gas	Hemijski znak	Zapremiski sadržaj u vlažnom vazduhu				
Azot	N ₂	78,084%	77,30%	76,52%	75,74%	74,96%
Kiseonik	O ₂	20,947%	20,74%	20,53%	20,32%	20,11%
Vodena para	H ₂ O	0%	1%	2%	3%	4%
Argon	Ar	0,934%	0,92%	0,91%	0,90%	0,89%

žaja vodene pare u vazduhu za naše podneblje iznosi oko 1%. Promene u sastavu atmosfere u zavisnosti od sadržaja vodene pare prikazne su u tabeli 2.2.

Ugljen-dioksid je, posle vodene pare, najzastupljeniji gas staklene bašte u atmosferi. U atmosferu dospeva raspadanjem biljaka, u procesu disanja, pri erupcijama vulkana i kao produkt različitih čovekovih aktivnosti, uglavnom vezanih za sagorevanje fosilnih goriva i biomase. Nestanak šuma, takođe značajno doprinosi povećanju koncentracije ovog gasa. Procenjeno je da ugljen-dioksid učestvuje sa 60% u dodatnom zagrevanju atmosfere usled uticaja čoveka. Troši se u procesu fotosinteze i pri stvaranju karbonata. Otprilike polovina oslobođenog ugljen-dioksida ostaje u atmosferi, a drugu polovicu apsorbuju vodene i kopnene površine. Utvrđeno je da srednje vreme od emisije ugljen-dioksida do maksimalnog efekta zagrevanja koje izaziva iznosi oko 10 godina. To znači da smanjenje, pa čak i prestanak, emisije ovog gasa neće dovesti do trenutnog zaustavljanja procesa globalnog zagrevanja. Pored pojačanog efekta staklene baštice, povećana emisija ugljen-dioksida dovodi i do acidifikacije tj. povećanja kiselosti okeana, što ugrožava živi svet u njima. Vrednost potencijala globalnog zagrevanja ugljen-dioksida uzima se kao referenta, što znači da GWP ugljen-dioksida iznosi jedan.

Koliki je značaj biljnog sveta u kruženju ugljen-dioksida i kiseonika u prirodi?

Proračunato je da suvozemne biljke u toku jedne godine usvoje iz vazduha 67,8 milijardi tona ugljen-dioksida, a vodene biljke oko 330 milijardi tona, što znači da bi biljke usvojile sav ugljen-dioksid iz atmosfere za 33 godine, da ga istovremeno postepeno i ne oslobađaju. U procesu fotosinteze pri usvajanju 1 tone ugljenika, biljke oslo-

bode 2,7 tona kiseonika. Procenjeno je da za približno 250 godina sav ugljenik na Zemljinoj površini prode kroz proces fotosinteze, a zatim se putem disanja opet враћa u atmosferu, dok se u procesu fotosinteze sav kiseonik u atmosferi obnovi za 3 000 godina.

Metan je gas koji dospeva u atmosferu iz prirodnih (40%) i antropogenih izvora (60%). Nastaje bakterijskim raspadom organske materije na pirinčanim poljima, močvarnim zemljиштимa i deponijama, sagorevanjem biomase, ali i kao produkt biohemiskih reakcija koje se odvijaju tokom procesa varenja kod preživara – goveda, koza, ovaca, kamila. Procenjeno je da jedna krava tokom preživanja ispusti u atmosferu tek nešto malo manje od četvrt kilograma metana na dan. Osim u poljoprivredi, značajna količina metana se oslobodi pri eksploraciji prirodnog gasa, nafte i uglja (oko 20%). Prirodni izvori metana pored močvara su i okeani, geološki izvori i termiti. Troši se tako što ga koriste pojedini mikroorganizmi u zemljишtu, kao i u hemijskim reakcijama. Naučna javnost je posebno zabrinuta zbog povećavanja koncentracije metana u polarnim oblastima, gde usled globalnog zagrevanja dolazi do odmrzavanja zamrznutog zemljишta (eng. permafrost) i oslobađanja ovaj gasa. Metan je gas sa relativno kratkim životom u atmosferi (oko 10 godina), ali zbog velike apsorptivne moći u dugotalsnom delu spektra, vrednost GWP-a mu se kreće od 28 do 36 za period od 100 godina.

Najznačajniji prirodni izvor **azot(I)-oksida** (azot-suboksida) su mikroorganizmi koji žive u zemljишtu i okeanima. U atmosferu iz antropogenih izvora dospeva oko 40% ukupnog azot(I)-oksida i to u najvećoj meri razlaganjem veštačkih đubriva, zatim sagorevanjem tečnih goriva u motornim vozilima i tokom

proizvodnje veštačkih đubriva i sintetičkih materijala. Azot(I)-oksid iz atmosfere apsorbuju pojedine bakterije, a razlaže se pod dejstvom ultraljubičastog zračenja ili u hemijskim reakcijama. Vreme zadražavanja u atmosferi je preko 100 godina, a GWP azot(I)-oksidu je skoro 300 puta veći od ugljen-dioksida za period od 100 godina.

Ozon je alotropska¹ modifikacija kiseonika. Ozon možemo naći u prizemnom sloju atmosfere kao sastojak fotohemskiog smoga i u višim slojevima atmosfe-

¹ alotropan (grč. *allos* – drugi, *tropos* – način) – koji se javlja u više različitih oblika ili stanja.

re. Između 12 i 50 km se nalazi veći deo atmosferskog ozona (oko 95%) koji štiti život na Zemlji od štetnog ultraljubičastog zračenja. U prizemnom sloju atmosfere nastaje sagorevanjem fosilnih goriva i biomase i njegova koncentracija je vrlo promenjiva i u prostoru i u vremenu. U većim količinama, ozon je otrovan bledoplavi gas, veoma neprijatnog mirisa koji štetno utiče na vegetaciju i zdravlje ljudi. Doprinosi i efekti staklene bašte, ali ne u velikoj meri s obzirom na njegovu malu koncentraciju u prizemnom sloju. Na površini Zemlje, ozon se brzo razlaže u interakciji sa biljkama i rastvaranjem u vodi, dok je u višim slojevima atmosfere prilično stabilan.

AKO ŽELITE DA SAZNATE NEŠTO VIŠE O OZONSKIM RUPAMA

Osmotreno smanjenje koncentracije ozona u višim slojevima atmosfere, pojava tzv. ozonskih rupa, predstavlja ozbiljan ekološki problem, jer pojačan intenzitet ultraljubičastog zračenja utiče na zdravlje ljudi, na biljni i životinjski svet. Kod ljudi, ultraljubičasto zračenje izaziva slabljenje imunog sistema i povećava rizik od pojave raka kože i očne katarakte. Povećano ultraljubičasto zračenje može negativno uticati na prinose poljoprivrednih kultura i prouzrokovati oštećenja šuma. Štetno utiče i na ekosisteme mora i okeana, uništavajući planktone, najosetljiviju kariku u celokupnom lancu ishrane. Najveće oštećenje ozonskog omotača je iznad Južnog pola. Ozonska rupa iznad Antarktika je uobičajena pojava u septembru i oktobru (proleće na južnoj hemisferi) i nastaje zbog prolećnog zagrevanja atmosfere i opšte cirkulacije koja se tada uspostavlja. Problem je što je ona postajala sve veća, zbog emisije

freona (komercijalni naziv za hloro-fluoro-ugljenike) i ostalih gasova koji sadrže hlor ili brom, koji i pri veoma malim koncentracijama uništavaju veliki broj molekula ozona. Severni pol je manje ugrožen, jer meteorološki uslovi, u prvom redu više temperature, ne pogoduju produbljavanju i zadržavanju ozonske rupe kao što je to slučaj iznad Južnog pola. Poslednjih godina, mnoge zemlje su izbacile iz upotrebe najštetnije freone, pa se beleži porast koncentracije ozona. Međutim, pošto freoni i ostale supstance koje utiču na koncentraciju stratosferskog ozona imaju dug životni vek, potpuni oporavak ozonskog omotača na nivo od pre 1980. godine se očekuje tek sredinom ovog veka. Montrealski protokol je sporazum iz 1987. godine, kojim se zemlje potpisnice obavezuju na postepeno smanjivanje do potpunog izbacivanja iz upotrebe supstanci koje štete ozonskom omotaču. To je jedan, možda i najbolji, primer uspešne međunarodne

saradnje i to ne samo na polju zaštite životne sredine.

Hloro-fluoro-ugljenici (CFCs) ili freoni su sintetička jedinjenja koja se koriste u uređajima za hlađenje, sprejevima i za proizvodnju penastih masa. Ovi gasovi su hemijski inertni, izuzetno stabilni, nezapaljivi, nekorozivni i neutrovni, pa se dugo smatralo da su potpuno bezopasni po životnu sredinu. Međutim, zbog male specifične težine dospevaju na veoma velike visine, gde posredno učestvuju u razgradnji ozonskog omotača. Pod dejstvom Sunčevog ultraljubičastog zračenja molekuli hloro-fluoro-ugljenika se razgrađuju i oslobađa se hlor, čiji jedan jedini molekul može da prouzrokuje razgradnju i 100 000 molekula ozona. Takođe, ovi gasovi imaju veliki potencijal kao gasovi staklene bašte – hiljadama i desetinama hiljada puta veći od ugljen-dioksida za period od 100 godina.

Hloro-fluoro-ugljovodonici (HCFCs) se koriste kao prelazno rešenje umesto CFCs, jer imaju manji

potencijal i u razgradnji ozonskog omotača i kao gasovi staklene bašte. Trenutno su najzastupljeniji od svih sintetičkih gasova sa štetnim uticajem, iako je npr. u Evropskoj uniji njihova upotreba zabranjena.

Fluoro-ugljovodonici (HFCs) se koriste kao zamena za CFCs i HCFCs, jer u sebi ne sadrže hlor i ne uništavaju ozonski omotač. Međutim, HFCs imaju sličan potencijal kao CFCs i HCFCs što se tiče efekta staklene bašte. Emisija HFCs ne podleže Montrealskom protokolu, ali podleže Kjoto protokolu, kojim se ograničava emisija gasova staklene bašte. Nažalost, implementacija Kjoto protokola, donesenog 1997. godine, imala je mnogo manje uspeha od Montrealskog protokola. Iako donesen još 1997. godine, Kjoto protokol je stupio na snagu tek 2005. godine, kada ga je ratifikovala 141 država. Kjoto protokol je prestao da važi 31. decembra 2012. Očekuje se da će na

konferenciji Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama u Parizu u decembru 2015. godine, lideri 147 zemalja postići dugoročni sporazum o smanjenju emisije gasova staklene bašte. Ovim sporazumom, koji treba da zameni Kjoto protokol i stupi na snagu 2020. godine, rast temperaturе do kraja XXI veka trebalo bi da se ograniči na 2°C u odnosu na predindustrijsko doba.

Bromo-hloro-fluoro-ugljenici (BCFC) ili haloni su gasovi koji se koriste kao punjenje u aparatima za gašenje požara. Njihova upotreba je takođe zabranjena Montrealskim protokolom, jer uništavaju ozonski omotač.

Perfluoro-ugljovodonici (PFCs) su jedinjenja koja se oslobođaju u industrijskim procesima proizvodnje aluminijuma i poluprovodnika. Veoma dugo se zadržavaju u atmosferi (2 600–50 000 godina) i imaju veliki GWP.

Sumpor-heksafluorid (SF₆) je neogranski, nezapaljiv gas, bez boje i mirisa, koji je odličan električni izolator. Koristi se najviše u elektro-industriji kao dielektrični medijum, zatim u proizvodnji magnezijuma i kao izolator kod višestrukih prozora. Smatra se da je SF₆ najpotentniji gas staklene bašte – njegov GWP je veći 23 900 puta od ugljen-dioksida posmatrano za 100 godina. Veoma je stabilan, ne učestvuje ni u jednoj hemijskoj reakciji i ima izuzetno dug život u atmosferi, koji je procenjen na više od 3 000 godina. Srednja koncentracija SF₆ je rasla 7% godišnje tokom osamdesetih i devedesetih godina prošlog veka, ali još uvek je njegov sadržaj u atmosferi veoma mali, pa njegov doprinos ukupnom globalnom zagrevanju iznosi manje od 0,2%. U Evropi je, od 2006. godine, upotreba ovog gasa dozvoljena samo kod visokonaponske sklopne opreme.

U vazduhu se nalazi i promenjiva količina primesa u čvrstom, tečnom ili gasovitom stanju, koje dospevaju u atmosferu iz prirodnih izvora ili kao rezultat čovekovih aktivnosti. To mogu biti čestice prašine, peska, dima, soli, vulkanskog pepela, polenovog praha ili različiti gasovi, uglavnom zagađivači, kao što su sumpor-dioksid, ugljen-monoksid, azot-dioksid, ugljovodonici i dr. Aerosoli su značajni jer utiču na bilans zračenja, tako što smanjuju propustljivost atmosfere za Sunčevu zračenje, dok različiti zagađivači utiču na kvalitet vazduha. Koncentracija primesa u atmosferi se veoma brzo smanjuje sa visinom. Naročito brzo opada koncentracija čvrstih čestica, jer usled njihove težine, koja je znatno veća od težine gasovitih sastojaka atmosfere, dolazi do gravitacionog taloženja. Postoji dosta pravilna godišnja i dnevna promena u vertikalnoj raspodeli primesa u atmosferi. Leti i danju, zbog intenzivnijih vertikalnih strujanja vazduha, sma-

njuje se koncentracija atmosferskih pridodataka prioritetu, a povećava na visini, dok je zimi i noću situacija obrnuta.

2.2 Osnovni pojmovi o temperaturi, pritisku i gustini vazduha

Temperatura tela određena je srednjom brzinom njegovih molekula. Ako temperatura raste, srednja brzina molekula se povećava i obrnuto, ako temperatura opada i srednja brzina molekula se smanjuje. Srednja brzina molekula vazduha na sobnoj temperaturi je oko 450 m/s. Najniža moguća temperatura je ona pri kojoj nema kretanja molekula. Ta temperatura se naziva *apsolutna nula*.

Jedinica za merenje temperature u SI sistemu je *Kelvin (K)*. Nula Kelvinove skale, nazvane po britan-

skom naučniku lordu Kelvinu (1824–1907), je apsolutna nula. U meteorologiji, kao i u svakodnevnom životu, temperatura se najčešće meri i izražava *u stepenima Celzijusa (°C)*. Nula ove skale, nazvane po švedskom astronomu Celzijušu (1701–1744), je temperatura na kojoj se voda zamrzava, a 100-ti podeok predstavlja temperaturu na kojoj voda ključa. Originalno, Andres Celzijus je za nulu temperaturne skale uzeo tačka ključanja vode, a za 100-ti podeok tačku mržnjenja vode. Godinu dana nakon njegove smrti, Karl fon Line (1707–1774), otac moderne taksonomije, takođe Švedanin, zamenio je mesta ovih tačaka na temperaturnoj skali. Veza između temperature u Kelvinima i temperature u stepenima Celzijusa data je sledećom relacijom:

$$T \text{ (K)} = 273,15 + t \text{ (°C)}$$

Jedan Kelvin jednak je jednom stepenu Celzijusa.

U Sjedinjenim Američkim Državama u upotrebi je *stepen Farenhajta (°F)*, koji se koristio u većini zemalja engleskog govornog područja do sedamdesetih godina XX veka. Za nulu ove skale, nemački fizičar Farenhajt (1686–1736) je uzeo najnižu temperaturu koju je mogao da postigne mešanjem vode i soli, a za stoti podeok temperaturu ljudskog tela. Veza između temperature u stepenima Celzijusa i temperature u stepenima Farenhajta data je relacijom:

$$\frac{t \text{ (°F)} - 32}{9} = \frac{t \text{ (°C)}}{5}$$

Stepen Celzijusa iznosi 1,8 stepeni Farenhajta.

Gustina vazduha (ρ) predstavlja masu vazduha (m) u jedinici zapremine (V):

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Gustina vazduha opada sa visinom. Pošto se intenzitet sile gravitacije smanjuje sa rastojanjem, jedinična zapremina vazduha sadrži sve manji broj molekula kako se udaljavamo od Zemljine površine.

Srednje rastojanje između molekula vazduha u prizmilju iznosi 10^{-7} m, na 150 km visine 10 m, a na visini od 250 km čak 1 km.

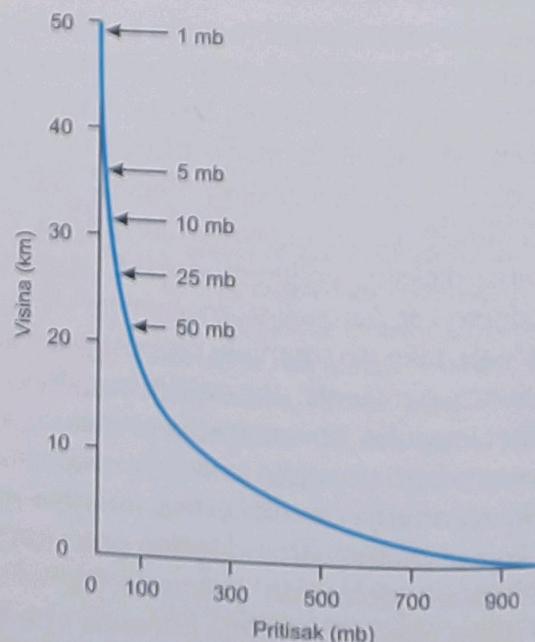
Pritisak je sila (F) po jedinici površine (S):

$$p = \frac{F}{S}$$

Atmosferski pritisak predstavlja težinu vazdušnog stuba iznad jedinične površine. Vazduh je u stvari iznenađujuće težak – masa 1 m³ vazduha iznosi 1,293 kg. Tako npr. vazduh u prostoriji dimenzija 6 m x 6 m x 2,5 m ima masu od oko 108 kg. Jedinica za pritisak u SI sistemu je paskal (1 Pa = 1 N/m²). U meteorologiji se upotrebljavaju sledeće jedinice za vazdušni pritisak: hektopaskal (1 hPa = 100 Pa) i bar, odnosno milibar (1 mb = 0,001 bar). Pre uvođena SI sistema, atmosferski pritisak se obično izražavao u milimetrima živinog stuba (mmHg). Veza između ovih jedinica data je sledećim relacijama:

$$1 \text{ mb} = 1 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1,333 \text{ mb.}$$



Slika 2.1 Promena atmosferskog pritiska sa visinom

Kao i gustina, i pritisak vazduha opada sa visinom. Sa udaljavanjem od Zemljine površine vazduh je sve ređi i lakši, jer u jediničnoj zapremini ima sve manje i manje molekula vazduha. Promena atmosferskog pritiska znatno je veća u vertikalnom nego u horizontalnom pravcu. Promena pritiska vazduha sa visinom, koja važi za „standarnu atmosferu“², prikazana je na slici 2.1.

U prvih 100 km atmosferski pritisak opada eksponentijalno sa visinom. Pritisak na morskom nivou iznosi oko 1 000 mb, a na 5,5 km visine 500 mb – polovinu vrednosti prizemnog pritiska. Na nadmorskoj visini nešto većoj od 15 km, vazdušni pritisak iznosi svega 100 mb. Na većim visinama pritisak sporije opada, ali još uvek dovoljno brzo da na 50 km njegova vrednost iznosi samo 1 mb, što znači da se 99,9% mase atmosfere nalazi ispod tog nivoa. Ipak, atmosfera se prostire još stotinama kilometara uvis, postajući sve ređa i ređa.

Temperatura, pritisak i gustina vazduha su međusobno zavisne veličine. Veza između njih data je jednačinom gasnog stanja, koja ima sledeći oblik:

$$p = \rho RT,$$

gde je: p – pritisak (mb),
 ρ – gustina vazduha (kg m^{-3}),
 T – temperatuta (K),
 R – gasna konstanta, čija je vrednost različita za različite gasove (za suvi vazduh iznosi $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a za vodenu paru $461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

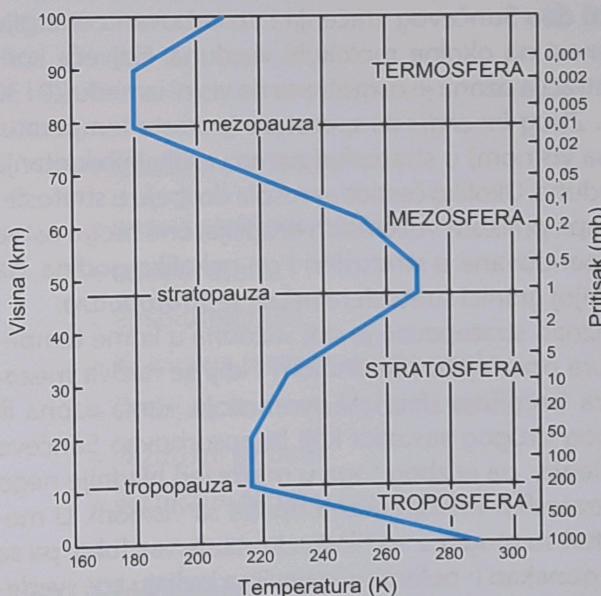
U meteorologiji se vazduh najčešće posmatra kao smeša suvog vazduha i vodene pare. Iako se često kaže da je vazduh težak kada je toplo i vlažno vreme, vlažan vazduh je lakši od suvog (odnos molekularnih težina vodene pare i suvog vazduha iznosi 0,622).

² standardna atmosfera – osrednjena atmosfera u horizontalnom pravcu i vremenu; funkcija samo visine; na nivou mora u standardnoj atmosferi $p = 1013,3 \text{ hPa}$, $t = 15^\circ\text{C}$, $\rho = 1,225 \text{ g m}^{-3}$.

2.3 Vertikalna podela atmosfere

Atmosfera se može podeliti na slojeve na osnovu vertikalne promene temperature, hemijskog sastava i nanelektrisanja vazduha.

Temperatura vazduha ima znatno komplikovaniјi vertikalni profil od gustine i pritiska vazduha, koji prvo brzo, a potom sporo opadaju sa visinom. Promena temperature sa visinom naziva se **vertikalni temperaturni gradijent**. Na osnovu toga da li temperatura opada ili raste sa visinom, izvršena je podela atmosfere na sledeće slojeve: troposferu, stratosferu, mezosferu i termosferu (slika 2.2).



Slika 2.2 Vertikalni profil temperature u „standardnoj atmosferi“

Troposfera (obrtna ili promenjiva sfera) je najniži sloj atmosfere. Prostire se od površine Zemlje do različitih visina u zavisnosti od geografske širine, godišnjeg doba, sinoptičke situacije itd. Visina troposfere je najmanja iznad polova (6–7 km), a najveća iznad ekvatora (do 18 km). U umerenim širinama troposfera se prostire do 10–11 km. U troposferi temperatuta opada sa visinom i to u proseku $0,6^\circ\text{C}$ na svakih 100 m. Sadrži 3/4 ukupne mase vazduha i u njoj se nalazi gotovo sva atmosferska vodena para. U ovom sloju se odvijaju intenzivna kretanja vazduha i svi procesi i

pojave koji utiču na vreme na Zemlji. Iznad troposfere nalazi se sloj vazduha u kome se temperatura ne menjala sa visinom i koji se naziva *tropopauza*. Intenzivna vertikalna kretanja koja se formiraju u troposferi, npr. u grmljavinskim oblacima, zaustavljaju se na nivou tropopauze. Na svim geografskim širinama visina tropopauze je veća u toplijem delu godine. Debljina tropopauze se kreće od nekoliko stotina metara do 1–2 km. Postoje mesta gde je ovaj izotermički sloj³ probijen i to su mesta gde se javljaju mlazne struje – jaki, kanalizani vetrovi čija brzina prelazi 50 m/s.

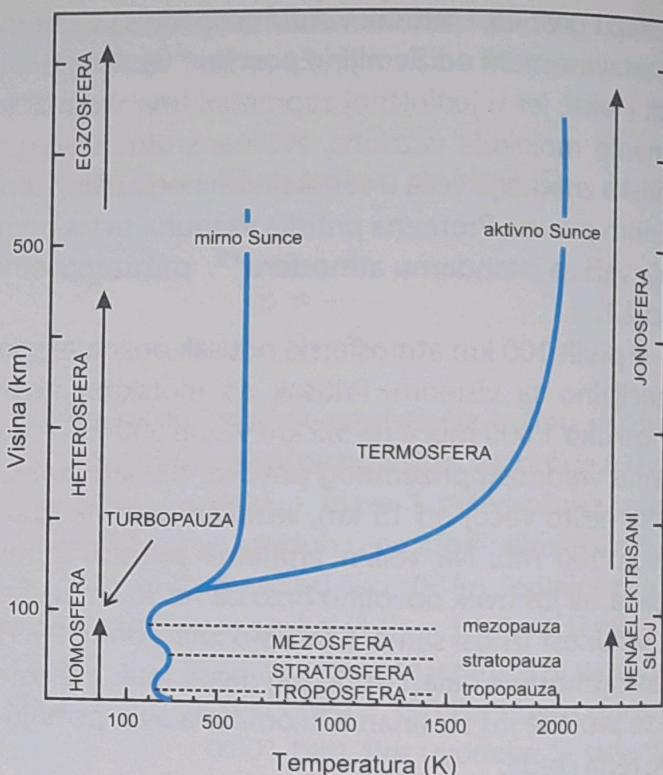
Stratosfera (slojevita sfera) je sloj vazduha koji se nalazi iznad tropopauze. U njemu temperatura raste sa visinom, zbog sloja ozona koji apsorbuje ultraljubičasti deo Sunčevog zračenja i apsorbovanu energiju prenosi na okolne molekule vazduha. Najveća koncentracija ozona je osmotrena na visini između 20 i 30 km. Zbog *inverzije temperature* (porasta temperaturе sa visinom) u stratosferi nema vertikalnih kretanja vazduha. Ukoliko čestice aerosola dospeju u stratosferu, npr. prilikom vulkanskih erupcija, one mogu ostati suspendovane u stratosferi i po nekoliko godina. Na gornjoj granici stratosfere nalazi se *stratopauza*.

Iznad stratopauze je sloj vazduha u kome temperatura opet opada sa visinom i koji se naziva **mezosfera** (središnja sfera). U ovom sloju nema ozona ili nekog drugog sastojka koji bi apsorbovao Sunčev zračenje, pa je zbog toga u mezosferi hladnije nego u stratosferi i temperatura opada sa visinom. U mezosferi su moguća vertikalna kretanja vazduha, pa se leti ponekad u polarnim krajevima javljaju tzv. svetleći noćni oblaci. **Mezopauza** je izotermički sloj koji na visini od 85 km razdvaja mezosferu i termosferu.

Termosfera (toplotna sfera) je sloj vazduha iznad mezopauze u kome temperatura raste sa visinom. Za porast temperature sa visinom u ovom sloju najviše su zaslužni molekuli kiseonika, koji apsorbuju ultraljubičasto zračenje najkraćih talasnih dužina. Vrednost temperature u termosferi veoma zavisi od aktivnosti Sunca (slika 2.3).

Podela atmosfere na slojeve može se izvršiti i na osnovu njenog hemijskog sastava (slika 2.3). Ako

³ izo- (grč. *isos*) – predmetak u složenicama sa značenjem: isto, jednako.
izotermički sloj – sloj u kome se temperatura ne menja sa visinom.



Slika 2.3 Vertikalna podela atmosfere

nema izvora ili ponora sastojaka vazduha, dva procesa – molekularna difuzija⁴ i mešanje vazduha usled kretanja, određuju hemijski sastav atmosfere tj. odnos između pojedinih sastojaka vazduha. Sastav atmosfere do 85 km je prilično homogen, pa se zato ovaj sloj i naziva **homosfera**⁵. U ovom sloju, zbog veće gustine vazduha, proces mešanja je dominantniji od molekularne difuzije. **Turbopauza** razdvaja homosferu i heterosferu. **Heterosfera**⁶ je sloj u kojem se sastav vazduha menja sa visinom. U ovom sloju dominira proces molekularne difuzije, sudari među molekulama su retki i nema mešanja vazduha. Teži molekuli i atomi difuzijom dospevaju na donju granicu, a laksi na gornju granicu ovog sloja. Sastav donjih slojeva heterosfere je u velikoj meri uslovjen procesom fotodisocijacije kiseonika. Iznad 120 km visine kiseonik

⁴ molekularna difuzija (lat. *difusio* – širenje, rasprostiranje) – kretanje molekula usled razlike u koncentraciji supstance u različitim tačkama.

⁵ homo- (grč. *homos*) – predmetak u složenicama sa značenjem: isti, jednak, sličan.

⁶ hetero- (grč. *heteros*) – predmetak u složenicama sa značenjem: drugi, razni, različit.

se uglavnom nalazi u atomskom obliku. Na visini od 500 km atmosfera se uglavnom sastoji od atomskog kiseonika. Prisutan je i izvestan broj molekula azota čija koncentracija naglo opada sa visinom, kao i gasova male molekularne težine (vodonika i helijuma). Na visinama većim od 1 000 km atmosfera se uglavnom sastoji samo od vodonika i helijuma.

Na velikim visinama, gustina atmosfere je veoma mala, šanse za sudare molekula su sve manje, tako da pojedini lakši elementi napuštaju atmosferu. Oblast u kojoj se to dešava naziva se **egzosfera** i predstavlja na neki način gornju granicu atmosfere (slika 2.3). Egzosfera se prostire od od otprilike 500 km pa sve do nekih 10 000 km.

Na osnovu električnih svojstava, atmosfera se može podeliti na dva sloja: nenaelektrisani i naelektrisani sloj (slika 2.3). Donji sloj atmosfere je nenaelektrisan, dok se iznad 60 km nalazi nanelektrisan sloj atmosfere koji nazivamo **jonosfera**. Jonosfera je region u kome postoji veliki broj jona⁷ i slobodnih elektrona, koji nastaju usled apsorpcije ultraljubičatog, gama i X zračenja u gornjem delu atmosfere. Zbog male koncentracije čestica, život slobodnih elektrona i jona je znatno duži u jonosferi nego u prizemnom sloju atmosfere. Jonosfera ima veoma važnu ulogu u radio-komunikaciji, koja funkcioniše na principu odbijanja radio-talasa od tog nenelektrisanog sloja.

REZIME

Atmosfera je gasoviti omotač oko Zemlje koji se u najvećoj meri sastoji od azota i kiseonika. Iako se u atmosferi nalaze u veoma malim količinama, vodena para, ugljen-dioksid i ostali gasovi staklene bašte su veoma važni jer apsorbuju dugotalsno Zemljino zračenje. Čovek svojim aktivnostima utiče na povećavanje koncentracije gasova

staklene bašte i pojačavanje već, bez njegovog uticaja, postojećeg efekta staklene bašte.

Pritisak i gustina vazduha opadaju eksponencijalno sa visinom, dok je promena temperaturu u vertikalnom pravcu složenija. Prema promeni temperature sa visinom, atmosfera se deli na troposferu, stratosferu, mezosferu i termosferu. Troposfera je sloj atmosfere koji je najbliži površini Zemlje i u njemu se odvija većina procesa i pojava koji su vezani za vreme na Zemlji.

KLJUČNI POJMOVI

- gasovi staklene bašte
- temperatura
- apsolutna nula
- Kelvinova temperaturna skala
- Celzijusova temperaturna skala
- vazdušni pritisak
- vertikalni temperaturni gradijent
- inverzija temperature
- troposfera
- stratosfera
- mezosfera
- termosfera
- homosfera
- heterosfera
- egzosfera
- jonosfera

⁷ jon (grč. ion – ono što se kreće) – atomi ili molekuli koji imaju višak elektrona.

PITANJA

- 1.** Koji gasovi čine 99% mase suvog vazduha?
- 2.** Koji su gasoviti sastojci atmosfere najznačajniji sa meteorološkog stanovišta i zašto?
- 3.** Koji gas ima najveći doprinos u dodatnom zagrevanju atmosfere usled uticaja čoveka?
- 4.** U emisiji kojih gasova staklene baštne u velikoj meri učestvuje poljoprivreda?
- 5.** Koji gasovi se nazivaju F-gasovi?
- 6.** U kom sloju atmosfere se javljaju ozonske rupe?
- 7.** Koji gasovi, odnosno koji hemijski elementi u njima, se smatraju odgovornim za nastanak ozonskih rupa?
- 8.** Zašto vazdušni pritisak opada sa visinom?
- 9.** Koliko iznosi prosečna vrednost atmosferskog pritiska na nivou mora?
- 10.** Na osnovu kojih se sve kriterijuma može izvršiti vertikalna podela atmosfere?
- 11.** Koji sloj atmosfere je najbliži površini Zemlje, a koji je sloj najtoplji?
- 12.** Zašto se sloj atmosfere koji se prostire od Zemljine površine do 85 km naziva homosfera?
- 13.** Koliko u proseku opada temperatura vazduha na svakih 100 m visine u troposferi?
- 14.** Kako se naziva nanelektrisani sloj atmosfere?

LITERATURA

- Ahrens D.C., 2009: *Meteorology Today*. Brooks/Cole.
- Wallace M. J., Hobs P.V., 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd edition, Academic Press, San Diego, USA.
<https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/greenhouse-gases.php>
http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/ozone/additional-science-focus/about-ozone/ozone_atmosphere.shtml
<http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe-the-air-and-climate-system>
<http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/>