

# VODA U SISTEMU ZEMLJA–ATMOSFERA

*Na početku ovog poglavlja moći ćete da obnovite svoje znanje o kruženju vode u prirodi i promenama agregatnog stanja vode. Saznaćete kako se odvijaju procesi evapotranspiracije, kondenzacije, mržnjenja i depozicije u atmosferi i od kojih činilaca zavise. Naučićete šta su to adijabatski procesi i zašto su važni za odvijanje mnogih procesa u atmosferi. Saznaćete kako se obrazuju magla, oblaci i padavine i kako utiču na biljni svet. Trebalо bi i da naučite da prepoznate osnovne rodove oblaka. Saznaćete i iz kojih oblaka mogu da se izlazu padavine, a iz kojih ne. Biće objašnjeno i zašto se formira rosa baš u jutarnjim časovima i zbog čega možete pre da vidite rosu na travi nego na lišću grmova ili drveća. Na kraju poglavlja ćete sazнати kako se sve može definisati suša, od kojih činilaca zavisi njen intenzitet i koje se agrotehničke mere mogu preduzeti u borbi protiv negativnih posledica suše u poljoprivredi.*

**P**risustvo vode u sistemu Zemlja–atmosfera od posebnog je značaja za zbivanja u atmosferi, jer voda zbog svojih fizičkih i hemijskih osobina značajno utiče na energetsko i toplotno stanje atmosfere. Kao jedan od gasova staklene baštе, vodena para selektivnom apsorpcijom znatno utiče na bilans zračenja i zagrevanje atmosfere i Zemljine površine. Zbog velike specifične toploote vode, okeani i mora apsorbuju i odaju velike količine toploote uz male promene temperature. Pri faznim prelascima vode troše se ili oslobađaju velike količine toploote, a usled promena agregatnog stanja vode u atmosferi dolazi do obrazovanja oblaka, magle i padavina, kao i do pojave fotometeora i elektrometeora.

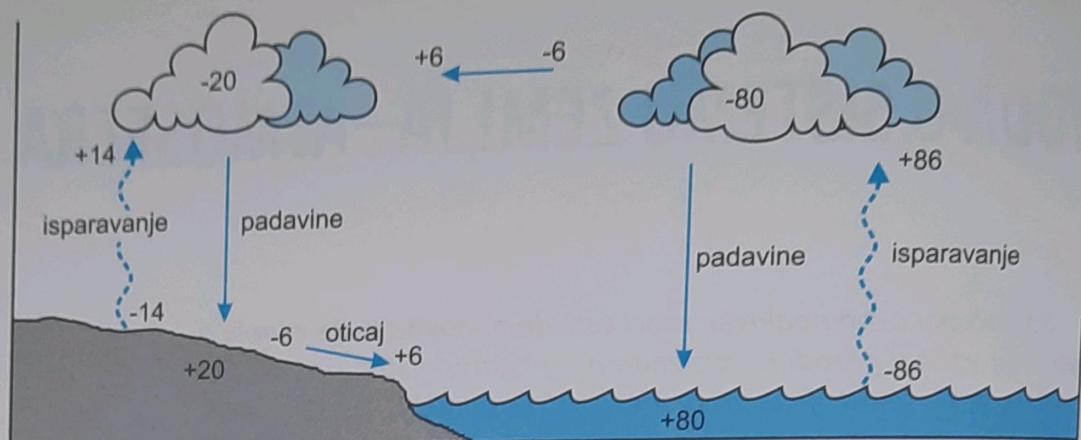
## 5.1 Kruženje vode u prirodi

U sistemu Zemlja–atmosfera najviše vode ima u okeanima i morima (97,3%), zatim glečerima (2,1%), dok podzemne vode (0,6%), jezera (0,008%), zemljiste (0,002%), reke (0,0003%) i vegetacija (0,00007%) sadr-

že manje od 1%. Svega 0,001% ukupne vode se nalazi u atmosferi. Prosečno zadržavanje molekula vodene pare u atmosferi iznosi oko desetak dana.

Neprekidno kruženje vode u prirodi naziva se hidrološki ciklus. Na slici 5.1 su prikazane osnovne komponente hidrološkog ciklusa. Sunce, odnosno energija koja stiže sa Sunca, osnovni je pokretač kruženja vode u prirodi, koje započinje tako što voda sa Zemljine površine, zagrejana apsorpcijom Sunčevog zračenja, isparava. Najviše vode isparava sa površine okeana koji prekriva više od 2/3 Zemljine površine. Voda takođe isparava i sa kopna, sa vodenih površina na koje se tamo nalaze, kao i sa samog tla. Voda isparava sa vlažnog zemljista, zemljista prekrivenog snegom i ledom, kao i sa biljnog pokrivača u procesu transpiracije. Vodena para se najčešće ne zadržava iznad izvorišne oblasti, već vazdušnim strujanjima biva transportovana u druge oblasti, ponekad i veoma udaljene. Pri određenim meteorološkim uslovima, vodena para prelazi u tečno ili čvrsto stanje, pa dolazi do formiranja oblaka. Izlučivanjem padavina isparena voda se vraća na površinu Zemlje. Padavinama koje

**Slika 5.1**  
Šematski prikaz hidrološkog ciklusa [pričekane vrednosti predstavljaju procentualni udeo u ukupnoj srednjoj godišnjoj sumi padavina] (Oke, 1983)



se izluče iznad okeana direktno se nadoknadi deo prethodno isparene vode, dok se padavine, koje se izluče iznad kopna, jednim delom zadržavaju u porama zemljишta ili na biljnem pokrivaču, a ostatak se površinskim i podzemnim vodama vraća u glavni izvor – mora i okeane.

## 5.2 Promene agregatnih stanja vode

Voda se i u prirodnim uslovima može naći u sva tri agregatna stanja. Agregatno stanje vode zavisi od vrednosti pritiska i temperature (slika 5.2). Dijagram je podeljen na tri jednofazne oblasti: led, vodu i paru. Oblasti su razdvojene linijama koje spajaju tačke u kojima mogu postojati dve faze u ravnoteži.

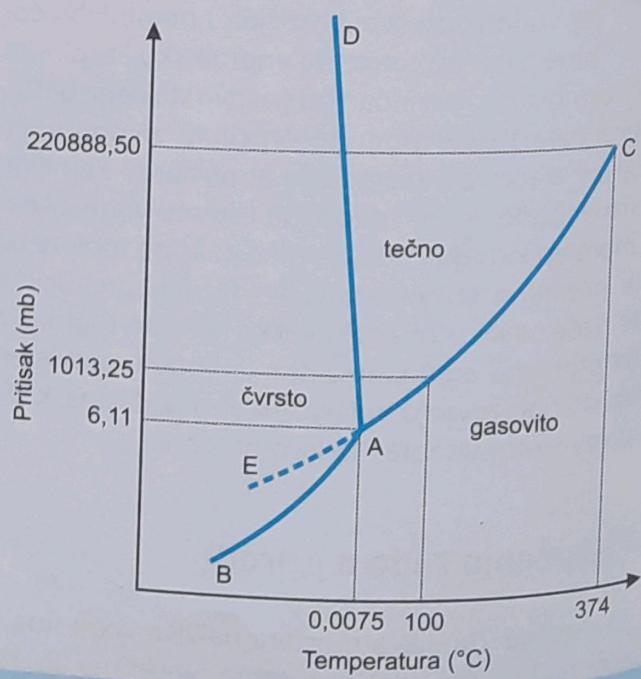
Kriva AC deli tečnu od gasovite faze i predstavlja krivu maksimalnog pritiska vodene pare iznad tečne vode. Za datu temperaturu postoji samo jedna vrednost pritiska vodene pare na kome je vodena para u ravnoteži sa tečnom vodom. Tačka C predstavlja kritičnu tačku iza koje se ne razlikuje tečna od gasovite faze. Tada je para gušća od tečne vode, ali nema osobine tečnosti – ne poseduje površinski napon i izlazi iz otvorenog suda.

Kriva AD razdvaja čvrstu od tečne faze i pokazuje kako se tačka mržnjenja menja sa promenom pritiska. Temperatura topljenja leda odnosno mržnjenja vode, snižava se sa povećanjem pritiska, što predstavlja jednu od anomalnih osobina vode.

Kriva AB razdvaja čvrstu od gasovite faze i predstavlja krivu maksimalnog pritiska vodene pare iznad leda. Voda se i na temperaturama ispod tačke mržnje

žnjenja može nalaziti u tečnom stanju. Kriva AE predstavlja krivu maksimalnog pritiska vodene pare iznad prehlađene vode koji je, važno je naglasiti, viši od maksimalnog pritiska vodene pare iznad leda.

U tački A, koja se naziva *trojna tačka*, sve tri faze su u ravnoteži. Vrednosti pritiska i temperature u tački A iznose 6,11 mb i 0,0075°C. Ako se i malo promeni vrednost pritiska ili temperature, jedna od faza isčezava. Trojna tačka nije identična sa tačkom topljenja koja je jednaka 0°C i koja se definiše kao temperatura na kojoj se led pri normalnom atmosferskom pritisku (1013,3 mb) topi.



**Slika 5.2** Agregatna stanja vode u zavisnosti od pritiska i temperature

Gde je potrebno više vremena da bi se jaje skuvalo u ključaloj vodi, na većoj ili na manjoj nadmorskoj visini?

Zbog smanjivanja temperature ključanja sa nadmorskim visinom, odnosno pritiskom, potrebno je više vremena da se jaje skuva u ključaloj vodi na većoj nadmorskoj visini nego na manjoj, jer se na većoj nadmorskoj visini kuva na nižoj temperaturi.

Pri kondenzaciji vodene pare oslobođa se toplota. **Latentna toplota kondenzacije** je količina toplote koja se oslobođi pri prelasku jedinične mase vode iz gasovitog u tečno agregatno stanje na temperaturi tačke kondenzacije, pri čemu temperatura ostaje nepromenjena. Latentna toplota kondenzacije jednaka je latentnoj toploti isparavanja za datu temperaturu.

**Latentna toplota sublimacije** je količina toplote koju treba utrošiti da bi jedinična masa vode prešla direktno iz čvrstog u gasovito agregatno stanje pri konstantnoj temperaturi. Brojno je jednaka zbiru latentne topline topanja i isparavanja i za temperaturu  $0^{\circ}\text{C}$  iznosi  $2,83 \text{ MJ/kg}$ . **Latentna toplota depozicije** jednaka je latentnoj toploti sublimacije i definiše se kao količina toplote koja se oslobođi pri prelasku jedinične mase vode iz gasovitog u čvrsto agregatno stanje na konstantnoj temperaturi.

### 5.3 Isparavanje vode u sistemu Zemlja–atmosfera

Isparavanje vode predstavlja jednu od osnovnih komponenti vodnog i toplotnog bilansa. U meteorologiji isparavanje se izražava u milimetrima (mm) isparene vode za određeni vremenski period (1 mm isparene vode odgovara zapremini vode od 1 l koja ispari sa površine od  $1 \text{ m}^2$  ili masi vode od 1 kg koja ispari sa površine od  $1 \text{ m}^2$ ). Pod intenzitetom ili brzinom isparavanja podrazumeva se količina vode koja ispari sa jedinične površine u jedinici vremena.

Isparavanje vode na površini Zemlje odvija se sa slobodne površine vode, sa zemljишta i sa biljnog pokrivača.

Ovaj složeni fizički proces zavisi od sledećih činilaca:

- temperature površine sa koje se vrši isparavanje,
- temperature vazduha
- zasićenosti vodene pare u vazduhu iznad površine koja isparava,
- brzine vetra,
- vazdušnog pritiska.

Intenzitet isparavanja raste sa povećanjem temperature površine sa koje se vrši isparavanje, jer povećanjem temperature povećava se brzina molekula, pa veći broj njih napušta površinu vode.

Isparavanje je veće što je manja zasićenost vodene pare u vazduhu iznad površine sa koje se vrši isparavanje. Što je temperatura vazduha viša, neophodan je veći broj molekula vodene pare da bi došlo do zasićenja. To znači da isparavanje zavisi i od temperature vazduha iznad podlage koja isparava. Kada dođe do zasićenja vodene pare u vazduhu proces isparavanja se prekida. U prirodi nema zatvorenih sistema vazduha, pa se stanje zasićenosti relativno brzo narušava zbog mešanja vazduha usled difuzije, horizontalnih i vertikalnih kretanja vazduha.

Isparavanje se povećava sa porastom brzine vetra, koji odnosi vodenu paru iznad površine koja isparava. To važi za slučaj kada duva suv vetar koji donosi manje vlažan vazduh. Kada vetar donosi vlažan vazduh, njegov uticaj na isparavanje je zanemarljiv. Na intenzitet isparavanja utiču i vertikalna strujanja vazduha. Konvektivnim, uzlaznim strujanjima vlažan vazduh se iz prizemlja transportuje uvis, dok se silaznim strujanjima suv vazduh spušta iz viših u niže slojeve. Pored jačine vetra, za proces isparavanja važna je i promena njegove brzine sa visinom. Što je veća promena brzine vetra sa visinom, intenzivnija su turbulentna kretanja vazduha, a samim tim i mešanje vazduha, odnosno isparavanje.

Isparavanje zavisi i od vazdušnog pritiska. Pri povećanju pritiska vazduha, isparavanje se smanjuje zbog usporavanja procesa molekularne difuzije. S obzirom na to da su promene pritiska vazduha obično male i da je molekularna difuzija najmanje značajna od svih procesa kojima se transportuje vodena para u atmosferi, može se reći da je zavisnost isparavanja od vazdušnog pritiska veoma mala, praktično zanemarljiva.

Zbog čega se vrela supa hlađi kada duvamo u nju?

Duvanjem proizvodimo vazdušnu struju koja odnosi vodenu paru iznad supe koja isparava. Tako se smanjuje zasićenost vodene pare u sloju vazduha neposredno iznad tečnosti, što povećava intenzitet isparavanja, procesa u kome se troši toplota, te se zbog toga supa u tanjur hlađi.

Zašto nam je hladnije kada izademo iz vode ako duva vetar nego ako ne duva?

Objašnjenje je isto kao kod vrele supe. Pošto su ubrzava isparavanje kapljica vode sa kože, više se topote oduzima telu.

Pored topotnog stanja podloge sa koje se vrši isparavanje i meteoroloških uslova (temperature i relativne vlažnosti vazduha, brzine vетра i vazdušnog pritiska) i neke druge osobine podloge utiču na intenzitet isparavanja. Voda brže isparava, pri istim ostalim uslovima, sa površine slatke nego slane vode, zbog jačih kohezionih sila između molekula vode i soli. Isparavanje vode sa zemljišta i sa vegetacijom i bez vegetacije zavisi pre svega od njegove vlažnosti. Isparavanje sa zemljišta zavisi još i od tipa, hraptovosti i rastresitosti zemljišta, reljefa, ekspozicije terena i blizine podzemnih voda, a isparavanje vode sa biljnog pokrivača zavisi od vrste, stanja i faze razvića biljaka.

### 5.3.1 Isparavanje sa zemljišta

Isparavanje vode sa zemljišta zavisi, kao što je već rečeno, u prvom redu od sadržaja vlage. Ono je, sa zemljišta koje je zasićeno vodom do punog poljskog slobodne površine vode pri istim meteorološkim uslovima. To predstavlja najveće moguće isparavanje pri datim uslovima i naziva se **potencijalno isparavanje**. Ako zemljište nije zasićeno vodom tada je stvarno ispa-

<sup>2</sup> poljski vodni kapacitet – vodna konstanta zemljišta, koja se definije kao količina vode koja se zadrži u zemljištu posle oticanja gravitacione vode, pošto su prethodno sve pore bile ispunjene vodom.

ravanje manje od potencijalnog. Razlika između stvarnog i potencijalnog isparavanja je naročito izražena u pustinjama, a u našim krajevima tokom letnjih suša. Tada su vrednosti potencijalnog isparavanja veoma velike zbog visokih temperatura i velikog deficit-a vlažnosti vazduha, a vrednosti stvarnog isparavanja izrazito male zbog male količine raspoložive vlage u tlu.

Mehanički sastav i struktura zemljišta takođe utiču na isparavanje. Zemljišta koja su lakšeg mehaničkog sastava (npr. peščana) brže propuštaju vodu do dubljih slojeva, pa je sa njih gubitak vode isparavanjem manji nego sa zemljišta težeg sastava (npr. gline) koja više vode zadržavaju u površinskim slojevima. Isparavanje sa rastresitih zemljišta je manje, jer je kapilarno uzdizanje vode sporije nego u sabijenim zemljištima. Isparavanje je manje i sa ravnih i glatkih površina zemljišta, jer su iznad hraptovih zemljišta jača turbulentna strujanja, a površina sa koje se vrši isparavanje veća. Pošto se tamnija zemljišta više zagrevaju od svetlijih i isparavanje je sa njih veće.

Na isparavanje vode utiče i reljef, kao i ekspozicija terena. Isparavanje je veće na uzvišenjima nego u dolinama, zbog većeg zagrevanja i jačih vetrova. Na južnim stranama je povećano isparavanje, jer su one više izložene Sunčevim zracima.

Isparavanje sa zemljišta povezano je i sa nivoom podzemnih voda. Ono je veće što su izvori podzemnih voda bliži površini. Podzemne vode, koje se nalaze na dovoljno velikoj dubini, ne utiču na isparavanje sa površine zemljišta.

### 5.3.2 Isparavanje sa biljnog pokrivača

**Evapotranspiracija** je ukupni gubitak vode sa jedinice površine zemljišta pod biljnim pokrivačem. Evapotranspiracija se satoji od: isparavanja vode sa zemljišta, transpiracije i isparavanja vode sa površine listova.

**Isparavanje vode sa zemljišta ispod biljnog pokrivača** je manje nego sa golog zemljišta iz nekoliko razloga: zemljište prekriveno vegetacijom se manje zagreva nego golo zemljište, vlažnost vazduha je veća, a brzina veta manja nego iznad golog zemljišta. Ovački uslovi su naročito izraženi kada se radi o šumskom pokrivaču.

Međutim, kada se isparavanju sa zemljišta doda i transpiracija biljaka i isparavanje vode sa lišća, tada je ukupan gubitak vode sa zemljišta pod vegetacijom veći nego sa golog zemljišta, jer ukupna površina sa koje se vrši isparavanje može da bude i višestruko veća od površine golog zemljišta. Ukupno isparavanje sa zemljišta prekrivenog vegetacijom, u uslovima dovoljne vlažnosti zemljišta, može biti veće i od isparavanja sa slobodne površine vode.

**Transpiracija** je fiziološki proces isparavanja vode preko nadzemnih delova biljke. Procesi i mehanizmi koji kontrolisu transpiraciju su veoma komplikovani i uključuju interakciju abiotičkih i biotičkih faktora. Od ukupne vode koju biljka korenovim sistemom apsorbuje iz dubljih slojeva zemljišta, samo mali deo se koristi za sintezu organskih materija, dok se najveći deo utroši na transpiraciju. Voda koja učestvuje u transpiraciji služi i za transport mineralnih i organskih materija u biljci, a samim procesom transpiracije biljka se oslobađa suvišne topote. Prolazeći kroz tkiva hranjive materije ostaju u biljci, a voda u međućelijskim prostorima prelazi u gasovito stanje. Vodena para dospeva u atmosferu najvećim delom difuzijom kroz stome, a manjim delom kroz kutikulu biljaka i kroz otvore na stablu – lenticelle. U početnim fazama razvića biljaka, isparavanje sa zemljišta je obično veće od transpiracije, dok u kasnijim fazama kada se biljna masa uveća, transpiracija postaje veća od direktnog isparavanja sa zemljišta. Krajem vegetacionog perioda isparavanje sa golog zemljišta opet postaje veće od transpiracije.

**Intercepcija padavina**<sup>3</sup> i isparavanje vode zadržane na lišću biljaka mogu značajnije doprineti ukupnoj vrednosti evapotranspiracije pri visokim temperaturama i smanjenoj vlažnosti zemljišta.

Proces evapotranspiracije zavisi od velikog broja faktora koje možemo svrstati u sledeće grupe:

- meteorološki faktori (temperatura, zračenje, relativna vlažnost vazduha, brzina veta i padavine);
- pedološki<sup>4</sup> faktori (mehanički sastav i struktura zemljišta, sadržaj organske materije, boja zemljišta);

<sup>3</sup> intercepcija (lat. interceptio) – prisvajanje, oduzimanje tuđeg.  
intercepcija padavina – zadržavanje vode na biljnog pokrivaču.

<sup>4</sup> pedo- (grč. pedon) – predmetak sa značenjem: zemlja, tlo.  
pedologija – nauka koja proučava fizičku, hemijsku i biološku svojstva zemljišta.

- hidropedološki faktori (dubina podzemnih voda i vodne konstante zemljišta koje određuju fiziološki aktivnu vlagu);
- agrobiološki faktori (vrsta i stanje biljnog pokrivača, primenjene agrotehničke mere).

**Stvarna evapotranspiracija** predstavlja utrošenu količinu vode na transpiraciju i isparavanje u datim vremenskim uslovima i uslovima vlažnosti zemljišta. **Maksimalna evapotranspiracija** je utrošak vode određene biljne vrste u uslovima optimalne vlažnosti zemljišta, a **potencijalna evapotranspiracija** je maksimalna evapotranspiracija travnatog pokrivača u punom porastu koji potpuno prekriva zemljište. Potencijalna evapotranspiracija se često naziva i referenta ili **standard evapotranspiracija**.

### 5.3.3 Dnevni i godišnji hod isparavanja

Dnevni i godišnji tokovi isparavanja prate dnevne i godišnje hodove temperature površine koja isparava i vazduha iznad. To važi za potencijalno isparavanje, odnosno za isparavanje sa slobodne površine vode i sa zemljišta koje je dovoljno vlažno, pa je stvarno isparavanje približno jednako potencijalnom.

U toku dana isparavanje je najveće između 12 i 16 sati po lokalnom vremenu. Pored najviših temperatura podloge i prizemnog sloja vazduha, u tom periodu je najmanja zasićenost vodene pare u vazduhu, a konvektivna strujanja su najintenzivnija. Isparavanje se tokom noći smanjuje, a minimum se javlja pred zoru kada vrednost isparavanja može biti i 0 mm. U tom periodu često dolazi i do suprotnog procesa – kondenzacije ili sublimacije vodene pare i formiranja roze ili slane na površini tla.

Godišnji hod isparavanja takođe prati godišnji tok temperature, pa se u našim krajevima maksimum isparavanja javlja u julu i avgustu, a minimum u decembru i januaru.

### 5.4 Vodena para u atmosferi

Vodena para u atmosferi potiče od isparene vode sa vodenih i kopnenih površina. Manji deo dospeva u atmosferu i sublimacijom sa površina pokrivenih

ledom i snegom. Transport vodene pare u atmosferi se odvija vazdušnim strujanjima i difuzijom koja je od daleko manjeg značaja. Količina vodene pare u vazduhu veoma brzo opada sa visinom, brže u slobodnoj atmosferi nego na planinama, gde je vazduh i na visini u direktnom kontaktu sa površinom koja isparava. U inverzionim slojevima može se desiti da sadržaj vodene pare raste sa visinom.

Prisustvo vodene pare u atmosferi čini vazduh vlažnim. Vlažnost vazduha se može iskazati različitim veličinama koje se mogu svrstati u dve grupe. Prva grupa veličina daje informaciju o sadržaju vodene pare u vazduhu, a druga o stepenu zasićenja vodene pare.

#### 5.4.1 Veličine koje opisuju vlažnost vazduha

Veličine kojima se određuje količina vodene pare u vazduhu su: absolutna vlažnost vazduha, specifična vlažnost vazduha, odnos smeše i pritisak vodene pare.

#### ■ APSOLUTNA VLAŽNOST

**Apsolutna vlažnost ili gustina vodene pare (a)** brojno je jednaka mase vodene pare u jedinici zapreme vazduha. Izražava se u  $\text{kg/m}^3$  ili  $\text{g/m}^3$ . Ako se delić vazduha uzdiže, njegova zapremina se zbog širenja povećava, tako da vrednost absolutne vlažnosti opada, iako se količina vodene pare u posmatranom deliću vazduha nije promenila. Zbog toga se absolutna vlažnost i ne koristi često u meteorologiji.

#### ■ SPECIFIČNA VLAŽNOST I ODNOS SMEŠE

**Specifična vlažnost vazduha (q)** definiše se kao masa vodene pare u jedinici mase vazduha (ukupne mase svog vazduha i vodene pare), a **odnos smeše (r)** kao masa vodene pare u jedinici mase svog vazduha (vazduha bez vodene pare). I jedna i druga veličina su bezdimenzionalne ( $\text{kg/kg}$ ), a često se izjavaju i u  $\text{g/kg}$ . Specifična vlažnost i odnos smeše se ne menjaju pri promeni zapremine delića vazduha,

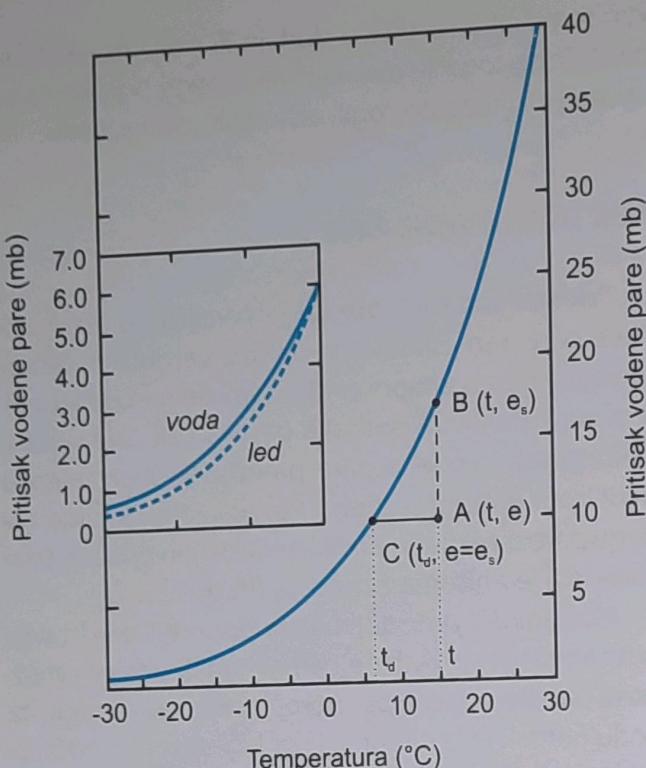
već samo ako se deliću dodaje ili oduzima vodena para. Zbog toga su ove veličine mnogo pogodnije za upotrebu u meteorologiji od apsolutne vlažnosti.

#### ■ PRITISAK VODENE PARE

**Pritisak vodene pare (e)** je parcijalni pritisak vodene pare u smeši gasova koji čine vazduh. Po Daltonovom zakonu ukupni pritisak smeše gasova jednak je zbiru parcijalnih pritisaka gasova koji čine smešu. Tako pritisak vodene pare predstavlja njen udio u ukupnom pritisku vazduha. Povećanjem sadržine vodene pare u vazduhu povećava se i njen pritisak. Izražava se u jedinicama za pritisak (Pa ili mb).

**Maksimalni pritisak vodene pare ( $e_s$ )** predstavlja pritisak zasićene vodene pare. Pri maksimalnoj vrednosti pritiska vodene pare, broj molekula koji napušta vodu jednak je broju molekula koji se u nju vraća, tj. brzina kojom voda isparava jednak je brzini kojom se vodena para kondenzuje. Zasićenje vodene pare nastaje u trenutku kada više nije moguće dovoditi nove količine vodene pare, a da kondenzacija ne bude veća od ispravanja. Ispravno je govoriti o zasićenosti vodene pare, a ne o zasićenosti vazduha vodenom parom, jer po Daltonovom zakonu svaki gas u smeši gasova se ponaša nezavisno od drugih (širi se u drugom gasu kao u praznom prostoru i njegov pritisak ne zavisi od pritiska ostalih gasova). U stvari, još ispravnije je govoriti o ravnotežnom pritisku, a ne o pritisku zasićenja vodene pare, jer se tada nalaze u ravnoteži tečna i gasovita faza vode, nezavisno od prisustva drugih gasovitih sastojaka vazduha. Međutim, uobičajeno je, pa čak i u naučnim tekstovima, da se govoriti o zasićenosti vazduha vodenom parom. S obzirom na odomaćenost te fraze, ona će biti korišćena i u ovom udžbeniku u pojedinim delovima teksta.

Maksimalni pritisak vodene pare zavisi u prvom redu od temperature. Što je viša temperatura, potrebno je prisustvo većeg broja molekula vodene pare da bi došlo do zasićenja. Na slici 5.4 prikazana je zavisnost maksimalnog pritiska vodene pare od temperaturе. Na temperaturama ispod  $0^\circ\text{C}$  maksimalni pritisak vodene pare je veći iznad površine vode nego iznad površine leda (manji grafikon na slici 5.4) i ta razlika je najveća na temperaturi  $-12^\circ\text{C}$ . Na slici 5.4 tačkom A



Slika 5.4 Zavisnost maksimalnog pritiska vodene pare i temperature iznad ravne površine čiste vode

označena je vazdušna masa koju karakteriše određeni pritisak vodene pare  $e$  i temperatura  $t$ . Posmatrani vazduh nije zasićen vodenom parom i stvarni pritisak je manji od maksimalnog. Do zasićenja može doći ako u vazduh dospe dodatna količina vodene pare (isprekidana linija) ili hlađenjem vazduha (puna linija). Ako do zasićenja dođe usled dodavanja vodene pare, tada temperatura ostaje nepromenjena, a povećava se pritisak vodene pare (tačka B na slici 5.4). Ako do zasićenja vodene pare dođe hlađenjem, tada se pritisak vodene pare ne menja, a temperatura se snižava (tačka C na slici 5.4). I u jednom i u drugom slučaju stvarni pritisak vodene pare je jednak maksimalnom.

U atmosferi do zasićenja vodene pare najčešće dolazi zbog snižavanja temperature vazduha usled adijabatskog širenja ili radiacionog hlađenja. Zasićenje zbog povećanja količine vodene pare dešava se uglavnom pri tihom vremenu u sloju vazduha male debljine, koji se nalazi neposredno iznad vlažnih površina koje isparavaju.

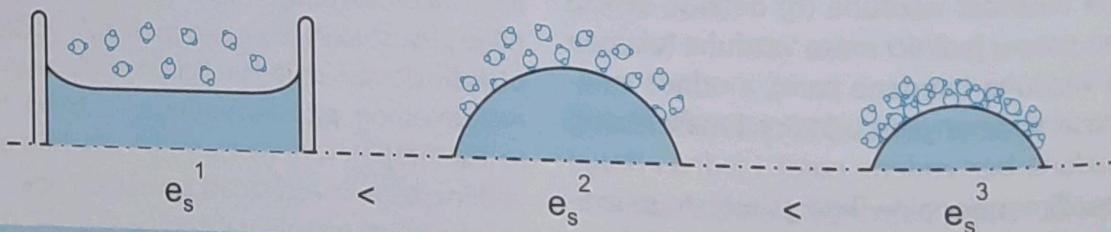
Postojanje razlike u pritiscima zasićenja vodene pare iznad vode i leda je od presudnog značaja za formiranje padavina u oblacima mešovitog sastava. Na vrednost maksimalnog pritiska vodene pare i obrazovanje padavina utiče i zakrivljenost vodene površine. Što je ona veća, veći je maksimalni pritisak vodene pare. To znači da je pritisak zasićenja vodene pare veći iznad kapljica vode nego iznad ravne površine, kao i iznad manjih nego iznad većih kapljica vode (slika 5.5). Pritisak zasićenja zavisi i od hemijskog sastava vode, tako da je maksimalni pritisak vodene pare manji iznad rastvora (npr. morske vode) nego iznad čiste vode.

Veličine koje određuju stepen zasićenosti vodene pare su: relativna vlažnost vazduha, deficit vodene pare i temperatura tačke rose.

#### ■ RELATIVNA VLAŽNOST VAZDUHA

Relativna vlažnost vazduha (U) definiše se kao odnos stvarnog i maksimalnog pritiska vodene pare za datu temperaturu u odnosu na ravnu površinu čiste vode. Relativna vlažnost se računa u procentima na osnovu sledeće relacije:

$$U = \frac{e}{e_s} \times 100 .$$



Slika 5.5 Maksimalni pritisak vodene pare u zavisnosti od zakrivljenosti vodene površine

Relativna vlažnost vazduha se menja ako se promeni sadržaj vodene pare ili temperatura vazduha. Povećanjem količine vodene pare u vazduhu pri konstantnoj temperaturi, povećava se relativna vlažnost posmatranog vazduha. Kada se temperatura vazduha smanjuje, a sadržaj vodene pare ostaje nepromenjen, relativna vlažnost raste, jer se smanjuje maksimalni pritisak vodene pare. Drugim rečima, na nižim temperaturama vazduha dolazi pre do zasićenja pri istom sadržaju vodene pare u vazduhu.

Da li je vazduh suviji u pustinjama nego u polarnim predelima?

Odgovor glasi i da i ne. Da, ako se posmatra zasićenost vazduha vodenom parom ili relativna vlažnost, a ne, ako se posmatra količina vodene pare, odnosno apsolutna vlažnost vazduha. Pustinjski vazduh ima malu relativnu vlažnost zbog visokih temperatura, a polarni vazduh, iako ne sadrži veliku količinu vodene pare, ima visoku relativnu vlažnost zbog ekstremno niskih temperatura.

Relativna vlažnost vazduha je veličina koja se najčešće koristi u primjenjenim disciplinama za opisivanje vlažnosti vazduha, jer npr. ljudski organizam reaguje na promene relativne vlažnosti vazduha, a ne na promene količine vodene pare u vazduhu.

Zašto je vreme „teško“ kada je relativna vlažnost vazduha visoka?

Osnovni mehanizam kojim se ljudsko telo hlađi je znojenje. Isparavanjem znoja sa površine tela troši se određena količina toplote (latentna toplota isparavanja). Ako je relativna vlažnost vazduha mala, a temperatura vazduha visoka, isparavanje se odvija intenzivno i čovek ima subjektivni osećaj da je temperatura vazduha niža nego kada je relativna vlažnost velika. Pri visokim vrednostima relativne vlažnosti onemogućeno je isparavanje vode sa površine tela, nema hlađenja i znoj ostaje na koži. Zbog toga čovek mnogo teže podnosi visoke temperature kada je povećana vlažnost vazduha. Indeks topline daje vrednost temperature koju prosečni čovek oseća kao rezultat kombinovanog efekta temperature i relativne vlažnosti vazduha (dodatak II).

Zbog čega je važno imati isparivače u stanovima tokom zime?

Zbog toga što niska relativna vlažnost vazduha može imati štetne posledice po ljudsko zdravlje. Dolazi do sušenja i ispucalosti kože, do iritacije sluzokože grla i nosa koja otvara put bakterijskim infekcijama. U velikom broju stanova u zimskim periodima, relativna vlažnost vazduha je veoma niska. Hladan vazduh, čak i pri zasićenju, sadrži veoma malu količinu vodene pare. Kada se taj vazduh u stanovima zagreje za nekoliko desetina stepeni, njegova relativna vlažnost se drastično smanjuje, pa vrednost relativne vlažnosti često može biti daleko manja nego u pustinjama. Jednostavan način da se povećava relativna vlažnost u zatvorenim prostorijama je postavljanje isparivača u blizini grejnih tela.

## ■ DEFICIT VLAŽNOSTI

**Deficit vlažnosti (D)** se definiše kao razlika maksimalnog i stvarnog pritiska vodene pare i izražava se u jedincima za pritisak (Pa ili mb):

$$D = e_s - e.$$

## ■ TEMPERATURA TAČKE ROSE

Temperatura tačke rose ( $t_d$ ) je temperatura na kojoj, ako se vazduh hlađi bez promene pritiska i sadržaja vodene pare, stvarni pritisak vodene pare postaje jednak pritisaku zasićene vodene pare (slika 5.4). Na osnovu razlike u temperaturi vazduha i temperaturi tačke rose može se odrediti zasićenost vodene pare, odnosno relativna vlažnost. Temperatura tačke rose je uvek manja ili jednaka temperaturi vazduha. Što je veća razlika između temperature vazduha i tačke rose to je manja relativna vlažnost vazduha. Temperatura tačke rose je jednaka temperaturi vazduha kada je relativna vlažnost vazduha 100%.

Pošto se na temperaturama ispod 0°C razlikuju pritisci zasićenja iznad površine vode i leda, pored temperature tačke rose, može se definisati i **temperatura tačke slane (t\_f)**. To je temperatura na kojoj dolazi do zasićenja u odnosu na led, ako se vazduh hlađi bez

promene pritiska i sadržaja vodene pare u vazduhu. Pošto je pritisak zasićenja vodene pare za led manji od pritiska zasićenja za vodu, temperatura tačke slane je viša od temperature tačke rose.

#### 5.4.2 Dnevni i godišnji hod pritiska vodene pare i relativne vlažnosti vazduha

Dnevni i godišnji tokovi pritiska vodene pare i relativne vlažnosti vazduha zavise od temperature podloge i temperature vazduha, odnosno intenziteta isparavanja.

Iznad vodenih površina i u oblastima sa bujnom vegetacijom tokom cele godine dnevni hod pritiska vodene pare sledi dnevni tok temperature vazduha, pa se javlja po jedan maksimum i minimum pritiska vodene pare u toku dana. Iznad ovih područja gotovo stalno postoji zasićenje vodene pare zbog dovoljno raspoložive vode za isparavanje. Slično se dešava i iznad kopna u zimskim mesecima, kada su zbog niskih temperatura i male količine vodene pare dovoljne da dođe do zasićenja.

Iznad kopnenih površina u topljem delu godine pritisak vodene pare u toku dana ima dva maksima (u 9 i 21 h) i dva minimuma (u 4 i 15 h). Sa izlaskom sunca podloga se zagreva, povećava se intenzitet isparavanja i sadržaj vodene pare u vazduhu sve do 9 h, kada pritisak vodene pare dostiže svoj glavni dnevni maksimum. Tada počinju da se razvijaju turbulentna i konvektivna vazdušna strujanja koja sa sobom odnose vodenu paru. Jačina vazdušnih strujanja raste sve do najtopljih časova dana, kada se javlja sekundarni minimum pritiska vodene pare. Sa slabljenjem vazdušnih strujanja, pritisak vodene pare raste sve do 21 h, zbog isparavanja sa još uvek toplog tla. Tada se javlja sekundarni dnevni maksimum. Tokom noći pritisak vodene pare opada sve do izlaska sunca, kada se javlja i glavni dnevni minimum. Pad pritiska vodene pare u ranim jutarnjim časovima naročito je izražen pri kondenzaciji ili depoziciji vodene pare i obrazovanju rose ili slane.

Dnevni tok pritiska vodene pare u planinskim predelima uglavnom sledi promene temperature sa jednim minimumom i jednim maksimumom. To se dešava zbog dnevnog uzlaznog strujanja vazduha uz planinske padine koji donosi vodenu paru prema vr-

hovima. Strujanje je najintenzivnije tokom najtopljih časova, pa se tada javlja i maksimum pritiska vodene pare. Tokom noći uspostavlja se silazno strujanje vazduha, koje odnosi vodenu paru sa planinskih vrhova i tada se javlja minimum pritiska vodene pare.

Relativna vlažnost vazduha iznad kopna ima uglavnom suprotan dnevni tok od temperature vazduha. Najviše vrednosti relativne vlažnosti javljaju se pred izlazak sunca, a minimalne između 15 i 16 h. Planinski vrhovi zbog dnevnih uzlaznih i noćnih silaznih strujanja imaju gotovo sasvim suprotan dnevni tok relativne vlažnosti – minimum se javlja u ranim jutarnjim časova, a maksimum u vreme najintenzivnijih uzlaznih strujanja. Iznad većih vodenih površina dnevno kolebanje relativne vlažnosti je veoma malo.

Godišnji tokovi pritiska vodene pare i relativne vlažnosti pokazuju veću zavisnost od temperature vazduha nego dnevni tokovi. Iznad svih vrsta podloge minimum pritiska vodene pare i maksimum relativne vlažnosti javljaju se u najhladnjem mesecu, a maksimum pritiska vodene pare i minimum relativne vlažnosti u najtopljem mesecu u toku godine.

#### 5.5 Adijabatski procesi i stabilnost atmosfere

Termodinamički procesi zagrevanja i hlađenja bez razmene toplote sa okolinom nazivaju se adijabatski procesi<sup>5</sup>. U atmosferi se adijabatski procesi zagrevanja i hlađenja vazduha, bez dovođenja i odvođenja toplote, odvijaju pri uzlaznim i silaznim kretanjima.

##### 5.5.1 Adijabatski procesi u atmosferi

Vazduh koji se uzdiže ili spušta u atmosferi može se smatrati izolovanim sistemom koji ne razmenjuje toplotu sa okolinom, pa su stoga promene temperature posmatranog vazduha isključivo posledica transformacije unutrašnje energije u mehaničku i obrnuto. Prepostavka da pri uzdizanju i spuštanju vazdušnih masa nema razmene toplote sa okolinom je prihvati-

<sup>5</sup> adijabatan (grč. a – ne, diabano – prolazim) – nepropustljiv, neprovodljiv.

## 5.9 Padavine

**Padavine** su hidrometeori koji u tečnom ili čvrstom agregatnom stanju dospevaju na Zemljinu površinu ili se na njoj obrazujuju.

Prema mestu nastanka, padavine se mogu podeliti na padavine iz oblaka i padavine pri tlu. Padavine iz oblaka donose znatno veću količinu vode, te su daleko značajnije za život na Zemlji.

Pored količine, značajne karakteristike padavina su i njihov intenzitet i trajanje. Količina, odnosno **visina padavina**, obično se izražava u milimetrima (mm). Visina sloja vode u mm iznad 1m<sup>2</sup>, približno je jednaka zapremini vode u litrima ili masi vode u kilogramima koja padne na istu jediničnu površinu. **Intenzitet padavina** se definiše kao količina padavina koja padne u određenom vremenskom intervalu (npr. mm/min, mm/h itd.) Na osnovu intenziteta, padavine se dele na slabe, umerene i jake, a na osnovu trajanja na dugotrajne i kratkotrajne.

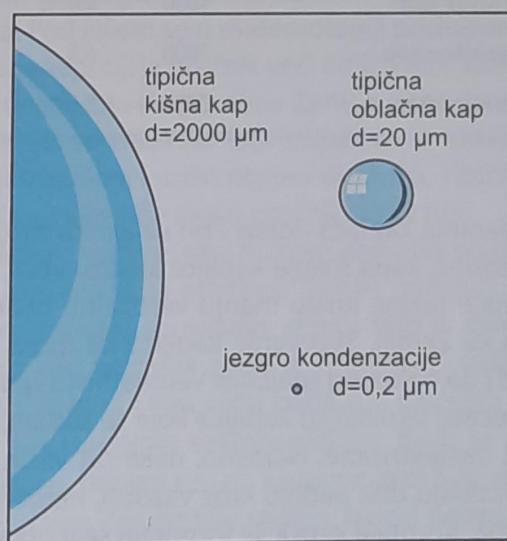
Po načinu padanja, padavine se mogu podeliti na pljuskovite, ujednačene i sipeće. **Pljuskovite padavine** su jakog ali neujednačenog intenziteta. Donose veću količinu vode, iako su kratkotrajne. Obično se izlučuju iznad manje površine na Zemlji. **Ujednačene padavine** su dugotrajne, približno konstantnog intenziteta i zahvataju veću površinu. **Sipeće padavine** su veoma slabe padavine konstantnog intenziteta, koje iako dugo traju ne donose znatnu količinu vode.

### 5.9.1 Obrazovanje padavina u oblacima

Da bi došlo do izlučivanja padavina iz oblaka potrebno je da se oblačne kapljice i kristalići leda uvećaju toliko da njihova težina postane veća od otpora vazduha i uzlaznih strujanja. Pretpostavlja se da su dva mehanizma uglavnom odgovorna za obrazovanje padavina u oblacima. Jedan je sudaranje i spajanje vodenih kapljica, koje se odvija u tzv. **toplim oblacima** (oblaci koji se nalaze ispod nulte izoterme), a drugi je rast ledenih kristalića, koji se odvija u tzv. **hladnim oblacima** (oblaci koji se prostiru iznad nulte izoterme).

### ■ RAST OBLAČNIH KAPLJICA SUDAROM I SPAJANJEM

Tipična kišna kap ima oko sto puta veći prečnik od tipične oblačne kapljice (slika 5.24), što znači da je potrebno oko milion oblačnih kapljica da bi se obrazovala jedna kišna kap. Kondenzacijom vodene pare u atmosferi nastaju oblaci, ali kondenzacija je suviše spor proces da bi dovela i do formiranja padavina. Da bi kondenzacijom od oblačne kapljice nastala kišna kap, potrebno je nekoliko dana pod idealnim uslovima.



Slika 5.24 Dimenzije kišne kapi, oblačne kapljice i jezgra kondenzacije

U toplim oblacima rast oblačnih kapljica kondenzacijom je u početku dominantan proces. Kada oblačne kapljice narastu do određenog prečnika, njihov rast do veličine kišnih kapi postiže se prvenstveno sudarima i spajanjem kapljica. Da bi se desio neophodan broj sudara za stvaranje kišne kapi, neophodno je da oblačne kapljice budu različitih dimenzija. Brzina padanja kapljica (tzv. terminalna brzina<sup>16</sup>) povećava se sa veličinom kapi (tabela 5.3). Veće kapi imaju veću terminalnu brzinu i sudaraju se sa manjim kapima koje im se nađu na putu, a koje sporije padaju.

<sup>16</sup> terminalna brzina – brzina objekta u trenutku kada je dostigao stalnu brzinu pri kretanju kroz fluid.

**Tabela 5.3** Terminalna brzina jezgara kondenzacije, oblačnih kapljica i kišnih kapi različitih dimenzija

	Prečnik ( $\mu\text{m}$ )	Terminalna brzina (m/s)
jezgro kondenzacije	0,2	0,0000001
tipična oblačna kapljica	20	0,01
velika oblačna kapljica	100	0,27
izmaglica	200	0,70
mala kišna kap	1000	4,0
tipična kišna kap	2000	6,5
velika kišna kap	5000	9,0

Do sudaranja kapljica dolazi i pri uzlaznim strujanjima vazduha, kada manje kapljice sustizu veće, koje zbog veće težine imaju manju vertikalnu brzinu ili padaju ka Zemlji. Sudaranje kapljica ne mora uvek dovesti i do njihovog spajanja. Verovatnoća spajanja se povećava ukoliko su kapljice koje se sudaraju suprotno nanelektrisane. Naravno, neke od većih kapi se i raspadaju dok padaju kroz vazduh, naročito pri sudarima. Krupnije kapi kiše formiraju se u oblacima veće debljine, u kojima su vertikalna i turbulentna kretanja intenzivnija, dok se u oblacima male debljine i slabih uzgonih kretanja, kakvi su npr. stratusi, mogu formirati samo sitnije kapi. Ako je vazduh ispod ovih oblaka dovoljno vlažan pojaviće se sipeća kiša, a ako nije ili ako je baza oblaka nešto viša, kapljice vode će ispariti na putu do tla.

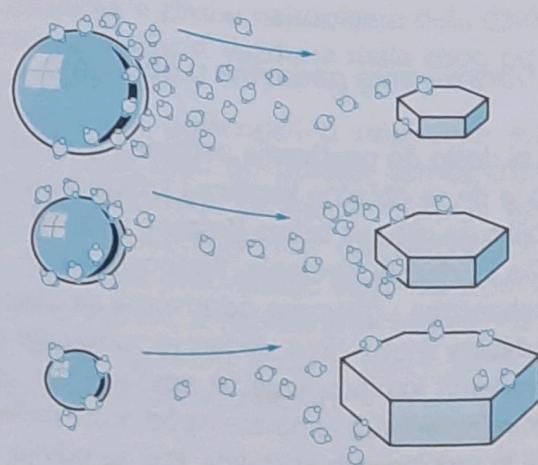
### RAST LEDENIH KRISTALIĆA

Rast ledenih kristalića u oblacima mešovitog sastava objašnjava se činjenicom da je maksimalni pritisak vodene pare iznad površine leda manji nego iznad površine vode. Kada je vazduh prezasićen vodenom parom u odnosu na led, a nezasićen u odnosu na vodu, tada se dešava da kristalići leda rastu deponovanjem vodene pare, a kapljice prehlađene vode isparavaju (slika 5.25). Zbog toga se obično kaže da ledeni kri-

stalići rastu na račun vodenih kapi. Ovaj proces je načito intenzivan na temperaturi od oko  $-12^\circ\text{C}$ , kada je razlika maksimalnih pritisaka vodene pare iznad leda i vode najveća (slika 5.4). Ledeni kristalići se dalje uvećavaju i interakcijama između oblačnih čestica: **agregacijom** (prikljanjem manjih kristala na većim kristalima leda), **mržnjenjem** (prikljanjem manjih kristala leda na većoj kapljici) i **akreacijom** (prikljanjem manjih kapi vode na većim kristalima leda).

Opisani mehanizmi koji dovode do obrazovanja padavina objašnjavaju zašto se najobilnije padavine izlučuju iz koloidno-nestabilnih oblaka. U oblacima koji se sastoje od mešavine ledenih kristalića i kapljica prehlađene vode dolazi od brzog rasta kristalića leda na račun vodenih kapljica, prvo difuzijom, zbog razlike u maksimalnim pritiscima vodene pare iznad leda i vode, a zatim akreacijom. U oblacima vertikalnog razvoja koji se sastoje od kapljica vode različitih dimenzija, obrazovanje padavina takođe može biti veoma intenzivno. U njima prvo velike kapljice rastu na račun malih, zbog razlike u vrednostima maksimalnog pritiska vodene pare iznad različito zakrivljenih površina (slika 5.5), a zatim se dalje uvećavaju sudarom i spajanjem.

Pored sastava i dimenzija oblačnih delića, još neki parametri određuju da li će doći do obrazovanja značajnijih padavina u datom oblaku ili ne. To su: vodnost oblaka, vremenska razmara (trajanje), debljina, vertikalna brzina, temperatura i turbulentacija u oblaku. Vod-



**Slika 5.25** Rast ledenih kristalića na račun vodenih kapljica

nost oblaka definiše se kao količina vode u tečnom ili čvrstom stanju, izražena u gramima, koja se nalazi u jedinici zapremine oblaka. Naravno, što je veća vodnost oblaka veća je i verovatnoća da će doći do obrazovanja padavina. Ako je vodnost oblaka manja od  $0,5 \text{ g/m}^3$  smatra se da oblak ne može biti padavinski. Ako je životni vek oblaka kraći od vremena potrebnog za formiranje padavina, do pojave padavina neće doći i pri dovoljnoj vodnosti oblaka. Debljina i vrednost vertikalne brzine vazduha u oblaku određuje vreme zadržavanja vodenih kapljica i kristalića leda u oblaku. Padavinski potencijal oblaka se povećava sa povećanjem temperature baze oblaka, povećanjem razlike u temperaturama baze i vrha oblaka, kao i pojačanim turbulentnim kretanjima koja povećavaju verovatnoću sudara oblačnih kapljica. Npr. u magli, koja po mnogim svojim karakteristikama predstavlja oblak, vodnost iznosi od 0,05 do  $0,2 \text{ g/m}^3$ , trajanje magle je između 2 i 6 časova, a vertikalna brzina je oko  $0,01 \text{ m/s}$ . U dobro razvijenom kumulusnom oblaku vodnost iznosi od 0,5 do  $2,5 \text{ g/m}^3$ , život oblaka je između 20 i 45 minuta, vertikalna brzina je oko  $10 \text{ m/s}$ , a turbulencija je veoma jaka.

### 5.9.2 Padavine iz oblaka

U umerenim i na većim geografskim širinama, gde se oblaci uglavnom prostiru iznad nulte izoterme, padavine nastaju u procesima vezanim za hladne oblake. Kristalići leda, koji se u njima obrazuju, na površinu Zemlje dospevaju u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju, u zavisnosti od temperature slojeva vazduha

kroz koje padaju. Na slici 5.26 prikazane su različite vrste padavina vezanih za različite vertikalne profile temperature koji se mogu pojaviti u toku hladnijeg dela godine.

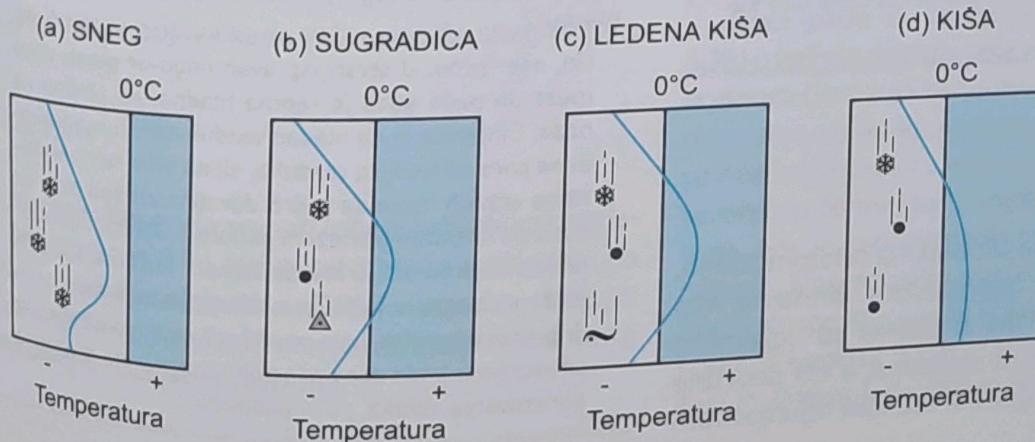
Osnovne vrste padavina iz oblaka su: kiša, sneg i grad. Postoje i prelazni oblici i podvrste kao što su: rosulja, ledena kiša, susnežica, krupa, ljutina i sugradica.

#### ■ KIŠA

**Kiša** je najzastupljeniji oblik padavina. Javlja se u svim godišnjim dobima na svim geografskim širinama. Pod kišom se u meteorologiji podrazumevaju vodene kapi čiji je prečnik veći od  $0,5 \text{ mm}$ . Kišne kapi koje dospevaju do površine Zemlje retko su veće od  $6 \text{ mm}$ , jer se krupnije kapi raspadaju u sudarima sa drugim kapima i usled otpora vazduha. Tipične kapi umereno jake kiše imaju prečnik oko  $2 \text{ mm}$ .

Sićušne vodene kapi manjeg prečnika od  $0,5 \text{ mm}$ , koje dospevaju na površinu Zemlje padajući veoma sporo, nazivaju se *rosulja*, *sipeća kiša* ili *izmaglica*. Sipeća kiša najčešće pada iz stratusa. U našim krajevima stratusi i ova vrsta padavina najčešće se javljaju zimi u toplom sektoru ciklona. Kada je vazduh nezasićen, dešava se i da krupnije kapi kiše dospeju na površinu Zemlje kao rosulja, jer pri padanju delimično ispare. Ponekad, zbog veoma male vlažnosti vazduha, sve kišne kapi ispare pre nego što stignu do tla i ta pojava padavinske zavese, koja kao da visi u vazduhu, naziva se *virga*.

**Dugotrajne kiše**, umerenog intenziteta, uglavnom padaju iz nimbostratusa. U našim krajevima



Slika 5.26  
Različiti oblici  
padavina u  
zavisnosti od  
vertikalnog profila  
temperature

one se obično javljaju u jesen pri prolasku toplog fronta ili centra ciklona.

**Pljusak kiše** predstavlja kišu velikog intenziteta, većeg od 1 mm/min. Pljuskovite padavine se javljaju uglavnom iz kumulonimbusa, oblaka u kojima su veoma jaka vertikalna strujanja, pa su i kišne kapi veoma krupne. U našim krajevima pljuskovite padavine se najčešće javljaju u maju i junu.

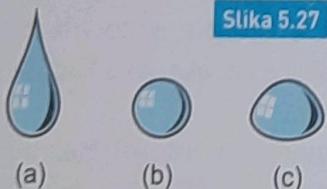
**Ledena kiša** je kiša čije se kapljice lede u trenutku dodira sa tlom, predmetima na tlu ili letilicima u vazduhu.

Kišne kapi su obično providne, ali ponekad mogu biti i različitih boja. Tako npr. ako vazduh iz severne Afrike koji sadrži pesak, prelazeći preko Sredoceanskog mora nošen južnim vetrovima, postane zasićen vodenom parom, kiša koja pada u našim krajevima je žutosmeđe boje.

Kada kišne kapi reaguju sa različitim zagađujućim materijama, kao što su azotna i sumporna jedinjenja, dolazi do pojave **kiselih kiša**, koje imaju veoma štetno dejstvo na životnu sredinu.

#### Kog oblika su kišne kapi?

Kišne kapi koje padaju nisu u obliku suze (slika 5.27a), iako se tako najčešće prikazuju na crtežima.



Slika 5.27

su krupnije kapi spljoštene (slika 5.27c), zbog većeg pritiska kojim okolni vazduh deluje na donji deo kapljice.

## ■ SNEG

**Sneg** je vrsta padavina iz oblaka u čvrstom stanju. U umerenim i na većim geografskim širinama, kao što je već rečeno, padavine iz oblaka su uglavnom u čvrstom stanju na većim visinama, a do površine Zemlje dospevaju u čvrstom ili tečnom agregatnom

stanju u zavisnosti od vrednosti temperature u primernom sloju vazduha. Sneg može padati kroz sloj vazduha čija je temperatura iznad 0°C, a debljina do oko 300 m, pre nego što se sasvim istopi.

Veličina i oblik ledenih kristalića zavise prvenstveno od temperature vazduha (tabela 5.4).

**Tabela 5.4** Oblik ledenih kristala u zavisnosti od temperature

Oblik kristala leda	Temperatura
pločice	0 do -4°C
iglice	-4 do -6°C
prizme	-5 do -10°C
pločice	-10 do -12°C
zvezdice	-12 do -16°C
pločice	-16 do -22°C
prizme	-22 do -50°C

Snežne pahuljice su najčešće u obliku šestokrakih zvezdica, jer se formiraju na temperaturama pri kojima kristalići leda najbrže rastu, zbog najveće razlike u pritiscima zasićene vodene pare iznad leda i vode.

Kada je vazduh kroz koji pada sneg vlažan, a temperatura oko 0°C, tada se pahuljice spajaju i obrazuju veće pahulje, prečnika nekoliko centimetara.

Da li je tačno da sneg ne može da pada kada je veoma hladno?

Ne, nije tačno. U stvari ispravan odgovor glasi: sneg može da pada kada je veoma hladno, ali obično ne pada. Činjenica je da hladan vazduh sadrži manje vodene pare od toplijeg vazduha, ali na svim temperaturama vazduh može da sadrži dovoljno vodene pare da dode do formiranja snežnih pahuljica. Razlog, uvreženom mišljenju da na niskim temperaturama sneg ne može da pada, je to što je zimi najhladnije tokom vrednih noći bez vetra, koje se javljaju pri antiklonarnim situacijama kada zbog silaznih strujanja ne dolazi do obrazovanja oblaka, pa ni padavina.

Pri niskim temperaturama pada suvi sneg tzv. **pršić**. Suvi sneg se zadržava na površini zemlje obrazujući snežni pokrivač, dok se vlažni sneg topi i ne zadržava na tlu.

Sneg pada pri širokom rasponu temperaturnog sloja vazduha. U umerenim širinama najčešće pada kada je temperatura prizemnog vazduha između  $-2$  i  $+2^{\circ}\text{C}$ . Ukoliko sneg pada kroz vazduh, čija je temperatura iznad  $2^{\circ}\text{C}$ , može doći do osetnog pada temperature vazduha zbog topljenja snežnih pahuljica.

Koja je najviša temperatura na kojoj može da pada sneg?

Da bi sneg pao na temperaturama koje su iznad nule, potrebno je da relativna vlažnost vazduha bude veoma niska. Najviša temperatura pri kojoj može da pada sneg je oko  $+10^{\circ}\text{C}$ . Izuzetno može da se desi da sneg pada i na temperaturama višim od  $+10^{\circ}\text{C}$ , kada su snežne pahuljice nošene hladnim i relativno suvim silaznim strujanjima u olujnim nepogodama.

**Pljusak snega** se javlja u hladnjem delu godine iz kumulusnih oblaka.

**Dugotrajne snežne padavine** padaju iz nimbostratusa i altostratusa.

**Susnežica** je pojava kada sneg i kiša padaju istovremeno. Nastaje kada je temperatura prizemnog vazduha pozitivna u sloju od više stotina metara, pa se znatan deo snežnih pahuljica istopi dok stigne do površine zemlje.

**Vejavica** nastaje kada gust sneg pada uz pojačan vetar.

**Mećava** je pojava kada vetar podiže sneg sa tla.

## ■ LJUTINA

Veoma sitni nerazgranati ledeni kristali koji pada pri veoma niskim temperaturama i svetlučaju na suncu, nazivaju se **ljutina**. Padaju iz jedva vidljivih oblaka ili čak pri vedrom vremenu, kada nema vetra i vertikalnih strujanja vazduha.

## ■ KRUPA

**Sitna krupa, snežna krupa ili zrnast sneg** se sastoji uglavnom od ledenih iglica ili snežnih kristalića pljosnatog i duguljastog oblika, prečnika manjeg od 1 mm. Pada iz istih oblaka iz kojih pada rosulja, a pri padu na tlo ne odskače. U narodu se ova vrsta padavina naziva *cigančići*.

**Krupa, ledena krupa ili solika** se sastoji od neprозрачnih zrna leda okruglog ili kupastog oblika, prečnika 2 do 5 mm. Drobi se pod prstima, odskače i rasprskava se pri padu na tlo. Obično pada u obliku kratkog pljuska u proleće, pri nestabilnom vremenu.

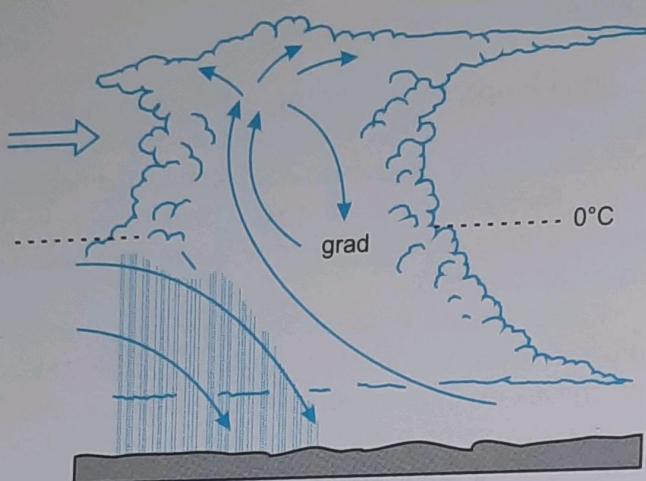
## ■ SUGRADICA

**Sugradica** se sastoji od zrna leda sfernog ili nepravilnog oblika, čiji je prečnik manji od 5 mm. Sugradica se odbija od tla proizvodeći karakterističan zvuk. Nastaje zamrzavanjem kišnih kapi ili još češće zamrzavanjem istopljenih snežnih pahuljica pri temperaturnim inverzijama.

## ■ GRAD

**Grad ili tuča** je vrsta padavina iz oblaka koju čine zrna leda sfernog ili nepravilnog oblika prečnika od 5 do 50 mm, pa i više. Zrna grada mogu biti providna ili se sastojati od više mutnih i providnih slojeva koji se naizmenično smenjuju. Javlja se isključivo pri temperaturama prizemnog vazduha iznad  $0^{\circ}\text{C}$ . Padanje grada obično kratko traje, najčešće 5 do 10 minuta, praćeno je grmljavinom i ne zahvata široku oblast.

Grad pada iz razvijenih kumulonimbusa (slika 5.28) u kojima postoji jaka vertikalna strujanja i velika vodnost. Obrazuje se na zrnima krupe ili na većim zamrznutim vodenim kapima koje rastu prikupljanjem prehladienih kapljica vode – akreacijom. Jezgra grada se obično formiraju u središnjem delu kumulonimbusa, gde je koncentracija prehladienih kapljica vode najveća. Nošena jakim vertikalnim strujanjima, jezgra grada dospevaju u više i hladnije delove oblaka. Prehladiene kapljice vode se lepe za jezgra grada, prevlačeći ih slojem leda koji je neproziran zbog prisustva



Slika 5.28 Gradonosni oblak

mehurića vazduha. Kada zrno grada postane dovoljno veliko i teško da uzlazna struja ne može da ga drži u vazduhu ili kada je zahvaćeno silaznim strujanjima u kumulonimbusu, ono počinje da pada, prolazeći još jednom kroz sloj prehlađenih kapljica i uvećavajući se. Ako dospeju do nižih toplijih delova oblaka, zrna grada dobijaju providan sloj leda nastao mržnjenjem većih kapljica vode, koje se razlivaju po celom zrnu, pa tek onda smrzavaju. Ta zrna mogu ponovo biti zahvaćena snažnim uzlaznim strujama i ponoviti sličan put kroz oblak ili pasti na tlo.

Manja zrna grada mogu se istopiti padajući ka zemlji, dok veća zrna grada nastala u jakim nepogodama dospevaju u čvrstom stanju na tlo, često prouzrokujući značajnu materijalnu štetu. Prečnik zrna grada je najčešće između 0,5 i 2 cm, ali može biti i znatno veći. Milion oblačnih kapljica je potrebno da bi nastala jedna kišna kap, a 10 milijardi oblačnih kapljica da bi se formiralo zrno grada prečnika 2 cm. Da bi zrno naraslo do ovih dimenzija potrebno je da se zadrži u oblaku 5 do 10 minuta. Jača uzlazna strujanja omogućavaju formiranje većih zrna grada zbog dužeg zadržavanja u oblaku. U raznim krajevima sveta zabeležene su pojave komada grada koji su težili i nekoliko kilograma. U okolini Valjeva i Osećine 18. juna 1970. godine padao je grad težine 600–700 grama.

Grad najčešće pada u umerenim širinama, ali najvećeg intenziteta je u tropskim oblastima. U našim krajevima grad se najčešće javlja u maju i junu i to obično u najtoplijim časovima tokom dana.

### 5.9.3 Padavine pri tlu

U padavine pri tlu ubrajaju se: rosa, slana, inje i poledicu. Fotografije padavina pri tlu, kao i nekih padavina iz oblaka mogu se videti u dodatku VI.

#### ■ ROSA

Kada se vazduh u kontaktu sa hladnom površinom tla ili predmeta ohladi kondukcijom do tačke rose, dolazi do zasićenja vodene pare. Ukoliko je temperatura tačke rose iznad  $0^{\circ}\text{C}$ , tada dolazi do kondenzacije vodene pare i taloženja kapljica vode, koje se nazivaju rosa.

Rosa se obrazuje tokom vedrih noći sa slabim vetrom. Tada je efektivno izračivanje sa površine Zemlje veoma intenzivno. U toku oblačnih noći ili noći sa vetrom, mala je verovatnoća da će doći do obrazovanja rose. Oblačni sloj sprečava intenzivno hlađenje tla, dok vetar meša hladniji vazduh pri tlu i topliji vazduh iznad, pa se temperatura vazduha ne spušta do tačke rose.

Obrazovanje rose zavisi od radijacionih i toplotnih osobina tla i predmeta na kojima se obrazuje. Najčešće i najviše rose se formira na predmetima i podlogama koje imaju veliku emisionu moć u infracrvenom delu spektra i koje loše provode toplotu. Rosa se najčešće javlja na vegetaciji, zbog toga što gornje površine listova gube toplotu zračenjem, a priliv toplote od površine i dubljih slojeva zemljišta ka vegetaciji je mali. Takođe, u biljnном sklopu vlažnost vazduha je veća nego u okolnom vazduhu, pa pre dolazi do zasićenja vodene pare nego iznad golog zemljišta. Pošto se najhladniji vazduh obično nalazi neposredno uz tlo, veća je verovatnoća da će se rosa obrazovati na vlatima trave nego na drveću ili predmetima koji se nalaze metar ili dva iznad zemlje.

Rosa je najobilnija i najčešće se javlja u tropskom pojasu, gde se gotovo svakog dana obrazuje značna količina, koja se sliva sa biljaka i krovova kuća. U umerenom pojasu rosa se najčešće javlja u kasno proleće i ranu jesen, kada je vazduh dovoljno vlažan, a noći dovoljno duge da se vazduh ohladi do tačke rose.

## ■ SLANA

Slana se sastoji od sićušnih ledenih kristala u obliku ljuspica, iglica, perja ili lepeza. Obrazuje se depozovanjem vodene pare, kada se temperatura vazduha spusti do tačke slane, temperature na kojoj, hlađenjem vazduha bez promene pritiska, vodena para postaje zasićena u odnosu na led. Na temperaturama ispod 0°C, formira se slana a ne rosa, jer je tačka slane viša od tačke rose.

Ponekad se dešava da se prvo, na temperaturi iznad 0°C, formira rosa, a zatim da se pri daljem hlađenju kapljice vode zamrznu. Tako formirani komadići leda nemaju kristalnu strukturu i nazivaju se **smrznuta ili bela rosa**. Kada je temperatura tačke rose oko 0°C mogu se istovremeno formirati i rosa i slana, jer se delovi podloge drugaćije hlađe zbog različitih radijacionih i topotnih osobina. Slana je u ovakvim slučajevima obilnija od rose zbog manjeg pritiska vodene pare iznad leda. Daljim hlađenjem i kapljice rose se smrzavaju, pa ovako formirana slana nije u potpunosti kristalne strukture i najčešće je u obliku perja.

Slana se javlja u umerenim širinama u hladnjem delu godine tokom vedrih, mirnih i hladnih noći.

## ■ INJE

Inje se obrazuje na temperaturama ispod 0°C u prehlađenoj magli ili sumaglici kada postoji horizontalno kretanje vazduha. Prehlađene kapljice magle lede se u dodiru sa hladnim vertikalnim površinama različitih predmeta, obrazujući ledene kristaliće, obično na njihovim ivicama i izloženim vetrusu. Istovremeno se i deponuje vodena para i to upravo na već formiranim ledenim kristalićima, pa se na taj način stvaraju naslage leda na tzv. napadnim ivicama. Inje koje se lako kruni naziva se **obično inje**, dok se inje koje ima kompaktniju strukturu naziva **tvrdo inje**.

Inje se javlja ređe od slane i pri drugačijim vremenjskim uslovima. Slana se obrazuje pri vedrom i tihom vremenu u najhladnijim časovima, dok se inje formira pri maglovitom i vlažnom vremenu uz postojanje vetrova i to u bilo kom delu dana. Naslage inja mogu prouzrokovati veće materijalne štete, ako se natalože velike količine koje lome grane drveća, nadzemne žice i kablove, pa čak i čitave dalekovode.

## ■ POLEDICA

Poledica je gladak, kompaktan sloj providnog leda koji se obrazuje na horizontalnim, ali i na vertikalnim površinama. Obično se obrazuje na početku ili na kraju zimskog perioda, na temperaturama vazduha i ispod i iznad 0°C.

Poledica se najčešće obrazuje na temperaturama vazduha ispod 0°C, zamrzavanjem prehlađenih kapljica kiše ili rosulje u dodiru sa čvrstim predmetima. Poledica nastala na ovakav način je najveće debljine i dugo se zadržava kada je i temperatura dodirne površine ispod 0°C. Može se obrazovati ne samo na tlu, već i na drveću, telefonskim žicama i električnim kablovima i prouzrokovati lomljenje grana i nadzemnih vodova.

Kada je zemljište smrznuto, poledica može nastati i na temperaturama vazduha iznad 0°C. To se obično dešava kada posle perioda veoma hladnog vremena dođe do naglog otopljenja. Tada do pojave poledice dolazi kada na smrznuto tlo padne kiša ili rosulja, ili pri advekciji toplog i vlažnog vazduha, kada se vodena para u dodiru sa hladnom podlogom prvo kondenzuje, a zatim smrzne.

### 5.9.4 Dnevni i godišnji hod padavina

Padavine su veoma promenljiv meteorološki element i u prostoru i u vremenu. Dnevni i godišnji tokovi padavina uglavnom slede promene oblačnosti tokom dana i godine. Režim padavina znatno se menja sa geografskom širinom. U umerenim širinama izdvajaju se dva osnovna režima padavina: maritimni i kontinentalni.

**Kontinentalni dnevni tok padavina** nije isti u toplijem i hladnjem delu godine. Leti maksimum padavina se javlja u popodnevним časovima kada se, usled razvoja termički uslovljenih vertikalnih strujanja vazduha, formiraju konvektivni oblaci. Zimi maksimum padavina se javlja u jutarnjim časovima kada zbog niskih temperatura dolazi do obrazovanja slojevite oblačnosti. Minimum padavina u toku dana javlja se posle ponoći. Odstupanja od ovakvih dnevnih tokova su česta usled različitih lokalnih uslova i prodora atmosferskih poremećaja. **Maritimni dnevni tok pa-**

davina odlikuje se veoma malim kolebanjima. Noćni maksimum i popodnevni minimum su izraženiji leti nego zimi.

**Kontinentalni godišnji tok padavina** odlikuje se maksimumom u letnjim, a minimumom u zimskim mesecima. **Maritimni godišnji tok padavina** karakteriše maksimum u hladnijem delu godine, a minimum leti. U kontinentalnim oblastima, gde se oseća maritimni uticaj, postoji više podtipova padavinskih režima.

U većem delu Srbije najviše padavina ima u maju i junu, a najmanje u januaru i februaru. Izuzetak je oblast Metohije, gde se zbog maritimnog utcaja Jadranskog mora, maksimum padavina javlja u novembru i decembru, a minimum u julu i avgustu, kao i na Crnogorskom primorju.

## 5.10 Uticaj vlažnosti vazduha, magle i oblaka na biljni svet

Vlažnost vazduha je meteorološki element koji ima veliki značaj u svim fazama rasta i razvića biljaka. Od vlažnosti vazduha zavisi isparavanje vode sa zemljista i transpiracija. Relativna vlažnost i deficit vodene pare su veličine vlažnosti koje se najviše koriste u agrometeorološkim istraživanjima. Za normalan rast i razviće biljaka nije povoljna ni mala, ali ni suviše velika relativna vlažnost vazduha, naročito ako ta stanja vlažnosti vazduha potraju duži vremenski period.

Veliki deficit vodene pare uz visoke temperaturu i vetar ima veoma štetne posledice po biljni svet. Pri maloj relativnoj vlažnosti vazduha povećava se transpiracija i isparavanje zemljiste vode, pa biljka gubi više vode nego što uspeva da nadoknadi iz zemljista preko korenovog sistema. Smanjeni sadržaj vode u biljkama izaziva venjenje, a ako takvo stanje potraje može doći i do uginuća. Pri nedovoljnoj snabdevenosti biljke vodom smanjuje se i intenzitet fotosinteze. Pri smanjenoj vlažnosti vazduha lišće se suši, smanjuje se fotosintetska površina, a time i producija organskih materija, što dovodi do smanjenja prinosa. Do smanjenja prinosa u uslovima male vlažnosti vazduha može doći i zbog nepotpunog opršavanja usled sušenja polenovog praha ili smanjenog nalivanja zrna.

Povećana vlažnost vazduha ubrzava vegetativni rast, a usporava cvetanje i sazrevanje plodova. Visoka relativna vlažnost vazduha može omesti otvaranje prašnika i prenošenje polenovog praha, a kod žitarica može da odloži puno sazrevanje i da poveća sadržaj vode u zrnu i slami, što otežava rad mašina i čuvanje. Velika relativna vlažnost vazduha i toplo vreme pospešuju pojavu i širenje mnogih biljnih bolesti i štetočina, naročito gljivičnih oboljenja. Zbog povećane vlažnosti vazduha može doći do stvaranja rose, pri čemu se zbog oslobađanja latentne topote kondenzacije smanjuje verovatnoća pojave jesenjih i prolećnih mrazeva.

Svakodnevnim praćenjem temperature i vlažnosti vazduha mogu se precizno odrediti termini za primenu preparata za zaštitu bilja, čime se povećava efikasnost u borbi protiv biljnih bolesti i štetočina.

Magla i oblaci utiču posredno na biljni svet. Ove meteorološke pojave smanjuju prozračnost atmosfere, što utiče na bilans zračenja i energije na površini Zemlje. Prisustvo magle i oblaka smanjuje intenzitet globalnog i menja odnos između direktnog i difuznog Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu zemlje. To ima negativan efekat na biljni svet, posebno u fazama razvića kada je biljkama neophodna svetlost i toplota.

Međutim, u sušnim periodima magla i oblaci imaju pozitivan uticaj na biljke, jer se zbog nizih temperatura smanjuje gubitak vode transpiracijom i isparavanjem. Pozitivan uticaj ima i smanjivanje izračivanja tokom maglovitih i oblačnih noći, čime se sprečavaju ili znatno ublažavaju rani jesenji ili pozni prolećni mrazevi. Primer izrazito pozitivnog uticaja magle na voćarsku proizvodnju je Kalifornija u Sjedinjenim Američkim Državama, gde prisustvo magle u hladnijem delu godine omogućava da biljke prođu neophodan proces kaljenja i da zadovolje svoje potrebe za hladnoćom, što izostaje tokom vedrih dana zbog relativno visokih temperatura.

Magla iz atmosfere donosi i značajne količine vлаге i azotnih jedinjenja koji su neophodni za ishranu biljaka. Vrednost relativne vlažnosti vazduha je velika kada je prisutna magla, a povećana vlažnost vazduha može imati, kao što je već rečeno, štetne posledice po biljni svet. Kada se magla sastoji od prehlađenih kapljica vode i kada postoji strujanje