

METEOROLOGIJA I ZAGAĐENJE VAZDUHA

Troposfera je najniži deo Zemljine atmosfere. Sadrži oko 75 % mase vazduha i oko 99 % vodene pare i aerosola. Prosečna debljina troposfere je oko 17 km, pri čemu je njen sloj deblji na ekvatoru (do 20 km) i tanji na polovima (oko 7 km). Najniži sloj troposfere, debljine oko nekoliko stotina metara do 2 km je planetarni granični sloj atmosfere, u kome trenje vazduha na površini Zemlje koja se okreće, utiče na strujanje vazduha. Debljina ovog graničnog sloja zavisi od reljefa i doba dana. Reč troposfera dolazi iz Grčkog: „tropos“ označava mešanje ili okretanje, što bi u slučaju atmosfere označavalo turbulentno mešanje vazduha koje ima značajnog uticaja na strukturu i ponašanje atmosfere u blizini Zemljine površine. Najveći broj fenomena koji su vezani za dnevne vremenske promene i zagađenje atmosfere se odvijaju u troposferi.

Hemijski sastav troposfere je uglavnom uniforman, osim sadržaja vodene pare, koji je najveći u blizini tla, odnosno vodenih površina koje isparavaju, dok sa visinom naglo pada, zato što temperatura opada sa visinom, što pak dovodi do opadanja temperature saturacije vodene pare, odnosno parcijalnog pritiska zasićene vodene pare, a samim tim i udela vodene pare u vazduhu.

Promena srednje vrednosti pritiska sa visinom se može odrediti prema

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g = -\frac{p g}{R_g T} \quad (1)$$

gde je p pritisak, z visina od površine Zemlje, g ubrzanje Zemljine teže, $R_g = 287 \text{ J/kgK}$ gasna konstanta vazduha i T je temperatura vazduha, koja se takođe menja sa visinom.

Sa povećanjem visine u atmosferi opada pritisak zbog smanjenja uticaja sile Zemljine teže, a to dovodi do adijabatskog širenja vazduha za koje važi relacija

$$p T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \text{const.} \quad (2)$$

Iz jed. (1) i (2) se dobija

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\kappa-1}{\kappa} \frac{g}{R_g} = -9,8 \frac{^\circ\text{C}}{\text{km}} \quad (3)$$

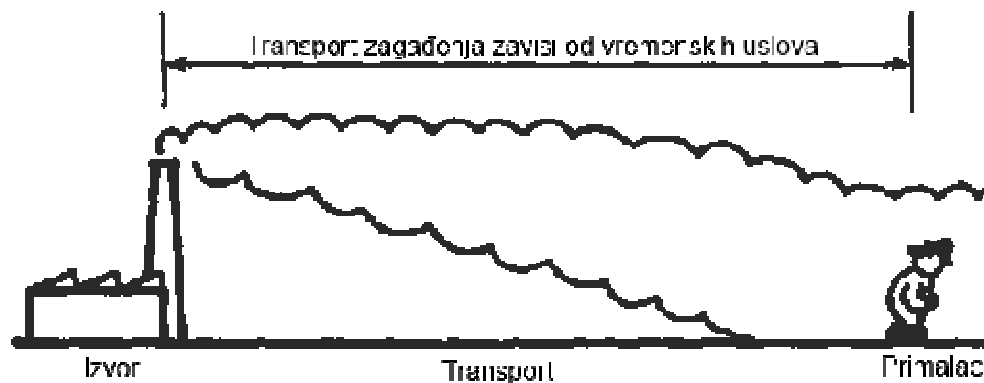
Stvarna srednja vrednost pada temperature sa porastom visine u troposferi je nešto manja od adijabatske i iznosi $6,5 \text{ }^\circ\text{C}$ na 1000 m povećanja visine, odnosno

$$T(z) = T_0 - 6,5 \cdot 10^{-3} z \quad (4)$$

gde je $T_0 = 288 \text{ K}$ srednja temperatura na nadmorskoj visini 0 m . Smenom jed. (4) u jed. (1) i integraljenjem od 0 m nadmorske visine do visine z dobija se

$$\frac{p}{p_{z=0}} = \left(1 - \frac{z}{44308}\right)^{5,2568} \quad (5)$$

Zagađenje vazduha zavisi od intenziteta izvora zagađenja i disperzije zagađenja u vazduhu. Disperzija zagađenja u atmosferi zavisi od vremenskih prilika.

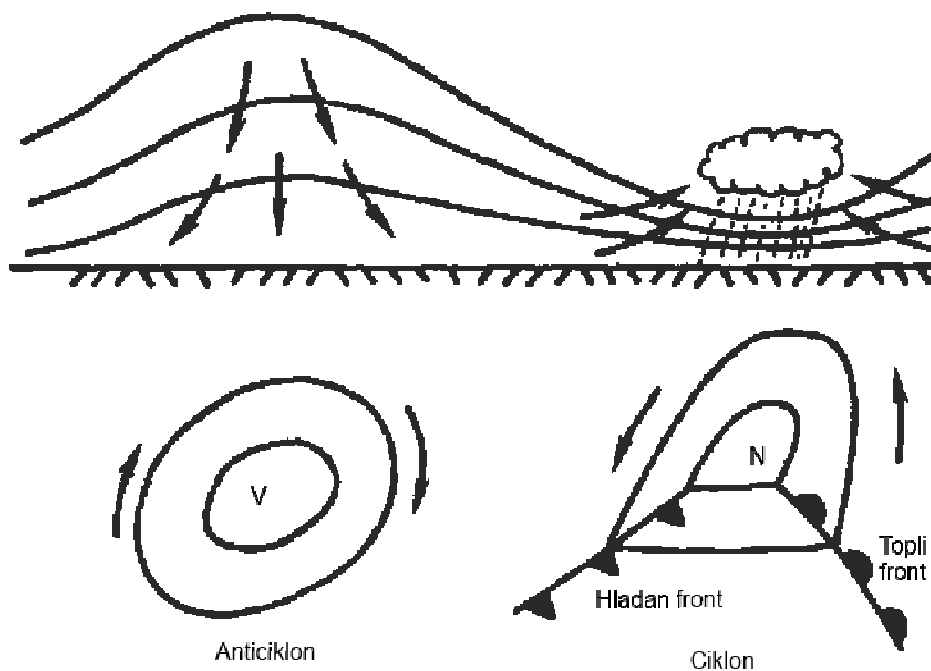


Slika 1 Prostiranje zagađenja u atmosferi.

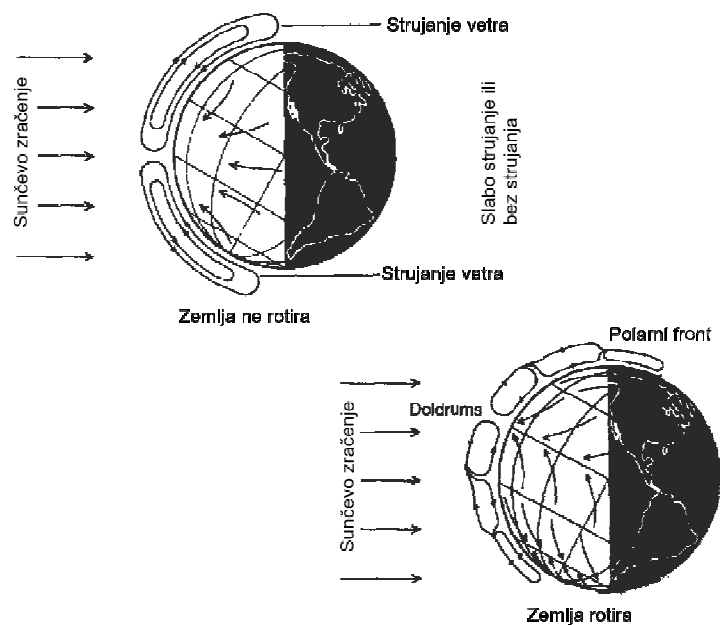
Kretanje vazdušnih struja usled temperaturnih razlika u atmosferi je prikazano na slici 2. Formiranje vetrova je prikazano na slici 3. Lokalni uslovi utiču na lokalnu klimu. Na slici 4 je prikazano vrtloženje vazduha iznad grada koje dovodi do gomilanja zagađenja u vazduhu. Kretanje vazduha se predstavlja takozvanom „ružom vetrova“ u vidu segmenata kao na slici 5, pri čemu ovakav grafički prikaz ima sledeće karakteristike:

- orijentacija segmenta određuje pravac i smer vetra,
- širina segmenta odgovara opsegu brzine vetra,
- dužina segmenta odgovara vremenskom periodu duvanja vetra.
-

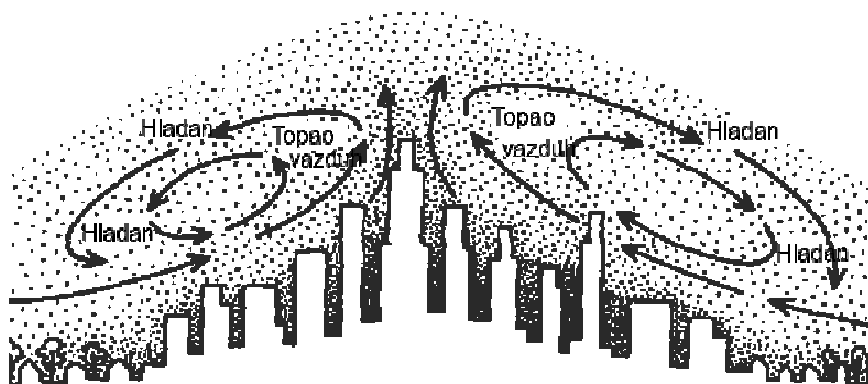
Prema slici 5 najveći je uticaj jugozapadnog vetra.



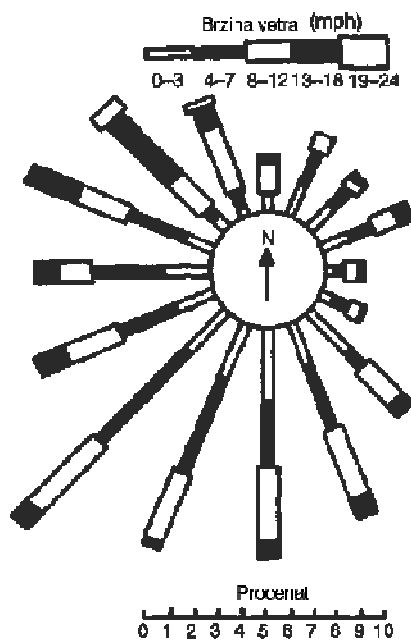
Slika 2 Kretanje vazduha u ciklonu i anticiklonu.



Slika 3 Horizontalna i vertikalna strujanja vazduha.



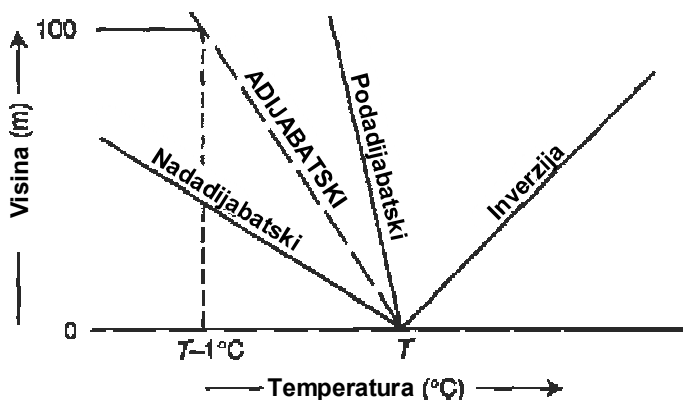
Slika 4 „Toplotno ostrvo“ u atmosferi iznad grada.



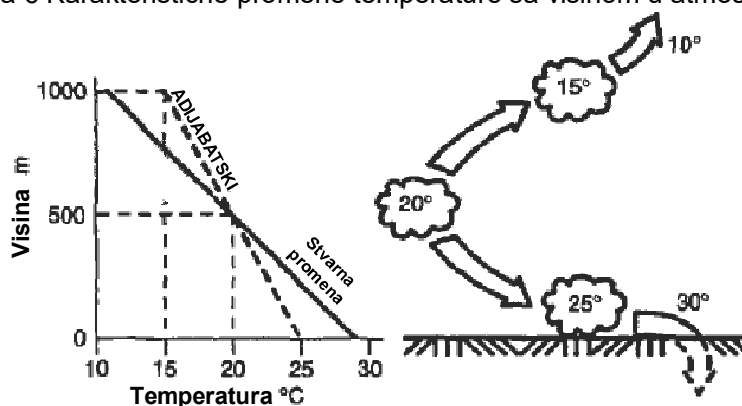
Slika 5 Ruža vetrova.

Pored ruža vetrova određuju se i ruže zagađenja. To su ruže vetrova određene samo za one periode kada je zagađenje veće od dozvoljenog ili nekog zadatog.

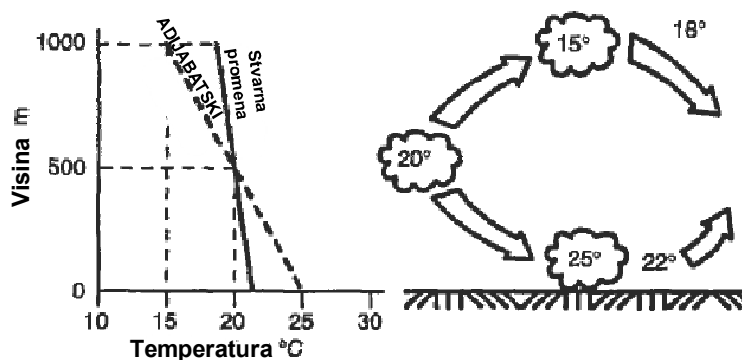
Promena temperature sa visinom utiče na strujanje vazduha i disperziju zagađenja. Zavisno od promene temperature sa visinom možemo imati slučajeve kao na slici 6. Za adijabatski slučaj, određen jednačinom (3), kaže se da ima neutralnu stabilnost, za veće opadanje temperature od $9,8\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ kaže se da je nadadijabatsko, a za manje da je podadijabatsko. Ukoliko imamo porast temperature sa visinom to je slučaj temperaturske inverzije. Nadadijabatski uslovi su nestabilni i intenziviraju disperziju zagađenja u vazduhu. Podadijabatski uslovi su stabilni i smanjuju disperziju. Temperaturska inverzija znatno smanjuje disperziju što može dovesti do znatnog povećanja koncentracije zagađenja iz eventualnog izvora. Ovi uslovi su ilustrovani na slici 7.



Slika 6 Karakteristične promene temperature sa visinom u atmosferi.

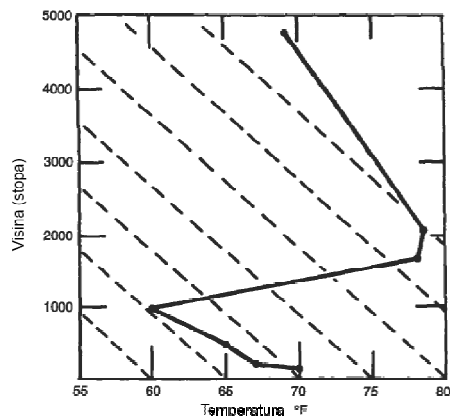


A. Nadadijabatski uslovi (nestabilni)

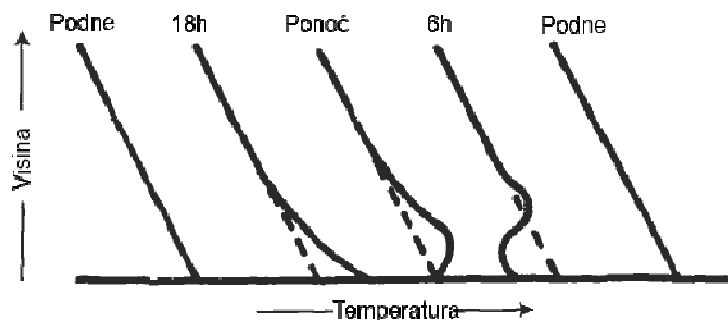


B. Podadijabatski uslovi (stabilni)

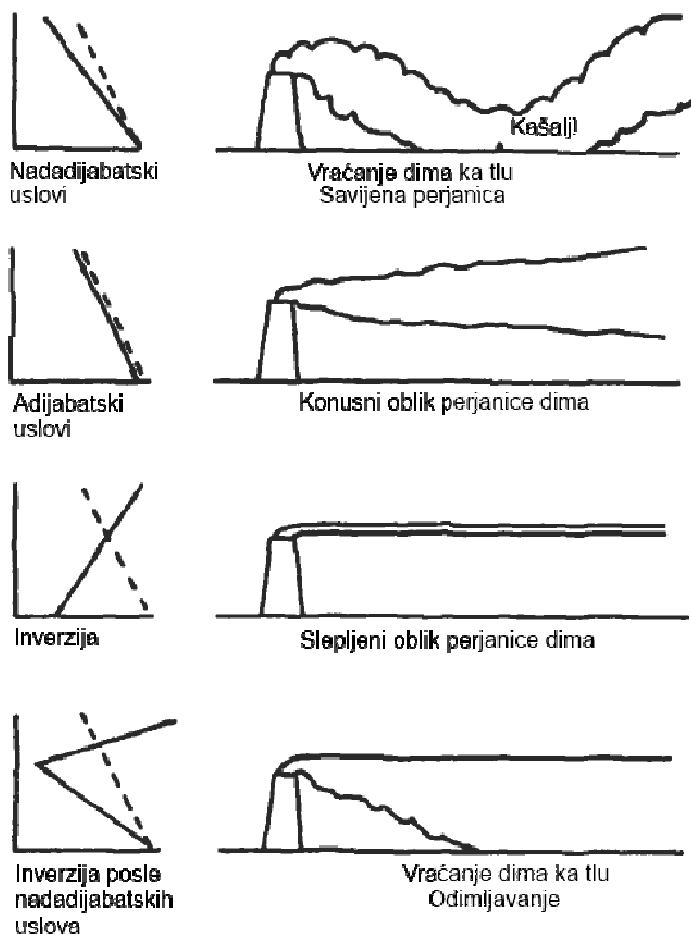
Slika 7 Uticaj promene temperature vazduha sa visinom na disperziju zagađenja.



Slika 8 Temperaturska inverzija iznad grada koja dovodi do formiranja oblaka zagađenja



Slika 9 Temperaturska inverzija izazvana hlađenjem tla tokom noći putem radijacije



Slika 10 Uticaj promene temperature po visini na disperziju iz dimnjaka

Uticaj vode u atmosferi. Pri adijabatskoj dekompresiji vlažnog vazduha, usled snižavanja temperature dolazi do kondenzacije vodene pare. Oslobođena latentna toplota kondenzacije usporava hlađenje, tako da opadanje temperature sa porastom visine u vlažnom vazduhu iznosi između -6,5 °C/km i -3,5 °C/km.

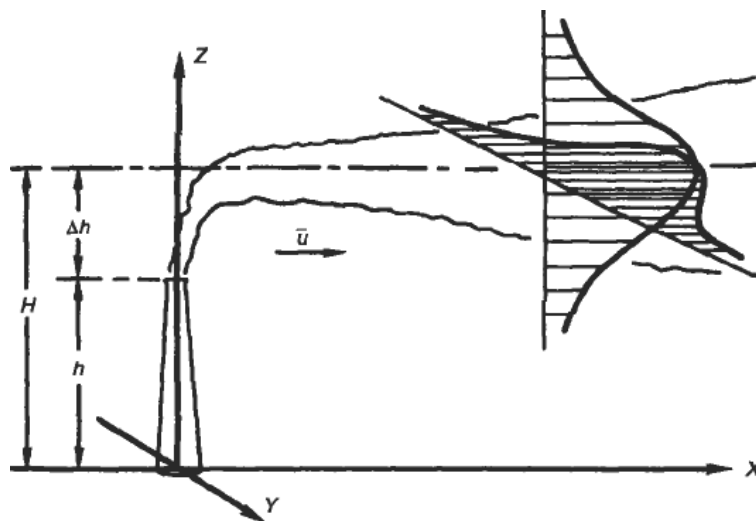
Hlađenjem vlažnog vazduha nastaje magla, pri čemu čestice zagađenja u vazduhu doprinose stvaranju magle. „Smog (smoke+fog)“ je „teži“ oblik zagađenja u gradovima. Kapi vode u magli stupaju u sledeću reakciju



Magla sprečava zagrevanja tla, tako da produžava periode zagađenja.

Disperzija u atmosferi.

- Najveći uticaj na transport zagađenja ima vetar.
- Najveća koncentracija zagađenja je u osi oblaka dima.
- Zagađenje se emituje stalno i proces je stacionaran.



Slika 11 Gausov model disperzije. Na slici je prikazana efektivna visina dimnjaka H.

Koncentracija zagađenja

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad \left[\frac{g}{m^3} \right] \quad (7)$$

gde je $C(x, y, z)$ koncentracija u tački prostora (g/m^3), Q izdašnost izvora emisije (g/s), u srednja brzina vetra (m/s), σ_y standardna devijacija oblaka dima u y pravcu (m), σ_z standardna devijacija oblaka dima u z pravcu (m).

Koncentracija na površini tla je

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(-H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot 2e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \quad (8)$$

pri čemu se pretpostavlja da se čestice reflektuju od površine tla (ne talože se na tlu).

Maksimalna koncentracija na površini tla je duž projekcije ose oblaka dima na tlu, to jest za $y=0$

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]. \quad (9)$$

Maksimalna koncentracija na površini tla biće za

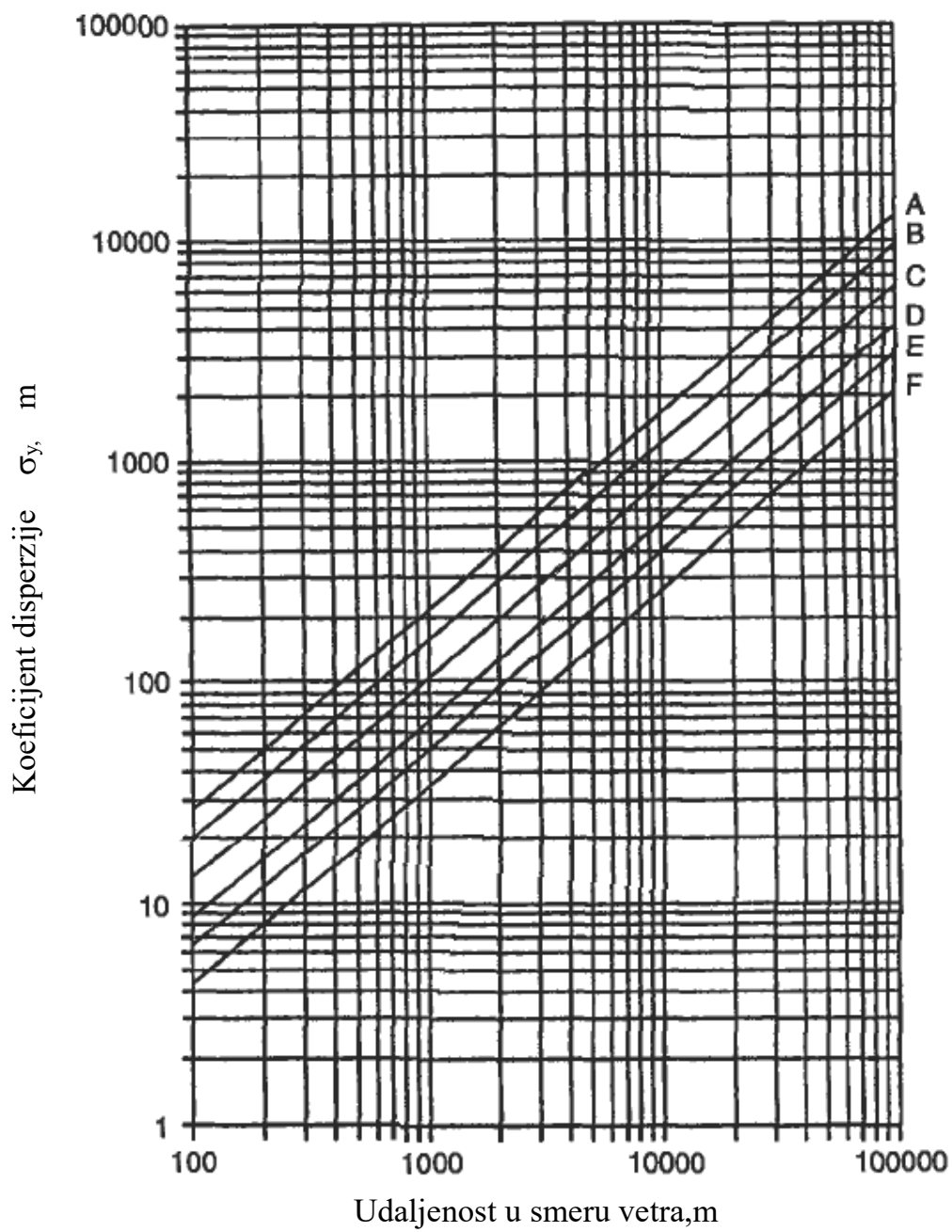
$$\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Standardne devijacije u bočnom σ_y i vertikalnom σ_z pravcu zavise od atmosferske stabilnosti i rastojanja od izvora emisije. Atmosferska stabilnost je klasifikovana slovima od A do F, takozvane klase stabilnosti, prema sledećoj tabeli

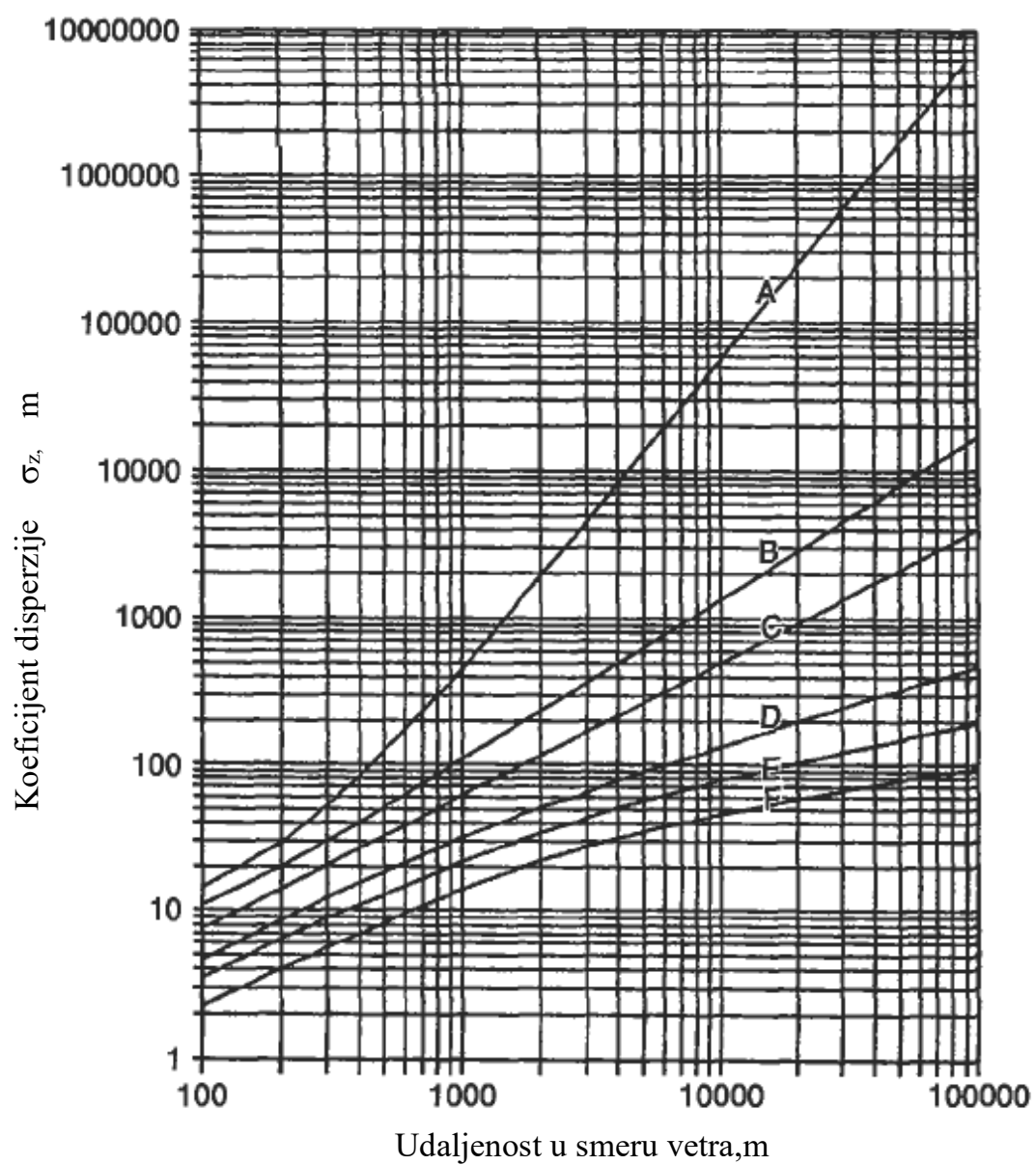
Tabela 1. Klase atmosferske stabilnosti pri različitim uslovima

	Dan Osunčanost			Noć Oblačnost	
	Jaka	Srednja	Slaba	1/2 oblačnost	3/8 oblačnost
Brzina vetra na visini 10 m od tla (m/s)					
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	D	E
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D		

Sa A je označena najmanje stabilna klasa, a sa F najstabilnija klasa. Klase A, B i C odgovaraju nadadijabatskim uslovima, klasa D neutralnim uslovima, a klase E i F podadijabatskim uslovima. Pored ovih, postoji i klasa G koja odgovara izrazitoj temperaturskoj inverziji, ali ona se najčešće vezuje za klasu F. U gradovima nivo stabilnosti atmosfere najčešće može ići najviše do klase D zbog efekta „toplotnog ostrva“, dok klase E i F odgovaraju uslovima koji se javljaju u neneaselejn timerdelima. Vrednosti standardnih disperzija se određuju prema dijagramima na slikama 12 i 13.



Slika 12 Standardna devijacija σ_y u bočnom pravcu u zavisnosti od rastojanja od izvora zagađenja i klasa stabilnosti atmosfere.



Slika 13 Standardna devijacija σ_z u vertikalnom pravcu u zavisnosti od rastojanja od izvora zagađenja i klasa stabilnosti atmosfere.

Promena brzine vetra sa visinom.

$$u = u_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (11)$$

gde je u_0 brzina vetra na visini h_0 , a eksponent n se naziva parametar stabilnosti i prikazan je u sledećoj tabeli

Tabela 2. Veza parametra stabilnosti klase stabilnosti atmosfere*

Klasa stabilnosti atmosfere	n
Klase A, B, C - Velika brzina opadanja temperature	0,20
Klasa D - Mala brzina opadanja temperature ili jednaka 0	0,25
Klasa E - Umerena inverzija	0,33
Klase F i G - Jaka inverzija	0,50

* Iz Wark i Warner (1986).

Efektivna visina dimnjaka.

Efektivna visina dimnjaka H je ona na kojoj oblak dima počinje da struji niz vetar. Jednaka je zbiru visine dimnjaka h i vertikalne putanje dima Δh (slika 11)

$$H = h + \Delta h$$

pri čemu se Δh određuje u zavisnosti od stabilnosti atmosfere

- za nadadijabatske uslove

$$\Delta h = 3,47 \frac{V_s d}{u} + 5,15 \frac{Q_h^{0,5}}{u} \quad (12)$$

- za neutralnu stabilnost

$$\Delta h = 0,35 \frac{V_s d}{u} + 2,64 \frac{Q_h^{0,5}}{u} \quad (13)$$

- za podadijabatske uslove

$$\Delta h = -1,04 \frac{V_s d}{u} + 2,24 \frac{Q_h^{0,5}}{u} \quad (14)$$

gde je V_s brzina gasa na izlazu iz dimnjaka (m/s), d prečnik izlaznog otvora dimnjaka (m), Q_h izvor toplote iz dimnjaka putem emisije dima (kJ/s).

Taloženje čestica.

Za čestice dimenzija od 1 do 100 μm brzina taloženja (Stoksov zakon)

$$V_t = g d^2 \frac{\rho_c}{18 \mu_{vaz}}, \quad (15)$$

gde je d prečnik čestice, ρ je gustina čestice, a μ je dinamička viskoznost.

Pri disperziji malih čestica, koncentracija na površini tla se određuje prema

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{\left(H - \left(V_t \frac{x}{u}\right)\right)^2}{2\sigma_z^2}}, \quad (16)$$

pri čemu se čestice talože na površini tla (zbog toga $\frac{1}{2}$ u razlomku na desnoj strani jednačine).

Brzina depozicije čestica ω (g/m²s) se određuje prema

$$\omega = V_t \cdot C(x, y, 0) = V_t \cdot \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{\left(H - \left(V_t \frac{x}{u}\right)\right)^2}{2\sigma_z^2}}. \quad (17)$$