

Ravnotežne koncentracije štetnih primjesa u atmosferi grada

Equilibrium Pollutants Concentrations in an Urban Atmosphere

MARINA BAJSIĆ

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Sažetak: Za pet kontinentalnih gradova u Hrvatskoj izračunat je koeficijent provjetravanja i normirana ravnotežna koncentracija kao ocjena provjetravanja. Izračunavanje normirane ravnotežne koncentracije zahtijeva poznavanje veličina koje do sada kod nas nisu mjerene: visina sloja miješanja nad gradom, tok senzibilne topline u okolišu i tok antropogenetske topline. Visina gradskog sloja miješanja zimi računata je po Summersu. U radu je dana i metoda procjene antropogenetske topline u kontinentalnim mjestima i praktičan grafikon za određivanje visine gradskog sloja miješanja.

Ključne riječi: Model kutije; Visina sloja miješanja u gradu; Antropogenetska toplina; Ravnotežna koncentracija.

Abstract: Flushing frequency and dilution factor are calculated for five continental Croatian cities to describe their natural aeration abilities. Dilution factor calculating requires the knowledge of urban mixing height, rural sensible heat flux and anthropogenic heat flux. Because of the lack of measured data, the urban mixing height in winter has been calculated according to Summers. A method has been derived for the estimation of winter anthropogenic heat fluxes. It also includes the operative graph for urban mixing height determination.

Key words: Box-model; Urban mixing height; Anthropogenic heat; Equilibrium concentration.

1. UVOD

1.1. Općenito

Grad kao specifična cjelina utječe, u okviru mezoskale, na atmosferske procese. Posebno je, za zdravlje ljudi i očuvanje materijalnih dobara, važna prisutnost štetnih tvari i njihova disperzija u atmosferi grada. Jedan od pristupa tom problemu je model kutije.

»Kutija« grada određena je površinom koju grad zauzima i visinom sloja miješanja. Osnovna pretpostavka je da za taj volumen vrijedi princip očuvanja svojstva koje promatramo. Promjena svojstva u volumenu ovisi o horizontalnoj advekciji, turbulenciji te procesima stvaranja i razlaganja unutar kutije. Teoretski prikaz i razradu modela dao je Lettau (Hanna, 1975).

Često se u osnovni model uvode dodatne aproksimacije ovisno o problemu koji razmatramo. Halpern (1971) je određivao vremensku promjenu koncentracije SO₂ za gradsko područje New Yorka. Mnogostrukim modelom kutije poslužio se Ragland (1973) kako bi mogao prostorno varirati vrijednosti nekih parametara i tako bolje opisati stvarnu situaciju u atmosferi grada.

Cilj ovog rada bio je odrediti srednje zimsko stanje aeracije, odnosno provjetravanja, kao lokalnu klimatsku karakteristiku nekoliko većih mjesta u Hrvatskoj. Kao mjera aeracije odabrana je normirana ravnotežna koncentracija, koja je obrnuto proporcionalna koeficijentu provjetravanja i visini sloja miješanja u gradu. Kako u odabranim gradovima ne postoje mjerenja visine sloja miješanja, ona je određena teoretski modelom Summersa (Oke, 1974). To je termodinamički model koji promatra strujanje stabilnog zraka iz okoliša prema gradu. Senzibilna toplina grada (toplina koja se prenosi konvekcijom) transformira taj zrak stvarajući sloj miješanja neutralne stabilnosti. U radu je izrađena metoda za određivanje senzibilne topline i antropogenetske topline u kontinentalnim mjestima Hrvatske. Potrebni podaci su samo horizontalne dimenzije grada i broj stanovnika. Nakon prikaza određivanja svih potrebnih veličina dan je praktičan grafikon za izračunavanje visine sloja miješanja.

Na kraju je izvršena procjena emisije SO₂ zimi u promatranim gradovima kako bi odredili zimsku ravnotežnu koncentraciju SO₂ i usporedili s izmjerenim koncentracijama SO₂.

1.2. Teorija modela kutije

Smatramo korisnim da u ovom dijelu rada u najkraćim crtama prikazemo teoriju modela kutije, jer su neki rezultati takvog pristupa korišteni u ovom radu.

Model kutije je jedan od analitičkih pristupa problemu difuzije. Osnovna pretpostavka je da u volumenu kutije vrijedi princip očuvanja svojstva koje razmatramo, npr. količine gibanja, količine topline ili općenito količine nekog svojstva. Promjena koncentracije c nekog svojstva unutar volumena kutije ovisi o ukupnom ulazu i izlazu tog svojstva iz volumena te procesima stvaranja odnosno razlaganja koji djeluju unutar kutije. To je prikazano jednadžbom (1.1) gdje je lokalna promjena koncentracije svojstva c rezultat djelovanja advekcije i unutarnjih izvora (ponora) S .

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (c\mathbf{v}) = S \quad (1.1)$$

Koncentracija c , izvori (ponori) S i brzina vjetera \mathbf{v} su prostorno vremenske funkcije koje sadrže niz fluktuacija različitih perioda i amplituda. Zbog toga se pri proučavanju turbulentnih procesa primjenjuje prostorno i vremensko osrednjavanje pa se funkcije mogu predočiti kao superpozicija osnovnog stanja i fluktuacija. Na (1.1) primjenit ćemo najprije operator vremenskog, a zatim prostornog osrednjavanja. (Općenito bi interval kod vremenskog osrednjavanja trebao biti veći od perioda fluktuacija, a manji od perioda osnovnog stanja). Nakon primjene operatora vremenskog osrednjavanja, (1.1) ima slijedeći oblik

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{c}\bar{\mathbf{v}}) = \bar{S} - \nabla \cdot (\bar{c}'\bar{\mathbf{v}}') \quad (1.2)$$

U izrazu (1.2) vodoravna linija označava srednje vrijednosti, a apostrofi fluktuacije. Član $\nabla \cdot (\bar{c}\bar{\mathbf{v}})$ sadrži u sebi advekciju, a $\nabla \cdot (\bar{c}'\bar{\mathbf{v}}')$ znači prostornu promjenu turbulentnog toka. Jednadžba (1.2) je ujedno i jednadžba turbulentne difuzije za volumen koji sadrži unutarnje izvore (ponore) uz zanemarivanje molekularne difuzije. Dimenzionalno su procesi vertikalne advekcije $\frac{\partial}{\partial z} (\bar{c}\bar{\mathbf{w}})$ i horizontalne difuzije $\left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}'\bar{u}') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}'\bar{v}') \right]$ manji od ostalih članova i često se zanemaruju pri rješavanju problema turbulentne difuzije.

Uz tu pretpostavku (1.2) prelazi u (1.3).

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}\bar{v}) = \bar{S} - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{c}'\bar{w}') \quad (1.3)$$

(1.3) je oblik jednadžbe difuzije koji je rješavao Lettau (Hanna, 1975). Ovdje će biti ukratko opisan njegov način rješavanja (1.3).

Taj izraz daje lokalnu promjenu koncentracije svojstva u nekoj točki volumena kutije. Provest ćemo integraciju (1.3) po površini plohe $Z \cdot \Delta x$ da bismo odredili srednju vrijednost koncentracije na toj plohi. Time smo zapravo primijenili operator osrednjavanja po površini koji za neku funkciju g ima ovaj oblik

$$[g] = \frac{1}{Z \Delta x} \int \int_{Z \Delta x} g dx dz.$$

Z je visina sloja miješanja, a Δx dimenzija kutije u smjeru puhanja vjetera. (Integracijom takvih ploha u y smjeru dobio bi se čitavi volumen).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial [c]}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}\bar{v}) \right] - \\ &- \frac{1}{Z} [(\bar{c}'\bar{w}')_z - (\bar{c}'\bar{w}')_0] + [\bar{S}] \end{aligned} \quad (1.4)$$

U jednadžbu (1.4) se dalje uvodi emisija u obliku tzv. »funkcije izvora« $Q(t)$. Funkcija izvora sadrži emisiju, izraženu preko turbulentnog toka koncentracije pri tlu i izvore (ponore) na promatranjnoj plohi.

$$Q(t) = [(\bar{c}'\bar{w}')_0] + [Z\bar{S}] \quad (1.5)$$

Ulaz i izlaz koncentracije rezultat su advektivnih procesa i turbulentnog toka na vrhu kutije. Omjer tih veličina i srednje površinske koncentracije C je koeficijent provjetravanja f^* .

$$f^* = \frac{1}{C} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}\bar{v}) \right] + \frac{1}{Z} [(\bar{c}'\bar{w}')_z] \right\} \quad (1.6)$$

Lettau (Hanna, 1975) je uveo i veličinu $u^*(t)$ koja ima dimenziju brzine, a definirana je ovako

$$u^*(t) = \frac{\Delta x}{C} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}\bar{v}) \right]. \quad (1.7)$$

Pomoću advektivne promjene, turbulentnog toka i unutarnjih izvora (ponora) određene su nove veličine $Q(t)$ i f^* koje imaju svoj fizikalni smisao. Tako sada (1.4) glasi

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -C \cdot f^* + \frac{Q}{Z} \quad (1.8)$$

i znači da je vremenska promjena koncentracije C u plohi $Z \cdot \Delta x$ ovisna o funkciji $Q(t)$ i provjetravanju svojstva koje se nalazi u plohi. Rješenje (1.8) se sastoji od dva člana

$$C = e^{-t'} (C_0 + \int_0^{t'} e^{t'} C^* dt'). \quad (1.9)$$

C_0 je početna koncentracija, a t' je bezdimenzionalna veličina uvedena pri rješavanju diferencijalne jednadžbe tako da je

$$dt' = f^* dt. \quad (1.10)$$

Prvi član desne strane u (1.9) znači eksponencijalno smanjivanje početne koncentracije s vremenom i faktorom provjetravanja. Drugi član izražava promjenu koncentracije u određenom vremenu s obzirom na izvore i provjetravanje. U (1.9) C^* je ravnotežna koncentracija koja nastupa kad je materijal potpuno izmještan u volumenu kutije i koncentracija se više ne mijenja s vremenom. Tada je lijeva strana u (1.8) jednaka nuli iz čega slijedi

$$C^* = \frac{Q}{Z f^*}. \quad (1.11)$$

Opisani oblik modela kutije se zbog svoje složenosti rjeđe koristi. Model postaje jednostavniji uvođenjem dodatnih pretpostavki koje još uvijek imaju svoje fizikalno opravdanje:

1. Vertikalni turbulentni tok na vrhu kutije je nula $[(\bar{c}'\bar{w}')_z] = 0$. To znači da je srednji prijenos koncentracije c' turbulentnom brzinom w' na vrhu kutije jednak nuli.

2. Nema unutarnjih izvora (ponora) što pojednostavljuje izraz za funkciju izvora na oblik $Q(t) =$

= $[(w' c')_0]$. Time su zanemareni kemijski, fotokemijski i fizikalni procesi koji djeluju na promatrano svojstvo kad uđe u atmosferu.

3. Horizontalno strujanje je konstantno pa je $u^*(t) = \bar{u}$.

Uz te pretpostavke (1.8) glasi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q}{Z} - \frac{C\bar{u}}{\Delta x} \quad (1.12)$$

Rješenje jednadžbe (1.12) pojednostavljenog modela kutije ima oblik (1.13):

$$C = e^{-t'} [C_0 + C^* (e^{t'} - 1)]. \quad (1.13)$$

Veličine C^* i t' u (1.13), zbog navedenih pretpostavki, nisu više iste kao u općem modelu kutije, o čemu nadalje treba voditi računa. Izraz za koeficijent provjetravanja (1.6) pojednostavljuje se zbog zanemarivanja turbulentnog toka na visini Z i pretpostavke o konstantnom horizontalnom strujanju \bar{u} .

$$f^* = \frac{\bar{u}}{\Delta x} \quad (1.14)$$

ima dimenziju vrijeme⁻¹ i označava koliko puta vjetar brzine \bar{u} prijeđe put Δx u nekom vremenskom intervalu. Izraz za veličinu t' ima isti oblik kao i prije (1.10), ali valja imati na umu da je koeficijent provjetravanja sad drugačiji. Ravnotežna koncentracija C^* je stacionaran slučaj jednadžbe (1.12). Tada je

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

$$C^* = \frac{Q\Delta x}{Z\bar{u}} \quad (1.15)$$

Ravnotežna koncentracija C^* uspostavlja se i u slučaju kad se koncentracija C mijenja s vremenom ako proces promatramo dovoljno dugo odnosno kad $t \rightarrow \infty$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(C_0 e^{-f^* t} + \frac{Q\Delta x}{\bar{u}Z} - e^{-f^* t} \right)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = \frac{Q}{Zf^*} = C^*$$

Ravnotežna koncentracija je dakle ona količina promatranog svojstva koja uz danu emisiju i meteorološke parametre (visina sloja miješanja i koeficijent provjetravanja) ostaje u atmosferi. Ako postoji emisija, unatoč provjetravanju, atmosfera je opterećena određenom količinom svojstva. Na meteorološke parametre ne možemo djelovati, ali se može i potrebno je kontrolirati emisiju, naročito emisiju tvari opasnih za zdravlje ljudi i materijalna dobra.

2. PRIMJENA MODELA KUTIJE NA ODABRANE GRADOVE

Cilj ovog rada bio je odrediti sposobnost aeracije atmosfere grada. Iz ranije izloženog (poglavlje 1.1) slijedi da je ravnotežna koncentracija mjera provjetravanja volumena grada. Ovdje je promatrano provjetravanje sumpornog dioksida kao osnovnog polutanta u gradskoj atmosferi. Ravnotežna koncentracija C^* (SO_2) određena je kao srednja zimska vrijednost za pet kontinentalnih gradova Hrvatske, i pokazatelj je lokalnih klimatskih i antropogenetskih karakteristika pojedinog grada. Zima je odabrana zato jer je emisija SO_2 (i drugih štetnih tvari) tada veća, a provjetravanje slabije. U radu su izračunate normirane koncentracije C^*/Q , pa se umjesto SO_2 može promatrati bilo koji polutant za koji je poznata emisija, a relativno je inertan u atmosferi (po pretpostavci pojednostavljenog modela kutije).

Određivanje ravnotežne koncentracije zahtijeva poznavanje koeficijenta provjetravanja i visine sloja miješanja što je opisano u slijedećim poglavljima. Koeficijent provjetravanja često se koristi kao samostalna mjera aeracije pa je u poglavlju 2.1 dana kratka ocjena provjetravanja u tom smislu.

2.1. Koeficijent provjetravanja f^*

Koeficijent provjetravanja $f^* = \frac{\bar{u}}{\Delta x}$ označava frekvenciju provjetravanja grada. To je ocjena povoljnog smještaja i veličine grada. Jednostavan je za primjenu, jer zahtijeva samo poznavanje brzine vjetra \bar{u} i dimenzije grada Δx u smjeru puhanja vjetra. Obično se izražava u sat^{-1} .

Za pet većih mjesta u kontinentalnom dijelu Hrvatske određen je koeficijent provjetravanja u klimatološkom smislu. Željela se dobiti ocjena srednje aeracije u toku čitave godine i u hladnom dijelu godine (zimi), kad su općenito izmjerene više koncentracije štetnih tvari, npr. SO_2 i dima. Upotrebljeni su podaci o vjetru iz višegodišnjih nizova. Ruže vjetra dobivene su prema motrenju smjera i jačine vjetra na osam smjerova u klimatološkim terminima. Jačina vjetra u boforima zamjenjena je odgovarajućom brzinom u $km\ sat^{-1}$. Kao reprezentant hladnog dijela godine odabran je siječanj. U tabeli 2.1 su podaci o srednjoj godišnjoj (g) i zimskoj (z) vrijednosti koeficijenta provjetravanja.

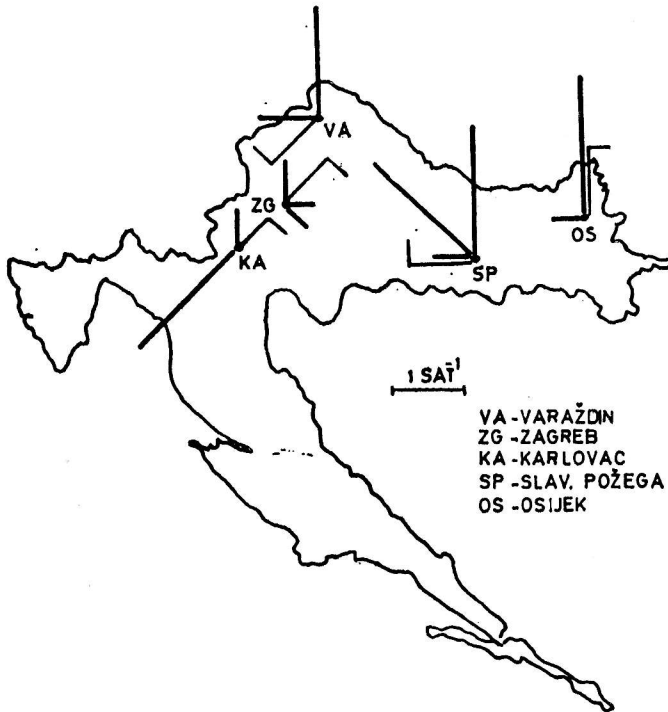
Tabela 2.1 — Godišnja (g) i zimska (z) vrijednost koeficijenta provjetravanja f^* [sat^{-1}]

Table 2.1 — Annual (g) and winter (z) flushing frequency f^* [$hour^{-1}$]

Smjer vjetra	Osijek		Sl. Požega		Varaždin		Zag. — Grič		Karlovac	
	g	z	g	z	g	z	g	z	g	z
N	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	1.6	0.7	0.9	0.6	0.4
NE	0.6	1.4	1.3	0.7	1.5	1.3	0.5	0.6	1.3	1.0
E	0.6	0.6	1.3	1.0	1.1	0.9	0.4	0.3	1.6	0.8
SE	0.6	0.5	1.5	1.0	1.0	0.7	0.4	0.3	0.8	0.7
S	1.6	1.2	1.5	1.0	1.1	1.1	0.6	0.3	0.8	0.6
SW	0.6	0.6	1.0	0.7	1.3	1.0	0.6	0.5	2.0	1.0
W	0.5	0.5	0.7	0.7	0.9	0.6	0.5	0.5	1.2	0.8
NW	0.8	0.8	2.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.9	0.6
Razdob.	1972—76		1961—70		1956—67		1956—75		1966—75	

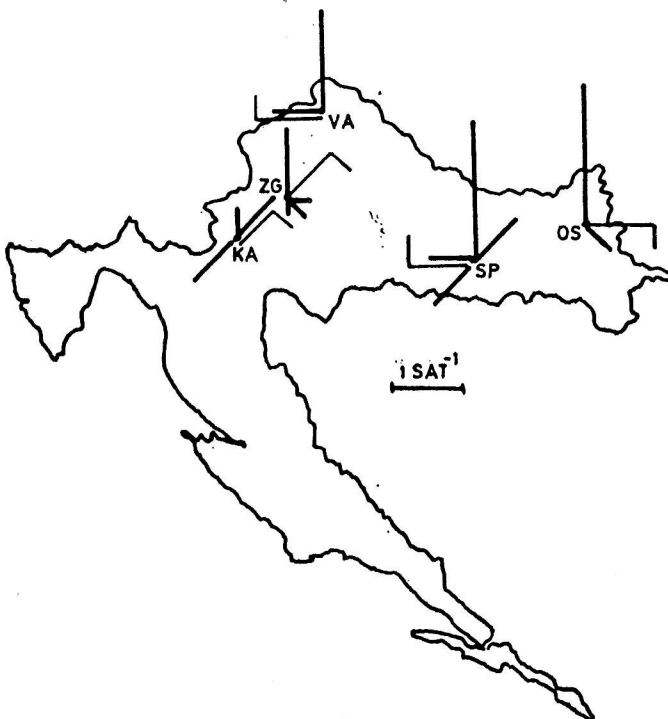
U posljednjem retku tabele 2.1 označeno je razdoblje iz kojeg je određena ruža vjetra.

Vrijednost u tabeli 2.1 ne razlikuje se bitno za godinu i siječanj, ali da bi se ocijenilo provjetravanje grada nekim vjetrom, potrebno je promatrati i čestinu puhanja tog vjetra. Zbog toga je uspoređen smjer



Sl. 2.1 — Smjer vjetra koji u godišnjem prosjeku ima najveću čestinu puhanja (↷) te smjerovi za koje godišnji koeficijent provjetravanja ima najveću odnosno najmanju vrijednost (↶).

Fig. 2.1 — The most frequent year wind direction (↷) and directions which have the greatest and the least flushing frequency (↶).



Sl. 2.2 — Isto kao sl. 2.1, ali za siječanj.

Fig. 2.2 — Same as Fig. 2.1, but for January.

za koji koeficijent provjetravanja ima najveću i najmanju vrijednosti sa smjerom vjetra najveće čestine (Sl. 2.1 i 2.2).

Osijek je izdužen u W-E smjeru, pa iako su srednje brzine tih vjetrova 1.8 ms^{-1} (W) i 1.7 ms^{-1} (E), provjetravanje tim vjetrovima je slabo. Grad je najbolje provjetren N vjetrom, a to je ujedno u godišnjem prosjeku i najčešći smjer vjetra.

U Slavonskoj Požegi N vjetar također najbolje provjetrava grad. Međutim najčešće puše W koji provjetrava grad frekvencijom od samo 0.7 sat^{-1} .

Slična je situacija i u Varaždinu, jer je zbog veličine i smještaja grada najpovoljnije kad puše N vjetar. Provjetravanje je najlošije u W smjeru koji je uz SW vjetar najčešći u Varaždinu.

Koeficijent provjetravanja za Zagreb određen je prema podacima vjetra na opservatoriju Zagreb — Grič koji je smješten u centru grada. Zbog veličine grada i relativno malih brzina vjetra, koeficijenti provjetravanja su za sve smjerove dosta mali ($0.3 \text{ sat}^{-1} \leq f^* \leq 0.9 \text{ sat}^{-1}$). Najčešće puše NE vjetar za koji je $f^* = 0.6 \text{ sat}^{-1}$ što je u odnosu na ostale smjerove vjetra dobro provjetravanje. Međutim, po čestini puhanja odmah iza NE je E vjetar koji jako slabo provjetrava grad.

Za razliku od prije spomenutih gradova u Karlovcu je vjetar N smjera nepovoljan, ali na sreću i rijedak. Najbolje provjetravanje je SW i NE vjetrom, a to su ujedno i vjetrovi koji najčešće pušu.

Koeficijent provjetravanja je tek prvi korak u ocjeni povoljnog smještaja i veličine grada. Da bi se dobila cjelovitija slika, potrebno je promatrati i vertikalnu dimenziju grada određenu visinom sloja miješanja.

2.2. Visina sloja miješanja

Sloj miješanja se razvija u prizemnom graničnom sloju zbog termičke i mehaničke turbulencije. Prijenos tvari u sloju miješanja određen je turbulentnom difuzijom i transportom. Iznad tog sloja turbulentna je difuzija zanemariva i dominantan proces je transport. Visina sloja miješanja ovisi o hrapavosti podloge i meteorološkim parametrima kao što su npr. vjetar, stabilnost atmosfere te senzibilna toplina, odnosno toplina koja se prenosi konvekcijom.

Nad ravnom podlogom za mirnog, neporemećenog dana visina sloja miješanja pokazuje izraziti dnevni hod. Minimum pada u vrijeme izlaza Sunca, a zatim visina brzo raste tokom prijepodneva. Ta je grana dnevnog hoda strmija od poslijepodnevne kad se sloj miješanja sporije smanjuje. Noću se od tla u visinu razvija izotermija ili inverzija pa je jedini proces koji može generirati sloj miješanja mehanička turbulencija.

Nad gradom su uvjeti drugačiji zbog jače mehaničke turbulencije, specifične geometrije grada i topline stvorene ljudskom aktivnošću. U vrijeme kad je primljena količina sunčevog zračenja mala (zimi) ili je uopće nema (noću), važan član toplinske bilance nad gradom postaje ljudskom aktivnošću stvorena toplina Q_F . Ona generira gradski sloj miješanja u vrijeme kad je nad okolinom grada zrak stabilno stratificiran.

Summersov termodinamički model (Oke, 1974) gradskog prizemnog sloja razmatra generiranje sloja miješanja nad gradom, ali uz određene pretpostavke:

a) Zrak nad okolinom je stabilan, uz vertikalni temperaturni gradijent γ . Takva je situacija česta noću, a u hladnom dijelu godine i danju. Tok senzibilne topline Q_{Hr} nad okolinom usmjeren je od atmosfere prema tlu, što za zrak znači gubitak topline.

b) Stabilan zrak iz okoline se prijelazom preko gradske površine transformira u adijabatski sloj miješanja, jer ovdje tok senzibilne topline ima smjer od tla prema atmosferi budući da u gradu djeluju specifični uvjeti uskladištenja i emisije topline primljene od Sunca i toplina stvorena ljudskom aktivnošću. Tu pretpostavku potvrdila su mjerenja (Kalanda i dr., 1980, Oke, 1978 b, Yap i dr., 1974).

c) Visina sloja miješanja trebala bi ovisiti o vertikalnom gradijentu potencijalne temperature u okolini $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r$ što je mjera stabilnosti okolnog zraka, brzini vjetra u , kojom zrak struji iz okoline i senzibilnoj toplini grada Q_{Hu} .

Summers je umjesto senzibilne topline upotrijebio samo jednu komponentu Q_{Hu} , toplinu stvorenu ljudskim djelovanjem, pa izraz za visinu sloja miješanja glasi:

$$h(x) = \left[\frac{2 Q_F(x) \cdot x}{c_p \rho u \left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

gdje je Q_F gustoća toka antropogenetske topline na mjestu x , a x je udaljenost od onog ruba grada na koji je zrak iz okoliša najprije došao, c_p je specifična toplina zraka pri konstantnom tlaku, ρ je gustoća zraka, a $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r$ vertikalni gradijent potencijalne temperature u okolini.

Leahey i Friend, (1971) rješavaju problem ocjene senzibilne topline u gradu jednadžbom (2.2):

$$Q_{Hu} = Q_F + Q_{Hr} - \sigma (T_u^4 - T_r^4) \quad (2.2)$$

Indeks »u« odnosi se na grad (urban) a »r« na okoliš (rural). Spomenuti autori su Summersov model primijenili za prognozu prostornih promjena visine sloja miješanja nad područjem New Yorka. Dobivena je dobra korelacija osmotrenih i prognoziranih visina sloja miješanja.

Što je zrak koji dolazi iz okoline stabilniji, odnosno što je $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r$ veći bit će ga teže dovesti u neutralno stanje, a ako je brzina strujanja veća, zrak će brže prijeći preko urbane podloge i neće se stići transformirati. Sloj miješanja razvija se od tla u visinu proporcionalno gustoći toka senzibilne topline i raste od ruba grada.

Da bismo odredili visinu sloja miješanja u odabranim gradovima, potrebno je izračunati gustoću toka

Senzibilna toplina Q_H prenosi se mehaničkom turbulencijom i slobodnom konvekcijom. Tok senzibilne topline je količina topline emitirana u jedinici vremena [W]. Ovdje je kao pozitivan smjer odabran onaj od tla prema atmosferi. Gustoća toka senzibilne topline je energija emitirana u jedinici vremena s jedinične površine pa ima dimenziju [Wm⁻²].

senzibilne topline u gradu Q_{Hu} i vertikalni temperaturni gradijent potencijalne temperature u okolini

$\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r$ određen je prema mjerenjima vezanom sondom u veljači i prosincu 1979. u Varaždinu i ta vrijednost uzeta je kao reprezentant okoliša u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Iz vrijednosti vertikalnog gradijenta potencijalne temperature u prvih 100 m, u slučajevima kad gradijent upućuje na stabilnost prizemnog sloja, određen je srednji $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r$.

Za uzorak mjerenja u veljači je $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, a u prosincu $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r = 4.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Gradijent potencijalne temperature u prosincu je velik, jer je tada bila izražena anticiklonalna situacija s jakim inverzijama u prizemnom sloju. Vrijednost $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ je upravo između vrijednosti vertikalnog gradijenta potencijalne temperature u malo stabilnim $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z} = 2.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}\right)$ i umjereno stabilnim $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z} = 3.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}\right)$ situacijama prema Pasquillovoj kategorizaciji (Beychok, 1979). To su klase stabilnosti koje bi po pretpostavci modela trebale vladati u okolini. Zato je računato s $\left(\frac{\partial\Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Uz tu vrijednost i uz

$\rho = 1.265 \text{ kg m}^{-3}$
 $c_p = 1007 \text{ J kg}^{-1} \text{ grad}^{-1}$

$K_H = 0.5 \text{ m}^2\text{sec}^{-1}$ (prema Leahey i dr., 1971), izrazom (2.3) za gustoću toka senzibilne topline u turbulentnom sloju (Oke, 1978 a)

$$Q_H = -\rho c_p K_H \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \quad (2.3)$$

izračunata je gustoća toka senzibilne topline u okolišu

$$Q_{Hr} = -16.60 \text{ Wm}^{-2}$$

Predznak je ovdje negativan, jer u uvjetima koje promatramo tok senzibilne topline ima smjer od atmosfere prema tlu.

Antropogenetska toplina Q_F nastaje izgaranjem različitih goriva u stacionarnim i mobilnim izvorima. U gradskim područjima, gdje je gustoća stanovništva velika, potrebno je uzeti u obzir i toplinu stvorenu ljudskim i životinjskim metabolizmom.

Sve komponente Q_F podložne su dnevnim, tjednim, sezonskim i višegodišnjim promjenama. Sezonske su promjene naročito izražene, jer zimi rade komercijalna i kućna ložišta koja znatno povećavaju Q_F . Na dnevni hod Q_F utječe vrijeme najjačeg loženja koje je pak ovisno o vanjskoj temperaturi i vremenu nastupa prometne gužve. Maksimum Q_F nastupa oko podne, a minimum navečer. Međutim, ako se Q_F promatra u odnosu na ukupnu gustoću toka radijacije najznačajnija je upravo večernja i noćna vrijednost Q_F , jer tada nema kratkovalne radijacije od Sunca. Zbog toga je upravo noću najveći utjecaj umjetno stvorene topline na vremenske prilike u gradu.

Sve komponente Q_F podložne su dnevnim, tjednim, sezonskim i višegodišnjim promjenama. Sezonske su promjene naročito izražene, jer zimi rade komercijalna i kućna ložišta koja znatno povećavaju Q_F . Na dnevni hod Q_F utječe vrijeme najjačeg loženja koje je pak ovisno o vanjskoj temperaturi i vremenu nastupa prometne gužve. Maksimum Q_F nastupa oko podne, a minimum navečer. Međutim, ako se Q_F promatra u odnosu na ukupnu gustoću toka radijacije najznačajnija je upravo večernja i noćna vrijednost Q_F , jer tada nema kratkovalne radijacije od Sunca. Zbog toga je upravo noću najveći utjecaj umjetno stvorene topline na vremenske prilike u gradu.

Sve komponente Q_F podložne su dnevnim, tjednim, sezonskim i višegodišnjim promjenama. Sezonske su promjene naročito izražene, jer zimi rade komercijalna i kućna ložišta koja znatno povećavaju Q_F . Na dnevni hod Q_F utječe vrijeme najjačeg loženja koje je pak ovisno o vanjskoj temperaturi i vremenu nastupa prometne gužve. Maksimum Q_F nastupa oko podne, a minimum navečer. Međutim, ako se Q_F promatra u odnosu na ukupnu gustoću toka radijacije najznačajnija je upravo večernja i noćna vrijednost Q_F , jer tada nema kratkovalne radijacije od Sunca. Zbog toga je upravo noću najveći utjecaj umjetno stvorene topline na vremenske prilike u gradu.

Način određivanja Q_F ovisi o raspoloživim podacima. Za Varaždin je bila poznata potrošnja goriva ili topline po domaćinstvima, ustanovama i industrijama (RHMZ SRH i dr., 1980). Ukupna količina topline podjeljena je površinom grada s koje odlazi ta toplina čime je određena gustoća toka topline oslobođene iz stacionarnih izvora (44.9 Wm^{-2}). Uzeta je u obzir i toplina oslobođena metabolizmom ljudi uz pretpostavku da je gustoća stanovništva na površini grada jednolika (0.87 Wm^{-2}). Toplina oslobođena iz mobilnih izvora procjenjena je kao dio ukupne antropogenetske topline (22.8 Wm^{-2}). Tako je u Varaždinu toplina stvorena ljudskom aktivnošću u zimskim mjesecima $Q_F = 68.57 \text{ Wm}^{-2}$.

Količina topline s čitave površine grada iznosi $0.4862 \cdot 10^9 \text{ W}$, a potrošnja po jednom stanovniku je $0.12 \cdot 10^5 / \text{stanovnik}$. Pretpostavka je da se isto tolika količina topline troši po stanovniku i u ostalim kontinentalnim gradovima Hrvatske. Prema tome, da bi se odredila antropogenetska toplina za određeno mjesto, potrebno je potrošnju po jednom stanovniku pomnožiti brojem stanovnika i podijeliti ukupnom površinom s koje odlazi ta toplina.

Senzibilna toplina grada dobivena je kao suma antropogenetske topline i senzibilne topline u okolišu jer je član $\sigma (T_s^4 - T_r^4)$ u (22) čak i za veće temperaturne razlike grada i okoline reda veličine 10^{-2} Wm^{-2}

pa je puno manji od ostalih članova u (2.2) i može se zanemariti.

Za ocjenu srednje visine sloja miješanja u zimskom periodu potrebno je, pored gustoće toka senzibilne topline, odrediti srednju sezonsku brzinu vjetra i srednji vertikalni gradijent potencijalne temperature.

Kao reprezentant zimskog dijela godine za vjetar uzet je mjesec siječanj. Podaci o smjeru i brzini vjetra su višegodišnji srednjaci iz razdoblja koje je označeno u tab. 2.1. Odabran je smjer vjetra koji prema podacima iz duljeg razdoblja najčešće puše. Za vertikalni gradijent potencijalne temperature u okolišu uzeta je vrijednost prema mjerenjima u veljači 1979.

na aerodromu Varaždin, $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ \text{C}/100 \text{ m}$.

Visina sloja miješanja računata je prema izrazu (2.4).

$$h = \left[\frac{2 Q_{Hu} x}{\rho c_p \bar{u} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Veličina h određena je za udaljenost koja odgovara polumjeru grada u smjeru vjetra koji u siječnju najčešće puše. Uz istu brzinu vjetra izračunata je također i visina sloja miješanja h_r na udaljenosti $x = 10^3 \text{ m}$ (kolona 6 u tab. 2.2) od ruba grada.

Tabela 2.2 — Visina sloja miješanja h [m] uz $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ \text{C}/100 \text{ m}$

Table 2.2 — Mixing height h [m] with $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r = 2.6^\circ \text{C}/100 \text{ m}$

Grad	Smjer vjetra	\bar{u} [ms^{-1}]	polumjer grada $\cdot 10^3 \text{ m}$	h [m]	h_r [m] za $x = 10^3 \text{ m}$
Zagreb	NE	1.6	4.0	148	74
Osijek	E	1.7	4.0	98	49
Karlovac	NE	1.4	1.5	60	49
Varaždin	W	1.3	1.75	65	49
Sl. Požega	W	1.3	1.5	42	34

Srednja visina sloja miješana zimi, koja je rezultat jedino djelovanja grada, je između 40 m u Slavonskoj Požegi i 150 m u Zagrebu. Gradovi srednje veličine kao što su Karlovac i Varaždin generiraju sloj miješanja debeo oko 60 m. To znači da se stabilan zrak iz okoline koji struji prema gradu transformira i nastaje sloj miješanja prosječne debljine 60 m. Iznad je stabilan sloj koji onemogućava miješanje pa se štetne tvari izbačene iz niskih izvora zadržavaju u plitkom prizemnom sloju.

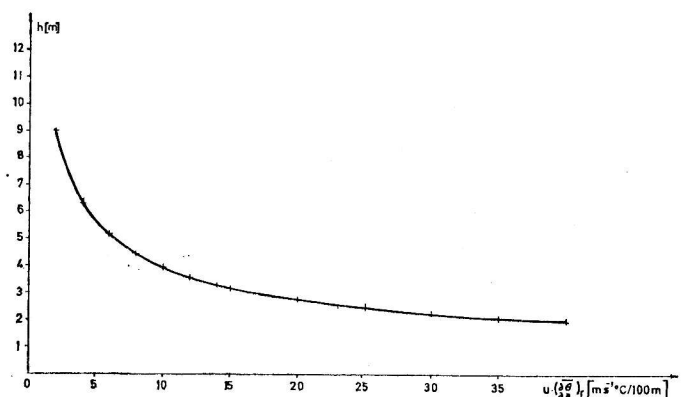
2.2.2. Operativni grafikon za određivanje h

Funkcija $h = h(Q_{Hu}, \bar{u}, \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r)$ ovisi o tri varijable.

Ispitivanjem krivulja koje pokazuju ovisnost h o svakoj varijabli može se zaključiti da je visina sloja miješanja jako »osjetljiva« na brzinu vjetra \bar{u} i $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r$ a manje na iznos Q_{Hu} .

Izrađen je operativni grafikon za određivanje visine sloja miješanja. Na apscisi je produkt $\bar{u} \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r$, a na ordinati je h . Računato je uz $Q_{Hu} = 1 \text{ Wm}^{-2}$ i $x = 10^3 \text{ m}$. Tako je izražena ovisnost h jedino o meteorološkim parametrima. Za neke druge vrijednosti Q_{Hu} i

x potrebno je iz grafa očitati vrijednost za h pomnožiti s $(x \cdot Q_{Hu})$ gdje je $x \equiv r$ u km. Tako je za primjer Slavonske Požege $\bar{u} \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r = 3.4 \text{ ms}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}/100 \text{ m}$ i h iz grafa 6.75 što pomnoženo s $\sqrt{1.5 \cdot 24.4} = 6.05$ daje visinu sloja miješanja nad Slavonskom Požegom od 41 m.



Slika: 3.1 — Visina sloja miješanja h [m] ovisno o $\bar{u} \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r$ [$\text{ms}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}/100 \text{ m}$] uz $Q_{Hu} = 1 \text{ Wm}^{-2}$ i $x = 10^3 \text{ m}$

Figure 3.1 — Mixing height h [m] related to $\bar{u} \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)_r$ [$\text{ms}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}/100 \text{ m}$] with $Q_{Hu} = 1 \text{ Wm}^{-2}$ i $x = 10^3 \text{ m}$

Prema tome, želimo li odrediti visinu sloja miješanja za bilo koji grad u određenim meteorološkim uvjetima potrebno je znati samo polumjer grada (odnosno ukupnu površinu grada) i broj stanovnika.

2.3. Ravnotežna koncentracija i ravnotežna normirana koncentracija

Koncentracija nekog svojstva u volumenu kutije grada ovisi o horizontalnoj advekciji i vertikalnoj difuziji. Uz istu emisiju i jednake meteorološke uvjete koncentracija se s vremenom smanjuje i približava ravnotežnoj C^* (1.15). Ta se koncentracija zatim zadržava sve dok se ne promijene uvjeti. Iz volumena kutije se dakle samo dio promatranog svojstva provjetrava, a uz dane uvjete određena koncentracija ostaje u volumenu kutije. Ravnotežna koncentracija C^* je mjera

prirodne aeracije grada ako se promatra i njegova vertikalna dimenzija.

Da bismo promatrali provjetravanje jedino kao rezultat meteoroloških uvjeta, ravnotežnu koncentraciju podijelit ćemo emisijom svojstva i dobiti izraz (2.5) za normiranu ravnotežnu koncentraciju.

$$\frac{C^*}{Q} = \frac{\Delta x}{Z \bar{u}} \quad (2.5)$$

U prethodnim poglavljima (2.1 i 2.2) izračunali smo zimske vrijednosti koeficijenta provjetravanja $f^* = \frac{\bar{u}}{\Delta x}$ (tab. 2.1) i visine sloja miješanja za pojedini grad (tab. 2.2). Pomoću tih podataka određena je normirana koncentracija zimi za odabrane gradove (tab. 2.3).

Tabela: 2.3 — Normirana koncentracija C^*/Q [$m^{-1}s$]
Table: 2.3 — Dilution factor C^*/Q [$m^{-1}s$]

Grad	Smjer vjetra	$x \cdot 10^3 m$	\bar{u} [ms^{-1}]	$Z = h$ [m]	C^*/Q
Zagreb	NE	8.0	1.6	148	33.8
Osijek	E	8.0	1.7	98	48.0
Karlovac	NE	3.0	1.4	60	36.7
Varaždin	W	3.5	1.3	65	41.4
Sl. Požega	W	3.0	1.3	42	54.9

Umjesto izraza normirana koncentracija, u našoj se literaturi često nalazi »faktor razređenja« što je doslovan prijevod engleskog izraza »dilution factor«.

Slavonska Požega ima najveću normiranu koncentraciju. To znači da je, s obzirom na visinu sloja miješanja, brzinu vjetra i dimenzije grada, sposobnost atmosfere za prirodno provjetravanje nad tim gradom mala. Zbog toga bi trebalo kontrolirati emisiju štetnih tvari u atmosferu. Naročito su opasni prizemni izvori, jer je visina sloja miješanja u Slavonskoj Požegi samo 42 metra. Normirana koncentracija u Zagrebu je relativno mala što upućuje na dobro provjetravanje. Međutim, Zagreb je brojem stanovnika, površinom i razvijenošću mnogo veći grad od ostalih pa je i emisija štetnih tvari veća što utječe na ravnotežnu koncentraciju.

Opisanim postupcima može se relativno jednostavno ocijeniti koliko određena emisija opterećuje atmosferu grada. Nažalost podaci o emisiji štetnih tvari (kattastar emisije) ne postoje. Jedino su za grad Varaždin

sređeni i objavljeni podaci o potrošnji pojedinih vrsta goriva (RHMZ SRH i dr., 1980) iz čega je procijenjena emisija SO_2 u Varaždinu (RHMZ SRH, 1982) koja zimi iznosi oko $0.8 \cdot 10^6 \text{ gs}^{-1}m^{-2}$. Emisija SO_2 ovisi o količini i vrsti goriva koje se upotrebljava, odnosno o strukturi i razvijenosti grada. Za ostale gradove procjena emisije SO_2 izvršena je usporedbom s podacima Varaždina, te ima samo orijentacionu vrijednost. Ukupna emisija SO_2 s gradskog područja Varaždina je 10.92 gs^{-1} , a s obzirom na broj stanovnika je $2.73 \cdot 10^{-4} \text{ gs}^{-1}/1$ stanovnik. Pretpostavimo da je u promatranim gradovima sličan odnos industrijskih i individualnih izvora. Emisija SO_2 u tim gradovima ovisi onda o broju stanovnika i ukupnoj površini izvora (urbanom području). U tabeli 2.4 dane su procjene emisije SO_2 , izračunate su normirane ravnotežne koncentracije i uspoređene sa srednjacima izmjerenih zimskih koncentracija. Iz razdoblja u kojem postoje mjerenja srednjih dnevnih koncentracija SO_2 izdvojeni su I, II i XII mjesec kao zimski pa je iz tih vrijednosti određena srednja zimska koncentracija.

Tabela: 3.4 — Procjena emisije sumpornog dioksida $Q(SO_2)$ [$gs^{-1}m^{-2}$], normirana ravnotežna koncentracija $C^*(SO_2)$ [μgm^{-3}] i srednja zimska koncentracija $\bar{C}(SO_2)$ [μgm^{-3}]

Table: 3.4 — Evaluated SO_2 emission value $Q(SO_2)$ [$gs^{-1}m^{-2}$], dilution factor $C^*(SO_2)$ [μgm^{-3}] and mean winter concentration $\bar{C}(SO_2)$ [μgm^{-3}]

Grad	$Q(SO_2)$ [$gs^{-1}m^{-2}$]	$C^*(SO_2)$ [μgm^{-3}]	$\bar{C}(SO_2)$ [μgm^{-3}]	Razdoblje
Zagreb	2.5	85	Grič	1978—81
			Maksimir	
			Katedrala	
Osijek	1.7	82	34	1981—82 (XII)
Karlovac	1.1	40	76	1978—79, 1982 (II)
Varaždin	0.8	33	Omladin. c.	1978 (XII)—1979
			Med. c.	
Sl. Požega	0.7	38		

$C(\text{SO}_2)$ izračunata je iz podataka RHMZ SRH. (Za Slavonsku Požegu nema podataka.) U 5. koloni tabele označeno je razdoblje iz kojeg je računata $C(\text{SO}_2)$. Ukoliko ne postoje mjerenja u sva tri zimska mjeseca, u zagradi je označen mjesec u kojem su mjerenja obavljena.

Kao što se vidi iz tabele izmjerene prizemne koncentracije su više od ravnotežnih, osim u Osijeku gdje je mjereno mjesto smješteno na poljoprivrednom dobru izvan grada.

Ta činjenica pokazuje da zimi »napori« atmosfere da pročisti zrak u gradu, odnosno prirodno provjetranje, nisu dovoljni. Trebalo bi pratiti i kontrolirati i emisiju kako u slučaju smanjenog provjetranja ne bi došlo do epizodnih situacija.

Iznos faktora razređenja izračunat u ovom radu (tab. 2.3) može se usporediti s rezultatima Holzwortha (1969). Tu je na sličan način određen faktor razređenja, ali za grad veličine $\Delta x = 50$ km. Veličina grada direktno je proporcionalna faktoru razređenja, ali ona utječe i posredno preko senzibilne topline grada i visine sloja miješanja. Određena usporedba faktora razređenja ipak se može izvršiti ako se vrijednosti u tab. 3.3 računaju uz iste meteorološke parametre ali za $\Delta x = 50$ km. Dobivene vrijednosti su $200 \text{ m}^{-1} \text{ s} \leq C^*/Q \leq 600 \text{ m}^{-1} \text{ s}$. U radu Holzwortha je u središtu grada koeficijent razređenja $\geq 500 \text{ m}^{-1} \text{ s}$, na periferiji $100 \text{ m}^{-1} \text{ s}$.

4. ZAKLJUČAK

Primjenom modela kutije ocijenjena je prirodna aeracija nekoliko većih mjesta u kontinentalnom dijelu Hrvatske tokom čitave godine i zimi kad je emisija štetnih tvari u atmosferu veća. Kao mjera provjetranja promatran je koeficijent provjetranja f^* i ravnotežna koncentracija C^* .

Osim iznosa koeficijenta provjetranja za neki smjer važna je i čestina pojavljivanja tog smjera. Tako Slavonska Požega i Varaždin imaju nepovoljan položaj s obzirom na vjetar koji najčešće puše, jer je u tom smjeru provjetranje slabo. Podudarnost smjera najboljeg provjetranja i najčešćeg vjetra izrazita je u Osijeku i Karlovcu. U Zagrebu je NE smjer najčešći i s obzirom na ostale smjerove vjetra omogućava dobro provjetranje grada.

Mjera aeracije grada uz uvažavanje visine sloja miješanja je ravnotežna koncentracija C^* . Često je međutim prikladnija normirana ravnotežna koncentracija C^*/Q , gdje je Q emisija određenog svojstva. Da bismo izračunali C^*/Q , treba poznavati visinu sloja miješanja nad gradom. Kako se ta veličina ne mjeri, njena srednja zimska vrijednost određena je teoretski modelom Summersa (Oke, 1974). Model promatra grad kao zagrijanu podlogu nad koju dolazi stabilno stratificiran zrak iz okoline, a zahtjeva poznavanje i vertikalnog gradijenta potencijalne temperature u

okolišu $\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_r$, gustoće toka senzibilne topline u

okolišu Q_{Hr} i gustoće toka antropogenetske topline u gradu Q_{F} . S obzirom na raspoložive podatke izrađena

je metoda ocjene i izračunavanja tih veličina koja se može primijeniti i na ostala kontinentalna mjesta.

Srednja visina sloja miješanja zimi u gradu srednje veličine (Varaždin, Karlovac) je oko 60 m što upućuje da su najopasniji prizemni izvori štetnih tvari. U Zagrebu je zimi srednja visina sloja miješanja veća i iznosi oko 150 m.

Za odabrane gradove određena je normirana ravnotežna koncentracija. Ona daje informaciju o specifičnim klimatskim uvjetima provjetranja u svakom gradu. Da bismo odredili ravnotežne koncentracije, procijenjena je emisija SO_2 u svakom gradu. Te su vrijednosti dosta visoke i upućuju da je zimi emisija SO_2 previsoka s obzirom na prirodne mogućnosti provjetranja. To potvrđuju i srednjaci izmjerenih prizemnih koncentracija zimi.

Općenito uzevši, određivanje ravnotežnih koncentracija u našim gradovima, makar i uz grubu procjenu emisije, koristan je pokazatelj »opterećenosti« mikroklimata grada primjesama, što treba uzimati u obzir kod urbanističkih planiranja.

SUMMARY

The continental towns in Croatia, except Zagreb, are not particularly large, but still they have problems with air pollution. Therefore an investigation was performed to investigate their own aeration capability connected with local climatological properties. According to the simplified box-model (Hanna, 1975) the flushing frequency and dilution factor were computed for five continental towns.

Flushing frequencies are determined as annual and also winter values, because of high pollutant emission in winter.

Winter values of dilution factor have also been calculated. Higher values denote weaker aeration. With these values one can determine equilibrium concentration if the emission is known. Actual concentration approaches the equilibrium concentration as time increases, no matter what the initial concentration is.

To calculate the dilution factor it is necessary to know urban mixing height, rural sensible heat flux and anthropogenic heat flux. There are no measurements of these parameters in Croatia, so they have been theoretically determined. Urban mixing height is calculated according to Summers (Oke, 1974) and in middle-size towns like Varaždin and Karlovac it is about 60 m in winter. Anthropogenic heat flux is evaluated for each town. The method has been derived for its evaluation which needs only town area and inhabitants number as input data. In the same way anthropogenic heat flux could be evaluated for any continental town so that finally urban mixing heights could be computed.

Dilution factor values give us information about local climatological properties of aeration. To determine SO_2 equilibrium concentrations SO_2 emission is estimated. Computed SO_2 concentrations have been compared with winter mean measured concentrations. Values are high and call for more attention to be paid to pollutant emissions.

LITERATURA

- Beychok, M. R., 1979: Fundamentals of stack gas dispersion.
- Halpern, P., 1971: Source emissions and the vertically integrated mass flux of sulfur dioxide across the New York city area, *J. of Appl. Meteor.* 10, 715—724.
- Garnett, A. and Bach, W., 1965: An estimation of artificial heat generation to natural radiation heat in Sheffield, *Mon. Wea. Rev.* 93, No 12, 383—385.
- Hanna, S. R., 1975: Urban diffusion problems, 209—227, Lectures on air pollution and environmental impact analyses, American Met. Soc., Boston.
- Kalanda, B. D. and Oke, T. R., 1980: Suburban energy balance estimates for Vancouver, B. C., using the Bowen ratio-energy balance approach, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 791—802.
- Leahey, D. M. and Friend, J. P., 1971: A model for predicting the depth of the mixing layer over an urban heat island with applications to New York City, *J. Appl. Meteorol.*, 10, 1162—1173.
- Oke, T. R., 1974: Review of urban climatology 1968—1973., Tech. Note No 134, WMO No 383, 132 pp.
- , 1978 a: Boundary layer climates, Methuen, London, 372 pp.
- , 1978 b: Surface heat fluxes and the urban boundary layer, WMO, Symp. Bound. Layer Phys. App. Spec. Problems Air Poll, WMO No 510, 63—69.
- , 1982: The energetic basis of the urban heat island, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108, 1—24.
- Ragland, K. W., 1973: Multiple box-model for dispersion of air pollutants from area sources, *Atmos. Envir.*, 7, 1017—1032.
- Republički hidrometeorološki zavod SRH i Zavod za istraživačku djelatnost iz sigurnosti na radu, 1980: Istraživanja o zagađenosti zraka na području grada Varaždina, Zagreb, 148 pp.
- RHMZ SRH, 1982: Model difuzije i transporta grada Varaždina, 85 pp.
- Yap, D. and Oke, T. R., 1974: Sensible heat fluxes over an urban area — Vancouver B. C., *J. Appl. Meteorol.*, 13, 880—890.
- WMO, Tech. No 121, Dispersion and forecasting of air pollution, Ch 5, 41—53.