

ONESNAŽENJE ZRAKA OD LINIJSKEGA VIRA,  
DVO- IN TRIDIMENZIONALNI PRISTOP

AIR POLLUTION FROM LINE SOURCE,  
A TWO- AND A THREE-DIMENSIONAL APPROACH

UDK 551.511.6:681.177

Jože RAKOVEC

Katedra za meteorologijo  
VTOZD Fizika, FNT, L j u b l j a n a

#### SUMMARY

The distribution of air pollution from line source is computed, using the two- and the three-dimensional dispersion models. When the source is not straight and/or the wind is not normal to the source, it is necessary to use the three-dimensional approach. But for the source, not very curved, the use of the two-dimensional model may be justified, if the wind is generally normal to the source.

As the two-dimensional model is simpler and more economic, the comparison of both models was done for a case of a road with a turning, viaducts, tunnels and canyons (see Fig. 1), to ascertain when the two-dimensional model is still applicable. Both models use explicit numerical scheme for solving the diffusion equation for stationary problem (eqs. 1 and 2), with the known distribution of air pollution sources. The same vertical log-linear wind profile (eq. 3) is assumed all over the area, and the turbulent diffusivity (eq. 4) is in accordance with the wind. Total reflection is assumed at the ground and at the top, on the height where a strong temperature inversion is often observed over the area we are dealing with.

In the case of weak wind (which is often observed on the site), from which results also weak turbulence, the results of both models are comparable, if those of the two-dimensional model are smoothed (see Figs. 2 and 3). In the case of stronger winds and stronger cross-wind diffusion, the results would not be so similar, because in that case the diffusion would not be so much prevailed by the advection.

#### POVZETEK

Z dvodimenzionalnim in tridimenzionalnim modelom za razširjanje onesnaženja zraka od linijskega vira je izračunana razporeditev onesnaženja od tega vira.

Le za ravne odseke enakomernega vira (npr. ceste) in za veter, pravokotno nanj, je dvodimenzionalni model ustrezen. S primerjavo rezultatov obeh modelov pa je na primeru ceste z ovinki, viadukti, predori in useki prikazano, koliko je treba rezultate dvodimenzionalnega modela izgladiti ali popraviti, da se z njimi približamo tistim iz tridimenzionalnega modela.

#### UVOD

Pri napovedi onesnaženja zraka zaradi virov, ki so šele v načrtu, je numerično modeliranje dober način in ima mnoge prednosti, predvsem glede preizkušanja raznih variant modela. Tak model mora povezovati vire onesnaženja in vsebovati njihovo dejansko onesnaževanje (emisija - onesnaženje), način razširjanja v okolico virov in s tem tudi meteorološke in reliefne pogoje. Prvega dela tu ne bomo opisovali, ker je zveza med emisijo in onesnaženjem ob samem viru poseben problem. Gre za to, da pri numeričnem načinu opisujemo razširjanje onesnaženja navadno v mreži računskih točk, ki pa morajo biti značilne za ves volumen, ki tako točko obdaja. Vprašanje je torej, v kolikšen volumen okrog vira se v časovni enoti (časovnem računskem koraku) onesnaženje iz vira razširi. Šele če to vemo, moramo v točkah, ki predstavljajo vire, predvideti primerno onesnaženje. V modelih, ki smo jih izdelali /1/, smo se tega problema lotili na osnovi izsledkov več avtorjev /2,3,4/, vendar moramo reči, da problem za posebne oblike virov (npr. cesta v useku ali med bloki hiš) še ni povsem zadovoljivo rešen in bodo zato potrebne še mnoge sočasne meritve emisije in onesnaženja ob samem viru.

Za drugi del problema, to je za razširjanje onesnaženja ob poznanem onesnaževanju pri viru, lahko za linijske vire uporabimo dva načina. Ekonomični in preprosti so dvodimenzionalni modeli razširjanja, če privzamemo stacionarno stanje, dovolj dolg raven vir ter horizontalno homogen tok zraka poprek nanj /npr. 5/. Ob tem, da privzamemo neki profil vetra ter njemu primerne koeficiente turbulentne izmenjave, smo problem v glavnem že rešili.

Tridimenzionalnemu modelu se težko ognemo, če je vir vijugast in po jakosti nehomogen ali pa teren tak, da pogoji glede razširjanja niso povsod enaki. Tudi tu se z omejitvijo na stacionaren primer lotimo opisovanja nekega poprečnega stanja. Seveda pa lahko uporabimo model tudi za nestacionarno dogajanje. Tu lahko vnaprej določimo časovni potek emisije in gibanja zraka, ali pa gibanje zraka prognoziramo z modelom atmosfere /npr. 6/. V tem članku bomo opisali rezultate, ki smo jih dobili z modeloma za stacionaren primer /1,7,8/.

#### DVO- IN TRIDIMENZIONALNI MODEL RAZŠIRJANJA ONESNAŽENJA

Na kratko opišimo osnovne lastnosti modelov, s katerimi smo proučevali razporeditev koncentracij onesnaženja  $C(x,y,z)$  /1,8/.

Za stacionaren primer s horizontalno homogenim vetrom v smeri  $x$  moremo

zanemariti turbulentno difuzijo v smeri vetra v primerjavi z advekcijo v tej smeri. V dvodimenzionalnem primeru moremo vire onesnaženja vgraditi v robne pogoje, tako da vir  $I(z)$  postavimo v koordinatni začetek, pri  $x=0$ , in tam predpišemo vrednost koncentracije onesnaženja  $C_0(z)$ . Ta je odvisna od jakosti vira, pa tudi od reliefnih in meteoroloških pogojev razširjanja onesnaženja. Ostane nam še, da advekcijo v smeri vetra in difuzijo v vertikalni smeri opišemo z enačko:

$$u(z) \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(z) \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Tu sta  $u(z)$  in  $K_z(z)$  znani funkciji višine;  $u(z)$  popisuje potek vetra z višino,  $K_z(z)$  pa potek kinematičnega koeficienta turbulentne izmenjave (difuzivnosti) z višino.

K enačbi (1) spadajo še robni pogoji. Onesnaženje pri viru ( $x=0$ ) poznamo, v veliki oddaljenosti od njega pa je zelo majhno, torej:

$$C(0,z) = C_0(z) \quad \text{in} \quad C(\infty,z) = 0. \quad (1_1)$$

Pri tleh moremo za marsikateri polutant (npr. CO) predpostaviti popolno refleksijo. Če je na neki višini  $h$  nad tlemi temperaturna inverzija, tudi ta tako zavira izmenjavo, da je tam upravičen enak pogoj. Namesto da bi predpisovali vrednosti odvodov funkcije  $C$ , opravi nalogo robnih pogojev postavitev:

$$K_z(0) = 0 \quad \text{in} \quad K_z(h) = 0. \quad (1_2)$$

Za bolj zapletene vire onesnaženja moramo uporabiti tridimenzionalni model. Tudi tu zanemarimo difuzijo v primerjavi z advekcijo v smeri  $x$ , to je v smeri horizontalno homogenega vetra. Predpišemo stalne vire onesnaženja  $I(x,y,z)$ , razširjanje pa opišemo z enačbo:

$$u(z) \frac{\partial C}{\partial x} = K_y(z) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(z) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + I(x,y,z) \quad (2)$$

Tu sta difuzivnosti  $K_y$  v horizontalni smeri, poprek na veter, in  $K_z$  v vertikalni smeri, lahko tudi različni.

Na robovih, pravokotnih na veter, predpišemo:

$$C(0,y,z) = 0 \quad \text{in} \quad C(\infty,y,z) = 0 \quad (2_1)$$

pri tleh in na višini  $h$  pa kot prej:

$$K_z(0) = 0 \quad \text{in} \quad K_z(h) = 0. \quad (2_2)$$

Nobenega opravičila za tak pogoj pa ne bi imeli na bočnih robovih obravnava-nega področja, pri  $y=0$  in  $y=y_1$ , saj se skozi onesnaženje neovirano širi. Zato postavimo, da gre skozi toliko onesnaženja, kolikor ga do tja pride. To dosežemo s postavko:

$$\left. \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right|_{y=0 + \Delta y} \quad \text{in} \quad \left. \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right|_{y=y_1} = \left. \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right|_{y=y_1 - \Delta y} \quad (2_3)$$

Že iz zapisa zadnjega robnega pogoja (2<sub>3</sub>) je videti, da smo enačbi (1) in (2) reševali numerično. Izbrali smo eksplicitno shemo /9/, ki je le pogojno stabilna.

Veter smo opisali z logaritmično-linearnim profilom po Moninu in Obuhovu/10/:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + \alpha \frac{z}{L} \right] \quad (3)$$

in njemu pripadajoč profil difuzivnosti  $z$  :

$$K_z(z) = \frac{u_* k z}{1 + \alpha \frac{z}{L}} \quad (4)$$

medtem, ko je  $K_y$  večji /11/:

$$K_y(z) = 1.5 K_z(z) \quad (5)$$

Pri tem smo postavili torno hitrost  $u_* = 0.2 \text{ ms}^{-1}$ , hrapavost  $z_0 = 0.5 \text{ m}$ , stabilitetno dolžino Monina in Obuhova  $L=600 \text{ m}$ , koeficient  $\alpha = 1.5$ , von Kármánovi konstanti pa smo pripisali vrednost  $k=0.36$ . Vse to pomeni šibak veter in slabo izmenjavo.

Pri tej izbiri  $u(z)$ ,  $K_y(z)$  in  $K_z(z)$  je eksplicitna shema stabilna za mrežne razdalje  $\Delta x = \Delta z = 10 \text{ m}$  v dvodimenzionalnem ter  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10 \text{ m}$  v tridimenzionalnem primeru. V prvem primeru računamo v pravokotniku, in sicer izberemo  $h=150 \text{ m}$ , v drugem primeru pa v kvadru:  $h=120 \text{ m}$ ,  $y=3000 \text{ m}$ ; obakrat računamo do razdalje  $x=5500 \text{ m}$  od koordinatnega izhodišča.

## REZULTATI

Opisana modela smo uporabili na primeru dela načrtovane avtomobilske ceste skozi Sarajevo. Tu želimo prikazati primerljivost rezultatov po obeh modelih, zato smo za izbrani del ceste naredili dve vrsti računov. Z dvodimenzionalnim modelom smo izračunali razporeditev onesnaženja v vertikalnem preseku vzdolž vetra v zavetrju vsakega karakterističnega predela ceste (mostu, nasipa, ustja predora, useka itd.), tako da smo ustrezno začetno onesnaženje  $C(z)$  postavili pri  $x=0$ . S tridimenzionalnim modelom pa smo računali rešitev enačbe (2) s pri-

padajočimi robnimi pogoji, ter z razporeditvijo onesnaženja  $C_0(x,y,z)$  pri viru, kakršna ustreza virom  $I(x,y,z)$  ter posameznemu predelu ceste in pogojem širjenja. Več o povezavi med  $C_0$  in  $I$  smo povedali v /1/, tu pa prikažemo na sliki 1 le krajevno porazdelitev  $C_0(x,y,z)$ .

Izračunane vrednosti smo pri tridimenzionalnem modelu kar prenesli v mrežo točk, pri dvodimenzionalnem modelu pa tako, da smo koordinatne začetke vertikalnih presekov postavili na ustrezna mesta v mreži - na cesto; s tem smo  $C_0(z)$  preuredili v  $C_0(x,y,z)$ . Potem smo vnešene podatke analizirali in dobili razporeditve onesnaženja, kot jih pri tleh prikazujeta sliki 2 in 3.

Vidimo, da rezultati v zavetrju daljših homogenih odsekov ceste niso zelo različni. Če bi rezultatom dvodimenzionalnega modela (slika 2) pri analizi z izglajevanjem "dodali" bočno difuzijo, bi se mogli približati sliki, ki jo daje tridimenzionalni model. Tak rezultat je seveda posledica izbrane šibke difuzije. Pri močni difuziji bi bila razporeditev po tridimenzionalnem modelu kaj kmalu za cesto precej izglajena in niti malo podobna oni po dvodimenzionalnem modelu.

To pomeni, da moremo pri šibki turbulentni izmenjavi do neke mere uporabljati rezultate preprostega dvodimenzionalnega modela, če seveda znamo oceniti napake, ki iz tega sledijo. Pri analizi rezultatov moramo upoštevati nehomogenosti, ki so vzrok za tridimenzionalnost dogajanja, in to tiste glede virov onesnaženja, kot tudi tiste v reliefu, ki posredno vplivajo tudi na nehomogenosti v toku zraka (spremenljivost smeri vetra, divergenca ali konvergenca, deformacija itd.).

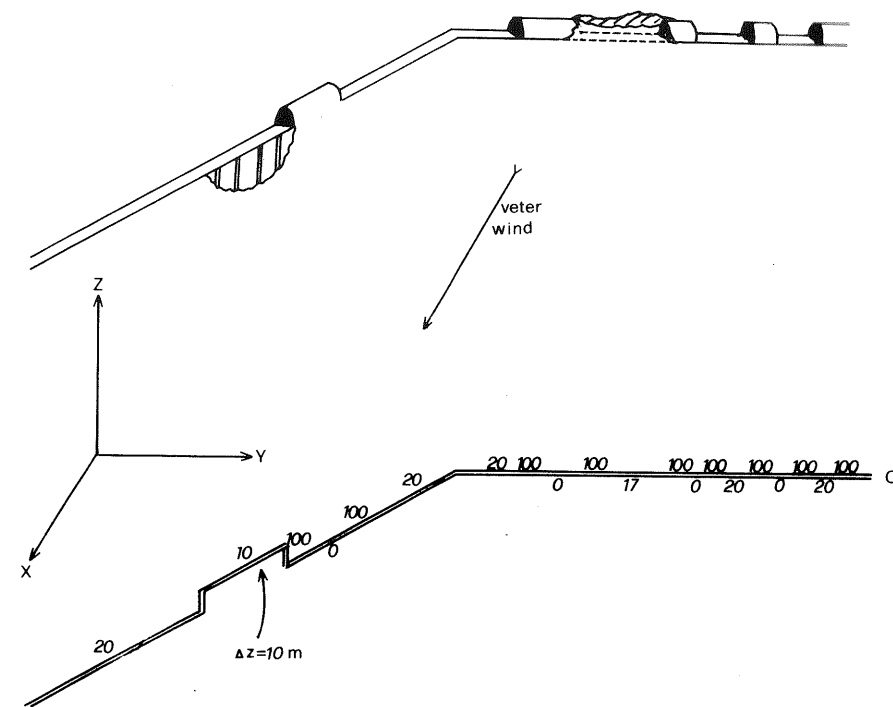
Na splošno dajeta oba modela realne rezultate (več o njih govorimo v /1/ in /8/). Še boljše bi dosegli, če bi vanju vgradili izmerjeno polje vetra in difuzivnosti, vendar pa se na takšne meritve v mikro- in mezometeorološki skali v razgibanem reliefu za sedaj še ne moremo opreti, ker so le redko kje na razpolago.

## ZAKLJUČEK

Iz prikazanega se vidi, da brez kritične presoje ni mogoče uporabljati običajnih dvodimenzionalnih modelov za stacionarno širjenje onesnaženja od linijskih virov, kot jih najdemo v literaturi. To pa je mogoče v primeru slabe turbulentne difuzije, torej na primer ob počasnih pobočnih vetrovih, kot smo jim priča v kotlinah in po dolinah. Toda tudi tu je potrebno pri analizi rezultatov z izglajevanjem "dodati" bočno difuzijo ter upoštevati nehomogenosti linijskega vira onesnaženja, reliefa in gibanja zraka.

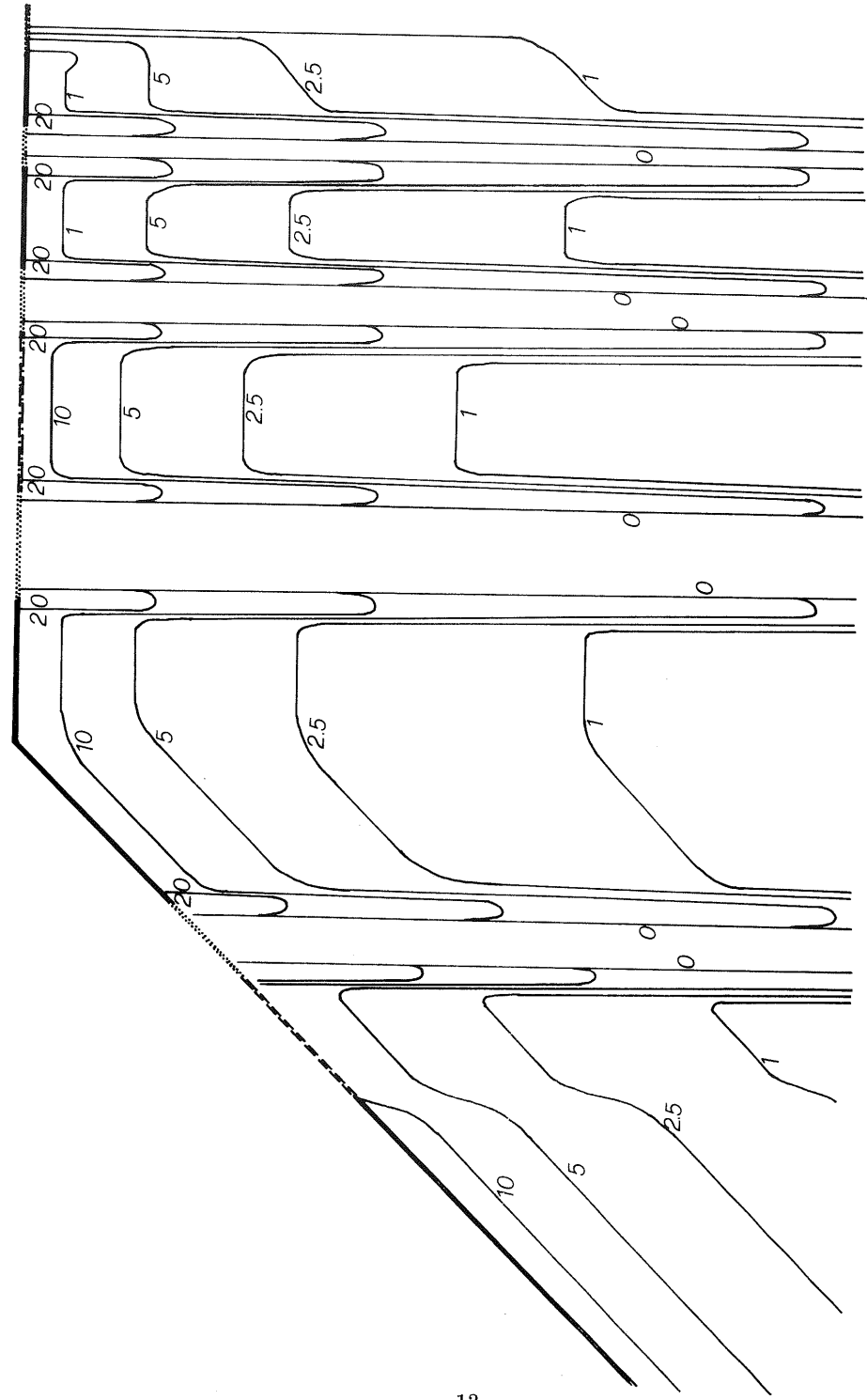
LITERATURA

- /1/ J. RAKOVEC, Z. PETKOVŠEK: Širenje zagadjenja vazduha od autoputa u Sarajevskoj kotlini. Katedra za meteorol., VTOZD Fizika, FNT, Ljubljana, 1978. 160 str.
- /2/ A. J. DEUBNER: Atmospheric Diffusion Model for Short Distances and Complicated Topography. Proc. IV. Int. Clean Air Cong., Tokyo, 1977, 224-226.
- /3/ E. PLASSMANN, P. LEISEN, H. SOBOTKA: Atmospheric Dispersion of Motor Vehicle Exhaust Gases in Urban Areas. Proc. IV. Int. Clean Air Cong., Tokyo, 238-241.
- /4/ N. UKEGUCHI, H. OKAMOTO, Y. IDE: Prediction of Vehicular Emission Pollution Around a Tunnel Mouth. Proc. IV. Int. Clean Air Cong., Tokyo, 1977, 205-207.
- /5/ J. RAKOVEC: Vertikalni profili vetra v prizemni turbulentni plasti. Razprave-Papers XIV, DMS, Ljubljana, 1972, 3-13.
- /6/ J. RAKOVEC: Numerično modeliranje dogajanj v atmosferi v mikro- in mezometeorološki skali. Zaštita atmosfere, 7, Sarajevo, 1976, 19-24.
- /7/ Z. PETKOVŠEK, J. RAKOVEC: Problemi širenja zagadjenja vazduha od autoputeva. V. Simp. JDČV, Beograd, 1978, 77-86.
- /8/ J. RAKOVEC, Z. PETKOVŠEK: Numerički modeli širenja zagadjenja vazduha od autoputeva. V. Simp. JDČV, Beograd, 1978, 65-75.
- /9/ C. E. WALLINGTON: Numerical Solution of Atmospheric Diffusion Equations. HMSO, Met. Office Sc. Paper No. 28, London, 1968, iv+38 str.
- /10/ A. S. MONIN, A. M. OBUHOV: Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremešivanja v prizemnom sloe atmosfery. AN SSSR, Trudy geofiz. inst., 24, Moskva, 1954, 161-187.
- /11/ C. LUDWIG: Der Gegenwärtige Stand der Forschung auf dem Gebiet der Immissionsbelastung von Industrialisierten Stadten. Inst. Theor. Meteorol., Berlin, 1974, iii+79 str.

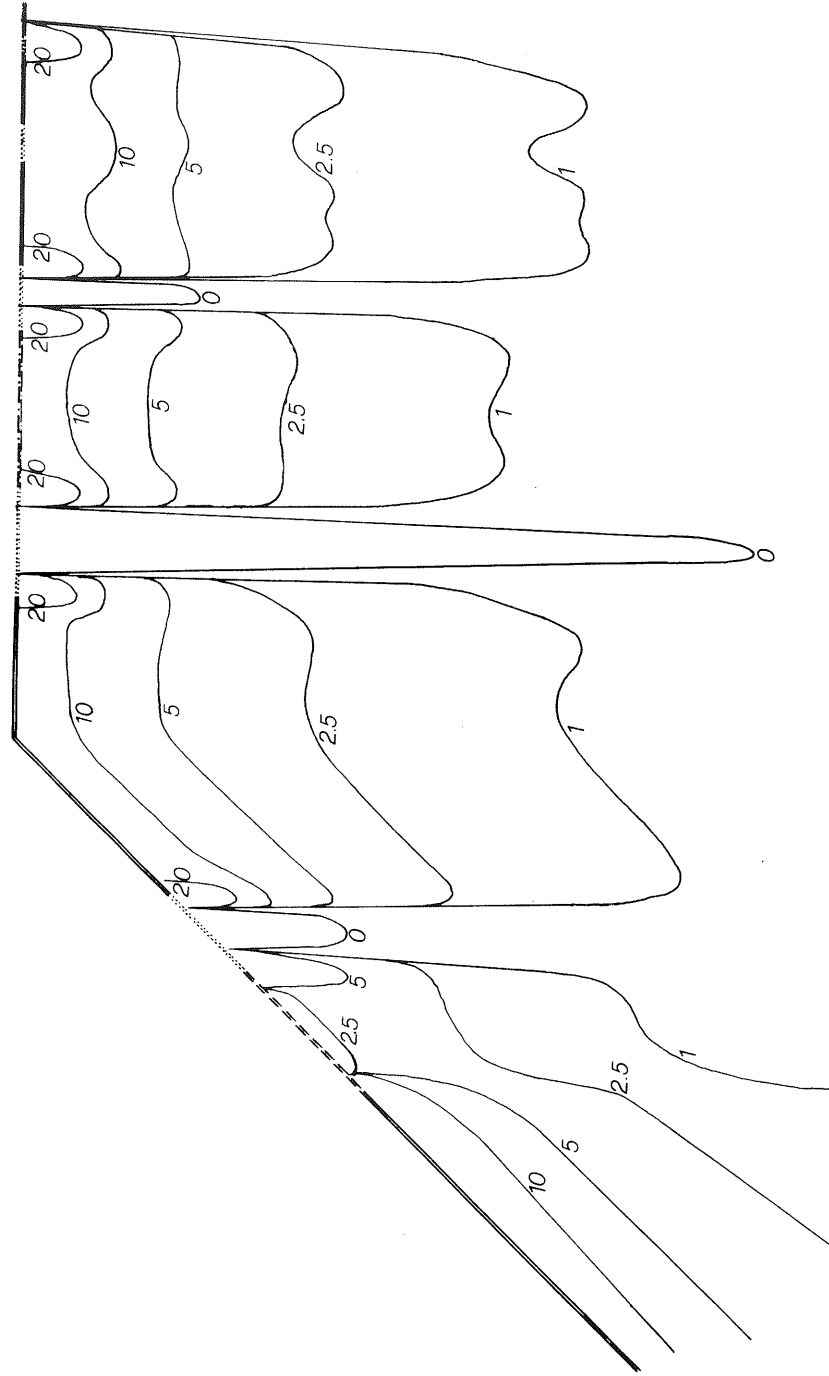


Slika 1 Shematična predstavitev ceste z značilnimi odseki ter ustrezno predpisano onesnaženje zraka  $C_0$  (v relativnih enotah).

Fig. 1 Schematic presentation of the road with characteristic sections and the corresponding prescribed air pollution  $C_0$  (in relative units).



Slika 2 Razporeditev onesnaženja zraka pri tleh (v relativnih enotah) v zavetrju ceste po dvodimenzionalnem modelu.  
 Fig. 2 The distribution of air pollution near the ground (in relative units) downwind from the road according to the two-dimensional model.



Slika 3 Razporeditev onesnaženja zraka pri tleh (v relativnih enotah) v zavetrju ceste po tridimenzionalnem modelu.  
 Fig. 3 The distribution of air pollution near the ground (in relative units) downwind from the road according to the three-dimensional model.