

OCENA TRANSKONTINENTALNEGA TRANSPORTA ONESNAŽENJA
ZRAKA V SLOVENIJO IN IZ NJE

ESTIMATION OF TRANSCONTINENTAL TRANSPORT OF AIR
POLLUTION TO SLOVENIA AND OUT OF IT

551.510.42

ZDRAVKO PETKOVŠEK

Katedra za meteorologijo FNT, Ljubljana

SUMMARY

The concentrations of sulphur dioxide in the air reaching and leaving Slovenia were calculated on the basis of emission map and a simple model for changes of air pollution in an air parcel travelling over regions of Europe with different air pollution emissions. A "rose" of possible air pollution transport to Slovenia has been constructed for eight main directions, and calculations have been made for three special trajectories, regardless of the influence of the Alps. This paper gives an estimation of the role of Slovenia according to air pollution emissions, as well as of the influence of its emission on air pollution background in the surrounding regions.

POVZETEK

Na osnovi preprostega modela spremembe koncentracij SO_2 v zračnem delcu, ki se premika prek področij z različno emisijo, in emisijske karte SO_2 za Evropo so računane koncentracije SO_2 v zraku, ki se giblje prek Evrope nad Slovenijo in dalje. Na osnovi računov za poenostavljene pogoje vzdolž ravnih trajektorij je sestavljena "roža" možnega transporta onesnaženja zraka v Slovenijo za glavne smeri in za tri posebne trajektorije brez upoštevanja vpliva Alp. Ocenjeno je mesto Slovenije glede emisije v Evropi in tudi vpliv Slovenije na koncentracije "ozadja" v sosednjih področjih.

UVOD

Trditev, da je onesnaženje zraka predvsem lokalni problem /1/ v splošnem še vedno velja, vendar pa transkontinentalni prenos onesnaženja, predvsem žveplovih spojin, niso več zanemarljivi. Ob zahodnih obalah Norveške in južne Švedske npr. lokalnega onesnaženja skoraj ni, vendar so izmerili veliko kislost padavin /2/ in so ugotovili, da jim to že povzroča gospodarsko škodo. Spoznali so, da je kislost padavin in onesnaženje zraka z SO₂ posledica transporta tega onesnaženja iz Anglije in srednje Evrope, zato so se s transportom onesnaženja na velike razdalje tam najprej in resno spoprijeli. Izdelali so že precej kompleksne modele za numerično reševanje v polju mrežnih točk in objektivno analizo in celó prognozo onesnaženosti zaradi takega transporta /3/, računalniški časi pa gredo v ure.

Za nas ti problemi v primerjavi z lokalnim onesnaženjem še niso pereči, ali vsaj mislimo tako, ker o tem še nič ne vemo. Meritve praktično (razen z letali v višinah) nič ne povedo, ker moti lokalno onesnaženje. Zato moramo uporabiti modele in računanje in vsaj približno ugotoviti, kakšno je mesto Slovenije glede tega v Evropskem prostoru. Potrebno je vedeti, kako onesnažen zrak prihaja k nam iz drugih področij in kakšnega pošiljamo mi sosedom, ali kakšen je naš delež k splošnemu onesnaževanju zraka v Evropi. Kmalu se namreč utegnejo pojaviti ekonomske in politične posledice in problemi, zato moramo biti nanje vsaj nekoliko pripravljeni.

S poenostavljenimi metodami, ki smo jih priredili za naše namene, bomo na osnovi računanja sprememb koncentracij vzdolž trajektorij v tem delu izračunali in prikazali transport SO₂ prek Evrope v Slovenijo in iz nje. Ker je SO₂ približen indikator za celotno onesnaženje (tudi z aerosoli-sajami, sulfati, itd.) je z njim prikazana približna slika transporta celotnega onesnaženja.

MODEL ZA OCENO TRANSPORTA

Lokalne spremembe koncentracij so v Eulerjevem sistemu lepo dane z enačbo, ki zajema advekcijo, difuzijo, izvore in ponore onesnaženja, ter jo s klasično simboliko zapišemo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u_h \cdot \nabla_h C - w \frac{\partial C}{\partial z} + K_h \nabla_h^2 C + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q - D \quad (1)$$

pri čemer sta advekcija in difuzija kot navadno podani ločeno za horizontalno in vertikalno smer. Zadnja dva člena pomenita izvore oziroma jakost emisije (Q) in izpad oziroma ponore onesnaženja (D).

Če preidemo v Lagrangeov sistem in spremljamo zračne delce ter onesnaženje v njih, advektivna člena odpadeta. Difuzijska člena sta za homogene delce pomembna le, če je zračni delec, ki ga spremljamo, sorazmerno majhen, in zgubljata pomen, čim večji je, saj vpliva difuzija v krajšem času le na spremembe koncentracij v mejnih področjih.

Za proučevanje transporta onesnaženja v zraku na velike razdalje (večje od 300 km) so "zračni delci" lahko veliki - linearnih horizontalnih dimenzij nad 100 km. Transport takih delcev in onesnaženja v njih je vezan na makrovremensko stanje in tokove v zvezi s splošno planetarno cirkulacijo zraka. Ta cirkulacija, kot sama atmosfera, ima dimenzijska razmerja v vertikali proti horizontali približno 1:100 do 1:1000. Zato so tudi delci, ki jih v teh primerih opazujemo in spremljamo, dejansko obsežne, a sorazmerno tanke "plošče". Če v lokalnih pogojih in dimenzijah pri širjenju onesnaženja še lahko govorimo o "box modelu", je tu primernejši izraz "model plošč".

Razen v izjemnih primerih je atmosfera stabilno stratificirana in je njeno gibanje na večje razdalje pretežno horizontalno ter so vertikalne hitrosti za tri velikostne rede manjše od horizontalnih. Koeficienti turbulentne difuzije so na zgornji meji planetarne prizemne zračne plasti (nekaj nad 1000 m) za en velikostni red manjši kot nekaj deset metrov nad tlemi, kjer so največji /4/, a tudi (in deloma zato) koncentracije onesnaženja z višino eksponentialno padajo ter je njihov padec nad 1000 m že relativno šibek /5/, zato je difuzija na višini H = 1500 m že relativno majhna. To nas opravičuje, da v prvem približku domnevamo, da je difuzija onesnaženja tudi skozi sorazmerno veliko zgornjo mejno ploskev (ob kateri je turbulenca v primeri s tisto pri tleh, že relativno šibka) sorazmerno majhna; skozi relativno majhne stranske ploskve pa je že tako zanemarljiva. Zato v našem modelu plošč tudi difuzijo zanemarimo ter nam od enačbe (1) ostane na desni le zadnja dva člena, na levi pa imamo zdaj individualno spremembo koncentracij v zračnem delcu - plošči ter zapišemo:

$$\frac{dC}{dt} = Q - D \quad (2)$$

Koncentracija onesnaženja v zračni plošči se torej spreminja v

skladu s tem, koliko onesnaženja pride vanjo iz virov na zemeljski površini, zmanjšano za tisto, kolikor ga razpade in izpade. Zračna ploščica lahko izjemoma stagnira nad nekim področjem, navadno pa se premika in se premakne nad drugo področje, ki ima močnejše ali šibkejše vire. Koncentracije se v zraku spreminjajo, vendar kot bomo videli, je posebno izpad relativno počasen, zato zrak ohranja del svojih prejšnjih lastnosti. Na relativno čista področja prihaja zato v splošnem bolj onesnažen zrak, medtem ko se bolj onesnažena področja ali področja z močno emisijo čistijo na račun okolišnjih in jim pošiljajo svoje onesnaženje.

Za velika področja reda 10^4 km^2 in več je emisijo (Q) za dobo nekaj dni v prvem približku gotovo mogoče vzeti kot konstantno vrednost, ki pa jo je treba poznati ali vsaj oceniti.

Izpad (D) je prostorsko zelo raznolik in je funkcija koncentracij (SO_2) in vremenskih pogojev - predvsem padavin ter zajema tudi pretvorbo SO_2 v sulfate /6/. Imamo popolnejše enačbe za določitev izpada /7/, toda v skladu z našo oceno vzemimo zaradi preprostosti enostavno linearno odvisnost:

$$D = k \cdot C \quad (3)$$

pri čemer je k koeficient izpada in C koncentracija. V večini primerov transkontinentalnega transporta lahko vzamemo zaradi nizkih koncentracij koeficient izpada kar za konstanto vrednost npr. $k = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, kar izhaja iz razpolovne dobe za suhi izpad SO_2 6 dni, torej za pogoje brez padavin. Napaka zaradi tega, ker smo vzeli k konstanten je največ 10% in je mnogo manjša, kot so napake v oceni emisije posameznih področij.

Iz enačb (2) in (3) sledi zdaj:

$$\frac{dC}{dt} + kC - Q = 0 \quad (4)$$

katere rešitev ob pogoju $C = C_0$ za $t = 0$ je:

$$C = [Q - (Q - kC_0) \exp(-kt)] / k \quad (5)$$

ki je osnovna enačba naših ocenjevanj in računanj.

Zračni delec se giblje prek področij z različno emisijo. Po času Δt , ki ga prebije nad nekim področjem, in v skladu z njegovo začetno koncentracijo in izpadom, je njegova koncentracija pri odhodu iznad področja, določena z enačbo (5). Na ta način spremljamo delce ali ploščice vzdolž njihovih trajektorij do Slovenije

brez upoštevanja vpliva Alp; pri tem je treba za konkretne primere določati trajektorije seveda iz Slovenije nazaj. Čas delovanja neke emisije (in hkrati izpada glede na predhodno koncentracijo), je določen s časom, ki ga porabi delec za prehod prek nekega področja. Ta je seveda določen z velikostjo področja in hitrostjo gibanja zraka - vetrov ter je:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \quad (6)$$

kjer je Δs linearna horizontalna dimenzija področja in v hitrost.

Enačba (5) je širše uporabna in tako seveda tudi za določitev sprememb koncentracij v zraku, če se ta giblje prek področij z enako emisijo, in torej tudi če zrak stagnira nad nekim področjem občasno stalne emisije. Če je emisija vseskozi stalna ali enaka, nastopi po dovolj dolgem času ravnotežje med emisijo in izpadom ter je maksimalna dosežena koncentracija, kot sledi iz enačbe (5), za $t = \infty$ podana z enačbo:

$$C_M = \frac{Q}{k} \quad (7)$$

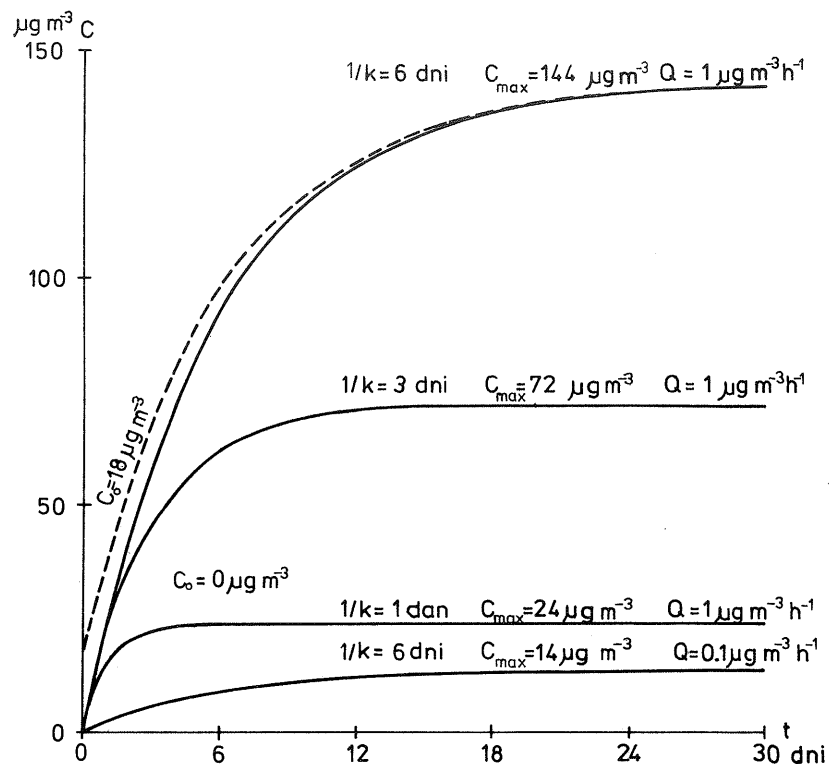
Nekaj primerov, kako naraščajo koncentracije po enačbi (5) ob konstantni emisiji ter se asimptotično približujejo vrednosti določeni po enačbi (7), je razvidno s slike 1. Iz nje vidimo, da koncentracije pri konstantni emisiji (Q) sprva zelo naglo in nato vse počasneje naraščajo. Vidimo tudi, kako vpliva na potek jakost emisije in kako vplivajo različne razpolovne dobe ali različni razpadni koeficienti; pa tudi, kako vpliva neka začetna koncentracija C_0 .

Iz enačbe (5) tudi sledi, da je ob pogoju, da je začetna koncentracija $C_0 = 0$, mogoče določiti čas, po katerem je dosežen neki poljuben odstotek (u) maksimalne koncentracije in sicer:

$$t_u = \frac{C_M (100 - u)}{k} \quad (8)$$

Ta čas je torej sorazmeren razpolovni dobi ($1/k$) in je neodvisen od jakosti emisije. Pri omenjeni razpolovni dobi ob suhem izpadu SO_2 6 dni, je npr. dosežena polovica maksimalne koncentracije približno po 4 dneh, 90% pa šele po 14 dneh.

Za nas je važna ugotovitev, kot sledi iz tega in slike 1, da koncentracije prvih nekaj dni sorazmerno naglo naraščajo in da je njihovo naraščanje močno odvisno od emisije (katere spremembe



Slika 1 Prikaz naraščanja koncentracij SO_2 po modelu pri mirovanju zračnih delcev ali njihovem premikanju čez področja enake emisije za dve emisijski jakosti, za tri razpolovne dobe, ter prikaz vpliva začetne koncentracije (C_0).

Fig. 1 Increase of SO_2 concentrations according to the model for air parcels at rest or their movement over areas with equal emission for two emission intensities, for three decay times and the influence of starting concentration (C_0).

upoštevamo), in malo od razpolovne dobe, ki je tu približno konstantna.

Enačba (5) je uporabna tudi za določanje koncentracij pri mirujočem zraku, če se emisija v stopnjah ali nezvezno spreminja. Taki so pogoji predvsem v naših kotlinah pozimi, ko zrak včasih tudi po več dni stagnira - a o tem pozneje. Tu pa si v nadaljnjem oglejmo transport SO_2 v Slovenijo čez različna emisijska področja Evrope, še prej pa mesto Slovenije na lestvici emisije v Evropi.

EMISIJA SO_2 V SLOVENIJI IN EVROPI

Za določitev sprememb koncentracij potujočega delca proti Sloveniji je potrebno poznati emisijo področij, prek katerih se delec premika. Za taka področja pa je navadno podana "površinska emisija" (Q_P), to je masa polutanta, ki izhaja iz enote površine v enoti časa ter je s prej obravnavano emisijo (maso na volumen in čas) v naslednji preprosti zvezi:

$$Q = \frac{Q_P}{H} \quad (9)$$

kjer je H višina plošče zraka ali debelina prizemne plasti, v kateri poteka transport. Tudi to višino vzamemo v naših obravnavah za konstantno vrednost, in sicer je $H = 1,5$ km, v skladu z nekoliko debelejšo prizemno mejno atmosfersko plastjo zaradi sorazmerno večje hrapavosti terena.

Površinska emisija nam je poznana iz karte emisije SO_2 , ki so jo izdelali v CCU v okviru programa OECD /8/ na Norveškem. Na tej karti je Evropa z delom Severnega morja in Atlantika razdeljena na površinske emisijske enote s površino 16.129 km^2 ($127 \text{ km} \times 127 \text{ km}$), za vsako enoto pa je podana ocenjena celotna emisija SO_2 za leto 1972. Ker je bila karta izdelana za interno delo z omejeno uporabo, je tu ne reproduciramo, vendar pa njene vrednosti uporabimo pri naših izvajanjih in računih. Iz te emisijske karte sledi, da Slovenijo neposredno obdajajo področja z manjšo emisijo, malo dlje pa je precej takih z izdatno večjo emisijo SO_2 . Področje Slovenije pade v dva kvadrata enotne emisijske enote: Zahodna Slovenija z delom Italije in Trstom je ocenjena na 100.000 ton SO_2 /leto, osrednja in vzhodna z Zagrebom pa za faktor 1,5 več. V grobem lahko vzamemo srednjo vrednost ter postavimo, da je poprečna emisija za Slovenijo

okrog 125.000 ton SO₂ na leto in na enako površinsko emisijsko enoto.

Da bi ugotovili mesto Slovenije glede emisije v Evropskem prostoru, si pogledjmo natančneje frekvenčno razporeditev jakosti emisijskih enot za širše okolno področje, ki pride za nas nekako najbolj v poštev. To je južna in srednja Evropa SE od Londona tako, da obsega zajeto področje po 7 emisijskih enot na vsako stran od Slovenije razen na jug, ker v tej smeri karta tako daleč ne sega. To področje zajema zato skupno 192 (12 x 16) emisijskih enot, ima dimenzije 2000 km x 1500 km ter je črtkano obrobljeno na sliki 4. Poprečna vrednost emisije SO₂ na tem delu Evrope je 140.000 ton na leto in na enoto, iz česar takoj sledi, da je emisija Slovenije pod poprečjem - kar pa ne da pravilne slike, ker je razporeditev emisije zelo neenakomerna.

Razdelimo emisijske enote v razrede po jakosti in izdelamo frekvenčno razporeditev emisijskih enot za ta del Evrope pa dobimo vrednosti, ki so podane v tabeli 1.

Iz tabele je razvidno, da pade Slovenija v tretji razred, in če pogostnost tega razreda (16) izvzamemo, vidimo, da je skupno 128 enot bolj čistih ali z manjšo emisijo in le 48 enot z večjo emisijo SO₂, kot jo ima Slovenija. Čeprav je torej emisija Slovenije pod poprečjem, je glede na razmerje čistejših in bolj onesnaženih površin Evrope očitno, da se tudi Slovenija čisti na račun širše čistejše okolice. V Evropi lahko torej štejemo Slovenijo med redkejša področja z relativno močno emisijo. Koliko in kdaj pošlje Slovenija v okolico več onesnaženja kot ga prejme od okolice pa je seveda predvsem odvisno od smeri in hitrosti gibanja zraka čez Evropo - torej od vremenske situacije. Ker se vremenske situacije stalno spreminjajo, mi pa še nimamo izdelanih tipičnih pogojev in tipičnih trajektorij, bomo najprej ugotovili, kako onesnažen zrak prihaja v Slovenijo iz raznih smeri in kako onesnažen jo zapušča, seveda ob poenostavljenih pogojih.

TRANSPORT SO₂

V nadaljnjem bomo pod "Slovenijo" razumeli kvadratno emisijsko enoto, ki zajema pretežni del osrednje in vzhodno Slovenijo ter delček Hrvaške (slika 4).

Poglejmo si najprej, kakšen bi bil približno transport žveplovega dioksida v Slovenijo v primerih, če bi bile trajektorije ravne črte, potekajoč iz glavnih smeri neba in če ne upoštevamo vpliva

Tabela 1 Frekvenčna razporeditev enotnih emisijskih površin po razredih jakosti emisije SO₂ za srednjo in južno Evropo (občrtkano območje slike 4); Q je v 1000 ton na leto in površinsko enoto.

Table 1 Frequency distribution of unit air pollution emission areas according to emission intensity classes for middle and South Europe (Area encircled with dashed line on fig. 4); Q is in 1000 tons SO₂ per year per unit area.

Emis. razred	0-50	-100	-150	-200	-250	-300	-350	-400	-450	-500	-550	-600
n	82	46	16	14	10	3	3	5	3	0	0	1
Σ Q	2050	3450	2000	2450	2250	825	975	1870	1275	0	0	600
Σ _d ⁿ	48											
Σ _d ^Q	19.570											

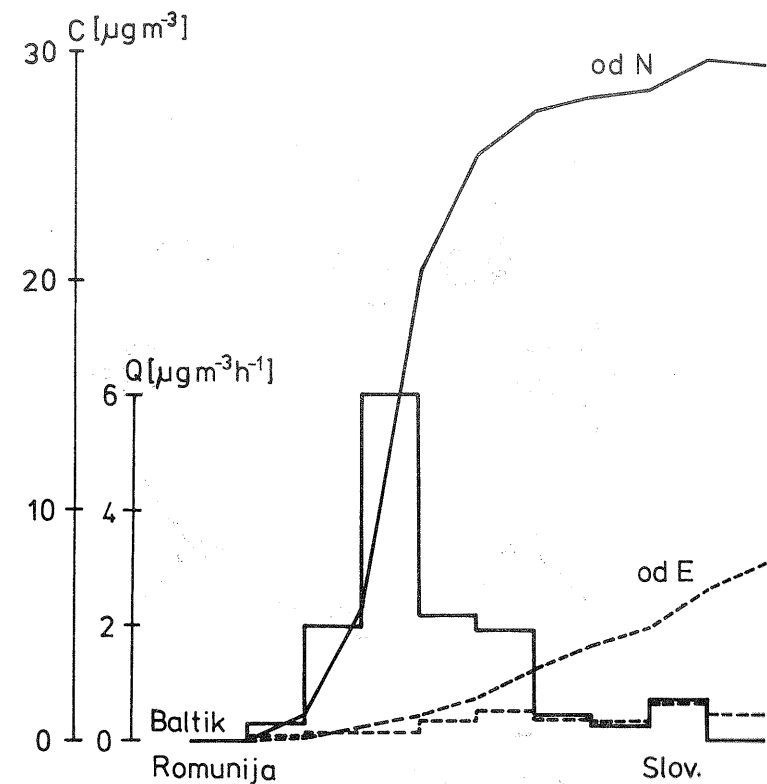
Emis. razred	-650	-700	-750	-800	-850	-900	-950	-1000	-1050	-1100	-1150	-1150	1150
n	1	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Σ Q	605	1400	0	770	850	0	0	0	1020	0	0	0	4680

Alp. Transport naj bi segal do višine 1,5 km, zračni delci pa bi se gibali s konstantno hitrostjo 50 km/h brez divergence in deformacije, torej v stacionarnem in paralelnem tokovnem polju. Le za premike v diagonalni smeri emisijskih kvadratnih polj upoštevamo daljši čas prehoda za faktor 1,41 (koren iz 2).

Spremljajmo npr. zračni delec, ki bi prišel v osrednjo in vzhodno Slovenijo naravnost od severa - kar je izjemoma tudi mogoče. Ob postavljeni začetni koncentraciji $C_0 = 0$ (kar približno velja) bi z Baltika prehajal prek posameznih emisijskih enotnih površin z emisijo $Q = 0.33, 2.00, 6.03$ itd. $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ ter končno prek 7 različnih emisijskih enot prišel do Slovenije. Zaradi predpostavljene enakomerne hitrosti (50 km/h) bi prehajal prek vsake emisijske enote 2,5 ure, doživljal postopne spremembe v skladu z enačbo (5) in prišel do enote Slovenije po 17,5 ure s koncentracijo $28,4 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ter odšel iz nje 2,5 ure pozneje s poprečno koncentracijo $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Potek postopnih sprememb koncentracij za to severno in za vzhodno smer je grafično prikazan na sliki 2. Rezultati analognih računov transporta SO_2 v Slovenijo iz glavnih smeri neba so nazorno prikazani na sliki 3 in izčrpnije podani v tabeli 2. Vpliv Alp, ki je verjetno znaten, pa bo treba še proučiti.

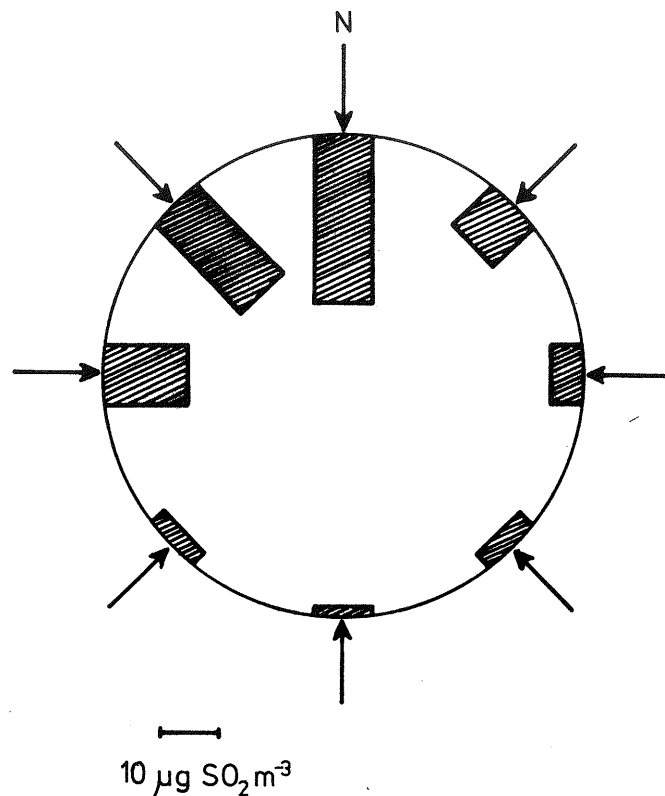
Iz slike 3 vidimo, da bi prihajal k nam najbolj onesnažen zrak prav s severa prek Šlezije, najbolj čist pa z juga. Po onesnaženosti je na drugem mestu zrak od NW ker prihaja prek Porurja, na tretjem pa od zahoda ker prehaja preko severne Italije, posebno prek milanskega industrijskega področja. Bolj podrobni podatki so razvidni s tabele 2.

V prvi vrsti tabele 2 so podane vsote emisij ($\sum Q$) površinskih enot vzdolž trajektorij iz posameznih smeri. V drugi vrsti (C_s) je podana koncentracija SO_2 v trenutku, ko pride zračni delec na mejo Slovenije (analogno kot na sliki 3), računana po enačbi (5). V naslednji vrsti (C_Q) so podane koncentracije, kot bi jih imeli zračni delci, če bi ne bilo izpada, to je, če računamo končno koncentracijo kot produkt poprečne emisije in časa delca na poti. Ker je ta čas v primerjavi z razpolovno dobo sorazmerno kratek, so razlike med obema koncentracijama ($C_Q - C_s$), ki so podane v naslednji vrsti, sorazmerno majhne. To potrjuje, da je izpad pri postavljenih hitrostih gibanja zraka prek južne Evrope večinoma zanemarljiv in je omemba vreden le pri višjih koncentracijah in za nas pri tokovih iz severozahodnega kvadranta - bil pa bi še nekoliko večji z uporabo popolnejše enačbe, kot je (3), kar pa bi obseg računov zelo povečalo, glede na natančnost podatkov o emisiji pa bi bilo nesmiselno.



Slika 2 Emisija na poti in spremembe koncentracij SO_2 v zračnih delcih, ki se pomikajo proti Sloveniji vzdolž ravnih trajektorij od severa in vzhoda s hitrostjo 50 km/h.

Fig. 2 Emissions along the path and changes of SO_2 concentrations in air parcels moving along straight trajectories from North and East to Slovenia with velocity of 50 km per hour.



Slika 3 Grafični prikaz fiktivne onesnaženosti zraka ali koncentracij SO_2 (v $\mu\text{g m}^{-3}$) tik pred prihodom zraka v Slovenijo po ravnih trajektorijah iz glavnih smeri neba.

Fig. 3 Graphical representation of fictive air pollution or concentrations of SO_2 (in $\mu\text{g m}^{-3}$) just before reaching Slovenia along straight trajectories from the main directions.

Tabela 2 Skupna emisija področij vzdolž poti, koncentracije SO_2 v zračnih delcih tik pred prihodom v Slovenijo ter razlike koncentracij, razmerja in čas potovanja delcev za ravne trajektorije iz glavnih smeri neba.

Table 2 Total emissions of areas along the path, concentrations of SO_2 in air parcels just before reaching Slovenia, concentrations, ratios and time consumed by air parcels moving along straight trajectories from the main direction.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
ΣQ	12.2	2.9	2.1	0.7	0.5	0.8	5.9	6.6	$\mu\text{g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$
C_s	28.4	9.5	5.1	2.3	1.3	2.7	13.9	20.9	$\mu\text{g m}^{-3}$
$C_{\bar{Q}}$	30.5	10.1	5.2	2.4	1.3	2.7	14.6	23.3	"
$C_{\bar{Q}} - C_s$	2.1	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.7	2.4	"
ΔC	1.3	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.5	1.4	"
R	0.04	0.2	0.3	0.8	1.4	0.6	0.1	0.7	-
t_s	17.5	24.7	17.5	14.1	10.0	14.1	17.5	24.7	h

Naslednja vrsta v tabeli 2 (ΣC) podaja razlike med koncentracijami v delcih, ko ti zapuščajo emisijsko enoto Slovenije, in koncentracijami tik pred prihodom vanjo. Zaradi izenačenja efekta emisije v enoti Slovenije za vse smeri in možnosti primerjave, tukaj čas prehoda v diagonalni smeri ni povečan za faktor koren iz 2. Iz podatkov te vrste je razvidno, da se nad Slovenijo nekoliko močnejše onesnažijo le sorazmerno čisti zračni delci, to je tisti, ki prihajajo iz čistejših področij - z juga; nizke koncentracije iz teh smeri prihajajočega zraka so nekoliko prenizke, ker so znana emisijska področja v teh smereh številčno manjša zaradi manjkajoče karte in zajemajo le 5 emisijskih enot.

Že precej onesnažen zrak, ki pride do Slovenije iz severne in severozahodne smeri (če zaradi Alp sploh pride), pa se nad Slovenijo le še malenkost bolj onesnaži in torej skoraj tak, kot je prišel, odhaja dalje proti jugovzhodu. Merilo relativnega dodatnega onesnaženja zraka, ki ga povzroča emisija virov v enoti Slovenije, je najbolj nazorno prikazana z razmerjem (R), ki je podano v predzadnji vrsti tabele 2. To razmerje je določeno z:

$$R = \Delta C / C_s \quad (10)$$

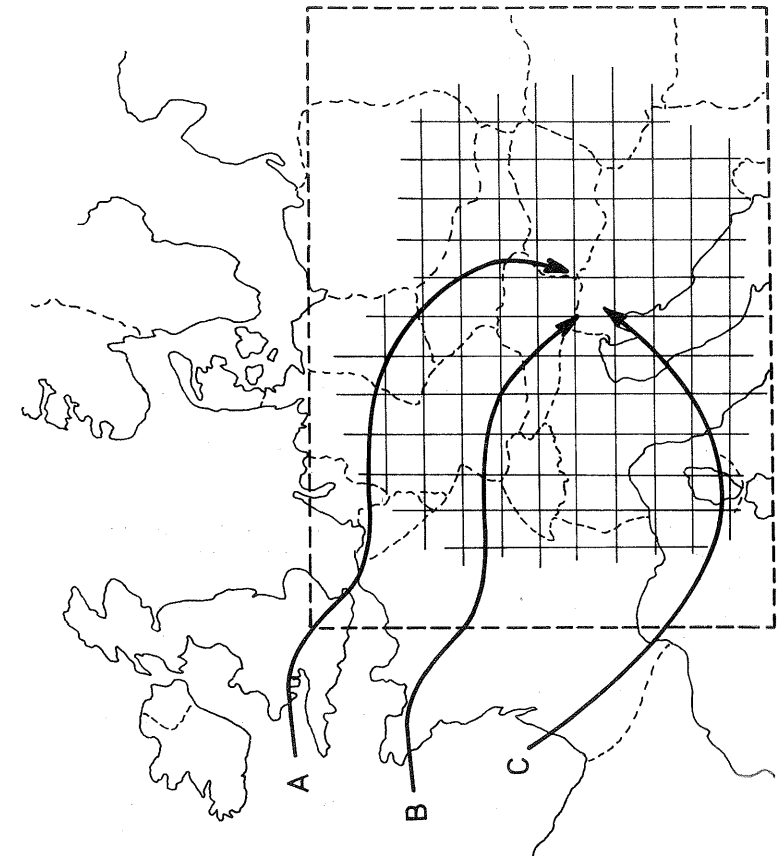
in je najmanjše (0.04) za severno smer, od koder prihaja najbolj onesnažen zrak, in je seveda največje za jug (1.3), od koder je prihajajoči zrak najčistejši; povečanje onesnaženja z SO_2 v njem z emisijo Slovenije je zanj torej skoraj za polovico večje, kot je bila sploh njegova onesnaženost do nas. V zadnji vrsti je skupen čas (t_g) približevanja delcev ter je različen zaradi diagonalnih smeri in manjkajoče karte na jugu, kjer pa je precej morja.

Vsi ti podatki, posebno pa razlika $C_Q - C_S$, kažejo, da je postavljen model za ocenitev transporta onesnaženja na take razdalje dokaj dober. Potrditev pa smo dobili, ko smo računali spremembe koncentracij za dva izrazito različna primera trajektorij po 850 mb ploskvi 5.3. in 29.10.1972. Naši rezultati se dobro ujemajo z rezultati, ki so jih za ta primera dobili Norvežani z uporabo mnogo zahtevnejšega numeričnega modela /3/. Več bodo povedale meritve.

Nekoliko idealiziran prikaz ob ravnih trajektorijah nam je torej pokazal nekakšno "rožo" možnega transporta onesnaženje v Slovenijo in je vsekakor pomemben za poznavanje razmer našega širšega prostora. Vendar pa so ravne trajektorije na področju južne in srednje Evrope izjemne, čez Alpe pa problematične, ter je primerno dati še nekaj primerov.

Čeprav natančno ne poznamo tipičnih trajektorij za dotok zraka v Slovenijo, sta gotovo A in C trajektoriji, ki sta prikazani na sliki 4 precej pogostni. Tako predstavljata primera A in B poti zraka ob razširitvi Azorskega anticiklona nad srednjo in južno Evropo - prva bolj severno in druga in druga bolj južno - B je zaradi Alp problematična; primer C pa trajektorije, ko je nad zahodno Evropo ozka dolina v pritiskovem polju. Končne vrednosti koncentracij SO_2 ob prihodu zraka v Slovenijo in analogne izvedenke, kot v tabeli 2, so za te trajektorije prikazane v tabeli 3.

Iz tabele 3 vidimo, da so razlike v končnih koncentracijah zelo velike in da že neznatna razširitev anticiklona proti severu vodi zračne delce k nam prek močnih emisijskih področij (Londona, Porurja in Dunaja) - primer A, ter pride zrak k nam nekajkrat bolj onesnažen, kot kadar potuje zrak nekoliko južneje prek Francije, Bavarske in srednje Avstrije - primer B. Najmanj onesnažen je očitno zrak, ki pride z Atlantika k nam prek južne Francije in severnega Sredozemlja - primer C. Verjetno je po tej poti prihajajoči zrak večinoma še manj onesnažen kot po teh računih, pri katerih smo upoštevali koeficient izpada brez padavin. Ob taki poti zračnih delcev v dolini pritiskovega polja namreč nastajajo navadno padavine ter je izpad onesnaženja, kot že



Slika 4 Tri posebne trajektorije za dovod zraka v Slovenijo ter območje Evrope za emisijsko vrednotenje Slovenije, ki je podano v tabeli 1.

Fig. 4 Three special trajectories for transport of air to Slovenia and the region of Europe used for calculation of emission of Slovenia which is given on table 1.

Tabela 3 Enako kot v tabeli 2 toda za trajektorije s slike 4.

Table 3 Total emissions of areas along the path, concentrations of SO₂ in air parcels just before reaching Slovenia, concentrations, ratios and time consumed by air parcels moving along trajectories given on fig. 4.

	A	B	C	
ΣQ	40.8	3.1	1.4	$\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$
C_s	69.7	8.1	3.8	$\mu\text{g m}^{-3}$
$C_{\bar{Q}}$	116.2	8.9	4.3	"
$C_{\bar{Q}} - C_s$	46.5	0.8	0.5	"
ΔC	-4.2	2.3	2.4	"
R	-0.06	0.28	0.62	"
t_s	37.5	30.0	27.5	h

rečeno, močnejši. Ta učinek pa je lahko delno kompenziran s konvergenco vetra pri tleh v dolini pritiskovega polja, kar lahko vodi do akumulacije onesnaženja /9/. Iz tega vidimo, da bi popolnejši model moral zajemati še vrsto spremenljivk.

Zaradi sorazmerno visokih koncentracij, ki kmalu nastopijo na trajektoriji primera A, je ta primer računat s spremenljivim - od koncentracije odvisnim izpadnim koeficientom, sicer bi bile končne koncentracije pri prihodu zraka v Slovenijo skoraj enkrat večje. Pri tem primeru je očitno, da za tako močno onesnažen zrak Slovenija že deluje kot očiščevalno področje, saj jo kljub njeni emisiji ta zrak zapušča manj onesnažen, kot prihaja vanjo $\Delta C = -4.2$; relativno pa to ne pomeni dosti, kot kaže razmerje $R = -0.06$, ki je seveda tudi negativno.

Iz celotnega spremljanja sprememb koncentracij v zračnih delcih na poti proti Sloveniji in prek nje sledi, da so delci, ki prihajajo iz NW kvadranta, precej onesnaženi in Slovenija s svojo emisijo ne vpliva bistveno na koncentracije v njih pri njihovem nadaljnjem širjenju proti jugu, kamor odhajajo le malo bolj onesnaženi ali celo čistejši. Relativno večji doprinos onesnaženja z SO₂ lahko daje Slovenija zraku, ki prihaja iz čistejših področij - iz južnih kvadrantov - in potuje v južno Avstrijo. Severneje ležeči predeli pa imajo že sami močnejšo emisijo in sami bolj

onesnažujejo kot mi. Čeprav spada enota Slovenije med relativno redka področja močnejšega onesnaževanja v Evropi (tabela 1), je njen vpliv na koncentracije "ozadja" onesnaženja sosednjih področij sorazmerno majhen. To je predvsem posledica prevladujočih zahodnih vetrov, razporeditve emisije v Evropi in sorazmerno majhnega vpliva izpadnega člena pri poprečnih hitrostih gibanja zraka čez Evropo.

Le pri zelo počasnih premikih zračnih delcev v tem delu Evrope bi utegnil biti vpliv emisije Slovenije na sosednja področja znaten. Toda v takih primerih šibkih splošnih vetrov se v kotlinah Slovenije, kjer je lociranih večina virov, ustvarjajo stacionarna jezera hladnega zraka tako, da transkontinentalnega transporta pri tleh tu skoraj ni; pač pa lokalne koncentracije v stagnirajočem zraku močno narastejo. Premik tega zraka prek sosednjih področij pa nastane šele ob močnejših pritiskovih poljih in močnejših splošnih vetrovih, ki pa zagotavljajo hiter transport, močnejšo turbulenco in prenos onesnaženja v večje višine. Tedaj je vpliv na prehodna področja manjši in kratkotrajen ali pa prehodnega značaja.

Čeprav spada Slovenija glede na razporeditev jakosti emisijskih enot v polovico med velike emitente, je njena poprečna emisija pod poprečjem za obravnavani pretežni del Evrope. Upoštevajoč še lokalno razporeditev onesnaženja sledi, da Slovenija sorazmerno malo prispeva k onesnaženju ozadja sosednjih področij. Pri trajektorijah iz NW kvadranta, kadar zrak od tam kljub Alpam (ali okrog njih) pride v Slovenijo, pa je transport onesnaženja v Slovenijo lahko znaten.

LITERATURA

- /1/ Scorer R.S.: Air Pollution. Pergamon Press, London 1968.
- /2/ Ottar B.: The Long Range Transport of Air Pollutants. Proc. of the Third Int. Clean Air Cong., Düsseldorf 1973, B 102.
- /3/ CCU: Long Range Transport of Air Pollutants. Norw. Inst. for Air Research, Kjeller 1973.
- /4/ Wippermann F.: The Planetary Boundary Layer of the Atmosphere. Deutscher Wetterdienst, Offenbach 1973.

- /5/ Reiter E.R.: Atmospheric Transport Processes. Part 2, U.S. Atomic Energy Comm., Oak Ridge 1971.
- /6/ Bolin B.G. and Charlson R.J.: Stockholm tropospheric aerosol seminar: measurement of regional to global scale pollution by airborne particles. Bulletin AMS, V-55, No-3, 1974.
- /7/ Nordø F.J.: Meso-Scale and Large-Scale Transport of Air Pollutants. Proc. Third Int. Clean Air Cong., Düsseldorf 1973, B 105.
- /8/ OECD: Co-operative Technical Programme to Measure the Long - range Transport of Air Pollutants. NR/ENV/74.7, Paris, 1974.
- /9/ Fortak H.: Anwendungsmöglichkeiten von Mathematisch-meteorologischen Diffusionsmodellen zur Lösung von Fragen der Luftreinhaltung. Min. für Arbeit, Ges. Soc. Nordrhein-W., Düsseldorf 1972.