

## Kumulativne razdiobe koncentracija u verifikaciji modela difuzije

### Diffusion Model Verification using Cumulative Distribution of Concentrations

MARINA GRČIĆ i NADEŽDA ŠINIK

Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb

**Sažetak:** Testiran je gausovski model za točkasti povišeni izvor SO<sub>2</sub> u orografski razvijenom području. Uspoređene su kumulativne razdiobe izračunatih koncentracija i koncentracija izmjerenih monitorom na četiri lokacije u blizini izvora. Izračunata je korelacija između kumulativnih krivulja koja pokazuje dobro slaganje teoretskih i mjerenih vrijednosti. Omjer teoretskih i izmjerenih vrijednosti ukazuje na prilagodbu modela orografskim uvjetima.

**Ključne riječi:** Kumulativna razdioba; Model difuzije polutanata.

**Abstract:** The Gaussian model for elevated point SO<sub>2</sub> source in an orographically developed region is tested.

SO<sub>2</sub> concentrations were measured over a period of a few months at four sites within 5 km distance of the source. The results are presented as a cumulative frequency distribution of concentrations calculated for the same period. Linear correlation coefficient of cumulative distributions have been calculated, showing good agreement between theoretical and measured concentrations. The ratio of the calculated to the measured values emphasized the models' applicability to orographical conditions.

**Key words:** Cumulative distribution; Pollutant diffusion model.

#### 1. UVOD

Testiranje modela je važan korak u procesu matematičkog modeliranja difuzije polutanata u atmosferi. Znanstveni pristup testiranju (Fox, 1981) uključuje provjeru mjerenja podataka korištenih u modelu; konzistentnost pretpostavki modela i fizikalnih zakona promatranog procesa; ispitivanje računske provedbe modela. Usporedba izmjerenih i teoretskih vrijednosti može se provesti za pojedinačne podatke, maksimalne koncentracije ili kumulativne razdiobe čestina. Takvim pristupom upoznajemo karakteristike modela i prilagođenost matematičkog aparata modeliranju prirodnih mehanizama difuzije.

Općenito se smatra da model dobro opisuje stvarne procese ako je iznos omjera izmjerenih i izračunatih koncentracija oko 2 (Hanna 1971). To je najjednostavnija mjera prilagodbe modela. Za isti model iznos omjera može varirati, ovisno o lokalitetu na koji je model primijenjen. To ukazu-

je koliko je model sposoban da uvaži specifičnosti pojedine lokacije (orografija, vodena površina), što je važna informacija za eventualne modifikacije modela.

U literaturi se navodi mnogo primjera testiranja modela gdje su uz opće karakteristike pristupa navedene i specifičnosti pojedinog modela.

Harrison i McCartney (1980) su gausovskim modelom odredili prostornu razdiobu koncentracija oko točkastog izvora NO<sub>2</sub>. Model daje za oko 40% više koncentracije od izmjerenih. Usporedba teoretskih i izmjerenih vrijednosti, s obzirom na stabilnost, je pokazala kako upravo pretpostavka da je nadvisanje neovisno o brzini vjetera i stabilnosti dovodi do povećanja teoretskih u odnosu na izmjerene koncentracije.

Gogolak et. al. (1981) su za procjenu srednjih satnih koncentracija <sup>85</sup>Kr, primijenili također gausovski model. Omjer teoretskih i izmjerenih vrijednosti je oko 2, a neovisan je o udaljenosti od izvora.

Csanady (Venkatram 1980) je ukazao da su izmjereni i teoretske koncentracije raspoređene po log-normalnoj razdiobi. Bencala i Seinfeld (1976) su ispitivali prilagodbu log-normalne i nekoliko drugih razdiobi, izmjerenim vrijednostima. Pokazali su da se čestine koncentracija polutanata mogu uspješno prikazati različitim matematičkim funkcijama, ali je log-normalna razdioba najprihvatljivija, jer se parametri razdiobe (srednjak i standardna devijacija) mogu odrediti relativno jednostavno. Autori su ustanovili da ta razdioba vrijedi neovisno o vremenu osrednjavanja koncentracija. Takva se razdioba koncentracija može dijelom objasniti i utjecajem brzine vjetera, parametra koji je također raspodijeljen po log-normalnoj funkciji.

Venkatram (1980) je testirao model sličnosti primijenjen za emisiju iz povišenog izvora u konvektivni granični sloj. Uz pretpostavku da su koncentracije log-normalno raspodijeljene, autor je odredio linearnu korelaciju između logaritamskih vrijednosti izmjerenih ( $\ln C_o$ ) i izračunatih koncentracija ( $\ln C_p$ ). Testirana je nul hipoteza da pravac regresije prolazi kroz ishodište uz nagib od  $45^\circ$  (tj.  $a=0$  i  $b=1$  za  $\ln C_o = a+b \ln C_p$ ). Hipoteza je prihvaćena uz prag signifikantnosti 10%.

U ovom je radu prikazano testiranje gausovskog modela za slučaj ispusta iz točkastog, povišenog izvora. Model je primijenjen na plominski bazen, lokalitet gdje je naročito izražena orografija. Model sadrži specifične modifikacije uvedene na osnovi istraživanja difuzijskih karakteristika atmosfere općenito i u orografskim uvjetima, koja su provedena u RHMZ CMI (1980, 1982). Testiranje je obavljeno pomoću kumulativnih čestina izmjerenih i izračunatih koncentracija.

## 2. OPIS MODELA I PRIMJENA

Model je gausovskog tipa, a proračunava polsatne prizemne koncentracije ispod osi dimne perjanice uz pravocrtno udaljavanje od točkastog, povišenog izvora. Sastoji se od skupa jednadžbi, koje uz normalni gausovski model sadrže i proširenje članovima multiple refleksije za razne slučajeve odnosa efektivne visine dimne perjanice i visine sloja miješanja, kao i posebnu jednadžbu za slučajeve »zadimljenja« (Pasquill 1974, Beychok 1979). Nadvisivanje dimne perjanice određivano je kao funkcija brzine vjetera pomoću Briggsovih formula (Briggs 1978). Uz tehnološke ulazne podatke, meteorološke podatke čine smjer i brzina vjetera na visini otvora dimnjaka, stabilnost po Pasquillu i visina sloja miješanja.

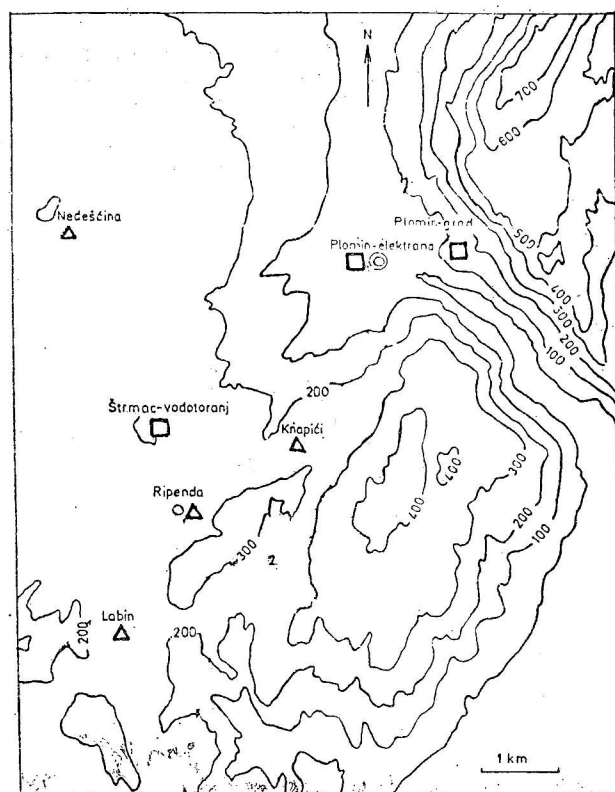
Iz statističkog skupa prizemnih koncentracija kroz dulji vremenski period, model izračunava vrijednost koncentracije iznad koje je samo 5% podataka,  $C(95)$ , 2%— $C(98)$  i medijan,  $C(50)$ .

Meteorološki ulazni parametri određivani su pomoću serije mjerenja vezanom sondom i pilot-balonima u kombinaciji s podacima anemografa na 45 m i 350 m visine te mjerenja temperature na 2 m iznad tla kod plominske elektrane i na obližnjem brežuljku s NV 350 m.

Orografska korekcija uvedena je u model kao funkcija stabilnosti uz tri gradacije približavanja dimne perjanice tlu: najviše u F stabilnosti, a najmanje u D stabilnosti. Postupak ORO-modifikacije izvela je S. Vidič u Prilogu IV studije »Meteorološki utjecaj TE Plomin 2 na okoliš« (Vidič, 1982). Testiranjem rezultata proračuna pokazalo se da jače približavanje tlu u E i F stabilnosti odgovara samo slučajevima maksimalnih koncentracija, izmjerenih monitorima (»a« varijanta modela), dok veći dio skupa koncentracija odgovara proračunima ORO-modifikacije uz dozvoljeno smanjenje He efektivne visine dimne perjanice) približavanjem orografskoj uzvisini do  $3.72\sigma_z$  (varijanta »b« modela).

## 3. TESTIRANJE MODELA

Model je testiran usporedbom statističkih kolektiva polsatnih koncentracija  $SO_2$ , izmjerenih na četiri monitora u okolišu TE Plomin 1 i izračunatih



Sl. 1 — Izvor  $SO_2$  (Plomin-elektrana) i položaj monitora.

Fig. 1 — The  $SO_2$  source (Plomin-power plant) and monitor locations.

teoretski. Monitori su radili tokom VII, VIII, IX, X, XI i XII mjeseca u 1981. godini u mjestima Knapići (udaljenost 1.5 km od TEP 1 prema SSW), Ripenda (udaljenost 3.8 km prema SSW-SW), Labin (udaljenost 5.8 km prema SSW-SW) i Nedešćina (udaljenost 4.3 km prema W). Ulazni podaci u model bile su odgovarajuće satne vrijednosti meteoroloških parametara u periodu rada monitora te tehnološki parametri elektrane.

Orografija okoliša često uzrokuje zakretanja dimne perjanice iz termoelektrane Plomin (TEP). Karakteristične trajektorije detaljno su analizirane u studiji RHMZ (1982). Ta činjenica onemogućava objektivno određivanje položaja dimne perjanice iznad monitora u svakom satu razmatranog test-perioda. S obzirom da model proračunava prizemne koncentracije točno ispod osi dimne perjanice, svako udaljavanje osi od položaja monitora otežava realnu usporedbu pojedinačnih polsatnih koncentracija. Iz tog se razloga za testiranje koristi općenito prihvaćen postupak usporedbe kumulativnih razdiobi. (Njihovom primjenom ujedno se izbjegava potreba prilagodbe teoretskih stvarnim razdiobama, što uvelike ubrzava proces testiranja).

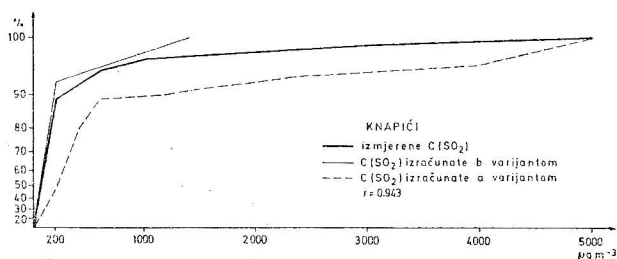
Kumulativne razdiobe izmjerenih i izračunatih polsatnih koncentracija za svaki monitor prikazane su na slikama 2 do 5. Teoretske razdiobe određene su za smjerove koji su najbliži poziciji monitora. Iz sličnosti u podudaranju krivulja kumulativnih razdiobi moglo se odrediti koji je smjer prijenosa iz TEP relevantan za pojedini monitor. U varijanti (b) primjene modela na TEP taj smjer odgovara uglavnom pravolinijskom prijenosu iz elektrane do monitora. Nasuprot tome, maksimalne koncentracije, varijante, (a) više mogu biti pod uplivom zakretanja trajektorija.

Podudaranje izmjerenih i teoretskih krivulja kumulativne razdiobe prvi je pozitivan korak testa koji pokazuje valjanost primjene modela u plominskom području i šire.

Kao dopunska informacija u vidu numeričkog pokazatelja izračunati su koeficijenti korelacije između krivulja (i upisani na slikama). Pri tom je korištena teoretska krivulja varijante (b), a samo podatak maksimuma je pridružen iz varijante (a). Jedino kod Labina u cjelini vrijedi varijanta (b) modela, jer je zbog povoljne pozicije između zavjetrine i navjetrine uglavnom zaštićen od pojave visokih koncentracija.

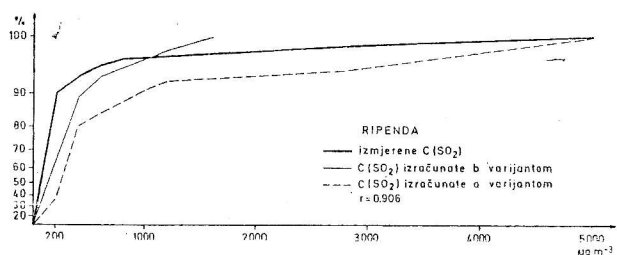
Korelacija je veoma dobra. Time je konačno potvrđeno da se model opravdano može upotrebljavati za ocjenu karakterističnog prizemnog onečišćenja u okolišu termoelektrane.

Međutim, unatoč podudaranju kumulativnih razdioba kao i visoke korelacije, posebno smo ispitali kod koje je grupacije prizemnih koncentracija ova korelacija najrealnija. Očitane su koncentracije uz iste percentile. Njihovi omjeri (sl. 6) pokazuju da kod manjih koncentracija model daje prevelike vrijednosti (što se vidi i iz kumulativnih razdioba). To je realno, jer model računa prizemne koncentracije ispod osi dimne perjanice, gdje su one najveće, a monitori se u većem broju slučajeva nisu nalazili upravo ispod osi. U momentu kada je os dimne perjanice bila iznad pojedinog monitora, izmjerene su veće koncentracije te se kvocijenti na slici 6 približavaju jedinici. Drugim riječima, realnosti se najviše približuje 95 i 98 percentil, dok C(50) daje prevelike vrijednosti.



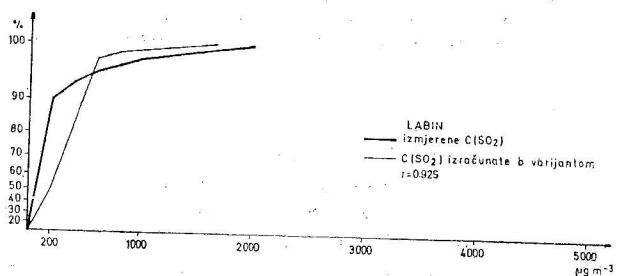
Sl. 2 — Kumulativne razdiobe prizemnih polsatnih koncentracija SO<sub>2</sub> (18. 07. 1981. do 07. 10. 1981.)

Fig. 2 — Cumulative distributions of 30-minute surface SO<sub>2</sub> concentrations (18 July 1981 till 7 October 1981)



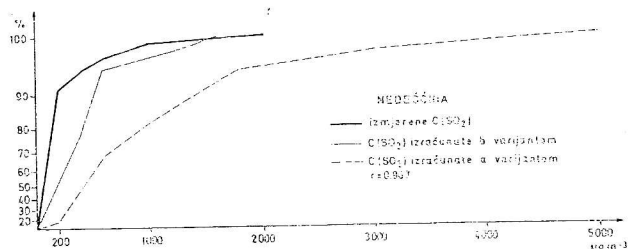
Sl. 3 — Kumulativne razdiobe prizemnih polsatnih koncentracija SO<sub>2</sub> (25. 07. 1981. — 11. 11. 1981.)

Fig. 3 — Cumulative distributions of 30-minute surface SO<sub>2</sub> concentrations (25 July 1981 till 11 November 1981)



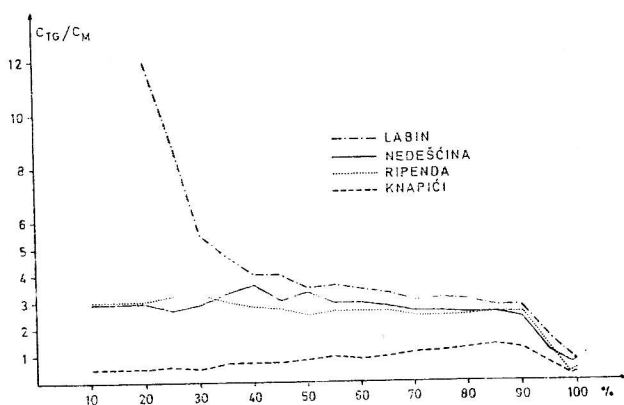
Sl. 4 — Kumulativne razdiobe prizemnih polsatnih koncentracija SO<sub>2</sub> (25. 05. 1981. do 09. 11. 1981.)

Fig. 4 — Cumulative distributions of 30-minute surface SO<sub>2</sub> concentrations (27 May 1981 till 9 November 1981)



Sl. 5 — Kumulativne razdiobe prizemnih polsatnih koncentracija  $\text{SO}_2$  (15. 10. 1981 do 09. 11. 1981.)

Fig. 5 — Cumulative distributions of 30-minute surface  $\text{SO}_2$  concentrations (15 October 1981 till November 1981)



Sl. 6 — Omjeri teoretskih i mjernih vrijednosti prizemnih koncentracija  $\text{SO}_2$ , određeni iz kumulativnih razdioba (svibanj 1981. — studeni 1981.)

Fig. 6 — Theoretical to measured surface  $\text{SO}_2$  concentrations ratio, determined by use of cumulative distributions (May 1981 till November 1981)

#### 4. ZAKLJUČAK

Provedeno testiranje omogućilo je realnu ocjenu uporabivosti modela u danom lokalitetu. Ustanovljeno je da primijenjeni gausovski model u većini slučajeva proračunava prevelike koncentracije kao rezultat proračuna samo ispod osi dimne perjanice.

Model dobro predviđa čestinu pojave i iznos visokih koncentracija koje, iako se javljaju rijetko, predstavljaju veliku opasnost za okoliš izvora.

Primjena kumulativnih razdioba na istovremene nizove podataka teoretskih i izmjerenih koncentracija potvrdila je operativnu vrijednost modela i omogućila bolje razumijevanje procesa turbulentne difuzije polutanata u orografski razvijenim uvjetima zadanog lokaliteta.

#### ZAHVALA

Ovo istraživanje je sufinancirala Republička zajednica za znanstveni rad SRH (SIZ III).

#### 5. LITERATURA

- Bencala, K. E. and Seinfeld J. H., 1976: On frequency distributions of air pollutant concentrations. *Atmos. Env.* 10, 941—950.
- Beychok, M., 1979: Fundamentals of stack gas dispersion. Irvin, California.
- Briggs, G. A., 1978: Plume rise predictions, Env. Research Lab., Air Resources-Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab, Oak Ridge, Tennessee.
- Fox, D. G., 1981: Judging air quality model performance. *Bull. of American. Meteorol. Soc.*, 62, 599—609.
- Gogolak, C. V., and Beck, H. L., 1981: Calculated and observed  $^{85}\text{Kr}$  concentrations within 10 km of the Savannah River plant chemical separation facilities. *Atmos. Env.*, 15, 497—507.
- Hanna, S. R., 1971: A simple method of calculating dispersion from urban area sources. *J. Air Poll. Assoc.*, 21, 774—777.
- Harisson, R. M., and McCartney, H. A., 1980: A comparison of the predictions of a simple gaussian plume dispersion model with measurements of Pollutant concentration at ground-level and aloft. *Atmos. Env.*, 14, 589—596.
- Pasquill, F., 1974: Atmospheric Diffusion. Halsted Press, 429.
- RHMZ CMI, 1980: Ekološka studija šireg područja Plomina, Meteorološki aspekti i onečišćenje zraka. Zagreb, 180.
- Vidič, S., 1982: Prilog IV u Meteorološki aspekti utjecaja TE Plomin 2 na okoliš. Zagreb, 90, studija RHMZ SRH Venkatram, A., 1980: Dispersion from an elevated source in a convective boundary layer. *Atmos. Env.*, 14, 1—10

#### SUMMARY

Testing is very important in pollutant diffusion modeling.

This work deals with a test of the Gaussian diffusion model applied to an orographically developed region. The model includes specific modifications due to theoretical investigations and comparisons with measured pollutant concentrations.

30 minute surface  $\text{SO}_2$  concentrations were measured at four locations in the environment of the Plomin-plant (Fig. 1), over six months (July-December 1981).

Cumulative distributions of measured and calculated concentrations (Fig. 2—5) have been compared in order to investigate the models applicability. The model generally overestimates  $\text{SO}_2$  concentrations because of calculating them only below the plume centerline so that only high  $\text{SO}_2$  concentrations are predicted with a reliable accuracy. The linear correlation coefficient and the ratio of the calculated to the measured concentrations (Fig. 6) emphasize the model's suitability for orographical conditions.