

MODELIRANJE DISPERZIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI KAO POSTUPAK ZA PROCJENJIVANJE INDUSTRIJSKIM IZVORIMA UZROKOVANOG ZAGAĐENJA ZRAKA

DISPERSION MODELLING APPROACH TO MONITORING AND PREDICTING INDUSTRY INDUCED AIR POLLUTION.

Marko ČAVRAK – Zoran ČARIJA – Zoran MRŠA

Sažetak:

Modeliranje onečišćenja zraka postalo je esencijalno za razumijevanja načina kojim emisije onečišćujućih tvari iz industrijskih kompleksa, cestovnog transporta i ostalih izvora emisija utječu na dinamiku okoliša. Korištenjem standardiziranoga modela disperzije ISCST3 izrađen je sustav za kontinuirano procjenjivanje prizemnih koncentracija onečišćujućih tvari. Opisan je automatizirani pristup prikupljanju emisija i meteoroloških podataka te izvršena evaluacija za odabrano vrijeme na temelju analize cjelogodišnjih mjerenih podataka emisija i meteoroloških podataka.

Ključne riječi:

Onečišćenje zraka
Modeliranje disperzije onečišćenja

Abstract:

The air quality modeling approach has become essential in understanding the way in which air pollution emissions from industrial complexes, vehicles and other sources influence the dynamics of the environment. A system for continuous prediction of ground level concentrations of air pollutants has been developed using the standardized dispersion model ISCST3. An automated emission preprocessor and meteorology collector has been integrated into the system. Finally, after conducting an annual analysis of the measured data, the system was evaluated for specific datasets.

Key words:

Air pollution
Pollution dispersion modelling

1. UVOD

Visoke koncentracije zračnih onečišćavala snažno utječu na ekosustav i ljudsko zdravlje. Modeliranje onečišćenja zraka važan je sastavni dio studije utjecaja planiranih industrijskih postrojenja na okoliš kao i postupak za kontinuirano procjenjivanje razine onečišćenosti sa stanovišta utjecaja na okoliš i na čovjekovo zdravlje [1]. Korištenjem podataka iz državnih i lokalnih mjernih stanica za praćenje kakvoće zraka moguće je utvrditi razinu onečišćenosti, ali ne i utvrditi pravi izvor onečišćenja (industrijski dimnjak, i dr.) koji bi u incidentnim situacijama mogao smanjiti emisiju prelaskom na

1. INTRODUCTION

High air pollution concentrations heavily affect our ecosystem and human health. Air pollution modeling is used to assess the environmental impact of planned industrial plants as well as to assess the effects of pollution on the environment and on human health on continuous basis [1]. The level of air pollution can be estimated using a national and local network of measurement stations, but one cannot find out the real pollution source (industrial chimneystack, etc.) that could, in the case of an emergency, lower pollution emissions from industrial sources by turning to energents with a lower pollution content or by reducing the working load of these

kvalitetnija goriva ili smanjenjem kapaciteta rada tog izvora. Najčešće korišten model simulacije disperzije onečišćenja, zbog svoje robusnosti i jednostavnosti, jest Gaussov model disperzije onečišćenja [2], koji je korišten i u ovome radu. Ovdje će biti prikazan postupak kontinuiranog procjenjivanja prizemnih koncentracija onečišćujućih tvari korištenjem standardiziranog matematičkog modela ISC3 [3]. Procesiranje ulaznih podataka istaknuto je i prezentirano kao važan segment s obzirom na senzibilnost rezultata ulaznim podacima. Za usporedbu simuliranih i mjerenih vrijednosti izvršena je analiza podataka iz lokalnih i državnih mjernih stanica za kakvoću zraka.

2. MODEL

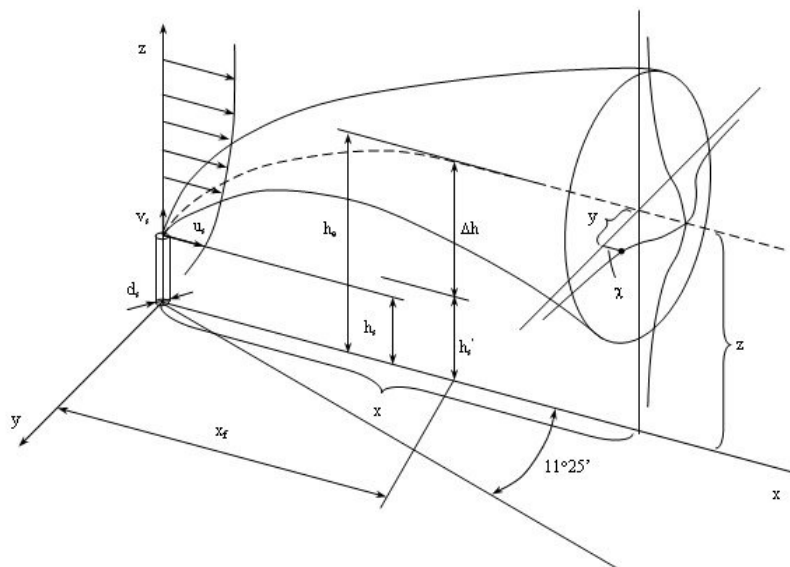
Gaussov model *Industrial Source Complex – Short Term* (nadalje ISCST3) korišten je za simulaciju disperzije na temelju osnovne Gaussove distribucije za točkaste izvore i za utvrđivanje stacionarnih prizemnih koncentracija za određeni vremenski trenutak. Model uzima u obzir kompleksnu konfiguraciju terena (definiranu pravokutnom receptorskom mrežom), a finoća opisa terena izravno utječe na točnost rezultata. Gaussov model računa vrijednosti koncentracije onečišćenja na svakom unaprijed definiranom mjestu, a prema unaprijed definiranim meteorološkim podacima. Time je omogućeno praćenje utjecaja svakoga pojedinog izvora onečišćenja na koncentraciju onečišćenja u svim unaprijed definiranim čvorovima receptorske mreže. Formiranje perjanice dima (podizanje, transport, difuzija i taloženje) pod izravnim je utjecajem satno definiranih meteoroloških podataka koji mogu biti rezultat *in situ* mjerenja ili procijenjeni. Ishodište koordinatnog sustava, za svaki izvor i za svaki sat proračuna, smješteno je na površini zemlje pri osnovici izvora onečišćenja, a apsolutni položaj čvora receptorske mreže preračunava se u lokalni koordinatni sustav izvora onečišćenja. Za promatrani izvor, koncentracija onečišćujuće tvari na udaljenosti x (metara) nizstrujno i y (metara) bočno od izvora (slika 1) dana je sljedećim izrazom [4]:

sources. In this work we use the most widely used model for simulation of pollution dispersion, the Gauss dispersion model, due to its robustness and simplicity [2]. This work describes the continuous air pollution assessment and monitoring using the standardized ISC3 model[3]. The processing of model input data was pointed out as a significant part of this study due to the high sensitivity of input data on simulation results. In order to validate the simulation results, the comparison of the simulated and measured values of air pollution at six local and two national measurement stations is given.

2. MODEL

The Gauss Industrial Source Complex–Short Term (hereafter abbreviated as ISCST3) is used to simulate pollution dispersion based on basic Gauss distribution for point sources in order to assess stationary ground pollution concentration for any given instant in time. The model takes into account the complex terrain configuration (defined by a rectangular receptor mesh), which directly affects the accuracy of the results. The Gauss model calculates the ground pollution values at every predefined terrain position (receptor), for any given meteorological data. This enables the monitoring of the influence of any particular source of pollution concentration at any given predefined receptor in the receptor network. Plume formation (raising, transport, diffusion and precipitation) is under the direct influence of hourly defined meteorological data given as the input as the result of *in situ* measurements or predicted values. The origin of the relative coordinate system, for every pollution source and every hour of calculation, is situated on the ground at the bottom of the source location and the absolute coordinates of the receptor network are then recalculated. For a given pollution point source the ground pollution concentration values at the distance x (meters) downstream and y (meters) sideways from the source (Figure 1) is given as [4]:

$$\lambda = \frac{Q K V D}{2 \pi U_s \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \quad (1)$$



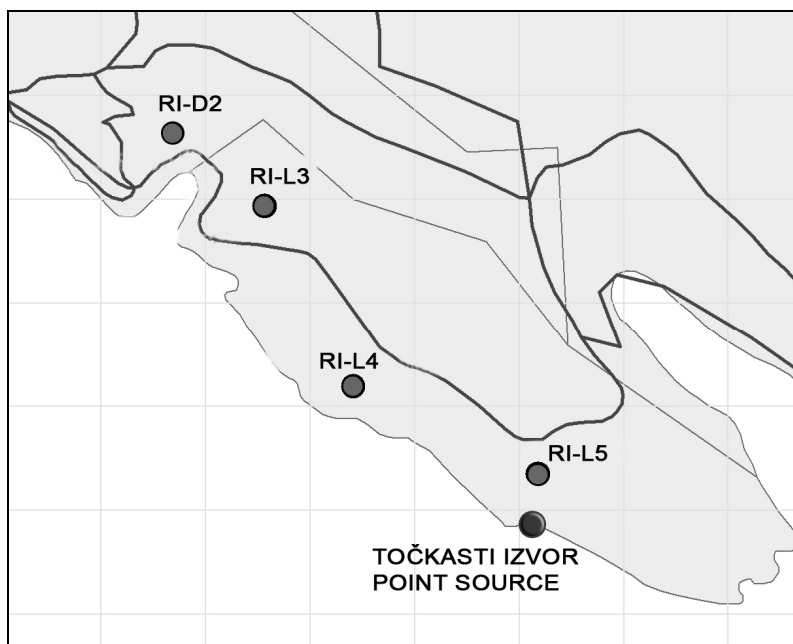
Slika 1 Prikaz osnovnih veličina Gaussova modela perjanice dima
 Figure 1 Gaussian plume model basic variables description

3. DOMENA ZA MODELIRANJE

Korištenje modela disperzije za kontinuirano procjenjivanje prizemnih koncentracija onečišćujućih tvari iz pojedinog izvora onečišćenja zahtijeva odabir domene za modeliranje. Naime, potrebno je odrediti veličinu domene i gustoću receptorskih točaka za koje će se procijeniti prizemne koncentracije onečišćujuće tvari. Optimalna veličina domene izabire se tako da se korištenjem izmjerenih emisija onečišćujućih tvari iz izvora, te meteoroloških podataka iz najbliže meteorološke postaje, izvrše simulacije za niz prethodnih godina i utvrdi područje unutar kojeg su prizemne koncentracije iznad godišnjih graničnih vrijednosti za zaštitu ljudi, ekosustava i vegetacije [5]. Domenom je također potrebno obuhvatiti lokacije mjernih postaja za kakvoću zraka radi validacije i verifikacije modela te radi utvrđivanja udjela pojedinog izvora onečišćenja u ukupnoj izmjerenoj razini onečišćenosti. Zatim je potrebno nad odabranim područjem definirati receptorsku mrežu. Horizontalna mrežna udaljenost receptora ili horizontalna rezolucija receptorske mreže utječe na točnost procjene koncentracija onečišćujućih tvari. Stoga je potrebno koristiti digitalne topografske karte horizontalnih rezolucija 100 do 300 m. Za provedenu simulaciju distribucije onečišćenja korišten je teren opisan ortogonalnom mrežom veličine $113 \times 121 = 13673$ receptorskih čvorova međusobno udaljenih 100 metara čime je predočen teren površine $136,73 \text{ km}^2$. Domena pokriva: Riječki zaljev, otok Krk i okolni kompleksni teren, a postavljen je centralno s obzirom na izabrani izvor onečišćenja uključujući i dio urbanog područja grada Rijeke.

3. MODELLING DOMAIN

The first step in the continuous assessment of the pollution immision from a given source is the domain definition for pollution simulation. The domain size and the mesh size of the receptors grid need to be defined in order to perform ground concentration pollution simulation. The optimal domain size is based on an analysis of the results of several previous annual simulations obtained from the measured emissions and the meteorological data from nearby meteorological measurement stations. The initial domain is delineated as to contain ground concentrations that are above the yearly permitted values designated for the protection of human health, the environment and vegetation [5]. The location of the air quality measurement stations should be inside the simulation domain in order to validate the model and to estimate how much a pollution source contributes to the total measured level of pollution. The definition of the receptor grid for the optimized domain follows. The horizontal grid distance between receptors, i.e. the horizontal resolution, influences the accuracy of predicted pollutant concentrations. Hence, high resolution (100-300m) digital elevated models of topography are used. A terrain grid with 113×121 orthogonal receptor mesh points is used for dispersion simulation, representing 100m of horizontal resolution. The total area of the terrain is $136,73 \text{ km}^2$. The terrain is situated centrally in relation to the location of the pollution source and covers Rijeka's bay with urban areas, Krk Island and the surrounding continental complex topography.



Slika 2 Dio domene za modeliranje s položajem izvora onečišćenja i mjernim stanicama za kakvoću zraka (RI-D2, RI-L3, RI-L4, RI-L5)

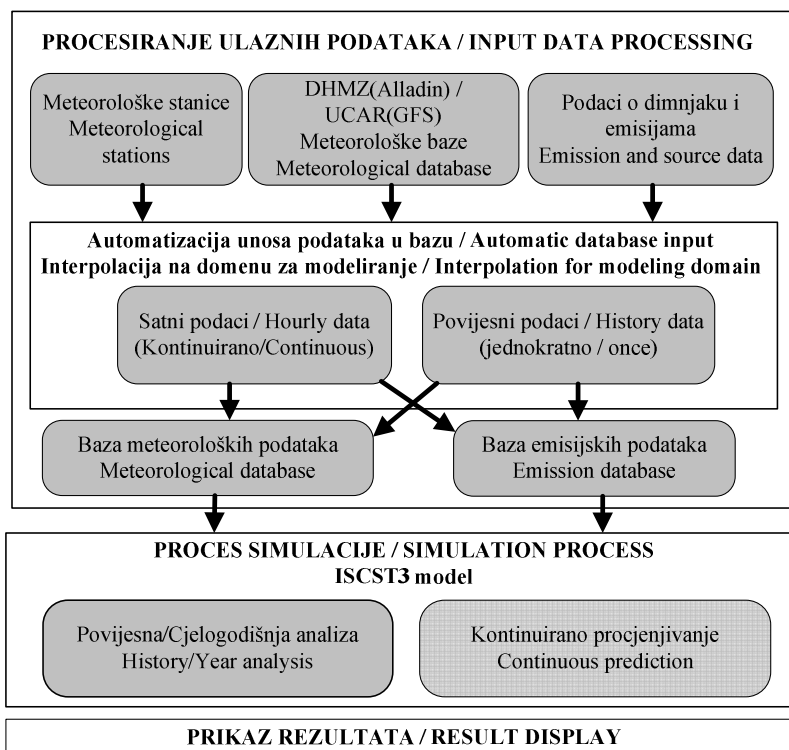
Figure 2 Part of the modelling domain with the location of the point source and the air quality stations (RI-D2,RI-L3,RI-L4,RI-L5)

4. SUSTAV ZA PROCESIRANJE ULAZNIH PODATAKA

Ulazni podaci za ISCST3 model uključuju receptorsku mrežu, podatke o emisijskim izvorima (prikazani u Tablici 1) i meteorološke parametre. Meteorološki podaci koje zahtijeva ISCST3 model uključuju brzinu i smjer vjetrova, temperaturu zraka, visinu miješanja i klasu stabilnosti atmosfere koja se određuje SRDT metodom na temelju vertikalnoga gradijenta temperature i Sunčeva zračenja. Kontinuirano procjenjivanje prizemnih koncentracija onečišćenja moguće je uspostaviti korištenjem višestrukih izvora ulaznih podataka izradom automatiziranih računalnih postupaka za interpolaciju podataka na domenu za modeliranje (Slika 3). Prikupljeni podaci smještaju se u emisijsku i meteorološku bazu podataka u svrhu povijesnih i cjelogodišnjih analiza ili za istodobno procjenjivanje razina prizemne onečišćenosti. Neophodno potrebni meteorološki podaci prikupljaju se iz najbližih meteoroloških postaja ili se koriste podaci dobiveni regionalnim mezoskalnim meteorološkim modelima (Alladin (DHMZ), MM5/WRF (EPA)) te iz javno dostupnih baza (NCEP/UCAR/DSS) koje su relativno grube rezolucije te ih je potrebno interpolirati na lokaciju izvora onečišćenja.

4. INPUT DATA PROCESSING SYSTEM

The ISCST3 model input data consists of receptor grid, source emission values and meteorology parameters. Source emission data are fully presented in Table 1. Meteorological data that are required for the ISCST3 model usage consists of wind speed and wind direction, ambient temperature, mixing height and atmospheric stability class calculated from the vertical temperature gradient and solar radiation. Continuous prediction of pollution immersion uses multiple input data sources. Meteorological input data are collected and interpolated on the modeling domain using automated programming scripts (Figure 3). In such a way a meteorological and emission database is built and the data is used for historical and annual analysis as well as for on-demand and instantaneous ground level pollutant concentration measurement. There are three ways to obtain meteorological data. First by using nearby meteorological measurement stations, secondly by using prognostic regional meteorological models such as the Aladdin (METEO/DHMZ), MM5/WRF (EPA) and thirdly by using the free NCEP (US National center for environmental protection) web database of relatively coarse resolution, and then applying it to the emission source location.



Slika 3 Sustav za pripremu, proračun i vizualizaciju prizemnih koncentracija onečišćenja iz industrijskih izvora onečišćenja
 Figure 3 System for pre-processing, simulation and visualization of immisions from polluted industrial sources

5. ANALIZA I PRIKAZ REZULTATA

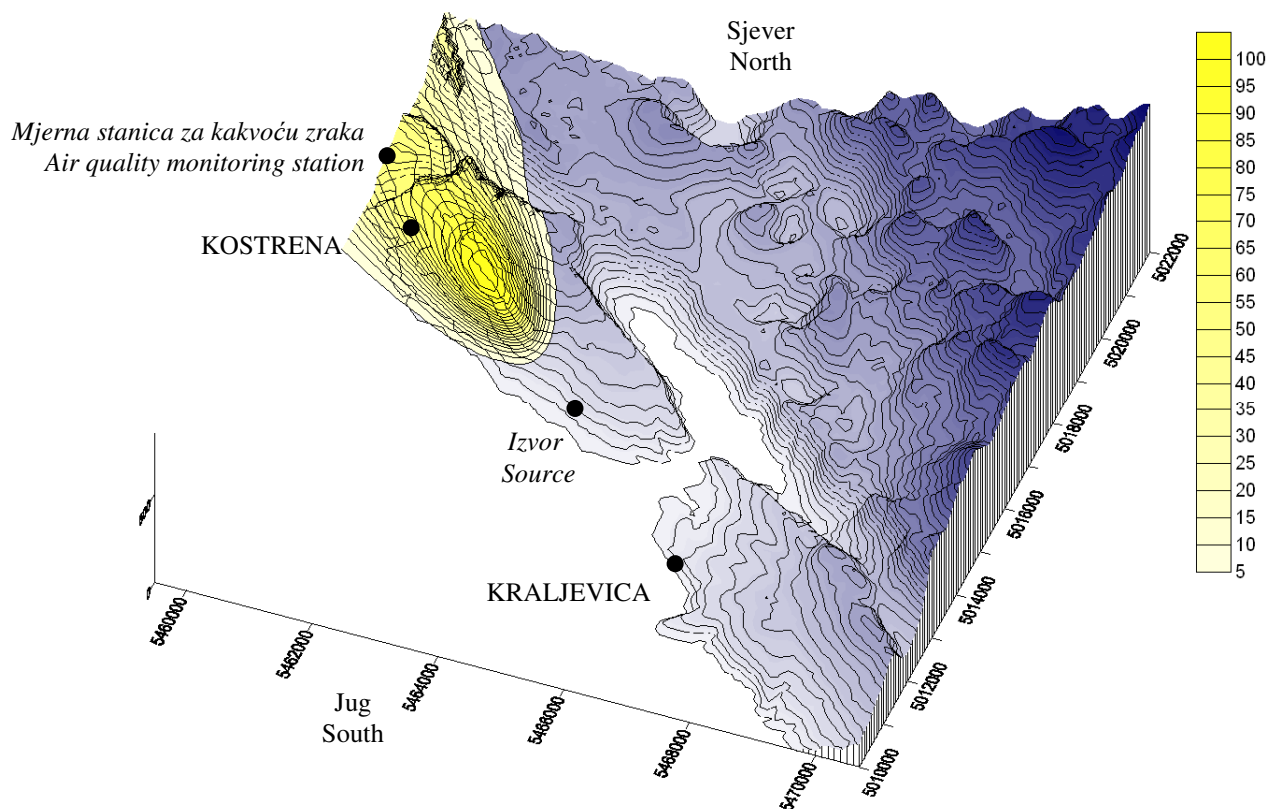
Evaluacija je provedena na razini cjelogodišnjih prikupljenih emisija za 2006. godinu za odabrani industrijski točkasti izvor onečišćenja. Nedostatak cjelovitih podataka iz mjernih postaja za kakvoću zraka (RI-L3, RI-L4 i RI-L5) ograničio je evaluaciju na jedinu mjernu postaju za koju postoje cjelogodišnji podaci, a time i povećao potrebu za primjenom modela disperzije. Time je suženo područje smjera vjetra na smjer od izvora prema mjernoj postaji RI-D2 (Slika 2) od 280 do 320° (ZSZ-SZ-SZS). Povremena aktivnost izvora onečišćenja dodatno je suzila broj simulacija te je prikaza radi izabran datum 9. srpnja 2006. u 19 sati. Simulirana je disperzija SO₂ (uzima se da je za ovu lokalnu studiju SO₂ nereaktivan) iz izvora za određeni vremenski trenutak, a na temelju realnih parametara navedenih u Tablici 1. Za odabrani vremenski trenutak izmjerena je satna koncentracija SO₂ od 112,2 µg/m³ na državnoj stanici za mjerenje kakvoće zraka Rijeka-2 (RI-D2). Procijenjena prizemna koncentracija na lokaciji mjerne postaje iznosi 45 µg/m³. Usporedba ISCST3 modelom procijenjenih prizemnih koncentracija (Slika 4) i mjerenih vrijednosti ukazuje na 40%-tni doprinos ukupnom onečišćenju.

5. MODEL OUTPUT AND RESULT ANALYSIS

A whole-year simulation evaluation is done for a chosen industrial point source using the 2006 dataset. Evaluation has been constrained due to incomplete data from air quality measurement stations (RI-L3, RI-L4 and RI-L5), hence using only one measurement station that has a complete 2006 dataset (RI-D2). Evaluation is further narrowed due to limited wind direction range influenced by source to measurement station line-of-sight (WNW-NW-NWN) (280 to 320°) (Figure 2). Correlating non-continuous activity of industrial point sources with 2006 dataset evaluation finally set a number of possible simulations to only a few, among which the 9th of July 2006 at 19⁰⁰ has been adopted for result presentation. Dispersion of SO₂ is simulated (considered to be non-reactive for this local simulation) based on real parameters from Table 1. For a chosen date, SO₂ hourly concentrations of 112,2 µg/m³ has been measured at the national measurement station for air quality „Rijeka-2“ (RI-D2). The predicted ground concentrations using ISCST3 at the location of RI-D2 is 45 µg/m³. Comparing predicted ground concentration (Figure 4) and measured concentration for a given date shows 40% industrial source contribution to overall pollution concentration at a specified location.

Naziv veličine / Parameter name	Vrijednost / Value	Jedinica / Unit
Vrijeme / Time	09.07.2006. 19:00	-
Podaci o izvoru i emisiji onečišćenja / Emission and point source data		
Visina dimnjaka / Stack height	252	m
Promjer dimnjaka / Stack diameter	4.5	m
Temperatura ispušnih plinova / Stack gas temperature	443.15	K
Emisija onečišćujuće tvari / Source emission	273.93	g SO ₂ s ⁻¹
Brzina ispušnih plinova / Stack gas velocity	9.5	m/s
Meteorološki podaci / Meteorological data		
Brzina vjetrova / Wind speed	1.7	m/s
Smjer vjetrova / Wind direction	315	°
Solarna radijacija / Solar radiation	100	W/m ²
Vertikalni temperaturni gradijent / Vertical temperature gradient	-1	K/m
Visina miješanja / Mixing height	1275,67	m

Tablica 1. Parametri izvora onečišćenja
Table 1. Pollution source parameters



Slika 4. Konturni prikaz površinske koncentracije SO₂ (µg/m³) za odabranu domenu i vrijeme (9.7.2006. 19:00)
Figure 4. 3D contour plot of SO₂ ground concentrations (µg/m³) on the 9th June 2006. at 19h

6. ZAKLJUČAK

Visoke koncentracije zračnih onečišćavala snažno utječu na ekosustav i ljudsko zdravlje. S obzirom na sve veći gospodarski i populacijski rast u svijetu evidentan je godišnji porast onečišćenja zraka te je stoga opravdano istraživanje u području modeliranja kakvoće zraka. Pored toga, zakoni propisuju i reguliraju korištenje referentnih trodimenzionalnih matematičkih modela u svrhu procjenjivanja razina onečišćenosti te kao preliminarnog dijela studija o utjecajima na okoliš planiranih novih prometnica ili industrijskih kompleksa.

U radu je prikazan i primijenjen složeni računalni model disperzije onečišćenja iz industrijskih izvora. Sustav kontinuiranog procjenjivanja prizemnih koncentracija onečišćenja unutar kojega je implementiran računalni model ISCST3 omogućuje pravodobno otkrivanje izvora-uzročnika prekograničnih prizemnih koncentracija, njegova udjela u prekoračenju te utvrđivanje prekoračenja zakonskih vrijednosti na području gdje ne postoje mjerne stanice za kakvoću zraka. Na taj način moguće je pravodobno reagirati puštanjem kvalitetnijih goriva u industrijski proces ili smanjiti kapacitet rada kako bi se izbjegla zakonski propisana ograničenja te time utjecalo na zaštitu ljudskog zdravlja, ekosustava i vegetacije. Zakonski definirane donje i gornje granice procjenjivanja [5] omogućuju korištenje računalnog modela kako bi se utvrdila potreba za instalacijom dodatnih mjernih stanica na mjestima prekoračenja granica procjenjivanja. Prikazani sustav procjenjivanja moguće je jednostavno prilagoditi za višednevno prognoziranje prizemnih koncentracija onečišćenja na temelju projiciranih emisija i prognoziranih meteoroloških polja korištenjem regionalnih meteoroloških modela.

7. POPIS OZNAKA

član raspada	D
konstanta pretvorbe	K - m
emisija onečišćujuće tvari	Q - g/m^3
brzina vjetra na izlazu iz dimnjaka	U_s - m/s
vertikalni član	V
horizontalna nizstrujna udaljenosti od središnjice dima	y - m
horizontalna bočna udaljenost od središnjice dima	z - m
koncentracija onečišćenja	λ - $\mu\text{g/m}^3$
st. dev. horizontalne disperzije	σ_y
st. dev. vertikalne disperzije	σ_z

6. CONCLUSION

High concentration of air pollutants strongly affects our ecosystem and human health. Every year we witness a rise in air pollution levels due to persistent industrial and population growth in the world. Air quality modeling is therefore becoming a standardized modeling tool for regulatory pollution level prediction purposes. Moreover, laws exist to designate and regulate the use of referential three dimensional mathematical models as they apply to the analysis of pollution levels and they constitute a preliminary part of environmental studies for the planning of new industrial complexes and road facilities.

This work presents an air pollution dispersion model used to predict immisions from industrial sources. The immision continuous prediction system implements the ISCST3 model to perform early detection of sources that cause excessive ground level pollution concentrations, to compute its fraction in total concentration measured and to determine deviations from the Clean Air Act (CAA) limit values at locations with absence of air quality measurement stations. Moreover, such a system can include air pollution control strategies such as inducing higher quality emergents into industrial processes in order to decrease air pollution levels or such processes can even lead to a reduction in production levels. These steps are aimed at influencing human health, the ecosystem and vegetation. Lower and upper prediction regulatory limits (CAA [5]) define a specific range that delimits the use of standardized mathematical models. In such a way it is possible to determine if a new air quality station is needed at specific locations.

The presented system for prediction is suitable for adjustment to next-day predictions based on projected emissions and prognostic meteorological fields from regional meteorological models.

7. LIST OF SYMBOLS

break up term
conversion constant
source emission
wind speed at stack outlet
vertical term
horizontal downwind coordinate based on plume centerline
horizontal crosswind coordinate based on plume centerline
pollutant concentration
horizontal dispersion st. dev.
vertical dispersion st. dev.

LITERATURA REFERENCES

- [1] ...: *Zakon o zaštiti zraka*, Hrvatska, Narodne novine 178/2004, 2004.
- [2] BOWERS, J.F.; BJORKLUND; J.R.; CHENEY, C.S.: *Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model User's Guide.*, EPA-450/4-79-031, U.S. EPA, 1979.
- [3] *Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models*, EPA-454/B-95-003b, 1992.
- [4] ČARIJA, Z.; MRŠA, Z.; KRANJČEVIĆ, L.: *Određivanje visine industrijskog dimnjaka primjenom genetskog algoritma*, *Strojarstvo*, 48 (5-6) 293-301, Zagreb, 2006.
- [5] ...: *Uredbu ZZZ (NN178/J04.) o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku (NN133/J05.)*, 2005.
- [6] MRŠA, Z.; ČAVRAK, M.: *Modeling of dispersion and diffusion of pollutant from industrial stacks*, *Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, ISBN 953-96243-4-7, Bizovac, 2003.
- [7] MRŠA, Z.; ČARIJA, Z.: *Maximum air pollution simulation using genetic algorithm*, *Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, ISBN 953-96243-4-7, Bizovac, 2003.

Primljeno / Received:

Prihvaćeno / Accepted:

Izvorni znanstveni članak

Original scientific paper

Adresa autora / Authors' address:

Mr. sc. Marko Čavrak, dipl. ing.

Mr. sc. Zoran Čarija, dipl. ing.

Dr. sc. Zoran Mrša, dipl. ing.

Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet

University of Rijeka, Faculty of engineering

Vukovarska 58

HR-51000 RIJEKA, Hrvatska

Sugerirani recenzenti:

Ph.D. Andrej LIPEJ
Turboinštitut, Ljubljana, Slovenija
Rovšnikova 7
1210 Ljubljana
Slovenija
andrej.lipej@turboinstitut.si
tel: 01 241 84 20
fax: 01 241 84 33

prof. dr. sc. Mario Šavar (FSB Zagreb)
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb
HRVATSKA
mario.savar@fsb.hr
tel: (01) 61 68 438
fax: (01) 61 56 940