

UNIVERZITET U BEOGRADU  
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Dušan P. Nikezić

**MATEMATIČKO MODELOVANJE  
RASPROSTIRANJA ZAGAĐUJUĆIH  
MATERIJA U VAZDUHU U OKOLINI  
NUKLEARNIH I INDUSTRIJSKIH  
OBJEKATA**

-doktorska disertacija-

Beograd, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Dušan P. Nikezić

**MATHEMATICAL MODELING OF  
ATMOSPHERIC AIR POLLUTANT  
DISPERSION IN THE ENVIRONMENT OF  
NUCLEAR AND INDUSTRIAL FACILITIES**

-Doctoral Dissertation-

Belgrade, 2016.

MENTORI:

---

Dr Boris Lončar, redovni profesor, Univerzitet u  
Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Slavko Dimović, naučni saradnik, Univerzitet u  
Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča"

ČLANOVI KOMISIJE:

---

Dr Dragan Dramlić, naučni savetnik, Univerzitet u Beogradu,  
Institut za fiziku

---

Dr Aco Janićijević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu,  
Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Dušan Antonović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu,  
Tehnološko-metalurški fakultet

---

Dr Slavko Smiljanić, docent, Univerzitet u Istočnom Sarajevu,  
Tehnološki fakultet, Zvornik

DATUM ODBRANE: \_\_\_\_\_

## **Naslov doktorske disertacije:** Matematičko modelovanje rasprostiranja zagađujućih materija u vazduhu u okolini nuklearnih i industrijskih objekata

### **REZIME**

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je izučavanje uticaja ulaznih podataka na polja koncentracija zagađujućih materija u donjem graničnom sloju atmosfere dobijenih primenom matematičkih modela kao i usložnjavanje matematičkog modela atmosferske disperzije Gausovog tipa, čiji je rezultat generalisan Gausov disperzioni model. Cilj istraživanja u ovom radu je realizacija i primena kompleksnog matematičkog difuzionog modela, koji uzima u obzir složene atmosferske procese u sloju mešanja, kao i razrađena procedura za pripremu ulaznih podataka, koji omogućavaju praćenje rasprostiranja zagađujućih materija u okolini industrijskih i nuklearnih izvora na rastojanjima do 10-20 km, gde su koncentracije zagađujućih materija iz tih izvora obično najveće i gde se dobijaju prve informacije važne za ranu najavu akcidenata i pokretanje kontramera. Pored navedenog cilj je i verifikacija matematičkog modela pisanog u FORTRAN programskom jeziku (NFS-Vinca) preko meteoroloških podataka koji su dobijeni u realnom vremenu, kao i procena rasprostiranja polutanata na osnovu idealizovane situacije sa zadatim vetrom i klasama stabilnosti.

Istraživanja u okviru doktorske disertacije polaze od hipoteze da koncentracije zagađujućih materija koje se emituju u atmosferu iz veštačkih izvora zavise od karakteristika izvora, atmosferskih procesa u donjem graničnom sloju atmosfere, tzv. sloju mešanja, karakteristika tla i fizičko hemijskih karakteristika zagađujućih materija. Kod nuklearnog postrojenja modelovana je koncentracija radioaktivnosti u vazduhu sledećih radionuklida:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ . Kod industrijskog postrojenja određivan je nivo koncentracije  $\text{PM}_{10}$ .

U prvom delu rada, matematičkim modelom su dobijene prosečne godišnje koncentracije aktivnosti u vazduhu, koncentracije suve i vlažne depozicije kao i ukupna godišnja doza koju bi primio hipotetički stanovnik u blizini nuklearnog reaktora. Rezultati modelovanja su upoređeni sa vrednostima koncentracije radioaktivnosti iz IAEA (International Atomic Energy Agency) literature za dati scenario radionuklida. Zbog male razlike u rezultatima, model predstavljen u radu može da se koristi kao osnova za ovu vrstu analize. Izračunato je da maksimalna vrednost

za ukupnu dozu koju bi primio hipotetički stanovnik u okolini nuklearnog reaktora za godinu dana iznosi  $7.3 \mu\text{Sv}$ , što je manje od granične vrednosti koja iznosi  $10 \mu\text{Sv}$ .

U drugom delu ove disertacije proučavan je uticaj letećeg pepela koji se emituje u atmosferu iz termoelektrana „Nikola Tesla“ A i B u Obrenovcu na nivo koncentracije  $\text{PM}_{10}$  na Novom Beogradu. TNTA i TNTB su u blizini Beograda (blizu 2 miliona stanovnika) i zbog toga važno je odrediti koncentraciju zagađenja iz ovih izvora. Primenom matematičkog modela dobijeno je da leteći pepeo iz dimnjaka i pepelišta TNTA i TNTB ne može značajnije da utiče na povećanje koncentracije  $\text{PM}_{10}$  u Beogradu.

**Ključne reči:** zagađujuće čestice, radionuklidi, leteći pepeo, atmosferska disperzija, zračenje, Gausov model, nuklearni reaktor, termoelektrana

**Naučna oblast:** Inženjerstvo zaštite životne sredine

**Uža naučna oblast:** Inženjerstvo zaštite životne sredine

**UDK broj:**

**Doctoral dissertation title:** Mathematical modeling of atmospheric air pollutant dispersion in the environment of nuclear and industrial facilities**ABSTRACT**

The subject of this doctoral dissertation was the influence of the input data on the pollutant concentration in the lower atmospheric boundary layer obtained by mathematical model, which was the result of generalized Gaussian dispersion model. The aim was implementation of complex mathematical diffusion model and development procedures which enable the monitoring of dispersion of pollutants in the environment of industrial and nuclear power plants within 10-20 km, where the concentration of pollutants from these sources is usually the highest, and also for early warning for accidents and countermeasures. In addition is the verification of the mathematical model in FORTRAN programming language (NFS-Vinca) through meteorological data obtained in real time, as well as the evaluation of dispersion of pollutants on the basis of idealized situations specified with wind classes and stability.

Research in this dissertation is based on the hypothesis that the concentrations of pollutants emitted into the atmosphere from artificial sources depend on the characteristics of the sources of atmospheric processes in the lower atmospheric boundary layer, soil characteristics and the physical and chemical characteristics of pollutants. For the nuclear power plant, radioactivity concentration of the following radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  was determined. For thermal power plant the concentration level of  $\text{PM}_{10}$  was measured.

The air pollution dispersion model is based on average annual activity concentration in the air, deposition on soil and field of total annual dose to a hypothetical resident contaminated by air in the vicinity of a nuclear reactor. The results of modeling were compared with values from an IAEA publication for a given scenario of radionuclide emission to the atmospheric boundary layer. Due to small differences in the results, compared to the IAEA recommended model, the model presented in the thesis can be used as a basis for this type of analysis. The maximum value of the total annual dose to a hypothetical resident was  $7.3 \mu\text{Sv}$  which is less than the limit value of  $10 \mu\text{Sv}$ .

The aim of the second part of this dissertation was to estimate if dust/fly ash emitted into the atmosphere from chimneys and the ash disposal sites of the thermal power plants Nikola Tesla A and B in Obrenovac could increase the concentration of  $PM_{10}$  in New Belgrade. TNTA and TNTB are close to Belgrade (population of 2.5 million) and it is important to estimate the amount of the pollution emitted into the atmosphere from these sources. By using NFS-Vinca mathematical model it has been proven that fly ash from TNTA and TNTB does not contribute to the increase in the concentration of  $PM_{10}$  in Belgrade.

**Keywords:** pollutant, radionuclide, fly ash, atmospheric dispersion, radiation, Gaussian model, nuclear reactor, thermal power plant

**Academic Expertise:** Environmental Engineering

**Major in:** Environmental Engineering

**UDC number:**

*Ova doktorska disertacija urađena je u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“.*

*Prijatna mi je dužnost da se zahvalim svima koji su mi pomogli. Mentorima, **dr Borisu Lončaru**, redovnom profesoru TMF-a, u Beogradu, kao i **dr Slavku Dimoviću**, naučnom saradniku INN „Vinča“, zahvaljujem na savetima i usmeravanju tokom izrade esperimenta, i pomoći u pisanju teze.*

*Posebnu zahvalnost dugujem **dr Draganu Dramliću**, naučnom savetniku Instituta za fiziku, kao i **dr Zoranu Gršiću**, na rukovođenju eksperimentalnim delom teze, sugestijama i pomoći u toku obrade rezultata, tokom pisanja publikacija i teze, i na konstantnom podsticanju da se rad finalizuje.*

*Članovima Komisije za ocenu i odbranu doktorske teze, **dr Aci Janićijeviću**, vanrednom profesoru TMF-a, **dr Dušanu Antonoviću**, redovnom profesoru TMF-a i **dr Slavku Smiljaniću**, docentu Tehnološkog fakulteta u Zvorniku, zahvaljujem na korisnim primedbama i savetima u pisanju disertacije.*

*Naposletku, veliku zahvalnost dugujem i **članovima porodice**, na podršci i razumevanju.*



## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DEO.....	7
2.1 Izvori zagađenja vazduha.....	7
2.2 Modelovanje disperzije zagađivača vazduha.....	10
2.3 Matematički modeli atmosferske disperzije .....	13
2.3.1 Disperzioni modeli Gausovog(Gaussian) tipa .....	16
2.3.2 Gausov „Puff“ model.....	21
2.3.3 Lagranžov model .....	25
2.3.4 Ojlerov model .....	25
3. EKSPERIMENTALNI DEO .....	28
3.1 Numerički eksperiment.....	30
3.2 Uticaj nuklearnog reaktora na okolinu.....	31
3.2.1 Depozicija čestica .....	46
3.2.2 Suva depozicija .....	49
3.2.3 Mokra depozicija .....	50
3.2.4 Resuspenzija čestica zagađujuće materije sa tla vetrom.....	52
3.2.5 Značaj hemijskih reakcija za modelovanje kvaliteta vazduha.....	57
3.3 Dozni modul.....	59
3.3.1 Doza inhalacije.....	59
3.3.2 Doza od boravka u oblaku .....	60
3.3.3 Doza od suve i od mokre depozicije .....	60
3.3.4 Ukupna doza .....	61
3.4 Uticaj TNTA i TNTB na zagađenost vazduha u Beogradu .....	61
4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	72

4.1 Procena uticaja reaktora na okolinu .....	72
4.1.1 Polja doza.....	79
4.1.2 Eksperimentalna provera modela.....	80
4.2 Procena uticaja TNTA i TNTB na Beograd .....	87
4.3 Uvod u paralelno programiranje .....	95
5. ZAKLJUČAK.....	99
6. LITERATURA .....	109
7. BIOGRAFIJA .....	114
8. IZJAVA O AUTORSTVU .....	115
9. IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE .....	116
10. IZJAVA O KORIŠĆENJU .....	117

## 1. UVOD

Tokom poslednjih godina prošloga veka sazrela je svest na međunarodnom planu da je jedan od prioriternih problema čovečanstva potreba očuvanja, unapređenja i zaštite životne sredine. Pošto se radi o problemu koji nije ograničen na teritoriju jedne zemlje, logično je što je međunarodna zajednica shvatila opasnost od zagađenja životne sredine na globalnom planu i potrebu za njenom adekvatnom, kvalitetnom i efikasnom zaštitom.

Zbog zagađenja vazduha svake godine umre više od 2 miliona ljudi širom sveta pokazuju rezultati jedne novije studije. Procena je da se u svetu desi oko 470.000 smrtnih slučajeva svake godine samo zbog povećanja koncentracije ozona nastalog dejstvom ljudske civilizacije [1].

Brz industrijski razvoj u nekim regionima sveta je doveo do značajnog povećanja broja i količina hemijskih materija koje se koriste u industriji, ali i do porasta broja industrijskih postrojenja, koja u svom tehnološkom procesu koriste te hemikalije kao sirovine ili pomoćne materije. Ovakvo stanje je za posledicu imalo i povećanje emisije zagađujućih materija u vazduhu, vodi i zemljištu, kao i generisanje velikih količina otpada. Radi preciznog utvrđivanja izvora emisija zagađujućih materija i nivoa njihove odgovornosti za nastale probleme, nekoliko industrijskih zemalja je uspostavilo katastre zagađivača koji su tokom godina prerasli u međunarodno standardizovane sisteme.

Republika Srbija se nalazi u fazi temeljne reforme političkog, društvenog, ekonomskog i pravnog sistema, koji uključuje potpunu harmonizaciju domaćih propisa sa međunarodnim ugovorima i propisima Evropske unije. Pravila i praksa upravljanja zaštitom životne sredine, kao i koristi od uspostavljanja registra za državne organe, preduzeća i javnost, koji su već razvijeni u drugim državama i međunarodnim organizacijama, mogu biti snažan podsticaj za ubrzanje reformi u Srbiji, ali sadrže i dovoljno argumenata na osnovu kojih se može zaključiti da je to dugotrajan proces.

Materije suspendovane u vazduhu, koje se javljaju u dovoljnoj koncentraciji da utiču na zdravlje ljudi i životinja, nanose oštećenja biljkama ili na bilo koji drugi način zagađuju životno okruženje predstavljaju aero-zagađenje. Zagađujuće materije u vazduhu se mogu javiti kao posledica prirodnih procesa ili kao posledica ljudske aktivnosti tj. mogu da budu emitovani iz pokretnih ili nepokretnih izvora, koji su prateći objekti te aktivnosti, kao što su : industrijski kompleksi, energetska postrojenja, elektrane i toplane, saobraćajna sredstva, nuklearna postrojenja, stambene i poslovne zgrade itd. Industrija kao i njeni proizvodi spadaju u najznačajnije veštačke izvore zagađivanja atmosfere. Dimnjaci, ventilacioni ispusti, deponije i skladišta raznog otpadnog materijala i sirovina, izduvni sistemi transportnih sredstava, raspršivači zaštitnih sredstva u poljoprivredi su tipični veštački izvori zagađujućih materija atmosfere. Pored sistematskog zagađivanja atmosfere u rutinskom radu ovi izvori, u akcidentalnim situacijama, mogu da dodatno i nekontrolisano pogoršaju kvalitet vazduha u graničnom sloju atmosfere, u kome se odvija većina ljudskih aktivnosti.

Zagađujuće materije dospevanjem u atmosferu osećaju transport vetrom - advekciju, atmosfersku difuziju, suvo ili mokro taloženje (depoziciju), podizanje sa tla posle taloženja (resuspenziju) i hemijske transformacije. Posledica emisije zagađujućih materija u atmosferu i procesa rasprostiranja kroz atmosferu je njihovo prisustvo u većim ili manjim koncentracijama. Ove koncentracije mogu se u principu dobiti merenjima u monitoring tačkama ili matematičkim modelovanjem.

Veliki broj industrijskih objekata u našoj zemlji, koji emituju zagađujuće materije u atmosferu u rutinskom radu ili koji mogu da emituju značajne količine zagađujućih materija u akcidentalnim situacijama, nemaju odgovarajuće kontrolne sisteme za praćenje rasprostiranja svojih zagađujućih materija kroz granični sloj atmosfere u realnom vremenu. Informacije o njihovom rasprostiranju mogle bi da posluže za brzo smanjivanje emisije i blagovremeno pokretanje ostalih kontra-mera, koje bi dovele do smanjenja štetnih posledica u životnoj sredini.

Objekti u rekonstrukciji ili industrijski objekti čija se izgradnja planira, za koje su predviđene izrade analiza uticaja na životnu sredinu uglavnom koriste neadekvatna meteorološka merenja i matematičke modele. Pomoću njih ne mogu da se urade objektivne procene uticaja na okolinu usled rutinske ili akcidentalne emisije zagađujućih materija u atmosferu. Uspostavljanje

adekvatnih programa meteoroloških merenja na reprezentativnim lokacijama industrijskih izvora zagađujućih materija, uspostavljanje kontrolnih soba u kojima se u realnom vremenu prati rasprostiranje ili se prave prognoze rasprostiranja u budućem vremenu. To bi omogućilo odlaganje izvođenja aktivnosti do povoljnijih vremenskih uslova, koje bi mogle da imaju za posledicu povećane koncentracije zagađujućih materija u graničnom sloju vazduha.

Uspostavljanje monitoring sistema radi kontrole kvaliteta vazduha, koji je najbrži i najopasniji put kontaminacije stanovništva, zasniva se uglavnom na dva pristupa. Prvi pristup zasnovan je na uzimanju uzoraka vazduha, njihovoj analizi u laboratorijama i naknadnom objavljivanju rezultata merenja. Drugi pristup zasniva se na primeni automatskih sistema i dobijanju podataka u realnom vremenu. Broj mernih mesta, u skladu sa odgovarajućim propisima i administrativnim preporukama, određuje se u oba slučaja prema broju stanovnika ili prema veličini kontrolisane oblasti.

Problemi mogu nastati kada se takvi podaci koriste kako bi se kvalitet vazduha opisao kao dobar ili loš na celoj teritoriji. To je čest slučaj u našoj praksi, pa čak i kad se mesta gde su uzeti uzorci nalaze u blizini izvora u industrijskim zonama, u neposrednoj blizini saobraćajnica ili drugih izvora zagađujućih materija.

Da bi se izbegli ovakvi problemi i da bi se adekvatno pratio uticaj na životnu sredinu industrijskih i komunalnih izvora, treba uspostaviti i lokalne monitoring mreže i u zoni njihovog uticaja, a svaka monitoring tačka treba da bude pokrivena i adekvatnim meteorološkim merenjima.

Meteorološki podaci, pored toga što se koriste kao podloge za fizičko-hemijske analize uzoraka iz svake tačke mreže, koriste se u ovom slučaju, što je posebno važno da se istakne, i kao ulazni podatak za matematičke modele, na osnovu kojih je moguće proceniti iz kojih izvora dolazi zagađujuća materija, do tačke gde se koncentracije zagađujuće materije određuju.

Radi upravljanja kvalitetom vazduha na nekoj teritoriji, informacija o koncentracijama zagađujućih materija i potencijalnim izvorima, trebalo bi da je dostupna u realnom vremenu. Na taj način bili bi dostupni podaci o posledicama emisije zagađujućih materija iz industrijskih postrojenja. Tako bi moglo adekvatno i pravovremeno da se zahteva smanjenje emisije

zagađujućih materija iz industrijskih objekata u atmosferu. Planiranje aktivnosti npr. bar 24 časa unapred, na osnovu prognoziranih meteoroloških podataka, je pri tome adekvatan način upravljanja kvalitetom vazduha.

Polja koncentracija zagađujućih materija imaju nepravilan oblik, posebno u naseljenim oblastima, jer pored ostalog, karakteristike tla, prepreke itd. i raspored izvora zagađujućih materija imaju nepravilan raspored. Industrijski izvori su obično grupisani u industrijske zone, mada je uobičajeno da postoje i izolovani industrijski pogoni u svakom gradu. Komunalni izvori su po pravilu nepravilno raspoređeni.

Pošto je osnovni prioritet dobijanje prostorne raspodele koncentracija iz različitih izvora, pri određenim meteorološkim i geografskim uslovima, jasno je da na kontrolisanom prostoru treba raspolagati velikim brojem podataka o koncentracijama zagađujućih materija. Ove informacije mogu se dobiti u principu na dva načina:

- merenjima
- matematičkim modelovanjem

Uzimanje uzoraka vazduha u većem broju kontrolnih tačaka, njihova analiza i merenja koncentracija zahteva značajna finansijska sredstva. Pored toga što je to skupa i tehnički složena metoda, merenjima u nekoj tački dobijaju se podaci koji su reprezentativni samo u toj tački, a nekoliko desetina ili stotina metara dalje u bilo kom smeru, uzimajući u obzir već pomenutu, uobičajenu neravnomernost prostorne raspodele koncentracija i izvora zagađujućih materija, oni bi trebalo da budu dopunjeni novim merenjima ili matematičkim modelovanjem. Ovaj način prikupljanja podataka koristan je za dobijanje nekih opštih informacija o kvalitetu vazduha. To je nedovoljno za objektivne analize u konkretnim situacijama, na osnovu kojih se donose odluke i pokreću kontramere radi smanjivanja posledica po životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Prednost matematičkog modelovanja je to što se podaci dobijaju u velikom broju kontrolnih tačaka. Uz to, ova metoda uzima u obzir emisiju zagađujućih materija (jačinu izvora), fizičke karakteristike izvora i njihovo rasprostiranje kroz granični sloj atmosfere u zavisnosti od meteoroloških uslova i karakteristika tla, njihovih fizičko-hemijskih transformacija, suve i mokre depozicije i resuspenzije sa tla.

Nedostatak metode može da predstavlja priprema velikog broja ulaznih podataka u realnom vremenu, naročito onih koji se odnose na emisiju zagađujućih materija u atmosferu, jer je u praksi relativno mali broj izvora pokriven automatskim monitoringom emisije. Kao ulazni podatak u realnom vremenu, teško je obezbediti emisije iz komunalnih izvora, naročito iz saobraćaja i domaćih ložišta. Problem može da predstavlja i nedostatak adekvatnih ulaznih meteoroloških podataka i prilagođavanje disperzionih parametara lokalnom terenu.

Značajna je i primena matematičkih modela za projektovanje broja i rasporeda kontrolnih tačaka u kojima se merenjima određuju koncentracije zagađujućih materija u okolini industrijskih izvora ili na teritoriji lokalnih uprava, jer je cena takvih monitoring sistema velika. Kombinacija adekvatnih programa meteoroloških merenja, sa primenom matematičkih modela i merenjima koncentracija zagađujućih materija u graničnom sloju atmosfere u skladu je sa EU direktivama (Framework Directive 96-62-EC and its Daughters Directives) u kojima se preporučuje da se u svim situacijama kvalitet vazduha određuje kombinacijom merenja i matematičkog modelovanja.

Merenje koncentracija zagađujućih materija primenom monitoring mreža je u principu tehnički složena i skupa procedura, bilo da se radi o sistemima koji daju informacije u realnom vremenu, bilo da se informacije dobijaju naknadnim analizama uzoraka vazduha u laboratorijama. Sa povećavanjem broja mernih mesta problem se uvećava. Praćenje rasprostiranja zagađujućih materija kroz atmosferu, može se vršiti i primenom matematičkih modela disperzije, kojima se izračunavaju polja njihovih koncentracija. Matematički modeli pored toga što daju informacije o koncentracijama zagađujućih materija na čitavom računskom domenu u obliku polja koncentracija, imaju pogodnost da predstavljaju relativno jeftine alate. Rezultat praćenja rasprostiranja zagađujućih materija kroz atmosferu primenom matematičkih modela su kontinualna prostorna polja koncentracija u realnom vremenu ili u zadatim vremenskim intervalima. Nedostaci matematiških modela, kada se radi o njihovoj praktičnoj primeni za analize kvaliteta vazduha u realnom vremenu ili za naknadne analize, javljaju se uglavnom zbog neadekvatnih ulaznih podataka.

Zbog ograničenja koje imaju obe pomenute metode u svetu se koristi kombinacija modelovanja i merenja u monitoring mrežama, koje su optimizovane u odnosu na broj i raspored

mernih mesta. Zbog navedenih osobina prikazanih metoda za praćenja koncentracija zagađujućih materija i upravljanja kvalitetom vazduha, obe metode treba koristiti kao komplementarne, u skladu sa preporukama međunarodne regulative.



## 2. TEORIJSKI DEO

Vazdušni omotač Zemlje (Zemljina atmosfera, grčki: atmos = para, isparenje; spharia = lopta) je sastavni deo planete. Njegova debljina predstavlja rezultantu između centrifugalne sile pod čijim dejstvom čestice teže da napuste omotač i gravitacione sile pod čijim dejstvom Zemlja privlači čestice. Termin čestica označava sve sastojke atmosfere bez obzira na njihovo agregatno stanje i veličinu, odnosno vazduh čine sledeće vrste čestica: molekuli i atomi različitih gasova i njihovi jonizovani oblici, slobodni radikali, jonizovane čestice metala i nemetala, molekuli vodene pare, kao i agregati raznih molekula, kao što su čestice aerosola i prašine [2].

Disperzija zagađujućih supstancija u atmosferi obavlja se u nižim slojevima atmosfere, do visine koja varira od reda nekoliko desetina metara (u ekstremnim slučajevima), nekoliko stotina metara, pa do više od tri hiljade metara. Deo atmosfere u kome se vrši mešanje zagađujuće supstancije sa okolnim vazduhom naziva se atmosferski granični sloj (Atmospheric Boundary Layer). U atmosferskom graničnom sloju se dešavaju izuzetno kompleksne pojave vezane za prenos količine kretanja, toplote i mase, koje zavise od velikog broja faktora. Kao primer za ovo mogla bi se navesti lokalna turbulentna kretanja i vrtloženja, koja zavise i od konfiguracije terena i reljefa, prenos toplote sunčevim zračenjem u zavisnosti od visine i rasporeda oblaka i vlažnosti, odbijanje i adsorpcija toplote od strane zemljine površine, uticaj vegetacije i drugo.

### 2.1 Izvori zagađenja vazduha

Zagađujuća materija može da dospe u atmosferu iz veštačkih ili prirodnih izvora. U akcidentalnim situacijama iz veštačkih izvora, zagađujuća materija se u atmosferu najčešće izbacuje kroz otvore izvan kontrolisanih ventilacionih sistema (dimnjaka). Zagađujuća materija dospela u donji granični sloj atmosfere iz veštačkih ili iz prirodnih izvora, transportuje se niz vetar u smeru njegovog duvanja i pri tome se na sve strane širi bočno u odnosu na pravac kojim

se transportuje. Za bočno širenje odgovorno je haotično kretanje vazduha, u daljem radu turbulencija. Bočno širenje može biti ograničeno po vertikali, sa donje strane podlogom, a sa gornje strane slojem inverzije.

Turbulencija ima dva uzroka, termički usled zagrevanja vazduha od tla i mehanički usled smicanja vetra po visini, koje zavisi od hrapavosti tla. Turbulencija ima dnevni hod. Leti tokom vedrog dana sa slabim vetrom, ispod  $2 \text{ ms}^{-1}$ , zagrevanje vazduha uz podlogu je najizraženije, a bočno širenje zagađujućih materija i iz visokih i iz niskih izvora je najintenzivnije. Tokom vedrih noći sa slabim vetrom, vazduh uz podlogu se hladi, turbulencija slabi, a sa njom i bočno širenje u odnosu na pravac transporta zagađujuće materije iz izvora pri tlu. Zimi je ovaj dnevni hod slabije izražen. Zbog turbulentne prirode kretanja vazduha u donjem graničnom sloju atmosfere, dolazi do intenzivnog mešanja zagađujuće materije sa okolnim vazduhom, pa se ovaj sloj atmosfere naziva još i sloj mešanja.

Donji granični sloj atmosfere definiše se kao najniži sloj vazduha u kome se oseća termički i mehanički uticaj podloge. Debljina donjeg graničnog sloja atmosfere ima dnevni i sezonski hod i zavisi od geografske širine. Leti, tokom vedrog dana, sa slabim vetrom, oko podne u umerenim geografskim širinama, debljina ovog sloja je najveća, 1500 m - 2000 m. Noću, pri slabom strujanju vazduha, zbog hlađenja vazduha uz tlo, pri tlu se formira novi granični sloj debljine oko 200 m, pri čemu, slojevi vazduha na većim visinama zadržavaju vertikalne profile temperature uspostavljene tokom dana (rezidualni turbulentni sloj). Na taj način, naročito na prelazu dana i noći, donji granični sloj ima složenu vertikalnu strukturu, koja je danju posledica zagrevanja vazduha od podloge i njegovog hlađenja od podloge tokom noći.

Zagađujuća materija, koja se emituje iz visokih izvora, u zavisnosti od razlike njene temperature i temperature okolnog vazduha, vertikalne brzine na izlazu iz izvora, brzine vetra na visini izvora i njenih fizičkih karakteristika, nastavlja da se kreće vertikalno ili zbog vetra, koso naviše do efektivne visine izvora. Da bi se odredili meteorološki parametri koji utiču na ove početne karakteristike kretanja oblaka zagađujuće materije, neophodno je da se uspostave adekvatni programi meteoroloških merenja na reprezentativnim lokacijama izvora emisije.

Na malim rastojanjima od izvora, za bočno širenje zagađujuće materije odgovorna je turbulencija koju oblak zagađujuće materije nosi iz ventilacionih kanala, (odgovorni su

turbulentni vrtlozi koji se formiraju u dimnom kanalu), a na većim rastojanjima turbulencija atmosfere (turbulentni vrtlozi) koji se formiraju u donjem graničnom sloju atmosfere

Visoki dimnjaci trebalo bi da omogućue transport zagađujuće materije na velika rastojanja i njeno razblaženje usled bočnog širenja u odnosu na pravac transporta. Međutim, zbog složene prirode strujanja vazduha u donjem graničnom sloju atmosfere, ovu svoju funkciju dimnjaci ispunjavaju uglavnom noću, a tokom vedrih dana bez vetra, naročito leti, mogu se dostići visoke koncentracije zagađujućih materija i u blizini podnožja, čak i vrlo visokih dimnjaka .

Na koncentracije zagađujuće materije u vazduhu (polje koncentracija), pored pobrojanih razloga utiču još suva i mokra depozicija, resuspenzija zagađujuće materije sa tla vetrom, kao i fizičke i hemijske osobine zagađujuće materije.

Izvori iz kojih se zagađujuće materije emituju u atmosferu u ograničenom vremenskom intervalu, koji je kraći od vremena koje je potrebno zagađujućoj materiji da dođe do određenog posmatrača nazivaju se trenutnim izvorima za tog posmatrača. Jedan izvor istovremeno može da bude proglašen za trenutni ili za kontinualni za različite posmatrače. Za posmatrača koji je u blizini izvora, izvor može da bude tretiran kao kontinualni, dok je za udaljene posmatrače isti izvor trenutni. Na primer, ako emisija zagađujuće materije iz nekog izvora traje 30 minuta, a posmatrač se nalazi na 5 minuta od izvora, onda će se posmatraču taj izvor činiti kao kontinualni u tih oko pola sata (5 minuta je vreme potrebno zagađujućoj materiji da bude preneti vetrom određene brzine do posmatrača). Ako se posmatrač, na primer, nalazi na 3 sata od izvora, izvor koji je emitovao pola sata tom posmatraču izgledaće kao trenutni, jer je za ograničeno vreme od pola sata formirao oblak „puff“ koji će za oko dva i po sata stići do njega. S obzirom da većina akcidenta ima ograničeno trajanje, akcidentalne emisije nazivaju se trenutne, iako kao što je već rečeno, treba voditi računa o udaljenosti posmatrača od takvog izvora.

Kada se desi akcident na nekom nuklearnom objektu, važnu ulogu u brznoj proceni opasnosti i pokretanju ranije projektovanih kontramera, imaju matematički modeli atmosferske disperzije. Atmosfera je najbrži i najopasniji put kontaminacije stanovništva i životne sredine, pa je primena modela, koji daju brze odgovore, utoliko značajnija.

Ranije pripremljeni scenariji akcidenata i merenja jačina doze u vazduhu, kao i meteoroloških podataka u realnom vremenu i njihov prenos do računara u kontrolnoj sobi, omogućavaju donošenje odluka o vrsti kontra mera koje treba pokrenuti i određivanje najugroženijih delova naselja na kojima te mere prvo treba primeniti.

Zbog svojih dobrih osobina, planovi delovanja u akcidentalnim situacijama, u velikoj meri se oslanjaju na rezultate koji se dobijaju iz kontrolnih soba na čijim ekranima se u praktično realnom vremenu prati rasprostiranje radioaktivnosti primenom matematičkih modela atmosferske disperzije.

U Republici Srbiji izdvojena su dva objekta koja mogu značajno da utiču na životnu sredinu i ljude. Prvi objekat je termoelektrana „Nikola Tesla“ kod Obrenovca. Kao izvori zagađenja posmatraju se dimnjaci sa emisijom otpadnih gasova (tačkasti izvori) i otpadne deponije pepela (pepelišta) kao površinski izvori. Drugi objekat je Institut za nuklearne nauke „Vinča“ (JP „Nuklearni objekti Srbije“) gde se osim koncentracije u vazduhu posmatra i ukupna doza koju bi primio hipotetički stanovnik u okolini nuklearnog reaktora.

## **2.2 Modelovanje disperzije zagađivača vazduha**

Modelovanje atmosferske disperzije zagađivača vazduha predstavlja jedan od najizazovnijih naučnih problema sadašnjice i ima za cilj određivanje koncentracije zagađujuće materije, kao što su koncentracije na tlu na određenim tačkama i periodima (što je najčešći slučaj kod operativnih modela), integrisane koncentracije i koncentracije u dimnoj perjanici.

Hemijske supstancije uključujući i toksične materijale imaju različite emisione puteve u atmosferu. Modeli za simulaciju treba da budu što brži, kao i da imaju visoki stepen tačnosti da bi mogli da se koriste u aplikacijama u realnom vremenu (npr. podrška pri odlučivanju). Jedan od glavnih izazova modelovanja atmosferske disperzije je razvijanje modela i softvera koji mogu pružiti precizna numerička predviđanja na kompjuterski efikasan način [3].

Modeli disperzije se zasnivaju na detaljnom poznavanju dinamike fizičkih, hemijskih i dinamičkih procesa fluida u atmosferi. Ovaj tip modela omogućava predviđanje koncentracije zagađujuće materije u ma kojoj tački prostora, u bilo kom vremenskom trenutku, na osnovu poznavanja koncentracije u tački receptora i koncentracije na izvoru zagađenja.

Transport i transformacija zagađivača vazduha u atmosferi se uglavnom odigrava advekcijom (polje vetar). Ostali procesi, kao što su turbulencija, hemijske reakcije, radioaktivni raspad i taloženje mogu znatno uticati pri disperziji toksičnih supstanci. Zbog toga, strategije za razvoj modela zahtevaju interakciju istraživača iz različitih oblasti (npr. meteorologija, geofizika, hemije, IT) [3].

Još jedno važno pitanje u modelovanju disperzije zagađivača vazduha je analiza trajanja hemijskih reakcija i karakteristične udaljenosti na kojoj čestice mogu biti transportovane u toku njihovog životnog veka. Ako emitovane čestice imaju kratak vek trajanja (minuti, sati - obično reaktivne čestice ili aerosoli), onda je njihova putanja kratkog dometa i njihovi efekti će biti koncentrisani na lokalnom nivou (npr. efekat PM čestica). Međutim, zagađivači kao što su  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , koji imaju duži životni vek (sati, dani), imaju šire zone uticaja. U takvim slučajevima potrebno je pristupiti regionalnom ili kontinentalnom modelovanju. Neki zagađivači (npr.  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ) imaju znatno duži životni vek (dani, nedelje) što rezultira transportom na velike udaljenosti, i u tom slučaju se koriste kontinentalni i globalni modeli transporta [3].

Disperzija zagađujuće materije kroz sloj mešanja atmosfere dovodi do njenog prisustva u vazduhu u koncentracijama, koje su ispod ili iznad graničnih vrednosti, na osnovu kojih se određuje kvalitet vazduha. Prisustvo zagađujuće materije u vazduhu, iznad graničnih vrednosti, može posle određenog vremena boravka stanovnika u takvoj sredini, usled disanja ili preko sluzokože i kože, da izazove određene zdravstvene posledice. Usled spiranja padavinama, koncentracija zagađujuće materije se smanjuje u vazduhu, ali se povećava njeno prisustvo na tlu. Suva depozicija usled gravitacionog taloženja i interakcije zagađujuće materije i tla, takođe, doprinosi povećanju njenog prisustva na tlu i smanjenju prisutva u kontaminiranom oblaku. Podizanje sa tla, tzv. resuspenzija ponovo povećava prisustvo zagađujuće materije u vazduhu.

Zbog velikog uticaja zagađenja na živi svet i njegovo okruženje, posle akcidenta na nuklearnom reaktoru u Windscale, Cumbria 1957. godine, Britanska meteorološka služba

započela je istraživanje, koje je trebalo da omogući izračunavanje prostorno vremenske evolucije raspodele koncentracije zagađujućih materija nošenih vetrom. Teorijsko rešenje jednačine difuzije, koje je u to vreme već bilo poznato, nije moglo zadovoljavajuće da opiše prirodu problema, stoga je osnovni zadatak bio formulisanje relacija koje se odnose na disperziju, a koje je moguće iskazati preko meteoroloških podataka koji su dostupni. Prva rešenja ovog problema objavila je Britanska meteorološka služba 1958. godine, a dalja istraživanja su prikazana u radu Paskvila, u kome se preporučuje metod za procenu intenziteta difuzije i u slučajevima kada osmotrene vrednosti meteoroloških veličina (sem temperature vazduha i brzine vetra) nisu dostupne [4]. Paskvil i Giford su problem tretirali statistički, a parametar  $\sigma$  su grafički predstavili preko kompleta sigma krivih [5].

Katastrofa u nuklearnoj elektrani u Černobilu 1986. godine podstakla je razvoj softvera za taj tip akcidenta, kao i za podršku pri brzom donošenju odluka. Potcenjivanje koncentracije ili doze radionuklida može imati ozbiljne zdravstvene posledice [3].

Zahtevi za brzim dobijanjem rezultata o prostorno-vremenskoj raspodeli koncentracija zagađujućih materija u prizemnom sloju atmosfere, uz minimalne troškove, uticali su na propagiranje skraćenih metoda, zasnovanih na jednostavnim matematičkim modelima Gausovog tipa, koji imaju skromne zahteve za ulaznim meteorološkim podacima. Masovna primena personalnih računara devedesetih godina omogućila je širu automatizaciju merenja i dobijanje podataka za matematičke simulacije u praktično realnom vremenu. Određivanje Pasquillovih kategorija stabilnosti izvornim procedurama i subjektivnim osmatranjima oblačnosti, zamenjeno je objektivnim metodama, zasnovanim na direktnom merenju vertikalnih gradijenata temperature vazduha, globalnog Sunčevog zračenja i bilansa zračenja i određivanju u realnom vremenu Richardsonovog broja i Monin-Obukhove dužine.

Polazeći od izračunatih standardnih devijacija, naredni korak je izračunavanje raspodele koncentracije. Nakon izračunatih koncentracija odabrane zagađujuće materije, naredni korak je izračunavanje (parametrizacija) vlažne i suve depozicije, koje direktno zavise od njene koncentracije u vazduhu. Prilikom računanja suve depozicije, uzimaju se u obzir fizičke karakteristike te materije i podloge, koje određuju brzinu depozicije. U slučaju većih čestica, u srazmernosti sa njihovom veličinom (gustinom), dominira gravitaciono taloženje. U slučaju

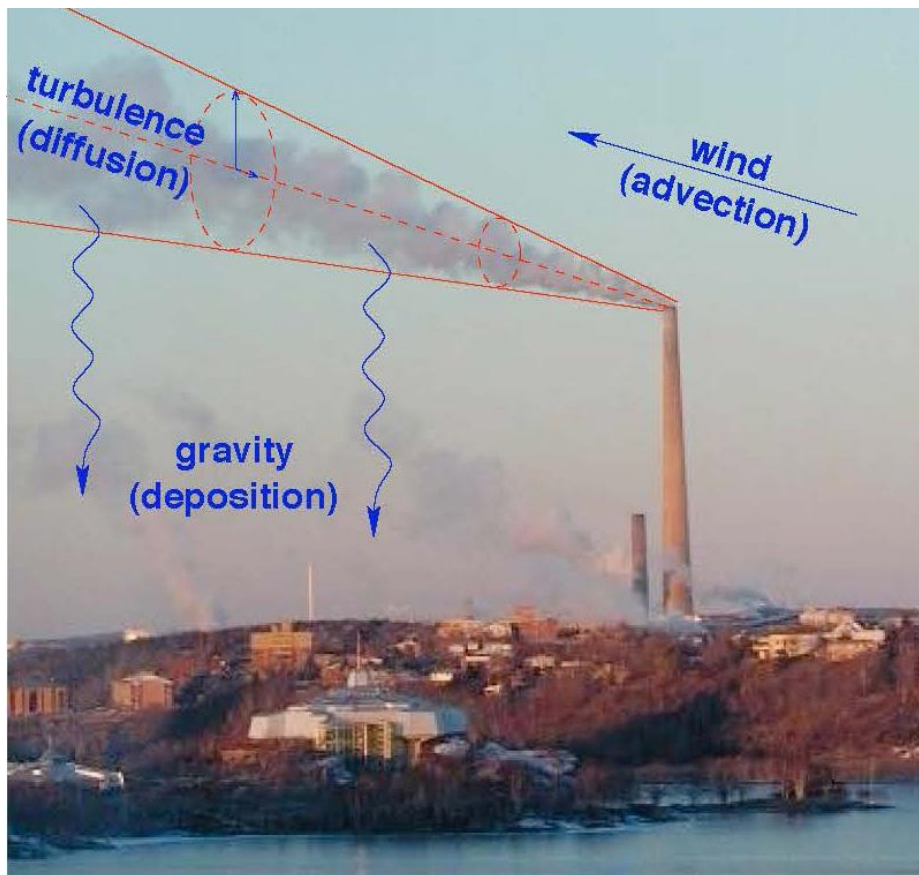
mokre depozicije dominantni proces je spiranje kišom ispod kišnog oblaka, a efikasnost ovog procesa, pored ostalog, zavisi i od fizičko-hemijskih karakteristika zagađujuće materije.

### **2.3 Matematički modeli atmosferske disperzije**

Modelovanje atmosferske disperzije se odnosi na matematički opis transporta zagađivača u atmosferi. Termin disperzija u ovom kontekstu se koristi za opisivanje kombinacije difuzije (zbog „eddy“ vrtloga) i advekcije (zbog vetra) u vazduhu u blizini Zemljine površine.

Matematički modeli atmosferske disperzije zagađujućih supstanci najčešće su zasnovani na parametrizaciji meteoroloških uslova i sistemu diferencijalnih jednačina prenosa mase, koje se zatim rešavaju numerički. U novije vreme, porastom mogućnosti računara i softverskog inženjerstva, matematički modeli sve više dobijaju na značaju i uglavnom dominiraju u savremenom modelovanju atmosferske disperzije zagađujućih supstanci. Potrebno je, međutim, naglasiti da se oni veoma retko razvijaju na čisto teorijskoj osnovi, već se dopunjuju i verifikuju merenjima u prirodi i na fizičkim modelima, pa se može reći da većina današnjih modela ima hibridni karakter.

Koncentracija zagađivača vazduha se može opisati advekciono-difuzionom jednačinom koja predstavlja parcijalnu diferencijalnu jednačinu paraboličnog tipa drugog reda i predstavlja odličan primer interdisciplinarne matematike koja ima direktnu primenu u industriji [6].



*Slika 2.1. Fotografija emisije iz Inco SuperStack (Ontario, Kanada) koja ilustruje tri glavna doprinosa transportu atmosferskog zagađivanja: advekcija od vetra, difuzija od dinamičkih eddy vrtloga (kretanja) i depozicija zbog gravitacionog taloženja.*

Transport jednog zagađivača čija je masena koncentracija (ili gustina) na lokaciji

$$\vec{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \text{ [m] i vremenu } t \in \mathbb{R} \text{ [s]}$$

može biti opisan glatkom funkcijom  $C(\vec{x}, t)$  [kg/m<sup>3</sup>].

Zakon održanja mase za  $C$  u diferencijalnoj formi glasi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \vec{J} = S \tag{2.1}$$



gde  $S(\vec{x}, t)$  [kg/m<sup>3</sup>] predstavlja gustinu izvora, dok  $J(\vec{x}, t)$  [kg/m<sup>2</sup>s] predstavlja maseni fluks zagađujuće supstance kombinovanim efektom difuzije i advekcije [3].

Difuzioni doprinos fluksu proizilazi iz turbulentnog eddy karaktera u atmosferi. Može se pretpostaviti da atmosferska difuzija podržava Fick-ov zakon, u kojem stoji da je difuzioni fluks proporcionalan koncentracionom gradijentu:

$$\vec{J}_D = -K\nabla C$$

Negativni znak garantuje da će kontaminant da se kreće iz regiona sa većom koncentracijom ka regionima niže koncentracije. Difuzioni koeficijent  $K(\vec{x}) = \text{diag}(K_x, K_y, K_z)$  [m<sup>2</sup>/s] predstavlja dijagonalnu matricu turbulentne eddy difuzivnosti i uopšteno je funkcija položaja.

Drugi doprinos fluksu je od proste linearne advekcije vetra koji se može izraziti kao:

$$\vec{J}_A = C\vec{u}$$

gde je  $\vec{u}$  [m/s] brzina vetra.

Ukupan fluks se dobija sabiranjem ova dva doprinosa:

$$\vec{J} = \vec{J}_D + \vec{J}_A = C\vec{u} - K\nabla C$$

Nakon zamene fluksa u jednačinu očuvanja mase (2.1) dobija se trodimenzionalna advekciono-difuziona jednačina [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\vec{u}) = \nabla \cdot (K\nabla C) + S \quad (2.2)$$

gde je  $S$  izvor zagađujuće supstance (suvo i vlažno taloženje i hemijski ili radioaktivni raspad).

Jednačina (2.2) predstavlja promenu koncentracije zagađivača u određenoj tački kao zbir advekcionog fluksa, izvora i difuzionog fluksa. Gravitaciono taloženje predstavlja dodatnu

advekcionu komponentu. Turbulentna difuzija nije prisutna u jednačini (2.2). Turbulencija se dodaje pomoću Reynolds-ove teorije koja brzinu vetra i koncentraciju prikazuje kao zbir njihovih srednjih vrednosti i njihovih fluktuacija (turbulentne perturbacione vrednosti):

$$\vec{u} = \overline{\vec{u}} + \vec{u}'$$

$$c = \overline{c} + c'$$

Posle smene u jednačini (2.2) dobija se konačni oblik advekciono-difuzione jednačine:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + \text{depozicija} + \text{hemijske reakcije} \quad (2.3)$$

gde je leva strana jednaka nuli za stabilna stanja. Prvi član sa desne strane predstavlja promenu koncentracije zbog advekcije, dok druga dva člana predstavljaju turbulentnu difuziju po x i y osi.

### 2.3.1 Disperzioni modeli Gausovog(Gaussian) tipa

Transporta jednačina (2.3) je parcijalno-diferencijalna jednačina koja može da se reši različitim numeričkim metodama. Pri homogenom protoku u stabilnom stanju sa tačkastim izvorom na (0,0,h) sledi:

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

- Konstantna brzina vetra sa visinom ( $u$  ne zavisi od  $z$ )
- Konstantan eddy koeficijent difuzije ( $K$  ne zavisi od  $y$  ili  $z$ )

Definišu se standardne devijacije kao:

$$\sigma_y^2 = \frac{2xK_y}{u}$$

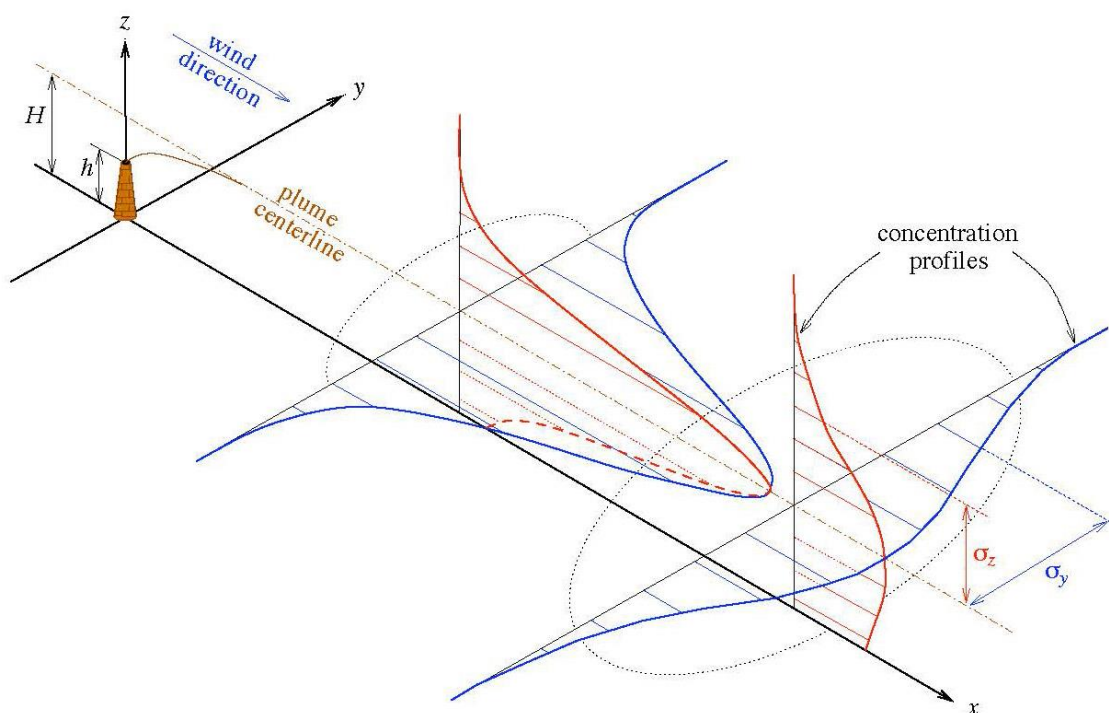
$$\sigma_z^2 = \frac{2xK_z}{u}$$

Nakon analitičkog integrisanja u jednačinu (2.3) dobija se Gausov pravolinijski model dimne perjanice (Gaussian plume model) [6]:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (2.4)$$

gde je:

- h efektivna visina izvora
- c usrednjena koncentracija na određenoj poziciji
- Q jačina izvora (brzina emisije)
- x rastojanje u pravcu vetra
- y rastojanje u pravcu bočnog vetra
- z vertikalno rastojanje
- u usrednjena brzina vetra na visini h
- standardne devijacije  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  opisuju bočni vetar i vertikalno mešanje zagađivača



Slika 2.2. Prikaz Gausovog modela dimne perjanice sa tačkastim izvorom zagađenja.

Ovako pretpostavljen model dimne perjanice daje rezultate koji se dobro slažu sa eksperimentima i pogodan je za primenu, jer se proračuni za sve tačke računске mreže dobijaju na osnovu meteoroloških merenja samo u jednoj tački - na lokaciji izvora.

Efektivna visina izvora se izračunava po formuli:

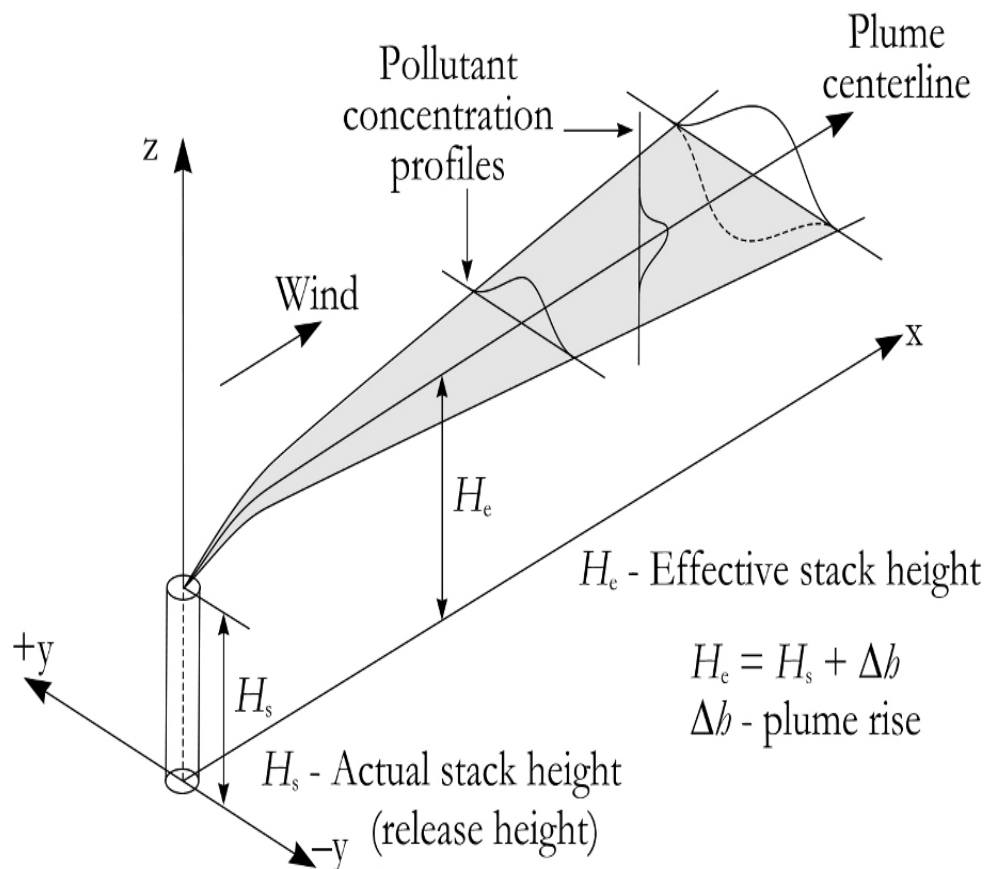
$$H = h_s + \Delta h - h_t$$

gde je:

- $h_s$  fizička visina izvora
- $\Delta h$  podizanje dimne perjanice (plume rise)
- $h_t$  visina terena

Podizanje dimne perjanice i efektivna visina  $H$ , u ovoj doktorskoj disertaciji, računane su primenom Brigsovog modela i stepenim zakonom vetra, na osnovu koga se računa brzina vetra na svetlom otvoru dimnjaka [7] - [10]. Zagađujuća materija iz veštačkih izvora, može da dospe u atmosferu na različite načine (ventilacioni ispusti na zgradama, izduvni ventili motornih vozila, fabrički dimnjaci) i pri tome ona može da bude toplija ili hladnija od okolnog vazduha, da se izbacuje iz izvora sa manjom ili većom izlaznom brzinom. Ponašanje oblaka zagađujuće materije na izlazu iz izvora i u njegovoj blizini, zavisi od potiska koji je posledica razlike gustine zagađujuće materije i okolnog vazduha, od mehaničkog potiska koji potiče od prirodnog i veštačkog provetravanja dimnjaka, kao i od brzine vetra na svetlom otvoru ventilacionih ispusta i turbulentnog stanja graničnog sloja atmosfere (kategorije stabilnosti). Pri svemu tome Brigs je oblake zagađujuće materije (dimne perjanice) podelio u četiri kategorije:

- hladne dimne perjanice u mirnoj atmosferi
- hladne dimne perjanice u vetrovitoj atmosferi (nagnuta perjanica)
- tople dimne perjanice u mirnoj atmosferi
- tople dimne perjanice u vetrovitoj atmosferi (nagnuta perjanica)

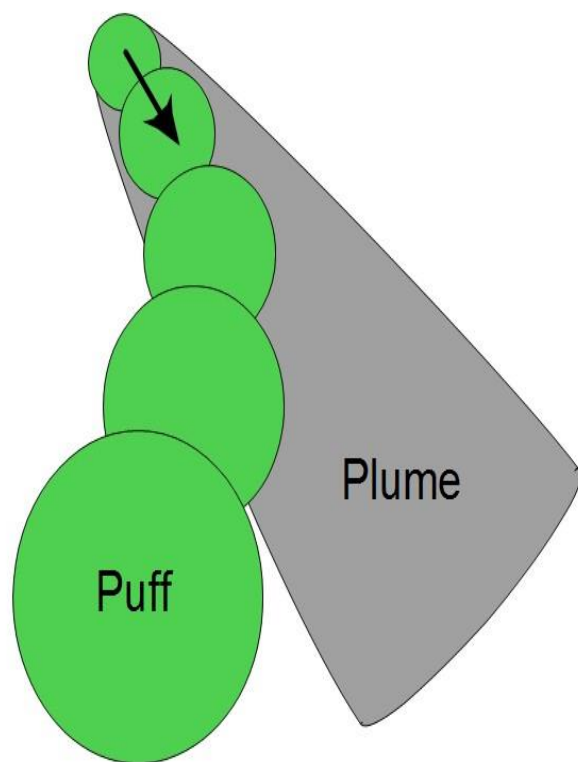


Slika 2.3. Gausov model dimne perjanice sa efektivnom visinom izvora

Gausov model ima izuzetno brzo vreme odziva, jer izračunava samo jednu formulu bez rešavanja diferencijalnih jednačina. Ovaj proračun je skoro trenutni i na kućnim računarima. Međutim obrada meteorološki podataka i parametrizacija turbulencije može znatno povećati vreme proračuna [3]. Gausov pravolinijski model daje slabe rezultate u situacijama sa malim brzinama vetra, gde je trodimenzionalna difuzija značajna.

### 2.3.2 Gausov „Puff“ model

Gausov pravolinijski model dimne perjanice podrazumeva izvor koji je kontinualan u vremenu i konstantnog protoka zagađujuće supstancije. Kada to nije slučaj potrebno je koristiti vremenski zavisnu advekciono-difuzionu jednačinu sa trenutnim oblakom zagađivača puštenim u trenutku  $t=0$ . Ovaj model tretira dimnu perjanicu kao superpoziciju serije sukcesivno emitovanih oblaka(puff), diskretnih zapremina, sa zadatim obimom i izračunava njihove putanje [3].



Slika 2.4. Šematski prikaz Gausovog modela dimne perjanice(plume) i „puff“ modela

Ukupna koncentracija u računskoj tački se dobija superpozicijom koncentracija svakog pojedinačnog „puff“-a. Puff model obuhvata prostorne i vremenske promene pravca vetra sa

prihvatljivim vremenom proračuna. Ovaj model uključuje efekat turbulencije na dva različita načina:

- stohastički nasumičan pristup vezan za putanju „puff“-ova
- kroz devijaciju normalne raspodele unutar svakog oblaka (puff-a)

Ako je ispunjen uslov da je vreme emisije kraće od vremena putovanja oblaka zagađujuće materije/aktivnosti do neke kontrolne tačke ili posmatrača i ako se u obzir uzima i njegova „refleksija“ od podloge, primenjuje se „puff“ model u čijoj osnovi leži sledeća formula [11]:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{\sqrt{(2\pi)^3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \right\} \times \left\{ \exp \left[ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[ - \frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (2.5)$$

gde je:

$ut$	rastojanje od izvora niz vetar koje oblak pređe za vreme $t$
$C(x,y,z,t)$	koncentracija [ $\text{Bqm}^{-3}$ ] u tački čije su koordinate $(x, y, z)$
$q$	količina radioaktivnosti u jednom oblaku ( <i>puff</i> -u) [Bq]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	standardne devijacije raspodele koncentracije u oblaku aktivnosti duž x,y i z ose, respektivno
$u$	srednja brzina vetra na visini centra oblaka [ $\text{ms}^{-1}$ ]
$H$	efektivna visina izvora ili visina centra oblaka [m]

Jasno je da se kontinualna emisija zagađujuće materije iz nekog izvora može prikazati serijom emisija diskretnih zapremina, "puff"-ova, zagađujuće materije u jednakim vremenskim intervalima. Ako se meteorološki podaci mere u tim istim intervalima, onda može da se prati rasprostiranje svake takve diskretne zapremine sa zagađujućom materijom, kao i njihov doprinos koncentracijama zagađujuće materije u tačkama računске mreže. Ako su pri tome meteorološki



uslovi stacionarni i ako se pretpostavi da je  $\sigma_{\text{perjanice}} = \sigma_{\text{puff}}$  treba očekivati da se poklapaju modelovana polja koncentracija primenom oba navedena modela – plume i puff.

U "puff" modelima kontinualni izvori mogu da se predstave emisijom serije, velikog broja, diskretnih zapremina u definisanim vremenskim razmacima. Ove zapremine ("puff"- ovi) su u modelima nošeni niz vetar na određenoj računskoj mreži. Podaci o brzini i pravcu vetra mogu se pri tome dobiti merenjima u jednoj tački na lokaciji izvora, u više tačaka na računskom domenu. Mogu se dobiti i modelovanjem polja vetra ili kombinacijom ovih metoda. Modelom se smuliraju karakteristike emitovanih zapremina, njihovo širenje i doprinosi koncentracijama zagađujuće materije u računskim tačkama tokom transporta niz vetar. Rasprostiranje zagađujuće materije "puff" modelima na taj način dobija se u dva koraka:

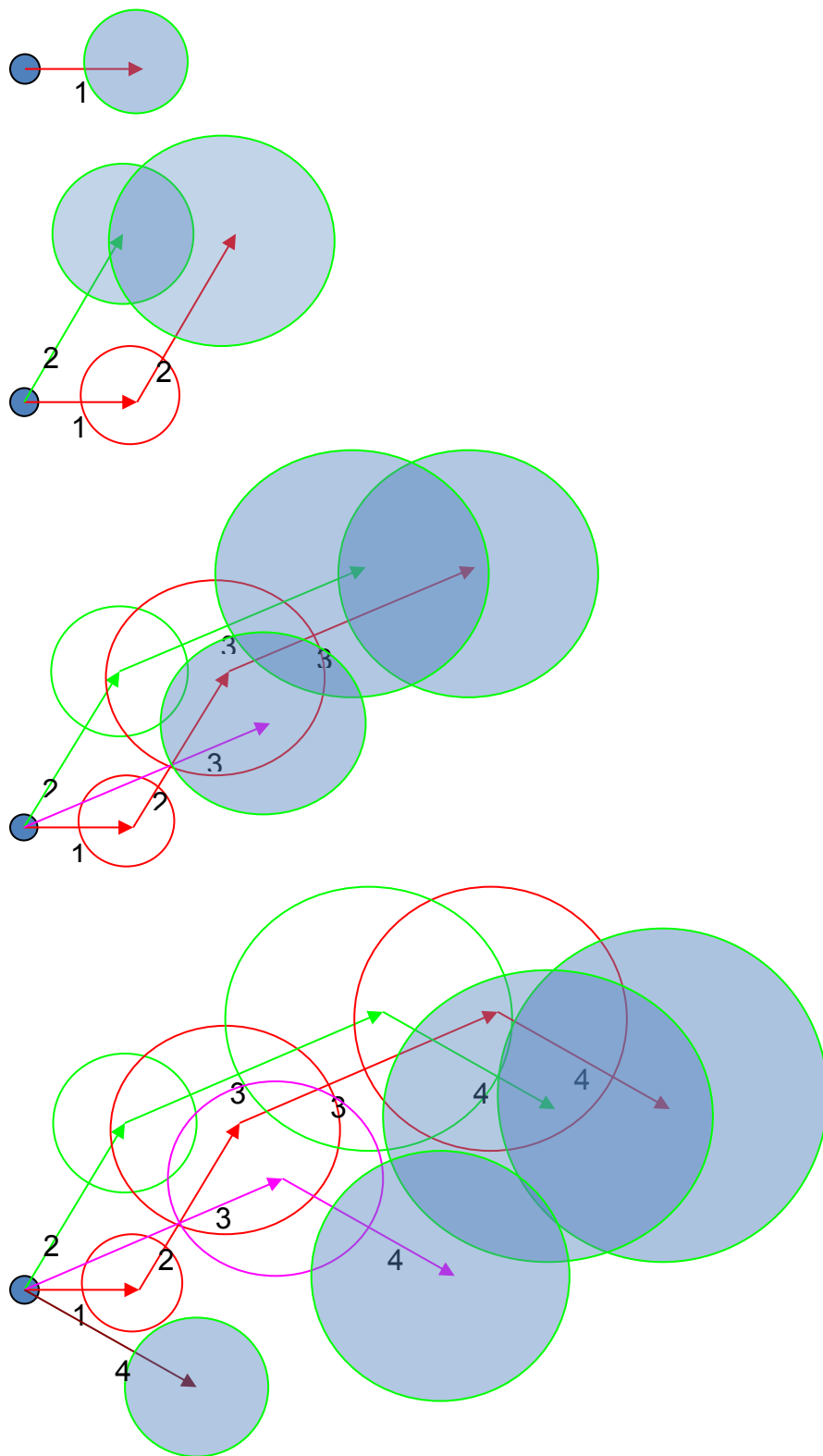
1. prvo se računa advekcija centra mase svake diskretne zapremine u smeru vetra i sa brzinom vetra u koraku vremena  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

2. računa se širenje oblaka od tačke u kojoj se oblak nalazio u trenutku  $t_{i-1}$  do tačke u koju je oblak dospelo u trenutku  $t_i$  vodeći računa da dimenzije oblaka u narednom vremenskom trenutku zavise od:

- standardnih devijacija koncentracije zagađujuće materije u tom oblaku, dimenzija oblaka u prethodnom trenutku  $t_{i-1}$
- rastojanja od položaja centra mase oblaka u prethodnom trenutku, kao i od
- odgovarajuće stabilnosti atmosfere

U uslovima kada su atmosferska stabilnost i brzina vetra promenljivi na kraju vremenskog intervala, parametri difuzije, kao i brzina vetra moraju da se odrede na kraju svakog vremenskog intervala za svaki diskretni oblak posebno.

Na slici 2.5 dat je šematski prikaz rasprostiranja četiri oblačića - "puff"-a. Plavi krugovi označavaju finalni položaj oblaka. Strelicama je obeležen pravac duvanja vetra od prvog do četvrtog vremenskog koraka.



Slika 2.5. Šematski prikaz rasprostiranja četiri "puff"-a

### 2.3.3 Lagranžov model

Ubrzani razvoj kompjuterske tehnologije omogućio je primenu kompleksijih ali preciznijih modela u čijoj osnovi je rešavanje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina kojima se opisuju procesi u graničnom sloju atmosfere lagranžovskog ili ojlerovskog tipa – Lagranžov model (Lagrangian) i Ojlerov model (Eulerian).

Modeli lagranžovskog tipa izračunavaju putanju (trajektoriju) čestice zagađujuće materije deterministički (polje vetra) i stohastično (efekti turbulencije). Ove putanje se izračunavaju preko osnovnih diferencijalnih jednačina. Konačna raspodela velikog broja čestica daje procenu koncentracionog polja. Lagranžov model je pogodan za simulacije kratkog dometa, dok simulacije dugog dometa zahtevaju izračunavanje velikog broja pojedinačnih putanja čime se brzo povećava ukupno vreme proračuna [3]. Putanja jedne čestice je obična diferencijalna jednačina:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} + \vec{v}_1$$

gde je:

- $\vec{r}$  pozicija čestice
- $\vec{v}$  deterministička brzina čestice koja zavisi od advekcije i taloženja
- $\vec{v}_1$  vektor turbulentne fluktuacije vetra

### 2.3.4 Ojlerov model

Osnovna ideja kod Ojlerovog modela je da reši numerički transportnu jednačinu (2.1) u fiksnom koordinatnom okviru. Matematički, to je parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda i njeno rešenje sa odgovarajućim početnim i graničnim uslovima predstavlja prostorno -

vremensko širenje koncentracije zagađivača [3]. Postoji nekoliko numeričkih metoda za rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina. Generalno ove metode se sastoje od dva koraka:

- prostorna diskretizacija
- vremenska integracija izvedenih običnih diferencijalnih jednačina

Prostorna diskretizacija, koja se izvršava na koordinatnoj mreži (grid), svodi parcijalne diferencijalne jednačine na sistem običnih diferencijalnih jednačina zavisnih od jedne vremenske promenljive. Radi ilustrovanja koncepta Ojlerovog modela sledi prikaz metode za dvodimenzionalnu atmosfersku transportu jednačinu:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad u > 0 \quad (2.6)$$

na fizičkom domenu  $\Omega$ .

Data jednačina opisuje pojednostavljenu situacija u kojoj se širenje koncentracije zagađivača odigrava advekcijom (vetar) i turbulentnom difuzijom. Koordinatni sistem se podesi u pravcu vetra za koji se pretpostavlja da je stabilan. Pri derivaciji koriste se homogeni Dirihleovi (Dirichlet) granični uslovi gde se pretpostavlja da je koncentracija na granici fizičkog domena jednaka nuli, što predstavlja dobru aproksimaciju ukoliko su granice daleko od izvora [3].

Zatim se primeni metod konačnih razlika gde su prostorni izvodi diskretizovani na mreži sa jedinstvenim pravougaonikom veličine  $\Delta x \times \Delta y$ . Sledi definisanje konačne centralne razlike:

$$\frac{c_{i+1,j}^n - c_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \quad \text{i} \quad K_x \frac{c_{i+1,j}^n - c_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2}$$

za aproksimaciju  $\frac{\partial}{\partial x}$  i  $K_x \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  u tački  $(x_i, y_j)$ .

Eksplicitne metode se lako primenjuju i mogu se brzo izračunati: korišćenjem vrednosti  $\{c_{i,j}^n\}$  izračunavaju se vrednosti  $\{c_{i,j}^{n+1}\}$ .

Kod implicitnih metoda koriste se vrednosti iz vremenskog nivoa (n+1) za prostornu diskretizaciju.

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

Navedene jednačine kojima se opisuju procesi u atmosferi u sloju mešanja pretočene su u kompjuterski kod. Na osnovu iskustva u rešavanju problema rasprostiranja zagađujućih materija u okolini realnih industrijskih izvora, u ovoj doktorskoj disertaciji izabrani su modeli atmosferske disperzije, koji imaju skromne zahteve za ulaznim meteorološkim podacima.

S obzirom da rutinski industrijski izvori nose rizik da u nekom trenutku prerastu u akcidentalne izvore, kontinualni monitoring njihove okoline trebalo bi da ima mogućnost praćenja oba režima emisije zagađujuće materije i rutinski i akcidentalni. Ovde se problem komplikuje, jer se sa pravolinijskog modela dimne perjanice prelazi na model diskretnih zapremina zagađujuće materije, tzv. "puff" pristup, koji kao ulaz zahteva prostornu raspodelu meteoroloških podataka i njihov češći dotok, bar na jedan minut. Teren pri tome može da bude kompleksan, što usložnjava idealizovane predstave kretanja za ravan teren.

U praksi, koncentracije radionuklida tj. aktivnosti u graničnom sloju atmosfere u zoni uticaja nuklearnih objekata, prate se monitoring mrežom sa ograničenim brojem diskretnih tačaka. Međutim, čak i u ovakvom pristupu problemu određivanja njihovih koncentracija, neophodan je i deo koji proizilazi iz matematičkih modela razne kompleksnosti.

Matematički modeli za kontinualnu i za akcidentalnu emisiju imaju i module za računanje atmosferske stabilnosti, efektivne visine izvora, suve i mokre depozicije, resuspenziju sa tla vetrom. Modeli komuniciraju sa automatskim meteorološkim stanicama u realnom vremenu i sa bazama meteoroloških podataka sa klasičnih i automatskih meteoroloških stanica, a njihov krajnji rezultat su polja doza radioaktivnosti koju u određenom vremenskom intervalu prima realan ili hipotetički stanovnik.

Emisija radionuklida u atmosferu usled akcidenta na nuklearnom postrojenju, može da bude neprekidna u nekom vremenskom intervalu, npr. usled požara na instalacijama ili može da bude trenutna, npr. usled eksplozije. U matematičkim modelima i izvori iz kojih se zagađujuće

materije neprekidno emituju u atmosferu u ograničenom vremenskom intervalu, koji je kraći od vremena koje je potrebno zagađujućoj materiji da dođe do određene tačke u prostoru, smatraju se trenutnim izvorima. Jedan izvor istovremeno može da bude proglašen za trenutni ili za kontinualni za različite tačke u prostoru. Za tačke koje su u blizini izvora izvor može da bude tretiran kao kontinualni, dok je za udaljene tačke taj isti izvor trenutni. Na primer, ako emisija zagađujuće materije iz nekog izvora traje 30 minuta, a tačka se nalazi na 5 minuta od izvora, onda će se posmatrač u toj tački taj izvor činiti kao kontinualni u tih oko pola sata, (jer će zagađujuća materija, radioaktivnost da bude preneti vetrom određene brzine do posmatrača za 5 minuta). Ako se posmatrač, na primer, nalazi na 3 sata od izvora, izvor koji je emitovao pola sata tom posmatraču izgledaće kao trenutni, jer je za ograničeno vreme od pola sata formirao oblak „puff“ koji će za oko dva i po sata stići do tačke u kojoj se nalazi. Obzirom da većina akcidenta ima ograničeno trajanje, akcidentalne emisije često se nazivaju trenutnim iako, kao što je već rečeno, treba voditi računa o udaljenosti posmatrane tačke od takvog izvora.

Složena priroda kretanja vazduha u sloju mešanja, koja ima svoju vertikalnu strukturu zahteva osetljive meteorološke instrumente za merenje turbulencije, koji se postavljaju na meteorološke stubove ili se koriste akustički ili laserski radari (sodari i lidari).

Koncentracija zagađujuće materije smanjuje se od izvora niz vetar zbog podizanja zagađujuće materije do efektivne visine izvora, zbog atmosferske disperzije, zbog suve i mokre depozicije i najzad zbog razvlačenja dimne perjanice vetrom. Posledice od rasprostiranja zagađujuće materije kroz donji granični sloj atmosfere, koja predstavlja najbrži i najopasniji put kontaminacije, iskazuju se dozom koju prima hipotetički ili realan stanovnik na osnovu koje se pokreću ranije projektovane kontra-mere.

Zbog potrebe za brzim dobijanjem informacija u akcidentalnim situacijama, kada se odluke o pokretanju kontra-mera donose u roku od nekoliko minuta, matematički model se puni meteorološkim podacima u realnom vremenu – model i akvizicija podataka čine jedinstven sistem.

### 3.1 Numerički eksperiment

Generalisani matematički model disperzije je matematički model koji ima module za rutinsku i akcidentalnu emisiju i module za računanje atmosferske stabilnosti, efektivne visine izvora, suve i mokre depozicije, resuspenzije sa tla vetrom i koji komunicira sa ulaznim podacima u realnom vremenu. Oni se, takođe, mere u realnom vremenu i uzimaju se u obzir karakteristike terena i zagađujuće materije i krajnji rezultat je kada se radi o nuklearnim izvorima, doza radioaktivnosti koju u određenom vremenskom intervalu prima realan ili hipotetički stanovnik.

Procedura za određivanje koncentracija (realna emisija) ili disperzionih faktora (jedinična emisija) za kontinualne ili diskretne emisije, primenom modela Gausovog tipa, ima generalno sledeće korake:

Za izabranu lokaciju i tip emisije bira se odgovarajući model pri čemu se uzima u obzir konfiguracija i hrapavost terena i karakteristike izvora. Koristeći odgovarajuća meteorološka merenja i osmatranja određuju se klase stabilnosti (turbulencije) za svaki vremenski interval. Merenjima ili matematikim modelovanjem, u praksi najčešće pomoću stepenog zakona vetra na osnovu merenja na drugim visinama određuje se brzina vetra na zadatim visinama (na fizičkoj i efektivnoj visini izvora). Zatim se, određuje efektivna visina izvora, standardne devijacije i koncentracije ili disperzioni faktori (koeficijenti razblaženja). Sledi korekcija proračuna u odnosu na:

- vreme usrednjavanja
- hemijske transformacije
- suhu depoziciju
- mokru depoziciju
- resuspenziju sa tla

U disertaciji će biti prikazana dva numerička eksperimenta sa matematičkim modelovanjem. Prvi je vezan za primenu disperzionog modela zagađenja vazduha čime su



dobijene prosečne godišnje koncentracije aktivnosti u vazduhu, ukupna godišnja depozicija aktivnosti na tlu i ukupna doza koju bi primio hipotetički stanovnik u okolini nuklearnog reaktora. Numerički eksperiment predstavlja zoniranje okoline nuklearnog reaktora „RA“ u JP „NOS“ na osnovu jedinične emisije pasivne supstance. Dat je algoritam za izračunavanje unutrašnje i spoljašnje doze koji predstavlja sastavni deo matematičkog modela atmosferske disperzije. Rezultati modelovanja su upoređeni sa vrednostima iz IAEA publikacije za zadati scenario emisije radionuklida u atmosferskom graničnom sloju. Zbog male razlike u dobijenim rezultatima, u odnosu na IAEA preporučeni model, model predstavljen u radu - „NFS-Vinca“ može se koristiti kao osnova za ovu vrstu analize.

Drugi numerički eksperiment daje prikaz modelovanja koncentracije pepela u vazduhu iz termoelektrana TNTA i TNTB kod Obrenovca i uticaj na zagađenost vazduha u Beogradu.

### **3.2 Uticaj nuklearnog reaktora na okolinu**

U toku normalnog rada nuklearnog reaktora mogu se javiti povišene doze radioaktivnosti koje bi eventualno imale negativan uticaj na potencijalnog stanovnika u blizini reaktora. Cilj istraživanja je da se proceni maksimalna vrednost ukupne godišnje doze koju bi primio hipotetički stanovnik u blizini nuklearnog reaktora pri normalnom radu i uporediti je sa graničnom vrednošću koja iznosi  $10 \mu\text{Sv}$  [12]. Na kraju sledi prikaz algoritma za izračunavanje unutrašnje i spoljašnje doze koji predstavlja sastavni deo matematičkog modela atmosferske disperzije.

Kod nuklearnih i industrijskih objekata uvek se koriste dva modela atmosferske disperzije, jedan za rutinsku kontrolu, a drugi za akcidentalne situacije. Kada se desi akcidentalna emisija radioaktivnosti u atmosferu, osnovni ulazni podatak za matematički model je tip emisije, kontinualni (požar ili neki drugi razlog) ili trenutni (eksplozija). Kontinualna emisija za udaljene oblasti može da bude modelovana kao trenutna emisija. Za kontinualni tip emisije ulazni podatak za model, koji se odnosi na izvor je efektivna visina izvora, visina do koje se podiže perjanica radioaktivnosti i jačina izvora (brzina emisije). Ako se ova vrsta emisije

dešava na ventilacionim ispuštima, podaci iz tehničke dokumentacije o ventilaciji, mogu se iskoristiti u modulima za proračun efektivne visine izvora.

Da li je izvor pri tome "hladan" (temperatura emitovanih gasova na izlazu iz ventilacije je približna temperaturi vazduha na svetlom otvoru) ili je "vruć", određuje se iz podatka o temperaturi emitovanih gasova i ambijentalne temperature. Jačina izvora je još jedan važan ulazni podatak. Za emisije na ventilacionim ispuštima ona bi mogla da bude rešena kontinualnim meračima jačine izvora koji su postavljeni na izlazu iz ventilacija, ali bi pri tome trebalo imati i podatak o vrsti radionuklida koji se ispuštaju u atmosferu.

Otvoreni požari su, sa tačke gledišta modelovanja teži slučaj. Matematički model treba da ima modul za ovakve scenarije akcidenata. Kada su u pitanju otvoreni požari, problem se komplikuje zbog nepoznavanja fizičkih karakteristika izvora, veličina dijametra površine zahvaćene požarom, verikalne brzine gasova iz izvora, jačine izvora i vrste radionuklida koji se pri tome oslobađaju u granični sloj atmosfere. Matematički model pri svemu tome očekuje koordinate akcidenta.

Trenutna, kratkotrajna emisija može da se desi i na ventilacionom ispustu, ali teži slučaj sa stanovišta matematičkog modeliranja je trenutna emisija usled eksplozije bilo gde na nuklearnom objektu. Da bi se matematički modeli mogli koristiti i u ovim situacijama trebalo bi da imaju ulazni podatak o mestu akcidenta, veličini i geometriji inicijalnog oblaka tj. "puff"-a, vrsti oslobođenih radionuklida i količini oslobođene aktivnosti.

Prethodno pripremljene baze scenarija akcidenata i obučeni timovi operatera koji brzo dostavljaju ovu vrstu ulaznih podataka su uslov za primenu matematičkih modela u ovoj situaciji, radi praćenja rasprostiranja radioaktivnosti kroz granični sloj atmosfere i pokretanja kontra mera radi smanjivanja posledica po okolinu.

Pored navedenih ulaznih podataka o izvoru akcidentalne emisije radioaktivnosti u granični sloju atmosfere i pored pravca i brzine vetra, važan ulazni parametar matematičkih modela atmosferske difuzije Gausovog tipa, i za kontinualnu i za akcidentalnu emisiju je atmosferska stabilnost. Ona određuje u kojoj meri je kretanje vazduha u graničnom sloju atmosfere turbulentno, i kojom dinamikom se šire dimne perjanice, odnosno diskretni

"radioaktivni oblaci". Zahvaljujući turbulentnom kretanju vazduha, koncentracija zagađujuće materije/radioaktivnosti se u graničnom sloju atmosfere razblažuje, jer se perjanice i "puff"-ovi manje ili više šire, pa koncentracija radioaktivnosti u njima, sa rastojanjem od izvora opada, čime se smanjuju posledice po životnu sredinu.

Gausov pravolinijski model dimne perjanice (2.4) ima skromne zahteve za ulaznim meteorološkim podacima. Pravač i brzina vetra, sunčevo zračenje danju i bilans zračenja tokom noći i intenzitet padavina su minimalni set ulaznih meteoroloških podataka za ovu vrstu modela. Za mala rastojanja od izvora meteorološki podaci mogu se dobiti merenjima u jednoj tački u blizini izvora (mesta akcidenta), zbog čega se pored ostalih dobrih osobina ova vrsta modela najviše koristi u praksi. Dobre osobine modela su i da daje brze odgovore o brzini i pravcu rasprostiranja, praktično u realnom vremenu, što je naročito važno u akcidentalnim situacijama, kada se odluke o pokretanju kontra mera donose u kratkom vremenu, reda veličine minuta.

Pojedine grane industrije i industrijski kompleksi imaju sopstvene meteorološke programe za prikupljanje podataka i oni su često bazirani na automatskim meteorološkim stanicama i uređajima za merenje na daljinu, kao što su sodari i lidari, koji daju vrednosti meteoroloških veličina u realnom vremenu, i koje je moguće usrednjiti za bilo koji vremenski interval 1h, 10 min, 1min i kraće.

Nakon toga izvršena su računanja polja srednjih mesečnih koncentracija radionuklida, korišćenjem srednjih desetominutnih ulaznih podataka i rezultati računanja polja srednjih mesečnih koncentracija korišćenjem srednjih časovnih ulaznih podataka i standardnih devijacija iz Paskal-Gifordovog seta za krive.

U Institutu „Vinča“, posle akcidenta na reaktoru „RB“ 1959. god. , kao uslov za puštanje u rad 10 MW-nog reaktora „RA“, uspostavljena su meteorološka merenja različitog obima, tipa i kvaliteta obrade podataka, koja traju do danas. Na osnovu zatečenih merenja i obrade podataka i na osnovu međunarodnih preporuka, IAEA, USNRC itd., 1982. god. počelo se sa razvojem kompjuterskog koda u programskom jeziku FORTRAN, koji se i dalje popravlja i dopunjava. Od 1997. godine uspostavljena su automatska merenja i obrada podataka na 37 m visokom meteorološkom stubu, automatskom meteorološkom stanicom Insituta za fiziku iz Zemuna, a od

2008. god. izgrađen je novi stub visine 40 m, sa automatskom meteorološkom stanicom, slovenačke firme AMES.

U eksperimentu se koriste podaci o dimnjaku, ventilacionom ispustu nuklearnog reaktora "RA" :

- visina izvora 45 m
- vertikalna brzina gasova na svetlom otvoru dimnjaka  $18 \text{ ms}^{-1}$
- temperatura gasova  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- dijamer svetlog otvora dimnjaka 2 m
- jedinična jačina izvora-brzina emisije pasivne supstance

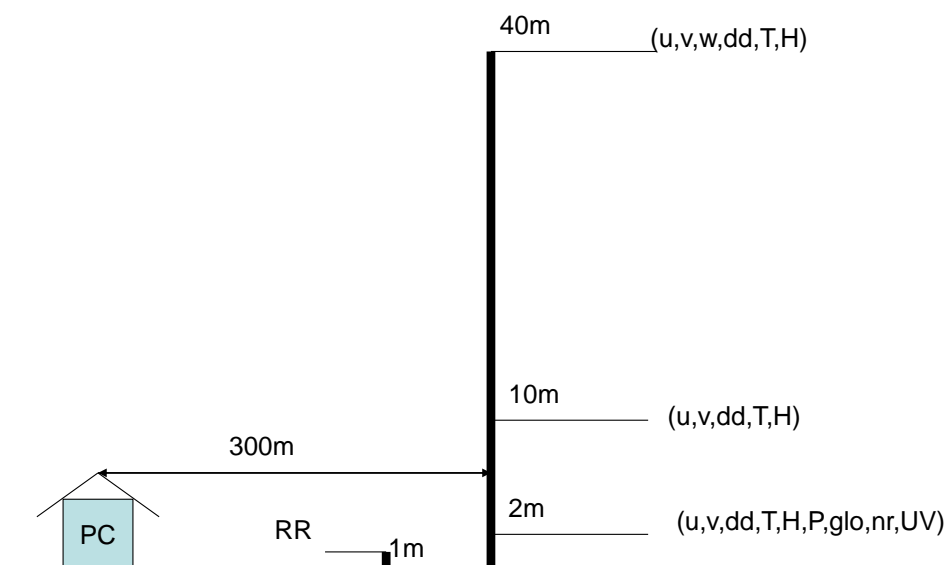


*Slika 3.1. Fizičke karakteristike izvora - dimnjaka*

Pretpostavlja se da je izvor (ventilacija, dimnjak) aktivan 24 h i da se jačina izvora ne menja u vremenu. Rutinski mod u osnovi ima Gausov pravolinijski model dimne perjanice (2.4).

Rutinska emisija iz ventilacije reaktora „RA“ simulirana je kao kontinualna emisija iz visokog tačkastog izvora, a relativne koncentracije u računskim tačkama, suva i mokra depozicija računata su primenom matematičkih modela, kao srednje časovne vrednosti. Rezultati modelovanja prikazani su kao srednje godišnje koncentracije pasivne supstance (srednje relativne koncentracije).

Šematski prikaz automatske meteorološke stanice u Institutu „Vinča“ dat je na slici 3.2.



Slika 3.2. Šematski prikaz automatske meteorološke stanice

gde je:

u,v,w	komponente vetra, pravac vetra, fluktuacije
dd	pravac vetra, fluktuacije
T	temperatura vazduha
H	relativna vlažnost

P	vazdušni pritisak
Glo	globalno sučevo zračenje
Nr	bilans zračenja
RR	padavine
PC	Soba sa računarom

Kao kartografska podloga za prikaz rezultata korišćena je karta Instituta u razmeri 1:25000 koja pokriva oblast oko reaktora "RA". Trodimenzionalne neravnine terena koje figurišu u modelu, dobijene su sa gridom  $dx=75m$ ,  $dy=84m$ . Radi detaljnijeg grafičkog prikaza rezultata, pored navedenih kartografskih podloga, korišćene su zumirane mape terena oko reaktora "RA" koje se mogu naći na internet adresama u slobodnoj razmeni.

Na osnovu brzine vetra, globalnog sunčevog zračenja-dan i bilansa zračenja-noć ili vertikalnog gradijenta temperature, određuje se stabilnost atmosfere i standardne devijacije koncentracije zagađujuće materije.

Za određivanje atmosferske stabilnosti u sloju mešanja korišćena je Pasquillova metoda za određivanje kategorija stabilnosti na osnovu vertikalnih gradijentnih merenja na meteorološkom stubu (određivanje kategorija stabilnosti direktnim merenjima). Posle akcidenta na nuklearnom reaktoru u Windscale, Cumbria 1957.godine, u Velikoj Britaniji, Paskal (Pasquill) je preporučio metod za procenu difuzije u slučajevima kada se ne raspolaže preciznim merenjima pravca i brzine vetra [4], [13]. Paskalova metoda, rasprostiranje perjanice polutanta u vertikalnom i horizontalnom pravcu, izražava preko standardnih meteoroloških merenja i posmatranja. Krive vertikalnog i horizontalnog širenja perjanice, u zavisnosti od rastojanja od izvora niz vetar, date su za nekoliko klasa "stabilnosti". Paskalovo ugaono širenje dimne perjanice izraženo preko standardnih devijacija fluktuacija pravca vetra u horizontalnom i vertikalnom pravcu, Gifford je konvertovao u prikaz preko standardnih devijacija fluktuacija koncentracija polutanata u perjanici,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$ . Familija Pasquillovih krivih koju je modifikovao Gifford najčešće se naziva Pasquill-Giffordova (P-G) familija krivih i ima direktnu primenu u modelima difuzije Gausovog tipa [5].

Tabela 3.1. Pasquill-ove klase stabilnosti [14]

Brzina vetra $U[\text{ms}^{-1}]$ na 10 m	Klasa stabilnosti, dan, sa insolacijom:			Klasa stabilnosti, noć, sa oblačnošću:	
	Jaka	umerena	slaba	prozirni oblaci ili $\geq 4/8$ ukupna oblačnost	$\leq 3/8$ ukupna oblačnost
$U < 2$	A	A-B	B	*	*
$2 \leq U < 3$	A-B	B	C	E	F
$3 \leq U < 5$	B	B-C	C	D	E
$5 \leq U < 6$	C	C-D	D	D	D
$6 \leq U$	C	D	D	D	D

## Legenda:

- (1) „Umerena“ insolacija odgovara upadnoj sunčevoj radijaciji pri vedrom nebu kada je visina sunca iznad horizonta između  $35^\circ$  i  $60^\circ$ . Termini „jaka“ i „slaba“ insolacija odnose se na visinu Sunca veću od  $60^\circ$  i manju od  $35^\circ$  respektivno.
- (2) Visina Sunca može se za zadati datum, vreme i geografsku širinu dobiti iz astronomskih tablica. Pošto oblaci smanjuju insolaciju, insolacija za vedro nebo koriguje se u zavisnosti od oblačnosti (količine i tipa oblaka) da bi se dobila odgovarajuća Pasquillova kategorija stabilnosti. Jaka insolacija prema objašnjenju (1) može se redukovati na „umerenu“, ako je nebo pokriveno oblacima srednje visine i ima ih  $5/8$  do  $7/8$  ili na „slabu“ insolaciju, ako je nebo pokriveno niskim oblacima.
- (3) Ako postoje merenja insolacije, granične visine Sunca od  $35^\circ$  i  $60^\circ$  mogu se zameniti odgovarajućim vrednostima insolacije tokom vedrog dana, kada je visina Sunca na tim visinama iznad horizonta. Kada se dobiju te granične vrednosti insolacije direktnim merenjem insolacije uključuju se i efekti slabljenja insolacije usled oblačnosti.
- (4) Neutralna klasa D javlja se uvek kada je nebo potpuno pokriveno niskim oblacima, bilo da je dan ili noć.
- (5) Standardne devijacije  $\sigma_z$  i  $\sigma_y$  za situacije (A-B), (B-C) i (C-D) uzimaju se kao srednje vrednosti za A i B, B i C i C i D.

Stabilnost atmosfere može da bude određena na osnovu profila temperature vazduha i prema ovoj klasifikaciji deli se na:

A - jako nestabilno

B - umereno nestabilno

C - blago nestabilno

D - neutralno

E - umereno stabilno

F – stabilno

Ova klasifikacija uključuje termički uzrok turbulencije preko jačine sunčevog zračenja u toku dana i bilansa zračenja tokom noći. Mehanički uzrok turbulencije je uključen preko jačine vetra.

#### A - Jako nestabilno

Ovaj tip se javlja samo danju tokom letnje polovine godine. Usled zagrevanja tla dolazi do vertikalnih kretanja vazduha pri čemu se zagrejani vazduh podiže u više slojeve atmosfere. Ovaj tip stabilnosti dovodi do jake koncentracije zagađujućih materija već u blizini izvora, ali i do bržeg pročišćavanja prizemnog sloja vazduha. Dim brzo difunduje.

#### B - Umereno nestabilno

Sličan prethodnom tipu, ali ima perjanicu manjeg radijusa, tako da gasovi sporije difunduju. Kod nižih izvora (dimnjaka) moguće je zagađenje na malim razdaljinama, a u gradskim sredinama na visokim objektima. Najčešće se javlja u poslepodnevnim satima tokom leta i u prelazima između godišnjih doba.

#### C - Blago nestabilno

Prelazni tip između neutralnog i nestabilnog stanja atmosfere. Kod ovog tipa temperatura je nešto niža nego kod tipa A. Proces konvekcije je slabiji, tako da se zagađenje registruje dalje od izvora. Perjanica ima manji prečnik, za iste razdaljine, u poređenju sa prethodnim tipovima.



### D - Neutralno

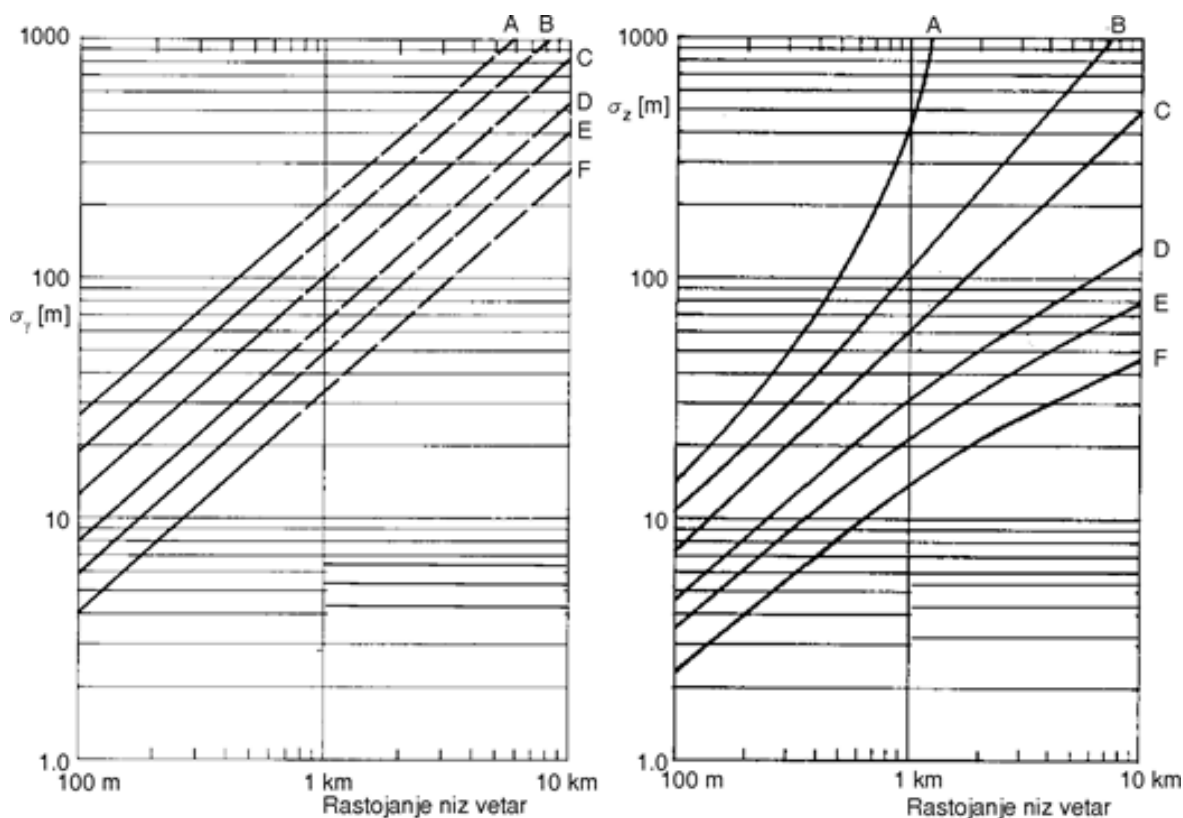
Vertikalni gradijent temperature se nalazi između neutralnog i izotermnog. Najčešće se javlja pri oblačnom i vetrovitom vremenu. Ovaj tip neće dovesti do značajnog zagađenja na tlu, ukoliko je dimnjak dovoljno visok, a teren ravan.

### E - Umereno stabilno

Nastaje pri zalasku Sunca, dok je prizemna inverzija ispod visine izvora. Ona ne dozvoljava spuštanje dima do tla. Iznad sloja inverzije dolazi do znatnog širenja dimne perjanice. Za visoke dimnjake ovo je najpovoljniji period za emisiju zagađenja.

### F - Stabilno

Najčešće se javlja tokom noći kada se zbog izračivanja tla stvori prizemni sloj hladnog vazduha. Temperatura se od površine tla smanjuje do sloja inverzije. Ovaj tip daje zagađenje samo kod niskih izvora. Ako se izvor nalazi iznad sloja inverzije, daje veoma povoljnu situaciju za emisiju zagađivača, posto dimna perjanica prelazi velike razdaljine pre nego što se na tlu može registrovati zagađenje.



Slika 3.3. Grafički prikaz parametara, u zavisnosti od rastojanja od izvora [14]

Da bi se utvrdile Paskalove klase atmosferske stabilnosti vršena su standardna meteorološka merenja na jedan sat. U ovoj šemi klasifikacije stabilnosti, noć je definisana kao period koji počinje jedan sat pre zalaska Sunca i završava se jedan sat nakon izlaska sunca.

Promenljivost termičke i mehaničke turbulencije i brzine vetra najveća je u sloju neposredno uz površinu tla. Turbulencija izazvana termičkom konvekcijom je u vezi sa vertikalnom termičkom strukturom atmosfere. Potencijalna temperatura je ona temperatura koju bi imao delić vazduha, kada bi bio adijabatski doveden na standardni nivo pritiska (1013.25mb) i ako ova temperatura opada sa visinom, atmosfera je nestabilna, pa se vertikalna kretanja ubrzavaju. Ako potencijalna temperatura ne opada ili raste sa visinom (inverzija) vertikalna kretanja se usporavaju i potpuno gube.

Proces transporta količine kretanja i pasivnih supstanci naviše ili naniže je usko povezan sa stabilnošću atmosfere. U nestabilnoj atmosferi, obično tokom dana, vertikalna kretanja naviše nose "manjak" količine kretanja usled turbulentnog trenja u relativno debelom sloju, zbog čega brzina sporije raste s visinom nego u toku noći. Na termičku turbulenciju superponiraju se efekti hrapavosti tla u vidu mehaničke turbulencije, koja utiče na profil vetra, a samim tim i na disperziju zagađenja u atmosferi. Povećanjem brzine vetra zagađenje se rasprostire na veća rastojanja, dok njegova koncentracija opada, tj. dimna perjanica se rasplinjuje.

Veličine  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  predstavljaju srednja kvadratna odstupanja tj. standardne devijacije, duž odgovarajućih pravaca i definišu dimenzije oblaka zagađenja. U ovakvom pristupu modelovanja transporta aerozagađenja, osnovni problem je određivanje standardnih devijacija. Složenost načina određivanja standardne devijacije je uzrokovana činjenicom da je ona u direktnoj vezi sa karakteristikama turbulentnog transporta u planetarnom graničnom sloju. U modelima za izračunavanje intenziteta depozicije, standardne devijacije su određene na osnovu Briggs-ovih empirijskih jednačina [7], u zavisnosti od klase stabilnosti, za urbane i ruralne uslove. Briggs je predložio seriju interpolacionih formula za  $\sigma$  krive, koje su prikazane u tabelama 3.2 i 3.3 [10].

*Tabela 3.2. Briggs-ove formule za  $\sigma_y(x)$  i  $\sigma_z(x)$ ;  $10^2 < x < 10^4$  m za urbane uslove*

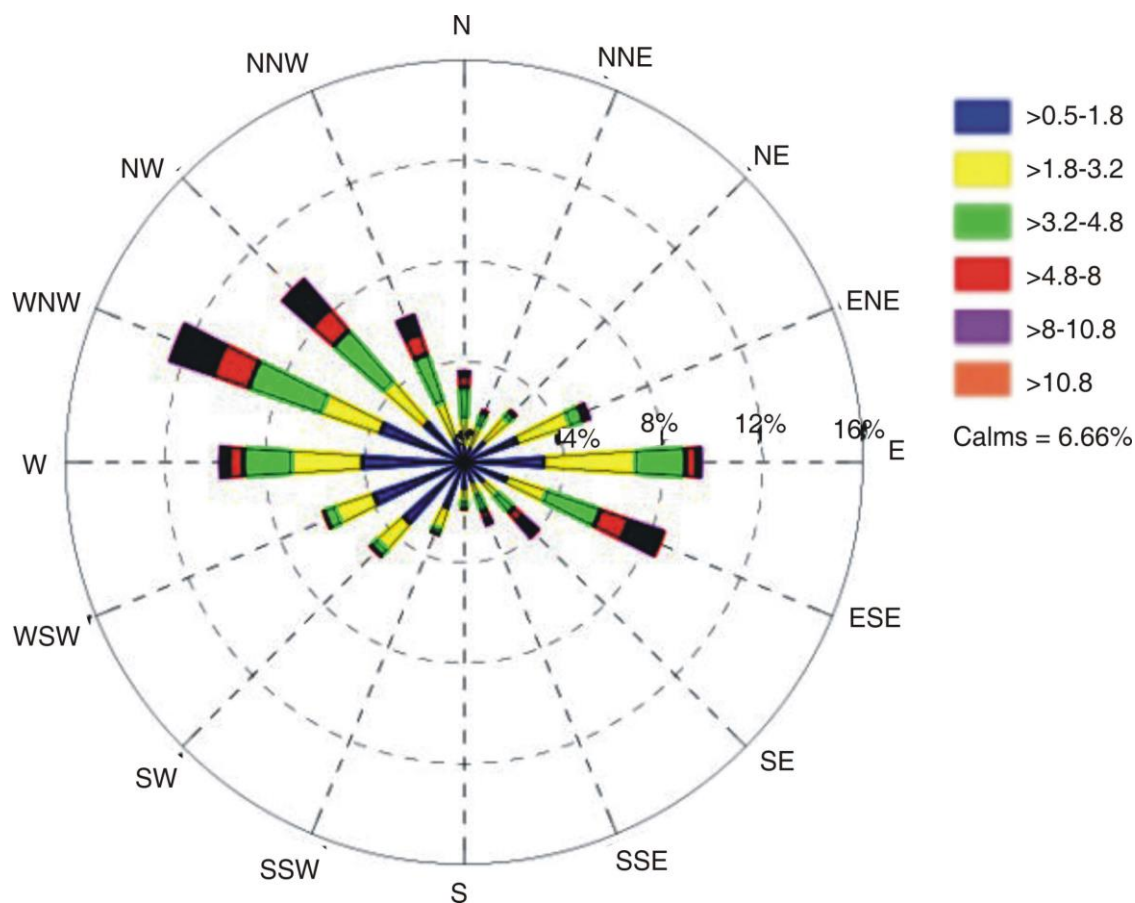
Pasquill-ova kategorija stabilnosti	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]
A-B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.0001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.00015x)^{-1/2}$

Tabela 3.3. Briggsove formule za  $\sigma_y(x)$  i  $\sigma_z(x)$ ;  $10^2 < x < 10^4$  m za ruralnu oblast

Pasquill-ova kategorija stabilnosti	$\sigma_y$ [m]	$\sigma_z$ [m]
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$

U prikazanim šemama za određivanje klasa stabilnosti, uzima se brzina vetra na visini 10m iznad tla, a ona se koristi i kao brzina noseće struje zagađujuće materije za niske izvore. Stvar oko brzine vetra se komplikuje, kada se posmatra rasprostiranje zagađujućih materija iz visokih dimnjaka, kada je za transport zagađujuće materije odgovorna brzina vetra na visini ose perjanice, koja se poklapa sa visinom do koje dospeva zagađujuća materija. U tom slučaju, pored brzine vetra na 10 m koja ulazi u algoritme za određivanje kategorija stabilnosti, treba znati i brzinu vetra na efektivnoj visini izvora, tj. na visini kojom se definiše visina ose dimne perjanice, a koja sa druge strane zavisi i od brzine vetra na visini svetlog otvora dimnjaka (fizička visina dimnjaka), gde se zagađujuća materija izbacuje u atmosferu. Kada su u pitanju dimnjaci, proizilazi da treba raspolagati podatkom o brzini vetra bar na tri visine, na 10 m, na fizičkoj visini dimnjaka i na njegovoj efektivnoj visini.

Najbolji način da se dobiju ovi podaci je da se oni direktno mere automatskim meteorološkim stanicama, čiji su senzori montirani na visokim meteorološkim stubovima ili da se mere uređajima, kao što su akustički radari (sodari) ili laserski radari (lidari). Ova oprema se zbog svoje visoke cene još uvek relativno malo koristi, a mnogo jeftiniji način je modeliranje polja vetra (slika 3.4).



Slika 3.4. Prikaz godišnje ruže vetrova

Početni pravac prenošenja zagađujuće materije od izvora emisije određen je pravcem vetra na izvoru [15]. Na koncentraciju zagađujuće materije pravac vetra utiče više od ostalih meteoroloških parametara. Tako npr. promena pravca vetra koji duva direktno u smeru receptora za samo 5 % uzrokuje pad koncentracije u receptoru od približno 10 % u nestabilnim uslovima, odnosno oko 50 % u neutralnim uslovima i oko 90 % u stabilnim uslovima. Takođe, značajna je promena pravca vetra s visinom, posebno blizu tla. Površinsko trenje uzrokuje promenu pravca vetra u smeru kazaljke na satu pri visinama blizu tla, dok horizontalna termička struktura atmosfere može imati dominantan uticaj na višim nadmorskim visinama, i to takav da se pravac vetra menja suprotno kazaljci na satu sa povećanjem visine.

Brzina vetra utiče na procese prenošenja (disperzije) zagađujućih materija u vazduhu na različite načine sa promenom visine [15]:

- Koncentracija zagađujuće materije na izvoru emisije razblažuje se zavisno od faktora koji je proporcionalan brzini vetra koji duva preko izvora emisije;
- Brzina vetra uzrokuje mehaničku turbulenciju koja povećava mešanje vazdušne mase i razblaživanje koncentracije zagađujuće materije;
- Površinsko trenje smanjuje brzinu vetra blizu površine tla, tako da je brzina na vrhu industrijskog dimnjaka značajno veća od one pri dnu dimnjaka.

Uopšteno posmatrano, može se konstatovati da se brzina vetra povećava sa visinom. Turbulencija je nepravilno kretanje vetra koje karakteriše neravnomerno duvanje vetra, promjenljivo i nestabilno, što uzrokuje turbulentno vrtloženje vazdušne mase. Razlikuju se dva tipa turbulentnog vrtloženja vazdušne mase. Mehanička turbulencija je posledica kretanja vazdušne mase pored objekata na tlu, dok je termička turbulencija rezultat izmene čestica vrućeg vazduha koji se uzdiže sa vruće površine tla i velike količine padajućih sporijih molekula vazduha.

U tabeli 3.4 kvalitativni opisi insolacije, tj. termini jaka, umerena i slaba insolacija odnose se na uslove koji su tipični za Englesku zbog čega je ova šema nepraktična za primenu na drugim geografskim širinama. Za određivanje Paskalovih klasa stabilnosti, kao što je već rečeno, koriste se standardna časovna meteorološka merenja, a osnovni parametri za klasifikaciju stabilnosti su brzina vetra na 10 m, kvalitativna procena insolacije u toku dana (jaka, umerena, slaba) i pokrivenost neba oblacima tokom noći. Osnovni nedostatak ovog pristupa je subjektivna procena insolacije i oblačnosti.

Slične šeme razvili su, kasnije, i neki drugi autori među kojima je najznačajnija Turnerova šema koja je modifikovana u odnosu na osnovnu šemu, uvođenjem stabilnosti jako stabilno G i indeksa insolacije, koji se računaju na osnovu visine Sunca, količine i tipa oblaka, čime se otklanja neodređenost prethodne šeme u definisanju insolacionih nivoa [16]. Turner je

Pasquill-Giffordovu šemu kvantifikovao definišući jaku, umerenu, malu i slabu insolaciju, pri vedrom nebu, na osnovu visine Sunca iznad tla i pokrivenosti neba oblacima po tipu preovlađujućih oblaka, čime su prevaziđene neodređenosti Paskalove klasifikacije [16]. Ako su na nebu prisutni oblaci, njihova količina i debljina oblačnog sloja utiču na smanjenje upadnog Sunčevog zračenja i Zemljinog izračivanja toplote. U Turnerovom sistemu klasifikacije atmosferske stabilnosti, insolacija se određuje na osnovu visine Sunca iznad horizonta, a modifikuje se na osnovu ukupne oblačnosti i količine oblaka prema njihovom tipu tokom dana i samo na osnovu ukupne oblačnosti tokom noći. Ovaj sistem za određivanje kategorija stabilnosti predstavlja podlogu za objektivne algoritme i automatsko određivanje kategorija stabilnosti. Metoda je objektivna, jer se visina Sunca određuje iz astronomskih tablica ili iz jednačina nebeske geometrije, a insolacija se koriguje na osnovu kvantitativno određene oblačnosti po tipu i količini:

*Tabela 3.4. Insolacija u funkciji visine Sunca*

Visina sunca ( $h$ )	Insolacija	Insolacioni nivoi IN
$60^\circ < h$	jaka	4
$35^\circ < h \leq 60^\circ$	umerena	3
$15^\circ < h \leq 35^\circ$	mala	2
$h \leq 15^\circ$	slaba	1

Visina sunca se određuje ili iz astronomskih tablica ili, što je jednostavnije, iz jednačina sferne trigonometrije koje definišu relacije između koordinata horizontskog i ekvatorskog astronomskog koordinatnog sistema. Insolacija, odnosno insolacioni nivoi, modifikuju se u nekoliko koraka u zavisnosti od oblačnosti (količina i tip oblaka), pri čemu se dobija indeks bilansa Sunčevog zračenja NRI.

### 3.2.1 Depozicija čestica

Transport zagađenja, a samim tim i depozicija, odnosno proces taloženja zagađujućih materija na tlu, imaju veliki uticaj na zdravlje ljudi, poljoprivredne kulture, biljni i životinjski svet. Iz tog razloga, veoma je važna prognoza intenziteta depozicije, naročito u slučaju havarija na energetske postrojenjima u cilju projektovanja mera predostrožnosti i protiv-mera, radi ublažavanja i eliminisanja nepovoljnih efekata. Do depozicije materijala nošenih vetrom, može da dođe na tri načina :

1. Gravitacionim taloženjem čestica
2. Turbulentnim transportom na dole
3. Spiranjem kišom ili drugim oblicima padavina

Svaki od ova tri načina ubrzava proces smanjenja koncentracije zagađujućih materija u vazduhu. Obzirom da je red veličine vertikalne komponente brzine vetra  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ , čestice se mogu podeliti na velike (teške) i male (lake). Tačnije, čestice čija je konačna brzina padanja većeg reda veličine od vertikalne komponente brzine vetra biće tretirane kao velike čestice, dok će ostale čestice biti tretirane kao male čestice. Stepent sedimentacije je određen, bar u prvoj aproksimaciji, konačnom brzinom čestica, pa je jasno da je mehanizam taloženja čestica na tlu dominantan za relativno velike i teške čestice. Na intenzitet depozicije malih čestica dominantan uticaj ima turbulentni transport. U slučaju turbulentnog transporta, širenje pasivne supstance je mnogo intenzivnije u odnosu na molekularno (laminarno) kretanje, iz razloga što turbulentno kretanje zavisi od veličine turbulentnih elemenata (vrtloga). Dakle, u zavisnosti od veličine čestica, depoziciju određuju različiti procesi, pa će ona za velike i male čestice biti posmatrana odvojeno.

Merenja intenziteta depozicije malih čestica (i gasova) ukazuju na važnost osobina same površine koja zadržava čestice kao i mehanizma kojim je materijal prenet na površinu. Kod velikih čestica ovo nije od velike važnosti, jer su pore manje od dimenzija čestica, pa apsorpcija podloge nema značajan uticaj na intenzitet depozicije. Ako podloga apsorbuje onoliko supstancije koliko vetrom i turbulentnim transportom stigne do nje, podloga je savršen upijač.

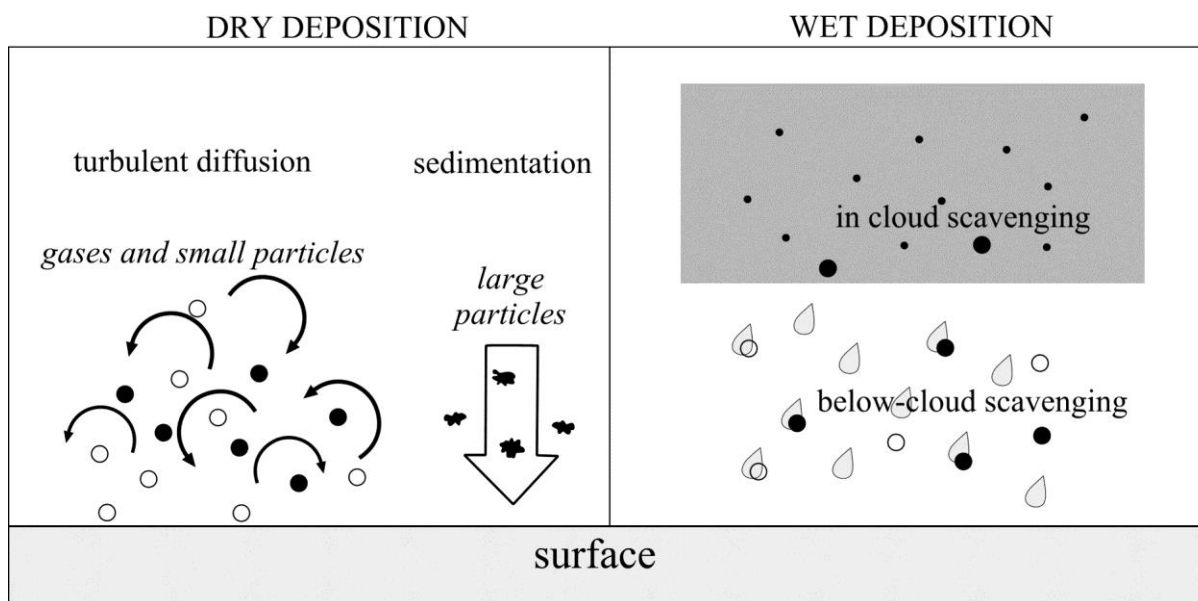


U nestabilno stratifikovanoj atmosferi, usled zagrevanja tla, dolazi do vertikalnih kretanja vazduha, pri čemu se zagrejani vazduh podiže u više slojeve atmosfere, što dovodi do bržeg pročišćavanja prizemnog sloja vazduha, odnosno broj nataloženih čestica na tlu je manji nego u stabilno stratifikovanoj atmosferi i ima približno istu vrednost u urbanoj i ruralnoj sredini.

Za razliku od nestabilno stratifikovane atmosfere, u stabilno stratifikovanoj atmosferi uslovi sredine imaju veliki značaj pri izboru visine dimnjaka. U ruralnoj sredini maksimalan intenzitet depozicije je znatno veći nego u urbanoj, što je posebno izraženo za niske dimnjake. Na osnovu toga može da se zaključi da u onim ruralnim oblastima, gde je stratifikacija pretežno stabilna, nije povoljno graditi niske dimnjake, jer daju velika zagađenja.

Za male visine dimnjaka, znatno veći broj čestica padne u jedinici vremena na jediničnu površinu u ruralnoj sredini nego u urbanoj, ali na približno istom rastojanju od izvora. U slučaju visokih dimnjaka maksimalan intenzitet depozicije, u ruralnoj sredini je na značajno većoj udaljenosti od izvora nego u urbanoj sredini. Na osnovu ove činjenice, može da se zaključi da niski dimnjaci daju veće zagađenje i na manjem rastojanju od izvora, nego visoki dimnjaci, za koje maksimalan intenzitet depozicije ima nižu vrednost, ali je veće rastojanje od izvora, na kojem maksimalan broj čestica u jedinici vremena padne na jediničnu površinu.

Jedan od glavnih mehanizama slabljenja koncentracija zagađujućih materija u kontaminiranom oblaku su suva i mokra depozicija. Ako se radi o česticama, u oba slučaja veličina čestica je dominantan faktor koji određuje brzinu eliminisanja zagađujuće materije iz oblaka. Granična brzina pri tome najviše zavisi od veličine čestice i njene gustine. Male čestice, aerosoli i gasovi ostaju suspendovani u vazduhu, a teže čestice talože se bliže izvoru. Veće čestice se lakše eliminišu iz oblaka procesom mokre depozicije, formiranjem kapljica kiše u oblaku ili spiranjem kapima kiše ili drugim oblicima padavina kao što su npr. sneg ili grad.



Slika 3.5. Proces suve i mokre depozicije u atmosferi [3]

U većini slučajeva čestice zagađivača imaju veću masu od vazduha i tako imaju tendenciju da izađu iz atmosfere brzinom  $\omega_{set}$  [m/s]. Na proces suve depozicije lakih čestica i gasova utiču turbulentni procesi u vertikalnom pravcu, karakteristike tla i njegovog biljnog pokrivača, kao i fizičke i hemijske karakteristike zagađujuće materije. Doprinos slabljenju koncentracija zagađujućih materija može se u principu dobiti merenjima - empirijski ili matematičkim modelovanjem [6].

Za čestice sfernog oblika brzina taloženja se može aproksimirati pomoću Štoksovog (Stokes) zakona:

$$\omega_{set} = 2\rho g \frac{R^2}{9\mu}$$

gde je:

$\rho$       gustina čestica [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

$R$       poluprečnik čestice [m]

- $\mu$       dinamička viskoznost vazduha [ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]  
 $g$       gravitaciono ubrzanje [ $\text{m s}^{-2}$ ]

### 3.2.2 Suva depozicija

Suva depozicija se često izražava preko donjeg graničnog uslova za vertikalnu komponentu atmosferske turbulentne difuzije jednačinom:

$$K_z \nabla c \cdot \vec{n} = E - v_d c$$

gde je :

- $K_z$       koeficijent turbulentne difuzije u vertikalnom pravcu [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]  
 $\nabla$       nabra operator [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $E$       emisija po jedinici površine tla (resuspenzija čestica zagađujuće materije) [ $\text{kg m}^{-2}$ ], [ $\text{Bq m}^{-2}$ ]  
 $v_d$       brzina suve depozicije [ $\text{m s}^{-1}$ ]  
 $\vec{n}$       jedinični vektor u vertikalnom pravcu  
 $c$       koncentracija zagađujuće materije u vazduhu pri tlu [ $\text{kg m}^{-3}$ ], [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

Slabljenje koncentracije zagađujućih materija u perjanici, može se u principu dobiti merenjima/empirijski ili matematičkim modelovanjem. Na proces suve depozicije lakih čestica i gasova utiču, turbulentni procesi u površinskom sloju atmosfere, karakteristike tla i stanje njegovog biljnog pokrivača, kao i fizičke i hemijske karakteristike zagađujuće materije.

Suva depozicija čestica i gasova i njihova koncentracija povezane su relacijom:

$$Dry_{dep} = v_d \cdot C$$

gde je:

$Dry_{dep}$  količina zagađujućih materija koja se deponuje na tlo suvom depozicijom [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ], [ $\text{Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]

$v_d$  brzina suve depozicije [ $\text{m s}^{-1}$ ]

### 3.2.3 Mokra depozicija

Prilikom pojave padavina u tečnom (kiša, rosa..) ili čvrstom agregatnom stanju (sneg, inje, grad) tokom rasprostiranja zagađujuće materije kroz atmosferu, dolazi do smanjivanja njihove koncentracije u vazduhu zbog depozicije, koja se naziva spiranje ili mokra depozicija.

Efikasnost spiranja zagađujućih materija pri tome zavisi od više faktora:

– od vrste padavina, (kiša, sneg ...). Očekuje se da sneg i ledeni kristali efikasnije spiraju zagađujuću materiju iz atmosfere od vodenih kapi zbog većeg odnosa između njihove površine i zapremine.

– od mesta na kome se ostvaruje kontakt zagađujuće materije sa padavinama, u samom padavinskom oblaku ili na putu padavina ispod oblaka do tla. Razlikuju se spiranje izlučivanjem zagađujuće materije iz samog padavinskog oblaka, kada se čestice zagađujuće materije u oblaku javljaju kao centri formiranja kapljica padavina i spiranje ispod padavinskog oblaka, kada se čestice i gasovi zagađujuće materije spiraju kišnim kapima ili pahuljicama i gradom koji ih pokupe na svom putu prema tlu. Spiranje kišom je značajniji mehanizam kod mokre depozicije zagađujućih materija od izlučivanja iz samog oblaka [17].

Izlučivanjem zagađujuće materije iz oblaka smanjuje se koncentracija zagađujuće materije u tom oblaku. To istovremeno ne znači da će zagađujuća materija i dospeti do tla u obliku mokre depozicije, jer padavine mogu na primer da ispare na putu do tla i da se mokra depozicija pri tome ne ostvari. Pri tome će se koncentracija zagađujuće materije smanjiti u samom padavinskom oblaku, ali će se povećati u vazduhu ispod oblaka.

– od prirode zagađujuće materije. Za čestice se uzima u obzir njihova raspodela po veličini, a ako su u pitanju gasovi uzima se u obzir njihova difuzivnost i rastvorljivost. Rezultati nekih istraživanja primenom modelovanja raspodele čestica pri tome mogu da nadomeste nedostatak adekvatnih empirijskih podataka

– od procesa interakcije, kao što su kondenzacija, Braunovo kretanje itd.

Efikasnost spiranja u prvoj aproksimaciji može se smatrati da je funkcija od dijametra čestica zagađujuće materije  $r_{zm}$  i dijametra kišne kapi, zrna leda ili snežne pahuljice  $r_p$  u zavisnosti od oblika padavina:

$$E = f(r_{zm}, r_p)$$

Spiranje ispod oblaka može se predstaviti verovatnoćom, da zagađujuća materija bude pokupljena padavinama kojima se nađe na putu, zbog čega se spiranje može predstaviti eksponencijanom funkcijom. U ovom slučaju spiranje zagađujućih materija padavinama parametrizuje se koeficijentom spiranja  $\Lambda$ , koji se definiše kao brzina promene koncentracije u jedinici vremena zbog spiranja. Mokra depozicija dovodi se u vezu sa spiranjem kišom ili snegom sledećim matematičkim izrazom:

$$\frac{dc}{dt} = -\Lambda c$$

Odnosno:

$$c = c_0 e^{-\Lambda t}$$

gde je:

- $c$  koncentracija zagađujuće materije u vazduhu u trenutku  $t$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
- $c_0$  koncentracija materije u vazduhu u trenutku  $t=0$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
- $\Lambda$  koeficijent spiranja [ $\text{s}^{-1}$ ]

Na taj način ukupna količina zagađujuće materije na tlu usled mokre depozicije, po površini u jedinici vremena, može da se izračuna po formuli:

$$W_{dep} = \sum_{\Delta z_i} \overline{c_{0\Delta z_i}} (1 - e^{-\Lambda t}) \Delta z_i$$

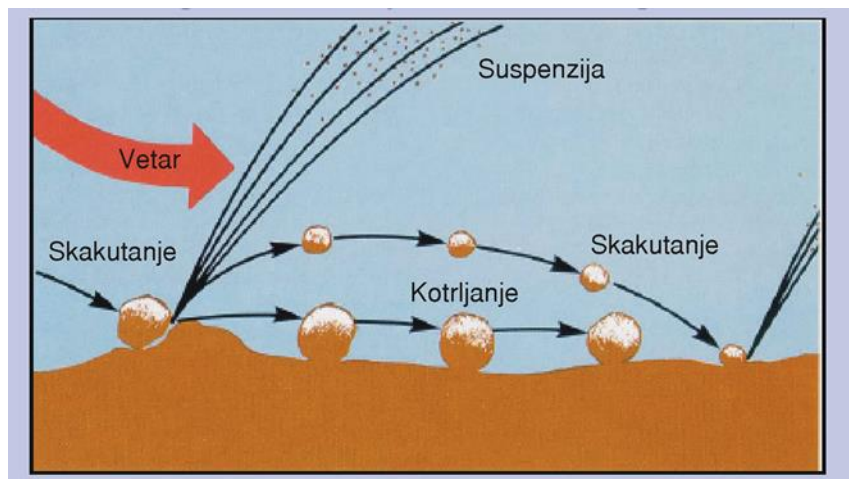
gde je:

$\overline{c_{0\Delta z_i}}$  srednja koncentracija zagađujuće materije u sloju debljine  $\Delta z_i$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

### 3.2.4 Resuspenzija čestica zagađujuće materije sa tla vetrom

Prethodno su opisani mehanizmi koji utiču na smanjenje koncentracije zagađujuće materije u sloju mešanja atmosfere, kao što su atmosferska disperzija i suva i mokra depozicija. Zagađujuća materija koja se deponuje na tlo, suvom i mokrom depozicijom, može ponovo dospeti u atmosferu mehanizmom (procesom) koji se zove resuspenzija, zbog jakog vetra ili mehaničkog podizanja sa tla usled prolaska vozila, prekopavanja tla ili prelaskom ljudi i stada životinja. Istim procesom u atmosferu dospeva zagađujuća materija sa deponija pepela i uglja u blizini termoenergetskih postrojenja, sa veštačkih deponija peska ili sa tla pokrivenog prašinom, peskom ili drugim rastresitim materijalom.

Ako je tlo pokriveno suvom prašinom, peskom ili drugim rastresitim materijalom, dovoljno jak vetar može da kotrlja veće deliće materijala ili čak da ih podigne sa tla do rastojanja reda veličine oko jednog metra. Ovi delići materijala ponašaju se kao projektili koji pogađaju sitnije deliće na tlu, podižu ih u površinski sloj atmosfere, gde usled turbulencije mogu biti suspendovani za duži vremenski period i rasuti na velika rastojanja niz vetar.



Slika 3.6. Resuspenzija čestica zagađujuće materije sa tla vetrom

Horizontalni fluks delića materijala-projektila može se predstaviti jednačinom [18] - [21]:

$$q = A \frac{\rho}{g} \sum_{u_*} u_* (u_*^2 - u_{*fv}^2)$$

gde je:

- $q$  horizontalni fluks čestica-projektila [ $\text{g cm}^{-1}$ ]
- $A$  bezdimenzioni parametar (obično se pretpostavlja da ima vrednost 1)
- $\rho$  gustina vazduha [ $\text{g cm}^{-3}$ ]
- $g$  gravitaciono ubrzanje [ $\text{cm s}^{-2}$ ]
- $u_*$  brzina trenja [ $\text{cm s}^{-1}$ ]
- $u_{*fv}$  granična brzina trenja [ $\text{cm s}^{-1}$ ]

Vertikalni fluks prašine koja se podiže sa tla zasutog česticama-projektlima  $F_a$  [ $\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] dobija se na osnovu linearne relacije sa  $q$ , množenjem  $q$  konstantom  $K$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] čija je tipična vrednost reda veličine  $10^{-5}$ - $10^{-6}$ . Vrednosti konstante  $K$  strogo zavise od sastava površine, njene pokrivenosti pokoricom i vlažnosti.

Brzina trenja  $u_*$  je povezana sa brzinom vetra na visini  $z$  u neutralnoj atmosferi relacijom:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-D}{z_0}\right)$$

gde je:

- $U(z)$  brzina vetra na visini  $z$  [ $\text{cm s}^{-1}$ ]
- $k$  von Karmann-ova konstanta (0.4)
- $z_0$  debljina hrapavosti [cm]
- $D$  visina prepreka [cm]

Granična brzina trenja  $u_{*TV}$  zavisi od hrapavosti tla i njegovih karakteristika i u prvoj aproksimaciji vrednosti za  $u_{*TV}$  mogu se uzeti iz literature [18] - [21].

Na kraju horizontalni fluks čestica-projektla  $q$  povezan je sa vertikalnim fluksom podignute prašine  $F$  relacijom [22]:

$$F = K * q$$

Da bi se modelovalo podizanje oblaka čestica prašine sa velikih deponija, površine deponija se dele u veliki broj manjih površina, koje se u modelu zadaju svojom veličinom, karakteristikama tla i koordinatama. Kada prašina dospe u atmosferu ponaša se kao bilo koja druga zagađujuća materija, a njena atmosferska disperzija računa se matematičkim modelima koji su opisani u prethodnim poglavljima [23].

Prikazani algoritam za resuspenziju čestica sa tla je modul algoritma za rasprostiranje čestica kroz donji granični sloj atmosphere koja se u ovom slučaju može predstaviti izrazom:



$$Q = F \cdot dia$$

gde je:

*dia* površina sa koje se podižu čestice zagađujuće materije [m<sup>2</sup>]

Q jačina izvora

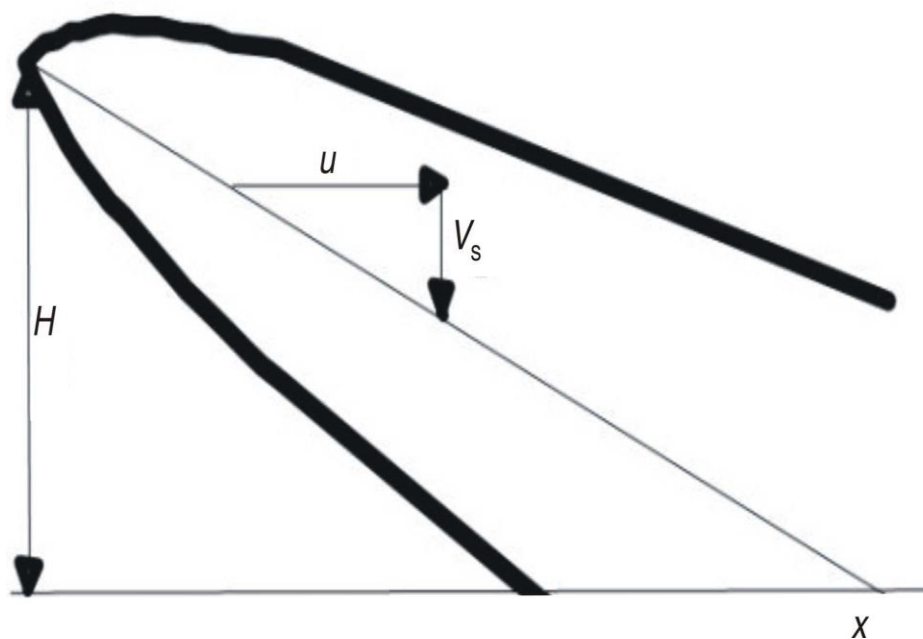
Gravitaciono taloženje teških aerosola izračunava se tako što se efektivna visina dimnjaka *H* modifikuje članom [23], [24]:

$$H - \frac{v_s x}{u}$$

gde je:

*v<sub>s</sub>* granična brzina [m s<sup>-1</sup>]

*x* rastojanje niz vetar od izvora [m]



Slika 3.7. Šematski prikaz gravitacionog taloženja teških aerosola [23]

Suva depozicija ovih čestica, podignutih sa tla računa se izrazom:

$$C_d = v_g C(x, y, 0)$$

gde je:

$v_g$  brzina depozicije čestica [ $\text{m s}^{-1}$ ]

U prvoj aproksimaciji može se uzeti da je:

$$v_g = v_s$$

### 3.2.5 Značaj hemijskih reakcija za modelovanje kvaliteta vazduha

Simulacija zagađenja vazduha korišćenjem matematičkih modela za praćenje kvaliteta vazduha omogućava definisanje zavisnosti koncentracija zagađujućih materija u posmatranoj sredini (imisija) od emisija primarnih zagađujućih materija i prekursora sekundarnih zagađujućih materija, uzimajući u obzir meteorološke pokazatelje, topografiju terena i parametre koji se odnose na hemijske transformacije [25].

Usled neograničenosti vazdušnog prostora u vazduhu se istovremeno odvija veliki broj procesa, kao što su kretanje čestica, hemijske i fotohemijske reakcije, kao i adsorpcija i desorpcija supstanci sa aerosolnih čestica. Uz poznavanje kinetike procesa koji se odvijaju u atmosferi neophodno je poznavanje i mehanizama posmatranih reakcija.

Pored hemijskih reakcija koje su izazvane toplotom, čija brzina zavisi od temperature, u atmosferi se odvija i veliki broj fotohemijskih reakcija koje su izazvane energijom svetlosti. Pri interakciji zračenja sa česticama mogući su sledeći procesi: refleksija zračenja od čestice, prolaženje zračenja kroz česticu, uz eventualno prelamanje i apsorpcija zračenja od strane čestice. Za atmosfersku hemiju najznačajniji su procesi apsorpcije i refleksije.

Pri apsorpciji zračenja, zavisno od energije zračenja i strukture čestice, može doći do promene u njoj strukturi, što se naziva fotohemijsko pobuđivanje ili fotohemijska ekscitacija. Pri apsorpciji količine energije koja je nedovoljna za pobuđivanje doći će samo do povišenja kinetičke energije čestice, odnosno do njenog zagrevanja. Nakon faze ekscitacije, na račun dobijene energije reakcija može da se nastavi na više načina [25].

Pored gasova atmosfera sadrži i suspendovani materijal u obliku vrlo sitnih čestica ili kapljica koji se zove aerosol. Bez obzira na agregatno stanje aerosola, za ove čestice se u atmosferskoj hemiji koristi termin čestica, kao i za molekule, atome i radikale. Poluprečnik čestice aerosola mora biti manji od  $1\mu\text{m}$  da bi se čestica zadržala u dužem periodu suspendovana u vazduhu. Po definiciji čestice aerosola su veće od poluprečnika molekula (oko  $2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ), a manje od  $500 \mu\text{m}$  (prašina). S obzirom na veoma izražene posledice dejstva aerosolnih čestica na zdravlje čoveka i živi svet, pridaje im se posebna pažnja od početka 90- tih godina XX veka.

Neke od posledica dejstva aerosola su sledeće:

- 1) udisanjem vazduha sa visokom koncentracijom aerosolnih čestica i prašine raste verovatnoća da će doći do oštećenja u organizmu;
- 2) utiču na klimu Zemlje;
- 3) na površini aerosolnih čestica odvijaju se neke od reakcija koje su ključne za hemizam atmosfere;
- 4) umanjuju vidljivost zbog rasipanja i apsorpcije u vidljivom delu spektra elektromagnetnog zračenja.

Neki od šire prisutnih vrsta aerosola su:

- 1) dim koji predstavlja smešu gasova u kojoj se nalazi aerosol čvrstih čestica i kapljica vode, nastalih koagulacijom, odnosno kondenzacijom proizvoda sagorevanja;
- 2) magla koja predstavlja aerosol kapljica vode nastalih kondenzacijom vodene pare;
- 3) leteći pepeo koji se sastoji od čestica pepela koje zbog svojih malih dimenzija imaju osobinu aerosola.

Prema poreklu razlikuje se:

- 1) primarni aerosol koji nastaje procesima kao što je sitnjenje materijala na površini Zemlje (terestrični aerosol) ili rasprskavanje morske vode (marinski aerosol) i
- 2) sekundarni aerosol koji nastaje hemijskim reakcijama u vazduhu. Za stvaranje čestica sekundarnog aerosola prirodnog porekla, najznačajnije su supstance biogenog porekla kao što su:  $\text{SO}_2$  koji nastaje oksidacijom biogenog  $\text{H}_2\text{S}$ , zatim  $\text{NH}_3$ , kao i oksidi azota koji nastaju oksidacijom  $\text{NH}_3$ , ugljovodonici i njihovi oksidacioni i polimerizacioni proizvodi, vodena para i druge supstance. Stvaranje aerosola iz ovih reakcija odvija se preko velikog broja homogenih i heterogenih hemijskih i fotohemijskih reakcija. Najznačajnija reakcija u stvaranju troposferskog aerosola jeste oksidacija  $\text{SO}_2$  do  $\text{SO}_3$ , s obzirom na visoku koncentraciju sulfata u aerosolu [25].

### 3.3 Dozni modul

Usrednjavanjem polja koncentracije aktivnosti po vremenu, dobijaju se polja jačine ili brzine koncentracije aktivnosti koja su polazna osnova za dobijanje polja jačine doze kojoj je izložen posmatrač [23].

Kod radioaktivnosti, apsorbovana doza je količina energije koja potiče od jonizujućeg zračenja raspadom radionuklida, a deponuje se u živom tkivu individualnog posmatrača i izražava jedinicom grej [Gy]:

$$1\text{Gy} = \frac{J}{Kg}$$

Biološki efekti primljenih doza radioaktivnosti, odnosno moć apsorbovane doze da izazove manja ili veća oštećenja tkiva naziva se ekvivalentna doza, a izražava se jedinicom sivert [Sv]. Jedan mSv je doza ozračivanja od prirodnog fona za godinu dana.

Pomenute doze u jedinici vremena su jačine ili brzine tih doza u jedinicama Gy/h, odnosno Sv/h.

#### 3.3.1 Doza inhalacije

Računa se iz brzine udisanja vazduha posmatrača, koncentracije aktivnosti u vazduhu i koeficijenta doze inhalacije za posmatrani radionuklid:

$$D_{inh} = g_{inh} \cdot C(x, y, z, t) \cdot V_{br}$$

gde je:

$g_{inh}$  koeficijent doze inhalacije za posmatrani radionuklid [Sv/Bq]

$C(x, y, z, t)$  koncentracija aktivnosti u vazduhu [Bq/m<sup>3</sup>]

$V_{br}$  srednja brzina udisanja vazduha posmatrača [1.2 m<sup>3</sup>/h]

Vreme izlaganja je jedna godina tj. 8760 h.

### 3.3.2 Doza od boravka u oblaku

Doza spoljašnjeg ozračivanja posmatrača obavijenog radioaktivnim oblakom, koji se formira u akcidentalnim situacijama, računa se na sličan način kao doza inhalacije:

$$D_{obl} = g_{obl,r} \cdot C(x, y, z, t)$$

gde je :

$g_{obl,r}$  koeficijent doze spoljašnjeg ozračivanja od oblaka radionuklida  $r$ , [ $\text{Sv} \cdot \text{m}^3 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ ]

### 3.3.3 Doza od suve i od mokre depozicije

Doza spoljašnjeg ozračivanja od ukupno deponovane radioaktivnosti na tlu, koju posmatrač primi od svoje 18. do 70. godine života računa se prema modelu:

$$D_{tot} = \left[ (1 - \mathcal{G}) \cdot g_{b,r}^{>17a} + (1 - \mathcal{G}^{52}) \cdot b \cdot g_{b,r}^{>17a} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_r} \cdot (Dry_{dep,r} + Wet_{dep,r})$$

$$\mathcal{G} = \exp(-\lambda_r \cdot t_1)$$

gde je:

$t_1$	vremenski period od 1 godine [s]
$\lambda_r$	koeficijent raspada za radionuklid $r$ [ $\text{s}^{-1}$ ]
$g_{b,r}^{>17a}$	koeficijent doze depozicije za stanovnika starijeg od 17 godina, za radionuklid $r$ [ $\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{Bq} \cdot \text{s})$ ]
$Dry_{dep,r}$	suva depozicija za radionuklid $r$ , [ $\text{Bq}/\text{m}^2$ ]
$Wet_{dep,r}$	mokra depozicija za radionuklid $r$ , [ $\text{Bq}/\text{m}^2$ ]
$b$	bezdimenzioni koeficijent

### 3.3.4 Ukupna doza

Ukupna doza se dobija kao suma doze inhalacije, doze od oblaka i doze od suve i mokre depozicije na tlu. Najveći doprinos ukupnoj dozi koju posmatrač primi od svoje 18. do 70. godine života, očekuje se od depozicije (suva i mokra) na tlu, gde osoba boravi tokom dugog vremenskog perioda.

$$D_{tot} = D_{inh} + D_{obl} + Dry_{dep} + Wet_{dep}$$

## 3.4 Uticaj TNTA i TNTB na zagađenost vazduha u Beogradu

Zagađivači prisutni u ambijentnom vazduhu, pre svega respirabilne/suspendovane čestice (particulate matter – PM) zbog svog negativnog dejstva na ljudsko zdravlje, skreću veliku pažnju stručnjaka, regulatornih tela i najšire javnosti. Među njima su posebno značajne one koje mogu dospeti do najdubljih delova pluća i te čestice imaju prečnik manji od 10  $\mu\text{m}$ . Zakonska regulativa Evropske Unije već dugi niz godina, a od 2010. godine i srpska regulativa propisuju monitoring dve frakcije čestica prisutnih u vazduhu, manjih od 2.5  $\mu\text{m}$  takozvanih finih čestica i čestica manjih od 10  $\mu\text{m}$  aerodinamičkog prečnika,  $\text{PM}_{10}$ , u čiji sastav ulaze pored finih čestica i grube čestice koje su iz opsega od 2.5-10  $\mu\text{m}$ .

Za uspešno upravljanje aerozagađenjem potrebna su znanja o ukupnom ciklusu vezanom za respirabilne čestice, uključujući izvore emisije čestica, procese njihovog formiranja, njihov sastav, rasprostiranje i sudbinu u atmosferi, kao i izloženost ljudi, što dalje ima uticaj na zdravlje. Glavni izvori respirabilnih čestica su dobro poznati. Pored prirodnih izvora, najznačajniji izvori antropogenog porekla uključuju termoelektrane i saobraćaj. Fine čestice i gasovi iz termoelektrana i saobraćaja obično potiču od procesa sagorevanja.

Respirabilne čestice u atmosferi nisu ni u fizičkom ni u hemijskom pogledu homogene. S toga je važno znati kolika je njihova količina i koje su njihove fizičke osobine i hemijski sastav.

Respirabilne čestice karakterišu brojne osobine uključujući veličinu, gustinu, oblik i sastav. Uopšteno posmatrano, uticaj na zdravlje ljudi, efekti na životnu okolinu i sudbina čestica zavise od njihove veličine. Što su čestice manje mogu dopreti dalje od izvora emisije s jedne strane, a s druge strane takve čestice imaju osobinu da dublje i efikasnije prodiru u pluća čoveka.

Sastav čestica je bitan jer od njega zavisi i veličina, gustina, isparljivost, reaktivnost i što je od posebne važnosti toksičnost. Čestice prisutne u atmosferi su dimenzija od oko 0,002 do 100 $\mu\text{m}$ . Ove najveće se ne zadržavaju suspendovane u atmosferi dugo vremena, već se brzo talože – za svega 4 do 8 sati. U opseg ukupnih suspendovanih čestica (total suspended particles – TSP) spadaju sve one koje su manje od 40  $\mu\text{m}$ . Čestice koje su najvažnije sa gledišta atmosfenske hemije, fizike i zdravstvenih efekata su čestice u opsegu 0,002 do 10  $\mu\text{m}$  i klasifikuju se kao:

- PM<sub>10-2.5</sub> - grube čestice = inhalabilne čestice, frakcije između 2.5 i 10  $\mu\text{m}$
- PM<sub>2.5-0.1</sub> - fine čestice frakcije između 2.5 i 0.1  $\mu\text{m}$
- PM<sub>0.1</sub> - ultrafine čestice, sve čestice  $\leq 0.1 \mu\text{m}$ .

Termoelektrane, preko dimnjaka i pepelišta, su često veliki izvor zagađenosti okoline. U zavisnosti od meteoroloških uslova, leteći pepeo (fly ash) može dostići velike razdaljine od izvora. Iz tog razloga je bitno da se uradi procena koncentracije pepela ne samo u blizini termoelektrane već i u široj regiji [26].

Tri glavna faktora koja utiču na koncentraciju letećeg pepela jesu jačina vetra, atmosfenska stabilnost i raspodela veličine čestica. Zbog velikih razlika koje se javljaju kod pravca i smera vetra kao i kod stabilnosti atmosfere, procena koncentracije može da se uradi matematičkim modelovanjem. Da bi se izvršila verifikacija modela potrebno je da se uradi merenje lokalne koncentracije pepela.

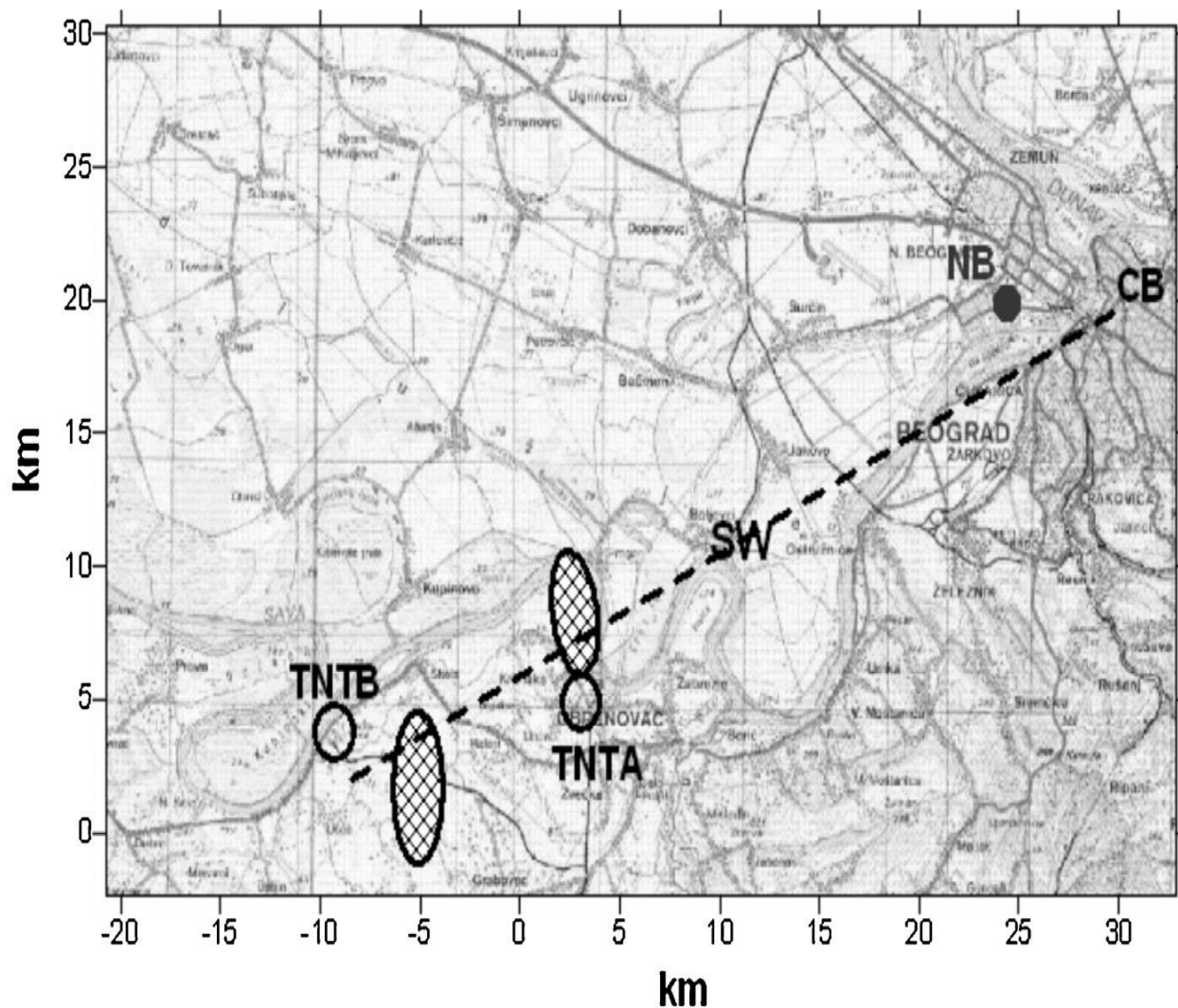
Termoelektrane TNTA i TNTB su udaljena od centra Beograda oko 30 km u smeru zapad - jugozapad po nomenklaturi ruže vetrova. Nalaze se u dolini na desnoj obali reke Save. Udaljenost između TNTA i TNTB je približno 15 km. Teren oko termoelektrana je relativno ravan.



TNTA i TNTB poseduju tri dimnjaka sa različitim visinama - 150 m, 220 m, 280 m, koji su stalni izvori prašine po okolinu. Svaki od ovih dimnjaka će dati drugačiji doprinos koncentraciji zagađenja za različite vetrove i lokalne atmosferske stabilnosti. U toku rutinskog rada TNTA i TNTB, njihovi dimnjaci oslobode oko 3 t/h pepela u atmosferu [26].

U okviru projekta koji je realizovan sa Institutom za istraživanje vazduha (Institute for Air Research) iz Norveške, postavljen je kontrola stanica na Novom Beogradu za merenje nivoa koncentracije  $PM_{10}$  čestica. Na osnovu meteoroloških merenja, izabrana su tri datuma kada su vrednosti  $PM_{10}$  bile povećane na kontrolnoj stanici na Novom Beogradu. Na osnovu toga je pretpostavljeno da je najveći deo zagađujuće supstance od TNTA i TNTB [27], [28].

Na slici 3.8, krugovi označavaju pozicije dimnjaka, dok dve šrafirane elipse predstavljaju odlagališta pepela – pepelišta (CB je centar Beograda). NB (Novi Beograd) je tačka merenja koja se koristi za verifikaciju modela i gde se ustvari nalazi merna stanica. Domen na kome se vrši računanje je dimenzija  $53.5 \text{ km} \times 32.5 \text{ km}$ .

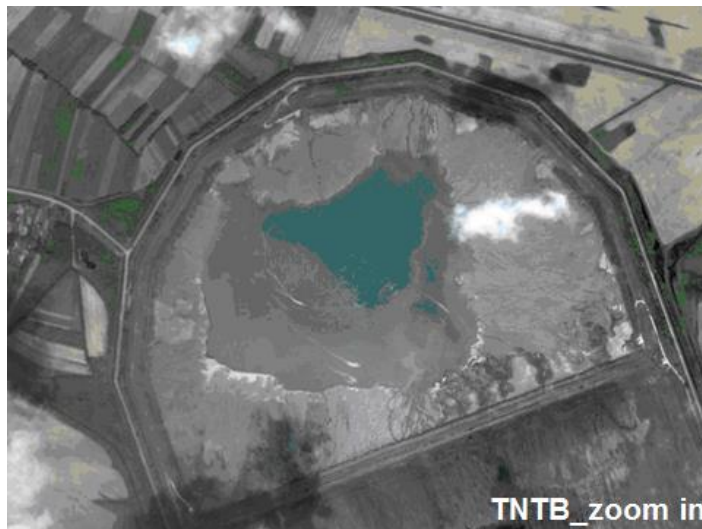


Slika 3.8. Šematski prikaz lokacija TNTA, TNTB i pepelišta

gde mali krugovi predstavljaju dimnjake i deponije uglja, dok šrafirane elipse predstavljaju deponije pepela.

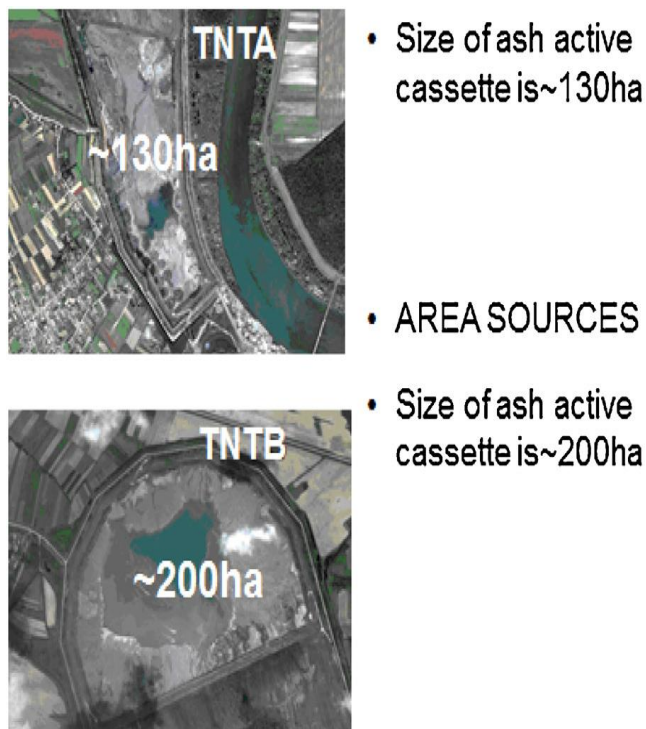
Količina pepela koji se emituje sa deponije zavisi od intenziteta površinskog prskanja vodom. Ovi izvori prašine postaju aktivni samo sa jakim vetrovima koji su neophodni za početno podizanje pepela [29]. Veličina i oblik koji figurišu kao površinski izvor pepela u modelu dobijaju se preko dnevnog praćenja "vodenog ogledala" na pepelištu (slika 3.9). Tirkiz površina

je „vodeno ogledalo“, tamno siva je vlažan pepeo, dok je ostalo suv pepeo (oko 50 %) koji se smatra izvorom  $PM_{10}$  u ovom istraživanju.



*Slika 3.9. Tirkiz površina je „vodeno ogledalo“, tamno siva je vlažan pepeo, ostalo je suv pepeo*

Što je manja površina „vodenog ogledala“, veći je i negativan uticaj po okolinu (slika 3.10).



Slika 3.10. Pepelišta sa „vodenim ogledalima“

Kao što je već napomenuto, modelovanje atmosfere disperzije podrazumeva matematički opis transporta zagađujućih čestica u graničnom sloju atmosfere i veoma je značajna oblast zaštite životne sredine [3]. Koncentracija aktivnosti zagađivača u vazduhu može se opisati pomoću advekciono-difuzione jednačine koja predstavlja parcijalnu diferencijalnu jednačinu paraboličnog tipa drugog reda [6]. Rešenje je Gausov pravolinijski model dimne perjanice (Gaussian plume model) (2.4).

U ovoj doktorskoj disertaciji pošlo se od pretpostavke da bi fine čestice suspendovane u atmosferu iz dimnjaka mogle dostići do predgrađa Beograda, možda i do centra grada pod određenim meteorološkim uslovima, kao što je stalni vetar pravca zapad - jugozapad. Automatska meteorološka stanica sa stubom visine 10 metara postavljena je između dimnjaka TNTA i TNTB i služi za prikupljanje meteoroloških podataka u realnom vremenu koji su ulazni podaci za matematički model. Dodatna kontrolna automatska meteorološka stanica postavljena je na obližnjem vodotornju na visini od 45 m iznad zemlje. Navedene stanice su služile za

određivanje brzine vetra na različitim visinama kao i klasa stabilnosti preko gradijenta temperature.

Matematički model koristi ove podatke pri proračunu količine letećeg pepela koji se podiže sa suvih delova deponija kao i njegovog širenja kroz atmosferski granični sloj kada duva jak vetar. Takođe, ovi podaci se koriste u modelu za proračun atmosferske disperzije zagađivača iz dimnjaka u realnom vremenu tokom cele godine.

Atmosferska stabilnost se dobija na osnovu meteoroloških merenja i Paskal-ovih klasa stabilnosti (tabela 3.1), globalnog Sunčevog zračenja tokom dana i bilansa Sunčevog zračenja tokom noći [23]. Neutralna stabilnost se ostvaruje pri jakom vetru (iznad  $6 \text{ ms}^{-1}$ ) i kada je minimalna potrebna brzina vetra za podizanje prašine sa pepelišta oko  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Neutralna stabilnost je, takođe, prisutna pri maloj brzini vetra praćenoj niskom oblačnošću i, u tom slučaju, jedini aktivni izvori prašine su dimnjaci.

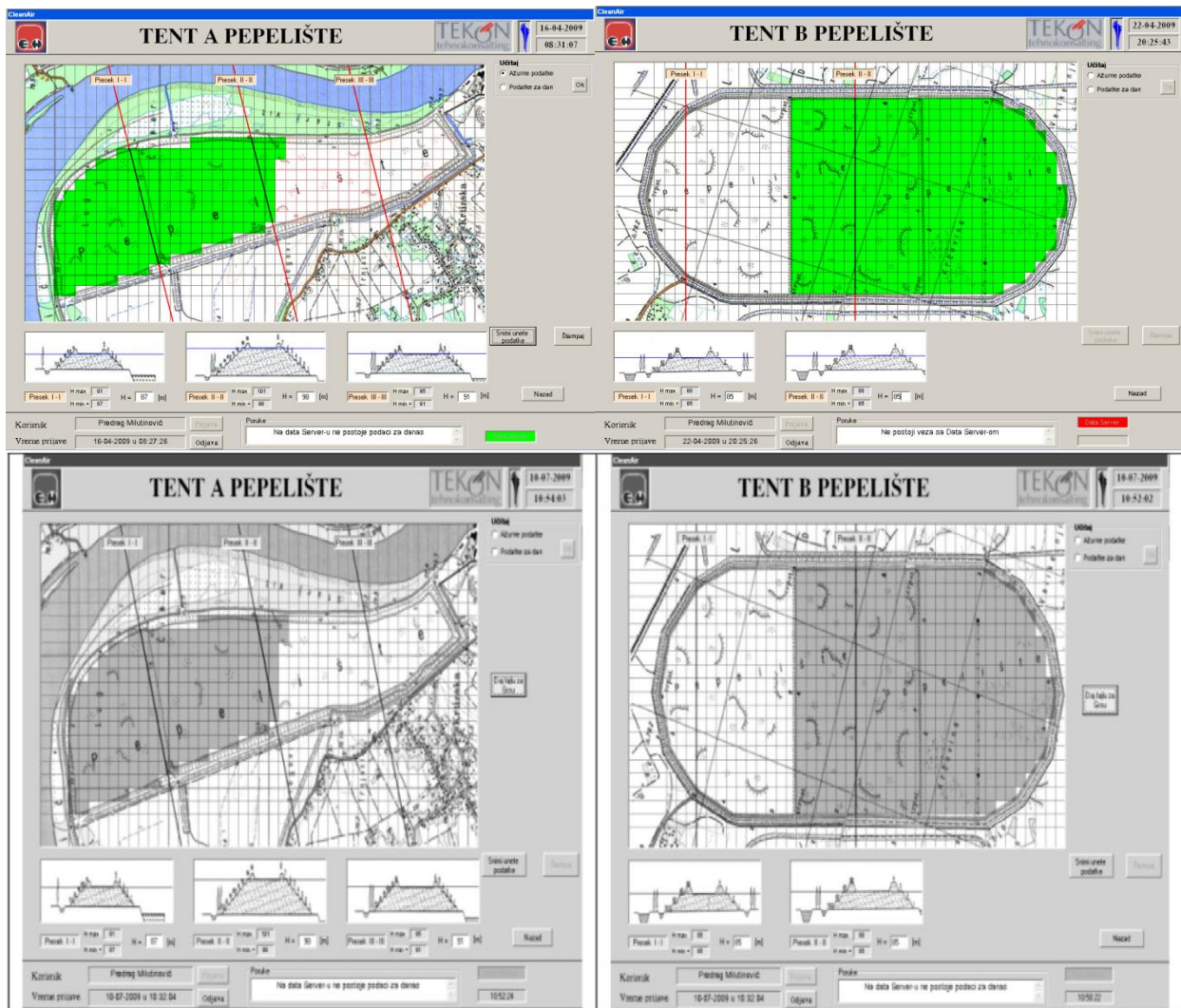
Druga dva ekstremna uslova za emisiju letećeg pepela iz dimnjaka javljaju se u slučaju stabilne i nestabilne atmosferske klase stabilnosti koje se odlikuju malom brzinom vetra i vedrim nebom bez oblaka. Ovakve situacije se smatraju kao "idealni" slučajevi za ispitivanje da li leteći pepeo iz TNTA i TNTB može da stigne do naseljenih delova grada pod navedenim okolnostima.

Kao što je već ranije napomenuto, svaki matematički model za atmosfersku disperziju ima najmanje tri glavne komponente (problema):

- količina pepela emitovana iz termoelektrana
- način transporta zagađujućih čestica kroz vazduh
- suva ili mokra depozicija

Uzimajući u obzir namenu modela (akcidentalna ili kontinualna emisija), raspoloživost meteoroloških podataka i kompjuterske resurse, optimalno rešenje je Gausov model dimne perjanice [16], [30] - [33]. Domen modela je iznosio  $53.5 \text{ km} \times 32.5 \text{ km}$  i to je dovoljno velika površina da pokrije sve izvore kao i ispitivano područje Beograda koje je najbliže termoelektranama. Takođe je pokriveno i kontrolno merno mesto na Novom Beogradu (tačka NB na slici 3.8).

Da bi se uradio proračun količine pepela koji se podigne u atmosferu, suvi delovi deponija su podeljeni u veliki broj malih ćelija (izvora prašine), dimenzija 100 m × 100 m. Zbir navedenih malih površina se tretira kao vremenski kontinualni izvor prašine definisan preko svojih geografskih koordinata (dužine, širine i visine). Na slici 3.11 dat je detaljan geometrijski prikaz oba pepelišta sa podelom na male površine.



Slika 3.11. Geometrijski prikaz pepelišta Tenta sa aktivnom površinom (bela boja) ~130 ha i pepelišta Tent B sa aktivnom površinom (bela boja) ~ 200 ha.

U slučaju kontinuiranog izvora zagađujuće materije koristi se Gausov pravolinijski model dimne perjanice (Gaussian plume model) koji je opisan jednačinom (2.4) [16].

Lokacija sa maksimalnom koncentracijom je za  $y = 0$  i  $z = 0$ . Maksimalna koncentracija  $C_{max}(x,0,0)$ , u slučaju kada su  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  proporcionalne, može se izračunati prema sledećoj jednačini:

$$C_{max}(x, 0, 0) = \frac{2Q\sigma_z}{\pi h^2 e u \sigma_y}$$

gde je:

$e$  prirodni logaritam

$$\sigma_z = \frac{h}{\sqrt{2}}$$

Difuzioni koeficijenti  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  zavise od atmosfenske klase stabilnosti i rastojanja od izvora u pravcu vetra. Kao što je već pomenuto, gravitaciono taloženje teških čestica izračunava se tako što se efektivna visina dimnjaka  $H$  modifikuje članom [23], [24]:

$$H - \frac{v_s x}{u}$$

gde je:

$v_s$  granična brzina [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$x$  rastojanje niz vetar od izvora [m]

Uobičajene vrednosti za brzinu taloženja  $v_s$  su između od 0.01 do 1  $\text{cm s}^{-1}$  u zavisnosti od veličine čestice. Uzeto je da je brzina taloženja 0.8  $\text{cm s}^{-1}$  [34].

Prostorne koncentracije zagađujućih čestica iz tačkastih izvora (dimnjaci) i iz prostorno površinskih izvora (pepelišta) se dobijaju pomoću jednačine (2.4).

Najvažniji mehanizam za podizanje prašine sa zemlje u atmosferu je peskarenje tj. resuspenzija čestica zagađujuće materije sa tla vetrom (slika 3.6).

U eksperimentu se polazi od pretpostavke da je veličina čestice letećeg pepela u proseku 10  $\mu\text{m}$  tj. da spada u grupu  $\text{PM}_{10}$  [27], [28]. Uz ovu pretpostavku većina emitovanih čestica treba da dostigne velike razdaljine od izvora.

Karakteristike dimnjaka prikazane su u tabeli 3.5:

*Tabela 3.5. Fizičke karakteristike dimnjaka*

<b>Dimnjak</b>	<b>Visina (m)</b>	<b>Prečnik (m)</b>	<b>Temperatura izlaznih gasova (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Vertikalna izlazna brzina (<math>\text{ms}^{-1}</math>)</b>	<b>Snaga izvora (kg/h)</b>
TENTA-1	150	10.5	170	10	1000
TENTA-2	220	16.9	170	10	1000
TENTB-1	280	30.0	170	10	1000

Karakteristike pepelišta TNTA i TNTB date su u tabeli 3.6:

*Tabela 3.6. Karakteristike pepelišta TNTA i TNTB*

<b>Pepelište</b>	<b>TNT A</b>	<b>TNT B</b>
Površina	~380 ha; aktivno ~ 130 ha	~600 ha; aktivno ~ 200 ha
Visina	~18-25 m	~29 m
Obim	~112.000.000 $\text{m}^3$	~174.000.000 $\text{m}^3$



Meteorološki podaci koji se koriste u eksperimentu dobijeni su sa automatske meteorološke stanice sa sensorima za pravac i intenzitet vetra na 10 metara visine, zatim sa sensorima za temperaturu i relativnu vlažnost na 2 m i za globalno Sunčevo zračenje, pritisak i količinu padavina. Dodatni senzori za vetar i temperaturu postavljeni su na vrhu obližnjeg rezervoara za vodu na visini od 45 m. Podaci su uzimani na svakih 10 minuta.

Izvedene su tri grupe eksperimenata. U prvoj grupi vetar je bio intenziteta  $1 \text{ ms}^{-1}$ , dok su klase stabilnosti bile: stabilna, neutralna i nestabilna. U drugoj grupi eksperimenata, vetar je bio jak, preko  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Treća grupa eksperimenata uključivala je realne meteorološke podatke i odgovarajuće emisije iz dimnjaka.

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Procena uticaja reaktora na okolinu

Polazna informacija za ovu vrstu analiza je emisija aktivnosti/radionuklida u jedinici vremena i trajanje emisije. Monitoring emisije na svetlom otvoru dimnjaka-ventilacije treba da obezbedi ovaj ulazni podatak za matematički model. U JP „NOS” nisu mogli da se dobiju takvi podaci, jer adekvatan monitoring emisije aktivnosti/radionuklida, za vreme rada nuklearnog reaktora „RA”, nikad nije bio uspostavljen. Zbog toga je u radu korišćen izveštaj o emisiji aktivnosti/radionuklida, Brook Haven laboratorije US, za jednu izabranu godinu, koji je kao javna informacija dostupan preko interneta (tabela 4.1). I pored propisane filterske zaštite ugrađene u ventilacioni sistem nuklearnog reaktora Brook Haven laboratorije, koji se po snazi može uporediti sa reaktorom „RA” u JP „NOS”, procenjuje se da se u toku godine oko 1% inventara aktivnosti/radionuklida emituje u atmosferu, što je u skladu i sa podacima monitoringa vazduha u zoni uticaja ventilacije, pomenutog reaktora Brook Haven laboratorije.

Pored ovako zadate emisije, u radu su korišćeni dostupni podaci o karakteristikama ventilacije reaktora „RA”, podaci sa automatske stanice čiji su senzori postavljeni na meteorološkom stubu visine 40 m u blizini reaktora „RA”, 3D topografija terena oko Instituta „Vinča”, fizičke karakteristike polutanata i dozni faktori dostupni preko međunarodnih publikacija [35] - [44].

Tabela 4.1. Pretpostavljena jačina izvora, na osnovu BrookHaven National Laboratory

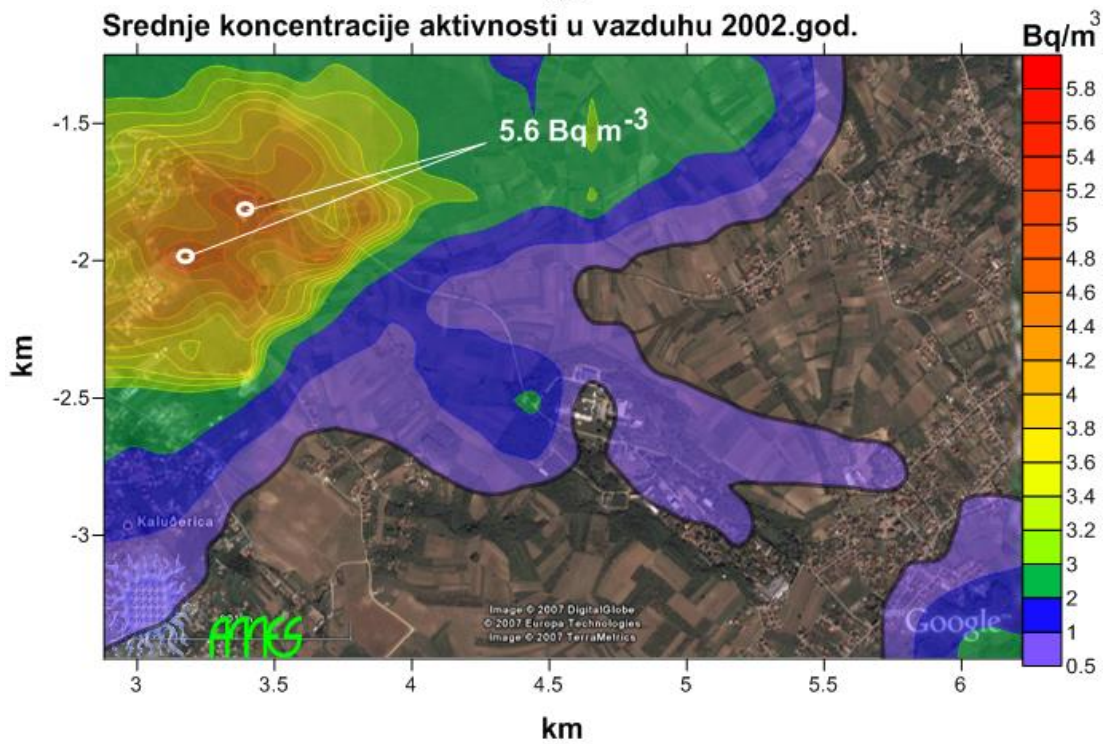
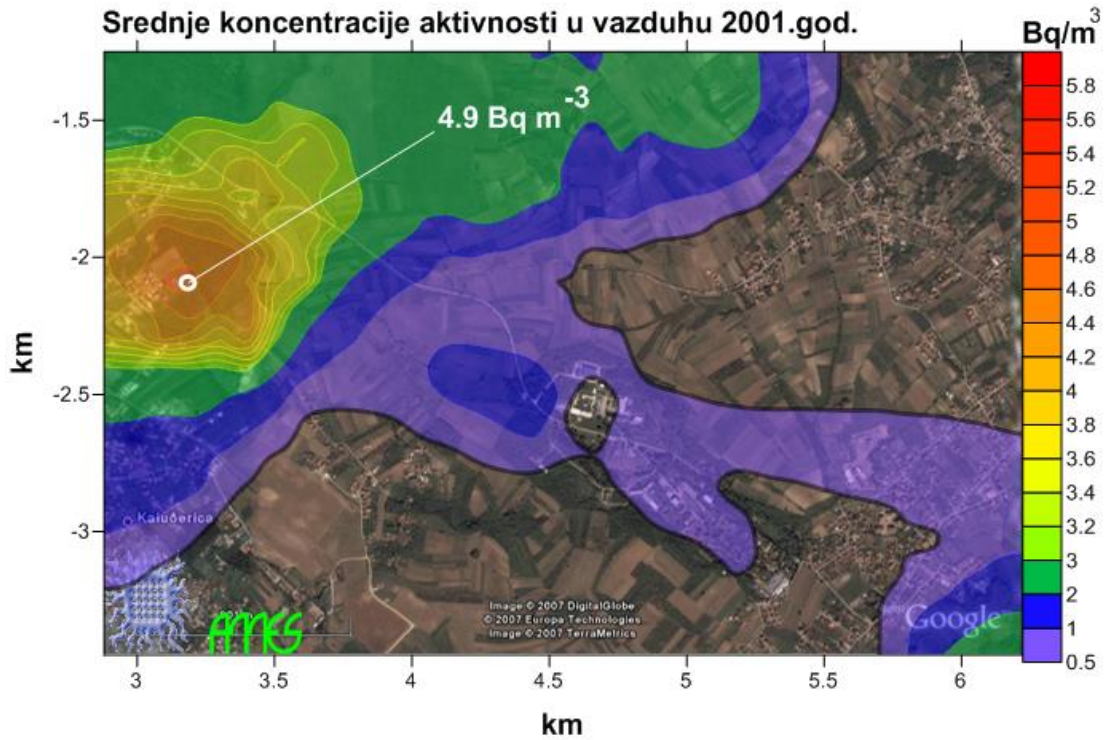
nuklid	Ar41	Al26	As76	Ba128	Ba140	Br82	Ce141	
Emisija	8.2e+13	4.5e+2	1.7e+7	6.9e+6	5.8e+6	3.2e+8	6.7e+3	Bq/god

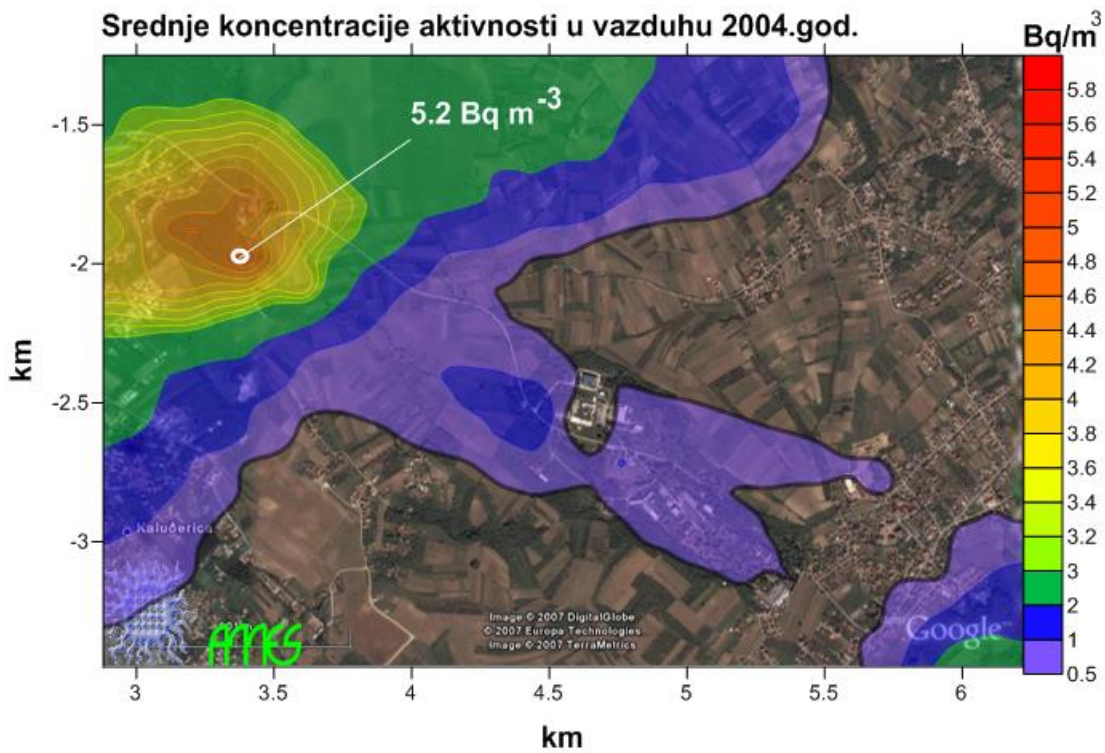
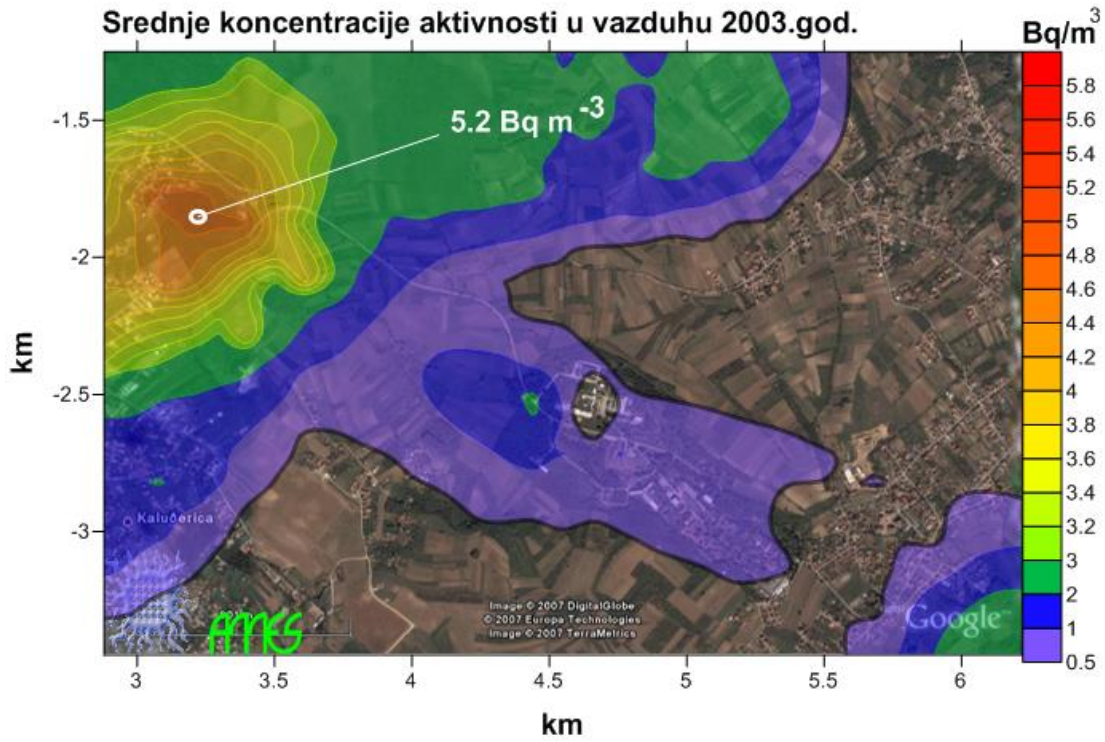
nuklid	Ce144	Co60	Fe59	Hg203	I124	I131	I133	
Emisija	5.3e+4	9.8e+4	1.4e+5	2.2e+6	7.0e+5	1.2e+6	1.3e+7	Bq/god

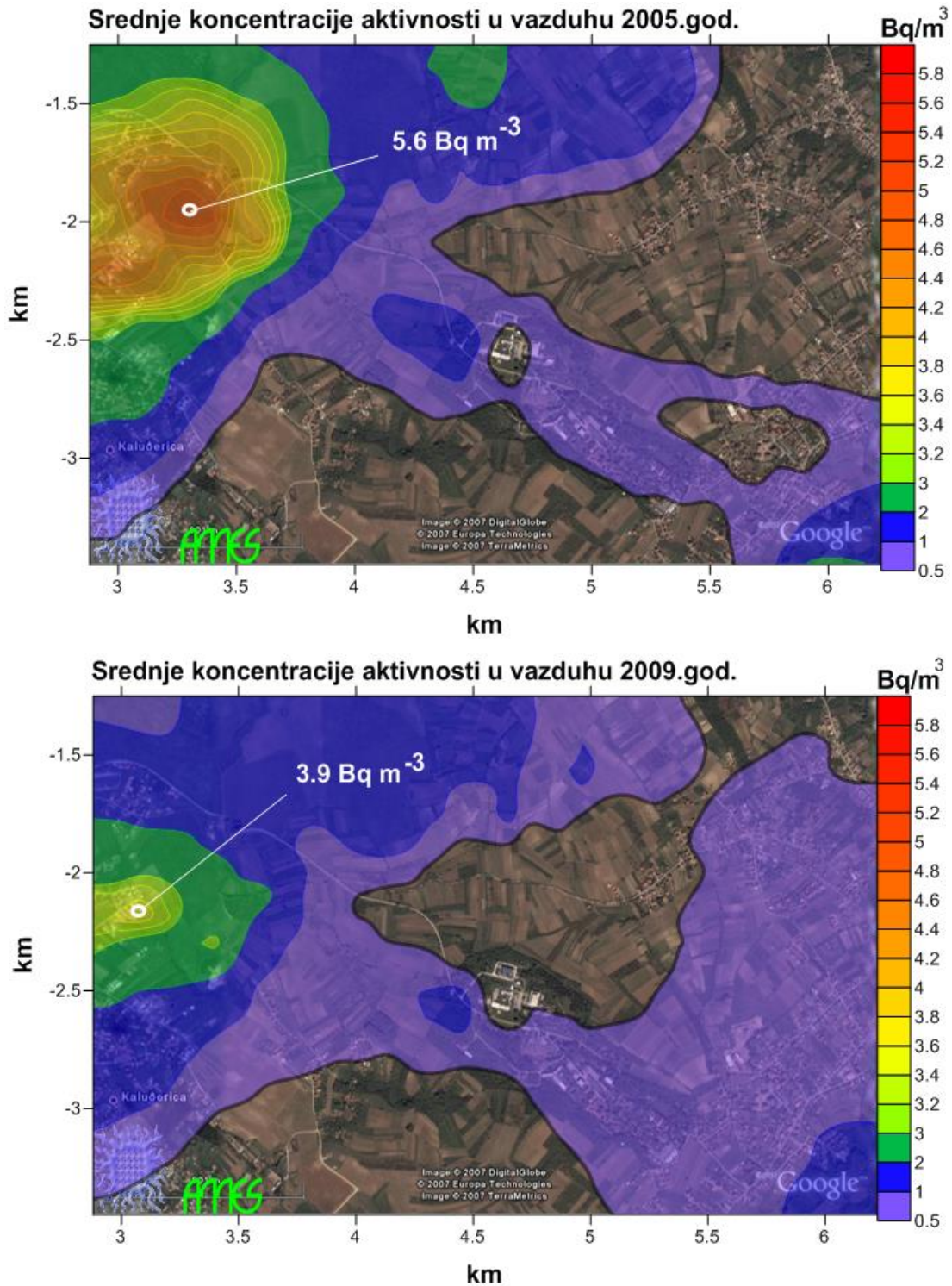
nuklid	La140	Mo99	Na24	Sb122	Sc46	Se75	Sr91	
Emisija	3.0e+7	5.7e+3	8.5e+6	1.8e+4	7.9e+2	7.5e+3	1.2e+7	Bq/god

nuklid	Tc99m	Ti44	Xe133	Xe135	Zn65	Zn69m		
Emisija	2.2e+6	4.8e+6	3.8e+6	4.0e+7	7.2e+5	5.3e+4		Bq/god

Emitovani radionuklidi nose sa sobom određenu aktivnost, koja predstavlja broj njihovih raspada u jedinici vremena. Jedinica za aktivnost je bekerel i ona predstavlja broj raspada u jednoj sekundi. Aktivnost izvora, u zavisnosti od vremena poluraspada radionuklida, menja se sa vremenom, odnosno sa rastojanjem od izvora. Polja srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti, dobijena za prikazane emisije radionuklida (tabela 4.1) uzimajući pri tome u obzir karakteristike izvora, vremenske uslove i karakteristike tla, prikazana su grafički na slici 4.1.

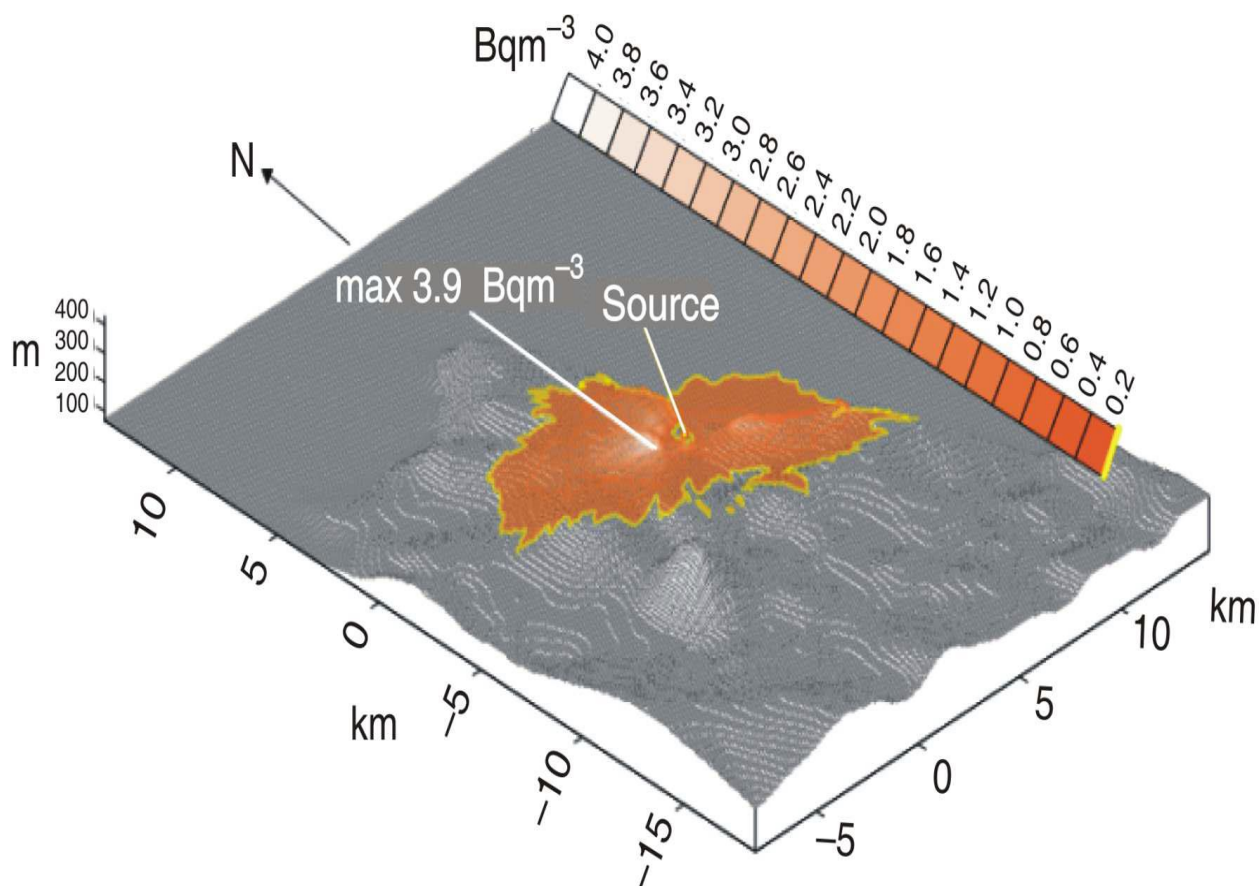






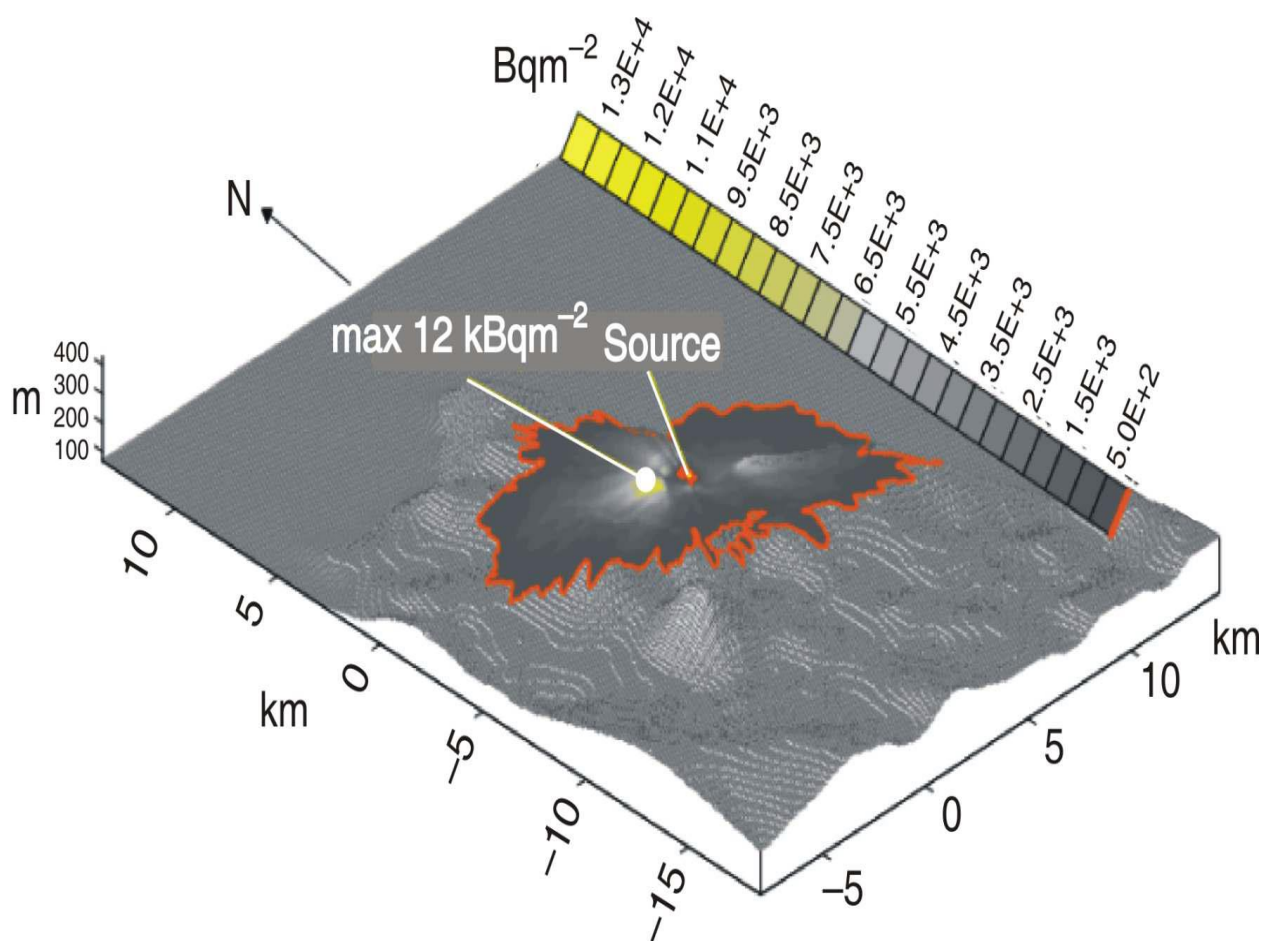
Slika 4.1. Polja srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti za pretpostavljenu emisiju aktivnosti/radionuklida

Na slici 4.2 dat je prikaz polja godišnje koncentracije aktivnosti u vazduhu na 2 m iznad tla. Kao što se vidi na slici maksimalna godišnja koncentracija aktivnosti u vazduhu iznosi  $3.9\text{Bqm}^{-3}$ .



Slika 4.2. Maksimalna srednja godišnja koncentracija aktivnosti u vazduhu, na 2 m iznad tla iznosi  $3.9\text{Bqm}^{-3}$

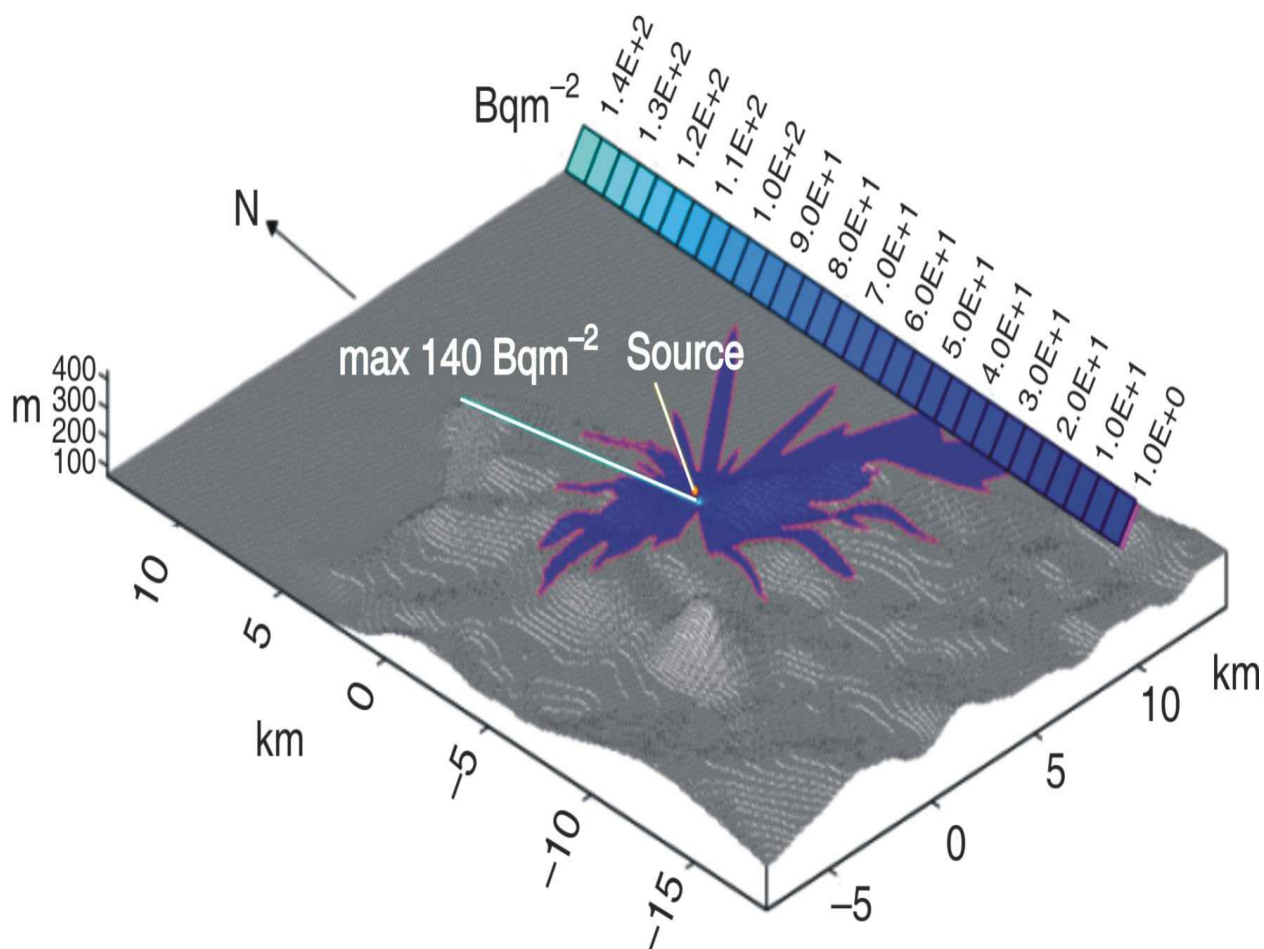
Suva depozicija aktivnosti je računata iz koncentracije aktivnosti u vazduhu i brzine depozicije za odabrani teren i inventar emitovanih radionuklida za godinu dana. Brzina suve depozicije uzeta je iz literature i preporuke da je brzina  $0.008 \text{ ms}^{-1}$  [34]. Polja suve depozicije korespondiraju sa poljima koncentracije aktivnosti i po obliku i po zonama sa maksimalnim vrednostima.



Slika 4.3. Polje godišnjih aktivnosti suve depozicije

Na slici 4.3 vidi se da je maksimalna godišnja vrednost suve depozicije  $12 \text{ kBq m}^{-2}$ .





Slika 4.4. Polje godišnjih aktivnosti mokre depozicije

Na slici 4.4 vidi se da je maksimalna godišnja vrednost mokre depozicije  $140 \text{ Bqm}^{-2}$ .

#### 4.1.1 Polja doza

Doze inhalacije računane su kao proizvod brzine disanja, vremena izlaganja, koeficijena doze inhalacije i koncentracije aktivnosti za svaki radionuklid iz inventara emisije. Vreme izlaganja odgovaralo je godišnjem periodu za koji su računane doze, pri brzini udisanja vazduha za odraslog čoveka od  $0.95 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Doze spoljašnjeg ozračivanja, koju primi posmatrač pri tlu, koji je obavijen oblakom radionuklida/aktivnosti, za posmatrane mesečne i godišnje periode, proporcionalna je koncentraciji aktivnosti u vazduhu pri tlu, vremenu izlaganja i odgovarajućih doznih koeficijenata za radionuklide prisutne u oblaku.

Doza spoljašnjeg ozračivanja od radionuklida dospelih na tlo u obliku suve i mokre depozicije, računata je uz konzervativnu pretpostavku da se radionuklidi, za posmatrane vremenske intervale, ne podižu sa tla pri jakom vetru i da se ne spiraju sa padavinama u dublje slojeve tla i podzemne vodotokove.

Efekat jonizujućeg zračenja u čovečijem telu izražava se fizičkom veličinom koja se zove apsorbovana doza. Jedinica za apsorbovanu dozu je grej (Gy),  $Gy=J/kg$ . Proizvod apsorbovane doze i više faktora koji izražavaju uticaj vrste i energije zračenja, naziva se ekvivalentna doza. Ovi faktori su bezdimenzionalni, pa se i ekvivalentna doza izražava u jedinicama J/kg, koja se u ovom slučaju naziva sivert (Sv). Pod pojmom doza, u ovom radu, podrazumeva se ekvivalentna doza.

Polja godišnjih doza spoljašnjeg ozračivanja za hipotetičkog stanovnika, računata su kao doza inhalacije, doza od boravka u radioaktivnom oblaku i kao doza od radioaktivnog materijala deponovanog na tlo u obliku suve i mokre depozicije. Ukupna godišnja doza računata je kao zbir navedenih doza. Granična vrednost ukupne godišnje doze koja potiče od veštačkih izvora, ne sme da pređe 1% od granične vrednosti godišnje doze koju prima stanovnik od fona prirodnih izvora, koja na godišnjem nivou iznosi 1 mSv. Na taj način doprinos veštačkih izvora, ukupnoj godišnjoj dozi ne bi smeo da bude veći od 10  $\mu$ Sv. Ukupna godišnja doza za hipotetičkog stanovnika, u okolini nuklearnog reaktora "RA", za hipotetičku emisiju radionuklida iznosi 7.3 $\mu$ Sv što je manje od maksimalne dozvoljene vrednosti tj. 10  $\mu$ Sv [23].

#### **4.1.2 Eksperimentalna provera modela**

Validacija modela je neophodan korak u cilju testiranja tj. provere bilo kog tipa modela da bi se sa izvesnom sigurnošću model mogao koristiti prilikom donošenja odluka. Na osnovu svega prethodno pomenutnog (ulazni podaci, dimenzije izvora, meteorološki uslovi, topografija terena, fizičke i hemijske karakteristike emitovanih čestica, polja doza), urađena je analiza

disperzije radionuklida kroz ventilacioni ispušt nuklearnog reaktora u granični sloj atmosfere tokom jednogodišnjeg rutinskog rada u 3 koraka:

1. Izvršeno je testiranje matematičkog modela - Gausov pravolinijski model dimne perjanice (2.4) koji je proširen sa modulima za izračunavanje doza koju bi primio hipotetički stanovnik u okolini nuklearnog reaktora u toku jedne godine. Model je pretvoren u programski kod (Fortran) a ulazni podaci su korišćeni iz publikacija IAEA.

Za validaciju modela korišćena su 4 radionuklida:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ . Radionuklidi se u ovom eksperimentu, emituju u atmosferu iz izvora zadate visine od 15 m, a procenjuje se da bi u atmosferu tokom dekomisije jednog istraživačkog reaktora, u toku jedne godine bila emitovana aktivnost u jedinici vremena, po radionuklidu (jačina izvora), prema sledećoj tabeli:

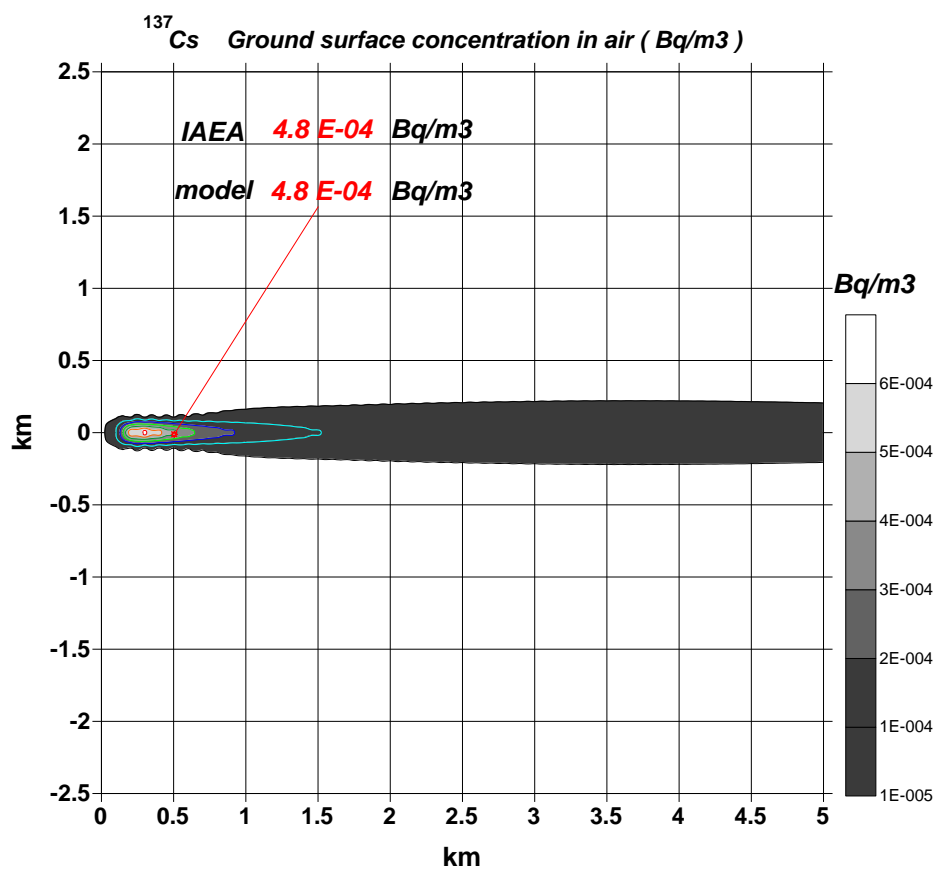
*Tabela 4.2. Jačina izvora po radionuklidu (brzina emisije)*

	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{154}\text{Eu}$	
<b>Jačina izvora</b>	0.95	0.003	0.06	0.03	Bq/s

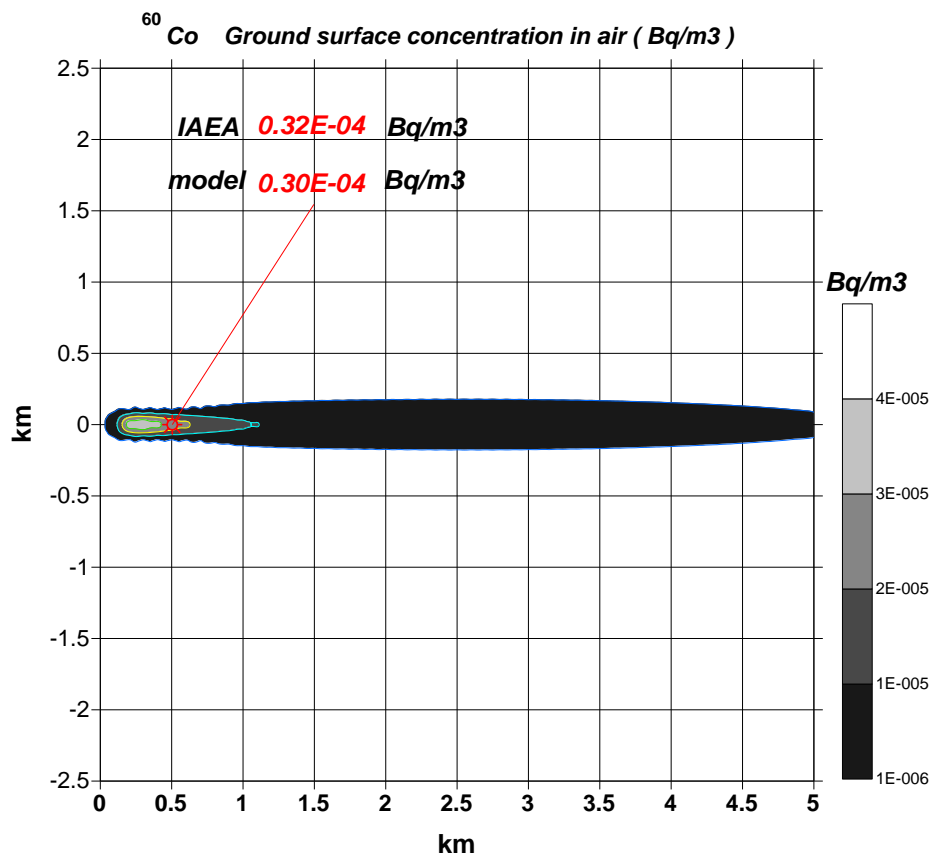
Rezultati koncentracije aktivnosti radionuklida u vazduhu 2 m iznad tla prikazani su u tabeli 4.3 kao i na slikama 4.5 – 4.8:

*Tabela 4.3. Koncentracija aktivnosti na 2m iznad tla, po radionuklidu*

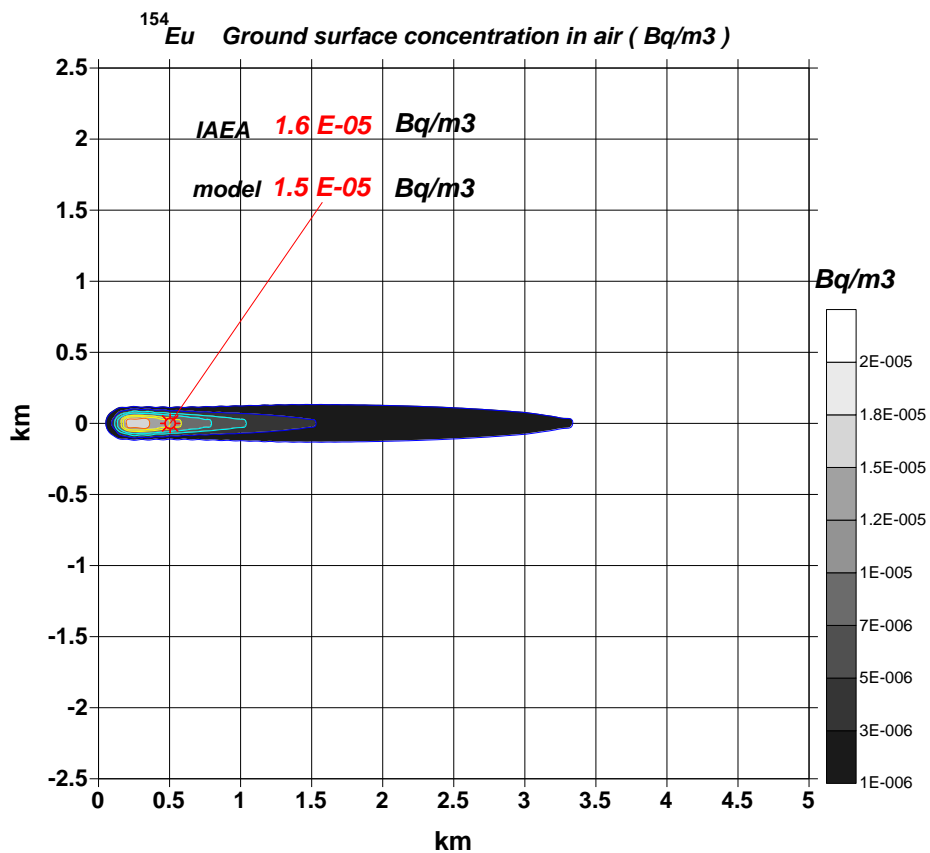
<b>Radionuklid</b>	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{154}\text{Eu}$
<b>Modelirano [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	4.8E-04	1.5E-06	3.0E-05	1.5E-05
<b>IAEA dokument [Bq m<sup>-3</sup>]</b>	4.8E-04	1.6E-06	3.2E-05	1.6E-05



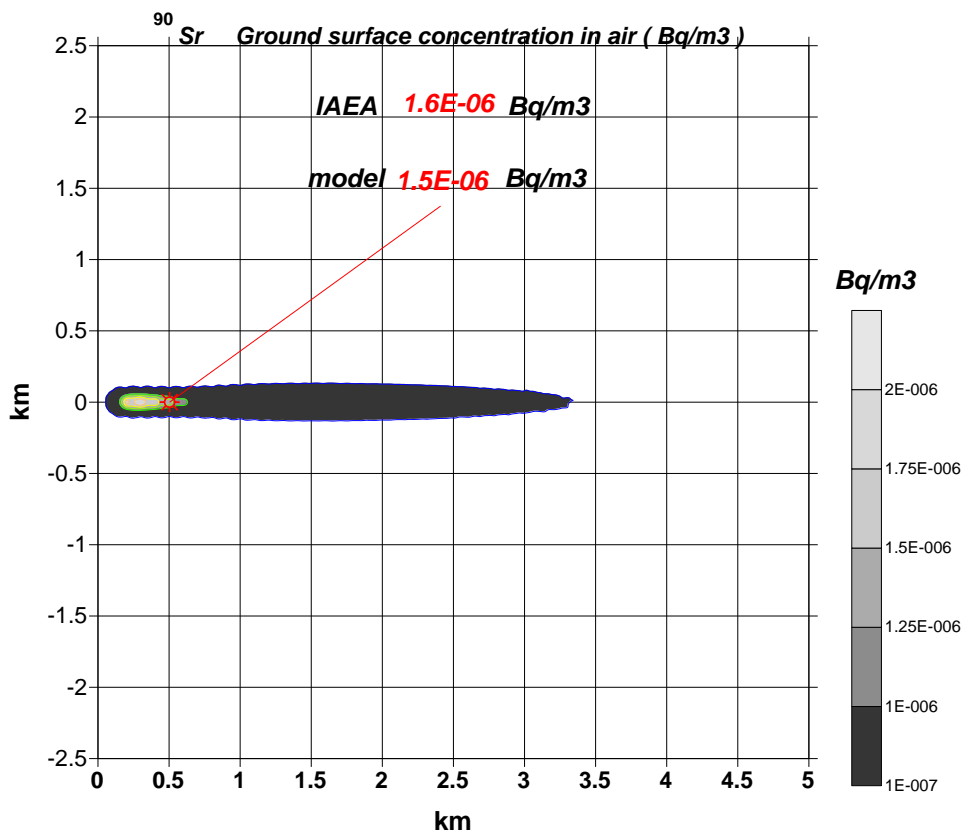
Slika 4.5. Modelovana koncentracija aktivnosti u vazduhu pri tlu za <sup>137</sup>Cs



Slika 4.6. Modelovana koncentracija aktivnosti u vazduhu pri tlu za <sup>60</sup>Co



Slika 4.7. Modelovana koncentracija aktivnosti u vazduhu pri tlu za <sup>154</sup>Eu



Slika 4.8. Modelovana koncentracija aktivnosti u vazduhu pri tlu za  $^{90}\text{Sr}$

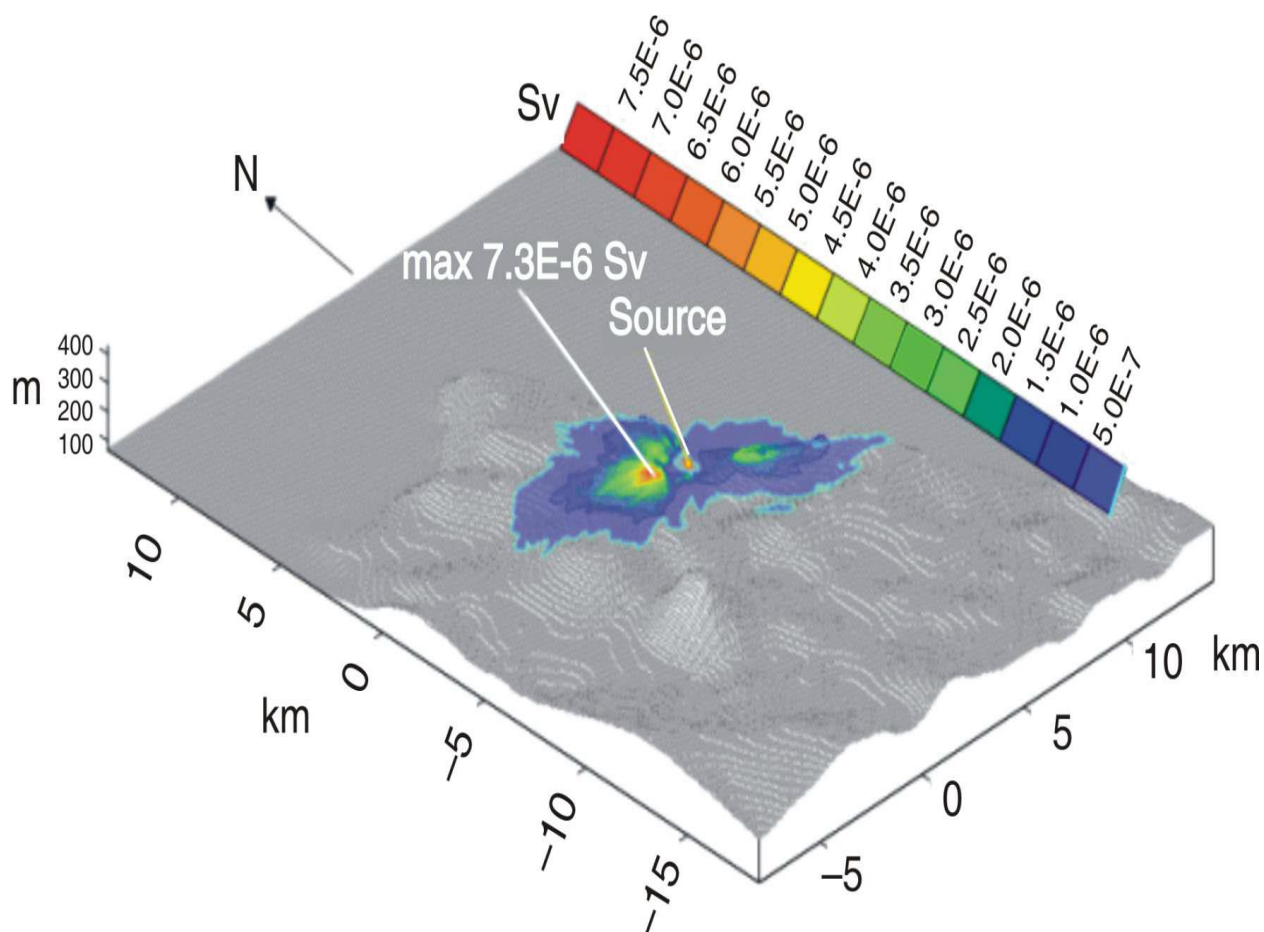
Suva depoziciju je modelovana primenom modela nagnute perjanice i sa zadatom vrednošću za brzinu suve depozicije  $v_s = 0.694 \text{ms}^{-1}$ . Pretpostavlja se da vetar duva konstantnom brzinom od  $2 \text{ m s}^{-1}$  sa zapada, a da je kontrolna tačka na rastojanju 500 m niz vetar od izvora i na visini 2 m iznad tla, pri klasi stabilnosti F. Godišnja aktivnost suve depozicije radionuklida data je u tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Godišnja aktivnost suve depozicije radionuklida

Radionuklid	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{154}\text{Eu}$
Modelirano [Bqm <sup>-2</sup> ]	154.2	0.49	9.74	4.87
IAEA dokument [Bqm <sup>-2</sup> ]	174	0.6	12	6

- Rezultati dobijeni poređenjem vrednosti IAEA i modelovanih vrednosti, dobijeni generalisanim matematičkim modelom, pokazuju da se model korišćen u ovoj doktorskoj disertaciji, zbog razlika rezultata manjih od ~10 % može koristiti za planirane analize [45].
2. Drugi korak analize je simulacija disperzije radionuklida od interesa iz izduvne cevi nuklearnog reaktora u okolinu u cilju dobijanja vrednosti koncentracije aktivnosti u vazduhu kao i suve i mokre depozicije. Rezultati i maksimalne vrednosti su date na slikama 4.2 – 4.4.
  3. Poslednji korak je uključivao modelovanje polja jačine doze kojoj je izložen hipotetički posmatrač/stanovnik u okolini nuklearnog reaktora. Ukupni dozni modul, tj. ukupna godišnja doza zračenja se dobija zbirom doze inhalacije, doze od boravka u oblaku i doze od suve i mokre depozicije (slika 4.9). Maksimalna vrednost ukupne godišnje doze iznosi 7.3  $\mu\text{Sv}$ .



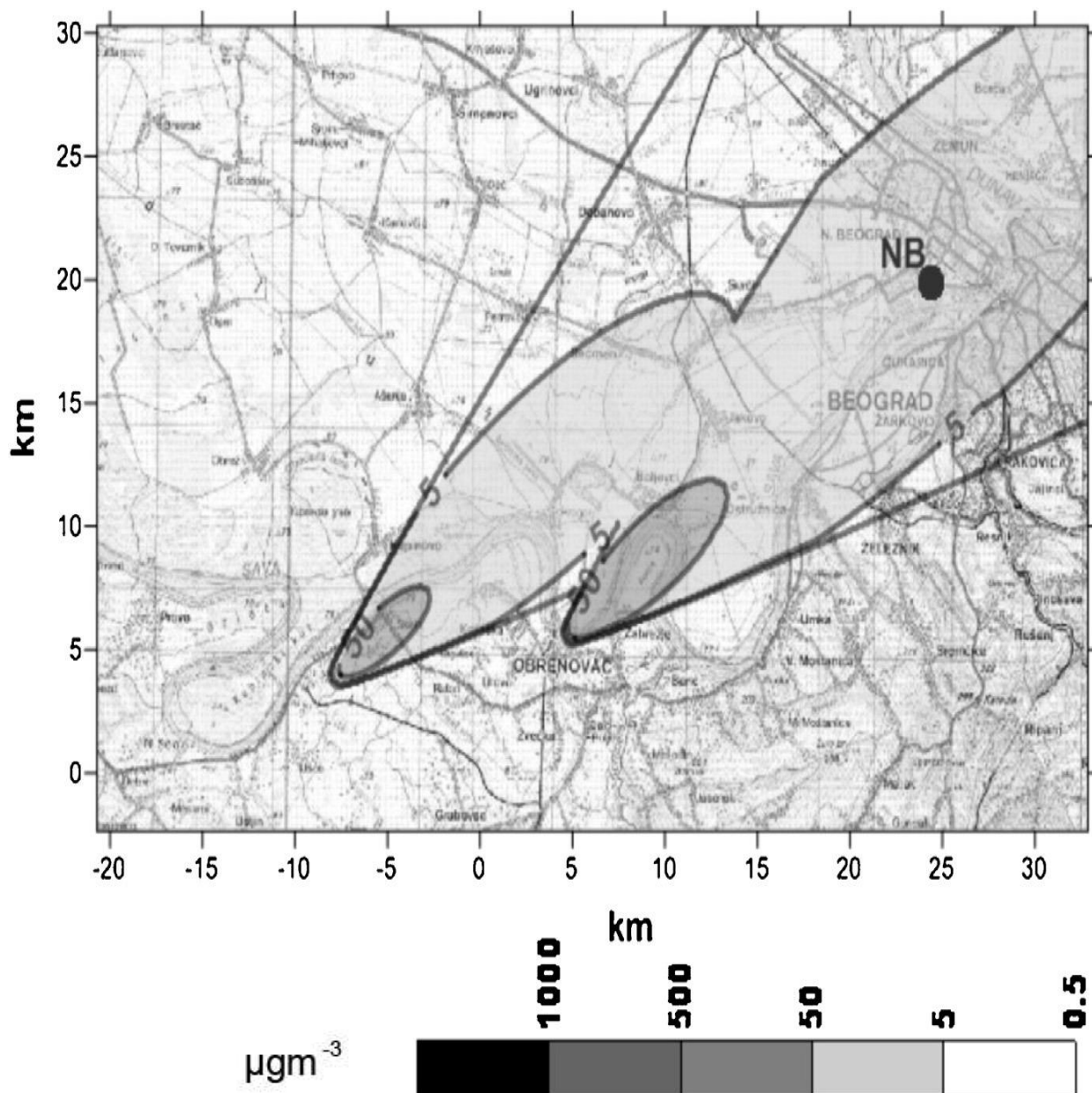


Slika 4.9. Ukupna godišnja doza zračenja i njena maksimalna vrednost

## 4.2 Procena uticaja TNTA i TNTB na Beograd

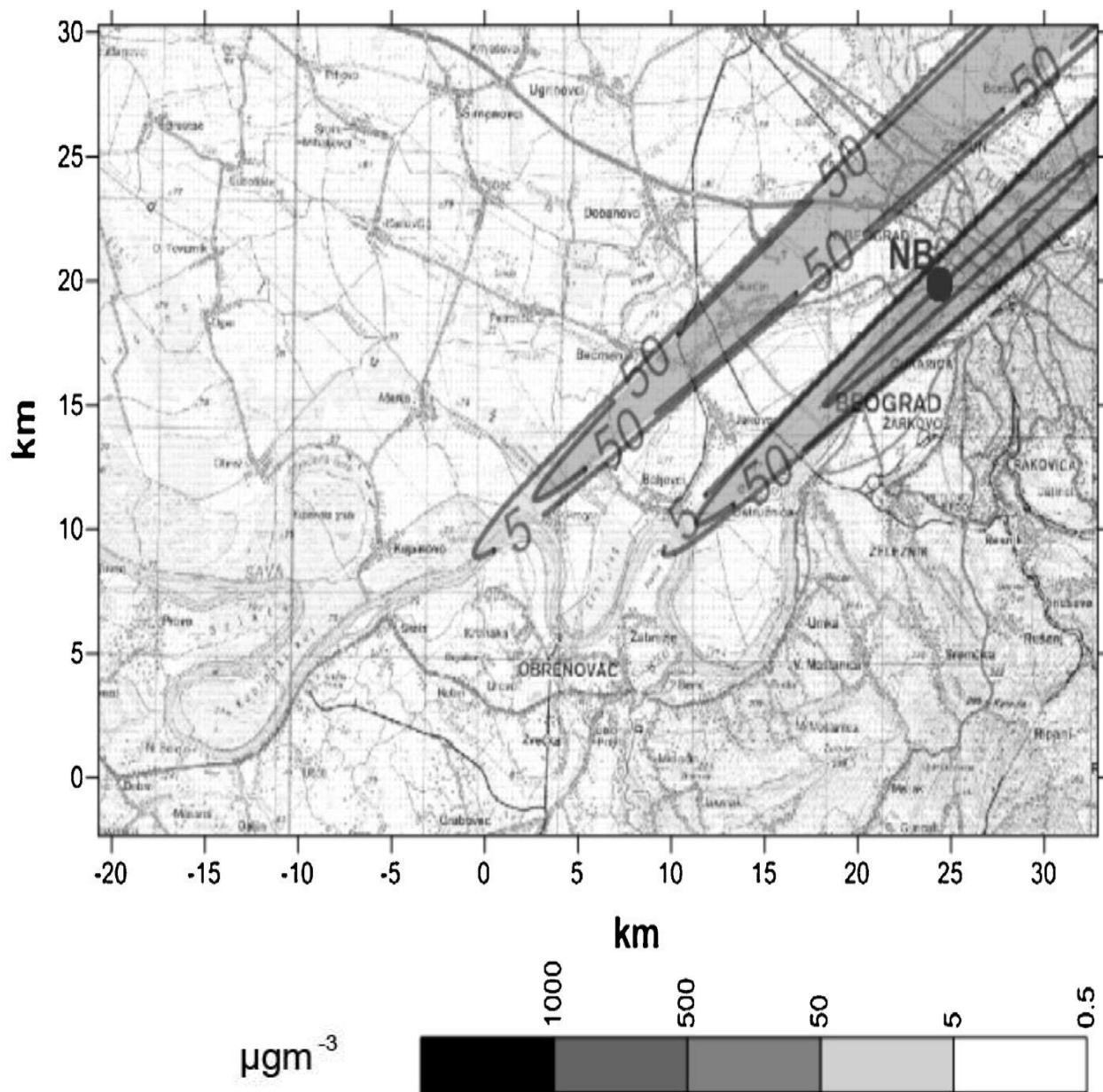
Izvršene su tri grupe eksperimenata. Prva grupa je urađena za 3 klase stabilnosti – A, D, F i za isti intenzitet vetra.

Na slici 4.10, predstavljeni su rezultati u slučaju nestabilne stratifikacije (klasa stabilnosti A) i brzine vetra od  $1 \text{ ms}^{-1}$ . Sa slike se konstatuje da su najveće koncentracije zagađivača u blizini dimnjaka. Za viši dimnjak (sa leve strane) zona maksimalne koncentracije je prilično mala ( $< 5 \text{ km}$ ), dok je za drugi zona skoro  $10 \text{ km}$ .



Slika 4.10. Dimnjaci u slučaju klase stabilnosti A i intenziteta vetra  $1 \text{ ms}^{-1}$

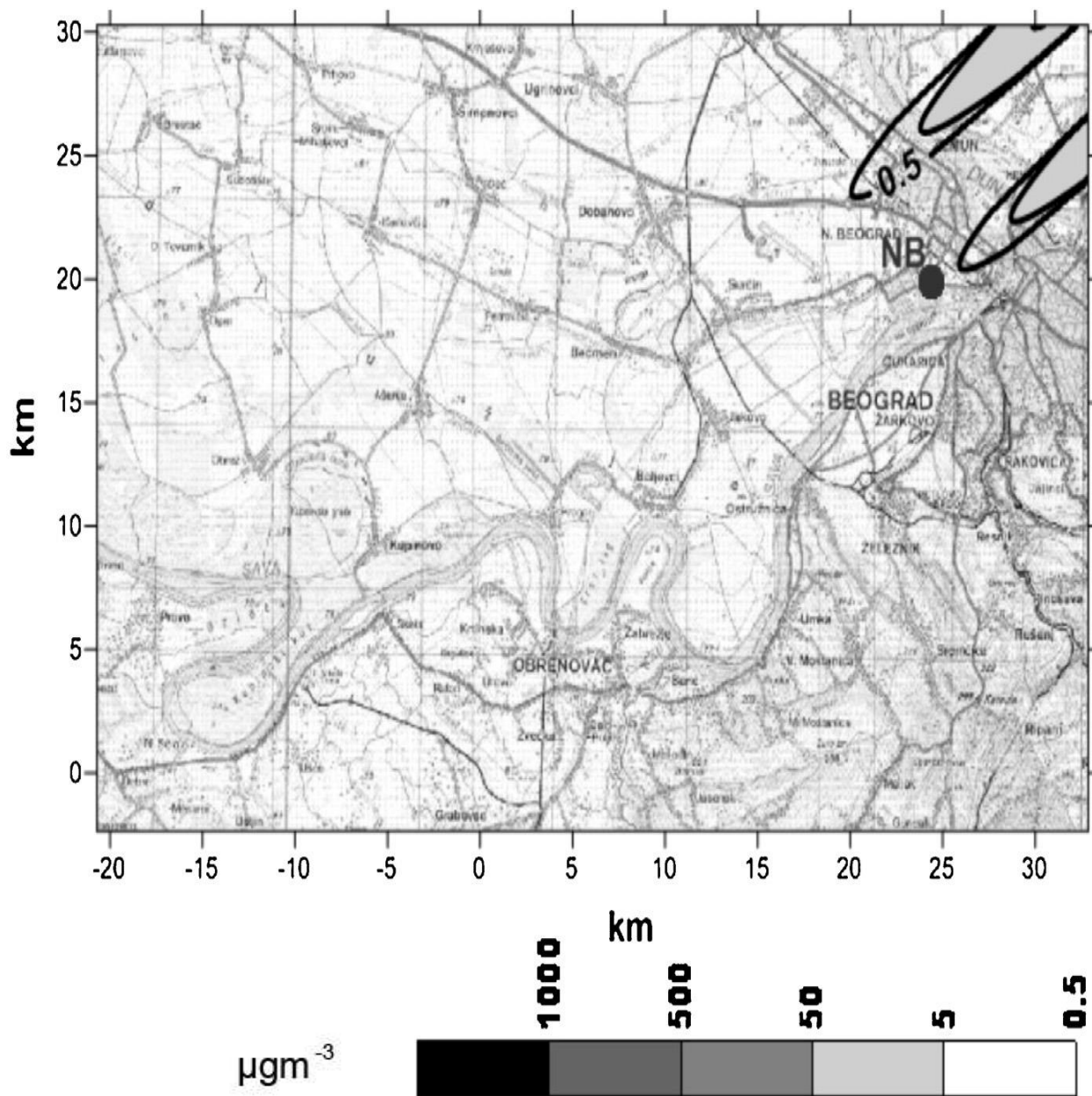
Sledeći slučaj je prikazan na slici 4.11. Za neutralnu stabilnost (klasa D) i isti vetar, koncentraciona polja se razlikuju od prethodnog slučaja.



Slika 4.11. Dimnjaci u slučaju klase stabilnosti D i intenziteta vetra  $1 \text{ m s}^{-1}$

Zone maksimalnih koncentracija su izdužene u pravcu vetra. Glavni razlog za to jeste što veći deo koncentracije ostaje u višim slojevima za razliku od prvog slučaja.

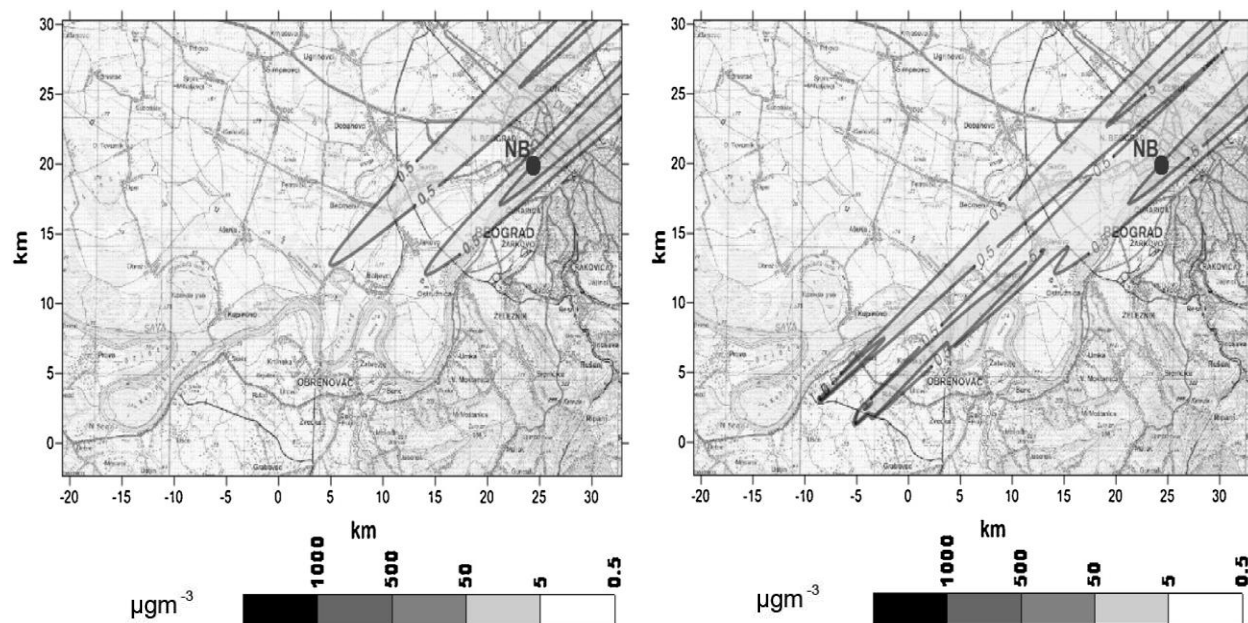
Na slici 4.12 prikazan je treći slučaj kada je stabilna stratifikacija (klasa F).



Slika 4.12. Dimnjaci u slučaju klase stabilnosti  $F$  i intenziteta vetra  $1 \text{ ms}^{-1}$

Zone zagađenosti se značajno pomeraju od izvora zbog jake stabilnosti koja u velikoj meri smanjuje vertikalnu difuziju. Iste izolinije su pomerene za više od 30 km nego u slučaju nestabilne stratifikacije.

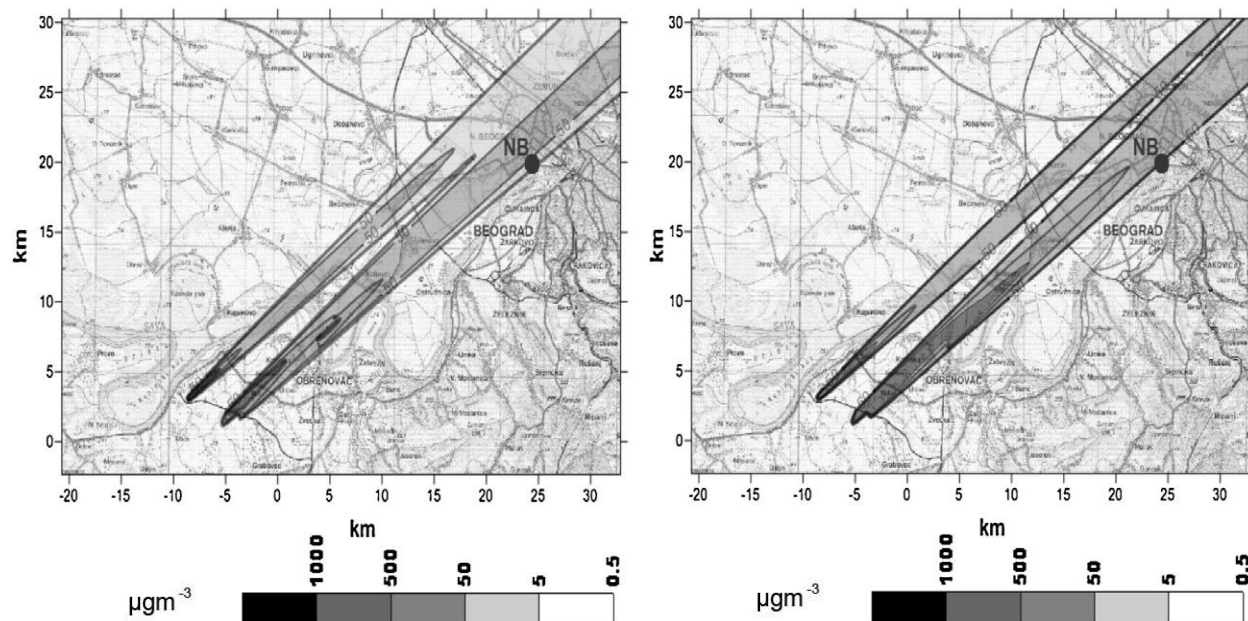
Druga grupa eksperimenata uključuje izrazito jake vetrove u model. Na slici 4.13, leva strana prikazuje zone koncentracije pri brzini vetra do  $10 \text{ ms}^{-1}$  tj. do granice (limita) za podizanje pepela u vazduh. Iz tog razloga se računa samo zagađenje od dimnjaka, jer se pepeo nije podigao.



Slika 4.13. Zone koncentracije pepela pri neutralnoj klasi stabilnosti – levo brzina vetra do  $10 \text{ ms}^{-1}$  – desno brzina vetra  $10.1 \text{ ms}^{-1}$

Desni grafik prikazuje zone koncentracije kada je brzina vetra dostigla prag vrednosti podizanja pepela i to je  $10.1 \text{ ms}^{-1}$ . U ovom slučaju se javljaju maksimalne koncentracije pepela, jer se računa koncentracija i od dimnjaka i od pepelišta.

Na narednoj slici 4.14, sa leve strane su prikazane koncentracije za intenzitet vetra od  $15 \text{ ms}^{-1}$  a na desnoj strani za vetar intenziteta  $20 \text{ ms}^{-1}$ .

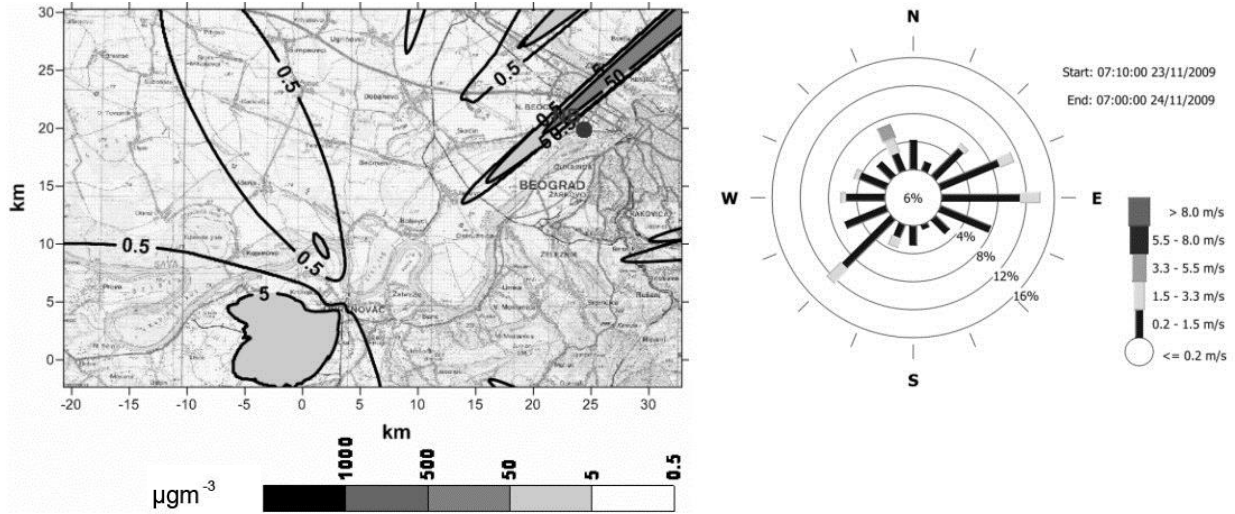


Slika 4.14. Zone koncentracije pepela pri neutralnoj klasi stabilnosti – levo brzina vetra  $15 \text{ ms}^{-1}$   
– desno brzina vetra  $20 \text{ ms}^{-1}$

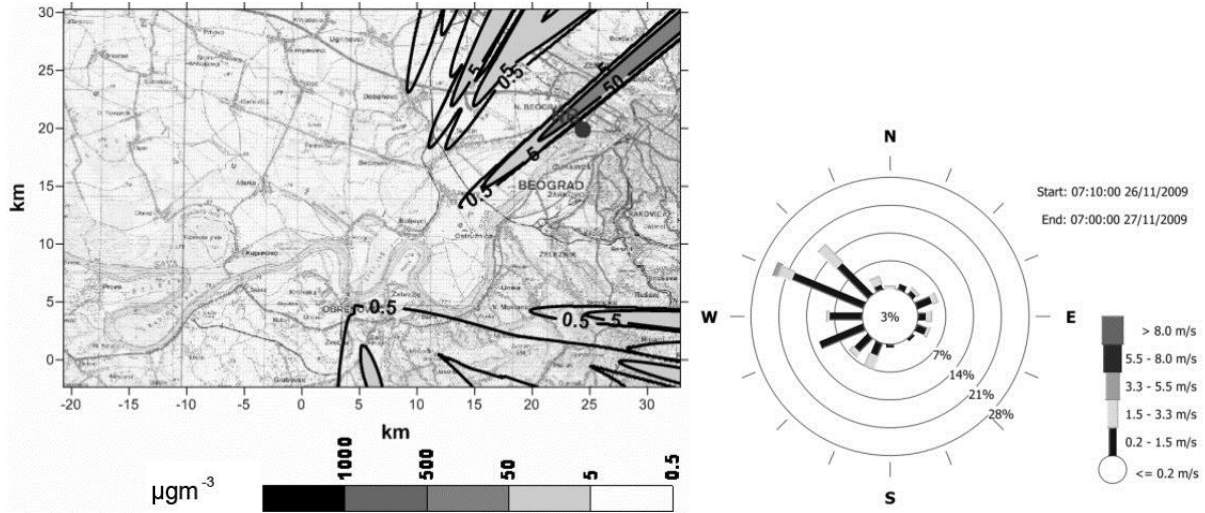
Vetar od  $15 \text{ ms}^{-1}$  izdužuje zone koncentracija pepela na mnogo veće udaljenosti, preko NB tačke (kontrolne tačke na Novom Beogradu). Najjači vetar od  $20 \text{ ms}^{-1}$  dovodi skoro do trostruko veće koncentracije zbog nelinearnosti u formuli za emisiju čestica.

Nakon analize idealizovanih slučajeva, model je dao prihvatljive rezultate. Zatim je urađen eksperiment za dugoročnu integraciju, za period od jedne godine. Period uzorkovanja kontrolne stanice na Novom Beogradu je bio 24 časa, pa su korišćene prosečne dnevne koncentracije za period od jedne godine. Novembar je bio mesec sa najviše dana (17 dana) kada je koncentracija  $\text{PM}_{10}$  na kontrolnoj stanici prelazila graničnu vrednost od  $50 \mu\text{g m}^{-3}$ .

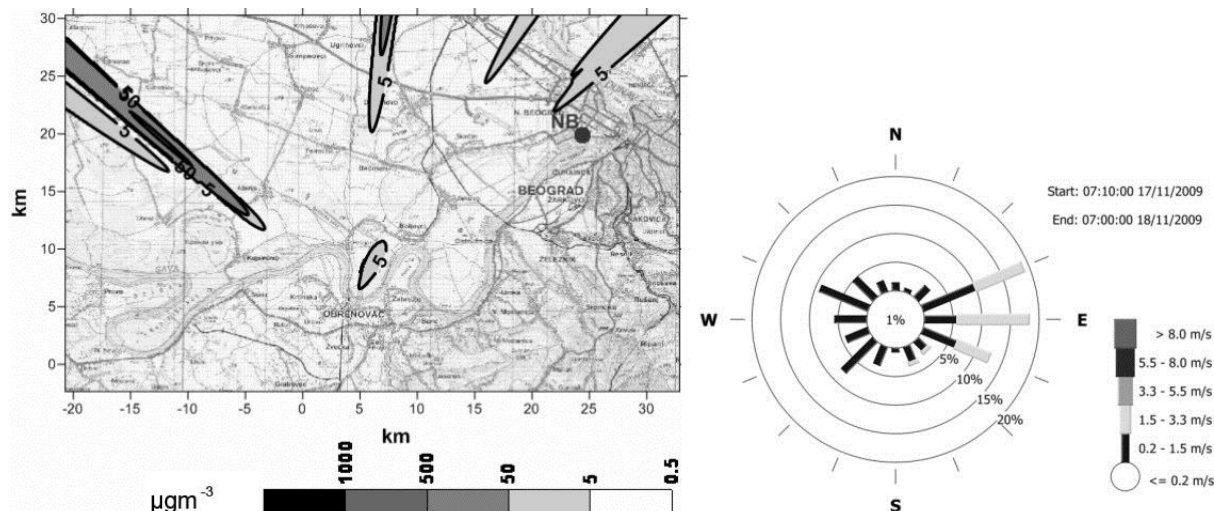
Iz tog perioda izdvojena su 3 dana kada je koncentracija bila najkritičnija. Rezultati su prikazani na slikama 4.15 - 4.17. Na levoj strani je dat prikaz koncentracionih izolacija, dok je na desnoj strani dat prikaz pratećih ruža vetrova sa brzinom i pravcem vetra.



Slika 4.15. Dnevne koncentracije ukupne suspendovane materije 24.-tog Novembra i odgovarajuća ruža vetrova na 45 metara visine u Obrenovcu



Slika 4.16. Dnevne koncentracije ukupne suspendovane materije 27.-tog Novembra i odgovarajuća ruža vetrova na 45 metara visine u Obrenovcu



Slika 4.17. Dnevne koncentracije ukupne suspendovane materije 18.-tog Novembra i odgovarajuća ruža vetrova na 45 metara visine u Obrenovcu

Osim povećane koncentracije, datumi 24. i 27. Novembar (slike 4.15 i 4.16) su izabrani jer za oba dana, kako model tako i merenja, pokazuju istu tendenciju: rast koncentracije  $PM_{10}$ . Merenja za 18. Novembar (slika 4.17) su pokazala povećanje koncentracije, dok je model pokazao maksimalne vrednosti skoro  $90^\circ$  stepeni levo. Međutim, sudeći po pravcu vetra nije bilo moguće da leteći pepeo iz TNTA i TNTB stigne do merne stanice NB [26].

Rezultati dobijeni iz eksperimenata sa idealizovanim uslovima imaju smisla u kvalitativnom pogledu. Za slučajeve sa nestabilnom klasom zabeležene su manje koncentracije bliže izvorima. Sa većom stabilnošću, maksimalna koncentracija se povećava dalje od izvora. Za najstabilniji slučaj atmosfere, pepeo nadleće Beograd i u tom slučaju postoji mogućnost za prekoračenje praga zagađenjenosti vazduha [26].

Što se tiče intenziteta vetra, najznačajniji efekat je količina podignutog pepela/uglja. Zbog nelinearnosti, povećanje od 25 % brzine vetra dovodi do skoro trostrukog povećanja maksimalne koncentracije.



Primenjeni model (Gausov model dimne perjanice - the straight-line Gaussian plume model) takođe je testiran za kontinualnu emisiju SO<sub>2</sub> iz dimnjaka termoelektrane u Šoštanju (Slovenija) sa eksperimentalnim podacima i dao je dobre rezultate [46].

Programski kod za matematički model je napisan u Fortranu i u procesu je verifikacije od strane IAEA i Modaria (Modeling and Data for Radiological Impact Assessments).

### 4.3 Uvod u paralelno programiranje

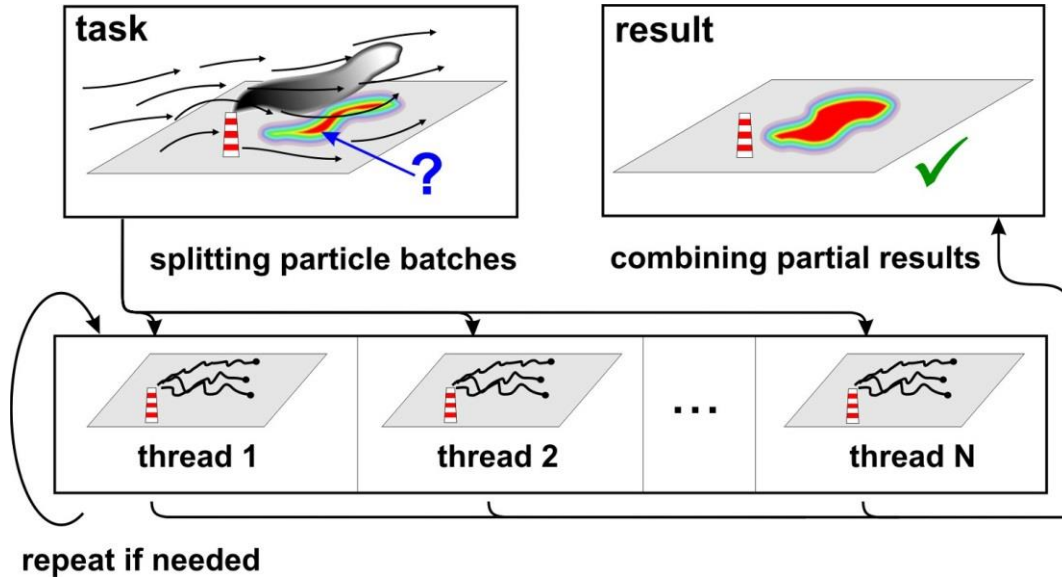
Glavno ograničenje za sve modele atmosferske disperzije, osim teorijskih, je potrebno kompjutersko vreme za predviđanja. Uvek postoji kompromis između brzine i tačnosti s tim da se oba zahteva koriste kao podrška pri odlučivanju [3]. Jedno od rešenja za povećanje računarskih performansi je paralelizacija. Za numeričke aplikacije, kao što su simulacije disperzije zagađenja vazduha, paralelizacijom se obično smatra izvršenje programa na različitim procesorima/kompijuterima [3].

Na osnovu memorijske strukture, sistemi za paralelno programiranje se mogu klasifikovati kao sistemi sa podeljenom memorijom ili sistemi sa zajedničkom memorijom. Grid computing (mrežno paralelno programiranje) je pretežno zastupljen vid paralelnog programiranja gde su samostalni kompjuteri u rasponu od nekoliko desetina do nekoliko hiljada povezani putem lokalne mreže ili Interneta. U ovom slučaju javlja se latencija u komunikaciji između računara tako da su ovi sistemi prikladni za izračunavanja koja ne zahtevaju veliku razmenu podataka među računarima. Klasteri predstavljaju drugi vid paralelnog programiranja i sastoje se od identičnih kompijuterskih jedinica koje se nazivaju čvorovi (nodes). Čvorovi su povezani namenskim mrežama velikih brzina i prenos podataka se kontroliše specijalizovanim softverima (npr. MPI ili PVM). Iako klasteri pripadaju grupi sistema sa podeljenom memorijom, navedeni dodatni softveri im omogućuju da vide ceo klaster kao sistem sa zajedničkom memorijom [3].

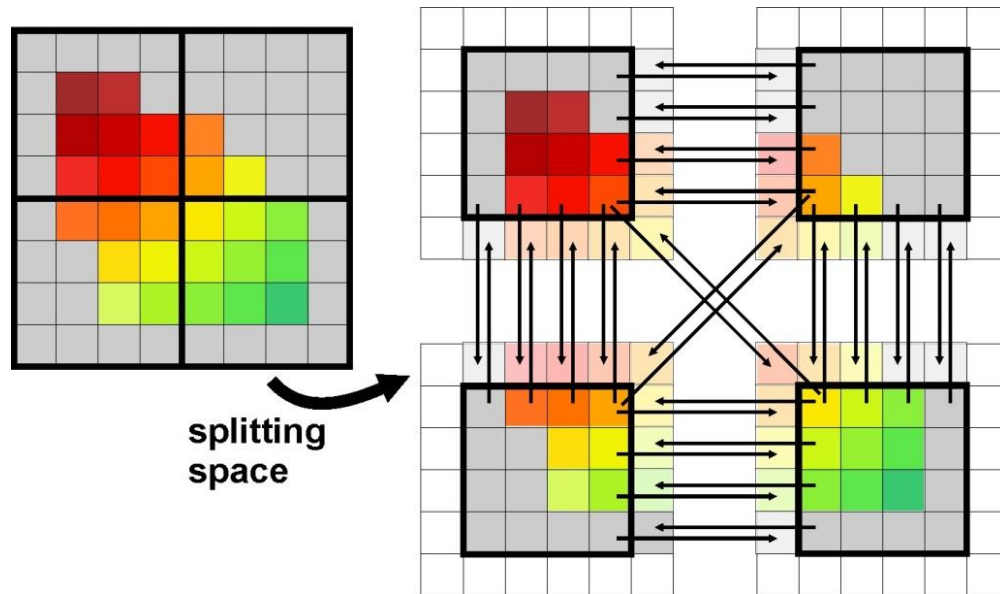
Procesori sa više jezgara (multicore) i nedavno razvijena tehnologija koja koristi grafičke procesore (GPU) za opšte svrhe računanja (GPGPU) su primeri sistema sa podeljenom memorijom. Paralelno programiranje uz pomoć grafičkih kartica - GPU se uspešno primenjuje u

modelovanju atmosferske disperzije kao i u blisko povezanim oblastima. Vreme proračuna uz pomoć grafičkih kartica može biti znatno kraće u odnosu na isti proračun na procesorima. Važno je napomenuti da teorijski ostvarivo ubrzanje (speedup) je ograničeno odnosom paralelnih delova programa i celog vremena proračuna (Amdalov - Amdahl's zakon). Kod modelovanja atmosferske disperzije vreme za proračun predviđanja je obično fiksno dok zahtevi za tačnošću prognoze rastu [3].

Generalno Gausov model nema potrebu za paralelizacijom. Kako Gausov model predstavlja jednu jednačinu, nema mesta paralelizaciji. Kod Lagranžovog modela, zadatak je vremenska integracija parcijalnih ili običnih diferencijalnih jednačina koje opisuju kretanje čestica. Paralelizacija se zasniva na nezavisnim putanjama čestica. Bilo koji broj trajektorija čestica može da se izračuna paralelno i na kraju se objedinjuju rezultati (slika 4.18). Kod Ojlerovog modela zadatak je izračunavanje numeričkih rešenja parcijalnih diferencijalnih jednačina. Uobičajena tehnika je razlaganje domena na diskretizovane prostorne domene koji se zatim dele na podomene kojima se dodeljuju različite kompjuterske jedinice, dok se vremenska evolucija u ovim podomenima izračunava paralelno (slika 4.19). Glavni problem je izračunavanje diskretizovanih prostornih izvoda na granici domena jer zahteva informacije od susednih domena. Dakle, podaci se moraju redovno razmenjivati sa susednim domenima i vreme za prenos informacija mora biti značajno manje od vremena provedenog za proračun. Zato je paralelizacija sa grafičkim karticama veoma pogodna za Ojlerov model [3].



Slika 4.18. Šematski prikaz paralelizacije Lagranžovog modela



Slika 4.19. Šematski prikaz paralelizacije Ojlerovog modela

Za paralelizaciju na grafičkim procesorima (GPU), kompanija tj. proizvođač grafičkih kartica NVIDIA razvila je poseban programski jezik CUDA koji se nadovezuje na neke već postojeće programske jezike. Najviše i najčešće korišćeni programski su Fortran i C tako da su prvi programski jezici za paralelno programiranje na grafičkim karticama CUDA Fortran i CUDA C. Kako su paralelizacije Lagranžovog i Ojlerovog modela za atmosfersku disperziju uz pomoć grafičkih kartica i CUDA programskih jezika već urađene ostaje još spoj Gausovog puff modela i Lagranžovog modela [47] - [49].

Naime, ako se trajektorija čestice u Lagranžovom modelu zameni trajektorijom puff-a (oblačića), može se uraditi paralelizacija svake trajektorije puff-a na grafičkim procesorima. Ukupna koncentracija se dobija zbirom trajektorija puff-a kao i same koncentracije u puff-u, pa se zbog paralelizacije ukupno vreme proračuna može znatno smanjiti. Osim skraćanja vremena proračuna, prednost grafičkih kartica – GPU jeste niža cena i znatno manja potrošnja električne energije u odnosu na CPU.

## 5. ZAKLJUČAK

Industrijski dimnjaci, komunalni izvori i saobraćaj su veštački izvori koji u rutinskom radu zagađuju granični sloj atmosfere gde se odvija raznovrstan kopneni život i u kome se obavlja većina ljudskih aktivnosti. Pored rutinske emisije povremeno se dešavaju emisije zagađujućih materija u atmosferu u akcidentalnim situacijama. Atmosfera je najbrži i najopasniji put kontaminacije, u akcidentalni situacijama, često sa velikim ljudskim žrtvama. Zagađeni vazduh sa druge strane, usled suve i mokre depozicije dospeva na tlo i vodene površine i tako utiče i na živi svet u okeanima, rekama i jezerima.

Praćenje rasprostiranja zagađujućih materija kroz atmosferu ima za krajnji cilj određivanje efekata prisustva zagađujućih materija u odredjenim koncentracijama, na zdravlje ljudi i projektovanje i ugradnju kontra-mera radi njihovog minimiziranja. U proceni efekata na zdravlje ljudi koriste se i dozni modeli koji uključuju puteve kontaminacije preko vazduha [50]. Dozni modeli pored karakteristika ljudskog organizma i navika stanovništva, kao jedan od osnovnih ulaznih podataka uzimaju koncentracije zagađujućih materija u vazduhu.

Modul za računanje doza, koju može da primi pojedinac ili stanovništvo u okolini izvora zagađujućih materija usled unutrašnjeg ili spoljašnjeg izlaganja zagađujućim materijama, omogućava procene neophodnosti projektovanja i pokretanja mera zaštite radi smanjivanja posledica po stanovništvo, u realnom vremenu usled akcidentalnih emisija, naknadne procene na osnovu analiza za prethodni period u kome su se dešavale emisije ili prognozu posledica za planirane emisije u budućem periodu.

Matematički model koji je prikazan u ovoj doktorskoj disertaciji, pored toga što uzima u obzir nabrojane procese u graničnom sloju atmosfere, može da koristi podatke koji su prikupljeni različitim meteorološkim programima. On može da bude sastavni deo automatskih meteoroloških stanica i može da se primeni na veliki broj različitih vrsta industrijskih i komunalnih izvora zagađujuće materije (tačkastih, površinskih, linijskih i zapreminskih).

Primenljiv je na gasovite i čestične zagađujuće materije koje u atmosferu dospevaju u rutinskom radu ili akcidentalnim situacijama [51].

Navedeni matematički model koristi Gausov pravolinijski model dimne perjanice za rutinsku emisiju i Puff-ov model gausovskog tipa za akcidentalnu emisiju. Oba modela su sastavni deo automatskog sistema koji ih kontinualno snabdeva ulaznim meteorološkim podacima. Ulazni podaci o izvorima su: vreme integracije, koordinate i fizička visina izvora, dijametar svetlog otvora, temperatura oblaka zagađujuće materije, jačina izvora, visina iznad tla na kojoj se računaju koncentracije, efektivna visina izvora/oblaka i druge fizičke karakteristike izvora. Oba modela rade u prognostičkom ili dijagnostičkom modu. Podizanje perjanice/oblaka i efektivna visina računaju se Brigsovom modelom i korišćenjem stepenog zakona vetra. Modeli uzimaju u obzir topografiju i suhu i mokru depoziciju zagađujuće materije.

Da bi se smanjile posledice po životnu sredinu usled emisije zagađujućih materija u atmosferu, još u fazi projektovanja postrojenja planiraju se mere zaštite: vrši se izbor najpovoljnije lokacije, projektuju se visine dimnjaka sa karakteristikama ventilacije. One pri projektovanim jačinama izvora i za najnepovoljnije meteorološke uslove daju vrednosti koncentracija štetnih materija, koje su ispod graničnih vrednosti propisanih zakonskom regulativom. Takođe, postavljaju se filteri kako bi se smanjile emisije štetnih materija i planiraju se kontra mere, da bi se smanjile posledice od akcidentalnih emisija.

Planirane kontramere su nekad, naizgled jednostavne, kao što je edukacija stanovništva o osnovnim merama koje treba primeniti u vanrednim situacijama ili kao što je obaveštavanje stanovništva na ugroženoj teritoriji i obezbeđivanje i podela stanovništvu sredstava lične zaštite. U okolini nuklearnih elektrana, pored jednostavnih procedura planiraju se i veoma složene kontra mere, kao što su planovi evakuacije stanovništva u akcidentalnim situacijama, pri čemu se unapred definišu transportna sredstva, najkraći putevi kretanja do bezbednih zona, a planiraju se i periodično izvode vežbe evakuacije stanovništva.

Da bi se kontramere blagovremeno pokrenule uspostavljaju se monitoring sistemi koji u realnom vremenu daju podatke o emisiji štetnih materija na svetlim otvorima dimnjaka, meteorološke podatke u graničnom sloju atmosfere. Na kraju, korišćenjem matematičkih modela, koncentracije zagađujućih materija na celoj teritoriji na kojoj se osećaju posledice emisije

zagađujućih materija. Na monitorima u kontrolnim sobama u svakom trenutku se dobija slika rasprostiranja zagađujuće materije sa zonama u kojima su koncentracije iznad propisanih, a na osnovu prognoziranih meteoroloških podataka dobijaju se i prognoze u narednom periodu od 24 časa ili duže, koje se osvežavaju unapred zadatim vremenskim korakom, u akcidentalnim situacijama na svaki minut ili kraće, a u rutinskim slučajevima na svaki sat ili na svakih deset minuta.

Prilikom izbora između nekoliko lokacija za izgradnju postrojenja, koriste se matematički modeli kojima se na osnovu podataka o karakteristikama lokacije, meteoroloških podataka, fizičko hemijskih karakteristika zagađujućih materija, rutinske ili akcidentalne emisije i na osnovu projektovanih podataka o jačini izvora, određuju srednje časovne, dnevne i godišnje koncentracije [52] - [54]. Da bi se uradile ove analize treba raspolagati sa minimalno jednogodišnjim nizom ulaznih časovnih vrednosti meteoroloških podataka. Da bi se uračunale godišnje promene ulaznih meteoroloških veličina u matematičke modele preporučuje se bar dvogodišnji niz, a petogodišnji niz časovnih podataka se smatra pouzdanim za analize uticaja potencijalno vrlo opasnih postrojenja, kao što su nuklearne elektrane. Na osnovu izračunatih koncentracija zagađujućih materija u površinskom sloju atmosfere, na osnovu raspodele gustine stanovništva, podataka o njegovoj aktivnosti na otvorenom prostoru i navika u ishrani, računaju se efekti na zdravlje koji se, zatim uz ostale karakteristike uzimaju u obzir prilikom izbora najpovoljnije lokacije za izgradnju postrojenja.

Iako se u vreme razvijenih informatičkih tehnologija, čini da je korisnicima lako dostupan veliki broj komercijalnih softverskih paketa za analize uticaja na okolinu, oni su ipak, prilično zatvoreni sistemi, neka vrsta crne kutije, koji doduše precizno informišu korisnika na koji način da pripremi ulazne podatke, da bi se dobio precizno definisan izlaz, za obično samo jedan tip izvora, tačkasti, linijski, površinski ili zapreminski, ali ne i za kombinovane izvore. Zbog toga što nije jednostavna priprema ulaznih podataka o karakteristikama izvora, meteoroloških podataka (dugački nizovi časovnih vrednosti), 3D topografije terena i posebno zbog nemogućnost pristupa kodu, ovi softverski paketi se uglavnom koriste tako što se unesu zadata brzina i pravac vetra i klasa stabilnosti atmosfere. Obično se uzima da je u pitanju ravan teren. Pošto su primenjivi uglavnom na samo jednu vrstu izvora, korisnici koji istovremeno imaju više tipova izvora, kao što su termoenergetski, petrohemijski ili rudarskotopioničarski

kompleksi, upućeni su na nabavku novih softverskih paketa, koji imaju svoje posebne zahteve za ulaznim podacima.

Da bi se prevazišli navedeni problemi, a naročito da bi moglo da se interveniše na kodu, razvijen je generalisan model disperzije koji je primenjiv na sve tipove izvora, za rutinske i akcidentalne emisije, za sve vrste terena i za klasično ili automatski prikupljene meteorološke podatke. Pored toga što je pogodan za primenu radi izrade analiza uticaja na životnu sredinu, zbog mogućnosti intervenisanja na kodu, generalisani model je pogodan za primenu kao sastavni deo automatskih sistema za kontrolu kvaliteta vazduha u realnom vremenu.

Generalisani model disperzije je pogodan alat za procenu rasprostiranja zagađujuće materije kroz donji granični sloj atmosfere za sve tipove izvora, jer pored toga što uzima u obzir stohastičku prirodu kretanja vazduha u donjem graničnom sloju atmosfere, automatski računa podizanje perjanice do efektivne visine izvora, modeluje vertikalni gradijent brzine vetra, suhu i mokru depoziciju zagađujuće materije, njenu resuspenziju sa tla, uticaj topografije terena na rasprostiranje kao i debljinu sloja mešanja, koji se u polaznoj verziji modela zadaju kao parametri.

Dodavanjem modula za računanje efektivne visine izvora, za računanje brzine vetra na fizičkoj visini izvora i na efektivnoj visini izvora, dodavanjem modula za suhu i mokru depoziciju i modula za resuspenziju sa tla, koji se pozivaju za svaki desetminutni set meteoroloških podataka uzimajući u obzir topografiju terena, prednost kompleksnog modela postaje očigledna, jer se ulazne veličine automatski računaju za svaku računsku tačku, kao što je prethodno objašnjeno na primeru efektivne visine izvora.

U ovom radu model je kao ulazne meteorološke podatke uzimao srednje desetominutne vrednosti izmerene u JP „NOS“ na novom rekonstruisanom meteorološkom stubu, visine 40 m, sa novom automatskom meteorološkom stanicom (AMES). Izborom periodičnih prikaza, kao adekvatnim za analize, dobijene su srednje godišnje koncentracije aktivnosti i odgovarajuće doze, koje prima hipotetički stanovnik u okolini nuklearnog reaktora „RA“. Uspešnost primene kompleksnog modela, može da se proceni poređenjem sa rezultatima merenja oko BrookHaven reaktora (SAD).



Prednost generalisanog disperzionog modela (algoritam +kompjuterski kod+ on-line veza sa automatskom meteorološkom stanicom sa meteorološkim podacima u realnom vremenu) u odnosu na osnovni model, ogleda se već u njegovoj jednostavnoj primeni na veliki broj ulaznih meteoroloških podataka. Radi ilustracije, u ovom sistemu, na svakih deset minuta automatski se računaju novi ulazni parametri za model, kao što je npr. efektivna visina izvora (dimnjaka), a u polaznom modelu ta veličina bi se računala i zadavala na svakih 10 minuta ručnim unosom ili bi se koristila neka fiksna zadata vrednost. U akcidentalnim situacijama vremenski korak je kraći, iznosi jedan minut, pa je prednost kompleksnog modela još očiglednija.

Na osnovu kompleksnog modela razvijen je kompjuterski kod koji omogućava potpuno automatski računanje rasprostiranja bilo koje zagađujuće materije u realnom vremenu ili unazad pretragama, kao i prognoze, uzimajući u obzir sve važne procese u donjem graničnom sloju atmosfere. Radi njegove jednostavne primene razvijen je grafički korisnički interfejs koji omogućava obučenim operaterima jednostavno korišćenje ovog kompjuterskog koda. Ovako ili slično dizajnirani grafički korisnički interfejs, sa odgovarajućom automatskom meteorološkom stanicom i podacima o fizičkim karakteristikama svih izvora neke grane industrije i njihovim emisijama zagađujućih materija u donji granični sloj atmosfere, kao i o karakteristikama tla, mogu se ponuditi bilo kojoj industriji, radi kontrole svoje neposredne okoline i radi planiranja kontra mera za smanjivanje posledica emisije u akcidentalnim situacijama i u rutinskom radu.

Isti kompjuterski kod kompatibilan je sa obavezama lokalne samouprave prema Zakonu o zaštiti životne sredine, koje se odnose na praćenje koncentracija zagađujućih materija na njihovoj teritoriji u donjem graničnom sloju atmosfere, kao najbržem i najopasnijem putu kontaminacije stanovništva. Pored industrijskih izvora ovaj sistem može da pokrije i sve komunalne izvore na teritoriji lokalne samouprave kao što su npr. deponije smeća, saobraćaj, domaća ložišta, ložišta daljinskog grejanja.

I na kraju treba napomenuti da je ovaj programski paket neophodan pri projektovanju mreža za praćenje i upravljanje kvalitetom vazduha. Prema zahtevima lokalnih samouprava projektovanje broja i prostornog rasporeda stanica može se rešiti dodavanjem odgovarajućeg modula u čijoj je osnovi algoritam za optimizaciju broja i rasporeda mernih mesta prema zadatim

kriterijumima. S obzirom na visoku cenu ovakvih mernih sistema neophodno je naći optimalna rešenja u čijoj osnovi je matematičko modelovanje atmosferske disperzije zagađujuće materije.

U ovoj doktorskoj disertaciji je na osnovu analize srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti emitovane u atmosferu iz izvora sa parametrima ventilacije nuklearnog reaktora „RA“, izračunato da maksimalna vrednost na 2 m iznad tla izosi  $3.8 \text{ Bq m}^{-3}$ . Maksimalne vrednosti pri tome su u pravcu WNW i NW u odnosu na izvor i na rastojanjima od 1500 m do 2000 m od izvora. Za pravac njihovog pojavljivanja odgovoran je vetar iz ESE i SE pravca, a uzimanjem u obzir orografije terena i rastojanja od izvora na kojima se pojavljuju te vrednosti, može se zaključiti da su za njihovo pojavljivanje odgovorne kategorije stabilnosti atmosfere E i F, po Pasquill-Giffordovoj klasifikaciji stabilnosti atmosfere (umereno stabilna E i stabilna F).

Polje koncentracija aktivnosti u vazduhu (2 m iznad tla) zavisi od meteoroloških karakteristika, karakteristika izvora, karakteristika tla, kao i od fizičko-hemijskih karakteristika radionuklida zbog čega zone sa maksimalnim vrednostima koncentracija aktivnosti korespondiraju sa zonama maksimalnih relativnih koncentracija, ali su uočljive razlike u detaljima.

Koncentracija aktivnosti suve depozicije radionuklida zavisi od koncentracije aktivnosti u vazduhu, ali i od karakteristika radionuklida i karakteristika tla. Polja koncentracija aktivnosti suve depozicije su u dobroj korelaciji sa poljima srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti, tj. poklapaju se zone sa njihovim maksimalnim i minimalnim vrednostima. U ovoj doktorskoj disertaciji, prikazi polja suve depozicije aktivnosti ne uzimaju u obzir poluraspade radionuklida po njihovom dospevanju na tlo, kao ni njihove dalje migracije u toku posmatranog perioda. Prilikom modelovanja doze spoljašnjeg ozračivanja od suve depozicije aktivnosti nisu uzeti u obzir poluraspadi radionuklida i njihove dalje migracije u toku životnog veka hipotetičkog stanovnika, za period od 18 do 72 godine.

Maksimalne vrednosti ukupne godišnje aktivnosti mokre depozicije, kao i zone maksimalnih vrednosti pojavljuju se u blizini izvora, što se na neki način i očekuje jer je spiranje kišom zavisi pored intenziteta padavina i od koncentracija radionuklida/aktivnosti, koje su najveće na izlazu iz dimnjaka. Spiranje padavinama zavisi i od dužine puta koji padavine prođu kroz kontaminirani oblak. Na osnovu rezultata prikazanih u ovoj doktorskoj disertaciji, zone sa

maksimalnim vrednostima mokre depozicije aktivnosti zatvaraju se na manjim rastojanjima od izvora. Spiranje padavinama najveće je u blizini izvora, pa se može zaključiti da veće koncentracije u blizini izvora više doprinose spiranju padavinama, nego dužina puta koji padavine pređu kroz oblak radionuklida/aktivnosti.

Doza inhalacije, doza radioaktivnosti usled udisanja kontaminiranog vazduha, koju prima realni ili hipotetički stanovnik, proporcionalna je koncentraciji radionuklida/aktivnosti u vazduhu i zavisi od količine udahnutog vazduha za posmatrani vremenski interval, kao i od interakcije sluzokože disajnih puteva sa aktivnostima koje potiču od određenog radionuklida.

Geometrija polja godišnjih doza zbog inhalacije, u saglasnosti je sa geometrijom polja srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti. Zone sa maksimalnim vrednostima doza inhalacije poklapaju se sa zonama maksimalnih vrednosti srednjih godišnjih koncentracija aktivnosti. Isto tako, u celom posmatranom periodu, uočava se isti trend promena koncentracija aktivnosti i doza inhalacije. Zone sa maksimalnim godišnjim vrednostima su u zoni naselja Kaluđerica, u smeru WNW, na rastojanju oko 2 km u odnosu na izvor.

Doza spoljašnjeg ozračivanja koju pojedinac prima od boravka u kontaminiranom oblaku, u životnoj sredini, zbog puteva kontaminacije preko kože i sluzokože, takođe je direktno zavisna od koncentracija radionuklida i aktivnosti u vazduhu. Treba napomenuti da se ovaj put kontaminacije vezuje za akcidentalne situacije, kada su emisije radionuklida u atmosferu ograničenog trajanja isto tako kao i boravak pojedinca u kontaminiranom oblaku. U ovoj doktorskoj disertaciji je urađen jako konzervativan pristup, jer je ovaj, inače akcidentalni put kontaminacije pripisan rutinskoj emisiji, sa „boravkom“ pojedinca u oblaku za posmatrani godišnji vremenski interval. Zbog ovakvog pristupa, najveći doprinos spoljašnjoj dozi koju prima stanovnik u okolini nuklearnog reaktora „RA“, dobija se opisanim putem kontaminacije.

Pri spoljašnjem ozračivanju od suve i mokre depozicije radionuklida/aktivnosti, veći doprinos ima suva u odnosu na mokru depoziciju. Suva depozicija kao što je već rečeno ranije, direktno zavisi od koncentracije radionuklida/aktivnosti u vazduhu pri tlu, dok mokra depozicija, pored toga što zavisi od koncentracije radionuklida/aktivnosti u vazduhu na putu kišne kapi do tla, zavisi i od intenziteta padavina i od efikasnosti spiranja, koje dalje zavisi od veličine kapi padavina i od rastvorljivosti polutanta u padavinama.

Matematičkim modelovanjem dobija se veći doprinos spoljašnjem ozračivanju od suve depozicije aktivnosti u odnosu na mokru depoziciju, jer se za posmatrane vremenske intervale, više aktivnosti deponuje na tlo putem suve depozicije.

Ukupna godišnja doza koju prima pojedinac je suma doza od svih puteva kontaminacije prikazanih u ovoj doktorskoj disertaciji (put kontaminacije ingestijom, preko unosa hrane i vode nije bio predmet istraživanja). Emisije radionuklida iz veštačkih izvora ne bi smele da doprinose graničnim vrednostima ukupne doze iznad 1% od doze koju prima pojedinac od prirodnog fona zračenja (granična vrednost fona 1 mSv, odnosno 10  $\mu$ Sv za godinu dana). Pretpostavljeno je takođe da je reaktor „RA“ bio u neprekidnom rutinskom radu, 24 časa dnevno i da su emisije bile neprekidne, što značajno odstupa od evidencija o radu reaktora u toku godine.

Na osnovu rezultata dobijenih kompleksnim matematičkim modelom, sa parametrima ventilacionog ispusta nuklearnog reaktora „RA“, pretpostavljenom emisijom radionuklida, karakteristikama tla, podacima sa meteorološkog stuba na lokaciji „RA“ i preporučenim doznim faktorima za posmatrane radionuklie, maksimalna vrednost za ukupnu dozu iznosila je 7.3  $\mu$ Sv što je manje od granične vrednosti koja iznosi 10  $\mu$ Sv. Na osnovu ovog rezultata može se zaključiti da nuklearni reaktor „RA“ u toku svog rada nije mogao da utiče na svoju okolinu iznad propisanih granica od 10  $\mu$ Sv/god.

U drugom delu ove doktorske disertacije kod TNTA i TNTB vršeno je istraživanje procene rizika od koncentracije pepela iz termoelektrana u Obrenovcu kod Beograda. Glavni cilj je bio da se ispita mogućnost povećane koncentracije pepela (PM<sub>10</sub>) na relativno velikom rastojanju tj. u naseljenim delovima Beograda.

Posledica sagorevanja velikih količina uglja je velika količina čvrstog ostatka sagorevanja neorganskog porekla-pepela i šljake. Po obavljenom sagorevanju u kotlovima termoelektrana, dimni gasovi se prečišćavaju od čestica letećeg pepela na elektrofilterima. Izdvojeni pepeo se meša sa vodom u određenom odnosu i hidraulički transportuje na otvorena odlagališta, deponije pepela. Zbog velikih količina pepela javljaju se problemi njihovog sakupljanja, evakuacije kao i čuvanje na deponijama. Deponije pepela mogu da utiču na zagađivanje voda, vazduha i zemljišta. Način i intenzitet uticaja zavise od tehnologije i odlaganja pepela, karakteristika tla gde se vrši odlaganje, kao i od fizičkih i hemijskih osobina odloženog

pepela. Zbog nepovoljnih fizičko-hemijskih karakteristika pepela i pri maloj brzini vetra dolazi do eolske erozije pepela. Pri nepovoljnim meteorološkim prilikama, suvom vremenu praćenom jakim vetrom, česta je pojava epizodnih zagađenja. Ovaj problem dolazi do izražaja u prelaznom periodu i u zimskim uslovima. Problem je utoliko veći, jer su deponije u neposrednoj blizini naselja i poljoprivrednih površina. Deponije pepela su površinski izvori zagađenja, koji se aktiviraju pri nepovoljnim vremenskim uslovima. Zbog lokacije i blizine naseljenih mesta, predstavljaju veliki problem za žitelje okolnih naselja. Uticaj je najjače izražen u zoni koja neposredno okružuje deponije (udaljenje do 1000 m). Prisutan je na rastojanju do 5000 m, a intenzitet mu opada sa razdaljinom od deponije [55].

Na osnovu istraživanja koja su bila predmet ove doktorske disertacije zaključeno je da pod idealnim meteorološkim uslovima, kada je atmosfera neutralna i vetar slabog intenziteta u pravcu Beograda, emisija iz dimnjaka može da poveća koncentraciju  $PM_{10}$  u Beogradu. U slučaju nestabilne atmosfere, nema povećanja koncentracije  $PM_{10}$  u Beogradu. Tada su maksimalne koncentracije u blizini dimnjaka a sa povećanjem rastojanja koncentracija zagađivača opada. Kada je atmosfera stabilna, pepeo se disperguje nad Beogradom u višim slojevima atmosfere i ne doprinosi povećanju koncentracije  $PM_{10}$  u Beogradu.

U realnom slučaju vetrova, dobija se prihvatljiv rezultat pri velikim zagađenjima (dva od tri datuma), dok je za treći dan, pravac vetra bio daleko od izvora, što znači da je nemoguće da leteći pepeo stigne do Beograda. Zaključak je da nije bilo neslaganja između modela i realnih merenja.

Prikazani sistem na osnovu utvrđenih zavisnosti uzroka (u ovom slučaju meteoroloških uslova) i posledice (imisija pepela u okolini pepelišta) omogućava brzo pokretanje adekvatnih kontra-mera radi smanjivanja štetnih posledica po životnu sredinu na malim rastojanjima, do nekoliko desetina kilometara, od deponija pepela niz vetar. Time se može rešiti jedan od najvećih problema životne sredine u okolini termoelektrana na znatno kvalitetniji način nego do sada.

Pitanje kvaliteta vazduha je od najveće važnosti za mnoge građane Evrope i jedna od oblasti u kojima je Evropska Unija najaktivnija, u cilju preduzimanja preventivnih i regulatornih mera. Čist vazduh za Evropu (Clean Air For Europe - CAFE) je inicijativa koja je dovela do tematske strategije kojom se utvrđuju ciljevi i mere naredne faze evropska politike kvaliteta

vazduha. Sve ovo je dovelo do direktive CAFE Directive - 2008/50/EC, koja naglašava potrebu za zajedničkim okvirom metoda i kriterijuma koji će omogućiti direktno poređenje kvaliteta vazduha u različitim državama članicama, kao i predviđanje i upravljanje kvalitetom vazduha. Štaviše, Direktiva CAFE uključuje mandate za pružanje određenih informacija javnosti u vezi sa koncentracijom zagađujućih materija (polutanata) u vazduhu, incidenata u prekoračenju kriterijuma atmosferskog kvaliteta, kao i predviđanja koncentracija polutanata za naredni dan ili dane.

S obzirom na navedene zahteve, neophodno je primeniti metode i alate koji analiziraju modele zagađenje vazduha, dok paralelno oni mogu da izdvoje informacije u smislu sličnosti, razlika i međuzavisnosti proučavanih parametara kvaliteta vazduha.

## 6. LITERATURA

- [1] K. L. Ebi: *Is climate change affecting human health?*. Environmental Research Letters 8 (2013) 031002.
- [2] P. Pfindt: *Hemija životne sredine*. Beograd: Zavod za udžbenike, 2009.
- [3] A. Leelossy, F. Molnar, F. Izsak, A. Havasi, I. Lagzi, R. Meszaros: *Dispersion Modeling of Air Pollutants in the Atmosphere: a review*. Central European Journal of Geosciences, 6(3) (2014), 257-278.
- [4] F. Pasquill: *The estimation of the dispersion of windborne material*. Meteorol. Mag. 90, (1961), 33-49.
- [5] F. A. Gifford: *Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion*. Nuc. Safety, 2, (1961), 47-51.
- [6] J. M. Stockie: *The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling*. SIAM Review, 53(2) (2011), 349–372.
- [7] G.A. Briggs: *Plume Rise*. USAEC Critical Review Series, (1969).
- [8] G.A. Briggs: *Some recent analyses of plume rise observations*. Proc. Second International Clean Air Congress, Academic Press, New York, (1971).
- [9] G.A. Briggs: *Discussion: chimney plumes in neutral and stable surroundings*. Atmos. Envir., 6, (1972), 507-510.
- [10] G.A. Briggs: *Diffusion Estimation for Small Emissions, in Environmental Research Laboratories*. Air Resources Atmosphere Turbulence and Diffusion Laboratory 1973 Annual Report, USAEC Report ATDL-106, National Oceanic and Atmospheric Administration, December (1974).
- [11] Slade et al: *Meteorology and Atomic Energy*, (1968).
- [12] IAEA Safety Standards Series, Vienna: *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. (2004), Safety Guide No. RS-G-1.7.
- [13] F. Pasquill: *Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling*. EPA-600/4-76-030b, (1976), 53.

- [14] IAEA Safety Series,: *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*. No.50-SG-S3, Vienna, (1980).
- [15] G. Bedeković, B. Salopek: *Zaštita zraka*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, (2010).
- [16] D.B. Turner: *A diffusion model for an urban area*. J.Appl.Meteorology, 3, (1964), 83-91.
- [17] A.C. Chamberlain: *Radioactive Aerosols*. Cambridge University Press, Cambridge, (1991).
- [18] Y. Shao, M. R. Raupach: *Effect of Saltation Bombardment on the Entrainment of Dust by Wind*. J. Geophys. Res., 98 (1993), 12719-12726.
- [19] R. Draxler, D. Gillete, J. Kirkpatrick, J. Heller: *Estimating PM10 Air Concentrations from Dust Storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia*. Atmospheric Environment, 35 (2001), 4315-4330.
- [20] G. S. Okin, D. A. Gillette: *Spatial Modelling of the Terrestrial Environment*. John Wiley&Sons, Hoboken, New York, (2004), 137.
- [21] G. S. Okin: *Dependence of Wind Erosion and Dust Emission on Surface Heterogeneity: Stochastic Modeling*. J. Geophys. Res., 110 (2005), D11208.
- [22] B. Marticorena, G. Bergametti, B. Aumont, Y. Callot, N'Doume and Legrand M.: *Modelling the atmospheric dust cycle: 2-Simulations of Saharan dust sources*. J. Geophys. Res., 102, (1997), 4387-4404.
- [23] D. P. Nikezić, B. B. Lončar, Z. J. Gršić, S. D. Dimović: *Mathematical Modeling of Environmental Impacts of a Reactor through the Air*. Nuclear Technology & Radiation Protection, 29(4) (2014), 268-273.
- [24] T. J. Overcamp: *A General Gaussian Diffusion-Deposition Model for Elevated Point Sources*. J. Appl. Meteorol, 15 (1975), 1167-1167.
- [25] J. S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino: *A User`s Guide for the CALPUFF Dispersion Model*. Concorrd: Earth Tech, Inc, (2000).
- [26] D. P. Nikezić, Z. J. Gršić, D. M. Dramlić, S. D. Dramlić, B. B. Lončar, S. D. Dimović: *Modeling air concentration of fly ash in Belgrade, emitted from thermal power plants TNTA and TNB*. Process Safety and Environmental Protection, (2016)
- [27] M. Jovašević-Stojanović, A. Bartonova: *Current state of particulate matter research and management in Serbia*. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 16 (3) (2010), 207–212.



- [28] J. Joksić, M. Radenković, A. Cvetković, S. Matić-Besarabić, M. Jovašević-Stojanović, A. Bartonova, K. Espen Yttri: *Variations of PM10 mass concentrations and correlations with other pollutants in Belgrade urban area*. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 16 (3) (2010), 251–258.
- [29] Z. Gršić, P. Milutinović, D. Dramlić, Z. Velikić, S. Dramlić: *Ash dust concentration in the vicinity of the ash disposal site depending on the size of the pond (“water mirror”)*. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 16 (3) (2010), 243-249.
- [30] B. Rajković, I. Arsenić, Z. Gršić: *Point Source Atmospheric Diffusion*. In Monographs: Fluid Mechanics of Environmental Interfaces - Chapter 2, Taylor & Francis Ltd., London, Singapore, (2008), 17-48.
- [31] Z. J. Gršić, P. Milutinović, M. J. Stojanović, M. Popović: *Design for Meteorological Monitoring for air Pollution Modeling Industrial Zone of Pancevo based on experiences during bombing*. in Monographs: Air pollution modeling and its application XV, (Ed. C. Borrego and G. Schazes), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, (2002), 509-511
- [32] Z. J. Gršić, P. Milutinović, M. J. Stojanović, D. Dramlić, M. Popović: *Air Pollution Disperzion Modelling in Surrounding of Industrial Zone of City Pancevo*. in Monographs: Air Pollution Modeling and Its Application XVI (Ed. C. Borrego and S. Incecik), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, (2004), 127 - 135.
- [33] Z. Gršić, D. Dramlić, P. Milutinović, S. Pavlović, D. Arbutina, S. Dramlić, J. Kaljević, D. Joksimović, N. Miljević: *Representativity of Air Quality Controls in Limited Number of Grid Points*. J. of Environmental Protection and Ecology, 15 (1), (2014), 1-6.
- [34] G. A. Sehmel: *Particle and Gas Deposition: a Review*. Atmospheric Environment, 14 (1980), 983-1011.
- [35] ICRP: *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides*. In: ICRP Publication 56, Part 1 Annals of the ICRP 20, Pergamon Press, Oxford (1989) (2).
- [36] ICRP: *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. In: ICRP Publication 60 Annals of the ICRP 21, Pergamon Press, Oxford (1991a).
- [37] ICRP: *Annual Limits on Intake of Radionuclides by Workers Based on the 1990 Recommendations*. In: ICRP Publication 61 Annals of the ICRP 21, Pergamon Press, Oxford (1991b).
- [38] IAEA Safety Series: *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*. No.50-SG-S3, Vienna, (1980).

- [39] IAEA Safety Series: *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. No. 115., Vienna, (1996).
- [40] IAEA Safety Standards Series: *Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment Safety Guide*. No. WS-G-2.3, Vienna (2000).
- [41] IAEA: *Safety Assessment for Decommissioning of a Research Reactor*. (Test case B of the DeSa Project), (Draft 3.0), IAEA SAFETY REPORT SERIES, IAEA (2007).
- [42] EPA: *External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil*. Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081, (1993).
- [43] Helth Canada: Recommendations on Dose Coefficients, (1999). <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/dose/index-eng.php>
- [44] Council Directive: *Laying down basic safety standards for the prediction of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation*. Concil Directive 96/29/EURATOM, (1996).
- [45] IAEA: *Safety Assessment for Decommissioning of a Research Reactor*. Safety Report Series No. 77, Annex I, Part B, , Viena (2013). <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/P1604-CD/Annex-I-Part-B.pdf>
- [46] Z. Gršić, D. Dramlić, S. Dramlić, D. Arbutina, D. P. Nikezić, S. Dimović, D. Joksimović: *Verification mathematical models for atmospheric dispersion under IAEA programme MODARIA*. Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, (2015), 53-62.
- [47] F. Molnár, T. Szakály, R. Mészáros, I. Lagzi: *Air Pollution Modelling using a Graphics Processing Unit with CUDA*. Computer Physics Communications, 181 (2010), 105-112.
- [48] F. Molnár Jr., F. Izsák, R. Mészáros, I. Lagzi: *Simulation of reaction–diffusion processes in three dimensions using CUDA*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Volume 108, Issue 1, (2011), 76-85.
- [49] A. R. Sanderson, M. D. Meyer, R. M. Kirby, C. R. Johnson: *A framework for exploring numerical solutions of advection–reaction–diffusion equations using a GPU-based approach*. Comput Visual Sci, Springer-Verlag (2008).
- [50] P.H. Jensen, E.L. Petersen, S. Thykier-Nielsen, F.H. Vinther: *Calculation of the individual and population doses on Danish Territory resulting from hypothetical core-melt accidents at the Barseback reactor*. Riso-R-356, (1977).
- [51] S. E. Gryning: *Meteorological Measurement Programs for Air Pollution Studies*. Report M2259, Riso, Denmark, (1980), 1-27.

[52] D. M. Dramlić, M. M. Adžić, P. Milutinović: *Comparative Investigation of Semiconductor an Electrochemical Cell Sensors Performance for Carbonmonoxide Emissions Monitoring from Combustion Processes*. J. of Environmental Protection and Ecology, 2(2) (2001), 406-411.

[53] D. M. Dramlić, M. M. Vukolić: *Determination of Dominant Reaction and the Degree of Doping in Commercial Semiconductor Tin (iv)-Oxide Gas Sensors in Interaction with Hydrogen*. J. of Environmental Protection and Ecology, 4(1) (2003), 8-15.

[54] D. M. Dramlić, M. M. Adžić: *Space Distribution of Nitrogen Oxides and Carbonmonoxide Concentration in Commercial C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> Mixture Combustion*. J. of Environmental Protection and Ecology, 4(2) (2003), 275-279.

[55] D. M. Dramlić, M. Milutinović, D. Joksimović, A. Banković, B. Vulević,: *System for the automatic prevention ash lifting from ashes depots*. Godišnji izveštaj Projekta TR 15005, Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj, (2009), Beograd, Srbija.

## 7. BIOGRAFIJA

Dušan P. Nikezić, rođen je 27.03.1975. godine u Beogradu (Srbija). Osnovno i srednje obrazovanje završio je u Beogradu. Diplomirao je na Tehničkom fakultetu u Zrenjaninu, Univerzitet u Novom Sadu 2008. godine i stekao zvanje diplomirani inženjer tehničkih nauka. Završio je master studije iz oblasti informacionih sistema i tehnologija na Fakultetu organizacionih nauka 2011. i stekao zvanje diplomirani inženjer organizacionih nauka – master iz oblasti informacioni sistemi i tehnologije.

Prvu godinu doktorskih studija upisao je u oktobru 2013. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu na studijskom programu Inženjerstvo zaštite životne sredine. Položio je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija.

Od oktobra 2001. godine zaposlen je u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za Računarsku tehniku i informatiku – RT270.

Zvanje istraživač saradnik stekao je 02.07.2015.

Dušan P. Nikezić govori tečno engleski i francuski jezik.

## 8. IZJAVA O AUTORSTVU

### Prilog 1.

#### Izjava o autorstvu

Potpisani-a \_\_\_\_\_

Broj indeksa \_\_\_\_\_

#### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 9. IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE

### Prilog 2.

#### Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora \_\_\_\_\_

Broj indeksa \_\_\_\_\_

Studijski program \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Mentor \_\_\_\_\_

Potpisani/a \_\_\_\_\_

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao na objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada. Ovi lični podaci mogu se objavljivati na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 10. IZJAVA O KORIŠĆENJU

### Prilog 3.

#### Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku "Svetozar Marković" da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim predlozima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo - bez prerade
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista)

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.