

KRIMINALISTIČKO POLICIJSKI UNIVERZITET



DEPARTMAN FORENZIČKOG INŽENJERSTVA

Venezija S. Ilijazi

Modelovanje distribucije aeropolutanata kod akcidenata u
funkciji informatičke podrške za rano reagovanje

Doktorska disertacija

Beograd, 2021

Doktorska disertacija:

*Modelovanje distribucije aeropolutanata kod akcidenata u
funkciji informatičke podrške za rano reagovanje*

Doctoral dissertation:

*Modeling of aero pollutants distribution at accidents of IT
support for early response*

Zahvalnica

Posebno se zahvaljujem mom mentoru dr Stevi Jaćimovskom redovnom profesoru i naučnom savetniku i komentoru dr Brankici Popović redovnom profesoru, za razumevanje, podršku i pomoć koja je bila od neprocenjive vrednosti u svim fazama izrade ove disertacije.

Takođe, zahvalnost dugujem i prof. dr Nenadu Miliću na nesebičnoj pomoći i svim savetima pri izradi disertacije.

I na kraju sam beskrajno zahvalan svojoj porodici, mojoj supruzi Merzimi i sinovima Damiru i Denisu na podršci i razumevanju tokom izrade ove disertacije.

Autor

Naslov teme doktorske disertacije:

Modelovanje distribucije aeropolutanata kod akcidenata u funkciji informatičke podrške za rano reagovanje

Naučno polje:

Tehničko-tehnološke nauke

Naučna oblast:

Elektrotehničko inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Interdisciplinarno: Forenzičko inženjerstvo, Informacione tehnologije i sistemi

Sažetak: Ekološka bezbednost pojedinca, zajednice, nacije kao i globalna bezbednost životne sredine sve više je ugrožena. Pretnje su višestruke i uglavnom su proizvod ljudskih aktivnosti. Zagađenje vazduha, vode, zemljišta, ozonskog omotača i rizik od velikih ekoloških akcidenata prisutni su širom sveta. Zbog toga potreba zaštite vazduha od zagađenja, obezbeđenje kvaliteta života i očuvanje ekološkog potencijala životne sredine postaje jedan od imperativa razvoja savremenog društva. Sprečavanje zagađenja, saniranje već zagađenog vazduha, a time i vraćanje životne sredine u njeno izvorno stanje, zahteva preduzimanje i sprovođenje niza aktivnosti. U osnovi tih aktivnosti jeste poznavanje izvora emisija zagađujućih materija i njihovih specifičnosti.

Otklanjanje posledica emisije štetnih gasova je deo procesa upravljanja rizikom koje imaju za cilj praćenje krizne situacije, obnavljanje i sanaciju životne sredine, vraćanje u prvobitno stanje, kao i uklanjanje opasnosti od mogućnosti ponovnog nastanka udesa.

U doktorskoj disertaciji, dato je obrazloženje predmeta istraživanja, navodeći aktuelnost i doprinos istraživanja u oblasti primene modelovanja kod emisije opasnih materija u akcidentnim situacijama. Danas postoji više modela koji omogućavaju proračun prizemne koncentracije aerozagađenja u oblasti izvora zagađenja. Smatra se da postoji oko 120 modela različitog nivoa složenosti i namene. Modelovanje može da nađe primenu kao osnovni matematički alat podrške

pri ranom reagovanju i upravljanju s ciljem preciznog vremenskog upozorenja i postupanja, čime bi se sprečilo ugrožavanje velikog broja ljudi, živog sveta, imovine, životne sredine i prirodnih resursa. Predmet disertacije daje rešenje za dva izražena problema kod akcidentnih situacija. Prvi problem se odnosi na proračunavanje širenja eksczesnih aerozagađenja u kojima se emituju enormne količine opasnih supstanci u atmosferu, a drugi problem je adekvatna podrška ljudima koji po prirodi posla prvi reaguju na akcidentne situacije rizikujući pri tome i svoje živote.

Kao rezultat disertacije je i softversko rešenje koje omogućava prepoznavanje intenziteta, obima i posledica opasnosti od strane onih koji reaguju na akcident, čime bi bila unapređena njihova efikasnost u smislu zaštite zdravlja i života ugroženog stanovništva.

U naučnom smislu disertacija daje doprinos u praćenju kretanja aerozagađenja na celokupnom kontaminiranom prostoru posle akcidenta kao i da proceni krajnje domete zagađenja.

Ključne reči: aerozagađenje, modelovanje, akcident, informatička podrška, rano reagovanje

Title of the topic of the doctoral dissertation:

Modeling of aero pollutants distribution at accidents of IT support for early response

Scientific field:

Technical and technological sciences

Scientific area:

Electrical engineering

Narrow scientific field:

Interdisciplinary: Forensic Engineering, Information Technology and Systems

Abstract: The ecological security of the individual, the community, the nation as well as the global security of the environment is increasingly endangered. The threats are multiple and are mainly the product of human activities. Degradation of air, water, soil, the ozone layer and the risk of major environmental accidents are present around the world. Therefore, the need to protect the air from pollution, ensure the quality of life and preserve the ecological potential of the environment is becoming one of the imperatives for the development of modern society. Prevention of pollution, remediation of already polluted air, and thus return of the environment to its original state, requires undertaking and implementation of a series of activities. The basis of these activities is the knowledge of the sources of emissions of pollutants and their specifics.

Eliminating the consequences of harmful gas emissions is part of the risk management process aimed at monitoring the crisis situation, restoring and rehabilitating the environment, restoring it to its original state, as well as eliminating the danger of the possibility of an accident recurrence.

In the doctoral dissertation, an explanation of the subject of research is given, stating the topicality and contribution of research in the field of application of modeling in the emission of hazardous substances in accident situations. Today, there are several models that allow the calculation of the ground concentration of air pollution in the area of pollution sources. It is estimated that there are about 120 models of different levels of complexity and purpose. Modeling can be used as a basic mathematical tool to support early response and management with the aim of

precise time warning and action, which would prevent endangering large numbers of people, wildlife, property, environment and natural resources. The subject of the dissertation provides a solution to two pronounced problems in accident situations. The first problem refers to the calculation of the spread of excessive air pollution in which enormous amounts of dangerous substances are emitted into the atmosphere, and the second problem is adequate support for people who are the first to react to accident situations at the risk of their lives.

As a result of the dissertation, there is a software solution that enables the recognition of the intensity, scope and consequences of the danger by those who react to the accident, which would improve their efficiency in terms of protecting the health and life of the endangered population.

In the scientific sense, the dissertation contributes to monitoring the movement of air pollution in the entire contaminated area after the accident, as well as to assess the final reach of pollution.

Key words: air pollution, modeling, accident, IT support, early response

Sadržaj

Glava 1 UVOD.....	1
1.1 Predmet rada	3
1.2 Naučni cilj rada	3
1.3 Hipoteze od kojih se polazi	5
1.4 Metode istraživanja	6
1.5 Očekivani naučni doprinos.....	7
Glava 2 UOPŠTENO O VAZDUHU.....	8
2.1 Osobine atmosfere.....	8
2.1.1 Troposfera	11
2.1.2 Stratosfera	11
2.1.3 Mezosfera.....	11
2.1.4 Termosfera	12
2.1.5 Kontaminacija vazduha.....	12
2.2 Zagađivači vazduha.....	13
2.2.1 Azot dioksid (NO ₂)	14
2.2.2 Ozon (O ₃)	14
2.2.3 Sumpor-dioksid (SO ₂).....	15
2.2.4 Čestice (particulate matter - PM)	16
2.2.5 Ugljenmonoksid (CO).....	16
2.2.6 Olovo (Pb).....	17
2.2.7 Otrovni zagađivači vazduha	17
2.2.8 Hemijske i fotohemijske reakcije.....	17
2.2.9 Ozonske rupe.....	18
2.2.10 Gasovi staklene bašte	18
2.3 Disperzija aeropolutanata.....	19
2.3.1 Meteorološki činioci koji utiču na atmosfersku disperziju	20
2.3.2 Vetar.....	21
2.3.3 Stabilnost atmosphere	21
2.3.4 Stepen turbulencije.....	23
2.3.5 Visina atmosferskog graničnog sloja	23
2.3.6 Ostali uslovi koji utiču na atmosfersku disperziju	24
2.3.7 Advekcija	25
2.3.8 Difuzija.....	25
2.3.9 Vlažno taloženje.....	26
2.3.10 Suvo taloženje	26

2.3.11	Granični uslovi na površini Zemlje	26
2.3.12	Granični uslovi na gornjem sloju atmosfere	27
2.4	Modelovanje procesa zagađenja vazduha	29
2.4.1	Vrste modela disperzije aerozagađenja	30
2.5	Jednačina advektivne difuzije (JAD)	32
2.5.1	Pregled literature za slučaj analitičkog rešavanja JAD	34
2.5.2	Rešenje JAD metodom Furije transformacije	38
2.6	Gausov metod	40
2.6.1	Gausov PUFF model	50
2.6.2	Grafički prikaz analitičkog rešenja Gausovog mode	52
2.6.3	Nedostaci Gausovog modela perjanice i Puff modela.....	57
2.7	Numeričko rešavanje JAD	58
2.8	Ostale numeričke metode za rešavanje JAD	63
2.9.	Verifikacija modela.....	64
2.10.	Softversko numeričko rešenje JAD.....	68
Glava 3 DISTRIBUCIJA AEROZAGAĐENJA		70
3.1	Ekološka forenzika.....	70
3.2	Pojam i osnovne karakteristike akcidenta	72
3.2.1	Faze hemijskog akcidenta	73
3.2.2	Zone ugroženosti kod hemijskog akcidenta	74
3.3	Opasne materije.....	75
3.3.1	Klasifikacije opasnih materija.....	76
3.4	Rizik i analiza rizika kod akcidenta	79
3.4.1	Procena rizika i modelovanje razvoja akcidenta	80
3.4.2	Pregled literature za procenu i analizu rizika u transportu opasnih materija	80
3.5	Prikaz softverskih rešenja za upravljanje akcidentima	82
3.5.1	Program CAMEO-ALOHA	83
3.5.2	Program CERES.....	89
3.6	Studija slučaja	92
3.6.1	Rezultati i diskusija.....	98
Glava 4 PROGRAMSKI SISTEMI ZA RANO REAGOVANJE.....		100
4.1	Mobilne aplikacije za rano reagovanje	101
4.2	Predloženo aplikativno rešenje - HAZMAT ASSISTANT.....	104
4.2.1	Prikaz funkcionalnosti mobilne aplikacije HAZMAT ASSISTANT.....	106
4.2.2	Ekranske forme mobilne aplikacije HAZMAT ASSISTANT	108
4.2.3	Ograničenja	129

Glava 5 ZAKLJUČAK.....	131
Glava 6 LITERATURA	134
Glava 7 DODATAK 1	148
7.1 Operatorsko rešenje jednačine molekulske difuzije.....	148
Glava 8 DODATAK 2	151
8.1 Softverski paketi za odgovarajuće modele disperzije zagađenja vazduha	151

Slike

Slika 1. Raspored temperature u atmosferi (Sawaisarje, 2005)	9
Slika 2. Slojevi atmosfere (Stull, 2003),	10
Slika 3. Presek Zemljine atmosfere u funkciji distribucije njenih hemijskih jedinjenja	10
Slika 4. Transport aero polutanata (Stockie, 2011).....	19
Slika 5. Uticaj stabilnosti atmosfere na disperziju polutanata.....	22
Slika 6. Raspodela polutanata iz stacionarnog izvora prema Gausovom modelu (Nikezić, 2016)	45
Slika 7. Šematski prikaz Gausovog modela dimne perjanice(plume) i „puff“ modela.....	51
Slika 8. Zavisnost koncentracije polutanata od klasa atmosferske stabilnosti za ruralne uslove	52
Slika 9. Zavisnost koncentracije polutanata od klasa atmosferske stabilnosti za urbane uslove	53
Slika 10. Zavisnost koncentracije polutanata za različite brzine vetra za ruralne uslove	53
Slika 11. Zavisnost koncentracije polutanata za različite brzine vetra za urbane uslove.....	54
Slika 12. Zavisnost koncentracije polutanata za različite visine dimnjaka za ruralne uslove	54
Slika 13. Zavisnost koncentracije polutanata za različite visine dimnjaka za urbane uslove	55
Slika 14. Zavisnost koncentracije polutanata kod D klase atmosferske stabilnosti	57
Slika 15. Usporedne vrednosti normalizovane koncentracije (1 - merene vrednosti, 2 - izračunate normalizovane vrednosti koncentracija prema Gausovom modelu Brigsovom metodom, 3 - prema Gausovom modelu Brukhejven laboratoriji).....	67
Slika 16. Grafički prikaz numeričkog rešenja PDJ u softverskom paketu Mathematica 11.2	69
Slika 17. Sličnost naučnog i forenzičkog pristupa (Pivato, Claire & Varghese, 2020)	71
Slika 18. Osnovni elementi prikaza hemijskog udesa.....	74
Slika 19. Bazne komponente programa CAMEO	85
Slika 20. Prikaz mape grada u elektronskoj formi MARPLOT programa.....	85
Slika 21. Grafičko predstavljanje elemenata u formi simbola i linija	86
Slika 22. Prikaz ALOHA disperzionog modela u formi „footprint“	87
Slika 23. Prikaz korišćenja nekih delova programa: 1 - pretraživanje hemijskih postrojenja, 2 - prikaz traženog postrojenja na elektronskoj karti, 3 - prikaz karakteristika tražene opasne materije, 4 - šema potencijalno zahvaćene zone za traženu materiju na elektronskoj karti	87
Slika 24. Podešavanje datuma i vremena akcidenta,.....	90
Slika 25. Izbor lokacije i tipa izvora i prikaz na mapi.....	91
Slika 26. Podešavanje meteoroloških parametara a)temperatura, vlažnost vazduha i klasa stabilnosti atmosfere, b)brzina vetra i oblačnost, c)zbirni prikaz meteoroloških podataka	91
Slika 27. Izbor hemijskog jedinjenja koje se transportuje	92

Slika 28. Prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na prvi-letnji scenario sa prikazanim objektima od posebnog značaja.....	98
Slika 29. Prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na drugi-zimski scenario sa prikazanim objektima od posebnog značaja.....	98
Slika 30. Zbirni prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na oba scenarija sa prikazanim objektima od posebnog značaja.....	98
Slika 31. Prikaz različitih faza kod ranog reagovanja na akcidentne situacije.....	103
Slika 32. Prikaz Hazmat assistant na Google store	106
Slika 33. Prikaz komponenti koje učestvuju u podizanju situacione svesnosti policijskih službenika kod ranog reagovanja na akcidente	108
Slika 34. Prikaz i opis klasa opasnih materija.....	110
Slika 35. ADR klasifikacija opasnih materija.....	111
Slika 36. Prikaz označavanja vozila za prevoz opasnih materija.....	113
Slika 37. Prikaz transportne dokumentacije za prevoz opasnih materija.....	115
Slika 38. Prikaz pravnih propisa koji regulišu problematiku transporta opasnih materija.....	116
Slika 39. Prikaz meteoroloških podataka za trenutnu lokaciju	118
Slika 40. Prikaz monitoringa kvaliteta vazduha sa indeksom zagađenja.....	120
Slika 41. Prikaz ekranske forme za izveštavanje sa upitnikom.....	122
Slika 42. Prikaz ekranskih formi za obaveštavanja i notifikacije.....	123
Slika 43. Prikaz ekranskih formi za kontakt	124
Slika 44. Prikaz ekranskih formi za pripremu modelovanja rizika	125
Slika 45. Prikaz ekranskih formi za modelovanje rizika odnosno prikaza zona ugroženosti ...	127
Slika 46. Prikaz ekranskih formi za postupanje usled hemijskog akcidenta.....	129
Slika 47. Kontura obilaska pola podintegralne funkcije u kompleksnoj ravni	149

Tabele

Tabela 1. Klase stabilnosti atmosfere po Paskvilu	47
Tabela 2. Vrednosti eksponenta p prema klasama stabilnosti atmosfere	47
Tabela 3. Kategorije stabilnosti atmosfere po Paskvilu i disperzije prema Brigsu.....	49
Tabela 4. Tabela stabilnosti atmosfere prema Bruckhejven laboratoriji.....	50
Tabela 5. Uporedne vrednosti merenih i izračunatih po Gausovom modelu normalizovanih koncentracija C/Q.....	66
Tabela 6. Uporedne vrednosti za disperzije određene po osnovu Brigsovog i Bruckhejven pristupa.....	67
Tabela 7. Osobine metil-merkaptana	93
Tabela 8. Izveštaj za scenarija za lokaciju pogođenom akcidentom sa zonama ugroženosti; levo- za letnje uslove i desno za zimske uslove	94
Tabela 9. Tabelarni prikaz postojećih softverskih paketa za odgovarajuće modele disperzije zagađenja vazduha (Indra, Mrinal & Gurdeep, 2001).....	151

SPISAK OZNAKA

Oznaka	Naziv
He	Helijum
H ₂	Vodonik
N ₂	Azot
O ₂	Kiseonik
O ₃	ozon
N ₂ O	azot- suboksid
NO	azot monoksid
S	Sumpor
SO ₂	sumpor dioksid
SF ₆	sumpor- heksafluorid
H ₂ S	vodonik- sulfid
NH ₃	amonijak
C	Ugljenik
CO	ugljen monoksid
CO ₂	ugljen dioksid
CH ₄	metan
CH ₄ S	metan-etiol (metil-merkaptan)
CFC	hlorofluorougljenici
HOS	isparljiva organska jedinjenja
H ₂ O	voda
Pb	Olovo
HNO ₃	azotna kiselina
NO ₂	azot dioksid
R	koeficijent korelacije
FAC ₂	odnos koncentracija
FB	razlomačka tendencija
C _x H _y	ugljovodonici
NO _x	azotni oksidi

SPISAK OZNAKA

Oznaka	Naziv	Jedinica
x	rastojanje	[m]
u	brzina vetra	[m s ⁻¹]
σ_y	horizontalni disperzioni parametar	[m]
σ_z	vertikalni disperzioni parametar	[m]
C/Q	Gaussov model normalizovane koncentracije	[10 ⁻⁴ s m ⁻²]
PM	suspendovane čestice (eng. <i>particulate matter</i>)	[μm]
PM _{2.5}	„fine“ čestice čiji je prečnik manji ili jednak 2,5 μm	[μm]
PM ₁₀	„grube“ veće su od 2,5 μm, ali im je prečnik manji ili jednake 10 μm	[μm]

SPISAK TERMINA I SKRAĆENICA

Termin ili skraćena	Srpski/Serbian	Engleski/English
IKTS	informaciono komunikacioni sistem	Information communication system
CAMEO	program za rad u vanrednim situacijama	Computer aided Managment of Emergency Operations
ALOHA	program za upravljanje atmosferskim zagađenjem	Areal Locations of Hazardous Atmospheres
MARPLOT	program za prepoznavanje, planiranje i oeracije	Mapping Aplications for Response, Planning and Operational Tasks
CERES	program za upravljanje u vanrednim situacijama	Chemical Emergency Response E-Service
IQ	koeficijent inteligencije	Intelligence Quotient
UV	ultravioletno zračenje	Ultraviolet radiation
MLR	linearni modeli kao višestruka linearna regresija	Linear models as multiple Linear regression
PDJ	parcijalna diferencijalna jednačina	Partial differential equation
JAD	jednačina advektivne difuzije	Equation of advective diffusion
PBL	planetarni granični sloj atmosfere	Planetary boundary layer of the atmosphere
ABL	granični sloj atmosfere	Border layer of atmosphere
ADMM	advekciono difuziona višeslojna metoda	Advection diffusion multi-layered method

SPISAK TERMINA I SKRAĆENICA

Termin ili skraćena	Srpski/Serbian	Engleski/English
CFD	Model računarske dinamike fluida	Computational Fluid
ADR	Evropski sporazum o međunarodnom prevozu opasnih materija u drumskom saobraćaju	Dynamics model Accord European relatifou transport international de merchandises Dangereuses par Route
UN	Ujedinjene nacije	United Nations
WHO	Svetska zdravstvena organizacija	World Health Organization
EU	Evropska unija	European Union
US EPA	Američka agencija za zaštitu	U.S. Enviromental Protection
OEPPR	životne sredine	Agency - Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office
NOAA	Nacionalna uprava za okeane i atmosferu	Natonal Oceanic and Atmosferic Administartion
SERC	Državna komisija za vanredne slučajeve	State Emergency Responce Commisions
TERC	Regionalna komisija za vanredne slučajeve	Tribal Emergency Responce Commision
LEPC	Lokalna komisija za vanredne slučajeve	Local Emergency Planning Committees
APELL	Spremnost za pomoć u vanrednim situacijama na lokalnom nivou	Awareness and Preparedness for Emergencies at the Local Level

Glava 1

UVOD

Ispuštanja opasnih gasova u atmosferu, bilo slučajno zbog ljudske nemarnosti, kvarova u postrojenju, prirodnih nepogoda, ili namerno u terorističkim napadima, predstavljaju veliku opasnost po stanovništvo i infrastrukturu kao i po životnu sredinu.

Problematika zagađenja životne sredine, njihovih uzroka i posledica, podrazumeva unapređenje i usavršavanje metoda i tehnika za analizu i procenu rizika od neželjene opasnosti sa potencijalno ozbiljnim posledicama po ljudsko zdravlje ili životnu sredinu. Potrebe za identifikovanjem pojavnih oblika i otkrivanje učinilaca ovih dela, vremenom su usloveli da se iz grupacije forenzičkih nauka izdvoji i posebna disciplina, forenzika životne sredine ili ekološka forenzike.

Oblast ekološke forenzike ili forenzike životne sredine nastala je osamdesetih godina dvadesetog veka, kao važna oblast proučavanja i sagledavanja problema zagađenja životne sredine i sprečavanja štete koja bi tim zagađenjem nastala.

Kod ekološke forenzike postoje dva pristupa istraživanja. Prvi je konvencionalni pristup, ili pristup po standardnim EPA¹ standardima i metodama koje se koriste za određivanje koncentracija odabranih hemijskih materija ili jedinjenja koja se ispuštaju u životnu sredinu. Ove metode su veoma jednostavne, dobro dokumentovane i nalaze se u širokoj primeni, ali daju informacije samo o specifično izabranoj hemijskoj materiji ili jedinjenju. Iako ove vrste informacija mogu biti korisne u svrhu praćenja toka zagađenja, od male koristi su kod utvrđivanja izvora zagađenja, snaga izvora, koncentracija zagađivača kao i zone ugroženosti usled zagađenja. Drugi pristup je kompleksniji i podrazumeva upotrebu i primenu širokog spektra multi-disciplinarnih naučnih tehnika i analitičkih i numeričkih metoda radi dobijanja sveobuhvatne slike zagađenja.

¹ Environmental Protection Agency

U radu se baziramo na drugom pristupu uz primenu naprednih tehnologija (IKT i mobilnih), kao i korišćenje analitičkih metoda i numeričko-grafičkih prikaza u cilju identifikacije, analize i procene rizika kod aero zagađenja.

Opasne materije koje se koriste, obrađuju ili prevoze često su podložne incidentima različite težine, i uprkos korišćenju raznih tehnika i procedura kao i mera usvojenih za sprečavanje tih nesreća, nije moguće smanjiti rizik od njih na nulu. Da bi rizik bio minimalan, neophodno je razviti planove i procene za smanjenje katastrofa koji omogućavaju zaštitu potencijalno pogođenog područja (Filipović, 2000).

Matemtički modeli disperzije opasnih materija čine osnov prevencije i zaštite u vanrednim situacijama, s obzirom na to da su nivo i opseg posledica direktno proporcionalni merama koje su potrebne za njihovo izbegavanje ili ublažavanje. Ali, nažalost, raznovrsnost mogućih scenarija i složenost mehanizama, parametara i promenljivih, čine predviđanja teškim, utičući na rezultate sa visokim nivoom neizvesnosti.

U početku su to bili jednostavni modeli koji su se mogli ručno proračunati. Razvoj informacionih tehnologija doprineo je ubrzanom razvoju matematičkih modela disperzije čime su oni postali sve kompleksniji, sa sve više ulaznih parametara.

Za merenje koncentracije opasnih gasova koriste se fizičke, hemijske, fizičko-hemijske i elektrohemije metode. Granična vrednost opasnih gasova je propisom određen protok ili koncentracija štetnih i opasnih komponenti na mestu akcidenta. Rezultati merenja se mogu prikazati kao masa po jedinici zapremnine gasa ili kao masa protoka u jedinici vremena (mg/h, gr/h i sl.). Za određivanje emisije opasnih gasova primenjuju se kontinualne metode (neprekidne, u dužem vremenskom periodu) i diskontinualne (merenje koncentracije gasova u kraćem vremenskom intervalu). Merenje je od velikog značaja za utvrđivanje uticaja koncentracije opasnih gasova na zdravlje stanovništva i životnu sredinu.

U slučaju emisije opasnih gasova u atmosferu, stručnim timovima Sektora za vanredne situacije potrebno je obezbediti neophodne i relevantne podatke u jako kratkom vremenskom roku, kako bi preduzeli adekvatne i efikasne akcije u cilju smanjenja ili eliminisanja štete po stanovništvo i infrastrukturu.

Postojeće softverske aplikacije za modelovanja gasnog zagađenja daju samo delimično rešenje problema disperzije. Veliki procenat ovih modela ne radi u stvarnom-realnom vremenu, sa istovremenom akvizicijom i obradom snimljenih podataka, već samo vrši analizu prikupljenih podataka i prikaz regiona rizika u dve dimenzije. Zone različitih koncentracija opasnih materija

su statične i ne uzimaju u obzir dinamiku procesa, primarnu promenu atmosferskih uslova i promenu jačine izvora zagađenja.

1.1 Predmet rada

Gasni omotač oko planete predstavlja jedan od najznačajnijih faktora kvaliteta života na Zemlji, kao i samog opstanka života, zbog čega je treba neprekidno štiti od zagađenja. Sa stanovišta mogućnosti zaštite životne sredine, vazduh po obimu potrebne zaštite, predstavlja najveći, a po postupcima i mogućnostima zaštite, najkompleksniji deo čovekovog okruženja. Čist i kvalitetan vazduh je prema svojim karakteristikama jedan od osnovnih preduslova egzistencije ljudske populacije na planeti.

Aerozagađenje u akcidentnim situacijama, koje su posledica havarijskih emisija usled oštećenja uređaja i opreme hemijskih postrojenja ili transportnih sistema i skladišta opasnih hemijskih supstanci, je osnova za hitno rano reagovanje. Otklanjanje posledica emisije štetnih gasova je deo procesa upravljanja rizikom koje ima za cilj praćenje krizne situacije, obnavljanje i sanaciju životne sredine, kao i uklanjanje opasnosti od mogućnosti ponovnog nastanka udesa.

Analiza uticaja zagađenja vazduha na zdravlje ljudi kroz analizu rizika kod definisanih modela, u smislu ranog reagovanja kod vanrednih situacija (akcidenata), je značajno olakšana korišćenjem naprednih informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT). Brzina širenja zagađenja iz tačkastog izvora kao i koncentracija zagađivača su najvažniji parametri koji direktno utiču na zagađenje prirodnih resursa i na ljudsko zdravlje. Od efikasnosti brze identifikacije i vizuelizacije informacije o ugroženoj oblasti direktno zavise zdravlje i životi populacije nastanjene u njoj kao i zdravlje ljudi koji su, po prirodi posla, zaduženi da prvi reaguju u vanrednim situacijama.

1.2 Naučni cilj rada

Utvrdjivanje modela disperzije za odabrane polutante predstavlja osnovni cilj ovog rada kako bi se omogućila procena zagađenja vazduha koji je primarno uslovljen polutantima kod akcidenata usled transporta opasnih materija i izlivanja hemijskih supstanci i jedinjenja, uz uzimanje u obzir i drugih faktora kao što su meteorološki, topografski i ostali. U relevantnoj literaturi ranije definisani modeli disperzije sagledavali su uglavnom makro (čitava zemlja) ili mezo (nivo grada) zagađenosti vazduha, dok se u poslednje vreme težište ovih istraživanja pomera ka iznalaženju modela koji su adekvatni za mikro-nivo (određenu konkretnu lokaciju).

Poseban akcenat je na brizi prema stanovništvu kao i uticaj za stvaranje ekološki nezdrave sredine za život i rad ljudi zahvaćenom delovanju opasnih materija. Ovaj rad bi trebalo da ukaže na potrebu za ranim reagovanjem na potencijalne opasnosti kojima su izloženi upravo stanovnici u zonama zahvaćenim uticajem opasnih materija. Rano reagovanje bi podrazumevalo primenu naprednih informacionih tehnologija kao i mobilnih aplikacija od strane policijskih službenika opšte nadležnosti u cilju brzog reagovanja i ranog planiranja eventualnih evakuacija stanovništva i životinja na kontaminiranom području. U perspektivi, ukoliko se pokaže opravdanost upotrebe resursa mobilne aplikacije, radi donošenja što bržih i adekvatnijih odluka, u planu je službena upotreba mobilne aplikacije na svim nivoima kao i predviđanje organizacione jedinice na nivou Operativno komandnog centra radi koordinacije svih službi i specijalnih timova u prevazilaženju i minimizaciji potencijalnih posledica akcidenta.

Traženje odgovora na pitanje da li će rešavanje advektivno – difuzione jednačine disperzije aeropolutanata omogućiti bolje razumevanje problema transporta vazdušnih polutanata od izvora zagađenja do neke udaljenje lokacije, predstavlja cilj prvog dela ovog rada. Prilikom analize kretanja štetnih materija, sagledani su izvori zagađenja koji se nalaze na različitim lokacijama i na različitim rastojanjima.

Takođe, cilj rada predstavlja kreiranje modela održivog upravljanja aerozagađenjem u akcidentnim situacijama. Model koji će se analizirati je baziran na prediktivnoj analizi kroz primenu analitičkih i numeričkih metoda obrade ulaznih parametra kao što su vrsta supstance, brzina vetra, temperatura i vlažnost vazduha, klasa stabilnosti atmosfere, koncentracija emitovane supstance i udaljenost od izvora zagađenja. Procena mogućeg zagađenja se zasniva na fizičko-hemijskim osobinama materija koja se oslobađaju u akcidentu, meteorološkim uslovima u trenutku udesa i okolnostima pod kojima je došlo do nekontrolisane emisije. Saznanja dobijena na ovaj način nalaze veliku primenu prilikom postupanja u ranoj fazi odgovora na akcident.

Drugi deo rada pruža odgovor na pitanje unapređenja efikasnosti odgovora na akcidente. Odgovor se bazira na ponuđenom softverskom rešenju. Ovo rešenje omogućava policijskim službenicima da preko mobilnih uređaja dobiju informacije potrebne za identifikaciju štetne materije kod akcidenta, podatke o njoj koncentraciji i raspodeli kao i procene širenja ispuštenih opasnih materija. Te informacije omogućavaju pravovremeno upozorenje stanovništva, eventualnu njihovu evakuaciju, odnosno preduzimanje drugih neophodnih mera za zaštitu zdravlja stanovništva i očuvanja životne sredine.

1.3 Hipoteze od kojih se polazi

Osnovne polazne hipoteze koje vode ispunjavanju ciljeva ovog rada nastale su kao rezultat detaljnog proučavanja dosadašnjih istraživanja, najnovijih dostignuća i saznanja u oblasti matematičkog modelovanja.

Uočeno je da kod neposrednog ranog reagovanja na akcidente (eng. *first respond*) ne postoje odgovarajuće informacije o ugroženim oblastima koje bi omogućile da se na adekvatan način reaguje kako bi sprečile ili minimilizovale štetne posledice po zdravlje stanovnika i životnu sredinu. Pretpostavlja se da mobilne tehnologije treba da omoguće blagovremeno posedovanje ove informacije, uz mogućnost njene vizuelizacije, čime bi se obezbedilo optimalno postupanje kao brzi odgovor na akcident.

Hipoteze kojima je definisan predmet istraživanja proistekle su tokom analiziranja literature i sagledavanja realne ekološke situacije. Povišene vrednosti parametara zagađenja usled hemijskog akcidenta kreiraju zabrinjavajuću situaciju sa stanovišta identifikovanja posebno opasnih i najčešćih uzročnika zagađenja u cilju otklanjanja daljih efekata štetnih po ljudsko zdravlje i životnu sredinu. Sagledavajući napred navedeno, definisane su hipoteze, koje će biti predmet rada i obrade ove doktorske disertacije.

H0: Izbor modela upravljanja kod akcidenata utiče na nivo rizika u pogledu ugroženosti zdravlja ljudi i životne sredine.

Za ispitivanje parametara i faktora zagađenja opasnih materija uzimaju se u razmatranje, sa jedne strane, hemijska materija koja se prevozi, ADR klasa, količina koja se prevozi kao i količina koja se izlila i transportno sredstvo za prevoz opasne materije (bure, cisterna, vagon, i dr.), dok se sa druge strane uzimaju u obzir klimatski uslovi, temperatura, brzina i smer vetra, vlažnost vazduha, doba dana ili noći.

Pored osnovne (radne), formulisana je i pomoćna hipoteza:

H1: Ishod rangiranja parametara zagađenja na lokaciji akcidenta, primenom višekriterijumske analize u zavisnosti od vrednosti parametara u vazduhu, direktno zavisi, pored emisije i procesa disperzije zagađujućih materija u atmosferi u odnosu na izvor zagađenja, i od klimatskih uslova.

U literaturi se za disperziju zagađenja u vazduhu koriste različiti matematički modeli, ali se oni, uglavnom, baziraju na Gausovom modelu distribucije polutanata u vertikalnom pravcu i bočno u odnosu na pravac vetra uključujući efekat odbijanja polutanata o podlogu.

1.4 Metode istraživanja

U cilju ispunjenja zadataka postavljenih predmetom i naučnim ciljem u tezi, s obzirom na kompleksnost istraživanja, koristi se više metoda istraživanja. Istraživanje počinje konsultovanjem adekvatne naučne literature, a nastavlja se nizom faza u kojima dominiraju naučne metode analitičke i numeričke simulacije. Raspored faza definiše i jasno pokazuje istraživačke metode koje se u radu koriste. Izbor specifičnih metoda istraživanja određen je, prvenstveno, činjenicom da postoje četiri koraka u rešavanju problema zagađenja i njegove optimizacije:

- prikupljanje podataka o izvoru zagađenja (vrsta, količina, agregatno stanje, ...), vrsta transportnog sredstva za prevoz opasne materije (buad, mini cisterna, auto cisterna, vagon cisterna i dr), meteoroloških uslova (temperatura, brzina i smer vetra, vlažnost vazduha, doba dana, godišnje doba i dr.), i kontinuirano praćenje zadatah parametara zagađenja;
- analiza, sinteza i klasifikovanje dobijenih podataka,
- matematičko modelovanje problema na osnovu relevantnih podataka iz prethodne dve faze, kao i kreiranje zona opasnosti;
- sagledavanje potencijalnog rizika i brzo reagovanje.

Matematički modeli za procenu rizika su brojni i uglavnom se zasnivaju na proceni verovatnoće pojavljivanja opasnog događaja.

Za potrebe matematičkog modelovanja korišćene su različite tehnike i metode, zbog kompleksnosti istraživanog zadatka, kao i aplikativna rešenja ALOHA i CERES koja razmatraju zagađenost vazduha u zavisnosti i od lokacije, meteoroloških faktora i klasa stabilnosti.

U toku izrade doktorske disertacije korišćiće se i sledeće metode:

- *Metoda deskripcije* – korišćiće se u početnom delu disertacije za opisivanje problema istraživanja, postupaka koji su korišćeni tokom analize problema i za opisivanje dobijenih rezultata.
- *Metoda analize* – metodom analize, odrediće se elementi, veze i procesi koji čine strukturu ugroženog prostora.
- *Metoda analitičkog i numeričkog rešavanja advektivno – difuzione jednačine disperzije aeropolutanata* – primeniće se za izračunavanje širenja polutanata u atmosferu iz tačkastog izvora. Ona treba da dokaže da disperzija i koncentracija zagađujućih materija

zavise od količine emitovanih zagađujućih materija, atmosferskih strujanja (horizontalnih i vertikalnih), hemijskih reakcija oslobođenih polutanata i brzine taloženja polutanata.

- *Metoda numeričke analize i simulacije koncentracije i disperzije aeropolutanata* – primenom adekvatnog programskog paketa treba da se dobiju rezultati u tabelama i grafikonima koji ilustruju raspodelu koncentracije zagađujućih materija u funkciji rastojanja od izvora, rastojanja na kojima su maksimalne koncentracije, zavisnost koncentracije od snage izvora, zavisnost koncentracije od različitih vremenskih uslova.
- *Metoda sinteze* – koristiće se za sistematizaciju dobijenih rezultata, upoređivanjem i izvođenjem zaključaka.
- *Komparativna metoda* – dobijeni rezultati će se verifikovati metodom komparacije sa drugim studijama dostupnim u literaturi.
- Razvoj algoritama i specijalizovanih programa za implementaciju matematičkih modela disperzije aeropolutanata (MATLAB, MAXIMA i MATHEMATICA) – proverom dobijenih podataka preko kreiranog programa za modelovanje i vizuelizaciju.

1.5 Očekivani naučni doprinos

U disertaciji se analiziraju i integrišu savremena teorijska saznanja, metodološki pristupi, i prezentuju sopstvena istraživanja i rezultati u izabranoj oblasti. Naučno je zasnovana i predstavlja zaokruženu istraživačku celinu. Tema analize rizika, procene i upravljanje rizicima danas je veoma aktuelna.

Originalnost ove teze se ogleda u odabiru adekvatnih pokazatelja na osnovu kojih je procenjen rizik na različitim nivoima složenosti. Originalnost se ogleda i u načinu analiziranja problema koji se u njoj razrađuju, a zasniva se na sledećim činjenicama:

- U tezi se predlaže originalno rešenje za poboljšanje razumevanja situacije i adekvatno postupanje pri ranom reagovanju na accident, za koje, u postojećoj literaturi, ne postoje dovoljno detaljno razmatrani primeri primene modelovanja disperzije aeropolutanata u realnom vremenu.
- Predmet istraživanja, osnovni pojmovi numeričke simulacije i obrada računskih podataka zasnivaju se na poštovanju osnovnih naučnih principa u naučnoj oblasti kojoj teza pripada.

Obzirom da su ciljevi istraživanja proistekli iz nedovoljne istraženosti problema, dobijeni rezultati predstavljaju originalan doprinos istraživačkoj oblasti.

Glava 2

UOPŠTENO O VAZDUHU

U svetu raste zabrinutost zbog sve većeg globalnog zagađenja životne sredine, posebno usled povećanog broja incidenata okončanih zagađenjem vazduha, tla i vode u mnogoljudnim gradovima širom sveta. Zbog shvatanja značaja proučavanja i sprečavanja zagađenja životne sredine, informacije o polutantima i njihovom uticaju na živi svet postaju sve dostupnije.

Problem zagađenja vazduha je globalni problem jer pogađa praktično sve zemlje u svetu tj. sve njihove regione, naselja, socioekonomske i starosne grupe. Postoje važne geografske razlike u izloženosti zagađenju vazduha. Građani Afrike, Azije i Srednjeg Istoka udišu mnogo veće koncentracije polutanata od ostalih u svetu.

Prema podacima Svetske zdravstvene organizacije, zagađenje vazduha je najveća pretnja očuvanju životne sredine i godišnje je odgovorno za jedan od devet smrtnih slučajeva, što je oko 3 miliona ljudi svake godine. Samo jedna od deset osoba živi u gradovima koji ispunjavaju standarde o kvalitetu vazduha. Zbog toga smo suočeni sa postojanjem velikog broja obolelih od hroničnih neinfektivnih oboljenja (bolesti srca i organa za disanje), koja utiču na kvalitet života ljudi, ali i na ekonomski razvoj društva. Može se reći da kvalitet vazduha predstavlja marker održivog razvoja društva (Neira, 2016).

Atmosfersko zagađenje je globalno, jer od toga ne stradaju samo oni koji dovode do zagađenja, već i ostali subjekti i ostale zemlje zbog toga što se polutanti prenose na velika rastojanja. Na primer, usled havarije na nuklearnoj elektrani u Černobilu produkti raspada radioaktivnih čestica su registrovani i u Londonu (Borzenkova & Turchinovich, 2009).

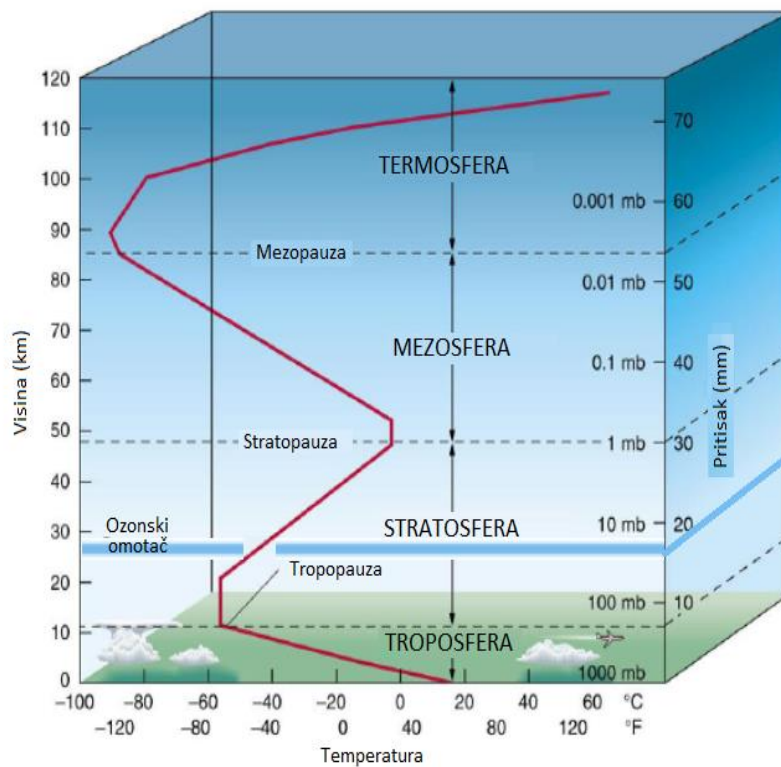
2.1 Osobine atmosfere

Vazduh je nesumnjivo jedan od najvažnijih prirodnih resursa. Čist vazduh je od vitalnog značaja za ljudsko zdravlje i dobrobit. On je kombinacija različitih gasova poput azota, kiseonika, ugljen -dioksida i drugih gasova u tragovima, zajedno sa vodenom parom koja se

uočava kao vlaga i suspendovanih čvrstih materija u obliku čestica (Barry & Chorley, 1998).

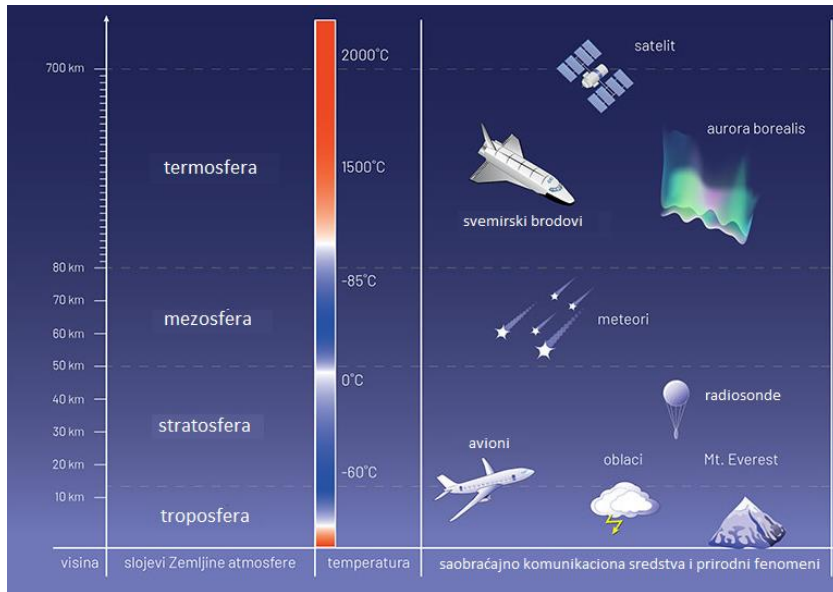
Primese (polutanti, aerozagađivači) se emituju u vazduh iz različitih izvora, posle čega se mešaju sa okolnim vazduhom, transportuju i razblažuju. Ova pojava, koja se naziva disprezija primesa u atmosferi, zbog čega je za njeno razumevanje i modelovanje nužno poznavanje strukture i osobine atmosfere (Lin, Tawhai & Hoffman, 2013).

Atmosfera je podeljena u četiri različita sloja različite temperature zbog različite apsorpcije sunčeve energije (slika 1).

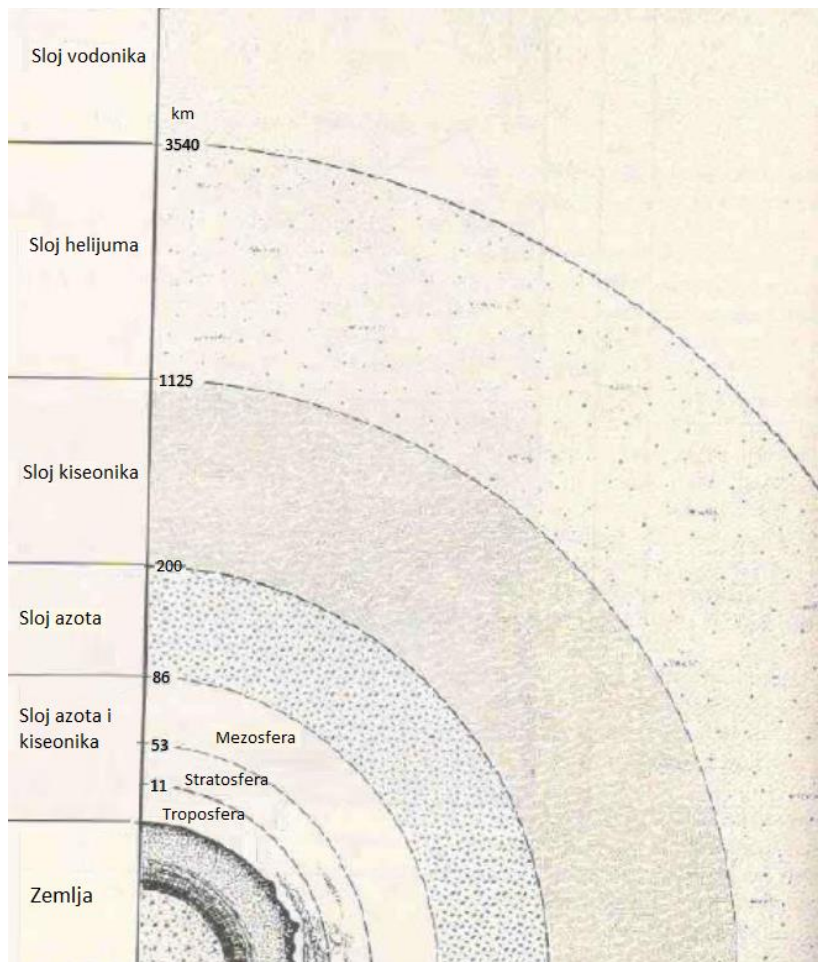


Slika 1. Raspored temperature u atmosferi (Sawaisarje, 2005)

Četiri atmosferska sloja su: troposfera, stratosfera, mezosfera i termosfera (slika 2).



Slika 2. Slojevi atmosfere (Stull, 2003),



Slika 3. Presek Zemljine atmosfere u funkciji distribucije njenih hemijskih jedinjenja

2.1.1 Troposfera

Atmosferski sloj vazduha uz površinu zemlje naziva se troposfera. Ovaj sloj ima visinu od oko 16 km iznad ekvatora i oko 8 km iznad polova. Ovaj sloj sadrži oko 80 % ukupne mase atmosfere zbog gravitacione sile i stišljivosti gasova. U troposferi temperatura vazduha opada sa povećanjem nadmorske visine i dostiže oko -60°C na vrhu sloja. Jasna granica gde se temperatura invertuje naziva se tropopauza, i ona ograničava mešanje između troposfere i gornjih slojeva.

U troposferi se ostvaruju sve životne aktivnosti. Ona sadrži vodu, paru, gasove i prašinu. U ovom sloju se oni brzo mešaju zbog vetra ili turbulencije. Vreme zadržavanja čestica u troposferi je kratko zbog kiše, gravitacije i pomeranja vazduha. Vremenski uslovi na Zemlji se realizuju u ovom sloju atmosfere.

Od interesa za disperziju zagađujućih materija, najčešće je samo troposfera. Deo troposfere, u kojem se obavlja disperzija zagađujućih materija, naziva se atmosferski granični sloj.

2.1.2 Stratosfera

Ovaj sloj se proteže iznad troposfere do oko 50 km. U ovom sloju temperatura vazduha je stabilna ili se čak povećava sa porastom nadmorske visine. Zapremina vodene pare u ovom sloju je oko sto puta manja nego u troposferi, a ozon je gotovo hiljadu puta veći u odnosu na troposferu. U ovom sloju ozon nastaje od molekula kiseonika pod uticajem Sunčevog zračenja u fotohemijским reakcijama. Količina ozona varira u zavisnosti od lokacije i godišnjeg doba. Koncentracija ozona je najniža iznad ekvatora, povećavajući se prema polovima. Takođe, značajno se povećava tokom leta.

U stratosferi, ozon apsorbuje većinu dolazećeg sunčevog ultraljubičastog (UV) zračenja i time štiti život na površini Zemlje. Smanjenje stratosferskog ozona na celoj planeti dovodi do povećanja količine opasnih UV zraka, koji kod ljudi stvaraju probleme sa očima, izazivaju genetske mutacije, povećavaju stopu raka kože, izazivaju propadanje useva itd. Ovaj sloj ne sadrži vodenu paru i prašinu. Zagađenja koja ulazi u ovaj sloj obično tu ostaju dugo, zbog slabog mešanja delova stratosfere.

2.1.3 Mezosfera

Iznad stratosfere je mezosfera. Prostire se do visine od oko 85 km iznad naše planete. Većina meteora izgori u mezosferi. Za razliku od stratosfere, temperature u mezosferi ponovo postaju niže kako se podižemo kroz mezosferu. Najhladnije temperature u Zemljinoj atmosferi, oko -90°C , nalaze se pri vrhu ovog sloja. Vazduh u mezosferi je previše razređen

da bi mogao da se udiše. Vazdušni pritisak na dnu ovog sloja je znatno ispod 1 % pritiska na nivou mora i nastavlja da pada kako idemo naviše.

2.1.4 Termosfera

Temperatura se naglo menja na oko 80 km od zemljine površine i sloj u kome se to realizuje naziva se termosfera. Ovaj sloj se proteže do oko 1600 km iznad površine Zemlje i sadrži visoko jonizovane gasove. Molekule ovog sloja neprestano bombarduje sunčevo zračenje velike energije i kosmičko zračenje, pa su temperature u termosferi veoma visoke. Donji deo termosfere naziva se jonosfera. U ovoj oblasti se pojavljuje polarna svetlost, jer velike količine sunčeve i kosmičke energije stimulišu jonizovane gasove da emituju vidljivu svetlost.

Ne postoji jasna granica koja čini kraj atmosfere. Pritisak i gustina atmosfere se, sa udaljavanjem od Zemlje, postepeno smanjuju dok ne prestanu da se razlikuju od bliskog vakuuma međuzvezdanog prostora. Sastav termosfere, takođe, postepeno postaje isti kao i sastav međuzvezdanog prostora i čine ga uglavnom He i H₂ (slika 3).

2.1.5 Kontaminacija vazduha

Kontaminacija (zagađenje) je proces remećenja životne sredine, tj. zemljišta, vode i vazduha, dodavanjem štetnih supstanci u nju. Zagađenje uzrokuje neravnotežu u životnoj sredini (Thompson, 1998). Ova neravnoteža vremenom ugrožava opstanak života. To je pretnja celom svetu posebno što se zagađenje povećava iz dana u dan.

Zagađenje vazduha može se definisati kao bilo kakvo atmosfersko stanje u kojem su određene supstance prisutne u takvim koncentracijama da mogu proizvesti neželjene efekte na životnu sredinu ljudi (Nikezić, 2017). Gotovo sve primese u vazduhu su prirodno prisutne u atmosferi u niskim (pozadinskim, fon) koncentracijama i obično se smatraju bezopasnim.

Stoga, određena supstanca se može nazvati zagađivačem vazduha, ako je njena koncentracija relativno visoka u poređenju sa pozadinskom vrednošću i ako izaziva štetne efekte.

Zagađenje vazduha jedan je od najozbiljnijih ekoloških problema u društvima sveta koji utiče na zdravlje ljudi, biljaka i životinja. Na primer, postoje dobri dokazi da je 900 miliona gradskih stanovnika svakodnevno izloženo visokim koncentracijama sumpor-dioksida u vazduhu. Industrijski razvoj je povezan sa emisijom velikih količina gasovitih i čestica u vazduh iz industrijske proizvodnje i sagorevanjem fosilnih goriva za energiju i transport.

Iako su uvedene nove tehnologije za kontrolu zagađenja vazduha, otkriveno je da se emisije gasova nastavljaju i stvaraju druge probleme. Trenutno su naponi za kontrolu emisija delimično uspešni u većini razvijenih zemalja, ali i dalje postoji zdravstveni problem zbog zagađenja vazduha (Jaćimovski, Miladinović, Radovanović & Ilijazi, 2013).

U društvima zemalja u razvoju, manje resursa se može koristiti za kontrolu zagađenja vazduha. Industrijski razvoj, povećanje prometa vozila, sve veći zahtevi za energijom u domaćinstvima postojanje velikih urbanih područja rezultira problemom zagađenja vazduha u društvima u razvoju. U mnogim tradicionalnim društvima i društvima u kojima su energije u domaćinstvu dostupni u neprerađenom obliku, kontaminacija vazduha je izražena zbog neefikasnih uređaja koji se koriste za grejanje zgrada i kuvanje. To uzrokuje zagađenje vazduha i na otvorenom i u zatvorenom prostoru, a rezultati mogu biti problemi sa očima, plućne bolesti i rizik od raka. Posebno u urbanim sredinama postoji problem zagađenja vazduha u zatvorenim prostorima čak i u mnogim razvijenim zemljama. Hemikalije koje proizvode sistemi grejanja i hlađenja i supstance koje isparavaju iz građevinskog materijala akumuliraju se u zatvorenom prostoru i stvaraju problem zagađenja.

2.2 Zagađivači vazduha

Zagađivači vazduha se, uglavnom, mogu klasifikovati na primarne i sekundarne (Seinfeld & Pandis, 2016).

Primarni zagađivači vazduha su supstance koje se direktno emituju u atmosferu iz izvora.

Osnovni primarni zagađivači su sledeći:

- 1) Jedinjenja azota. Na primer: N_2O , NO i NH_3
- 2) Jedinjenja sumpora. Na primer: SO_2 i H_2S
- 3) Jedinjenja ugljenika. Na primer: CO , CO_2 , CH_4 i isparljiva organska jedinjenja (IOJ)
- 4) Halogena jedinjenja (bromidi, hloridi i fluoridi)
- 5) Čestice (PM) ili aerosoli (u čvrstom ili tečnom obliku)

Sekundarni zagađivači vazduha se ne emituju direktno iz izvora, već se formiraju ili emituju u atmosferu od primarnih zagađivača vazduha.

Sekundarni zagađivači vazduha su sledeći:

- 1) HNO_3 i NO_2 i nastali od NO

- 2) Ozon (O_3) nastao fotokemijskim reakcijama azotnih oksida i isparljivih organskih jedinjenja (IOJ)
- 3) Kapljice azotne kiseline nastale od NO_2 i kapljice sumporne kiseline nastale od SO_2
- 4) aerosoli sulfata i nitrata (npr. amonijum bisulfat i amonijum nitrat) nastali reakcijama kapljica sumporne kiseline i kapljica azotne kiseline sa NH_3
- 5) Organski aerosoli nastali od (IOJ) u reakcijama gasa i čestica.

Neki uobičajeni zagađivači vazduha i njihov uticaj na zdravlje i životnu sredinu.

2.2.1 Azot dioksid (NO_2)

Ovo je crvenkastosmeđi gas koji nastaje u vazduhu okoline oksidacijom azot-oksida (NO). Azotni oksidi (NO_x) doprinose stvaranju čestica, ozona, izmaglice i kiselih kiša. Azot dioksid u većini dolazi iz elektrana, vozila, kućnih grejača i plinskih peći.

Kratkotrajna izloženost (npr. manje od 3 sata) niskim nivoima NO_2 može dovesti do kašlja kod ljudi i može izazvati nedostatak daha. Ove izloženosti, takođe, mogu povećati respiratorne bolesti kod dece. Dugotrajna izloženost NO_2 može dovesti do povećane osetljivosti na respiratorne infekcije i može prouzrokovati trajne promene na plućima. NO_x reaguje u vazduhu i formira prizemni ozon i fine čestice primesa, koje su povezane sa štetnim efektima na zdravlje.

NO_x u velikoj meri utiču na životnu sredinu direktno i u kombinaciji sa ostalim jedinjenjima u kiseloj kiši i ozonu. Povećani unos azota u kopnene i močvarne sisteme može dovesti do promena u sastavu biljnih vrsta i nastanku mutacija kod istih.

Azot, sam ili u kiseloj kiši, može zakiseliti zemljište, što uzrokuje gubitak osnovnih hranljivih sastojaka u biljkama i povećani nivo rastvorljivog aluminijuma koji je toksičan za biljke. Slično, azot, sam ili u kiseloj kiši, može zakiseliti površinske vode i to stvara uslove niskog pH i nivoa aluminijuma koji su toksični za ribe i druge vodene organizme. NO_x , takođe, doprinose pogoršanju vidljivosti.

2.2.2 Ozon (O_3)

Prizemni ozon je primarni sastojak smoga. Ozon se ne stvara direktno u vazduhu, već nastaje mešanjem isparljivih organskih jedinjenja (IOJ) i NO_x u prisustvu toplote i sunčeve svetlosti. Prizemni ozon se uglavnom stvara u atmosferi po toplom letnjem vremenu. NO_x dolazi iz motornih vozila, elektrana i drugih izvora sagorevanja. Promena godišnjih doba doprinosi godišnjim razlikama u koncentracijama ozona iz regiona u region.

Kratkotrajna (1 do 3 sata) i produžena (6 do 8 sati) izloženost atmosferskom ozonu povezana je sa nizom zdravstvenih problema. Ozon može dovesti do problema u funkciji pluća i pojačanih respiratornih simptoma kao što su bol u grudima, bol u grlu, kašalj, otežano disanje i astma. Ovi efekti se, uglavnom, javljaju dok pojedinci aktivno vežbaju, rade ili se kreću na otvorenom. Deca koja su aktivna na otvorenom tokom leta kada je nivo ozona najveći, izložena su najvećem riziku od takvih efekata. Druge rizične grupe su osobe koje su aktivne na otvorenom (npr. neki radnici na otvorenom) i osobe sa već postojećim respiratornim bolestima kao što su astma i hronične plućne bolesti. Pored toga, dugotrajna izloženost umerenim nivoima ozona predstavlja mogućnost nepovratnih promena na plućima, što može dovesti do prevremenog starenja pluća i pogoršanja hroničnih respiratornih bolesti.

Ozon, takođe, utiče na vegetaciju i ekosisteme. Ozon izaziva smanjenje prinosa poljoprivrednih useva i komercijalnih šuma, smanjeni rast i preživljavanje sadnica drveća i povećana osetljivost biljaka na bolesti, štetočine i druge stresove iz okoline. Kod višegodišnjih vrsta, ovi efekti se mogu uočiti nakon nekoliko godina ili čak decenija, što može da ima dugoročne efekte na šumske ekosisteme.

2.2.3 Sumpor-dioksid (SO₂)

Sumpor-dioksid je nagrizajući gas koji se ne može videti ili osetiti i pripada porodici SO_x gasova. Ovi gasovi uglavnom potiču od sagorevanja goriva koje sadrži sumpor (pre svega uglja i nafte) u elektranama, visokim pećima za proizvodnju metala i drugim industrijskim procesima. Sagorevanje goriva za proizvodnju električne energije čini većinu ukupnih emisija SO₂.

Visoke koncentracije SO₂ mogu uticati na astmatičnu decu i odrasle koji su aktivni na otvorenom prostoru. Kratkotrajna izloženost astmatičara povišenim nivoima SO₂, tokom umerene aktivnosti, može dovesti do poteškoća sa disanjem koje mogu biti praćene simptomima kao što su, stezanje u grudima ili otežano disanje. Posledice dugotrajna izloženost visokim koncentracijama SO₂ su kardiovaskularne bolesti, respiratorne bolesti i promene na plućima. Takođe, SO₂ može iritirati oči, nos i grlo. Zajedno SO₂ i NO_x su glavni izvori jedinjenja za stvaranje kiselih kiša i finih čestica primesa, što je povezano sa zakiseljavanjem tla, jezera i potoka i ubrzanom korozijom zgrada i spomenika. SO₂ je, takođe, osnovni izvor nastanka PM_{2,5}, što izaziva značajnu zdravstvenu zabrinutost i osnovni je uzrok slabe vidljivosti.

2.2.4 Čestice (particulate matter - PM)

Smeša malih čvrstih čestica i kapljica tečnosti suspendovanih u vazduhu nazivaju se česticama (eng. *particulate matter* - PM). Neke čestice su dovoljno velike da se mogu videti kao prašina ili prljavština. Druge su toliko male da se mogu otkriti samo elektronskim mikroskopom. PM_{2.5} opisuje „fine“ čestice čiji je prečnik manji ili jednak 2,5 µm. Sitne čestice nastaju pri sagorevanju goriva u elektranama i automobilima. Čestice „grube frakcije“ veće su od 2,5 µm, ali im je prečnik manji ili jednake 10 µm. Grube čestice nastaju od prašine sa puteva i gradilišta. PM₁₀ se odnosi na sve čestice manje ili jednako prečniku od 10 µm. PM se mogu emitovati direktno ili formirati u atmosferi.

Dovoljno male čestice mogu ući u pluća (one manje ili jednake 10 µm u prečniku) i izazvati zdravstvene probleme. Neki od problema koje izazivaju su česti napadi astme, respiratorni problemi, nepravilnosti rada srca i srčani napadi i prevremena smrt od bolesti srca i pluća.

Fine čestice su jasnije povezane sa najozbiljnijim posledicama po zdravlje. Osobe sa srčanim ili plućnim bolestima, starije osobe i deca su u najvećem riziku od izlaganja česticama.

2.2.5 Ugljenmonoksid (CO)

Ugljen-monoksid je nevidljivi gas bez boje i mirisa koji dolazi od nesagorelog ugljenika. Sastavni je deo izduvnih gasova motornih vozila. Vozila koja nisu drumska vozila takođe doprinose ukupnoj emisiji CO iz transportnih izvora. Visoke koncentracije CO uglavnom se javljaju u tencima gužve u saobraćaju. U nekim gradovima čak 95% svih emisija CO može doći iz automobila i izduvnih gasova automobila. Drugi izvori emisije CO su peći i grejači u domaćinstvu, industrijski procesi, sagorevanje goriva koje se ne transportuje i prirodni izvori, poput požara. Koncentracije CO su maksimalne tokom hladnijih meseci u toku godine kada su automobilske emisije CO veće i kada su noćni uslovi inverzije (gde su zagađivači vazduha zarobljeni blizu tla ispod sloja toplog vazduha) češći.

CO ulazi u krvotok kroz pluća i smanjuje isporuku kiseonika u telesne organe i tkiva. CO je najozbiljniji za one koji pate od kardiovaskularnih bolesti. Kada je izloženost ljudi dejstvu CO mnogo veća, i nivo CO mnogo viši, CO može biti otrovan i utiče i na zdrave ljude. Smanjena radna sposobnost, oštećenje vida, smanjena koordinacija udova, slaba sposobnost učenja i poteškoće u izvršavanju složenih zadataka povezani su sa izloženošću povišenim nivoima CO.

2.2.6 Olovo (Pb)

To je plavo-sivi vrlo otrovni metal. U prošlosti su automobilski izvori najviše doprinosili emisiji olova u atmosferu. Danas su industrijski procesi, prvenstveno prerada metala, olovne boje i voda za piće (iz starih olovnih cevi) glavni izvori emisije olova u atmosferu. Najveće koncentracije olova u vazduhu obično se nalaze u blizini topionica metala i industrijskih pogona za proizvodnju baterija.

Udisanjem vazduha i unošenjem olova iz hrane, vode, zemlje ili prašine, ono se akumulira u krvi, kostima i mekim tkivima i može negativno uticati na bubrege, jetru, nervni sistem i druge organe. Prekomerna izloženost olovu, može prouzrokovati neurološka oštećenja kao što su mentalna oštećenja nervnog sistema fetusa i male dece, što dovodi do nesposobnosti za učenje i snižavanje IQ -a. Nedavne studije, takođe, pokazuju da olovo može povećati šansu za infarkt. Olovo može da se taloži na lišću biljaka, što predstavlja opasnost po životinje i ljude prilikom ishrane.

2.2.7 Otrovnii zagađivači vazduha

Veliki broj hemikalija za koje se zna ili sumnja da izazivaju rak nazivaju se toksičnim zagađivačima vazduha. Neki važni toksični zagađivači vazduha su azbest, arsen, benzen, formaldehid i dioksin². Mnogi toksični zagađivači vazduha stvaraju se u hemijskim postrojenjima ili se emituju pri sagorevanju fosilnih goriva. Azbest i formaldehid se nalaze u građevinskim materijalima i mogu dovesti do problema sa vazduhom u zatvorenom prostoru. Mnogo toksičnih zagađivača vazduha može ući u zalihe hrane i vode, što dovodi do različitih zdravstvenih problema.

Toksični zagađivači vazduha mogu izazvati rak. Neki toksični zagađivači vazduha mogu prouzrokovati urođene nedostatke. Ostali efekti toksičnih zagađivača vazduha su iritacija kože i očiju i problemi sa disanjem.

2.2.8 Hemijske i fotohemijske reakcije

U vazduhu se odvija veliki broj procesa koji se dešavaju kroz hemijske i fotohemijske reakcije. Hemijske reakcije su obično izazvane toplotom i njihova brzina zavisi od temperature. Fotohemijske reakcije u vazduhu su izazvane energijom svetlosti.

² Pod dioksinom smatramo bilo koju hemikaliju koja sadrži hlor (Cl), ugljenik (C), kiseonik (O) i vodonik (H), a da su pri tome međusobno povezane na neki specijalan način

Proces refleksije nastaje prolaskom zračenja kroz čestice, uz apsorpciju i prelamanje zračenja. Kod apsorpcije zračenja, usled energije zračenja dolazi do promene u strukturi čestica, što predstavlja fotohemijsko pobuđivanje ili fotohemijsku reakciju.

2.2.9 Ozonske rupe

Hemikalije koje mogu uništiti ozon u stratosferi nazivaju se stratosferski oksidanti. Haloni³, hlorofluorougljenici (CFC) i druga jedinjenja koja uključuju hlor ili brom su primeri jedinjenja koja oštećuju stratosferski ozonski omotač. CFC se koriste u klima uređajima i frižiderima, jer dobro funkcionišu kao rashladne tečnosti. Takođe, mogu se naći u aerosolnim limenkama i aparatima za gašenje požara. Ostale hemikalije koje uništavaju stratosferski ozon koriste se kao rastvarači u industriji.

Ako se ozon u stratosferi smajuje, ljudi su izloženi većem zračenju sunca (ultraljubičasto zračenje). To dovodi do raka kože i problema sa očima. Veće ultraljubičasto zračenje osim toga može naštetiti biljkama i životinjama.

2.2.10 Gasovi staklene bašte

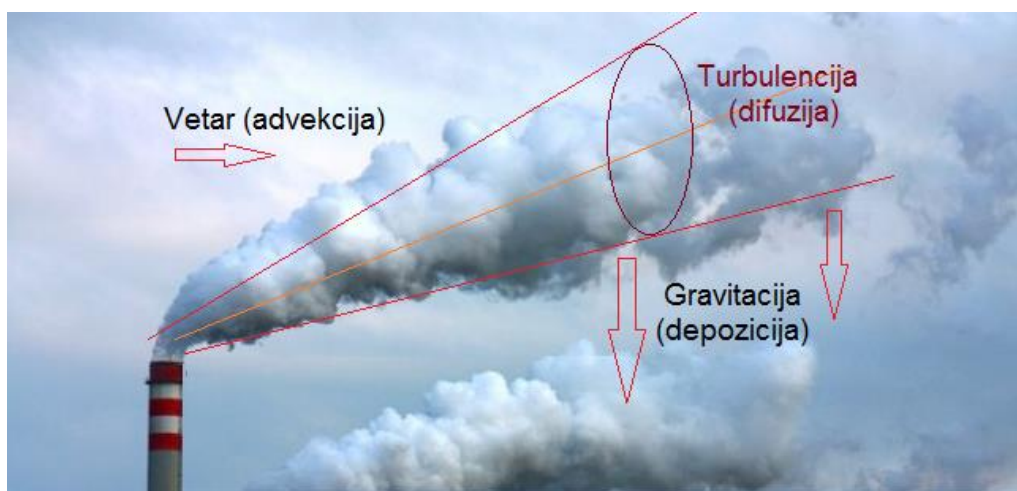
Gasovi koji dugo ostaju u vazduhu i zagrevaju planetu zadržavajući sunčevu svetlost nazivaju se gasovi staklene bašte. Efekat gasova staklene bašte na životnu sredinu naziva se tako jer se ti gasovi ponašaju poput stakla u stakleniku. Neki od važnih gasova sa efektom staklene bašte su azot-oksidi, ugljen-dioksid i metan. Azot-oksidi potiče iz industrijskih izvora i biljaka u raspadanju. Ugljen-dioksid je najznačajniji gas staklene bašte i dolazi od sagorevanja fosilnih goriva u automobilima, elektranama, kućama i industriji. Metan se oslobađa tokom prerade fosilnih goriva, a takođe potiče iz prirodnih izvora poput stajskog đubreta.

Efekat staklene bašte može dovesti do promena u klimi na planeti. Veći broj dana sa ekstremno visokim temperaturama, viši nivo mora, promene u sastavu šuma i oštećenja zemljišta u blizini obala, neki su primeri promena klime na planeti. Na ljudsko zdravlje mogu uticati bolesti koje su povezane sa visokim temperaturama ili oštećenjem zemlje i vode.

³ Haloni su supstance koje se koriste u vatrogasnim aparatima i sadrže brom (Br)

2.3 Disperzija aeropolutanata

Zagađujuće materije izbacuju se u atmosferu, mešaju sa okolnim vazduhom i razblažuju u zavisnosti od meteoroloških uslova i reljefa (Suton, 1953). Disperzija je širenje polutanata u atmosferu kao kumulativni efekat osnovnih prirodnih procesa (Crank, 1975) kao što su advekcija, difuzija, hemijske reakcije, vlažno taloženje i suvo taloženje zagađenja (Berlyand, 1975) (slika 4).



Slika 4. Transport aero polutanata (Stockie, 2011)

Deo troposfere bliži površini zemlje u kojem se obavlja disperzija polutanata, naziva se atmosferski granični sloj⁴. U atmosferskom graničnom sloju strujanje vazduha je pretežno pod uticajem površine Zemlje, odakle se u atmosferu emituju toplota, vodena para i jezgra kondenzacije. Prema karakteristikama flukseva količine kretanja i toplote u atmosferskom graničnom sloju postoji nekoliko podslojeva: (Pocajt, 2018)

- Najniži sloj atmosferskog graničnog sloja naziva se viskozni ili molekularni sloj, i njega karakteriše laminarno strujanje vazduha, pri čemu se transport odvija putem molekularne difuzije. Debljina ovog sloja iznosi nekoliko centimetara i u njemu je horizontalno strujanje slično onome koje se javlja blizu zidova cevi kroz koje protiče fluid.
- Sledeći sloj, čija debljina iznosi oko 10% atmosferskog graničnog sloja, zove se Prandtlov sloj. Turbulentni tok toplote i količine kretanja su približno konstantni. Sa porastom rastojanja od tla, brzina vetra dostiže oko 70% maksimalne vrednosti u atmosferskom graničnom sloju, a smer vetra ostaje približno neizmenjen kroz ceo sloj.

⁴ Koriolisova sila deluje na sve objekte u kretanju i nastaje kao posledica zemljine rotacije. Ona može da izmeni pravac vetra ili da odredi tok fluida, zbog čega se, na primer, na čitavoj severnoj hemisferi voda puštena da slobodno ističe kreće u smeru kazaljke na satu.

- Iznad Prandtlovog (prizemnog) sloja je Ekmanov sloj, koji čini oko 90% atmosferskog graničnog sloja, u kome se brzina vetra sporo menja, a smer se znatno menja zbog uticaja Koriolisove sile⁵. U njemu su sila gradijenta pritiska, Koriolisova sila i sila trenja približno jednake veličine.
- Iznad Ekmanovog sloja je tzv. slobodna atmosfera. Strujanje u slobodnoj atmosferi odvija se bez uticaja Zemljine površine.

Mehanizmi disperzije su (Moreira, Tirabassi & Carvalho, 2005):

- srednje kretanje vazдушnih masa (vetar)
- stabilnost atmosfere
- turbulentne fluktuacije
- difuzija uslovljena gradijentom koncentracije

2.3.1 Meteorološki činioci koji utiču na atmosfersku disperziju

S obzirom na kompleksnost i stohastičku prirodu atmosfere, broj meteoroloških činioca koji utiču na disperziju veoma veliki. Osnovne meteorološke veličine koje moraju biti poznate za modelovanje atmosferske disperzije zagađujućih materija mogu se izdvojiti (Pocajt, 2018; Turner, 1994; Zannetti, 1990; Марчук, 1982)

- Profil vetra, tj. njegova brzina i pravac, jer oni određuju proces horizontalnog transporta zagađujućih materija;
- Stabilnost atmosfere, koja određuje disperziju u vertikalnom pravcu;
- Stepenturbulencije u blizini površine, koji je važan za širenje i disperziju zagađujućih materija u svim pravcima;
- Visina atmosferskog graničnog sloja, koja određuje visinu do koje zagađujuće supstance mogu biti odnešene u atmosferi.

Lokalni faktori, takođe, značajno utiču strujanje na vazduha, samim tim i na raspored koncentracija (Jaćimovski et al., 2012). Najčešće se razmatraju zgrade koje stvaraju senke, ulični kanjoni koji ometaju strujanje i disperziju vazduha, prelaz kopno-voda koji izaziva lokalna strujanja, zatim reljef i vegetacija. Od značaja su i faktori vezani za sam izvor

emisije, pri čemu se izdvajaju visina izvora, brzina i pravac isticanja, temperatura i gustina gasa (tmf).

2.3.2 Vetar

Ukupno kretanje vazduha u atmosferi naziva se strujanje, a njegova horizontalna komponenta, odnosno deo koji struji paralelno sa površinom Zemlje, naziva se vetar. Vetar je vektorska veličina, jer ima smer i brzinu, a smer mu je određen položajem anticiklona i ciklona, odnosno razlikom u pritiscima između njih. Vetar duva od anticiklona (oblast visokog pritiska) prema ciklonu (oblast niskog pritiska), a jačina mu je veća ukoliko je razlika u pritiscima između anticiklona i ciklona veća. Vetrovi se na osnovu trajanja i površine na koju deluju dele na stalne (planetarne), periodične (sezonske) i lokalne. Brzina ili jačina vetra se meri anemometrima i izražava u m/s. Smer vetra se određuje po strani sveta odakle dolazi struja vazduha. Smer vetra se određuje vetrokazom, a grafički prikaz smeru, učestalosti i intenziteta vetrova na određenom području daje ružu vetrova. Smer vetra je značajan za procenu u kom smeru će se kretati zagađujuće materije emitovane iz određenog izvora i u opštem slučaju se pretpostavlja da se zagađujuće materije kreću isključivo u pravcu vetra. Ruža vetrova stoga daje pregled smeru kretanja zagađujućih materija iz određenog izvora. Uz brzinu i pravac, značajan je i profil brzine vetra, odnosno njegova promena sa visinom. Zbog dejstva trenja na vetar od površine zemlje i elemenata hrapavosti na površini, vetar usporava na nivoima blizu tla, da bi praktično nestao na relativno maloj visini iznad tla, koja označava dužinu hrapavosti. Dužina hrapavosti zavisi od vrste tla npr. iznosi 0,0001[m] za vodene površine, 0,03[m] za livade, od 0,6-0,8 [m] za šume, do 1-2 [m] za gradove.

Profil vetra u većini slučajeva nije dostupan, pa se prilikom modelovanja po pravilu pribegava analitičkom proračunu profila brzine vetra. Brzina vetra se često određuje kao

$$u_s = u_{z_0} \left(\frac{z_s}{z_0} \right)^p$$

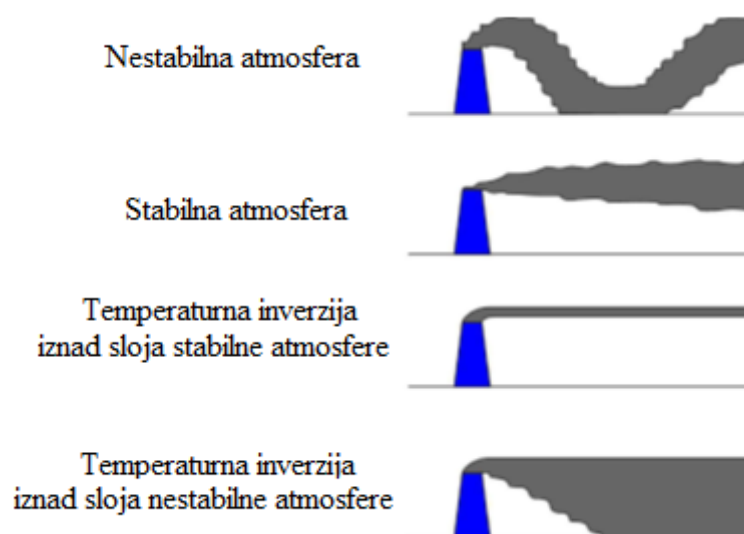
gde se eksponent p određuje iz klasa stabilnosti atmosfere i osobina

površine sredine (urbana ili ruralna).

2.3.3 Stabilnost atmosfere

Stabilnost atmosfere opisuje sposobnost atmosfere da se odupre vertikalnom kretanju. Do vertikalnog kretanja dolazi zato što se zagrejani vazduh u nižim slojevima penje u više slojeve atmosfere pri čemu se širi i hladi. Lokalno na određenoj visini može doći do temperaturene inverzije, kada se sa porastom visine vazduh greje, pri čemu vertikalno

kretanje nije moguće (slika 5). U tom slučaju, zagađujuće materije emitovane na manjim visinama ostaju „zarobljene“ pri tlu, pri čemu njihovo duže zadržavanje može dovesti do ozbiljnog narušavanja kvaliteta vazduha (Pocajt, 2018).



Slika 5. Uticaj stabilnosti atmosfere na disperziju polutanata

Najčešće korišćena metoda kategorizacije količine atmosferskih turbulencija tj. stabilnosti atmosfere je metoda koju je dao Paskuill (Paskuill, 1961):

- A = krajnje nestabilno,
- B = nestabilno,
- C = blago nestabilno,
- D = neutralno,
- E = blago stabilno i
- F = stabilno.

Stabilnost atmosfere, posebno u blizini površine tla, daje Monin-Obukhov dužina (L) (Golder, 1954) u sledećem obliku formule:

$$L = -\frac{u_*^3 c_p Q T}{g k H} \quad (2.3.1)$$

gde je c_p specifična toplota vazduha pri konstantnom pritisku, Q gustina vazduha, k fon-Karmanova konstanta, T temperatura vazduha, g gravitaciono ubrzanje, H toplotni fluks i u_* je brzina pri trenju. Za nestabilne, neutralne i stabilne uslove, vrednosti L su manje od nule, jednake 0 i veće od nule (Macdonald, 2003).

2.3.4 Stepen turbulencije

Atmosferska turbulencija predstavlja kretanja u atmosferi koja odstupaju od opšteg kretanja vazдушnih masa i predstavljaju stohastička (slučajna) kretanja. Stepem turbulencije značajno utiče na rasprostiranje zagađujućih materija u svim pravcima, s obzirom da veća turbulencija donosi bolje mešanje i disperziju.

Zbog turbulencije, horizontalni i vertikalni vrtlozi mešaju zagađivače vazduha sa okolnim vazduhom. Kako se turbulencija povećava, mešanje zagađivača vazduha se takođe povećava, što rezultira dobrom disperzijom i smanjenom koncentracijom zagađivača vazduha. Turbulencija se može stvoriti termičkim i mehaničkim putem. Termički stvorena turbulencija nastaje agrevanjem površine, što dovodi do konvekcije vazduha izazvane uzgonom. Sa jakim zagrevanjem površine, toplotna turbulencija će se povećati. Vetrovi koji se kreću pored različitih elemenata vegetacije ili urbanih struktura stvaraju mehaničke turbulencije. Što je vetar jači, to je veći stepen nastale mehaničke turbulencije. Takođe, što su veći elementi hrapavosti (strukture, vegetacija) na površini, veća će biti mehanička turbulencija.

Stepen turbulencije je složen meteorološki parametar i kao njegova mera najčešće se uzimaju standardna devijacija brzine kretanja vazduha u samom pravcu vetra σ_u i normalno na pravac vetra σ_w .

2.3.5 Visina atmosferskog graničnog sloja

Visina atmosferskog graničnog sloja predstavlja visinu od zemljine površine do nivoa do kojeg mogu biti odnešene zagađujuće supstance. U tom delu atmosfere obavlja se mešanje zagađujuće supstance sa ambijentalnim vazduhom, zbog čega se visina atmosferskog graničnog sloja često naziva i visina mešanja. Visina i fizička priroda atmosferskog graničnog sloja je povezana sa stabilnošću, pa se razlikuju stabilni i konvektivni, nestabilni granični sloj (Ludwig & Dabberdt, 1976). Stabilni granični sloj nastaje uglavnom noću, dok se konvektivni granični sloj formira danju, u izrazito nestacionarnim uslovima uzrokovanim uglavnom sunčevim zračenjem.

Eksperimentalno određivanje visine mešanja je vrlo složeno i može se izvršiti upotrebom radio sonde, meteoroloških balona, tornjeva, aviona, radara i drugih metoda. S obzirom da su eksperimentalne vrednosti često nedostupne, koristi se matematičko modelovanje za dobijanje vrednosti visine mešanja (Pocajt, 2018).

Visina inverznog sloja zavisi od više parametara i za različite uslove stabilnosti atmosfere ima različite vrednosti.

U oblastima sa srednjom i velikom geografskom širinom ona iznosi:

$$H = 0,3 \left(\frac{u_*}{f} \right); \quad f = 10^{-4} s^{-1}; \quad u_* = 0,4 \left(\frac{u}{\ln z / z_0} \right) \quad (2.3.2)$$

gde je $f = 2\omega \sin \varphi$ Koriolisov parametar (ω - ugaona brzina rotacije Zemlje, φ - geografska širina), a z referentna visina $z = 10 m$ i $z_0 = 0,5 m$ veličina hrapavosti površine Zemlje.

U stabilnim uslovima, noću pri umerenim do jakim vetrovima, inverzni granični sloj se određuje kao:

$$H = 0,4 \sqrt{\left(u_* \frac{L}{f} \right)} \quad \text{za} \quad z/L > 0 \quad (2.3.3)$$

gde je

$$u_* = 0,4 \left(\frac{u}{\ln z / z_0 + 5z / L} \right) \quad (2.3.4)$$

Ove procene važe za stabilne uslove i daju dobre rezultate kada se uporede sa direktnim merenjima. One važe čak i u noćnim uslovima kada imamo nestacionarna stanja koja se sporo razvijaju.

Za nestabilne i konvektivne uslove, visina inverznog sloja je:

$$H = 2 \left[12 - \left(\frac{\sigma_{\theta} u}{u_*} \right)^3 \right] L; \quad \text{za} \quad z/L < 0 \quad (2.3.5)$$

$$u_* = 0,4 \left[\frac{z}{1 - 15(z/L)} \right]^{-1/4} \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right) \quad (2.3.6)$$

gde je $\frac{\Delta u}{\Delta z} = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1}$ tzv. napon smicanja.

2.3.6 Ostali uslovi koji utiču na atmosfersku disperziju

U ove uslove se ubrajaju vrste izvora koji emituju polutante, advekcija, difuzija, vlažno taloženje polutanata, suvo taloženje polutanata, kao i granični uslovi na površini Zemlje i na graničnom sloju.

Izvori zagađenja

Postoje četiri osnovne vrste izvora koje se koriste:

Tačkasti izvor

To je izvor iz koga se zagađivač vazduha ispušta iz malog otvora, poput dimnjaka ili ventilacionog otvora bez geometrijskih karakteristika (na primer fabrički ili energetski dimnjak). Tačkasti izvori zahtevaju specifikaciju temperature emisije i brzinu emisije polutanata.

Linijski izvor

To je dugački, uski izvor, poput kolovoza, transportne trake ili krovnog otvora duž duge, uske zgrade (obično se za modelovanje linijski izvor mora redefinisati kao lanac zapreminskih izvora). To je jednodimenzionalni izvor emisije zagađivača vazduha (saobraćaj i putevi),.

Površinski izvor

To je dvodimenzionalni izvor zagađivača vazduha velike površine, kao što je površina deponije, kontaminirano mesto, gomila čvrstog materijala ili tečna površina (ribnjak, rezervoar, laguna). Skup više tačkastih izvora, takođe, se tretira kao površinski izvor.

Zapreminski izvor

To je glomazan izvor koji emituje polutante iz celokupne zapremine (emisija prilikom požara iz zgrada, oblak zagađujuće materije ispušten tokom akcidenta itd.).

2.3.7 Advekcija

Advekcija je proces horizontalnog transporta polutanata pod uticajem vetra. Advektivni član

u transportu polutanata je oblika $\vec{u} \cdot \nabla C = u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}$

2.3.8 Difuzija

Osnovni proces mešanja zagađenog vazduha sa čistim vazduhom naziva se difuzija (Chanady, 1973),. Obično se to dešava na dva načina.

- Molekularnom difuzijom do koje dolazi usled haotičnog kretanja molekula u vazduhu, zbog razlike u koncentracijama polutanata u različitim oblastima. Odvija se duž negativnog gradijenta koncentracija.

- Turbulentnom ili vrtložnom difuzijom, koja nastaje zbog turbulentnih fluktuacija u vazduhu, koje se odvijaju na stohastički način.

Obe gore navedene difuzije odgovorne su za mešanje zagađenog vazduha sa čistim vazduhom. Difuzija se razlikuje od advekcije po tome što se realizuje na slučajan način (Lin & Hildemann, 1996).

2.3.9 Vlažno taloženje

Vlažno taloženje se može ostvariti na tri načina. Prvo rastvaranjem gasova u kapljicama oblaka ili magle, drugo kada čestice primesa deluju kao jezgra za kondenzaciju oblaka i treće, kada se čestice primesa ili gas sudare sa kapljicom kiše. Sva tri slučaja se mogu desiti unutar i izvan oblaka. Koeficijenti depozicije se koriste za opisivanje vlažnog taloženja u modelima zagađenja vazduha. Vlažno taloženje je najvažniji postupak depozicije čestica u atmosferi. Vlažno taloženje može ukloniti čestice iz atmosfere u roku od nekoliko minuta posle kiše. Kod suvog taloženja, isti efekat traje od 7 do 10 dana.

2.3.10 Suvo taloženje

Suvo taloženje opisuje kako se čestice i gasovi deponuju iz vazduha blizu tla. Čestice veličine veće od $1\mu\text{m}$ se talože zahvaljujući gravitaciji. Da bi došlo do suvog taloženja, gas se mora prvo transportovati do površinskog sloja turbulencijom. Sva taloženja zavise od brzine vetra i hrapavosti površine na kojoj se taloži gas ili čestica.

2.3.11 Granični uslovi na površini Zemlje

Interakcija između zemljine površine i zagađivača vazduha ispuštenih iz izvora blizu površine obično se objašnjava putem površinskih graničnih uslova. Raspodela koncentracije zagađujućih materija znatno se menja u prisustvu površine kao fizičke barijere difuziji nadole. Talozenje na Zemljinoj površini je dato kao protok mase prema dole:

$$-v_d \quad \text{na} \quad z = 0,$$

gde je v_d brzina depozicije (taloženja).

Generalno postoje tri vrste površinskih graničnih uslova u zavisnosti od stepena interakcije između površine i zagađivača.

1) Savršeno reflektujuća površina

U slučaju da ne postoji interakcija između površine i zagađivača, na površini nema depozicije. Reflektujući granični uslov za gasove je dat kao:

$$-k_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (2.3.7)$$

U slučaju čestica (PM), reflektujući granični uslov dat je kao:

$$-k_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_s C = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (2.3.8)$$

gde je w_s brzina reflektovanih čestica zagađivača. Ovo uslov naziva se Nojmanov granični uslov, tj. granični uslov za izvode funkcija.

2) Savršeno upijajuća površina

Površina se smatra savršenim apsorberom, ako zagađivači dođu u kontakt sa površinom zemlje i potpuno se apsorbuju. Granični uslov za savršeno apsorbujuću površinu je dat kao:

$$C = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (2.3.9)$$

Difuzija čestica na vodenoj površini je primer savršeno apsorbujuće površine. Kapljice tečnosti na čvrstoj površini, takođe, bi imale tendenciju da se lepe za površinu (Lin & Hildemann, 1997). Ovo stanje na površini zemlje naziva se Dirihleov granični uslov, tj. granični uslov za samu funkciju.

3) Delimično reflektujuća/upijajuća površina

Skoro sve prirodne površine nisu savršeni reflektori niti savršeni apsorberi gasova ili čestica zagađujućih materija koje se prema njima šire. Obično se javlja konačna količina taloženja zagađivača na površini, pa se delimično reflektujuć i delimično apsorbujući površinski granični uslovi za gas daju kao:

$$k_z \frac{\partial C}{\partial z} - v_d C = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (2.3.10)$$

pri čemu treba znati brzinu depozicije.

U slučaju čestica, granični uslovi na površini koja delimično reflektuje, a delom apsorbuje daju se kao:

$$k_z \frac{\partial C}{\partial z} - v_d C + w_s C = 0 \quad \text{na } z = 0 \quad (2.3.11)$$

2.3.12 Granični uslovi na gornjem sloju atmosfere

Planetarni granični sloj (PBL), je granični sloj atmosfere (ABL) prekriven je inverznim slojem, tako da unutar inverznog sloja atmosfera postaje izuzetno stabilna i nema mešanja

zagađujućih materija. Inverzija na vrhu PBL praktično deluje kao nepropusna površina i za nju važi granični uslov:

$$-k_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{na } z = H \quad (2.3.12)$$

gde H predstavlja visinu inverznog sloja (visina mešanja). Da bi se uklonila nagomilana masa na gornjoj granici, granični uslov se može dati kao:

$$k_z \frac{\partial C}{\partial z} = -w_l C \quad \text{na } z = H \quad (2.3.13)$$

gde w_l predstavlja brzinu smanjenja mase (brzina curenja).

U principu, svi ovi granični uslovi se u literaturi (Lin, Hildeman, 1996) se grupišu u četiri vrste graničnih uslova.

Dirihleovi granični uslovi za slučaj totalne apsorpcije polutanata:

$$\begin{aligned} C(x, y, z) &= 0 \quad \text{na } z=0 \\ C(x, y, z) &= 0 \quad \text{na } z=h \end{aligned} \quad (2.3.14)$$

Nojmanovi granični uslovi za slučaj totalne refleksije:

$$\begin{aligned} k_z \frac{\partial C(x, y, z)}{\partial z} &= 0 \quad \text{na } z=0 \\ k_z \frac{\partial C(x, y, z)}{\partial z} &= 0 \quad \text{na } z=h \end{aligned} \quad (2.3.15)$$

Mešani granični uslovi (I tipa)

$$\begin{aligned} k_z \frac{\partial C(x, y, z)}{\partial z} &= 0 \quad \text{na } z=0 \\ C(x, y, z) &= 0 \quad \text{na } z=h \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

Mešani granični uslovi (tip II)

$$\begin{aligned} C(x, y, z) &= 0 \quad \text{na } z=0 \\ k_z \frac{\partial C(x, y, z)}{\partial z} &= 0 \quad \text{na } z=h \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

Koncentracije polutanata teže nuli za sledeće uslove:

$$C(x, y, z) \rightarrow 0 \quad \text{kada } y \rightarrow \pm\infty \quad (2.3.18)$$

Polutanti se izbacuju iz tačkastog izvora snage Q koji se nalazi na lokaciji $(0, y_0, z_0)$

$$UC(0, y, z) = Q\delta(y - y_0)\delta(z - z_0) \quad (2.3.19)$$

gde je δ Dirakova funkcija (Abramowitz, Stegun, 1972).

2.4 Modelovanje procesa zagađenja vazduha

Merenja koncentracije zagađivača daju važne kvantitativne informacije o stanju kvaliteta vazduha na specifičnim lokacijama u određenom trenutku. Iako se različitim metodama i merenjima mogu se odrediti koncentracije zagađujućih materija na pojedinim lokacijama, ipak se na taj način ne mogu se znati kakve će koncentracije biti u budućnosti ili kakve su koncentracije na lokacijama na kojima se ne sprovode merenja. Takođe, ona ne mogu ukazati na razloge koji su doveli do problema sa kvalitetom vazduha.

Modeli atmosferske disperzije imaju za cilj da, na bazi poznavanja fizičkih, hemijskih i termodinamičkih zakonitosti procesa prenosa fluida u atmosferi, omoguće predviđanje koncentracije zagađujućih materija na bilo kom mestu i vremenu, za poznate parametre emisije zagađujućih materija.

Sama ideja o modelovanju širenja polutanata nastala je dvadesetih godina XX veka. Osnovni cilj je bio da se proceni širenje bojnih otrova koji su korišćeni na ratištima tokom I svetskog rata. Ideja se kasnije prenela na procenu uticaja širenja polutanata u oblastima sa izraženim zagađenjem vazduha (industrijskim oblastima, velikim gradovima...).

Interes za bavljenje problemom aerozagađenja stalno raste, posebno kada je u pitanju bezbednost ljudi. Problemi aerozagađenja životne sredine nakon dešavanja prirodnih katastrofa ili katastrofa prilikom transporta radionukleotida ili bioloških i hemijskih agenasa su vrlo aktuelni (Bultjes, 2010).

Danas je borba za čist vazduh jedan u prioriteta u svim oblastima društvene delatnosti i svim delovima sveta.

Potrebe za modelima disperzije zagađenja u vazduhu su sledeće (Pocajt, 2018)

- Modeli predstavljaju nezaobilazan alat za optimizaciju, strategije poboljšanja kvaliteta vazduha i pri tome pružaju podršku lokalnim, regionalnim i globalnim organizacijama za zaštitu vazduha.
- Merenje kvaliteta vazduha može biti podržano od strane modela prognoze, i to kratkoročne (eng. *nowcasting*), reda 1 do 3 sata unapred i dugoročne (eng. *forecasting*), za više dana. Modelovanjem se mogu rešiti problemi koji se odnose na reprezentativnost, usrednjavanje i istraživanje relativnog uticaja pojedinih izvora zagađenja.

- Modeli zagađenja vazduha primenjuju se u zakonskoj regulativi u većini evropskih zemalja (npr. izdavanje dozvola za izgradnju novih saobraćajnica).
- Modeli omogućavaju predviđenja distribucije aeropolutanata u slučaju akcidenata, procenjuju ugrožene zone i pomažu službama za brzo delovanje da dejstvuju i spašavaju ljudske živote i zaštite životnu sredinu.

Uspešnost modelovanja zavisi od ulaznih podataka koja dobijamo meteorološkim merenjima.

U osnovi, savršeni model bi trebao da omogući određivanje prostorno–vremenske koncentracije zagađujućih materija sa dovoljnom preciznošću kako bi bio pogodan za praktičnu primenu. Danas u upotrebi postoji oko 120 vrsta modela, od kojih svaki ima svoja ograničenja i različit nivo tačnosti. Neki od zahteva koje modeli treba da ispune su sledeći: uspešna usklađenost sa rezultatima merenja koncentracija na mernim stanicama, jednostavnost za upotrebu, primenljivost širem krugu korisnika, rad sa nepotpunim podacima (često, zbog hitnosti u slučajevima akcidenata ne raspolažemo svim podacima potrebnim za modelovanje).

Rezultati primenjenog modela mogu da nam posluže i za procenu odgovarajućih lokacija za postavljanje mernih stanica, za različite zakonske, istraživačke ili forenzičke aplikacije (Daly, 2007; Nikezić, 2016).

2.4.1 Vrste modela disperzije aerozagađenja

Modeli aerozagađenja se mogu podeliti na različite načine. Po pravilu se dele na fizičke i matematičke modele. Fizički modeli daju opis atmosferskog strujanja koje se izvodi u aerotunelima (Fedorovich & Kaiser, 1998).

U aerotunelima se širenje polutanata u prostoru simulira u smanjenim razmerama, i zatim se na osnovu izmerenih rezultata donosi zaključak kakav bi bio raspored koncentracija u realnim uslovima. Iako fizičko modelovanje ima primenu za određene situacije, u novije vreme, porastom mogućnosti računara, matematički modeli sve više dobijaju na značaju i uglavnom dominiraju u savremenom modelovanju atmosferske disperzije polutanata.

Prema razmerama, modeli mogu biti (Pocajt, 2018)

- lokalnih razmera, do približno 20 km,
- srednjih ili mezo razmere, do 100 km,
- veliki, regionalni ili kontinentalni, do 5000 km,

- globalni.

Nadalje, mogu se deliti u zavisnosti od:

- Vremenske skale koja opisuje: na trenutne modele, namenjeni modelovanju iznenadnih emisija i akcidenata, dugoročne modele, koji modeluju uticaj dugoročnijih ili stalnih zagađivača.
- Vrste i prirode izvora zagađivača: tačkaste, linijske, površinske, zapreminske
- Prirode polutanata i njenih interakcija sa okolinom, pri čemu se najčešće supstance tretiraju kao konzervativne (ne učestvuju u hemijskim reakcijama). Međutim, u nekim slučajevima posmatraju se kao nekonzervativne i moraju se uzeti u obzir hemijske reakcije, suvo i vlažno taloženje, gustina zagađujuće materije i drugo.
- Primenjenih jednačina za opis fenomena prenosa polutanata: na statističke i determinističke (Lagranževi, Ojlerovi i Gausovi modeli).

Statistički modeli zasnovani su na analizi i praćenju podataka o kvalitetu vazduha (Кошляков, Глинер & Смирнов, 1970). Glavna uloga statističkih modela je analiza podataka o kvalitetu vazduha dobijena na osnovu monitoringa atmosfere. Dele se na linearne i nelinearne modele. Linearni modeli kao višestruka linearna regresija (MLR) može se koristiti za stvaranje linearnog empirijskog odnosa između zagađivača vazduha i meteoroloških promenljivih (Rajković & Mesinger, 2002).

Deterministički modeli zasnovani su na matematičkom opisu fizičkih i hemijskih procesa koji se odvijaju u atmosferi. Oni su zasnovani na matematičkim jednačinama i izražavaju zakone očuvanja mase, impulsa i energije.

Od determinističkih modela najviše se u praksi koristi Gausov model, zbog svoje jednostavnosti i relativno dobrih rezultata koje daje. Ovaj metod se koristi često u softverskim aplikacijama. Između Lagranževog modela i Ojlerovog modela prednost ima Ojlerov pristup, jer se veličine koje se sadrže u Ojlerovom modelu jednostavnije mere od onih iz Lagranževog modela.

Analiza problema atmosferske difuzije primesa Ojlerovim metodom dovodi do rešenja jednačina turbulente difuzije uz korišćenje mnogobrojnih poluempirijskih metoda za dobijanje zatvorenog sistema jednačina koji opisuju transport i difuziju primesa u turbulentnoj sredini.

Prema temi disertacije od najvećeg značaja su *lokalni, trenutni deterministički modeli Ojlerovog i Gausovog tipa*, pa će se samo oni razmatrati. Distribucija koncentracije

aeroplutanata kao rezultat koji daju modeli može se dobiti u analitičkom i numeričkom obliku. Istorijski posmatrano, prvo su nađena analitička rešenja jednačina koje opisuju disperziju polutanata. Upotreba analitičkih rešenja i dalje ostaje pogodan način za modelovanje problema zagađenja vazduha (Vulovic, Ilijazi, Lamovec & Jacimovski, 2018). Modeli disperzije vazduha zasnovani na analitičkim rešenjima imaju nekoliko prednosti u odnosu na numeričke modele, jer su svi uticajni parametri eksplicitno izraženi u matematički zatvorenom obliku. Analitički modeli su takođe korisni u ispitivanju preciznosti i performansi numeričkih modela.

U disertaciji će se prvo definisati jednačina advektivne difuzije čije rešenje u Ojlerovom modelu daje raspodelu aeropolutana u prostoru. Analitičko rešenje će se naći metodom integralne Furije transformacije. Potom će se ista jednačina rešiti numeričkim putem tzv. Adomian dekompozicionim metodom. Potom će se izvršiti komparacija oba metoda. Potom će se u softverskom paketu Mathematica 11.2 na adekvatan način naći i grafički prikazati numeričko rešenje iste jednačine. Izvršiće se uporedna analiza ovog rešenja sa prethodno datim rešenjima, ukazati na prednosti i mane svakog od pristupa.

U daljem tekstu disertacije analiziraće se Gausov model distribucije aerozagađenja i naći analitičko rešenje raspodele koncentracija aerozagađivača. Pokazaće se da rešenje dobijeno u Gausovom modelu sledi, uz određene pretpostavke i odgovarajuće granične uslove, iz rešenja dobijenog u Ojlerovom modelu. Gausov model će se detaljno analizirati iz razloga što je on implementiran u softverskom paketu ALOHA koji se koristi u drugom delu disertacije za analizu realnih situacija kod hemijskih akcidenata. Na kraju će se izvršiti verifikacija, na osnovu odgovatajućih statističkih pokazatelja, rezultata dobijenih Gausovim metodom za dva različita pristupa određivanju stabilnosti atmosfere tako što će se ti rezultati uporediti sa eksperimentalno merenim rezultatima.

2.5 Jednačina advektivne difuzije (JAD)

Upotreba parcijalnih diferencijalnih jednačina (PDJ) za formulisanje odedenih fizičkih pojava je dobro poznata, kao na primer u procesu modelovanja prenosa toplote i mase, a posebno u kontekstu modelovanja zagađenja vazduha (Nieuwstadt, 1982; Blackadar, 1997). Prostorno - vremenska distribucije koncentracije polutanata opisuje se parcijalnom diferencijalnom jednačinom paraboličkog tipa poznatom kao jednačina advektivne difuzije (Vulović, Ilijazi & Jaćimovski, 2017) .

Radi nalaženja jednačina advektivne difuzije zagađujućih materija u Ojlerovom modelu, polazimo od sledeće jednačine:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = R + S \quad (2.5.1)$$

koja predstavlja jednačinu kontinuiteta za C . Ovde član R karakteriše hemijske procese ukoliko primesa učestvuje u hemijskim reakcijama tokom transporta (nekonzervativna primesa). Ukoliko primesa ne učestvuje u hemijskim procesima, ona se naziva konzervativnom i onda je član $R=0$. Član S u jednačini (2.5.1) predstavlja član koji karakteriše osobine izvora koji emituje primese u atmosferu. Koncentracija polutanata se može napisati kao

$$C = \bar{C} + C' \quad (2.5.2)$$

koji predstavlja zbir srednjih i turbulentnih fluktuacija. Posle tzv. Rejnoldsovog usrednjavanja, dobija se

$$\bar{C}' = 0 \quad \text{i} \quad \bar{\bar{C}} = \bar{C} \quad (2.5.3)$$

Pretpostavljajući da je atmosfera nestišljiva, ima se da je:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2.5.4)$$

Množeći jednačinu (2.5.1) sa C dobija se

$$C \frac{d(\bar{C} + C')}{dt} = C \frac{\partial(\bar{C} + C')}{\partial t} + uC \frac{\partial(\bar{C} + C')}{\partial x} + vC \frac{\partial(\bar{C} + C')}{\partial y} + wC \frac{\partial(\bar{C} + C')}{\partial z} = R + S \quad (2.5.5)$$

Ovu jednačinu se usrednjava i dobija se

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \bar{R} + \bar{S} - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'C'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'C'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'C'}) \quad (2.5.6)$$

Član $\overline{u'C'}$ je fluks od C po x pravcu usled turbulentnih fluktuacija. Pošto je

$$\overline{w'C'} = -k_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.5.7)$$

gde je k_z koeficijent difuzije polutanata [m^2/s], dobija se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial C}{\partial z}) + R + S \quad (2.5.8)$$

Kod analize odgovarajućeg modela, u Ojlerovom pristupu, potrebno je analitički ili numerički rešiti ovu jednačinu. Radi potpunijeg razumevanja ovog modela neophodno je dati pregled literature o tome šta je urađeno u ovoj oblasti.

2.5.1 Pregled literature za slučaj analitičkog rešavanja JAD

Analitička rešenja sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina koja opisuju atmosferski transport i disperziju zagađenja vazduha poznata su od 1920-ih (Roberts, 1923). Analitička rešenja su od fundamentalne važnosti za razumevanje i opisivanje fizičkih pojava, jer u potpunosti uzimaju u obzir sve parametre problema.

Jednačina advektivne difuzije (JAD) je u velikoj meri primenjena u operativnim modelima disperzije polutanata u atmosferi za predviđanje srednjih koncentracija polutanata u planetarnom graničnom sloju (PBL) (Vilhena, Rizza, Degrazia, Mangia & Tirabassi, 1998). U principu, iz ove jednačine moguće je dobiti teorijski model disperzije polutanata iz kontinuiranog tačkastog izvora sa datim odgovarajućim graničnim i početnim uslovima ako imamo podatke o srednjoj brzini vetra i koncentraciji turbulentnih flukseva (Schnelle & Dey, 1999).

Diferencijalne jednačine koji opisuju ove fenomene je bilo nemoguće analitički rešiti za potpuno opšte funkcionalne forme koeficijenata difuzije k i opšte izraze za brzine vetra u , v i w .

Već 1920-ih godina jednačina advektivne difuzije za izvor na površini zemlje rešen je analitički. Pretpostavljena je stepena funkcionalna zavisnost za profile brzine vetra i koeficijente turbulentne difuzije. Roberts (Roberts, 1923) je dao rešenje jednačine advektivne difuzije za dvodimenzionalni (2-D) stacionarni slučaj za izvor na površini zemlje. Još jedno 2-D rešenje je razvio Smit (Smith, 1957) pri čemu i $u(z)$ i k_z imaju stepen funkcionalnu zavisnost koja zadovoljava konjugovani Smitov zakon (tj., eksponent vetra = 1 - eksponent k_z). Jamamoto i Šimanuki (Yamamoto & Shimanuki, 1961) su numerički rešili JAD za površinski izvor koristeći za $u(z)$ i k_z funkcije sličnosti umesto stepene zavisnosti. Paskvil (Pasquill, 1961) je rešio JAD sa konstantnim u i $k_z \sim (z-h)^\alpha$, $0 < z < h$. Hana i saradnici (Hanna & Briggs, 1982) su rešili JAD numerički u jednoj i tri dimenzije sa konstantnim k i u i taj slučaj se naziva Fikovom difuzijom. Neuštat i Van Ulden (Nieuwstadt & Ulden, 1978) su koristili sličan pristup, ali su koristili funkcije sličnosti za brzinu vetra i koeficijent turbulentne difuzije koju je predložio Bejsindžer (Businger, 1973). Hant i Veber (Hunt & Weber, 1979) su našli analitičko rešenje zasnovano na tome da koeficijenti difuzije u neutralnim uslovima polako variraju u zavisnosti od srednje visine perjanice ili rastojanju u smeru vetra. Jeh i Brutset (Yeh & Brutsaert, 1971) rešili su JAD u dve dimenzije sa protokom poltanata u jednom smeru i sa funkcionalnom zavisnošću brzine i koeficijentom vertikalne difuzije datom kao stepene funkcije udaljenosti od površine

zemlje. Jeh i Tasi (Yeh & Tsai, 1976) rešili su JAD u tri dimenzije sa stepenim zakonom za u i k u funkciji od z (visine). Ermak (Ermak, 1976) je našao rešenje JAD sa suvim taloženjem u tri dimenzije kada su u i v bile konstante, a koeficijenti turbulentne difuzije k_y i k_z su funkcije od x . Monin (Monin, 1958) je pronašao analitičko rešenje JAD, uračunavajući suvo taloženje, kada su k i u konstantne veličine. Smit (Smith, 1962) je razvio analitička rešenja sa različitim pojednostavljenim profilima koeficijenta difuzije. Neuštat (Nieuwstadt, 1980) je rešio JAD u jednoj dimenziji, za nestacionaran slučaj i zavisnost k_z oblika $k_z = ku_* z (1 - z/h)$. Horst i Slin (Horst & Slinn, 1984) pronašli su analitičko rešenje za dvodimenzionalni slučaj sa konstantnom brzinom vetra i profilima koeficijenata turbulentne difuzije koji zavise od visine z . Koh (Koch, 1989) je odredio analitičko rešenje dvodimenzionalnog JAD, uključujući efekte apsorpcije površine zemlje, funkcionalnu zavisnost brzine vetra i koeficijenata vertikalne turbulentne difuzije kao stepenih funkcija visine z , pri čemu je uzeo u obzir i taloženje polutanata.

Vilhena i saradnici (Vilhena, Costa, Moreira & Tirabassi, 2008) i Lin i Hildeman (Lin & Hildemann, 1996) dali su trodimenzionalna analitička rešenja JAD, za homogene Nojmanove uslove (totalna refleksija), Dirihleove uslove (totalna adsorpcija) ili mešane granične uslove, kada postoji više izvora i kada brzine vetra i koeficijenti turbulentne difuzije zavise od visine. Lin i Hildeman (Lin & Hildemann, 1997) su razvili uopšteni matematički pristup za simulaciju turbulentne disperzije zagađujućih materija koje se adsorbuju ili talože na zemlji. Pristup daje analitički egzaktno rešenje JAD sa brzinom vetra i koeficijentima turbulentne difuzije koji zavise od visine za Robinove granične uslovima na tlu. Hinričsen (Hinrichsen, 1986) je uporedio je ne-Gausov analitički model, koji koristi funkcionalnu zavisnost stepenog tipa za profile vetra i za vertikalne varijacije brzine i turbulencije vetra, sa tri modela Gausovog tipa. Vortman i saradnici (Wortmanna, Vilhena, Moreirab & Buske, 2005) su dali novi analitički pristup u rešavanju JAD za dvodimenzionalno simuliranje disperzije polutanata u planetarnom ganičnom sloju. Brzina vetra i koeficijenti turbulentne difuzije k_z su funkcije od z , a za rešavanje JAD su koristili metodu Laplasove transformacije.

Degrazia i Moriera (Degrazia, Moreira & Vilhena, 2001) rešili su JAD u tri dimenzije kada je k_x funkcija od x , z , u , a k_z je funkcija od z . Moriera i saradnici (Moreira, Rizza, Vilhena & Goulart, 2005) su dobili rešenje JAD u zavisnosti od turbulencije, Lagranžove vremenske skale i vertikalne turbulentne brzine. Ovu jednačinu su rešili analitički koristeći metodu Laplasove transformacije. Moreira i saradnici (Moreira, Vilhena, Tirabassi, Costa & Bodmann, 2006), za istu jednačinu, pomoću Laplasove metode transformacije, je nađeno

poluanalitički trodimenziono vremenski zavisno rešenje u kome su u , w i k_z bili funkcije od z . Moriera i saradnici (Moreira, Vilhena, Buske & Tirabassi, 2006) i Moriera i saradnici (Moreira, Vilhena, Tirabassi, Buske & Cotta, 2005) su dali tzv. GILTT⁶ rešenje za jednodimenzionalnu, vremenski zavisnu, advekciono difuzionu jednačinu. U radu se autori fokusiraju na primenu simulacije disperzije zagađivača u atmosferi, pretpostavljajući Fikov i kontragradijentni model za široku klasu problema. Takođe, u radu Moriera i saradnici (Moreira, Vilhena, Buske & Tirabassi, 2009) su prikazane numeričke simulacije i statistički podaci poređenja sa eksperimentalnim podacima i rezultatima iz literature. Kosta i saradnici (Costa, Vilhena, Moreira & Tirabassi, 2006) su dali trodimenzionalno rešenje JAD za stacionarni slučaj, pretpostavljajući vertikalni nehomogeni planetarni granični sloj sa koeficijentima k kao funkcijama od z . U radu su primenili poluanalitički tzv. GITT⁷ metod. Kosta i saradnici (Costa, Vilhena, Moreira & Tirabassi, 2009) su dali analitičko rešenje po prostornim koordinatama za nestacionarni problem prelazne dvodimenzionalne disperzije polutanata sa nehomogenim graničnim uslovima, koristeći metod Laplasove transformacije.

U radu Buske i saradnici (Buske, Vilhena, Moreira & Tirabassi, 2007), u stacionarnom matematičkom modelu, uzeta je u obzir difuzija niz vetar za disperziju zagađivača pri slabim vetrovima, ali nije uzet u obzir promenljivi pravac vetra tipičan za slab vetar. Rešenje JAD za ove uslove je dobijeno primenom GILTT metode i profili koeficijenta turbulentne difuzije su uzeti kao funkcije udaljenosti od izvora. Tirbasi i saradnici (Tirabassi, Buske, Moreira & Vilhena, 2008) su rešili, za stacionarni slučaj, dvodimenzionalnu JAD pomoću GILTT metode uzevši u obzir suvo taloženje na tlu. Ovim pristupom se može opisati turbulentna disperzije mnogih skalarnih veličina, kao što su zagađenje vazduha, transport radioaktivnog materijala, transport toplote itd. Za koeficijent turbulentne difuzije k_z se pretpostavlja da je funkcija promenljive z , a srednji vetar je orijentisan u pravcu x , a u je funkcija promenljive z . U radu Tirbasi i saradnici (Tirabassi, Moreira, Vilhena & Goulart, 2010) je dato poluanalitičko rešenje za dvodimenzionalnu JAD za stacionarni slučaj. Rešenje je dato metodom ADMM⁸ za višeslojni difuzioni model pri opisivanju transporta polutanata u atmosferu u uslovima slabog vetra i apsorbovanja polutanata od strane zemlje ili depoziciji polutanata na zemlju.

⁶ Generalisana integralna Laplasova tehnika transformacije - Ove metode izlaze van okvira ove disertacije

⁷ Generalisana integralna tehnika transformacije - Ove metode izlaze van okvira ove disertacije

⁸ Advekciono difuzionu višeslojna metoda - Ove metode izlaze van okvira ove disertacije

U radu Tirbasi i saradnici (Tirabassi, Tiesi, Vilhena, Bodmann & Buske, 2011), JAD je rešen za dvodimenzioni slučaj za konstantnu emisiju zagađivača iz tačkastog izvora smeštenog unutar nestabilnog graničnog sloja atmosfere sa brzinom vetra koja po stepenom zakonu zavisi od z i koeficijentom turbulentne difuzije $k_z \sim (1 - z/h)$. Rešenje je dobijeno analitički koristeći GILTT metod korišćenjem razvoja u beskonačni red. Određena je koncentracija nivoa na zemlji i za nju je dat eksplicitni aproksimativni izraz, preko koga je moguće naći analitički jednostavan izraz za položaj i veličinu maksimuma. Kummer i saradnici (Kumar&Sharan, 2010) su dobili analitička rešenja korišćenjem Laplasove transformacije za jednodimenzionalnu JAD sa promenljivim koeficijentima u tri slučaja: (1) nalaženje disperzije polutanata duž stacionarnog protoka u nehomogenoj sredini, (2) nalaženje vremenski zavisne disperzije polutanata duž ravnomernog protoka kroz homogeni sredinu i (3) nalaženje disperzije polutanata duž vremenski zavisnog protoka kroz nehomogenu sredinu.

Šaran i saradnici (Sharan, Singh & Yadav, 1996) su našli matematički model za stacionarno stanje u kome su uzeli u obzir difuziju u svim koordinatnim pravcima i advekciju usled srednjeg vetra. Analitičko rešenje je dobijeno pod pretpostavkom da su koeficijenta turbulentne difuzije u JAD konstantni. Šaran i Modani (Sharan, Modani, 2005) su dali matematički model disperzije polutanata u stacionarnom stanju i rešili analitički trodimenzionalnu advekciono-difuzionu jednačinu koristeći metode razvoja sopstvenih funkcija i Furijeovu transformaciju. U tom radu su zanemarili vertikalnu brzinu vetra, a za horizontalnu brzinu vetra i koeficijente turbulentne difuzije su pretpostavili da su konstantni.

Šaran i Modani (Sharan, Modani, 2006), takođe, su dali analitičko rešenje za stacionarnu dvodimenzionalnu JAD, u kojoj vertikalni koeficijent turbulentne difuzije zavisi od udaljenosti vetra od izvora, i u kojoj se smatra da je vetar slabog intenziteta. Šaran i Kumar (Sharan, Kumar, 2009) pronašli su analitičko rešenje za bočne koncentracije uzimajući u obzir brzinu vetra kao stepenu funkciju od visine i koeficijent turbulentne difuzije kao eksplicitnu funkciju udaljenosti vetra od izvora i od visine. Analitičko rešenje JAD za ove profile brzine vetra i koeficijente turbulentne difuzije, sa fizički relevantnim graničnim uslovima, nađeno je upotrebom metodom razdvajanja promenljivih koja dovodi do Šturm-Liouvilovog problema sa svojstvenim vrednostima. Esa i El-Otaifi (Essa, El-Otaify, 2007) su dali novo analitičko rešenje dvodimenzionalne JAD sa brzinom vetra i koeficijentom turbulentne difuzije kao funkcijama od visine z . Esa i El-Otaifi (Essa, El-Otaify, 2008) su dali rešenje dvodimenzionalne JAD sa logaritamskom zavisnošću vetra od visine i tako

dobili generalizovani analitički pristup rešenju JAD kada su koeficijenti turbulentne difuzije konstantni.

2.5.2 Rešenje JAD metodom Furije transformacije

Metodi analitičkog rešavanja su raznovrsni, principijelno poznati iz teorije parcijalnih diferencijalnih jednačina - metoda razdvajanja promenljivih, operatorski metod, metodi integralnih transformacija... (Кошляков, Глинер & Смирнов, 1970). U Dodatku 1 je dat prikaz rešenja jednačine molekularne difuzije operatorskim metodom

U ovom delu teze uradiće se jedan ilustrativni primer rešavanja JAD, metodom integralne Furije transformacije.

Granični uslovi za jednačinu JAD u našem slučaju su:

1. $\frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad z = 0, h$
2. $uC_y(0, z) = Q\delta(z - h_s)$

Ovde je h [m] - visina sloja mešanja, h_s [m] - visina dimnjaka, a Q [kg/s] - intenzitet izvora (maseni protok u jedinici vremena), δ - Dirakova funkcija .

Pretpostavke za rešenje JAD su sledeće

- a) razmatra se stacionaran slučaj tj. $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$
- b) vertikalna komponenta brzine w se zanemaruje u odnosu na horizontalne komponente brzine u i v
- c) x osa je orijentisana duž vetra tj. $u = U$ i $v = 0$
- d) difuzija duž vetra je zanemarljivo mala u odnosu na advekciju tj.

$$u \frac{\partial C_y(x, z)}{\partial x} = k(x) \frac{\partial^2 C_y(x, z)}{\partial z^2} \quad (2.5.9)$$

$$\left| u \frac{\partial C}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right| \quad (2.5.10)$$

Primena ovih pretpostavki na JAD u slučaju da polutanti ne učestvuju u reakcijama u atmosferi dovodi do sledeće jednačine

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2.5.11)$$

Pretpostaviće se da je $k_y = k(x)$ i $k_z = k(x)$. Tada jednačinu (2.5.11) integralimo na sledeći način:

$$u \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{\infty} C dy = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) dy + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) dy \quad (2.5.12)$$

$$u \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{\infty} C dy = k_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{-\infty}^{\infty} + k(x) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_{-\infty}^{\infty} C dy \quad (2.5.13)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} C dy = C_y(x, z); \quad k_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{-\infty}^{\infty} = 0$$

Iz ovoga sledi dvodimenziona jednačina koja će se najčešće rešavati kod modelovanja širenja polutanata:

$$u \frac{\partial C_y(x, z)}{\partial x} = k(x) \frac{\partial^2 C_y(x, z)}{\partial z^2} \quad (2.5.14)$$

JAD prepisemo u obliku

$$\frac{\partial C_y}{\partial x} = \frac{k_z}{u} \frac{\partial^2 C_y}{\partial z^2} \quad (2.5.15)$$

JAD rešavamo Furije transformacijom jednačine. Tražimo Furije transformaciju

$$\tilde{C}_y(x, \lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda z} C_y(x, z) dz \quad (2.5.16)$$

Odavde je

$$\frac{\partial \tilde{C}_y(x, \lambda)}{\partial x} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda z} \frac{\partial C_y(x, z)}{\partial x} dz = \frac{k_z}{u} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda z} \frac{\partial^2 C_y(x, z)}{\partial z^2} dz \quad (2.5.17)$$

Parcijalnom integracijom desne strane jednačine uz primenu odgovarajućih graničnih uslova dobija se:

$$\frac{\partial \tilde{C}_y(x, \lambda)}{\partial x} = \frac{k_z}{u} (i\lambda)^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda z} C_y(x, z) dz = -\frac{\lambda^2}{u} k_z \tilde{C}_y(x, \lambda) \quad (2.5.18)$$

Rešenje ove jednačine je

$$\tilde{C}_y(x, \lambda) = A e^{-\frac{\lambda^2 x}{u} k_z} \quad (2.5.19)$$

Kako je $C_y(0, z) = \frac{Q}{u} \delta(z - h_s)$ i kako je

$$\tilde{C}_y(0, \lambda) = A = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda z} C_y(0, z) dz \quad (2.5.20)$$

imamo da je $A = \frac{Q}{u} e^{-i\lambda h_s}$ i

$$\tilde{C}_y(x, \lambda) = \frac{Q}{u} e^{-i\lambda h_s - \frac{\lambda^2}{u} \int_0^x k_z dx} \quad (2.5.21)$$

Pretpostavljajući da je $k_z = \frac{0,16\sigma_w^2}{u} x$ može se naći integral u eksponentu

$$\tilde{C}_y(x, \lambda) = \frac{Q}{u} e^{-i\lambda h_s - \frac{\lambda^2}{u} \frac{0,08\sigma_w^2}{u} x^2} \quad (2.5.22)$$

Tražeci inverznu Furije transformaciju nalazimo

$$C_y(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda z} \tilde{C}_y(x, \lambda) d\lambda = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda z} \frac{Q}{u} e^{-i\lambda h_s - \frac{\lambda^2}{u} \frac{0,08\sigma_w^2}{u} x^2} d\lambda \quad (2.5.23)$$

Koristeći vrednost integrala $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-a\eta^2 - 2b\eta} d\eta = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{\frac{b^2}{a}}$

konačno nalazimo inverznu Furije transformaciju koncentracije polutanata u obliku

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi kx} \exp\left(-\frac{y^2 u}{4kx}\right) \exp\left(-\frac{u(z-H)^2}{4kx}\right) \quad (2.5.24)$$

ili

$$C_y(x, z) = \frac{Q}{x\sqrt{4\pi 0,08\sigma_w^2}} e^{-\frac{u^2(z-h_s)^2}{4 \cdot 0,08\sigma_w^2 x^2}} \quad (2.5.25)$$

Kao što se vidi, konačan oblik rešenja formiraju granični uslovi i ulazni parametri – profil brzine vetra i funkcionalna zavisnost koeficijenta turbulentne difuzije povezanog sa stabilnošću atmosfere.

2.6 Gausov metod

U ovom delu će se obraditi Gausov model za distribuciju aerozagađenja. Ovaj model će se detaljnije analizirati, jer je implementiran u mnogim softverskim paketima. Takođe, on je u osnovi softverskog paketa ALOHA koji se koristi za analizu širenja gasova pri hemijskim

akcidentima, što predstavlja osnovu ove doktorske teze (Jaćimovski, Miladinović, Radovanović & Ilijazi, 2017).

Postoje dva Gausova modela u upotrebi – Gausov model perjanice i Gausov „puff“ model. U ovom delu će se obraditi model perjanice, a u daljem delu „puff“ model.

Gausov model daje izraz za koncentraciju aerozagađenja koji se dobija kao rešenje JAD pod uslovima da je brzina vetra konstantna i da su koeficijenti turbulentne difuzije konstantni (Vulovic, Ilijazi, Lamovec & Jacimovski, 2018). U ovom poglavlju će se koncentracija aerozagađivača dobiti rešavanjem JAD metodom Laplasove transformacije (Stockie, 2011).

Uz sve navedene uslove, i uključujući osobine izvora u granične uslove, jednačina advektivne turbulentne difuzije čestica iz stacionarnog tačkastog izvora dobija sledeći oblik:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}; \quad 0 \leq x < \infty; -\infty < y < \infty; 0 \leq z < \infty \quad (2.6.1)$$

Partikularno rešenje parcijalne diferencijalne jednačine advektivne turbulentne difuzije zavisi od graničnih uslova. Pretpostavljeni granični uslovi za nalaženje rešenja ove jednačne su sledeći:

- Zagađivač se emituje konstantnom brzinom Q [kg/s] iz tačkastog izvora sa koordinatama $\bar{x}(0,0,H)$ smeštenog na visini H [m] od površine. Terminom izvor smatraćemo član $S(\bar{x}) = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-H)$ gde je δ Dirakova delta funkcija.
- Brzina vetra je konstantna i ima jedinicu [m / s] usmerena je duž pozitivnog smera x ose, ima koordinate $\bar{u}(u,0,0)$; $u > 0$.
- Rešenje je za stacionarni slučaj, što odgovara situaciji kada je brzina vetra konstanta i ostali parametri ne zavise od vremena i što je slučaj kada je vreme analize procesa širenja polutanata dovoljno veliko.
- Koeficijenti turbulentne difuzije [m^2 / s] su funkcije položaja samo na osi u pravcu vetra od izvora, tj. x osi.
- Brzina vetra je dovoljno velika za efekat difuzije u smeru x ose, pa je process difuzije zanemarljiv u odnosu na proces advekcije duž te ose tako da se član $\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)$ u jednačini (2.5.16) može da zanemari.
- Varijacije u topografiji su beznačajne, pa se može uzeti da je površina ravna tj. $z = 0$.

- Polutanti ne prodiru u zemljište.

Sada jednačina advektivne turbulentne difuzije, koju treba rešavati, i odgovarajući granični uslovi za nju glase:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}; \quad 0 \leq x < \infty; \quad -\infty < y < \infty; \quad 0 \leq z < \infty \quad (2.6.2)$$

$$C(0, y, z) = 0; \quad C(\infty, y, z) = 0; \quad C(x, \pm\infty, z) = 0; \quad C(x, y, \infty) = 0; \quad (2.6.3)$$

$$C(0, y, z) = \frac{Q}{u} \delta(y) \delta(z - H) \quad (2.6.4)$$

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z}(x, y, 0) = 0 \quad (2.6.5)$$

Radi pojednostavljenja rešavanja jednačine (2.6.2) uvodimo sledeće smene

$$r_y(x) = \frac{1}{u} \int_0^x K_y(\xi) d\xi; \quad r_z(x) = \frac{1}{u} \int_0^x K_z(\xi) d\xi \quad (2.6.6)$$

U tom slučaju koncentracija koja se traži $C(x, y, z)$ prelazi u novu promenljivu $c(r_y, r_z, y, z)$, tj., imamo

$$C(x, y, z) \rightarrow c(r_y, r_z, y, z) \quad (2.6.7)$$

Dobija se

$$K_y \frac{\partial c}{\partial r_y} + K_z \frac{\partial c}{\partial r_z} = K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2.6.8)$$

$$c(\infty, \infty, y, z) = 0; \quad c(r_y, r_z, \pm\infty, z) = 0; \quad c(r_y, r_z, y, \infty) = 0 \quad (2.6.9)$$

$$c(0, 0, y, z) = \frac{Q}{u} \delta(y) \delta(z - H) \quad (2.6.10)$$

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z}(r_y, r_z, y, 0) = 0 \quad (2.6.11)$$

Standardni postupak rešavanja jednačine (2.5.19) se vrši metodom razdvajanja promenljivih

$$c(r_y, r_z, y, z) = \frac{Q}{u} A(r_y, y) B(r_z, z) \quad (2.6.12)$$

$$\frac{\left(K_y \frac{\partial A}{\partial r_y} - K_y \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right)}{A} = - \frac{\left(K_z \frac{\partial B}{\partial r_z} - K_z \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right)}{B} = \lambda; \quad \lambda \in R \quad (2.6.13)$$

Iz relacije () imamo, za $\lambda = 0$, dve jednačine sa odgovarajućim graničnim uslovima i to:

$$\frac{\partial A}{\partial r_y} = \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}; \quad 0 \leq r_y < \infty; \quad -\infty < y < \infty \quad (2.6.14)$$

$$A(0, y) = \delta(y); \quad A(\infty, y) = 0; \quad A(r_y, \pm\infty) = 0 \quad (2.6.15)$$

$$\frac{\partial B}{\partial r_z} = \frac{\partial^2 B}{\partial z^2}; \quad 0 \leq r_z < \infty; \quad 0 \leq z < \infty \quad (2.6.16)$$

$$B(0, z) = \delta(z - H); \quad B(\infty, z) = 0; \quad B(r_z, \infty) = 0; \quad \frac{\partial B}{\partial z}(r_z, 0) = 0 \quad (2.6.17)$$

Za slučaj da je $\lambda \neq 0$, dobija se rešenje različito od rešenje u tekstu u smislu da se javljaju rešenja za B koja su oscilatornog tipa $\cos \lambda z$, koja nisu od interesa za ovaj rad.

Ove parcijalne diferencijalne jednačine rešićemo Laplasovom transformacijom. Osobine Laplasove transformacije su sledeće (Tošić, Šetrajčić, Jažimovski. 2018):

$$\begin{aligned} L[f(t)] = F(s) &= \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt; & L\left[\frac{df}{dt}\right] &= sF(s) - f(0); \\ L\left[\frac{d^2 f}{dt^2}\right] &= s^2 F(s) - sf(0) - \frac{df(0)}{dt}; & L[\delta(t-b)] &= se^{-sb}; b > 0 \end{aligned} \quad (2.6.18)$$

Za jednačinu (2.5.30) možemo pisati $\tilde{A}(\rho, y) = L_y\{A(r, y)\}; \quad A(0, y) = \delta(y)$

i primenom Laplasove transformacije dobija se

$$\frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial y^2} - \rho \tilde{A} = -\delta(y) \quad (2.6.19)$$

Ponovnom Laplasovom transformacijom $\tilde{\tilde{A}}(\rho, \eta) = L_y\{\tilde{A}(\rho, y)\} \quad L_y\{\delta(y)\} = 1$

iz jednačine (2.5.34) dobija se:

$$\eta^2 \tilde{\tilde{A}} - \eta \tilde{\tilde{A}}(\rho, 0) - \frac{\partial \tilde{\tilde{A}}}{\partial y}(\rho, 0) - \rho \tilde{\tilde{A}} = -1; \quad -1 \leq y < \infty \quad (2.6.20)$$

Uvođenjem odgovarajućih smena konačno nalazimo Laplasov lik funkcije A:

$$\alpha = \tilde{\tilde{A}}(\rho, 0); \quad \beta = \tilde{\tilde{A}}_y(\rho, 0) - 1; \quad \tilde{\tilde{A}} = \frac{\eta\alpha - \beta}{\eta^2 - \rho}; \quad \alpha, \beta = \text{const} \quad (2.6.21)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{A}}(\rho, y) &= \alpha \cosh(\sqrt{\rho} y) - \frac{\beta}{\sqrt{\rho}} \sinh(\sqrt{\rho} y) = \\ &= \frac{\alpha}{2} [\exp(\sqrt{\rho} y) + \exp(-\sqrt{\rho} y)] - \frac{\beta}{2\sqrt{\rho}} [\exp(\sqrt{\rho} y) - \exp(-\sqrt{\rho} y)] \end{aligned} \quad (2.6.22)$$

Uzimajući u obzir granične uslove:

$$\tilde{A}(\rho, \pm\infty) = 0; \quad \alpha = \frac{\beta}{2\sqrt{\rho}}; \quad \tilde{A}(\rho, y) = \beta \frac{\exp(-\sqrt{\rho}y)}{2\sqrt{\rho}} \quad (2.6.23)$$

i tražeći inverznu Laplasovu transformaciju, nalazimo:

$$A(r_y, y) = \beta \frac{\exp(-y^2 / 4r_y)}{\sqrt{\pi r_y}} \quad (2.6.24)$$

Da bi odredili konstantu β , koristimo izraz za Dirakovu delta funkciju u formi:

$$\delta(y) = \lim_{r_y \rightarrow 0} \frac{\exp(-y^2 / 4r_y)}{\sqrt{4\pi r_y}}; \quad \beta = \frac{1}{2}; \quad (2.6.25)$$

Konačno dobijamo izraz za funkciju $A(r_y, y)$

$$A(r_y, y) = \frac{\exp(-y^2 / 4r_y)}{\sqrt{4\pi r_y}}; \quad -\infty < y < \infty \quad (2.6.26)$$

Sličnim postupkom tražimo rešenje jednačine (2.5.31) za funkciju $B(r_z, z)$:

$$\tilde{B}(\rho, z) = L_{r_z} \{B(r, z)\}; \quad B(0, z) = \delta(z - H) \quad (2.6.27)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial z^2} - \rho \tilde{B} = -\delta(z - H) \quad (2.6.28)$$

$$\tilde{\tilde{B}}(\rho, \zeta) = L_z \{\tilde{B}(\rho, z)\}; \quad L_z \{\delta(z - H)\} = \exp(-\zeta H); \quad \frac{\partial \tilde{\tilde{B}}}{\partial z}(\rho, 0) = 0; \quad (2.6.29)$$

$$\tilde{\tilde{B}} = \frac{\zeta \tilde{B}(\rho, 0) - \exp(-\zeta H)}{\zeta^2 - \rho}$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}(\rho, z) &= \tilde{B}(\rho, 0) \cosh(\sqrt{\rho} y) - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \sinh(\sqrt{\rho} (z - H)) = \\ &= \frac{\tilde{B}(\rho, 0)}{2} \left[\exp(\sqrt{\rho} z) + \exp(-\sqrt{\rho} z) \right] - \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \left[\exp(\sqrt{\rho} (z - H)) - \exp(-\sqrt{\rho} (z - H)) \right] \end{aligned} \quad (2.6.30)$$

$$\tilde{B}(\rho, \pm\infty) = 0; \quad \tilde{B}(\rho, 0) = \frac{\exp(-\sqrt{\rho} H)}{\sqrt{\rho}} \quad (2.6.31)$$

$$\tilde{B}(\rho, z) = \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \left[\exp(-\sqrt{\rho} (z - H)) + \exp(-\sqrt{\rho} (z + H)) \right] \quad (2.6.32)$$

$$B(r_z, z) = \frac{1}{\sqrt{4\pi r_z}} \left[\exp(-(z - H)^2 / 4r_z) + \exp(-(z + H)^2 / 4r_z) \right] \quad (2.6.33)$$

Konačno, našavši rešenja za $A(r_y, y)$ i $B(r_z, z)$, možemo prema jednačini (2.6.12) odrediti izraz za $c(r_y, r_z, y, z)$:

$$c(r_y, r_z, y, z) = \frac{1}{4\pi u \sqrt{r_y r_z}} \exp(-y^2 / 4r_y) \left[\exp(-(z-H)^2 / 4r_z) + \exp(-(z+H)^2 / 4r_z) \right] \quad (2.6.34)$$

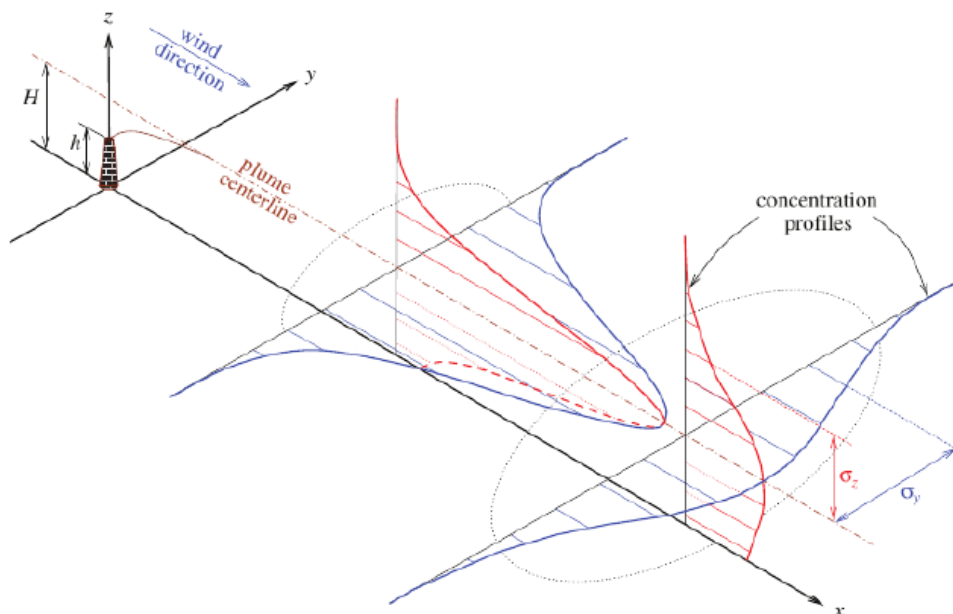
Sada treba da izvršimo inverzni prelaz $c(r, y, z) \rightarrow C(x, y, z)$ i nađemo koncentraciju polutanata u zavisnosti od koordinata (x, y, z) i parametara $(u, \sigma_y, \sigma_z, H)$ koji određuju širenje polutanata pod zadatim graničnim uslovima. Ovde su σ_y, σ_z koeficijenti disperzije polutanata i povezani su sa r_y, r_z na sledeći način:

$$r_y(x) = \frac{\sigma_y^2}{2}; \quad r_z(x) = \frac{\sigma_z^2}{2} \quad (2.6.35)$$

U tom slučaju jednačina (2.5.49) dobija sledeći oblik:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\} \quad (2.6.36)$$

Konačno vidimo da rešavanjem Ojlerove jednačine advektivne turbulentne difuzije, za slučaj konstantnih difuzionih koeficijenata dobijamo dobro poznati izraz za koncentracije širenja aeropolutanata iz Gausovog modela.



Slika 6. Raspodela polutanata iz stacionarnog izvora prema Gausovom modelu (Nikezić, 2016)

Na površini zemlje, kada je $z=0$, koncentracija polutanata je data kao:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2.6.37)$$

Smatraće se da su koeficijenti disperzije uzeti u obliku:

$$\sigma_y = ax^b; \quad \sigma_z = cx^d \quad (2.6.38)$$

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u a c x^{b+d}} \exp\left(-\frac{y^2}{2a^2 x^{2b}}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2c^2 x^{2d}}\right) \quad (2.6.39)$$

$$C_y(x, H) = \frac{Q}{\pi u a c x^{b+d}} \exp\left(-\frac{H^2}{2c^2 x^{2d}}\right) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{y^2}{2a^2 x^{2b}}\right)} dy \quad (2.6.40)$$

$$C_y(x, H) = \frac{Q}{\pi u a c x^{b+d}} \frac{\sqrt{\pi}}{2a^2 x^{2b}} \exp\left(-\frac{H^2}{2c^2 x^{2d}}\right) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi} u a^3 c x^{3b+d}} \exp\left(-\frac{H^2}{2c^2 x^{2d}}\right) \quad (2.6.41)$$

Ako pretpostavimo da visina izvora H ne zavisi od x tj. da je $\partial H / \partial x = 0$, onda se metodama matematičke analize nalazi da je maksimalna koncentracija u sledećim tačkama,

$$(x_{\max}, z_{\max}) = \left[\left(\frac{Hd^2}{c^2(3b+d)} \right)^{\frac{1}{2d}}, 0 \right] \quad (2.6.42)$$

a da je maksimum koncentracije

$$C_{z_{\max}} = \frac{Q}{2\sqrt{\pi} u a^3 c x^{3b+d}} e^{-\frac{3b+d}{2d}} \quad (2.6.43)$$

U slučaju da je H funkcija od x npr. $H = (v(x)x)^d$, onda je

$$C_{z_{\max}} = \frac{Q}{2\sqrt{\pi} u a^3 c x^{3b+d}} e^{(3b+d)\ln\frac{x}{x_0}} \quad (2.6.44)$$

gde je x_0 konstanta određena iz graničnih uslova.

U modelovanju širenja polutanata stanje atmosfere bitno utiče na njihovu distribuciju. To se pre svega odnosi na porast dimne perjanice Δh iznad izvora, a potom i na veličine disperzija σ_y, σ_z .

Uticaj sunčevog zračenja i brzine vetra na stabilnost atmosfere navelo je Paskvila da identifikuje stabilnost klasa na skali od A (vrlo nestabilne) do G (veoma stabilne). Njegova podela na klase stabilnosti je data u tabeli 1.

Tabela 1. Klase stabilnosti atmosfere po Paskvilu

Klase stabilnosti					
Brzina vetra na 10m u m/s	Dan			Noć	
	Sunčano			Oblačno	
	Jako	Umereno	Slabo	Malo oblačno	Uglavnom jasno
Oblast	1	2	3	4	5
< 2	A	A-B	B	G	G
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Brzina vetra na visini dimnjaka se određuje kao $u_s = u_{z_0} \left(\frac{z_s}{z_0} \right)^p$ gde se eksponent p određuje iz klase stabilnosti atmosfere prema sledećoj tabeli 2

Tabela 2. Vrednosti eksponenta p prema klasama stabilnosti atmosfere

Klasa stabilnosti	Ruralna sredina	Urbana sredina
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	1	0,2
D	0,15	0,25
E	0,35	0,3
F	0,55	0,3

U vezi određivanja porasta dimne perjanice postoji obimna literature. Za nalaženje Δh potrebno je imati puno podataka o osobinama samog izvora polutanata. Ako se manje zna o izvoru Δh se može proceniti iz $\Delta h = \frac{515P_t^{0,25}}{u}$ u metrima, gde je P_t toplotna moć gasova dimnjaka u MW.

Postoje dva osnovna metoda za određivanje rasta dimne perjanice. U prvom metodi, porast dimne perjanice se računa na osnovu empirijske formule, kao:

$$\Delta h = 4,71 \frac{Q_h^{0,444}}{u_s^{0,694}}; \quad Q_h = \frac{\pi d_s^2 V_s}{4} \frac{PM_w}{R_u T_s} C_p (T_s - T_a) \quad (2.6.45)$$

gde su:

1. Molekulska težina izlaznog gasa polutanata iz dimnjaka, M_w
2. Prečnik dimnjaka, $d_s[m]$
3. Brzina izlaznog gasa iz dimnjaka, $V_s[m/s]$
4. Temperatura izlaznog gasa, $T_s[K]$
5. Temperatura okoline, $T_a[K]$
6. Atmosferski pritisak, $P[atm]$
7. Brzina vetra iznad dimnjaka, $u_s[m/s]$
8. Toplotni kapacitet izlaznog gasa pri konstantnom pritisku, $C_p[J/Kmol]$

Podizanje gasa zbog potisnih sila (a ne zbog impulsnih) se dešava kada je zadovoljen

sljedeći empirijski kriterijum
$$\begin{cases} \Delta T < (\Delta T_c); & \Delta h = 3d_s \frac{V_s}{u_s} \\ \Delta T > (\Delta T_c); & \Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} \end{cases} \quad (T_s - T_a) \geq \Delta T_c, \text{ gde je } T_s$$

temperatura izlaznog gasa izražena u K, a T_a je temperatura okolnog vazduha, takođe u K. Izračunavanje razlike ΔT_c vrši se na osnovu empirijskih jednačina.

Potisak fluksa gasa se određuje kao $F_b = g V_s d_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) [m^4/s^3]$, gde je g gravitaciono ubrzanje.

Za nestabilne i neutralne uslove (klase A, B, C i D), ukoliko je $F_b < 55$ i

$$(\Delta T_c) = 0,0297 T_s \frac{V_s^{1/3}}{d_s^{2/3}}; \quad \Delta T = T_s - T_a, \text{ posmatramo dva slučaja: } \begin{cases} \Delta T < (\Delta T_c); & \Delta h = 3d_s \frac{V_s}{u_s} \\ \Delta T > (\Delta T_c); & \Delta h = 21 \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \end{cases}$$

$$\text{Ako je } F_b > 55 \text{ i } (\Delta T_c) = 0,00575T_s \frac{V_s^{1/3}}{d_s^{2/3}}; \quad \Delta T = T_s - T_a, \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta T < (\Delta T_c); \quad \Delta h = 3d_s \frac{V_s}{u_s} \\ \Delta T > (\Delta T_c); \quad \Delta h = 38,71 \frac{F_b^{3/5}}{u_s} \end{array} \right.$$

$$\text{Za klasu stabilnosti E, definišemo impulsni fluks} \quad F_m = \frac{V_s^2}{d_s^2} \left(\frac{T_a}{4T_s} \right) \quad \text{i}$$

$$(\Delta T_c) = 0,019582T_s V_s \sqrt{s}; \quad s = 0,0035 \frac{g}{T_a} \quad \Delta T = T_s - T_a. \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta T < (\Delta T_c); \quad \Delta h = 3d_s \frac{V_s}{u_s} \\ \Delta T > (\Delta T_c); \quad \Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} \end{array} \right.$$

$$\text{Za klasu stabilnosti F imamo } (\Delta T_c) = 0,019582T_s V_s \sqrt{s}; \quad s = 0,0035 \frac{g}{T_a} \quad \Delta T = T_s - T_a,$$

$$F_b = gV_s d_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right); \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta T < (\Delta T_c); \quad \Delta h = 3d_s \frac{V_s}{u_s} \\ \Delta T > (\Delta T_c); \quad \Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} \end{array} \right.$$

Veličina disperzija se prema Brigsu može izraziti kao u tabeli 3.

Tabela 3. Kategorije stabilnosti atmosfere po Paskvilu i disperzije prema Brigsu

Paskvilove kategorije	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
Na otvorenom (ruralna sredina)		
A	$0,22x(1+0,0001x)^{-0,5}$	0,20x
B	$0,16x(1+0,0001x)^{-0,5}$	0,12x
C	$0,11x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-0,5}$
D	$0,08x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-0,5}$
E	$0,06x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-0,5}$
F	$0,04x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-0,5}$
Urbana sredina		
A-B	$0,32x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,024x(1+0,001x)^{-0,5}$
C	$0,22x(1+0,0004x)^{-0,5}$	0,20x

D	$0,16x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-0,5}$
E-F	$0,11x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,0015x)^{-0,5}$

Za određivanje ovih disperzija koriste se i sledeće relacije.

$$\sigma_y = \alpha x^\beta; \quad \sigma_z = \gamma x^\delta \quad (2.6.46)$$

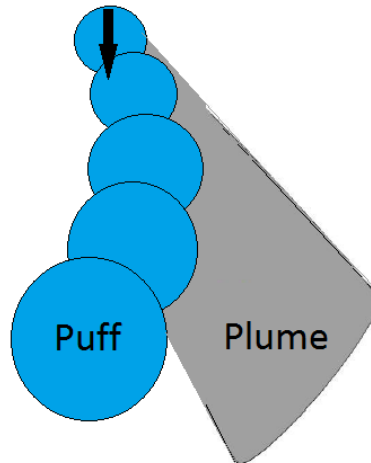
gde su $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ koeficijenti koji zavise od stabilnosti atmosfere i reljefa površine i određuju se eksperimentalno. Vrednost ovih koeficijenata je data u tabeli 4 (Lazaridis, 2011).

Tabela 4. Tabela stabilnosti atmosfere prema Brukhejven laboratoriji

		α	β	γ	δ
vrlo nestabilna	A	0,527	0,865	0,28	0,90
nestabilna	B	0,371	0,866	0,23	0,85
slabo nestabilna	C	0,209	0,897	0,22	0,80
		α	β	γ	δ
neutralna	D	0,128	0,905	0,20	0,76
stabilna	E	0,098	0,902	0,15	0,73
vrlo stabilna	F	0,065	0,902	0,12	0,67

2.6.1 Gausov PUFF model

Kod Gausovog modela polazimo od pretpostavke da je izvor kontinualan u vremenu sa konstantnim protokom zagađujuće materije, pa je dimna perjanica kontinualna. (Joseph, David & Robert, 2020). U slučaju kad izvor zagađenja nije kontinualan i nema konstantni protok zagađujuće materije koristimo tzv. Gausov „Puff“ model (McMullen, 1975). U ovom modelu dimnu perjanicu zagađivača aproksimiramo serijom segmenata sukcesivno emitovanih oblaka (puff-ova), u zavisnosti od dimenzija segmenata perjanice i standardnih devijacija u horizontalnom smeru σ_y . Vrednost σ_y raste tokom transporta zagađivača, tako da se svaki segment perjanice može potencijalno pretvoriti u „puff“ (slika 7). (Leelossy, Molnar, Izsak, Havasi, Lagzi & Meszaros, 2014).



Slika 7. 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 polutanata i ako se u obzir uzima i njegova „refleksija“ od podloge, primenjuje se „puff“ model u čijoj osnovi leži sledeća formula:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{\sqrt{(2\pi)^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}} \exp\left\{-\left[\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \left\{\exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (2.6.47)$$

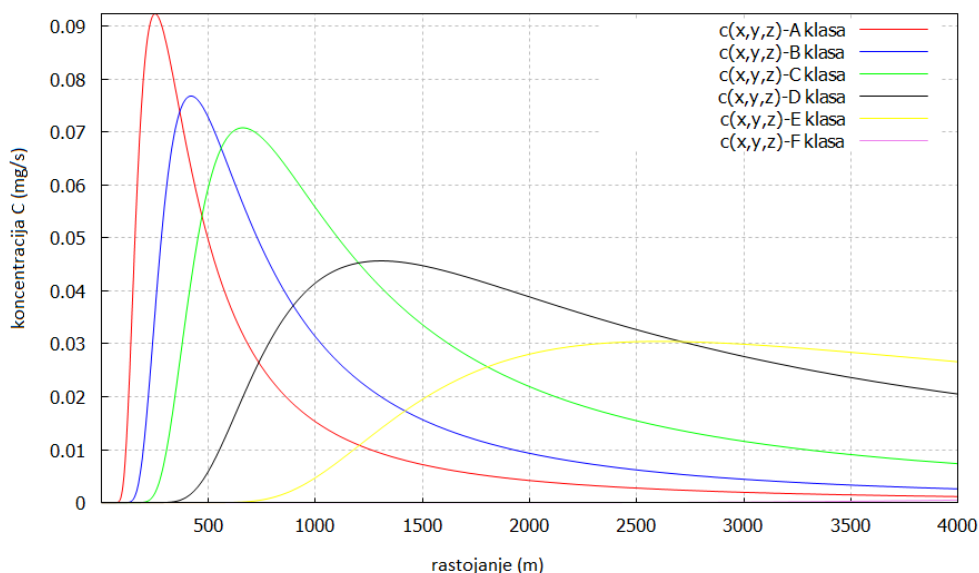
Kontinualna emisija polutanata iz nekog izvora može prikazati serijom emisija diskretnih zapremina, „puff“-ova, polutanata u jednakim vremenskim intervalima. Ako se meteorološki podaci mere u tim istim intervalima, onda može da se prati kretanje svake takve diskretne zapremine sa zagađujućom materijom, 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 – perjanica i puff (Nikezić, 2016).

2.6.2 Grafički prikaz analitičkog rešenja Gausovog mode

U ovom delu grafički su predstavljene koncentracije polutanata u funkciji različitih parametara dobijene na osnovu Gausovog modela perjanice. Svi proračuni rađeni su u matematičkom programu *Maxima i Matlab*.

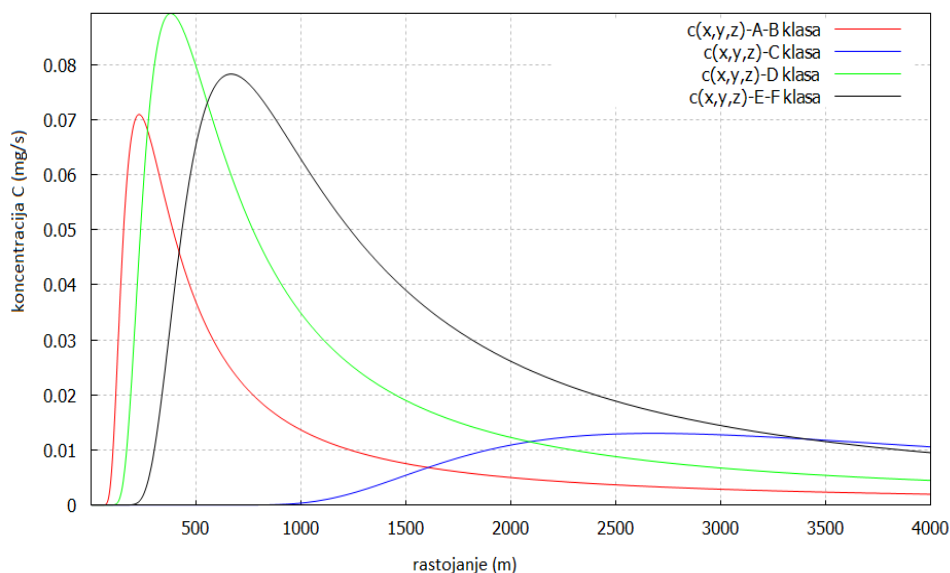
2D grafički prikaz

U ovom slučaju upoređićemo sigma parametre za svaku klasu stabilnosti: (Briggs,1975) jednačine (2.6.36 i 2.6.37). Parametri za procenu koeficijenata disperzije za urbane i ruralne uslove sredine dati su u tabeli 3. Vrednosti koncentracije aeropolutanata u zavisnosti od klasa stabilnosti, brzine vetra i visine dimnjaka (Sharan, Yadav & Sing, 1995), grafički su predstavljeni na rastojanju od izvora od 0 do 4 km na slici 8 do 13.



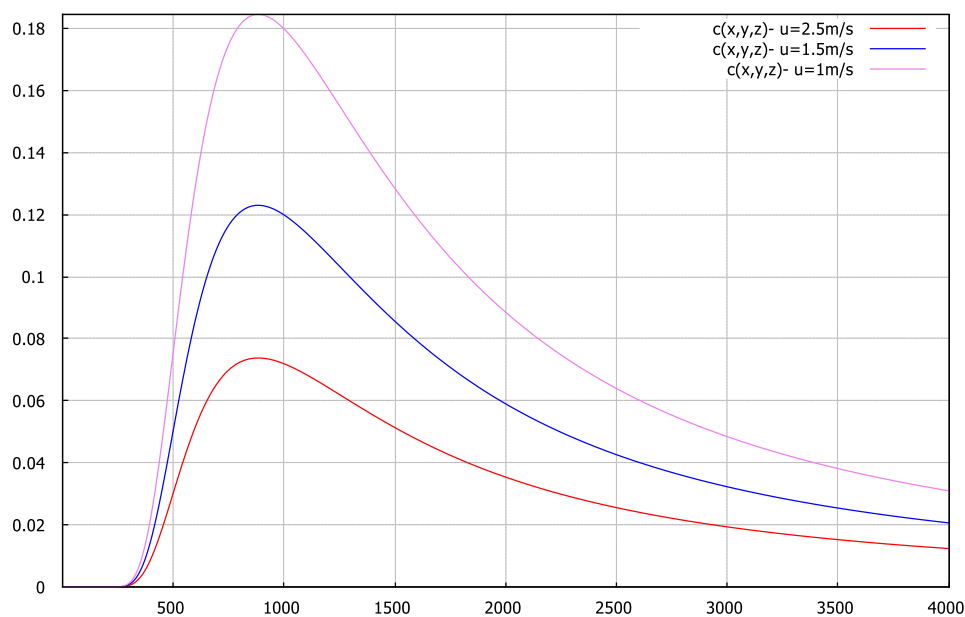
Slika 8. Zavisnost koncentracije polutanata od klasa atmosfere stabilnosti za ruralne uslove

Analizom grafika se mogu izvući određeni kvalitativni zaključci. Sa grafika se vidi se da je koncentracija polutanata najmanja (skoro jednaka nuli) u samoj blizini izvora. Maksimum koncentracije polutanata je najizraženiji za klasu A, tj. kada je atmosfera nestabilna. Što je atmosfera stabilnija, maksimumi koncentracija polutanata su manjih vrednosti i dostižu se na većim rastojanjima od izvora.



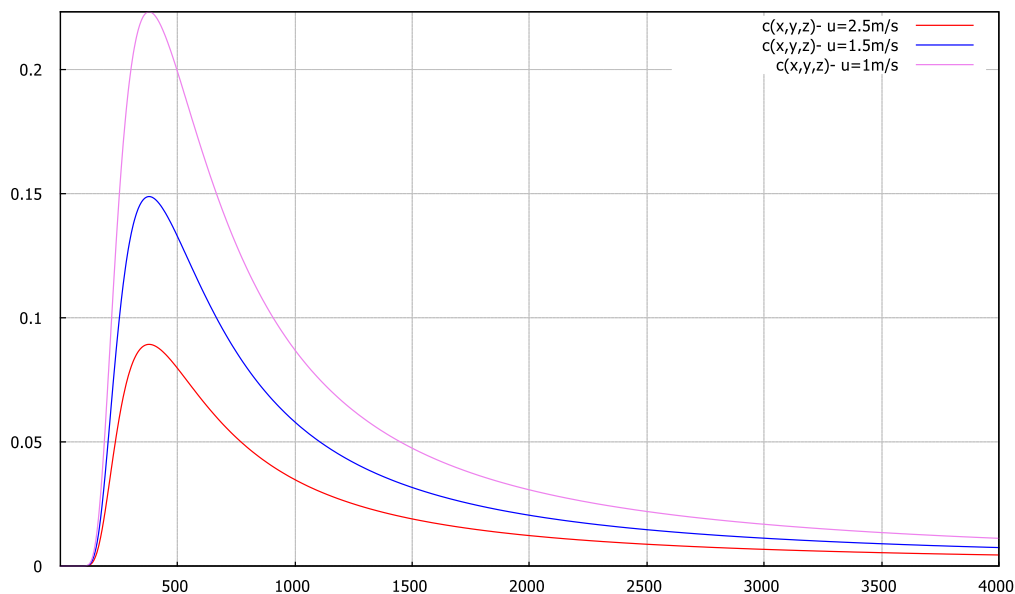
Slika 9. Zavisnost koncentracije polutanata od klasa atmosferske stabilnosti za urbane uslove

Raspodela koncentracije polutanata je u urbanim uslovima nešto drugačija nego u ruralnim. U urbanim uslovima maksimalna vrednost koncentracije polutanata se postiže za klasu D (neutralna atmosfera), potom za klase E-F (stabilna atmosfera) a za klase A-B je maksimum koncentracije niži. Za slabo nestabilnu atmosferu klase C je maksimum koncentracije najmanji i postiže se na najvećem rastojanju od izvora. Takođe, maksimalne vrednosti koncentracija polutanata se za urbane uslove postižu na kraćim rastojanjima od izvora nego u slučaju ruralnih sredina. Sama maksimalna vrednost je veća u ruralnoj sredini nego u urbanoj.

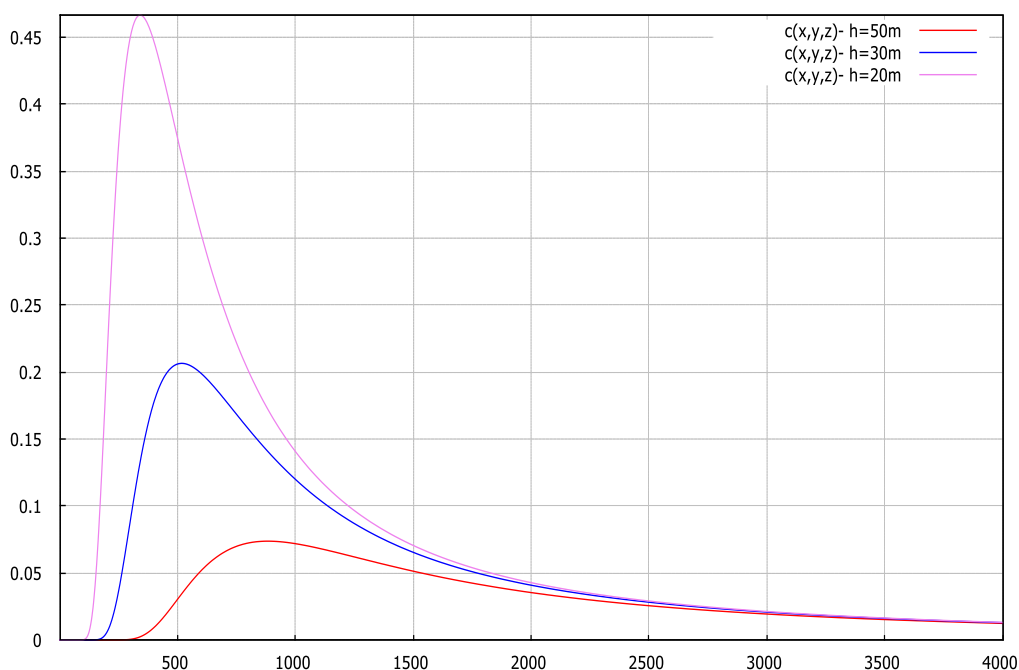


Slika 10. Zavisnost koncentracije polutanata za različite brzine vetra za ruralne uslove

Sa slika 9 i 10 je uočljivo da su maksimumi koncentracija polutanata veći za manje brzine strujanja vazduha. Interesantno je da se bez obzira na brzine vetra i u ruralno i u urbanoj sredini maksimumi postižu na približno istom rastojanju od izvora. Međutim, rastojanje maksimuma od izvora je manje u slučaju urbane sredine, a sama vrednost maksimuma koncentracije polutanata ima nešto veću vredost.



Slika 11. Zavisnost koncentracije polutanata za različite brzine vetra za urbane uslove

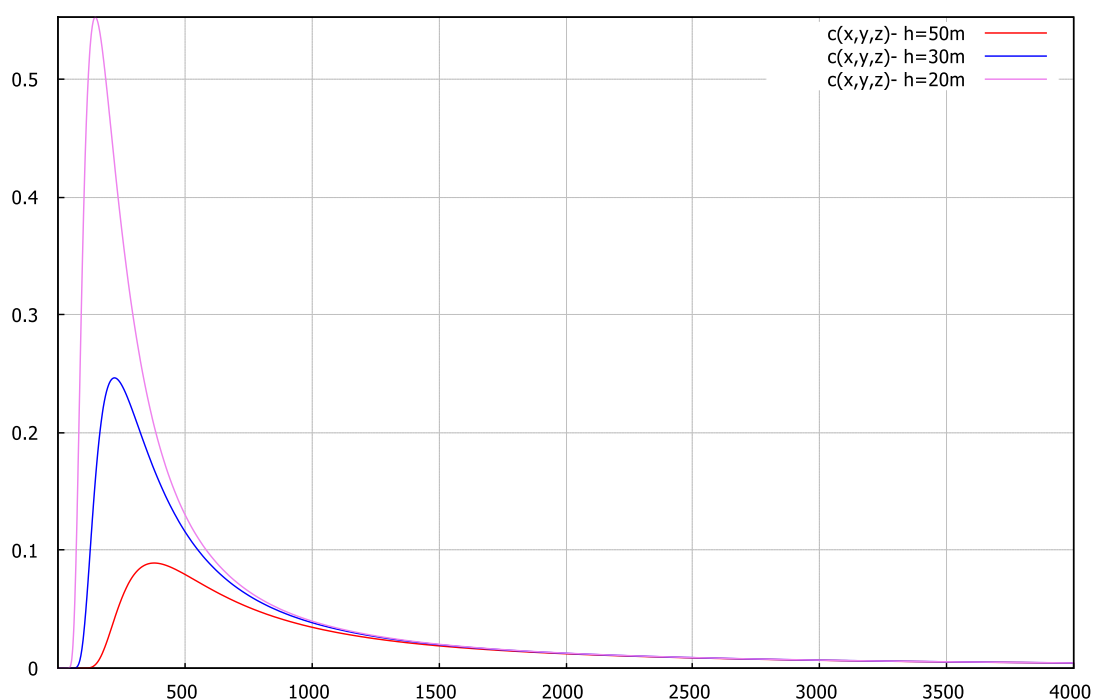


Slika 12. Zavisnost koncentracije polutanata za različite visine dimnjaka za ruralne uslove

Analizom slika 12 i 13 dolazi se do zaključka da koncentracija polutanata ima maksimalne vrednosti veće što je dimnjak manje visine i u ruralnoj i u urbanoj sredini. Takođe, u oba slučaja, vrednosti maksimuma koncentracije polutanata se pomeraju od izvora što je dimnjak veće visine.

Maksimum koncentracije polutanata je bliži izvoru u urbanoj sredini nego u ruralnoj, a sama vrednost maksimuma je veća u urbanoj sredini.

Jasno je da ovi kvalitativni rezultati pomažu za brzu procenu raspodele koncentracije polutanata i da iskusnom stručnjaku mogu biti od koristi kod donošenja odgovarajućih odluka u trenucima brzog delovanja.



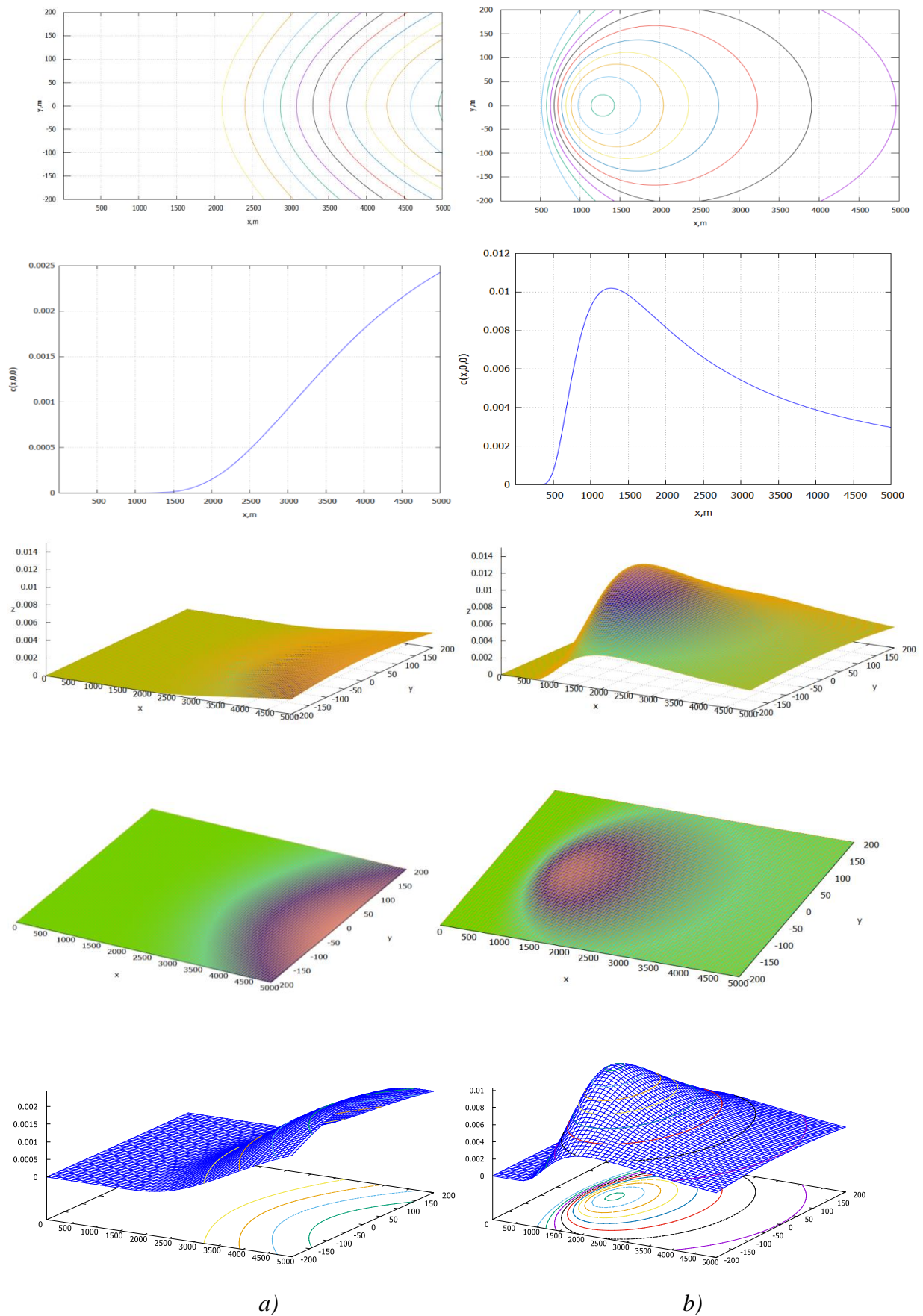
Slika 13. Zavisnost koncentracije polutanata za različite visine dimnjaka za urbane uslove

3D grafički prikaz

Na slikama 14a i 14b prikazane su prostorno-vremenske raspodele u različitim projekcijama u pravcu dejstva vetra za ruralne i urbane uslove za D klasu stabilnosti (Ilijazi, Jaćimovski, Milić & Popović, 2021), brzinu vetra $u=2,5$ m/s, i visini dimnjaka $h=50$ m.

Može se videti da je u slučaj ruralnih uslova (slika 14a) koncentracija zagađenja počinje da raste tek na rastojanju od oko 1500 m od izvora i svoju maksimalnu vrednost dostiže na rastojanjima preko 5000 m. Poređenja radi kod urbanih uslova (slika 14b), može se videti da je koncentracija je veća i opada brže sa povećanjem udaljenosti od izvora. Koncentracija zagađenja počinje da raste već oko 500 m od izvora zagađenja, a svoju maksimalnu

vrednost dostiže na rastojanju od 1250 m da bi nakon toga bržr počela da opada. U slučaju urbanih uslova koncentracija zagađenja je oko četiri puta veća u odnosu na ruralne.



Slika 14. Zavisnost koncentracije polutanata kod D klase atmosferske stabilnosti za a) ruralne i b)urbane uslove($u=2,5m/s$, $h=50m$)

2.6.3 Nedostaci Gausovog modela perjanice i Puff modela

U Gausovoj jednačini disperzije koriste se određene pretpostavke i ograničenja. Pođimo od toga da se posmatra jedan izvor zagađenja iz kojeg se razvija kontinuirana podignuta ili spuštana perjanica u odnosu na ravan teren (Lagzi, Meszaros, Gelybo & Leeslossy, 2013).

Najvažnije pretpostavke i ograničenja odnose se na:

- tačnost predikcije visine rasta perjanice budući da ona direktno utiče na visinu emisije korišćenu u Gausovoj jednačini;
- tačnost parametara difuzije (vertikalna i horizontalna standardna devijacija distribucije emisije) korištenih u Gausovom modelu disperzije;
- pretpostavka srednjeg perioda vremena izračunatih prizemnih koncentracija zagađivača pomoću koeficijenata difuzije korištenih u Gausovom modelu difuzije; odnosno dilema da li proračunate prizemne koncentracije predstavljaju 5-minutne, 10-minutne, 15-minutne, 30- minutne ili jednosatne srednje vrednosti koncentracije?

Pored ovih pretpostavki i ograničenja u Gausovom modelu postoje i one kojima su uključene metode određivanja određenih parametara. Te metode uključuju:

- određivanje klasifikacije atmosferske stabilnosti (karakteriše stepen turbulencije),
- određivanje profila vetra zbog efektivne visine, te konverzije kratkotrajnih prizemnih koncentracija iz jednog srednjeg vremena u drugi.

Takođe Gausov model polazi od pretpostavke o konstantnim uslovima nad celom dužinom putanje perjanice od izvora emisije pa sve do neke prizemne merne tačke na određenom rastojanju (Masters, 1998). Ipak, ne može se reći sa sigurnošću tvrditi kako je brzina vetra na visini srednje linije perjanice i klasa atmosferske stabilnosti zaista poznata i konstantna duž cele putanje emisije zagađivača.

Takođe, određivanje tačne brzine vetra i klase stabilnosti uzduž središnjice („simetrane”) dima zahteva :

- predviđanje tačnog dizanja perjanice,
- tačan odnos brzine vetra i visine,

a nijedno od njih nije još ostvareno.

Kratak prikaz svih ograničenja i pretpostavke uočenih do sada:

- brzina vetra i njen smer su konstantni od tačkastog izvora do neke prizemne merne tačke na određenom rastojanju.;
- atmosferska turbulencija je takođe konstantna duž cele putanje emisije zagađivača;
- cela perjanica je homogena, što znači da nema taloženja ili ispiranja čestica zagađivača niti njihove hemijske reakcije i transformacije sa okolinom;
- konfiguracioni uslovi terena sagledavaju se korišćenjem skupa difuzijskih koeficijenata za urbano i ruralno područje; Gausov model disperzije ne uključuje režime terena kao što su planine, brda, doline i obale.

Gausov model pretpostavlja jedan idealizovan stacionarni slučaj s konstantnim meteorološkim uslovima duž cele putanje emisije do velikih udaljenosti, idealizovanu geometriju perjanice, i jednoliku konfiguraciju terena. Takav idealan slučaj se zaista retko dogodi (Dragović, 2013).

2.7 Numeričko rešavanje JAD

Parcijalna diferencijalna jednačina JAD se, osim što se rešava analitički, može rešiti i numerički (Li & Chen, 2008). Za numeričko rešavanje se koriste razni metodi. Jedan od metoda koji se koristi poslednjih godina je tzv. Adomian dekompozicioni metod (Adomian, 1992). Pokazao se kao izuzetno efektan za brzo nalaženje rešenja, jer je rešenje dato u obliku reda koji brzo konvergira. Metod je dao G. Adomian po kome on nosi naziv (Adomian, 1994).

U daljem tekstu će se dati osnove metoda i na primerima pokazati kako u praksi funkcioniše.

Neka imamo diferencijalnu jednačinu oblika

$$Lu + Ru + Nu = g \quad (2.7.1)$$

gde je L diferencijalni operator najvišeg reda, R - linearni diferencijalni operator nižeg reda od L , Nu - predstavlja nelinearni član, a g je poznata funkcija. Pretpostavka je da se može jednostavno naći inverzni operator L^{-1} . Primenjujući na obe strane jednačine (2.5.61) inverzni operator L^{-1} , dobija se:

$$u = f - L^{-1}(Ru) - L^{-1}(Nu) \quad (2.7.2)$$

gde je f član dobijen integracijom poznate funkcije g uz primenu graničnih i početnih uslova, za koje pretpostavljamo da su poznati.

Rešenje posmatrane diferencijalne jednačine se dobija u obliku reda

$$u = \sum_{n=0}^{\infty} u_n \quad (2.7.3)$$

gde su članovi u_0, u_1, u_2, \dots određeni na sledeći način:

$$\begin{aligned} u_0 &= f \\ u_{k+1} &= -L^{-1}(Ru_k) - L^{-1}(Nu_k), \quad k \geq 0 \end{aligned} \quad (2.7.4)$$

Važno je napomenuti da se prvi član reda definiše funkcijom f i nalaženjem sledećih članova reda, lako se dolazi do rešenja.

Sada se Adomian metod dekompozicije primeni za rešavanje JAD. Pretpostavlja se da je

$k_y = k_z = k(x)$. U tom slučaju stacionarna JAD je oblika

$$\frac{\partial^2 C_y}{\partial z^2} = \frac{u}{k} \frac{\partial C_y}{\partial x} \quad (2.7.5)$$

Takođe pretpostavićemo sledeće granične uslove

1. Polutanti se apsorbuju na površini zemlje

$$k \frac{\partial C_y(x, z)}{\partial z} = -v_g C_y(x, z); \quad \text{na } z = 0$$

gde je v_g brzina depozicije polutanata na površinu zemlje.

2. Protok polutanata na visini mešanog sloja je

$$k \frac{\partial C_y(x, z)}{\partial z} = 0; \quad \text{na } z = h$$

3. Jednačina kontinuiteta za masu polutanata je

$$u C_y(x, z) = Q \delta(z - h); \quad \text{na } x = 0$$

gde je h visina mešanog sloja, δ - Dirakova funkcija, a Q - snaga izvora polutanata.

4. Koncentracija polutanata teži nuli na velikom rastojanju od izvora

$$C_y(x, z) = 0; \quad \text{za } z = \infty$$

Ako u JAD obeležimo sa $A = \frac{u}{k}$, ona postaje

$$L_{zz}C_y(x, z) = AL_xC_y(x, z); \quad L_{zz} = \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad L_x = \frac{\partial}{\partial x} \quad (2.7.6)$$

$$C_y(x, z) = c_0 + AL_{zz}^{-1}L_xC_y(x, z) \quad (2.7.7)$$

$$L_{zz}^{-1} = \int_0^z \int_0^z (c_0 + AL_{zz}^{-1}L_xC_y(x, z)) dz dz \quad (2.7.8)$$

Pretpostavimo da je

$$c_0 = P(x) + zR(x) \quad (2.7.9)$$

gde su $P(x)$ i $R(x)$ nepoznate funkcije koje će se odrediti iz graničnih uslova.

Opšti oblik koeficijenata je

$$c_{n+1} = A \int_0^z \int_0^z \frac{\partial c_n}{\partial x} dz dz \quad (2.7.10)$$

Za $n=0$ dobija se

$$c_1 = A \int_0^z \int_0^z \frac{\partial c_0}{\partial x} dz dz = A \int_0^z \int_0^z \left(\frac{\partial P}{\partial x} + z \frac{\partial R}{\partial x} \right) dz dz = A \frac{\partial P}{\partial x} \frac{z^2}{2!} + A \frac{\partial R}{\partial x} \frac{z^3}{3!} \quad (2.7.11)$$

$$u_n = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \quad (2.7.12)$$

$$u_1 = c_0 + c_1 = P(x) + zR(x) + A \frac{\partial P}{\partial x} \frac{z^2}{2!} + A \frac{\partial R}{\partial x} \frac{z^3}{3!} \quad (2.7.13)$$

Diferencira se poslednja jednačina po z i množi sa k_z :

$$k_z \frac{\partial u_1}{\partial z} = k_z R(x) + Azk_z \frac{\partial P}{\partial x} + A \frac{z^2}{2!} k_z \frac{\partial R}{\partial x} \quad (2.7.14)$$

Sada se primenjuje granični uslov 1. i za $z=0$ sledi da je

$$k_z \frac{\partial u_1}{\partial z} = k_z R(x) = P(x) \quad (2.7.15)$$

$$R(x) = -\frac{v_g}{k_z} P(x) \rightarrow P(x) = -\frac{k_z}{v_g} R(x) \quad (2.7.16)$$

Sada se koristi granični uslov 2. za $z=h$

$$k_z R(x) + Ahk_z \frac{\partial P}{\partial x} + A \frac{h^2}{2!} k_z \frac{\partial R}{\partial x} = 0 \quad (2.7.17)$$

$$P(x) = -\frac{k_z}{v_g} R(x); \quad \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{k_z}{v_g} \frac{\partial R}{\partial x} - \frac{R(x)}{v_g} \frac{\partial k_z}{\partial x} \quad (2.7.18)$$

$$k_z R(x) - Ahk_z \left(\frac{k_z}{v_g} \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{R(x)}{v_g} \frac{\partial k_z}{\partial x} \right) + A \frac{h^2}{2!} k_z \frac{\partial R}{\partial x} = 0 \quad (2.7.19)$$

$$\frac{\partial R}{\partial x} \left(A \frac{h^2}{2!} k_z - \frac{Ahk_z^2}{v_g} \right) + R(x) \left(k_z - \frac{Ahk_z}{v_g} \frac{\partial k_z}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.7.20)$$

$$\frac{\partial R}{R(x)} = \left[\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right] \partial x \quad (2.7.21)$$

$$R(x) = R_0(x) e^{\left(\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right) x} \quad (2.7.22)$$

Koristeći granični uslov 3. nalazimo za početnu vrednost $R_0(x)$

$$R_0(x) = \frac{Q}{u} \delta(z-h); \rightarrow R(x) = \frac{Q}{u} \delta(z-h) e^{\left(\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right) x} \quad (2.7.23)$$

Sada možemo prvi koeficijent c_0 izraziti preko jedinstvene funkcije $R(x)$

$$c_0 = -\frac{k_z}{v_g} R(x) + zR(x) = (z-B)R(x); \quad B = \frac{k_z}{v_g} \quad (2.7.24)$$

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \left[\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right] R(x) \quad (2.7.25)$$

$$P(x) = -\frac{k_z}{v_g} \frac{\partial R}{\partial x}; \rightarrow \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{k_z}{v_g} R \left[\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right] \quad (2.7.26)$$

$$c_1 = (AD) \left(\frac{z^3}{3!} - \frac{k_z}{v_g} \frac{z^2}{2!} \right) R; \quad D = R \left[\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right] \quad (2.7.27)$$

Slično se nalazi za ostale koeficijente

$$\begin{aligned} c_2 &= (AD)^2 \left(\frac{z^5}{5!} - \frac{k_z}{v_g} \frac{z^4}{4!} \right) R \\ c_3 &= (AD)^3 \left(\frac{z^7}{7!} - \frac{k_z}{v_g} \frac{z^6}{6!} \right) R \\ c_4 &= (AD)^4 \left(\frac{z^9}{9!} - \frac{k_z}{v_g} \frac{z^8}{8!} \right) R \end{aligned} \quad (2.7.28)$$

Iz ovoga se nalazi opšte rešenje JAD

$$C_y = \frac{Qv_g}{u(hv_g - k_z)} e^{\left(\frac{2A \frac{\partial k_z}{\partial x} - 2v_g}{Ah(hv_g - 2k_z)} \right) x} \sum_{i=0}^n \left(\frac{2u(A \frac{\partial k_z}{\partial x} - v_g)x}{Ahk_z(hv_g - 2k_z)} \right)^i \left(-\frac{k_z^{2i}}{v_g(2i)!} + \frac{z^{2i+1}}{(2i+1)!} \right) \quad (2.7.29)$$

Za nalaženje konkretnih vrednosti koncentracije, iz literature se uzima vrednost za koeficijent turbulentne difuzije u obliku:

$$k_z(x) = 0,04ux \quad (2.7.30)$$

ili

$$k_z(x) = 0,16 \left(\frac{\sigma_w^2}{u} \right) x \quad (2.7.31)$$

gde je σ_w standardna devijacija vertikalne brzine w .

Wazwaz je dokazao u (Wazwaz, 1998), da je Adomain dekompozicioni metod jednostavniji i pogodniji za numeričko rešavanje linearnih i nelinearnih diferencijalnih jednačina od metoda korišćenja Tejlorovog potencijalnog reda.

Uopšteno govoreći, sa tačke gledišta praktične implementacije, metoda dekompozicije je jednostavna za upotrebu, dok metoda korišćenjem Tejlorovog reda ima određene računске poteškoće.

2.8 Ostale numeričke metode za rešavanje JAD

Mali broj diferencijalnih jednačina se može rešiti analitički i zbog toga su se tokom godina razvijale različite numeričke metode. Postoji veliki broj numeričkih metoda za rešavanja parcijalnih diferencijalnih jednačina. U opštem slučaju, sve ove metode se mogu svrstati u jednu od sledećih kategorija (Li & Chen, 2008):

- Metod konačnih razlika
- Metod spektralne analize
- Metod konačnih elemenata
- Metod konačnih zapremina
- Metod graničnih elemenata i
- Metode koje ne uključuju kreiranje mreže elemenata

Metod konačnih razlika

Zbog svoje jednostavnosti, metod konačnih razlika je najčešće prvi izbor za numeričko rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina. Ova metoda se zasniva na diskretizaciji diferencijalnih jednačina. Na taj način se vrši prevođenje na jednačine sa konačnim razlikama.

Mana ovog pristupa je težina matematičke analize u slučaju promenljivih koeficijenata i kada su u pitanju nelinearne parcijalne diferencijalne jednačine.

Metod graničnih elemenata

Metod graničnih elemenata zasniva se na diskretizovanju granične oblasti graničnim elementima. Pri diskretizovanju koriste se različite vrste aproksimacija geometrije granica i graničnih funkcija.

Metod konačnih zapremina

Takođe, veliku primenu nalazi i metod konačnih zapremina, posebno za rešavanje problema u oblasti kompjuterske dinamike fluida.

Metod konačnih elemenata

Ipak, najpopularniji pristup je metoda konačnih elemenata, koja je istovremeno i najkomplikovanija metoda za implementaciju. Ova metoda koristi različite tipove varijacionih metoda, koje se primenjuju na diskretnom modelu.

Problem se opisuje sistemom diferencijalnih jednačina koje se formiraju iz uslova minimuma funkcionala. Tačnost izračunavanja zavisi od:

- interpolacionih funkcija,
- mreže i
- tipa konačnih elemenata.

Za razliku od ostalih numeričkih metoda, metoda konačnih elemenata se ne zasniva na diskretizaciji jednačina graničnih problema, već na fizičkoj diskretizaciji razmatranog područja.

U zavisnosti od izabranih nezavisno-promenljivih veličina i načina formiranja jednačina, postoje četiri osnovne metode:

- metoda pomeranja (metoda deformacija),
- metoda sila,
- mešovita metoda i
- hibridna metoda.

Detalji navedenih numeričkih metoda prevazilaze okvire ove disertacije i mogu se naći u sledećim monografijama: (Richtmayer & Morton, 1967; Smith, 1978; Gear, 1971; Lambert, 1992; Stetter, 1973; van der Houven, 1977; Butcher, 1987; Hairer & Wanner, 1991; Кошляков, Глинер & Смирнов, 1970).

2.9. Verifikacija modela

Verifikacija modela predstavlja ocenu praktične vrednosti i tačnosti modela. Postoji opšta saglasnost da su eksperimentalni podaci, i to posebno merenja sa terena, glavni kriterijum za verifikaciju modela. I pored te činjenice, verifikacija modela predstavlja izuzetno složen problem.

Razlozi za to su sledeći:

- Odgovarajuća metoda za ocenjivanje se ne može definisati na jedinstven način, pošto upotrebene metode zavise od konteksta primene.

- Skupovi eksperimentalnih terenskih podataka za ocenu su ograničeni i odlikavaju samo mali deo mogućih scenarija. Za korektnu ocenu modela potrebno je koristiti što je moguće veći broj skupova podataka, uz razumevanje prirode modela.
- Obrada ulaznih podataka i rezultata nije jednostavna.
- Teško se može očekivati nezavisnost modela od skupova podataka. S obzirom da postoji relativno mali broj skupova podataka, logično je očekivati da se modeli posle evaluacije delimično prilagođavaju njima, da bi ostvarili rezultate što bliže terenskim merenjima. Validacija modela sa što većim brojem eksperimentalnih test skupova potrebna je da bi se očuvala što je moguće veći stepen nezavisnosti u odnosu na modele.

Prema Hani (Hanna, Chang & Strimaitis, 1993), statistički parametri neophodni za upoređivanje kvaliteta modela sa eksperimentalno određenim normalizovanim koncentracijama su⁹:

Normalizovana srednja kvadratna greška $NSKG = \frac{\overline{(C_M - C_G)^2}}{C_M C_G}$

$$R = \frac{\overline{(C_M - \overline{C_M})(C_R - \overline{C_R})}}{\sigma_{C_M} \sigma_{C_R}}$$

Koeficijent korelacije

Koeficijent linearne korelacije (R) daje najmanje informacija, a time je i najmanje značajan, od prikazanih statističkih pokazatelja, jer on predstavlja stepen linearne korelacije predviđenih i tačnih vrednosti

Udeo tačnih predviđanja u odnosu na tačnu vrednost. FA indikator je jedan je od najznačajnijih statističkih pokazatelja performansi modela, jer on pokazuje sposobnost modela da da tačna predviđanja za određenu rezoluciju greške, za svaki pojedinačni ispitivani slučaj. FAC2 pokazuje udeo predviđanja sa relativnom greškom manjom od ±20 % omogućava da se modeli efikasno klasifikuju po performansama, u zavisnosti od složenosti problema i zahtevane tačnosti.

$$FAC2: 0,5 \leq \frac{C_G}{C_M} \leq 2,0 \quad (2.9.1)$$

⁹ Crta iznad odgovarajuće veličine označava srednju aritmetičku vrednost date veličine.

$$FB = \frac{(\overline{C_M} - \overline{C_R})}{0,5(\overline{C_M} + \overline{C_R})}$$

Razlomačka tendencija

Ukoliko bi model bio savršen, tj. davao rezultate identične sa merenim vrednostima, parametri R i $FAC2$ treba da imaju vrednost 1,0, a parametri $NSKG$ i FB vrednost 0,0. Zbog uticaja slučajnosti na atmosferske procese, nijedan model nije savršen i pomenuti parametri nikada ne dostižu idealne vrednosti.

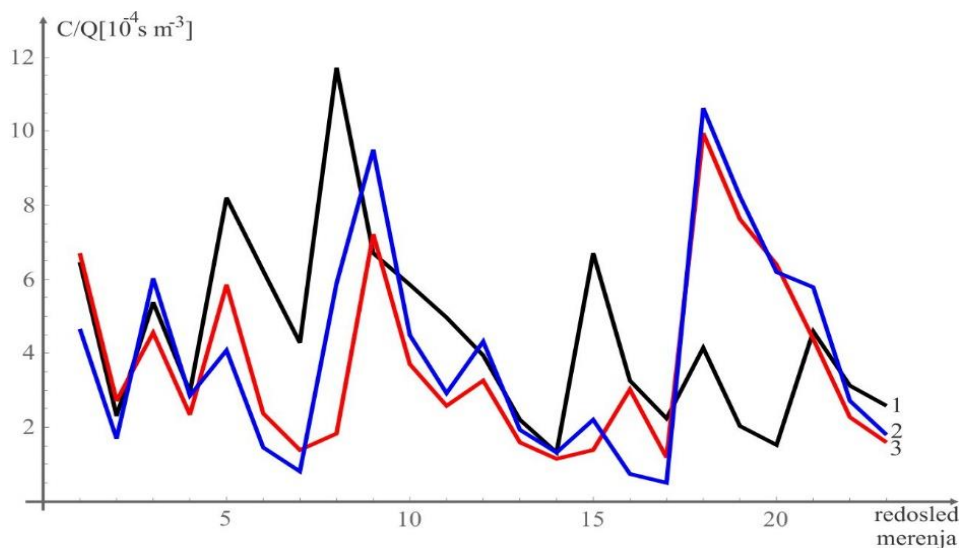
PRIMER

U Kopenhagenu je 1987. godine rađen eksperiment u kome su merene vrednosti koncentracije SF₆ u određenom vremenskom periodu za različite klase stabilnosti atmosfere (Gryning, Holtslag, Irwin & Siversten, 1987). Rezultati merenja su, preko tzv. normalizovane koncentracije C/Q [10^{-4} s m⁻³], dati u tabeli 5. Takođe, u tabeli 5. su date normalizovane vrednosti koncentracije izračunate prema Gausovom modelu, za iste uslove kao u eksperimentu.

Tabela 5. Uporedne vrednosti merenih i izračunatih po Gausovom modelu normalizovanih koncentracija C/Q

$x[m]$	Klase stabilnosti	$U_{z0}[m s^{-1}]$	Merene vrednosti $C/Q[10^{-4} s m^{-3}]$	Računate vrednosti $C/Q [10^{-4} s m^{-3}]$ prema Brigsu	Računate vrednosti $C/Q [10^{-4} s m^{-3}]$ prema Brukhejven laboratoriji
1900	A	2,1	6,48	6,70	4,67
3700	A	2,1	2,31	2,73	1,68
2100	C	4,9	5,38	4,57	6,03
4200	C	4,9	2,95	2,36	2,84
1900	B	2,4	8,20	5,86	4,09
3700	B	2,4	6,22	2,39	1,47
5400	B	2,4	4,30	1,40	0,82
2100	C	2,5	6,72	1,82	5,87
4200	C	3,1	5,84	7,22	9,51
6100	C	3,1	4,97	3,72	4,48
2000	C	3,1	3,96	2,58	2,92
4200	C	7,2	2,22	3,26	4,31
5900	C	7,2	1,83	1,60	1,93
2000	B	4,1	6,70	1,40	2,21
4100	B	4,1	3,25	3,01	0,74

5300	B	4,1	2,23	1,17	0,50
1900	D	4,2	4,16	9,93	10,62
3600	D	4,2	3,02	7,64	8,25
5300	D	4,2	1,52	6,39	6,18
2100	C	5,1	4,58	4,40	5,79
4200	C	5,1	3,11	2,26	2,73
6000	C	5,1	2,59	1,59	1,81



Slika 15. Uporedne vrednosti normalizovane koncentracije (1 - merene vrednosti, 2 - izračunate normalizovane vrednosti koncentracija prema Gausovom modelu Brigsovom metodom, 3 - prema Gausovom modelu Brukhejven laboratoriji)

U tabeli 6. date su vrednosti ovih parametara za slučaj kada se disperzije određuju na osnovu Brigsovog i Brukhejvenov pristupa određivanja klase stabilnosti atmosfere u Gausovom modelu

Tabela 6. Uporedne vrednosti za disperzije određene po osnovu Brigsovog i Brukhejven pristupa

Slučaj	Modeli	NSKG	R	FAC2	FB
Gausov model	Brigsov metod	0,68	0,09	1,06	0,09
	Brukhejvenov metod	0,54	0,32	1,02	0,21

Iz tabele 6 se vidi da računanje normalizovane koncentracije polutanata u Gausovom modelu, metodom Brukhejven laboratorije za određivanje disperzije, daje rezultate koji su usaglašeniji sa merenim vrednostima dobijenim u eksperimentu (ima manju srednju kvadratnu grešku, bolju korelaciju sa merenim vrednostima, odnos koncentracija bliži 1.

Jedino je nešto lošija razlomačka tendencija u odnosu na Brigosov metod određivanja koeficijenta disperzije).

2.10. Softversko numeričko rešenje JAD

U softverskim paketima tipa Mathematica 11.2, Matlab, razvijeno je više metoda za nalaženje numeričkih rešenja PDJ.

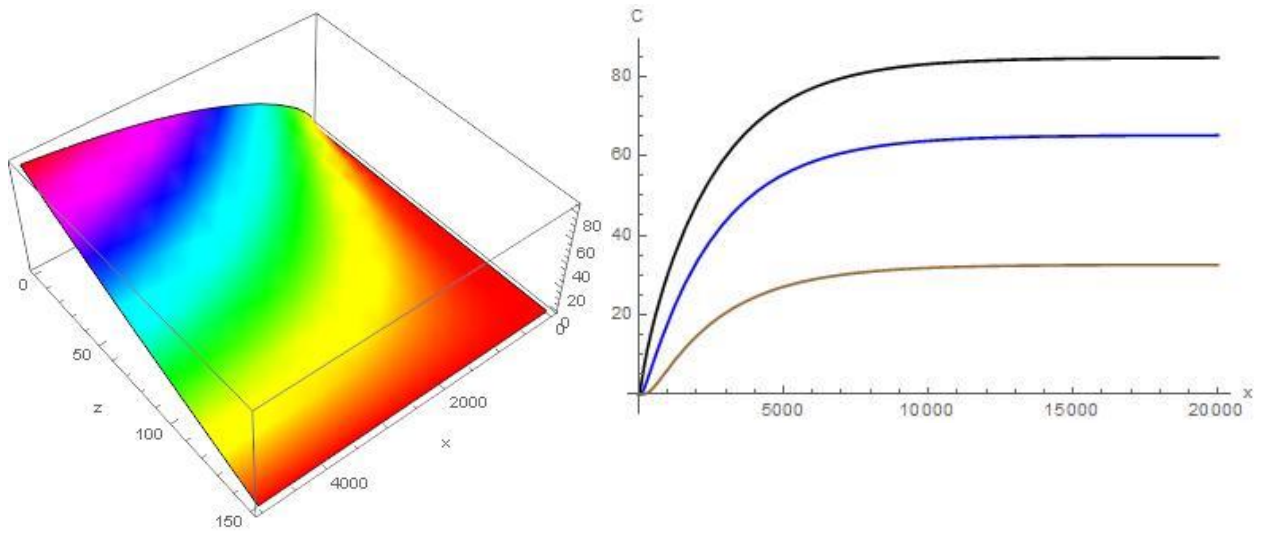
Ove metode se mogu svrstati u dve široke oblasti: metode konačnih razlika i metode konačnih elemenata. Grubo govoreći, oba metoda transformišu problem nalaženje rešenja PDJ u problem rešavanja sistema povezanih algebarskih jednačina (Zauderer, 2006).

Softverski paket Mathematica 11.2 ima ugrađenu funkciju NDSolve koja može numerički da reši različite PDJ-e i nudi korisniku veoma jednostavan i brz put do numeričkog rešavanja PDJ-a.

Niže je dat primer korišćenja funkcije NDSolve za nalaženje numeričkog rešenja JAD.

```
Ql=610.;m=0.29;n=0.45;z1=0.46;K1=2.58;u0=1.37;
Kz[z_]:=K1*(z/z1)^n
u[z_]:=u0*(z/z1)^m
xmin=0;
xmax=5000;
zmin=0.001;
zmax=150;
equL=u[z]*D[c[x,z],x];
equR=Kz[z]*D[c[x,z],z,z];
equ=equL- equR;
bc=NeumannValue[1,z==zmin];
bc1=DirichletCondition[c[x,z]==0,z==zmax];
ic=u[z]*c[0,z]==Ql*DiracDelta[z-20];
sol=NDSolveValue[{equ==bc,ic,bc1},c,{x,xmin,xmax},{z,zmin,zmax}];
p1=Plot3D[sol[x,z],{x,xmin,xmax},{z,zmin,zmax},PlotRange->All,Mesh-
>None,ColorFunction->Hue,AxesLabel->{"x","z"}]
```

Rešenje JAD koje je rezultat numeričkog rešenja pomoću funkcije NDSolve je dat na slici 16 u 3D i 2D formi.



Slika 16. Grafički prikaz numeričkog rešenja PDJ u softverskom paketu Mathematica 11.2

Glava 3

DISTRIBUCIJA AEROZAGAĐENJA

3.1 Ekološka forenzika

Ekološka forenzika ili forenzika životne sredine predstavlja važan, ali često zanemaren deo krivičnog pravosudnog sistema. Različita vrsta krivičnih dela iz oblasti ekologije i zaštite životne sredine je takva da je potreban raznovrstan spektar naučnih znanja i metoda pristupa radi njihovog istraživanja i otkrivanju učinilaca.

U tom cilju multidisciplinarni pristup potiče iz različitih naučnih oblasti i objedinjuje naučna znanja iz različitih oblasti, a posebno ekologije sa jedne strane i forenzičke tehnike sa druge strane u cilju pokretanja istrage kod incidenata zagađenja opasnim materijama kako bi se utvrdio izvor zagađenja i bilo koji drugi uticaj na životnu sredinu ili zdravlje ljudi (Kampa & Castanas, 2008).

Ekološka forenzika se definiše kao sistematska i naučna procena fizičke, hemijske i istorijske informacije u svrhu razvoja odbrambenih naučnih i pravnih zaključaka u vezi sa izvorom ili starošću zagađivača u životnoj sredini i njihovom uticaju na zdravlje ljudi i zagađenje životne sredine (Morrison & Murphy, 2005).

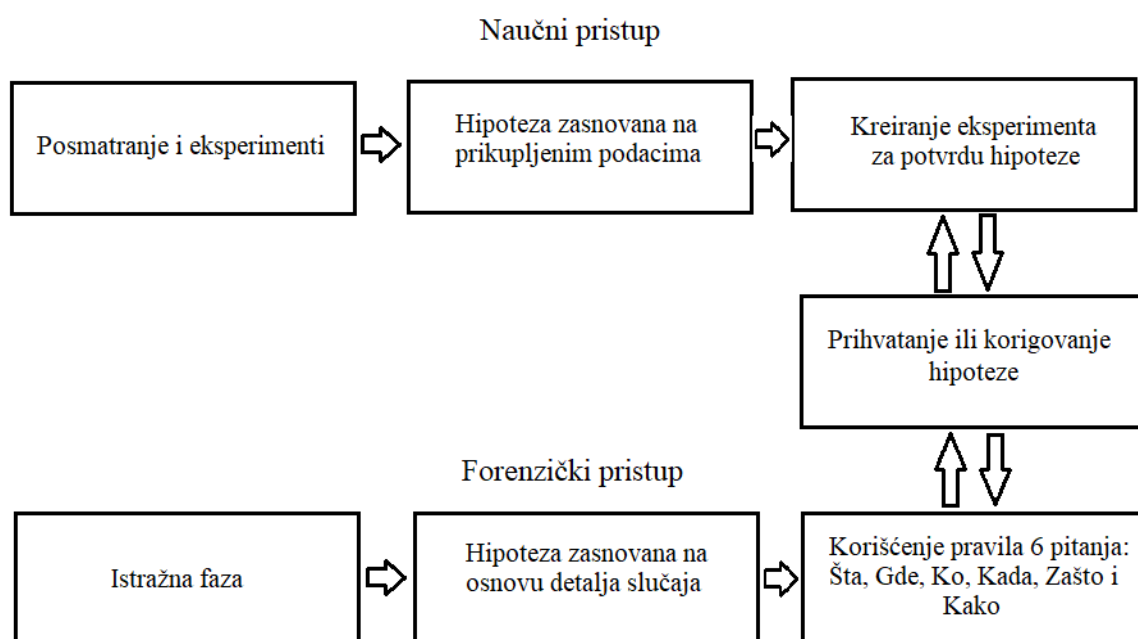
Osnovna svrha oblasti ekološke forenzike u početku razvoja bila je identifikacija izvora zagađenja i sprovođenje istrage u cilju dokazivanja odgovornosti među zagađivačima korišćenjem naprednih naučnih metoda.

Kasnije dolazi do potrebe za modifikacijom tradicionalne definicije ekološke forenzike kao oblast forenzike koji sublimira multidisciplinarne nauke sa ciljem primena naučnih metoda, tehnika i znanja radi zaštite životne sredine u kontekstu regulatornog i pravnog okvira.

Na slici 17, grafički je predstavljena sličnost između naučnog i forenzičkog pristupa kod zaštite životne sredine.

Naučni pristup počinje fazom posmatranja i pripremom eksperimenta. Druga faza je postavljanje naučne hipoteze zasnovane na prikupljenim podacima i informacijama. Treća

faza podrazumeva kreiranje eksperimenta kojim se naučna hipoteza dokazuje i potvrđuje. Kod forenzičkog pristupa prva faza je istražna u kojoj se prikupljaju saznanja i informacije o konkretnom slučaju. Druga faza za razliku od naučnog pristupa je postavljanje hipoteze zasnovane na osnovu detalja konkretnog slučaja. Treća faza za razliku od naučnog pristupa kreiranja eksperimenta za potvrdu hipoteze, koristi poznato pravilo „šest pitanja istrage“, (šta, gde, ko, kada, zašto i kako), na osnovu kojih dolazimo do konkretnih zaključaka. Na osnovu treće faze i kod naučnog i kod forenzičkog pristupa donosimo odluku o prihvatanju ili korigovanju hipoteze.



Slika 17. Sličnost naučnog i forenzičkog pristupa (Pivato, Claire & Varghese, 2020)

Pravilo šest pitanja

ŠTA: Možemo li identifikovati konceptualni model događaja uključujući osnovne elemente izvora zagađenja i transporta opasnih materija? Koje hemijske supstance i jedinjenja su zagađivači?

GDE: Možemo li identifikovati obim zagađenja, a samim tim i rizik?

KO: Možemo li identifikovati izvor zagađenja među potencijalnim izvorima, (industrijske oblasti (poljoprivredne oblasti, urbana sredina itd.)?)

KADA: Možemo li da identifikujemo kada je došlo do zagađenja i koliko je trajalo?

ZAŠTO: Ovo pitanje se odnosi na odluku pravosudnih organa.

KAKO: Ovo pitanje uključuje procese koji utiču na nastanak i transport hemikalija u životnu sredinu, odnosno na analizu i procenu rizika.

3.2 Pojam i osnovne karakteristike akcidenta

Postoje različita tumačenja pojma akcident. Obično se kao sinonim za termin akcident koristi termin „udes” koga definišemo kao neočekivani vanredni događaj ili pojavu sa neželjenim posledicama.

Pod pojmom hemijski akcident se podrazumeva nenameravan i neočekivan događaj ili niz događaja nastalih usled nekontrolisanog oslobađanja, izlivanja i rasturanja opasnih hemijskih materija u proizvodnji, upotrebi, transportu, skladištenju i čuvanju, sa ili bez posledica po zdravlje i život ljudi, materijalna dobra i životnu sredinu (Čvorović, 1999).

Pod akcidentima u smislu događaja koje ćemo obrađivati u radu, podrazumevaćemo pojave nekontrolisanog oslobađanja hemijskih agenasa (supstanci ili materija) koji mogu zagaditi životnu sredinu i prouzrokovati trovanja i infekcije ljudi, životinja i biljnog sveta. Uzrok najvećeg broja akcidenta su neznanje, neodgovorno ponašanje i nehat, tj. ljudski faktor. Akcidenti povezani sa tehničko-tehnološkim greškama i propustima, kao i strukturni nedostaci u postrojenjima za proizvodnju i preradu hemijskih jedinjenja, dešavaju se znatno ređe.

Hemijski akcidenti se u praksi odvijaju kroz četiri faze:

- nastanak akcidenta;
- razvoj akcidenta (ispuštanje opasnih materija u životnu sredinu);
- toksično dejstvo hemijskih materija na štetu po zdravlje ljudi ili životnu sredinu;
- lokalizacija akcidenta i sanacija posledica.

Hemijski akcidenti najčešće nastaju na objektima i sredstvima, koja uključuju:

- objekte hemijske industrije – fabrike, postrojenja i pogone koji proizvode, koriste, ili skladište opasne materije;
- rafinerijski kompleksi za naftno-prerađivačku delatnost;
- transportni objekti: stanice i luke u kojima se prevoze opasne materije, terminali, cevovodi i skladišta za otrovne hemijske materije;
- drugi proizvodni kapaciteti industrijskih grana koje koriste opasne materije: proizvodnja celuloze i papira tekstilna industrija, metalurški kompleksi, poljoprivreda itd.

- transportna sredstva: auto i vagon cisterne, rečni i pomorski tankeri i koji prevoze opasne hemijske materije.

3.2.1 Faze hemijskog akcidenta

Faze hemijskog akcidenta se mogu definisati u odnosu na vreme pre nastanka udesa, početak udesa, tok trajanja, prestanak i vreme nakon udesa. Poznavanje faza akcidenta posebno je važno za adekvatan odgovor na udes, kao i za skup aktivnosti koje treba sprovesti kako bi se smanjile negativne posledice udesa.

U literaturi se obično navode sedam faza odvijanja udesa:

- **I faza** - vreme pre nastanka,
 - **II faza** - vreme nastanka,
 - **III faza** - vreme trajanja udesa u granicama lokacije (proizvodne, skladišne, transportne),
 - **IV faza** - vreme trajanja udesa van granica lokacije,
 - **V faza** - vreme prestanka udesa,
 - **VI faza** - vreme neposredno nakon udesa i
 - **VII faza** - vreme posle udesa.
- U prvoj fazi treba preduzeti sve potrebne mere za sprečavanje nastanka udesa.
 - U drugoj fazi potrebno je poznavanje vremena nastanka udesa, što je ključno za pripremu treće faze.
 - U trećoj fazi je potrebno obezbediti spašavanje života i materijalnih dobara kao i preduzimanje određenih tehničko-tehnoloških mera za sprečavanje širenja udesa, van granica lokacije.
 - Četvrta faza obuhvata obezbeđivanje uslova za spašavanje stanovništva, biljnog i životinjskog sveta, objekata i materijalnih sredstava.
 - U petoj fazi definiše se područje zahvaćena udesom.
 - U šestoj fazi neposredno posle udesa vrši se pružanje prve medicinske pomoći, evakuacija stanovništva kao i pomoć u hrani i smeštaju.
 - Sedma faza podrazumeva primenu odgovarajućih mera za lokalizaciju, oporavak, sanaciju i otklanjanje posledica udesa.

3.2.2 Zone ugroženosti kod hemijskog akcidenta

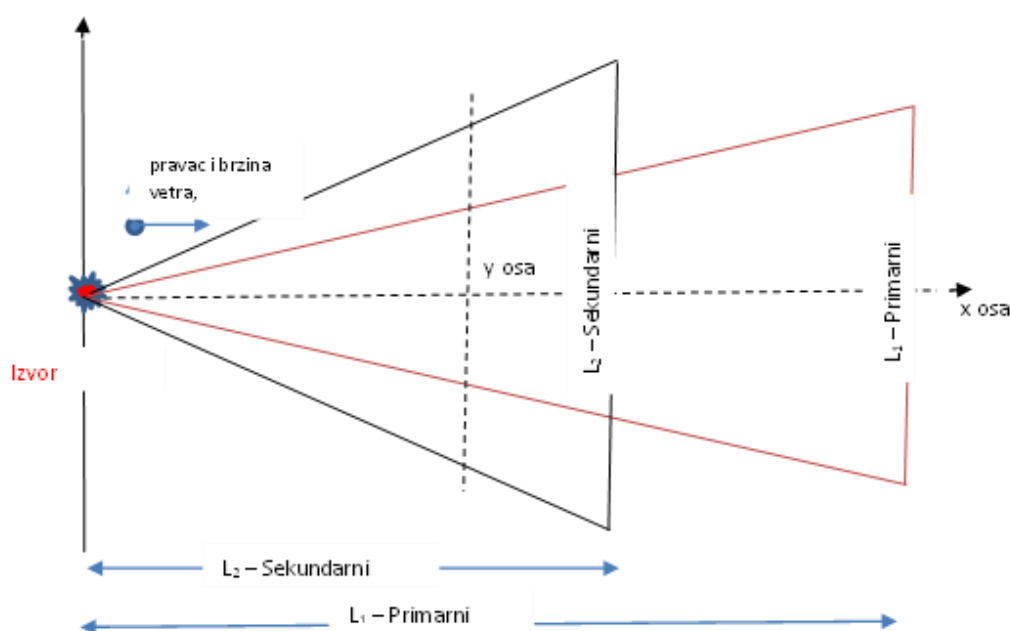
Potencijalni rizik od nastanka udesa svakako čine procesi proizvodnje, rukovanja, skladištenja i transporta opasnih materija. Kao mesta nastanka udesa mogu se definisati:

- proizvodna i tehnološka postrojenja u kojima se proizvode ili koriste u raznim procesima opasne materije;
- objekti, skladišta i magacini u kojima se čuvaju ili deponuju opasne materije;
- sredstva i komunikacije kojima se transportuju opasne materije.

Pri udesima sa opasnom materijom razlikujemo:

- **Centar udesa** - predstavlja zamišljeni prostor na lokaciji na kojoj je došlo do izlivanja opasne materije kao i vazdušni prostor iznad te lokacije u kojem se stvara primarni oblak sa opasnom materijom.
- **Primarni oblak** - je oblak gasova i para opasne materije nastao pri emisiji opasne materije, odnosno prelaskom opasne materije iz tečne u gasovito stanje. Primarni oblak formira samo opasna materija čija je temperatura ključanja niža od temperature okolne sredine.
- **Sekundarni oblak** - je oblak gasova opasne materije nastao isparavanjem razlivenne opasne materije po okolnom zemljištu na lokaciji udesa.

Na slici 18, x osa definiše pravac vetra ili smer širenja oblaka; y osa predstavlja pravac normalan na pravac vetra (koristi se pri određivanju širine žarišta i primarnog i sekundarnog kontaminiranog oblaka).



Slika 18. Osnovni elementi prikaza hemijskog udesa

Odnos između pravca i smera širenja opasnih gasova izuzetno je bitan za procenu i prognozu. Ako se pogrešno sagleda pravac vetra, posledice mogu biti katastrofalne. Na osnovu analize i procene rizika, moguće je za svaki konkretan slučaj odrediti zone ugroženosti nakon nastanka udesa.

3.3 Opasne materije

Fizičke i hemijske osobine hemijske materije, temperatura okoline, meteorološko-hidrološki uslovi, topografske karakteristike lokacije i drugi faktori utiču na širenje posledica akcidenta u vremenu i prostoru (Dingman, 2014). Karakter, masa (količina) i svojstva ispuštene hemijske materije, karakteristike reljefa i klimatski uslovi terena, kao i pripremljenost i materijalno-tehnička osposobljenost jedinica, utiče na dinamiku odvijanja akcidenta i nivo kvaliteta sanacije.

Toksične hemijske materije kod akcidenta mogu dovesti do požara, trovanja, opekotina, bolesti ljudi i zagađenja životne sredine usled njihovog paljenja, eksplozija, nekontrolisanog curenja i prosipanja kao i deformacije postrojenja ili prevoznog sredstva kod skladištenja ili transporta (Štrbac, Petrović-Gegić & Miroslavljević, 2019).

Količina i vrsta opasne materije i veličina zona prostiranja zagađenja utiču na razmere i stepen opasnosti pri akcidentima kod hemijskih postrojenja i pri transportu opasnih materija.

Od vitalnog je značaja pribavljanje relevantnih podataka o potencijalno opasnim materijama prisutnim na lokaciji akcidenta kako bi se blagovremeno preduzele preventivne mere i izradili planovi za otklanjanje posledica.

Po definiciji Evropske unije (Seveso II), hemijski akcident, čini neočekivanu pojavu velike emisije, požara ili eksplozije kao rezultat nepredviđenih događaja u okviru transporta ili određene industrijske aktivnosti koja nastaje u okviru ili van nje uključujući jednu ili više hemijskih supstanci (Dragović, Stojanović, Škraba, Blečić, Cerović & Nikolić, 2012).

Hemijske opasnosti koje se klasifikuju u odnosu na opasnu materiju, mogu biti:

- eksplozivna opasnost,
- toksična opasnost,
- opasnost od zapaljivih tečnosti,
- opasnost od zapaljivih čvrstih materija,

- opasnost od materija sklonih samopaljenju,
- opasnost od gasova pod pritiskom,
- oksidirajuća opasnost,
- opasnost od gadnih i zaraznih materija,
- radioaktivna opasnost,
- korozivna opasnost i
- ostale hemijske opasnosti.

Mali procenat hemijskih materija sadrži samo jednu od opasnih osobina (zapaljivost, toksičnost, eksplozivnost itd.). Supstance obično imaju dve ili više opasnih osobina koje su međusobno zavisne ili povezane (Zhang & Kleinstreuer, 2001). Na primer, zapaljiva jedinjenja su često takođe eksplozivna i opasna.

3.3.1 Klasifikacije opasnih materija

Postoje različiti kriterijumi za klasifikaciju opasnih materija. Pravilnikom o klasifikaciji, pakovanju, označavanju i oglašavanju hemikalija i određenih proizvoda¹⁰, opasne materije se razvrstavaju u jednu ili više klasa opasnosti tako što se podaci o svojstvima opasnih hemikalija upoređuju sa kriterijumima za izbor u određenu klasu opasnosti.

Osobine i svojstva koje karakterišu određenu opasnost grupišu veliki broj opasnih materije u određene grupe, tj. klase.

Trenutno postoji više međunarodnih i nacionalnih normi, preporuka i sporazuma o vrsti i načinu klasifikacije opasnih materija, koji preciznu definišu klasifikacione grupe. Najveći broj zemalja potpisnica Međunarodne konvencije o transportu opasnih materija u svojim sistemima klasifikacija uvažava sistem klasifikacije opasnih materija. Jedina razlika se može videti u broju klasifikacionih grupa, što je posledica stepena detaljnosti u razvrstavanju opasnih materija.

Prema preporuci UN klasifikacija opasnih materija predstavlja polaznu tačku i najznačajniju kariku u rešavanju problema u radu sa opasnim materijama.

¹⁰ „Službeni glasnik RS” br. 59/10, 25/11, 5/12 i 21/19

U drumskom saobraćaju, u skladu sa međunarodnim propisima koji uređuju njihovu primenu, transport i skladištenje, izvršena je klasifikacija opasnih materija. Prema Evropskom sporazumu o međunarodnom prevozu opasnih materija u drumskom saobraćaju (ADR - „Accord European relatifou transport international de merchandises Dangereuses par Route“), opasne materije svrstane su u devet klasa.

Evropski sporazum o međunarodnom prevozu opasne robe u drumskom saobraćaju¹¹ – ADR. Dodatna razrada ovog dokumenta poverena je Ekonomskoj komisiji za Evropu UN - Komitetu za unutrašnji saobraćaj - Radnoj grupi za transport opasnih dobara, sa sedištem u Ženevi.

- **Klasa 1** - eksplozivne materije:

- Klasa 1.1 - materije i predmeti koji predstavljaju opasnost od eksplozije celokupne mase (praktično jednovremeno eksplodira, obuhvatajući celokupni sadržaj);
- Klasa 1.2 - materije i predmeti koji predstavljaju opasnost od razleta fragmenata, ali ne i opasnost od eksplozije celokupne mase;
- Klasa 1.3 - materije i predmeti koji predstavljaju opasnost od požara, uz minimalnu opasnost od razletanja fragmenata ili eksplozije, ali ne predviđaju opasnost od eksplozije celokupne mase. Artikli ove grupe:
 - sagorevaju sa radijalnim širenjem toplotnog zračenja,
 - sagorevaju jedno za drugim, inicirajući minorne efekte razleta ili eksplozije;
- Klasa 1.4 - obuhvata materije i predmete koji ne predstavljaju značajnu opasnost. To su materije i predmeti koji imaju malu opasnost u slučaju paljenja ili iniciranja tokom prevoza. Efekti se praktično u potpunosti zadržavaju u okviru pakovanja i ne očekuje se fragmentalno ni probojno dejstvo. Spoljni plamen ne izaziva simultanu eksploziju celog sadržaja pakovanja.
- Klasa 1.5 - vrlo neosetljive materije, koje u slučaju iniciranja predstavljaju opasnost od eksplozije u masi. Veoma je mala verovatnoća iniciranja ili prenosa stanja požara u detonacije pod normalnim uslovima transporta.

¹¹ Međunarodni ugovor, zaključen u Ženevi 30.09.1957. godine - ratifikovala ga je SFRJ (Službeni list SFRJ, br. 59/79)

- Klasa 1.6 - ekstremno neosetljive materije koje ne poseduju opasnost od eksplozije u masi. Predmeti mogu sadržati samo ekstremno neosetljive detonirajuće supstance koje imaju beznačajnu verovatnoću akcidentnog iniciranja ili propagacije.
- **Klasa 2** - zbijeni gasovi, gasovi pretvoreni u tečnost i gasovi rastvoreni pod pritiskom. Materije koje imaju kritičnu temperaturu ispod 500C odnosno materije koje na 500C imaju pritisak veći od 3 bar.
- **Klasa 3** - zapaljive tečnosti-čine zapaljive tečnosti ili smeše tečnosti koje na temperaturi od 500C imaju pritisak para niži od 3 bar, a tačku paljenja manju od 610C .
- **Klasa 4** - zapaljive čvrste materije:
 - Klasa 4.1 - zapaljive čvrste materije - koje kad su u suvom stanju mogu lako da se zapale u dodiru sa plamenom ili varnicom (sumpor, celuloid, nitroceluloza, crveni fosfor) ali nisu sklone samopaljenju;
 - Klasa 4.2 - materije sklone samopaljenju - pale se u dodiru sa vazduhom ili vodom bez posredstva drugih materija ili izvora paljenja (beli i žuti fosfor, cinkovi alkali, otpaci nitrocelulozni filmovi, sirovi pamuk, upotrebljavane – nauljene i zamašćene krpe itd.);
 - Klasa 4.3 - materije koje u dodiru sa vodom oslobađaju zapaljive gasove - pale se u dodiru sa plamenom i varnicom (natrijum, kalijum, kalcijum karbid).
- **Klasa 5** - oksidirajuće materije i organski peroksidi:
 - Klasa 5.1 - oksidirajuće materije u dodiru sa drugim materijama, se razlažu i pri tom mogu prouzrokovati požar (hloridi, perflorati, vodeni rastvor vodonik-superoksida, peroksidi alkalnih metala i njihove smeše);
 - Klasa 5.2 - organski peroksidi-organske materije sa višim stepenom oksidacije koje mogu da izazovu štetne posledice po zdravlje i život ljudi ili oštećenje materijalnih dobara. Veliki broj organskih peroksida je osetljiv na povećane temperature i udare, pri čemu mogu eksplodirati. Zbog svoje nestabilnosti, neki od njih, moraju se skladištiti i transportovati na niskim temperaturama.
- **Klasa 6** - otrovne (toksične) i infektivne materije:
 - Klasa 6.1 - otrovi (toksične materije) - materije sintetičkog, biološkog ili prirodnog porekla i preparati proizvedeni od tih materija koji uneseni u organizam

ili u dodiru sa organizmom mogu ugroziti život ili zdravlje ljudi ili štetno delovati na životnu sredinu;

- Klasa 6.2 - infektivne materije, i materije koje šire neprijatan miris ili sadrže mikroorganizme ili njihove toksine za koje se zna da mogu izazvati zarazna oboljenja kod ljudi i životinja (sveža usoljena ili ne usoljena koža, otpaci od proizvodnje tutkala, iznutrice, žlezde, fekalije, mokraća, prirodno đubrivo itd.).
- **Klasa 7** - radioaktivne materije koje sadrže radioaktivne atome.
- **Klasa 8** - korozivne materije. Materije koje u dodiru sa drugim materijama i živim organizmima izazivaju njihovo oštećenje ili uništenje (sumporna kiselina, azotna kiselina, mravlja kiselina, brom, natrijum hloroksid, hidroksidi, halogeni elementi). Korozivne materije u dodiru sa ljudskom kožom izazivaju teška oštećenja kože, očiju, disajnih puteva i organa za varenje. Delovanjem na druge materije mogu izdvojiti toplotu, otrovne gasove i pare što može dovesti do požara i eksplozija.
- **Klasa 9** - ostale opasne materije. Materije koje za vreme prevoza predstavljaju opasnost, a koje se ne mogu svrstati u prethodne klase (azbest, suvi led, magnetni materijali i sl.). Opasnim materijama smatraju se i sirovine od kojih se proizvode opasne materije i otpaci, ako imaju osobine tih materija.

3.4 Rizik i analiza rizika kod akcidenata

U literaturi veliki broj autora smatra da rizik predstavlja višedimenzionalnu veličinu kojom se opisuju situacije u kojima može doći do nekog neželjenog događaja (Fabiano, Currò, Palazzi & Pastorino, 2002; Mannan, S., 2013).

Kao rezultat toga, procenu rizika se realizuje preko:

- verovatnoće dešavanja akcidenta;
- skupa ugroženih objekata koji zavise od osobina i sastava opasne materije, količinom opasne materije koja se prenosi u načinu transporta i karakteristikama životne sredine u kojoj se akcident dogodio.
- intenzitet delovanja opasne materije odnosno vrsta, priroda i obim preventivnih mera.

Iako postoji određena regulativa i preporuke pri analizi rizika kod transporta opasnih materija, nemože se reći da postoji jedinstvena metodologija i jednoznačan pristup.

3.4.1 Procena rizika i modelovanje razvoja akcidenta

Način procene rizika ima za cilj da identifikuje i kvantifikuje područja na kojima bi potencijalno mogao da se dogodi akcident. To je proces koji mora biti stručno i naučno utemeljen multidisciplinarnim pristupom. Dobro urađena procena opasnosti je preduslov za adekvatno planiranje, pripremu, prevenciju, reagovanje na akcident kao i otklanjanje štetnih posledica (Patel & Horowitz, 1994). U isto vreme, ova procena pruža dovoljno korisnih informacija i podataka za proces upravljanja rizikom pri transportu opasnih materija.

Proces procene rizika može se podeliti prema različitim kriterijumima u zavisnosti od stepena složenosti problema. Svaki od delova analize, sa svojim kvalitativnim karakteristikama, samostalno čini skup aktivnosti i postupaka koji se preduzimaju za što bolju realizaciju i služi kao osnova za dalje usavršavanje saznanja (Erkut, Tjandra & Verter, 2007).

Ova faza ima za cilj da proceni obim mogućih posledica akcidenta kao i veličinu štete. Na osnovu prikupljenih podataka o opasnim materijama, potencijalnim tačkama udesa na putevima transporta, potrebno je simulirati mogući razvoj događaja, što uključuje razmatranje obima akcidenta i štetnih posledica po život i zdravlje ljudi i životnu sredinu (Chang, Wei, Tseng, & Kao, 1997; Huang, 1979).

3.4.2 Pregled literature za procenu i analizu rizika u transportu opasnih materija

Tokom poslednjih dvadeset godina, bilo je više radova kaja su se bavila pitanjem procene rizika za transport opasnih materija (Yang, Li, Zhou, Zhang, Huang & Bi, 2010). Ova istraživanja su se posebno fokusirale na bezbedan transport cevovodima (Citro & Gagliardi, 2012), železničkim prevozom (Liu, Saat & Barkan, 2013) i posebno drumskim transport (Fabiano, Currò, Palazzi & Pastorino, 2002; Geroliminis, Karlaftis & Skabardonis, 2009).

Istraživanje o drumskom transportu opasnih materija ide u tri pravca (Erkut & Ingolfsson, 2000). Prvi je vezan za metodologiju koja je usmerena na poboljšanje reagovanja u vanrednim situacijama na osnovu karakteristika puta, vremenskih uslova i obima saobraćaja i drugih faktora (Fabiano, Currò, Reverberi & Pastorino, 2005). Drugi je zasnovan na analizi rizika od nezgoda koristeći istorijske podatke čiji je cilj otkrivanje karakteristika nezgoda kao što su učestalost pojave, posledice nezgode, i identifikacija uzročno-posledičnih faktora (Fabiano, Currò, Palazzi & Pastorino, 2002). Takođe, postoji i model procene rizika s više parametara za prevoz opasnih materija zasnovan na analizi podataka za optimalne rute puta koja minimizira rizik od transporta opasnih materija (Puliafita, Guevara & Puliafita, 2003). Treći pravac se odnosi na donošenje odluka usmerenih na izbor

transportnih sredstava i rute (Guo & Verma, 2010; Fabiano, Currò, Palazzi & Pastorino, 2002).

Saobraćajne nesreće nastale kao posledica transporta opasnih materija, predstavljaju veliki rizik i opasnost po stanovništvo, životnu sredinu, biljni i životinjski svet. U vezi sa tim neophodno je sagledati sve informacije o posledicama koje generišu ove vrste saobraćajnih nesreća. Učestalost i uticaji mogu zavisiti od efekata nesreće i njenog trajanja (Adler, van Ommeren & Rietveld, 2013); kategorije i opasnosti robe i materija koja se prevozi (Amezaga, Ambituuni & Werner, 2015); vrste nezgoda, (primarna ili sekundarne nesreće) (Hong, Kaan & Kun, 2014); vrste puteva (autoput, magistralni, gradski put itd.); tipologija deonice puta, (na primer ravan, zakrivljen, tunel, most itd) (Kinaterder at all., 2015). Rizik povezan sa prevozom opasnih materija odnosi se ne samo sa opasnom materijom već i sa karakteristikama kao što su putna mreža i vremenski uslovi (Erkut, Tjandra & Verter, 2007).

Rizik kod transporta opasnih materija bitno se razlikuje se od uobičajenog rizika od saobraćajnih nezgoda zbog mogućnosti prouzrokovanja ozbiljnih posledica po zdravlje stanovništva kao i životne sredine (Ilijazi, Vulović, Lamovec & Jaćimovski, 2019).. Glavni faktor koji razlikuje problematiku transporta opasnih materija od ostalih transportnih problema čini rizik.

Rizik kod transporta opasnih materija se može izračunati kao:

$$R_l = S_l \cdot P_l \cdot N_l \quad (3.4.1)$$

Gde su:

R_l = ukupan rizik kod transporta opasnih materija na delu puta l ,

S_l = ukupan broj učesnika u saobraćaju na delu puta l ,

P_l = verovatnoća nezgode jednog učesnika u transportu opasnih materija na delu puta l , i

N_l = ukupan broj osoba koje će biti pogođene nezgodom pri transportu opasnih materija na delu puta l .

Rizik kod transporta opasnih materija se može definisati (Alp, 1995) kao verovatnoća prouzrokovanja teških posledica po stanovništvo, biljni i životinjski svet kao i životnu sredinu u blizini mesta nesreće (Erkut, Tjandra & Verter, 2007).

Kako bi analizirali opasnost, kod nesreća pri njihovom transportu, usled izlivanja opasnih materija koje se prenose vazduhom, mnogi autori su koristili Gaussov model distribucije

aero zagađenja (Hanna, Chang & Strimaitis, 1993; Zannetti, 2013; Zhang, Hodgson & Erkut, 2000).

Takođe, u literaturi (Erkut, Tjandra & Verter, 2007) se navodi da pomenute pretpostavke mogu učiniti model nepraktičnim, što bi rezultiralo netačnim rezultatima. Na primer, ako se nesreća prilikom koje je došlo do ispuštanja opasnih materija dogodila u geografski brdovitom području sa različitim strujanjima vetrova, realne vrednosti zagađenja i opasnosti će se razlikovati u odnosu na model. Međutim i pored isvesnih neslaganja rezultata, model daje dobru osnovu za analizu i predikciju obima nesreće kao i planiranje aktivnosti u njenoj sanaciji i eventualnoj evakuaciji.

Koristeći model zasnovan na bazi Geografskog informacionog sistema (GIS-a), postoji mogućnost planiranja hitne evakuacije na osnovu procene na područjima izloženosti štetnog uticaja opasnih materija (Kara, Erkut & Verter, 2004). Za upravljanje vanrednim situacijama u prevozu opasnih materija u urbanim gradskim sredinama, posebno se obraća pažnja na simulaciju i vizuelizaciju određenih scenarija na GIS softveru korišćenjem modela Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA i MARPLOT) za procenu opasnosti pogođenog područja po stanovništvo (Milazzo, Ancione, Vianello & Maschio, 2009).

U studiji (Zhang et al., 2000) procena rizika pri transportu opasnih materija koristi Gaussian model i software ArcGIS. U drugoj studiji (Margai & Florence, 2001), za identifikaciju zona opasnosti nastale kao posledica nesreća pri transportu opasnih hemijskih materija koristi se ALOHA.

U radu Čitumala (Chitumalla & Kumar, 2008) takođe koristi ALOHA softver za modelovanje uzimajući u obzir pored opasne materije i dinamički aspekt vremenskih prilika, (temperatura, oblačnost, brzina i smer vetra). Jakala i saradnici, (Jakala & Stephen, 2007). opisuju modelovanje procene rizika za upravljanje hitnim i vanrednim situacijama, koristeći posebne izveštaje koji se generišu i vizuelno predstavljaju na mapama područja čime se dobija funkcionalnost analize zahvaćenog područja kako za stanovništvo tako i za materijalne resurse koji se nalaze u potencijalnoj opasnosti.

3.5 Prikaz softverskih rešenja za upravljanje akcidentima

Danas u svetu postoji veliki broj matematičkih modela i softverskih rešenja koji su deo projekata i sistema unutar pojedinih država i upotrebljavaju se kao pomoć u svim fazama upravljanja rizikom i svim vrstama vanrednih situacija (Kumar, 2008).

Postojeći softverski paketi za modelovanje gasnog zagađenja daju samo delimično rešenje problema disperzije (Holmes & Morawska, 2006). Veliki procenat ovih modela ne radi u realnom vremenu, sa istovremenom akvizicijom i obradom snimljenih podataka, već samo vrši analizu prikupljenih podataka i prikaz koncentracije hazarda u dve dimenzije (Kara, Erkut & Verter, 2004). Zone različitih koncentracija opasnih materija su statične i ne uzimaju u obzir dinamiku procesa, primarnu promenu atmosferskih uslova i promenu jačine izvora zagađenja (Bacon, 2000).

Disperzioni modeli vazdušnog zagađenja koji su najzastupljeniji su:

- ADMS 3: Developed in the United Kingdom (www.cerc.co.uk)
- AERMOD: Developed in the United States
(www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm)
- AUSPLUME: Developed in Australia, (<http://www.epa.vic.gov.au/air/epa>)
- CAMEO-DEGADIS-ALOHA: Developed in United States,
(<https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>)
- CALPUFF: Developed in the United States (www.src.com/calpuff/calpuff1.htm)
- DISPERSION2: Developed in Sweden, (www.smhi.se/foretag/m/dispersion_eng.htm)
- ISC3: Developed in the United States, (www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm)
- MERCURE: Developed in France, (www.edf.com)
- RIMPUFF: Developed in Denmark, (<http://www.risoe.dtu.dk>)

Modeli disperzije opasnih gasova igraju značajnu ulogu u nauci zbog svoje sposobnosti da procene uticaj i štetnost određenih procesa. Ovi modeli predstavljaju jedini metod koji kvantifikuje deterministički odnos između emisije i koncentracije hazardnog gasa (Kumar & Goyal, 2012). Oni mogu proceniti posledice posmatranih scenarija kao i efikasnost primenjenih strategija za smanjenje zagađenja (Tomaszewski, 2003).

3.5.1 Program CAMEO-ALOHA

CAMEO (Computer aided Management of Emergency Operations) je softverski proizvod nastao u kooperaciji dve američke organizacije - Agencije za zaštitu životne sredine - Kancelarija za prevenciju i pripravnost u vanrednim situacijama (*U.S. Enviromental Protection Agency - Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office EPAOEPPR*)

sa sedištem u Vašingtonu, i Uprava za atmosferski i okeanski monitoring (*Natonal Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA*), sa sedištem u Sijetlu.

CAMEO obuhvata niz softverskih aplikacija sa osnovnom funkcijom povećanja operativnosti u planiranju i odgovoru na akcidentne situacije (Hunt, 2005). Program čini set baza podataka sa dva prateća modula - model za disperziju toksičnih gasova ALLOHA i program za elektronsku kartografsku podršku MARPLOT. Svi programi su podržani od strane operativnog sistema Microsoft Windows. CAMEO-ALOHA se može upotrebiti u dva slučaja:

- Brzi pristup sačuvanim (istorijskim) podacima, njihova upotreba za procenu konkretne akcidentne situacije i prenošenje kreiranih informacija nadležnim organima, a koje su neophodne za adekvatan odgovor na akcidentni događaj. Upotreba programa znatno olakšava hitnu reakciju svim subjektima odgovora na akcident, jer obezbeđuje sve neophodne, precizne i tačne, informacije o akcidentnoj situaciji i znatno povećava stepen bezbednosti u reakciji odgovora. Time je amortizovan najčešći problem koji prati ovu fazu upravljanja akcidentima - nedostatak preciznih i sigurnih informacija o vrsti opasnosti i efektima nastalog akcidenta.
- Razvoj svih aktivnosti za kvalitetnije i potpunije planiranje u procesu upravljanja rizikom od akcidentnih događaja, posebno u fazama prevencije i pripravnosti je druga mogućnost koju pruža CAMEO.

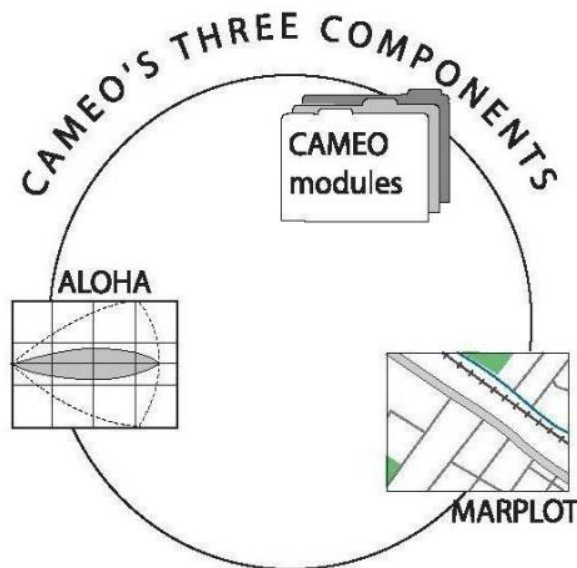
Primarni korisnici programa CAMEO su nacionalne organizacije, ustanove i službe nadležne za monitoring i upravljanje akcidentnim situacijama, vatrogasne službe, policija, hitne službe i ostali elementi koji mogu biti zahvaćeni¹². Van SAD program je u upotrebi u mnogim evropskim zemljama i preveden je na španski i francuski jezik. CAMEO je odabran od strane Ujedinjenih nacija, Programa za zaštitu životne sredine, kao podrška razvoju nacionalnih programa za pripremu i odgovor na hemijske akcidente i deo je UNEP programa za pripravnost za hitne akcije na lokalnom nivou APELL¹³ (Awareness and Preparedness for Emergencies at the Local Level).

3.5.1.1 Komponente programa

CAMEO čine tri integrativne kompatibilne komponente šematski prikazane na slici 19.

¹² U SAD program koriste organizacije State Emergency Responce Commissions (SERCs), Tribal Emergency Responce Commission (TERCs) and Local Emergency Planning Committees (LEPCs)

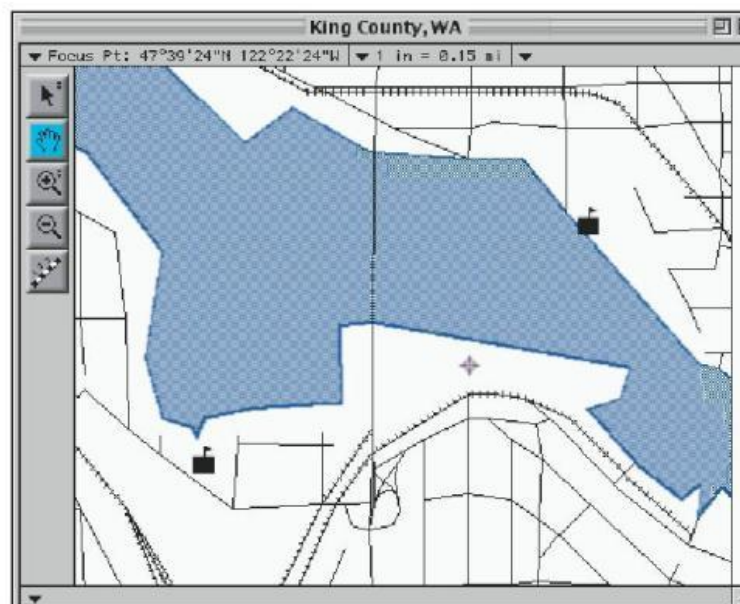
¹³ Awareness and Preparedness for Emergencies at the Local Level



Slika 19. Bazne komponente programa CAMEO

Izvor: <http://response.restoration.noaa.gov/cameo>

MARPLOT (Mapping Applications for Response, Planning and Operational Tasks) je program namenjen za kartografsku podršku osnovnog CAMEO softvera. Predstavljen je u formi elektronskih mapi sa prikazom svih geografskih elemenata koji su bitni u procesu planiranja i reagovanja na eventualne akcidente (komunikacije i rute za transport opasnih materija, lokacije postrojenja, organa i subjekata odgovora na akcident i drugo (slika 20)).



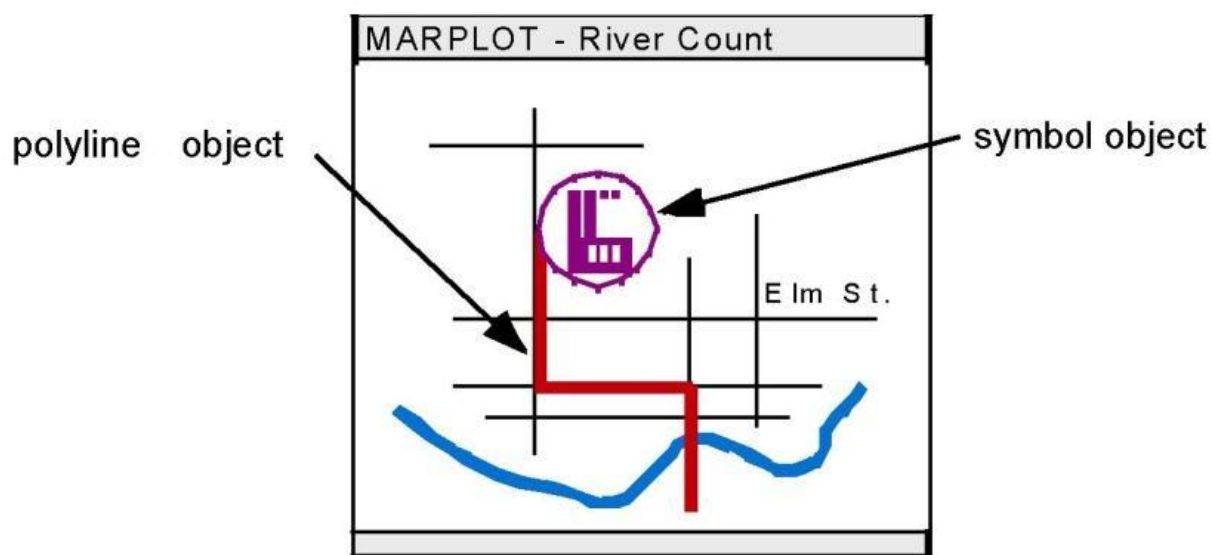
Slika 20. Prikaz mape grada u elektronskoj formi MARPLOT programa

Izvor: <http://response.restoration.noaa.gov/cameo>

U isto vreme omogućen je šematski prikaz na mapi u elektronskom obliku verovatnih zona opasnosti koje mogu biti stvorene akcidentom usled nekontrolisanog oslobađanja opasne materije, a zatim i procena trenutnog i naknadnog uticaja potencijalne ili već nastale opasnosti.

Sadržaji iz drugih modula kompatibilni sa ovim programom predstavljani su na elektronskoj mapi na dva osnovna načina (slika 21):

- grafičke simbole (*symbol objects*) - markiranje lokacija postrojenja (fabrike, skladišta opasnih materija), specijalnih lokacija (škole, bolnice), organizacija i ekipa za odgovor na akcident (vatrogasne stanice, policijske stanice, objekti hitne pomoći)
- grafičke linije (*polyline objects*) - prikazivanje ruta (puteva, pruga, plovnih rečnih tokova ili kombinacije istih) koje se koriste za transport opasnih materija.



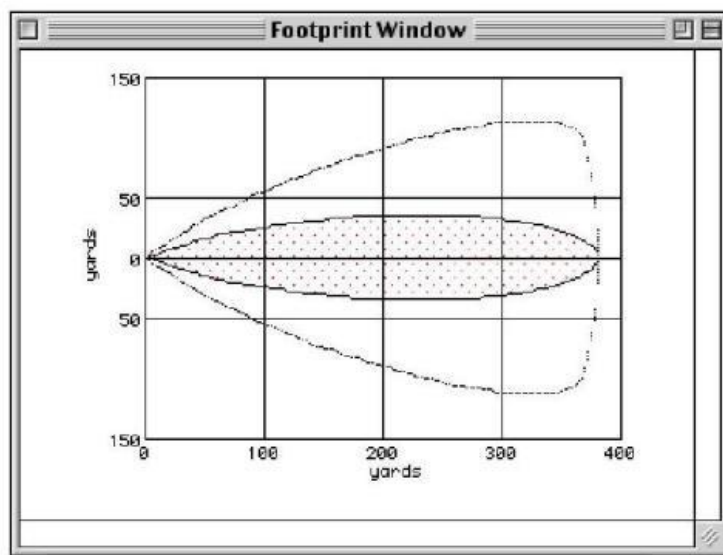
Slika 21. Grafičko predstavljanje elemenata u formi simbola i linija

Izvor: <http://response.restoration.noaa.gov/cameo>

ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) je model za prikaz disperzije (širenja) gasova. Koristi se za procenu širenja (disperzije) kontaminacionog oblaka u pravcu duvanja vetra. Procena se zasniva na fizičko-hemijskim osobinama materija koje su uzrok akcidenta, meteorološkim uslovima u trenutku akcidenta, i okolnostima pod kojima je došlo do nekontrolisane emisije ili oslobađanja (Jaćimovski, Miladinović, Stojičić & Ilijazi, 2015).

Prikaz širenja oblaka na displeju u formi tzv "footprint" (slika 22) može se elektronski kopirati na mapu MARPLOT programa. Na istoj mapi mogu se prikazati i svi stali elementi bitni za proces planiranja ili odgovora preuzeti iz odgovarajućih CAMEO modula.

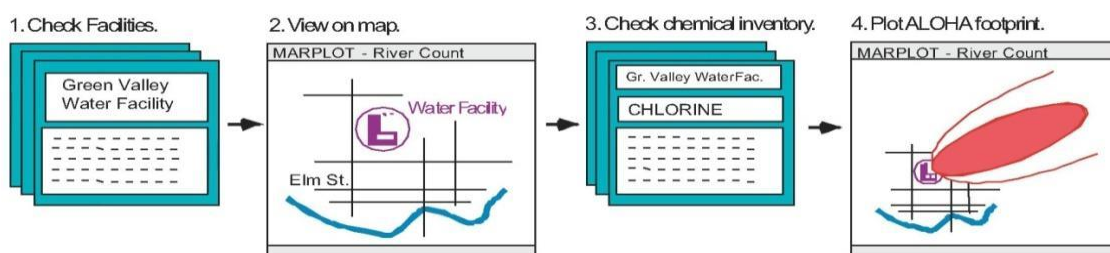
Koncepcijski je ostvarena kompatibilna funkcija obe forme CAMEO softvera: modula ili baze podataka i programa ALOHA i MARPLOT, što je presudno pri donošenju hitnih odluka i predstavlja važnu prednost programskog paketa u celini (Jaćimovski, Stojičić, Miladinović, Radovanović & Ilijazi, 2014),.



Slika 22. Prikaz ALOHA disperzionog modela u formi „footprint“

Izvor: <http://response.restoration.noaa.gov/cameo>

U praksi se mogu koristiti samo pojedini delovi, ili pak ceo CAMEO program u celini, što zavisi od praktične potrebe ili zahteva korisnika. Na slici 23. prikazana je kombinacija nekoliko sekvenci u korišćenju programa.



Slika 23. Prikaz korišćenja nekih delova programa: 1 - pretraživanje hemijskih postrojenja, 2 - prikaz traženog postrojenja na elektronskoj karti, 3 - prikaz karakteristika tražene opasne materije, 4 - šema potencijalno zahvaćene zone za traženu materiju na elektronskoj karti

Izvor: <http://response.restoration.noaa.gov/cameo>

Pretpostavka je da korisnik želi da u okviru lokalne zajednice registruje sva postrojenja koja se bave proizvodnjom opasnih materija ili ih koriste u procesu proizvodnje (1), prikaz svih lokacija na karti (2), karakteristike određene materije unutar postrojenja (3) i procenu

zahvaćene ili potencijalno kontaminirane zone u slučaju oslobađanja određene količine opasne materije (4).

CAMEO moduli predstavljaju set uskladištenih memorijskih podataka u programskoj bazi u vidu korisničkih informacija neophodnih za proces planiranja i reagovanja na accidente. Podaci se odnose na osnovne podatke o svim vrstama i količinama opasnih materija, ali i informacije opasnostima koje one mogu izazvati (od požara ili eksplozija, opasnostima po zdravlje, načinima gašenja raznih vrsta požara i sl.), kao i postupcima sanacije i dekontaminacije i preporukama za upotrebu zaštitne opreme.

Mogu se koristiti i drugi moduli radi preuzimanja podataka o svim postrojenjima koja proizvode ili koriste u procesu proizvodnje opasne materije, svim lokacijama i količinama uskladištenih hemikalija, kontaktima i adresama nadležnih organa za reagovanja ili ustanova koje se hitno moraju izveštavati radi evakuacije ili hitne reakcije tipa (škole ili bolnice) (Ilijazi, Vulović, Lamovec & Jaćimovski, 2019).

Hemijska biblioteka¹⁴ sadrži zapise za više od 6.000 opasnih materija. Svaki zapis daje osnovne podatke o materiji ili supstanci, uključujući njen tačan hemijski naziv, trivijalni naziv ili druge sinonime, identifikacioni broj i kontrolne informacije.

Za hitna planiranja i odgovore na vanredne situacije, najvažniji deo informacija odnosi se na sekciju Opšteg opisa hemikalije¹⁵, koja sadrži opšti opis hemikalije, njene fizičko-hemijske osobine, opasnosti za izazivanje požara ili opasnost po zdravlje, način neutralizacije, uputstvo za postupanje u fazi dekontaminacije, način pružanja prve pomoći i korišćenje adekvatne zaštitne opreme.

Postrojenja (eng. *Facilities*) je datoteka za smeštaj informacija o postrojenjima opasne materije skladište ili proizvode, uključujući adresu, hitan kontakt telefon i pregled svih odgovornih osoba. Svako postrojenje iz popisa može se vezati za elektronsku mapu što omogućava brzi prikaz lokacije na monitoru.

Popis hemikalija (eng. *Chemicals in Inventory*) je modul koji sadrži popis svih uskladištenih opasnih materija, uključujući opis agregatnog stanja, lokacije i uslova skladištenja i količine koja se čuva.

Kontakti (eng. *Contacts*) predstavlja datoteku važnih kontakt telefona sa adresama određenih lica, organa ili službi koji mogu imati veze sa organizacijom reagovanja na accidente, kao

¹⁴ Chemical Library

¹⁵ Response Information Data Sheets (RIDS)

što su stručnjaci za hemiju, državne agencije i organizacije, odgovorna lica u preduzećima-hemijskim postrojenjima, organi i subjekti odgovora na akcident ili druga lica koja mogu pružiti pomoć u vanrednoj situaciji.

Simulacija i prikaz (eng. *Screening & Scenarios*) je modul namenjen izradi analize opasnosti kroz procenu širenja negativnih efekata oslobođene opasne materije u atmosferi, izazvanog njenim nekontrolisanim oslobađanjem u toku akcidenta, na postrojenju ili u transportu. Zona koja može biti zahvaćena označava se kao potencijalna zona opasnosti (eng. *threat zone*) može biti „nalepljena“ na elektronsku mapu MARPLOT programa.

Rute (eng. *Routes*) je modul namenjen za sastavljanje informacija o maršutama ili komunikacijama kojima se vrši transport opasnih materija. Takođe služi za prikaz informacija o pojedinačnim transportima duž zadatih ruta, a u kompilaciji sa MARPLOT korisnik ima mogućnost prikaza kompletne rutabilne mreže za transport opasnog tereta u određenoj oblasti u elektronskom obliku, na mapi.

Incidenti (eng. *Incidents*) modul servira informacije o dosadašnjim akcidentima sa opasnim materijama, unutar postrojenja ili u toku transporta. Svaki od konkretnih slučajeva može biti prikazan i u elektronskom obliku, na mapi.

Izvori (eng. *Resources*) modul daje prikaz informacija o izvorima, poput snabdevača, stručnjaka ili preduzimača koji mogu biti od koristi tokom planiranja aktivnosti ili samog odgovora na akcident. I ovde je omogućeno povezivanje sa MARPLOT programom.

Specijalne lokacije (eng. *Special Locations*) je modul koji sadrži popis svih objekata koji zahtevaju specijalnu zaštitu i pažnju tokom hitnih aktivnosti reakcije na akcident, najčešće iz razloga što hitnije evakuacije (škole, bolnice, domovi zdravlja i sl.).

3.5.2 Program CERES

CERES¹⁶ (Chemical Emergency Response E-Service) je programski paket za podršku u odlučivanju u hitnim slučajevima za rano reagovanje pri vanrednim situacijama kod hemijskih nezgoda i akcidenata. CERES se može koristiti pre, tokom i nakon hemijskog incidenta. Program kao osnov za modelovanje koristi EPA CAMEO – ALOHA¹⁷ model koji su zajednički razvili Američka agencija za zaštitu životne sredine (US-EPA) (Ramasamy,

¹⁶ <https://ceres.vlahi.com/response.html>

¹⁷ <http://www.epa.gov/>

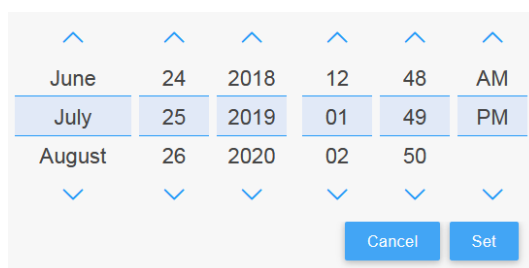
Abbasi, Khan, & Abbasi, 2013). Kancelarija za sprečavanje i prevenciju hemijskih opasnosti (CEPPO) i Kancelarija za odgovor i obnavljanje Nacionalne uprave za okeane i atmosferu (NOAA) američke vlade. Aplikacija radi na svim informacionim platformama omogućavajući korisnicima da koriste sve alate i funkcionalnosti za brzi odgovor na terenu, kancelariji ili van nje, bilo kada, bilo gde i na bilo kom uređaju. Aplikacija nudi opciju vizuelnog prikaza koji je integrisan sa interfejsom Google Map, sa svim standardnim mogućnostima GIS modela (LU Yong-long, 2000). Analiza scenarija se vrši na višim nivoima rizika sa planiranjem i prognozom reagovanja u vanrednim situacijama, korišćenjem baze podataka hemijskih jedinjenja potencijalnih izazivača hemijskog akcidenta, sa meteorološkim podacima u realnom vremenu odnosno podataka koji su bili aktuelni u trenutku analize ranijih vanrednih situacija.

Vizuelnim i zvučnim alarmima, automatski se generiše, prati, analizira i procenjuje uticaj različitih parametara, sa unapred definisanim scenarijima, a u cilju brzog odgovora pri vanrednim situacijama usled hemijskih nezgoda i akcidenata. Aplikacija nudi mogućnost arhiviranja i analize istorijskih podataka (Ilijazi & Miladinović, 2020).

Zone opasnosti se mogu integrisati na Google Earth mapama kroz istoriju scenarija za upravljanje trenutnim-realnim i prošlim akcidentima (Mannan, 2013). Pristup meteorološkim podacima odvija se u realnom vremenu uz izbor podataka sa najbližih javnih meteoroloških stanica ili lokalnih fiksnih ili prenosnih meteo stanica. Sama procena rizika i ugroženosti može se vršiti kroz razmenu podataka sa višekorisničkih nivoa istovremeno radi lakšeg deljenja scenarija i timske saradnje.

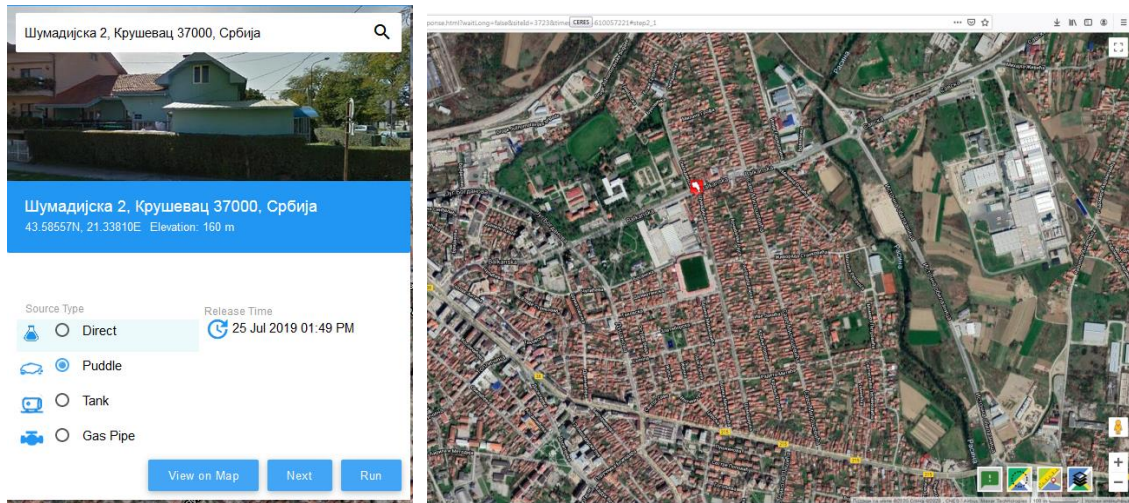
Napredno izveštavanje podrazumeva kreiranje naprednih korisničkih izveštaja sa projekcijama mapa različitih rizičnih zona, zahvaćene područjem opasnosti pri proceni toksičnih uticaja u vanrednim situacijama kod hemijskih nezgoda i akcidenata.

Na slikama 24, 25, 26 i 27 predstavljena su osnovna podešavanja u programu CERES vezano za datum i vreme akcidenta, lokacija, meteorološki podaci i hemijska materija koja se prevozi.

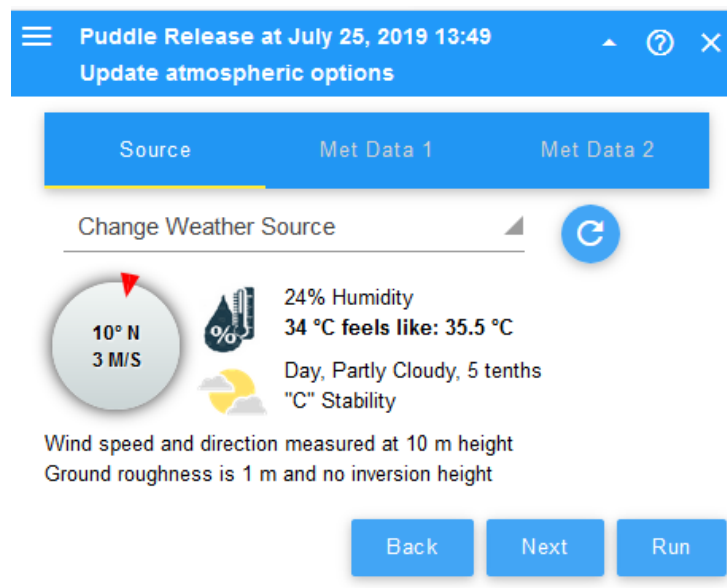
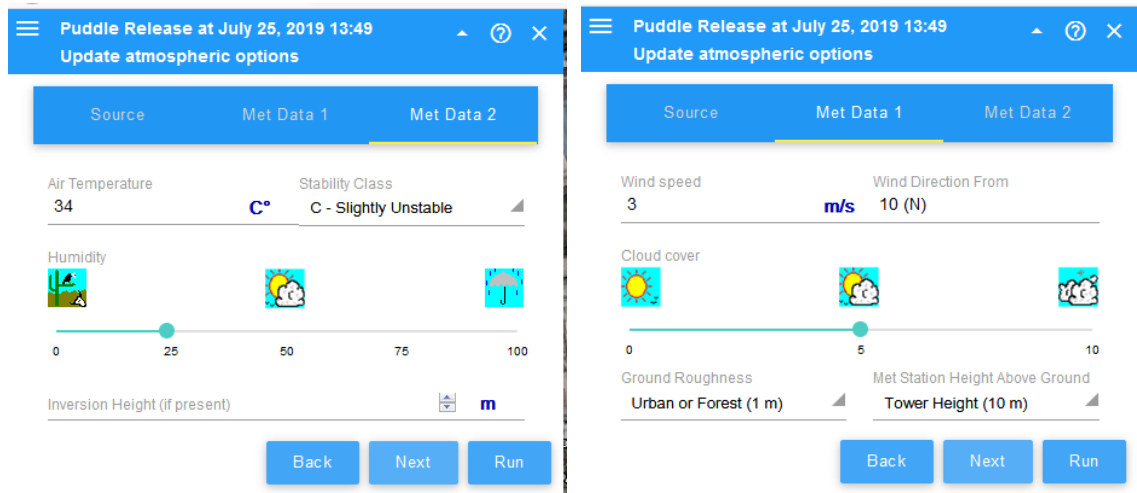


June	24	2018	12	48	AM
July	25	2019	01	49	PM
August	26	2020	02	50	

Slika 24. Podešavanje datuma i vremena akcidenta,



Slika 25. Izbor lokacije i tipa izvora i prikaz na mapi



Slika 26. Podešavanje meteoroloških parametara a) temperatura, vlažnost vazduha i klasa stabilnosti atmosfere, b) brzina vetra i oblačnost, c) zbirni prikaz meteoroloških podataka

Slika 27. Izbor hemijskog jedinjenja koje se transportuje

3.6 Studija slučaja

Dana dana 25.07.2019. godine u 13:49 (i 17.01.2019. godine u 13:34), u Kruševcu u urbanom delu grada u ulici Šumadijska 2., na krivini na tranzitnom putu (koordinate 43°35`08``N/21°20`17``E, nadmorska visina 160m), se prevrnula cisterna koja je prevozila 18,6 tona metil merkamptana. Izmerena trenutna temperatura vazduha je iznosila +34°C (-5°C), vlažnost vazduha je iznosila 25% (75%), oblačnost je iznosila 5/10 (7/10), duvao je severni vetar (severozapadni vetar) brzinom od 3m/s (7m/s). Prilikom prevrtanja, na telu cisterne, na 30cm od tla, se pojavio otvor širine 2cm, a dužine 40cm.

Metil-merkaptan (Metan-etiol) je hemijsko jedinjenje čija je formula CH_4S (tabela 7). To je organsko jedinjenje piramidalnog oblika u gasovitom stanju bez boje. Jako je štetan i otrovan i izuzetno zapaljiv.

Tabela 7. Osobine metil-merkaptana

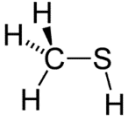





Methyl mercaptan	
	
Identifikacioni brojevi	
CAS broj	74-93-1
Osobine	
Molekularna formula	CH ₄ S
Molarna masa	48.107 g/mol
Prirodni oblik	Bezbojan gas
Gustina	0.9 g/ mL, (tečnost na 0°C)
Tačka topljenja	-123 °C (-189 °F; 150 K)
Tačka ključanja	5.95 °C (42.71 °F; 279.10 K)
Rastvorljivost	Nije rastvorljiv
Struktura	
Molekularni oblik	Trostrani piramidalni
Opasnosti	
EU klasifikacija	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>F+</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>T</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>N</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Štetan i otrovan (T) Izuzetno zapaljiv (F+) Opasan po okolinu (N)</p>
NFPA 704 oznaka	
Eksplozivnost	Zapaljiv gas

Tabela 8. Izveštaj za scenarija za lokaciju pogodenom akcidentom sa zonama ugroženosti; levo-za letnje uslove i desno za zimske uslove

Toxic Threat Zone

Time: July 25, 2019 13:49

Location: Шумадијска 2, Крушевац 37000, Србија(43.58557N, 21.33810E)

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

Wind: 3 m/s from 10.0° true at 10 m

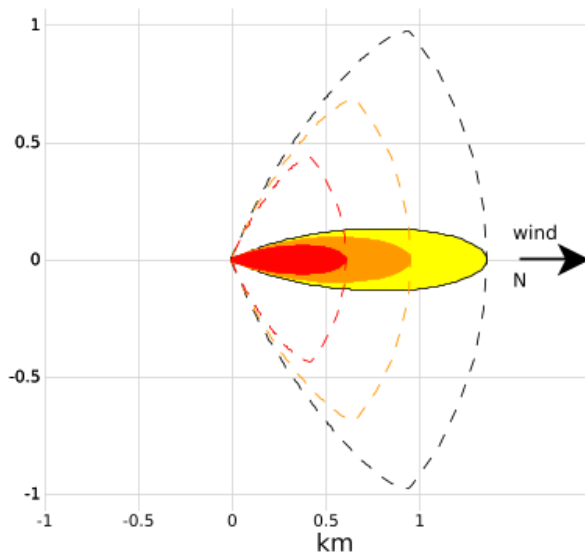
THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

Red: 605 m --- ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])

Orange: 950 m --- ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60 min])

Yellow: 1.4 km --- ≥10 ppm



Threat Zone

Concentration	Distance
 ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])	605 m
 ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60 min])	950 m
 ≥10 ppm	1.4 km

■■■■■ wind direction confidence lines

Note: ALOHA limited the duration to 1 hour

Map Image

Toxic Threat Zone

Time: January 17, 2019 13:34

Location: Шумадијска 2, Крушевац 37000, Србија(43.58557N, 21.33810E)

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

Wind: 7 m/s from 63.0° true at 10 m

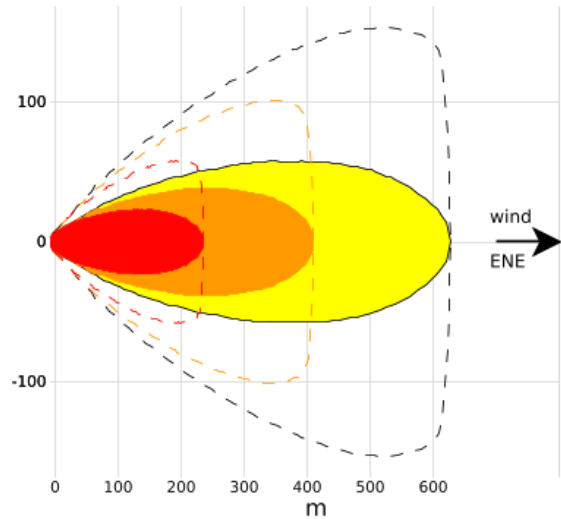
THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

Red: 236 m --- ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])

Orange: 410 m --- ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60 min])

Yellow: 627 m --- ≥10 ppm



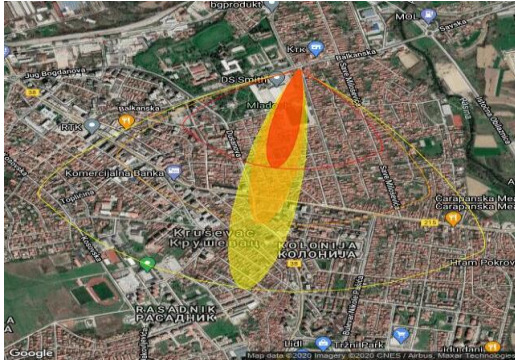
Threat Zone

Concentration	Distance
 ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])	236 m
 ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60min])	410 m
 ≥10 ppm	627 m

■■■■■ wind direction confidence lines

Note: ALOHA limited the duration to 1 hour

Map Image



Source Strength (Release Rate)

Time: July 25, 2019 13:49

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle: (Note - chemical is flammable)

Puddle Area: 148 m²

Puddle Volume: 48.6 m³

Ground Type: Concrete

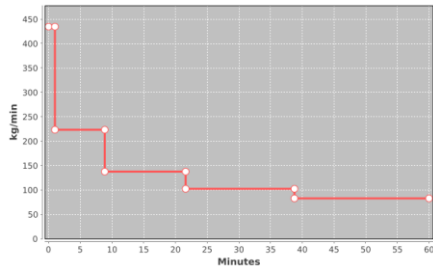
Ground Temperature: 44° C

Initial Puddle Temperature: 5.5° C

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate
(averaged over a minute or more): 435 kg/min

Total Amount Released: 7,449 kg



Impacted Places

Impact	Type	Name	Distance	Address
Low	Health care	Ceragem Jade Bed	0.94 km	Поручника Божидара 6, Крушевац, Србија
Low	Education	Владо	1.08 km	Драгомира Гајића 22, Крушевац 37000, Србија
Low	Education	Škola norveško g jezika	1.13 km	Хајдук Велкова 22, Крушевац, Србија
Low	Healthcare	Ambulanta za fiz.terapiju Salus Krusevac	1.26 km	Ђаконa Авакума, Крушевац, Србија



Source Strength (Release Rate)

Time: January 17, 2019 13:34

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle: (Note - chemical is flammable)

Puddle Area: 148 m²

Puddle Volume: 48.6 m³

Ground Type: Concrete

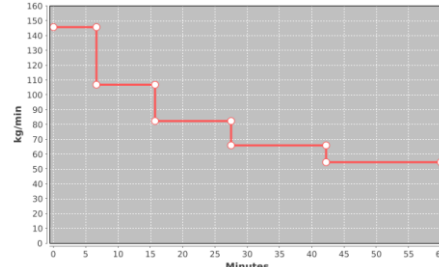
Ground Temperature: -8° C

Initial Puddle Temperature: -8° C

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate
(averaged over a minute or more): 146 kg/min

Total Amount Released: 4,846 kg



Impacted Places

Impact	Type	Name	Distance	Address
Low	Healthcare	Ozren Sokobanja	0.48 km	Душанова 3, Крушевац, Србија
Low	Education	Јован Поповић	0.58 km	Балканска 56, Крушевац, Србија

Threat at point: Ceragem Jade Bed

Address: 6, Поручника Божидара, Крушевац, Србија

Type: Healthcare

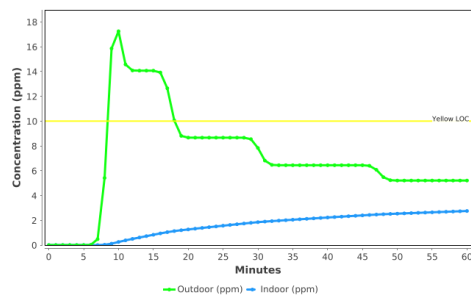
Location: 43.57740N, 21.33523E

Building Air Exchanges Per Hour: 1.5

Max Concentration:

Outdoor: 17.8 ppm

Indoor: 2.83 ppm



Threat at point: Ozren Sokobanja

Address: Душанова 3, Крушевац, Србија

Type: Healthcare

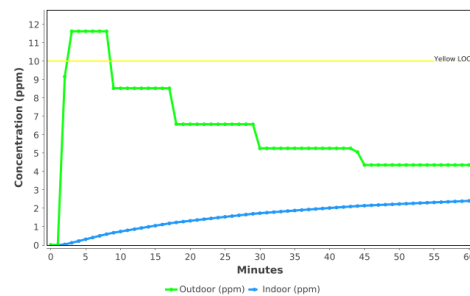
Location: 43.58322N, 21.33313E

Building Air Exchanges Per Hour: 1.5

Max Concentration:

Outdoor: 10.5 ppm

Indoor: 2.16 ppm



Threat at point: Владо

Address: Драгомира Гајића 22, Крушевац 37000, Србија

Type: Education

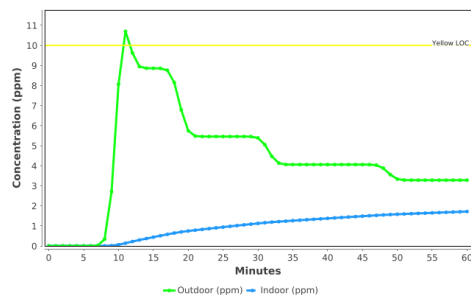
Location: 43.57592N, 21.33709E

Building Air Exchanges Per Hour: 1.5

Max Concentration:

Outdoor: 11 ppm

Indoor: 1.77 ppm



Threat at point: Јован Поповић

Address: Балканска 56, Крушевац, Србија

Type: Education

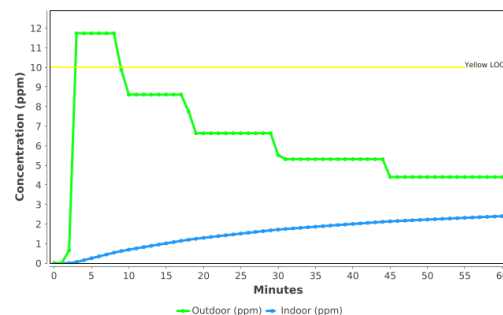
Location: 43.58342N, 21.33153E

Building Air Exchanges Per Hour: 1.5

Max Concentration:

Outdoor: 10.6 ppm

Indoor: 2.16 ppm



Text Summary

SITE DATA:

Location: Шумадијска 2, Крушевац 37000, Србија(43.58557N, 21.33810E)

Time: July 25, 2019 13:49

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

CAS Number: 74-93-1 Molecular Weight: 48.11 g/mol

AEGL-1 (60 min): N/A AEGL-2 (60 min): 23 ppm AEGL-3 (60 min): 68 ppm

IDLH: 150 ppm LEL: 39000 ppm UEL: 218000 ppm

Ambient Boiling Point: 5.5deg C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm

Text Summary

SITE DATA:

Location: Шумадијска 2, Крушевац 37000, Србија(43.58557N, 21.33810E)

Time: January 17, 2019 13:34

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHYL MERCAPTAN

CAS Number: 74-93-1 Molecular Weight: 48.11 g/mol

AEGL-1 (60 min): N/A AEGL-2 (60 min): 23 ppm AEGL-3 (60 min): 68 ppm

IDLH: 150 ppm LEL: 39000 ppm UEL: 218000 ppm

Ambient Boiling Point: 5.5deg C

Vapor Pressure at Ambient Temperature: 0.64 atm

Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 3 m/s from 10.0° true at 10 m

Ground Roughness: 1 m Cloud Cover: 5 tenths

Air Temperature: 34° C Stability Class: C

No Inversion Height

Relative Humidity: 24%

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle: (Note - chemical is flammable)

Puddle Area: 148 m²

Puddle Volume: 48.6 m³

Ground Type: Concrete

Ground Temperature: 44° C

Initial Puddle Temperature: 5.5° C

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate

(averaged over a minute or more): 435 kg/min

Total Amount Released: 7,449 kg

THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

Red: 605 m --- ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])

Orange: 950 m --- ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60 min])

Yellow: 1.4 km --- ≥10 ppm

Ambient Saturation Concentration: 652,344 ppm or 65.2%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 7 m/s from 63.0° true at 10 m

Ground Roughness: 1 m Cloud Cover: 7 tenths

Air Temperature: -5° C Stability Class: C

No Inversion Height

Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:

Evaporating Puddle: (Note - chemical is flammable)

Puddle Area: 148 m²

Puddle Volume: 48.6 m³

Ground Type: Concrete

Ground Temperature: -8° C

Initial Puddle Temperature: -8° C

Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour

Max Average Sustained Release Rate

(averaged over a minute or more): 146 kg/min

Total Amount Released: 4,846 kg

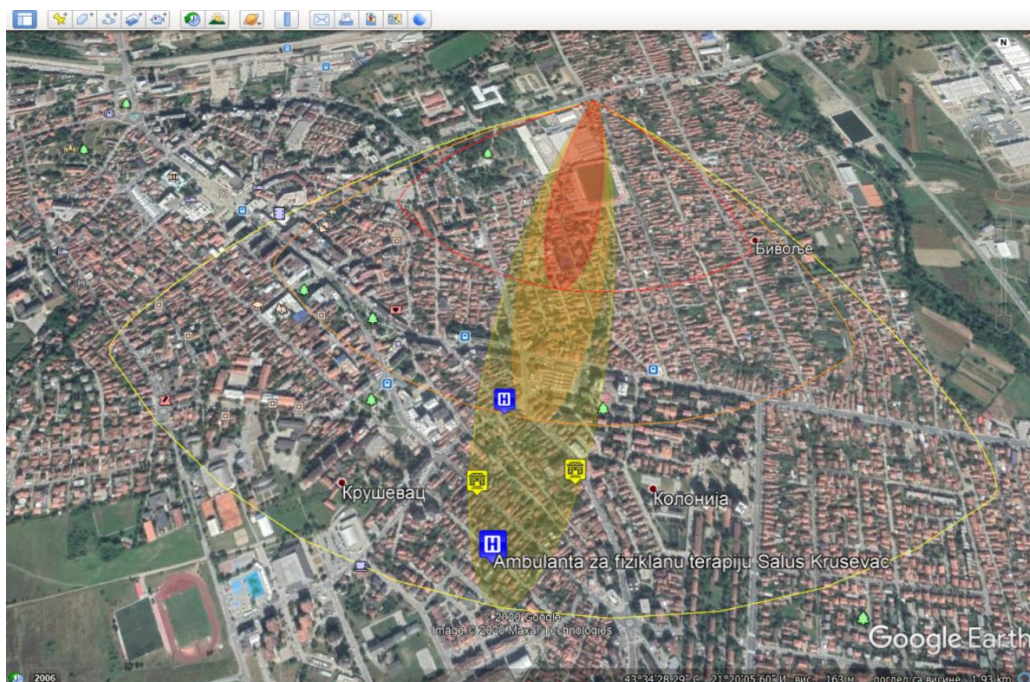
THREAT ZONE:

Model Run: Gaussian

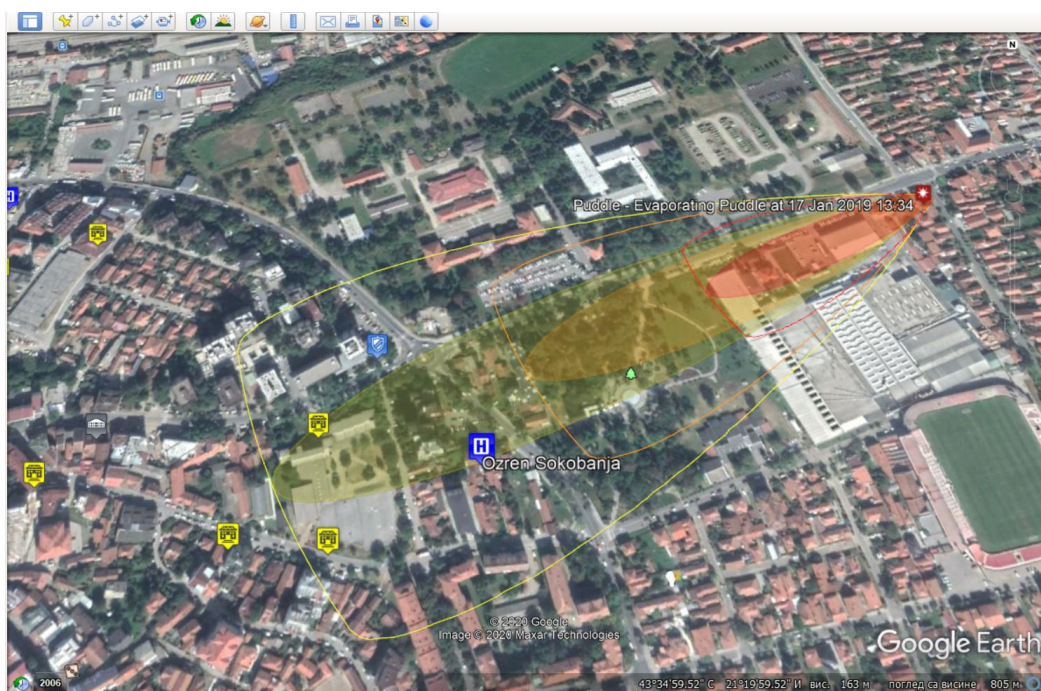
Red: 236 m --- ≥68 ppm (PAC-3 - AEGL-3 [60 min])

Orange: 410 m --- ≥23 ppm (PAC-2 - AEGL-2 [60 min])

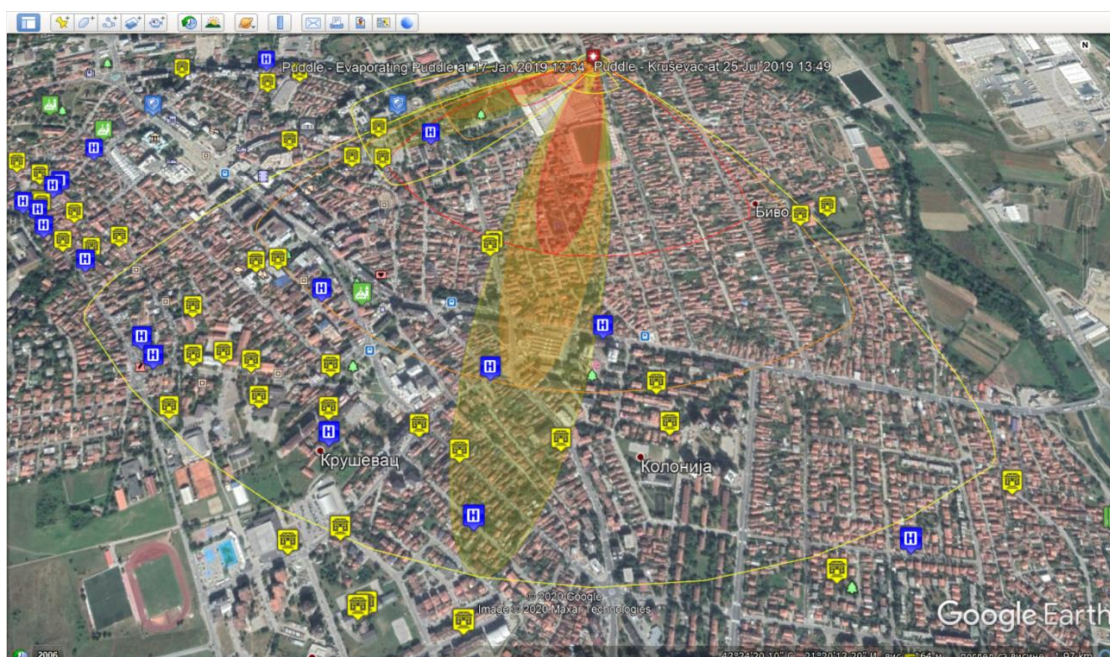
Yellow: 627 m --- ≥10 ppm



Slika 28. Prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na prvi-letnji scenario sa prikazanim objektima od posebnog značaja



Slika 29. Prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na drugi-zimski scenario sa prikazanim objektima od posebnog značaja



Slika 30. Zbirni prikaz dijagrama ugrožavanja na mapi terena u odnosu na oba scenarija sa prikazanim objektima od posebnog značaja

3.6.1 Rezultati i diskusija

Ukupna procenjena površina pod potencijalnim rizikom je oko 2km² (u prvom letnjem scenariju) odnosno 0,5km² (u drugom zimskom scenariju) (slika 28 i 29) a obzirom da se

radi o urbanoj naseljenoj oblasti procenjuje se da će stanovništvo koje je verovatno pod direktnim negativnim uticajem nesreće oko 10.000 ljudi. U prvom scenariju u letnjim uslovima u zoni ugroženosti nalaze se i dve zdravstvene ustanove i dve obrazovne na rastojanju do 1,4km od mesta akcidenta (crvena zona oko 600m, narandžasta oko 950m i žuta oko 1,4km)-zone ugroženosti u tabeli 15, U drugom scenariju u zimskim uslovima u zoni ugroženosti nalaze se po jedna zdravstvena i obrazovna ustanova na rastojanju od oko 0,6km (crvena zona oko 240m, narandžasta oko 410m i žuta oko 630m). U oba scenarija evidentna je maksimalna koncentracija zagađivača u prvih 15 minuta. U letnjem scenariju koncentracija za to vreme opadne na 1/3 vrednosti, sa 435 kg/min na 145 kg/min (posle 60 minuta koncentracija opada na 90kg/min) dok u zimskom scenariju koncentracija opada sa 146 kg/min na 110kg/min (posle 60 minuta koncentracija opada na 55kg/min)- vremenska zavisnost koncentracije zagađenja.

Rezultati nam govore da bi broj potencijalno ugroženih stanovnika u slučajevima opisanim u simulacijama bio jako veliki. Iz izračunatih parametara se vidi da bi najmanje 70% naseljene posmatrane teritorije bilo izloženo opasnoj dozi hemikalije. Takođe, u prvoj simulaciji se vidi toksični oblak stigao, gde bi bila registrovana povećana količina Metil-merkaptanom i bila bi potrebna evakuacija čak i do 60% stanovnika (slika 28). Iz druge simulacije se vidi da bi bila registrovana povećana količina Metil-merkaptanom i u okolnim mestima što bi izazvalo potrebu za evakuacijom čak i do 30% stanovnika (slika 29), Kada govorimo o Metil-merkaptanu, mora se reći da je on jedan izuzetno toksičan gas, može biti i smrtonosan, ako se ne počne sa monitoringom, evakuacijom i sanacijom na vreme.

Povećavanje rizika leti u odnosu na zimski period (slika 30), je zbog činjenice da je leti temperatura površinskih slojeva atmosfere u blizini zemljine površine gotovo jednaka temperaturi gornjih slojeva atmosfere, pa je atmosfera stabilnija nego zimi.

Glava 4

PROGRAMSKI SISTEMI ZA RANO REAGOVANJE

Upravljanje vanrednom situacijom zahteva pronalaženje optimalnih rešenja u smislu brzog i pravovremenog reagovanja. U tom smislu se, kao jedan od najvećih izazova, istražuje razvijanje mogućnosti i ostvarivanje preduslova da se u kratkom vremenskom periodu identifikuju i opišu najznačajnije karakteristike vanredne situacije. Svako odlaganje dobijanja početnih/ranih informacija, automatski bi dovelo do kašnjenja u procesu pružanja pomoći što bi prouzrokovalo i posledični rast štetnih posledica. Upravljanje rizikom pri ranom reagovanju kod vanredne situacije zasnovano je na blagovremenoj identifikaciji, analizi, praćenju i proceni resursa samog vanrednog događaja odnosno akcidenta (West & Valentini, 2013).

Kreiranje, distribucija i korišćenje relevantnih informacija kod vanrednih situacija u blagovremenom trenutku jeste ključan i istovremeno veoma zahtevan korak neophodan u funkciji ranog reagovanja za sprečavanje nastanka katastrofalnih posledica i adekvatnog odgovora pošto se određena opasnost već dogodila, ali i kod pružanja pomoći u procesu oporavka, sanacije i rehabilitacije.

Informaciono-telekomunikacione tehnologije (IKT), pre svega mobilni komunikacioni sistemi, geografski informacioni sistemi (GIS) i specifične programske aplikacije za (rano) reagovanje u vanrednim situacijama, mogu značajno poboljšati efikasnost sistema zaštite i spasavanja. U tom smislu, njihova primena igra značajnu ulogu u jačanju nivoa sposobnosti brzog donošenja odluka i reagovanja, čime se smanjuje mogućnost različitih grešaka sa fatalnim posledicama.

Uloga mobilnih uređaja i aplikacija je prepoznata kao esencijalna za sprovođenje svih faza u procesu upravljanja i ranog reagovanja u vanrednim situacijama (prevencije, pripreme, reagovanja i sanacije) i odnosi se na procese koji uključuju klasične funkcije planiranja, organizovanja, kontrole, reagovanja i rehabilitacije a u cilju sprečavanja i ublažavanja štetnih posledica (Carter, 2008).

Prednost upotrebe mobilnih uređaja i aplikacija u procesu upravljanja kod vanrednih situacija ogleda se u mogućnosti ranog reagovanja kod otkrivanja bilo koje vrste opasnosti uz racionalnu upotrebu ljudskih i materijalnih resursa. Pored toga, korišćenje mobilnih uređaja i aplikacija omogućava podršku za pravovremenu razmenu vitalnih podataka i informacija, kao i automatsko obaveštavanje ili upozoravanje o toku događaja svih zainteresovanih strana putem SMS poruka, obaveštenja, notifikacija, mejlova, i drugo.

Pored mobilnih tehnologija i geografski informacioni sistemi (GIS) su postali neizostavni deo sistema za upravljanje vanrednom situacijom. Vizuelizacija podataka koji imaju geografsku/prostornu komponentu, od mesta akcidenta do lokacije raspoloživih resursa predstavlja značajnu pomoć kod donošenja odluka (Milić & Milidragović, 2021). GIS omogućava bolje upravljanje informacijama, kvalitetniju analizu kao i mogućnost modelovanja različitih scenarija (Milic, Popovic & Ilijazi, 2017). Kod reagovanja na vanredne situacije posebno korisnim se pokazao GIS koji sadrži i omogućava vizuelizaciju 3D struktuiranih podataka (Yonglong, Guilian & Jia, 2000).

Može se zaključiti da upotreba IKT omogućava donosiocima odluka da vrlo brzo, racionalno i na bazi svih relevantnih informacija izaberu odgovarajuće i najefikasnije rešenje u pogledu adekvatnog odgovora i brzog oporavka od posledica vanrednih situacija (Carter, 2008).

4.1 Mobilne aplikacije za rano reagovanje

Mobilni uređaji su izuzetno pogodni za komunikaciju i upravljanje u vanrednim situacijama. Tačna i pravovremena informacija koja se može dobiti i pružiti putem mobilnih uređaja korisna je u svim fazama upravljanja vanredne situacije, naročito u fazi pripreme odnosno upozorenja o nadolazećoj opasnosti i prvobitnom odgovoru. U situacijama kada je teško uočiti kada će se opasnost razviti i kada ne postoji nikakvo upozorenje, posledice vanredne situacije mogu biti jako tragične i materijalno obimne. Upravo u ovim okolnostima, primena mobilnih uređaja i aplikacija, na lokacijama koje su neposredno ugrožene ili pogođene vanrednom situacijom, je veoma značajna i nemerljiva (Sweta, 2014).

Radnje i postupci preduzeti u početnoj fazi vanredne situacije su kritični i veoma važni u procesu ranog reagovanja kako bi se spasili životi i eventualne žrtve i smanjile štetne posledice. Potpune i tačne informacije pomoći će donosiocima odluka u komandno-operativnom centru da adekvatno reaguju u vanrednoj situaciji kroz pravovremeno i brzo angažovanje nadležnih službi. Reagovanje u ovakvim situacijama podrazumeva organizovanje, koordiniranje i usmeravanje raspoloživih resursa kako bi se odgovorilo na

događaj i situacija stavila pod kontrolu. Kod integrisanog upravljanja vanrednim situacijama mobilni sistemi i aplikacije se koriste za pružanje pomoći i podrške pre svega pripadnicima jedinica za spasavanje ali i svim drugim ugroženim građanima (Cvetković, Roder, Öcal, Tarolli, & Dragičević, 2018).

Trenutno postoje niz mobilnih aplikacija na pametnim uređajima (telefonima, tabletima, prenosnim računarima i drugo) koje su korisne u odgovoru na akcidente (Therese, Fajardo & Oppus, 2009). Primarna funkcija ovih aplikacija je upotreba GPS tehnologije koja se koristi za lociranje i praćenje vanredne situacije i prikupljanje podataka. Podaci se zatim obrađuju u posebnim centrima radi dobijanja relevantnih informacija koje se mogu koristiti za planiranje, procene i postupanja (Victoria & Pineda, 2012).

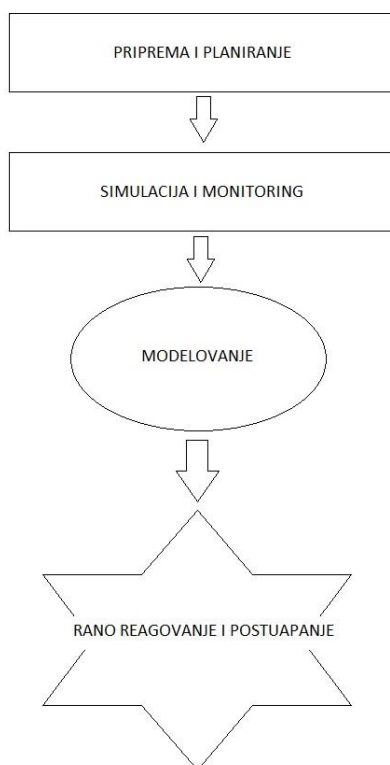
Međutim, mnogi ovakvi sistemi su glomazni i kruti (Ristić, 2015) i ne koriste pun potencijal modernih IKT, pre svega GIS- a i mobilnih tehnologija. To je posebno slučaj kada je u pitanju podrška policijskim službenicima koji su, kao deo tima za reagovanje u vanrednoj situaciji, najčešće prvi koji su obavešteni i dolaze na mesto događaja gde postupaju u skladu sa svojim ovlašćenjima. Tada se, u složenoj situaciji i ograničenom vremenskom okviru, javlja potreba za donošenjem odluka o aktivnostima koje će se preuzeti. Ta odluka bi trebala biti zasnovana na relevantnim i objektivnim informacijama, obzirom da doneta odluka može da utiče i na krajnji ishod (ponekad pravi razliku između života i smrti). Zato se sa pravom može reći da u uslovima stresa situaciona svest može biti ključna za efikasan rad policijskih službenika (Bertilsson et al., 2020; Verhage, Noppe, Feys & Ledegen, 2018).

Policijski službenici se često nalaze u opasnoj situaciji, rizikujući čak i svoje živote. Kao primer takve situacije može se navesti saobraćajna nezgoda prilikom transporta opasnih materija koje za posledicu može imati ispuštanje otrovne/zapaljive hemikalije, oblaka gasa ili pare (Bernatik, et al., 2008; Yang, et al., 2010; Ditta, Figueroa, Galindo, Yie-Pinedo, 2018). U takvim slučajevima policijski službenik je prvi na mestu događaja odgovoran za njegovo obezbeđenje u cilju očuvanja života, imovine, dokaza i životne sredine. Da bi se to učinilo na najbolji mogući način, a istovremeno vodeći računa o zdravlju postupajućih policijskih službenika, prepoznata je potreba za praktičnom pomoći u razumevanju trenutnih procesa koji se odvijaju u okruženju (situaciona svest). (Milić & Milidragović, 2021).

Tako bi na primer alat koji bi obezbedio informaciju o zoni ugroženosti (geografsko područje pogođeno akcidentom u određeno vreme) značajno pomogao u određivanju područja koje treba obezbediti (zatvoreno za javnost) ili čak potrebe za evakuacijom (u vezi sa mogućim posledicama). Poznato je da slučajno ispuštanje isparljive hemikalije može

predstavljati pretnju po život i zdravlje i na većoj udaljenosti od mesta ispuštanja (neke hemikalije su toksične ako se udišu, druge mogu predstavljati opasnost od požara). Posledice zavise od različitih faktora kao što su topografska karakteristika područja, demografija, karakteristike hemijskih supstanci, vremenski uslovi (smer i brzina vetra, stabilnost atmosfere...), a koji se menjaju od slučaja do slučaja. Zbog toga oni direktno utiču na procenu zone ugroženosti/rizika, i u tom smislu se pojedinac ne može osloniti na prethodno iskustvo. Zato je poželjno obezbediti mogućnost modelovanja zone ugroženosti za svaki pojedinačni slučaj akcidenta koji bi pomogao policijskim službenicima u postupanju kod ranog reagovanja (slika 31).

Različiti gotovi softverski paketi za procenu modela i simulaciju se mogu koristiti. Jedan od najpopularnijih je ALOHA® koji se široko koristi za planiranje i reagovanje na vanredne situacije u slučaju hemijskih incidenata. Te simulacije su uglavnom korišćene za predviđanje rizika u različitim situacijama kako bi se odredio i minimizirao u fazi pripreme, ili kako bi se procenile posledice akcidenta u fazi analize. Po najboljem saznanju trenutno jedina aplikacija koja omogućava asistenciju u samoj fazi reagovanja (hemijski akcidenti, požari i eksplozije) je komercijalna aplikacija CERES™ (Chemical Emergency Response E-Service) koja je takođe zasnovana na ALOHA modeliranju integrisanom sa Google mapama.



Slika 31. Prikaz različitih faza kod ranog reagovanja na akcidentne situacije

Mogućnost prikaza zone ugroženosti na mobilnim uređajima u realnom vremenu, tokom samog akcidenta, predstavljala bi veliku pomoć policijskim službenicima u prvom (ranom) reagovanju na istu. Sa druge strane modelovanje je moguće tek nakon što se utvrdi o kojoj štetnoj supstanci se radi kod akcidenta na koji se reaguje, a za šta policijski službenici nisu obučeni.

Uzimajući sve navedeno u obzir, kao najbolje rešenje za podizanje situacione svesti kod prvog reagovanja na akcident predlažemo razvoj nove mobilne aplikacije koja bi policijskom službeniku omogućila da u realnom vremenu dobije relevantne informacije.

4.2 Predloženo aplikativno rešenje - HAZMAT ASSISTANT

U nastavku je prikazan predlog softverskog rešenja u vidu mobilne aplikacije nazvane *HAZMAT ASSISTANT* koja bi se koristila za rano reagovanje u vanrednim situacijama. Aplikacija je zamišljena na način da obezbedi sve relevantne informacije iz okruženja koje bi povećale situacionu svesnosti postupajućeg policijskog službenika u slučaju (neočekivanog) hemijskog akcidenta (posebno kada je u pitanju saobraćajna nezgoda i kada je očekivano da upravo policijski službenik bude prvi na mestu događaja). U tom smislu je predviđeno da se omogući lak pristup (preko mobilnog uređaja) svim relevantnim informacijama vezanim prvo za prepoznavanje opasne materije a zatim za način postupanja kao i za procenu zone ugroženosti.

Aplikacijom je omogućeno i prikupljanje podataka koji bi se na lak i jednostavan način (preko predefinisanih formi upita i izveštavanja) mogli proslediti komandnom operativnom centru (KOC). Tamo bi se na osnovu njih izvršilo modelovanje zone rizika (pomoću ALOHA® paketa) i ta informacija prosledila u realnom vremenu svim policijskim službenicima koji se nalaze u okolini lokacije akcidenta. Obzirom da su u osnovi potvrđeni (u realnom vremenu) podaci i pretpostavke uz upotrebu mobilnih i GIS tehnologija, korišćenje aplikacije bi omogućilo pružanje vitalnih informacija za brzu identifikaciju ugroženog područja, pomažući u efikasnom i efektivnom donošenju odluka u vezi sa akcidentom.

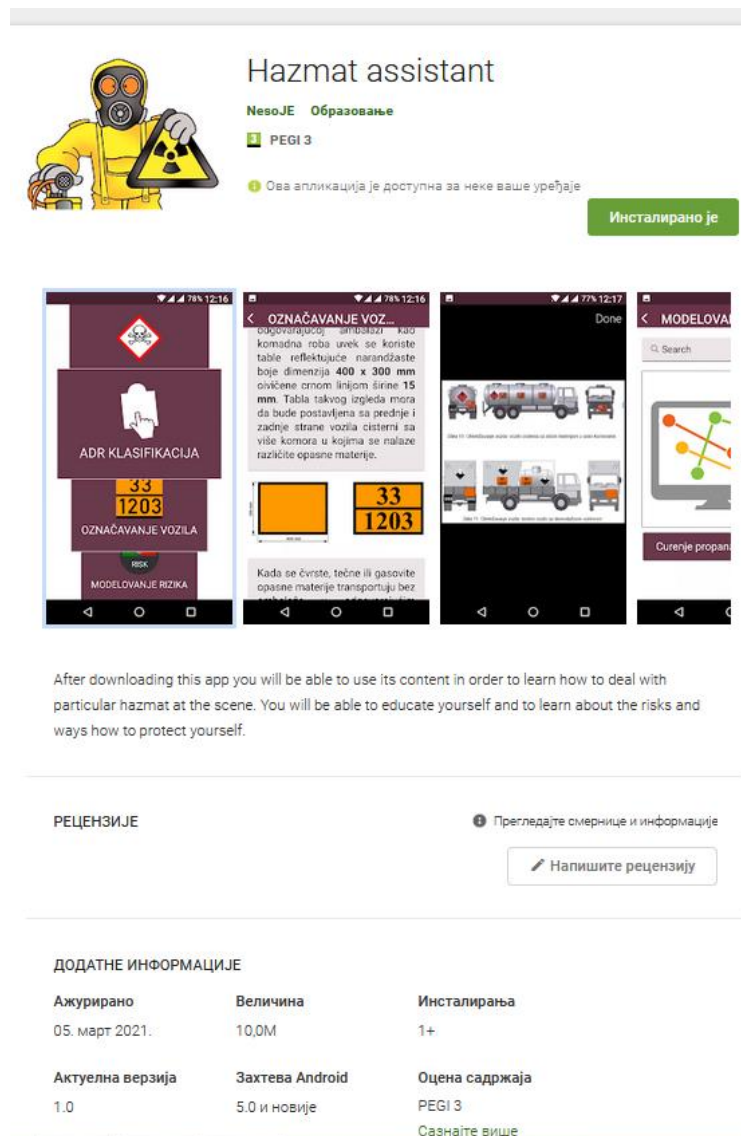
Mobilna aplikacija je razvijena pomoću servisa App-Dashboard okruženja dostupnog na <https://app-dashboard.com/>. U tom smislu ona predstavlja funkcionalni prototip jedne komponente integrisanog softverskog rešenja sastavljenog od 4 osnovne komponente:

- baze u kojoj bi bile pohranjene sve informacije,
- aplikacija (*app*) na mobilnim uređajima policijskih službenika,

- veb (*web-based*) aplikacija u KOC-u koju bi koristio donosilac odluka i
- *back-end* server koji bi obezbeđivao sigurnu komunikaciju između prethodno navedenih komponenti.

Upotreba mobilne aplikacije omogućuje pristup relevantnim informacijama neophodnim u postupku ranog reagovanja policijskih službenika kod hemijskih akcidenata u urbanim ili ruralnim područjima. Aplikacija identifikuje na lokaciji zasnovane parametre koji uključuju: trenutnu lokaciju akcidenta putem servisa geo-lokacije kao i dostupne informacije o meteorološkim uslovima (temperatura, brzina vetra, atmosferski pritisak, vlažnost vazduha i dr.). Takođe, na osnovu transportne dokumentacije i vizuelnim uvidom u lisnice sa ADR numeracijom, omogućena je identifikacija opasne materije u akcidentnoj situaciji kao i prevozno sredstvo (kamion, cisterna, železnički vagon ili drugo) koje je učestvovalo u istoj. Tako prikupljene informacije prosleđuju se preko mobilne aplikacije komandnom centru koji na osnovu dostavljenih podataka kreira model i zonu ugroženosti. Komandni centar urgentno dostavlja potrebne informacije svim korisnicima-policijskim službenicima, onim koji se neposredno nalaze u blizini lokacije akcidenta radi ranog reagovanja i vršenja specifičnih radnji za postupanje u vanrednoj situaciji (uključujući i eventualnu evakuaciju ugroženog stanovništva). Po potrebi se odgovarajuća informacija u formi upozorenja može proslediti i drugim činiocima (koji su funkciji reagovanja na akcident, ali i samim građanima koji su potencijalno ugroženi istim) sa svrhom informisanja i obaveštavanja.

HAZMAT ASSISTENT je originalna mobilna aplikacija kreirana za android platformu koja se može preuzeti sa Google Store (slika 32). Može se instalirati na pametnim (*smart*) uređajima - telefonima, a njena upotreba pruža policijskim službenicima alternativnu i dodatnu opciju ranog reagovanja pri akcidentnim situacijama. Trenutno prosleđivanje dostupnih informacija o akcidentu, kroz posebno kreiranu ekransku formu, komandno-operativnom centru obezbeđuje brzo i rano planiranje i reagovanje što automatski znači smanjenje potencijalno loših posledica sa fatalnim ishodom.



Slika 32. Prikaz Hazmat assistant na Google store

4.2.1 Prikaz funkcionalnosti mobilne aplikacije HAZMAT ASSISTANT

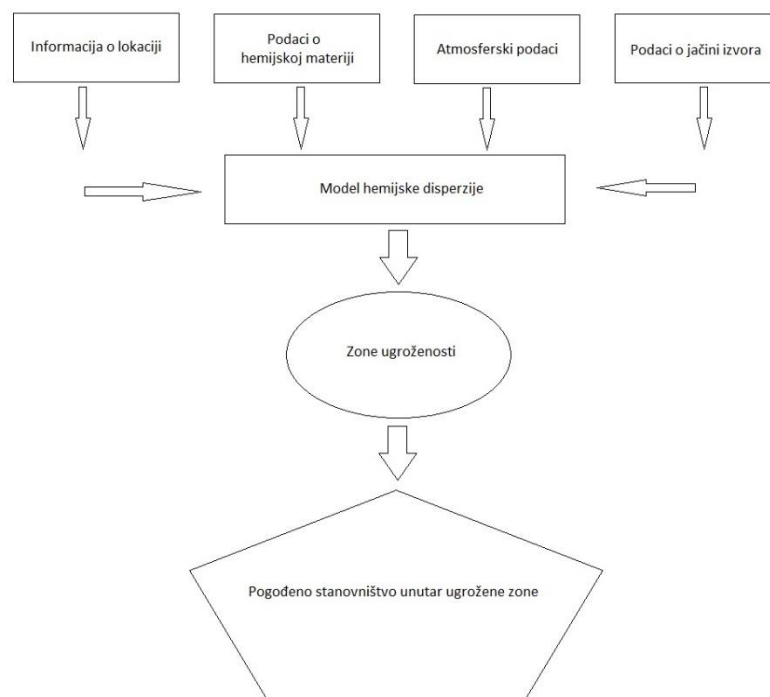
Osnovni koncept HAZMAT ASSISTANT aplikacije zasniva se na korišćenju podataka o lokaciji (urbana ili ruralna sredina), meteorološko-hidrološkim uslovima, informacije o samom akcidentu kao i o gustini naseljenosti (broj potencijalnih žrtava ili ljudi izloženih štetnom dejstvu opasne materije). Takođe postoji mogućnost foto dokumentovanja lokacije akcidenta.

Svi prikupljenji podaci se prosleđuju komandno-operativnom centru u kojem se na osnovu tih informacija u kratkom vremenskom periodu izvrši modelovanje zona ugroženosti usled štetnog uticaja opasne materije. Za modelovanje se koristi ALOHA® paket. Tako obrađeni podaci se nazad prosleđuju pošiljaocu kao i svim policijskim službenicima koji se nalaze na datom području radi pripreme za brzo reagovanje sa ciljem smanjenja stope rizika u vidu ugroženosti stanovništva i biljnog i životiskog sveta.

Grafički korisnički interfejs mobilne aplikacije je veoma jednostavan, predvidiv i praktičan tako da ne zahteva dodatnu obuku korisnika za njenu upotrebu. Na ekranskim formama mobilne aplikacije korisnici unose neophodne podatke oko akcidenta kojim obavestavaju postupajući komandni centar. Nakon kreiranja zona ugroženosti korisnici se obavestavaju o daljem reagovanju postupanju. Takođe, mogu se proslediti urgentni zahtevi za hitnu medicinsku pomoć, vatrogasce spasioce ili pripadnike policije.

Jednom kada korisnik identifikuje akcidentnu, udesnu i kriznu situaciju i zatraži određenu hitnu intervenciju, aplikacija automatski šalje prikupljene podatke koji uključuju: lokaciju (geografska širina i dužina, adresa ili automatsko GPS lociranje), meteorološke podatke (temperaturu vazduha, vlažnost, atmosferski pritisak, oblačnost, brzinu i smer vetra), podatke vezane za vrstu vozila za prevoz opasne materije, vrstu i količinu opasne materije (koja se prevozi odnosno koja se izlila) kao i podatke o jačini izvora (vrsta i veličina oštećenja). U komandno-operativnom centru se na osnovu tih podataka radi modelovanje i izračunava zona ugroženosti (slika 33). Ta informacija se u realnom vremenu prosleđuje korisniku, a povezanost sa Google-mapama omogućuje da se na telefonu korisnika ta informacija vizuelizuje. Ova informacija može biti korišćena kako za rano reagovanje tako i za postupanje specijalizovanih timova.

Obzirom da je kod slanja zahteva za hitne slučajeve predviđena mogućnost slanja multimedijalnih datoteka (npr. fotografija sa mesta događaja) potrebno je obezbediti i internet vezu. Ta veza se koristi i za pribavljanje meteoroloških podataka. Greška GPS-om određene lokacije kreće se od 1-10 metara, u zavisnosti ot topologije okruženja.



Slika 33. Prikaz komponenti koje učestvuju u podizanju situacione svesnosti policijskih službenika kod ranog reagovanja na akcidente

4.2.2 Ekranse forme mobilne aplikacije HAZMAT ASSISTANT

Mobilna aplikacija HAZMAT ASSISTANT, sadrži više ekranskih formi koje su objedinjene u tri grupe i to:

- informativne,
- izveštajne i
- postupajuće.

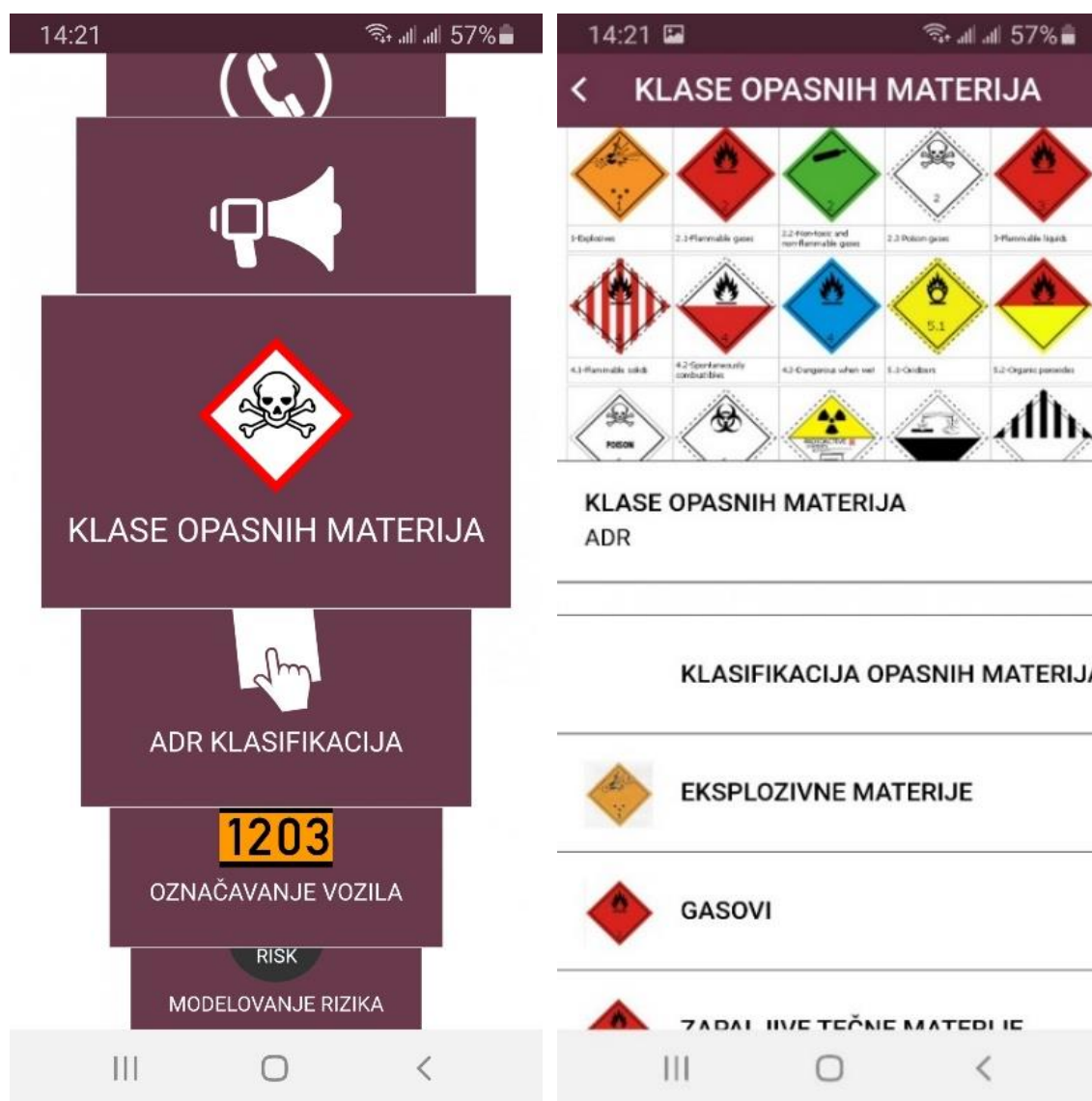
4.2.2.1 Informativne ekranske forme

U grupu informativnih mogu se svrstati sledeće ekranske forme:

- klase opasnih materija,
- ADR klasifikacija,
- označavanje vozila za prevoz opasnih materija,
- transportna dokumentacija,
- vremenska prognoza i
- meteo slika

U informativne ekranske forme spadaju forme u kojima su predstavljene informacije o opasnim materijama, vrsti, opisu i klasi. **Klase opasnih materija** (slika 34), predstavljene su na osnovu ADR lista sa detaljnim opisom.

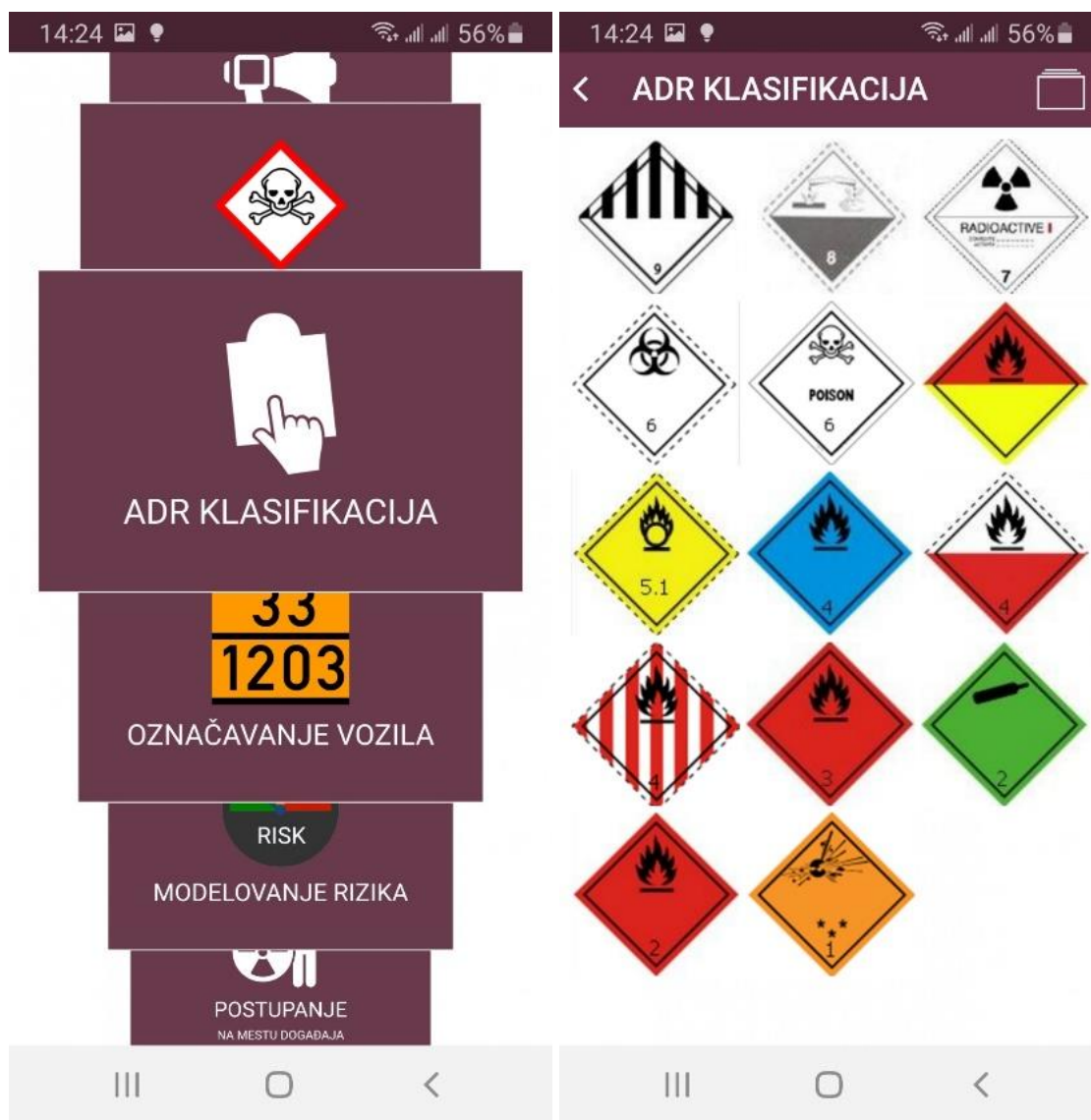
Široka primena opasnih materija uslovala je njihovu opštu klasifikaciju koja je izvršena u skladu sa međunarodnim propisima i sporazumima, a obuhvaćeno je oko 50.000 opasnih materija razvrstanih u 9 klasa i više podklasa.





Slika 34. Prikaz i opis klasa opasnih materija

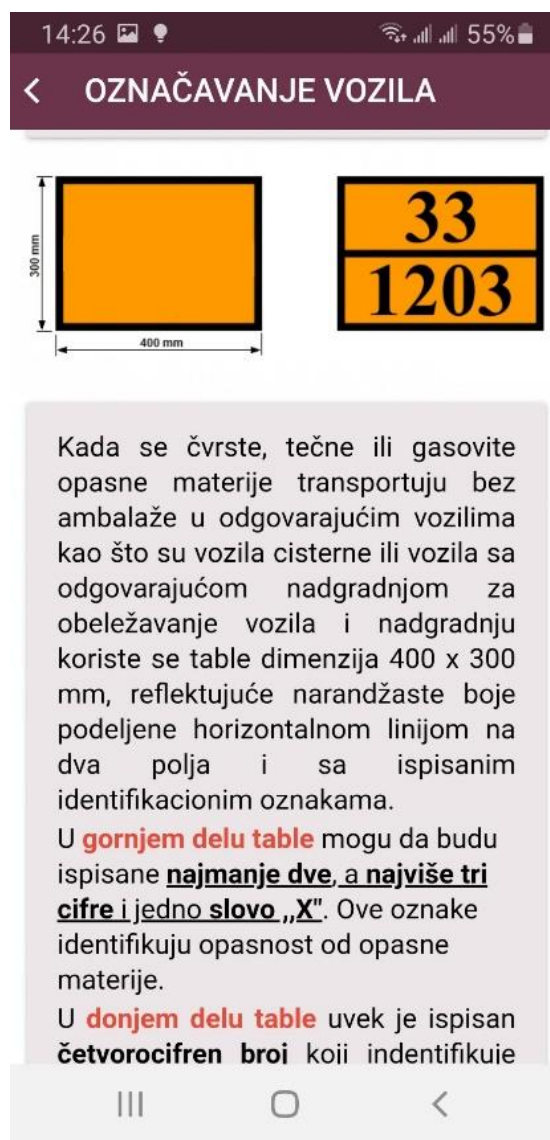
Vizuelnom identifikacijom ADR oznake na prevoznom sredstvu za prevoz opasnih materija korisnik-policijski službenik se automatski informiše o klasi materije koja se prevozi (slika 35).

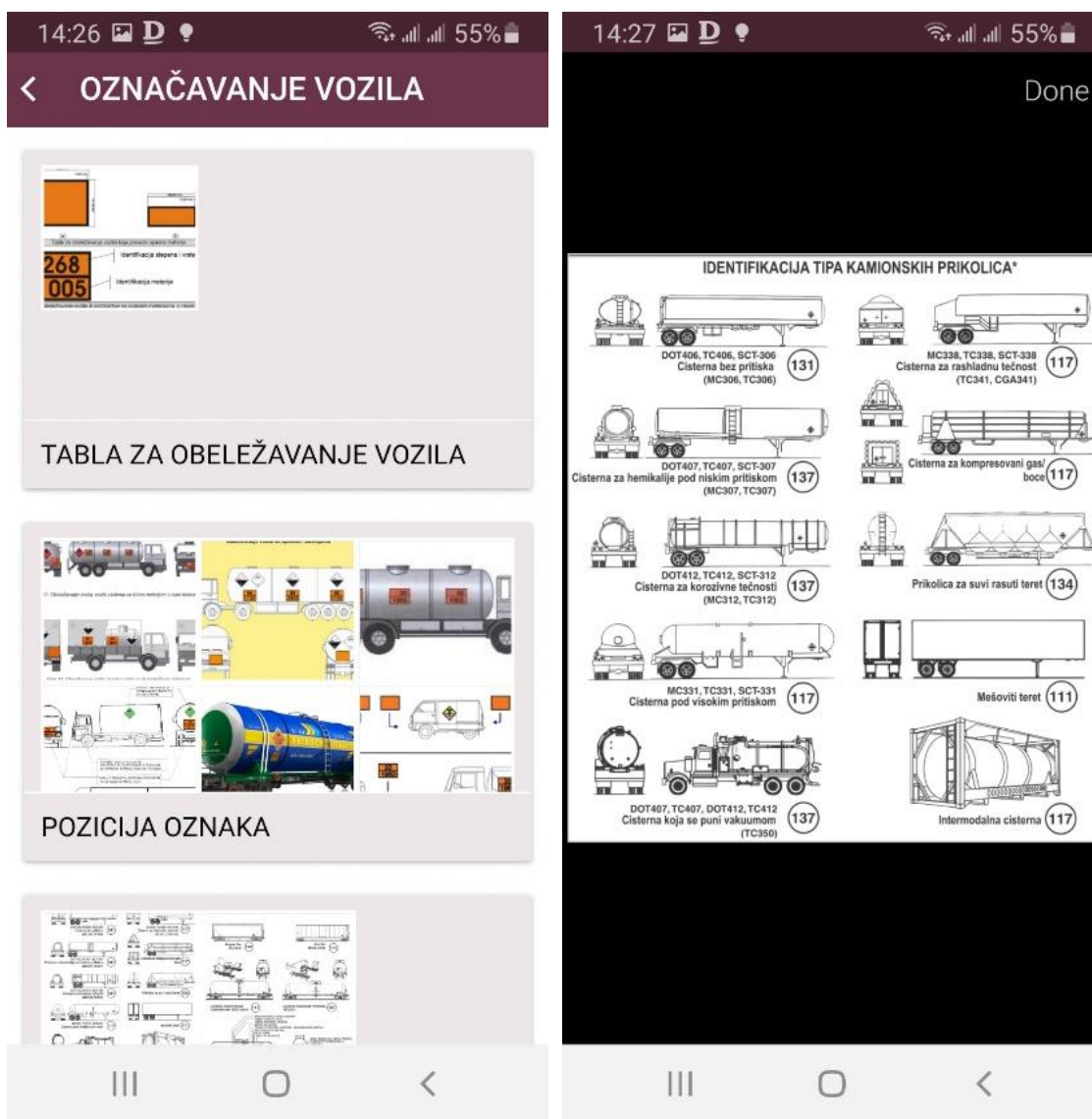


Slika 35. ADR klasifikacija opasnih materija

Na ekranskoj formi **Označavanje vozila** za prevoz opasnih materija (slika 36), može se na osnovu table za obeležavanje vozila koje se postavljaju na prednjoj i zadnjoj strani vozila za prevoz opasnih materija u vertikalnoj ravni, a u pojedinim slučajevima i na bočnim stranama vozila tako da budu lako uočljive i jasno vidljive, izvršiti vizuelna identifikacija opasne materije koja se prevozi definisana ADR oznakama.

Za obeležavanje vozila koja prevoze opasne materije klase 1 i klase 7, vozila koja prevoze kontejnere, kao i opasnu robu koja se prevozi u odgovarajućoj ambalaži kao komadna roba koriste se reflektujuće table narandžaste boje dimenzija 400 X 300 mm oivičene crnom linijom širine 15mm.

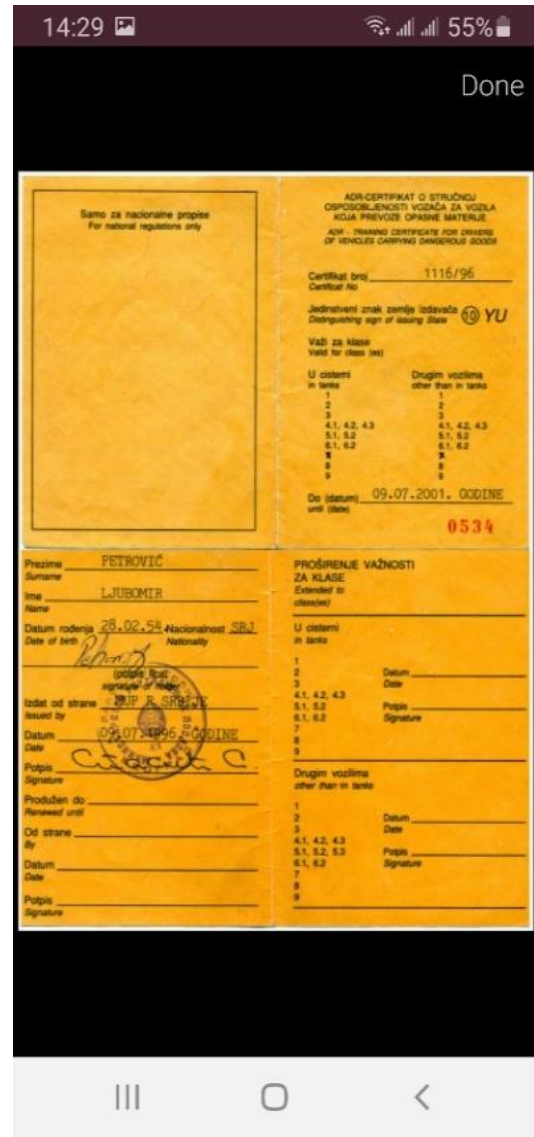


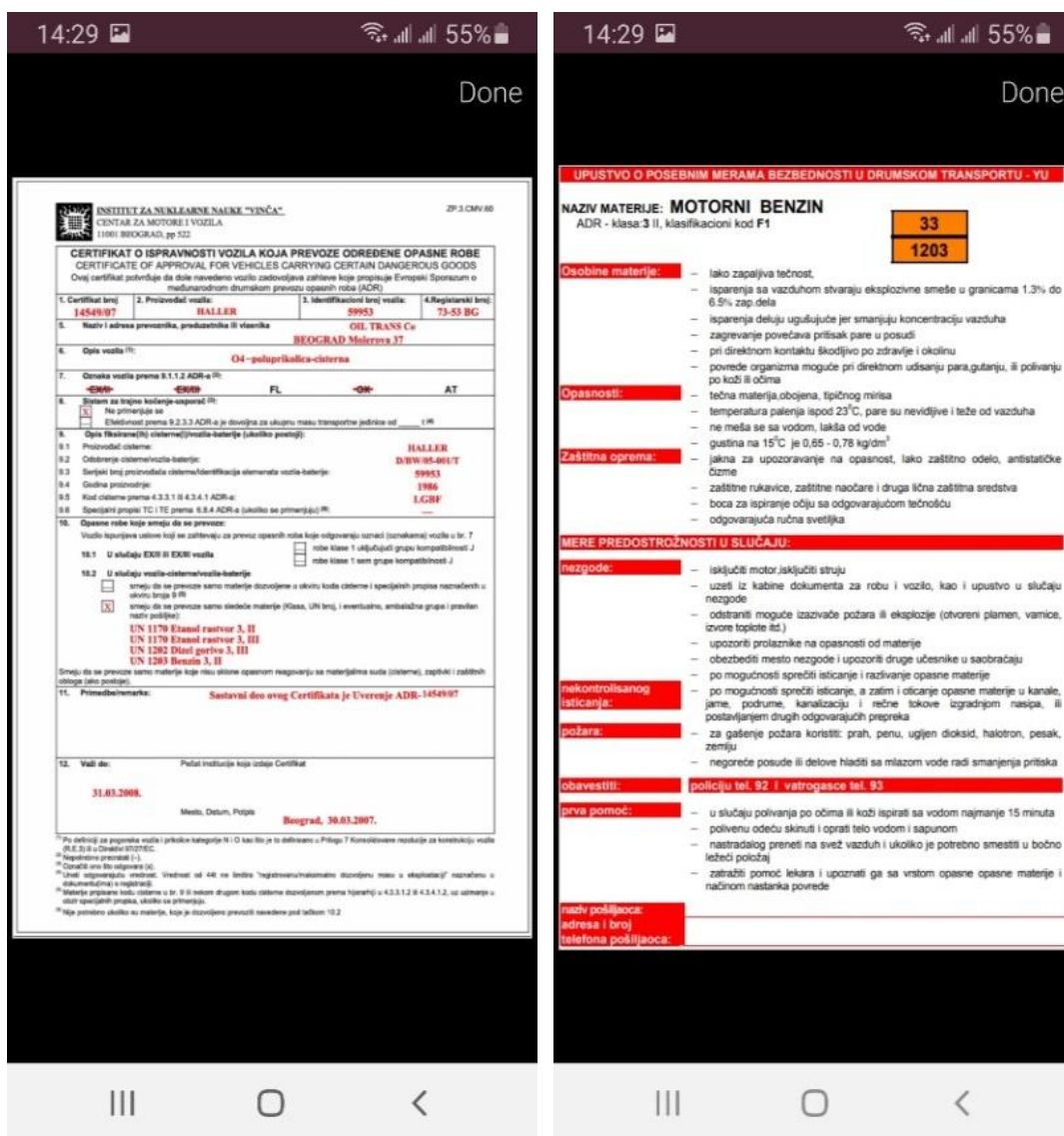


Slika 36. Prikaz označavanja vozila za prevoz opasnih materija

Na ekranskoj formi **Transportna dokumentacija**, u skladu sa postojećim zakonskim propisima opisana je dokumentacija neophodna za transport opasnih materija (slika 37) koja podrazumeva:

- sertifikat o ispravnosti vozila za transport opasnih materija,
- sertifikat o obuci vozača za transport opasnih materija,
- tovarni list (isprava o prevozu),
- dozvole (odobrenja) za prevoz,
- uputstvo o posebnim merama merama bezbednosti ili uputstvo u slučaju nezgode,

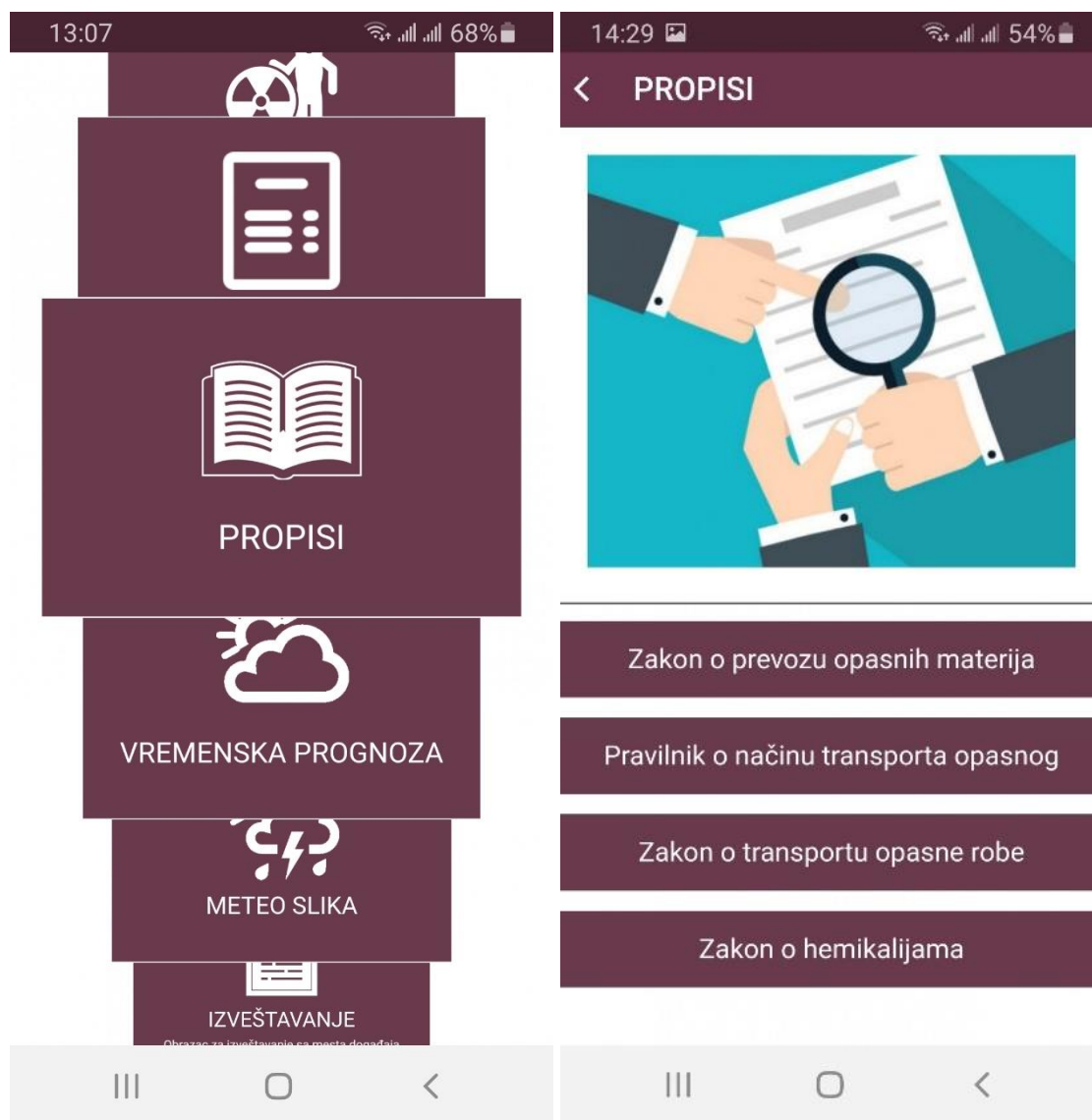




Slika 37. Prikaz transportne dokumentacije za prevoz opasnih materija

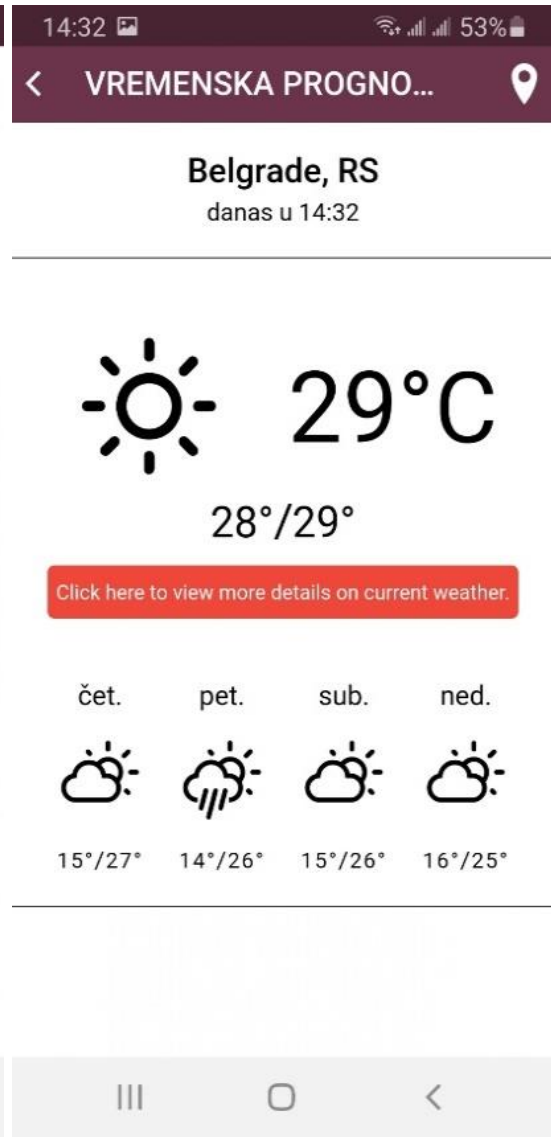
Ekrska forma **Pravni propisi** (slika 38) prikazuje važeće zakoske propise koji uređuju problematiku transporta opasnih materija:

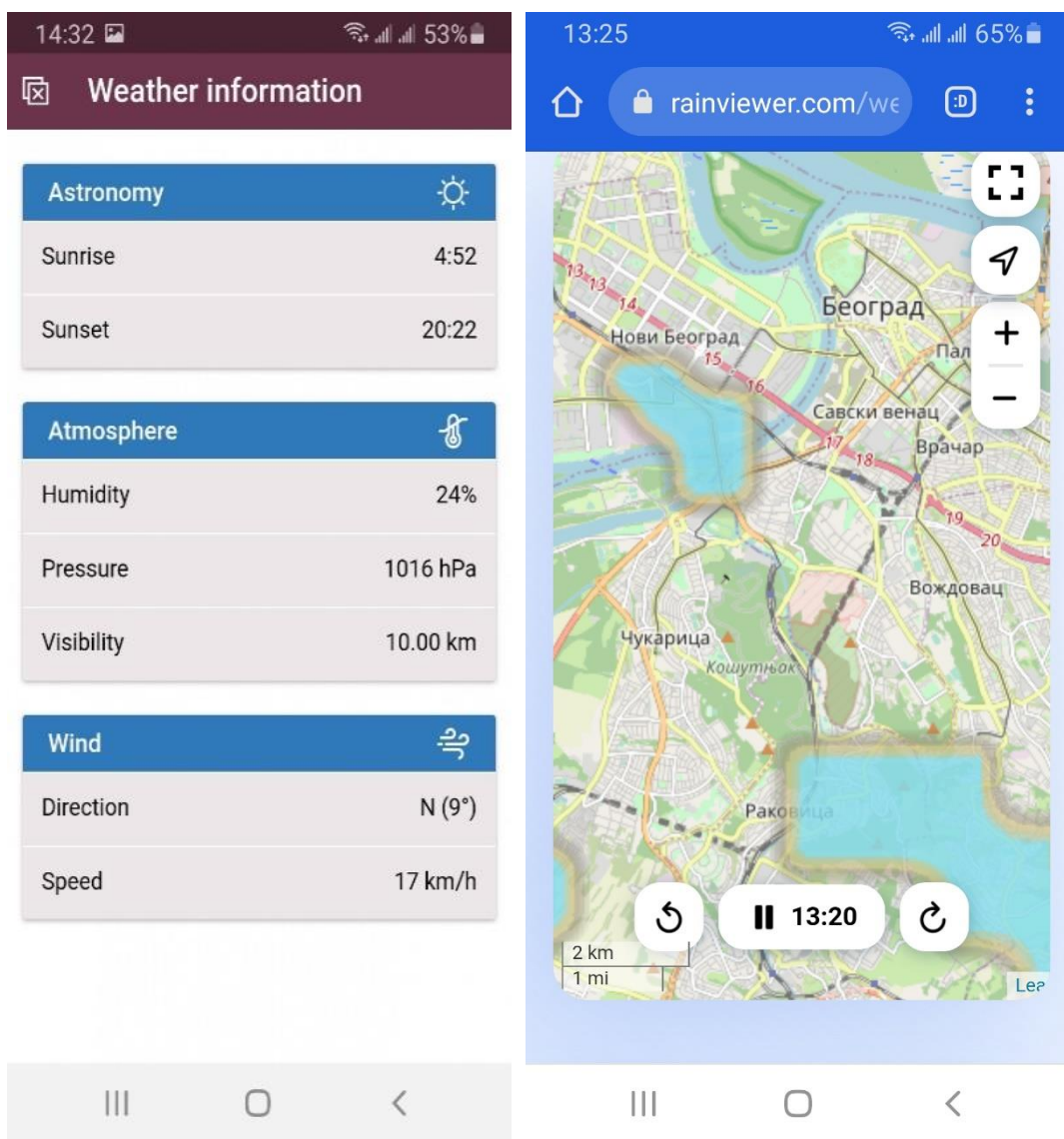
- Zakon o prevozu opasnih materija,
- Zakon o transportu opasne robe,
- Zakon o hemikalijama i
- Pravilnik o načinu transporta opasnih materija.



Slika 38. Prikaz pravnih propisa koji regulišu problematiku transporta opasnih materija

Ekranška forma **Vremenska prognoza** omogućava prikaz trenutnih meteoroloških podataka na postupajućoj lokaciji (slika 39) (temperatura vazduha, vlažnost vazduha, vidljivost, brzina i smer vetra kao i podaci o vremenu izlaska i zalaska sunca).

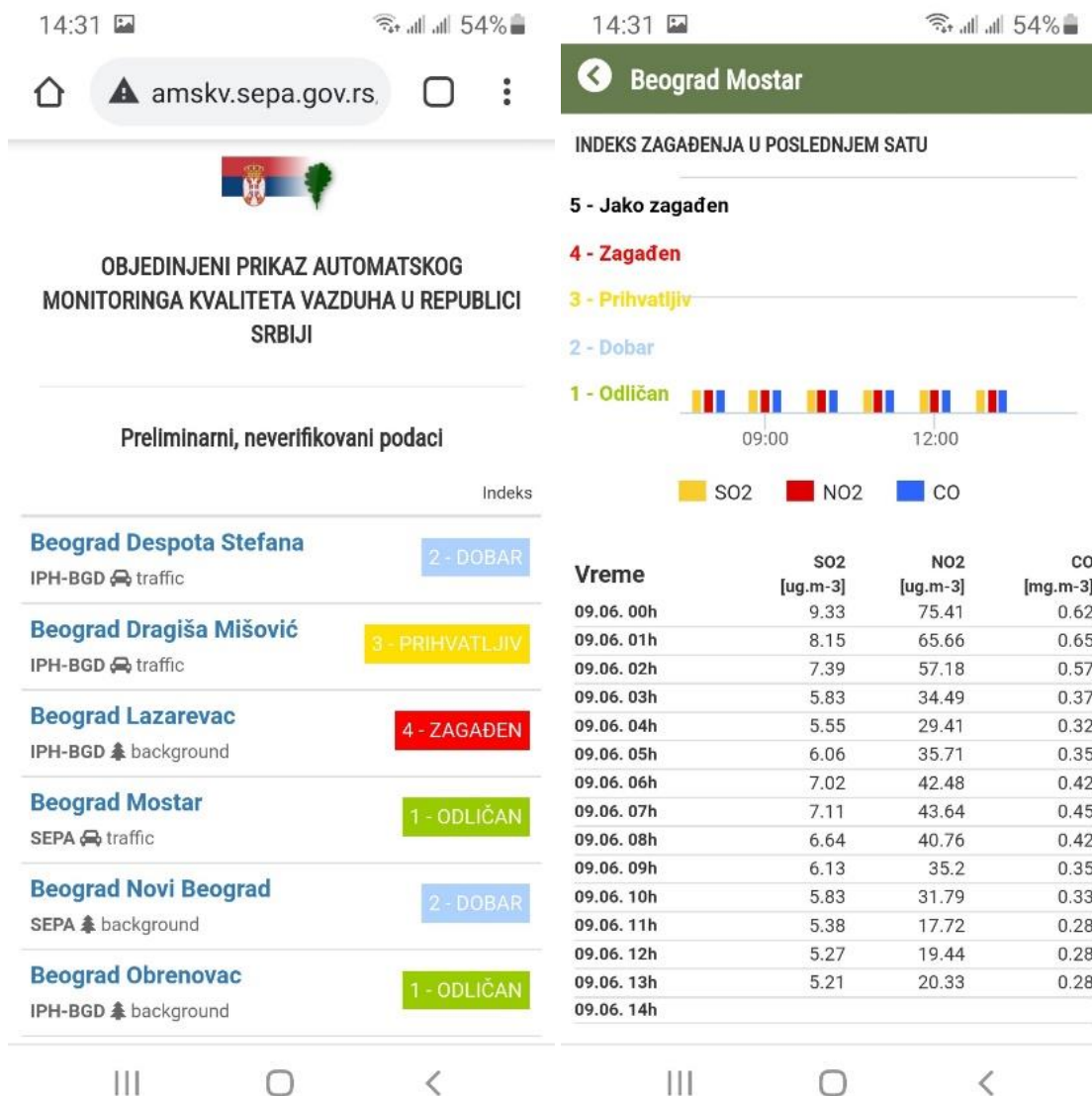




Slika 39. Prikaz meteoroloških podataka za trenutnu lokaciju

Na ekranskoj formi **Meteo Slika** (slika 40) može se dobiti informacija o radarskoj slici padavina u realnom vremenu kao i informacija o prikazu automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u Republici Srbiji sa indeksom zagađenja u poslednjem satu, linkovan na sajtu Agencije za zaštitu životne sredine Ministarstva za zaštitu životne sredine Republike Srbije.





Slika 40. Prikaz monitoringa kvaliteta vazduha sa indeksom zagađenja

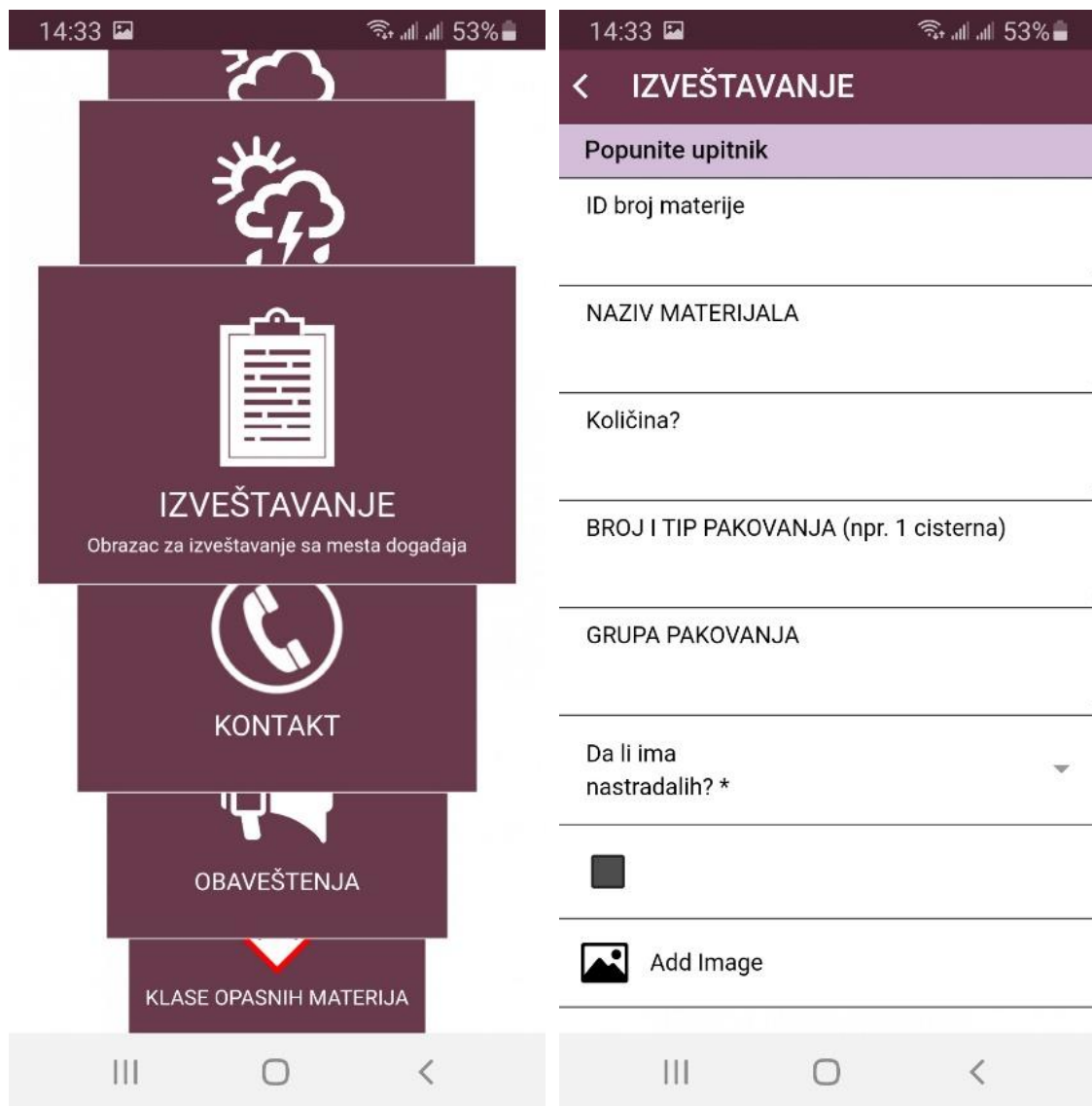
4.2.2.2 Izveštajne ekranske forme

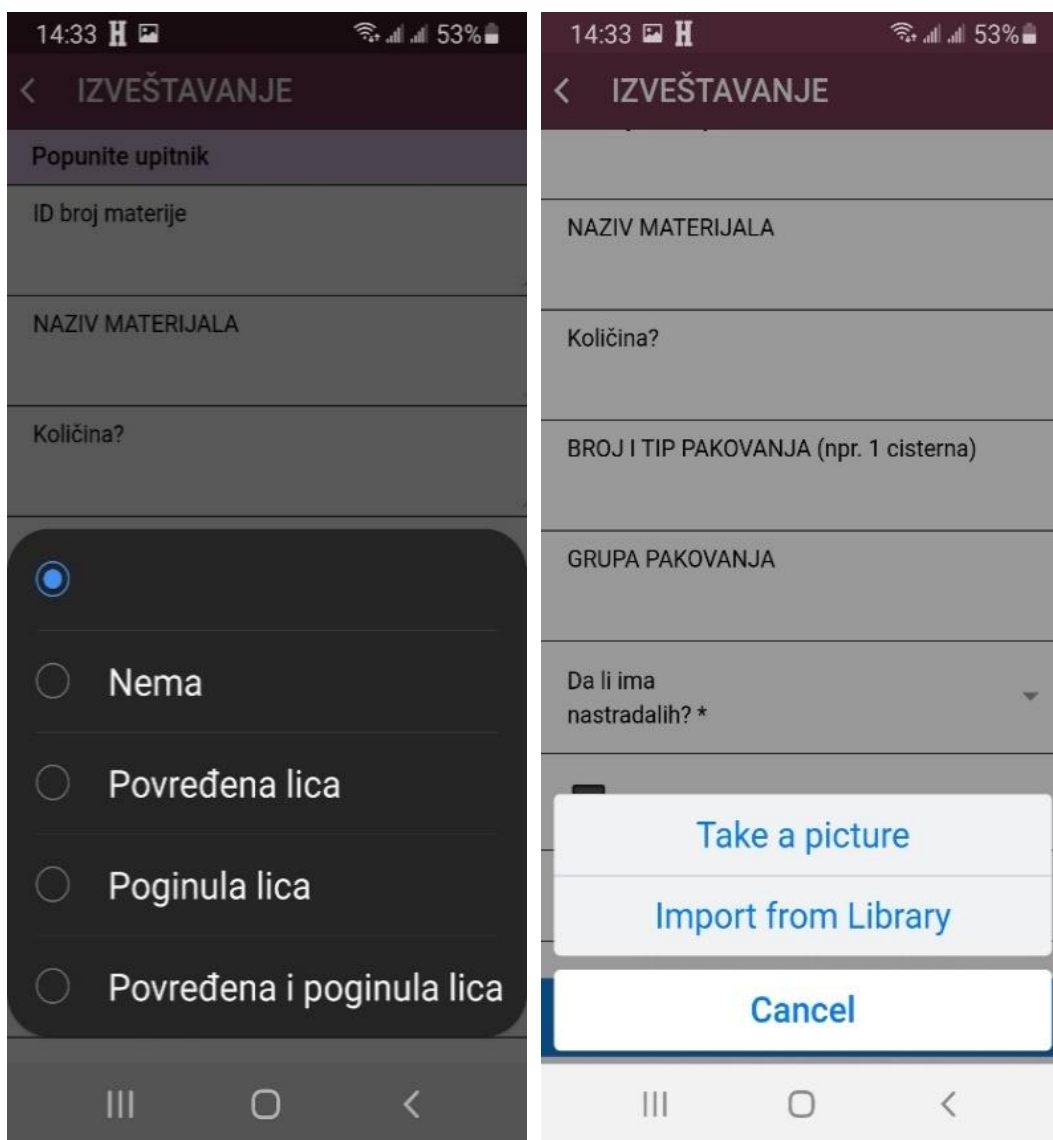
U izveštajne ekranske forme možemo svrstati sledeće ekranske forme:

- Izveštavanje,
- Obaveštenja i
- Kontakt

Na ekranskim formama **Izveštavanje** (slika 41) korisnik aplikacije-policijski službenik u par koraka popunjava formu upitnika sa podacima koje može da prepozna, a koji su jako bitni u početnoj fazi identifikovanja potencijalnog rizika nastalog u akcidentnoj situaciji. U upitniku se unose podaci o vrsti opasne materije, količini, pakovanju, informacija o povređenim ili poginulim licima i njihovom broju kao i mogućnost fotografisanja lica

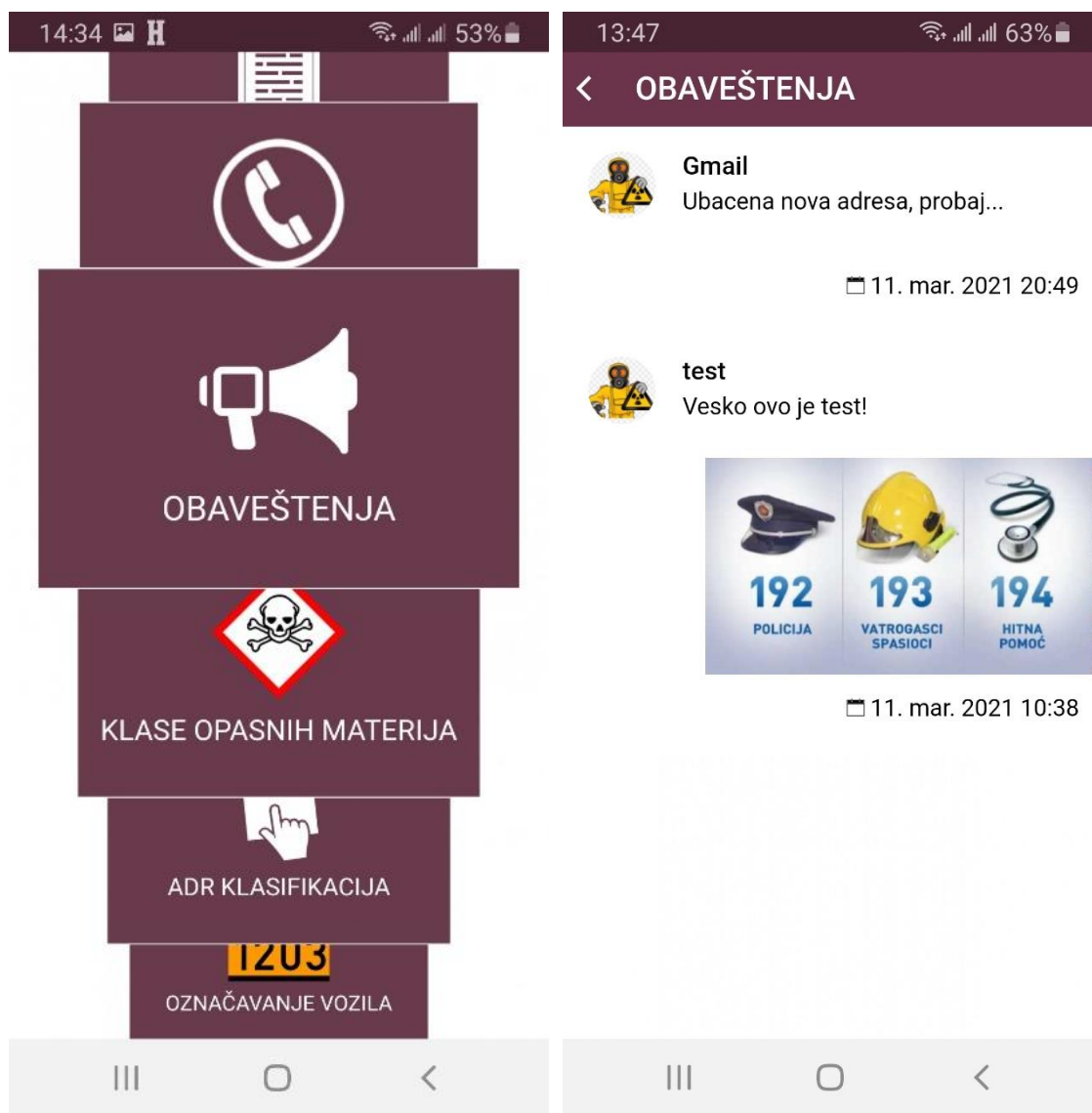
mesta. Popunjen Upitnik se prosleđuje komandno operativnom centru na upoznavanje radi daljeg planiranja i preduzimanja preventivnih mera.





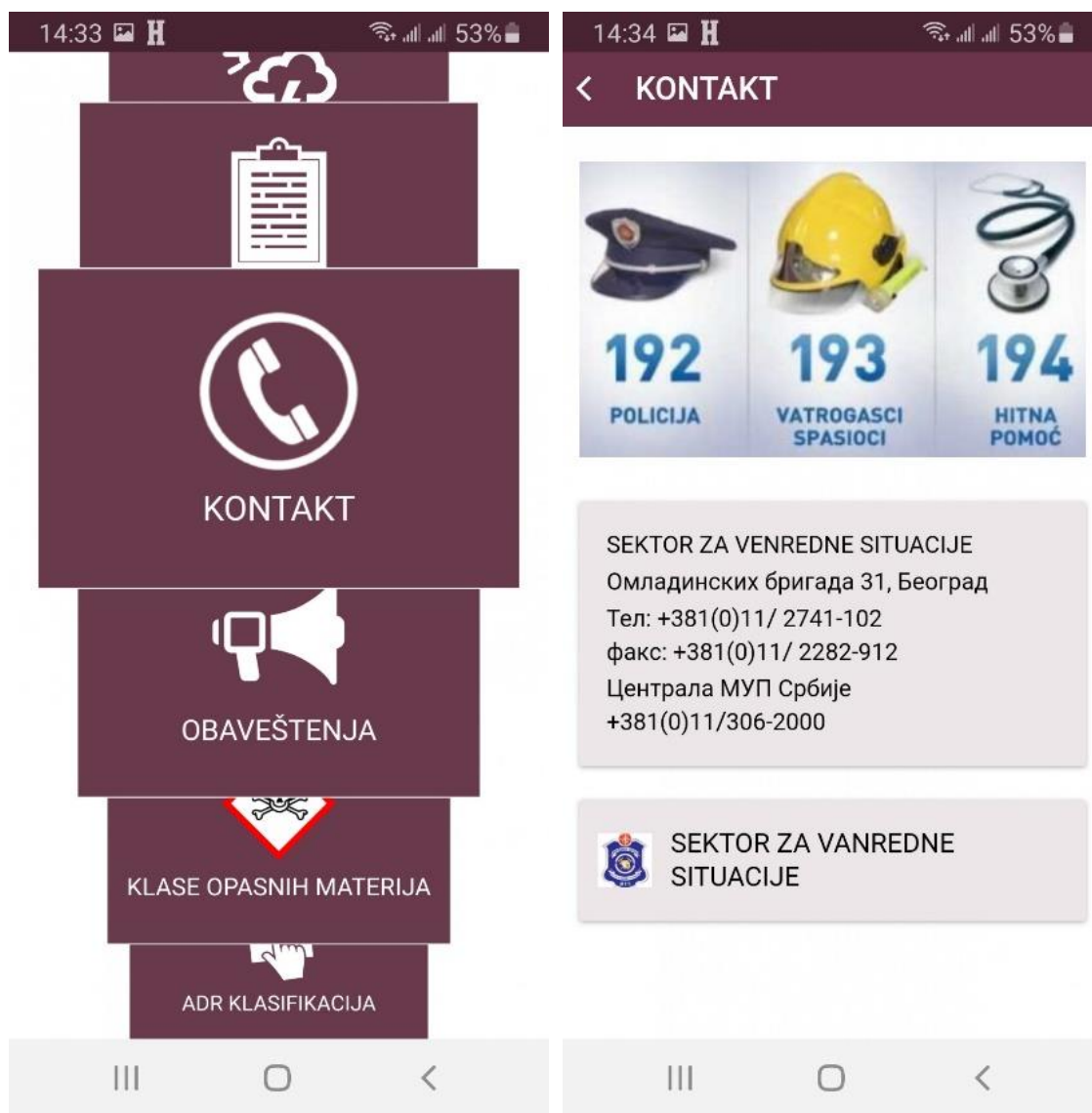
Slika 41. Prikaz ekranske forme za izveštavanje sa upitnikom

Preko ekranske forme **Obaveštenja** (slika 42), dobijaju se urgentne notifikacije koje se prosleđuju svim korisnicima aplikacije radi informisanja i eventualnog postupanja.



Slika 42. Prikaz ekranskih formi za obaveštavanja i notifikacije

Na formi **Kontakt** (slika 43), prikazani su brojevi telefona i kontakti sa relevantnim predstavnicima Sektora za vanredne situacije, policije, hitne pomoći i drugih urgentnih službi.



Slika 43. Prikaz ekranskih formi za kontakt

4.2.2.3 Postupajuće ekranske forme

U postupajuće ekranske forme možemo svrstati sledeće ekranske forme:

- Modelovanje rizika i
- Postupanje na mestu događaja.

Preko ekranske forme **Modelovanje rizika** (slika 44) omogućeno je povezivanje sa mapama terena i vizuelizaciju različitih informacija

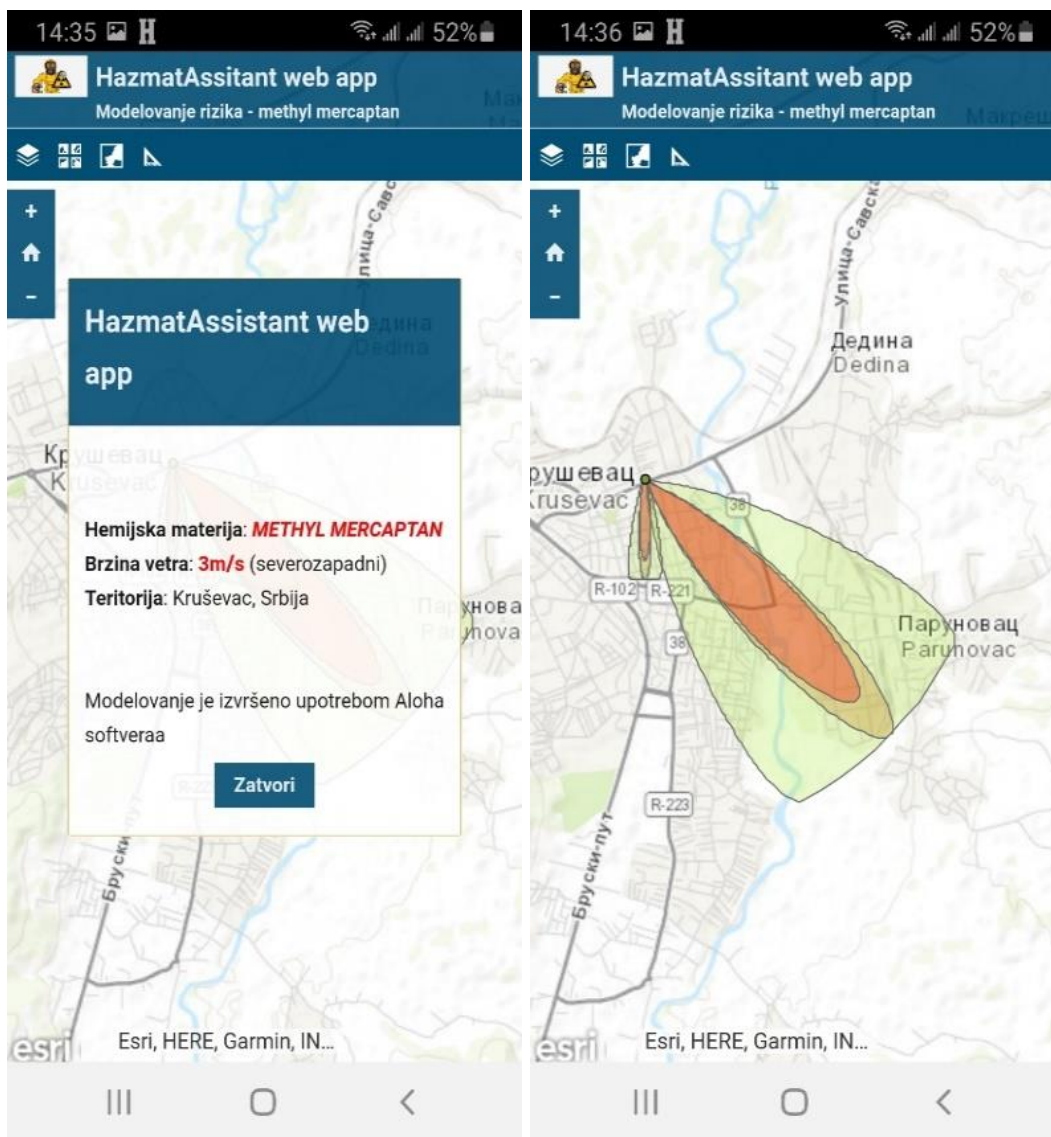


Slika 44. Prikaz ekranskih formi za pripremu modelovanje rizika

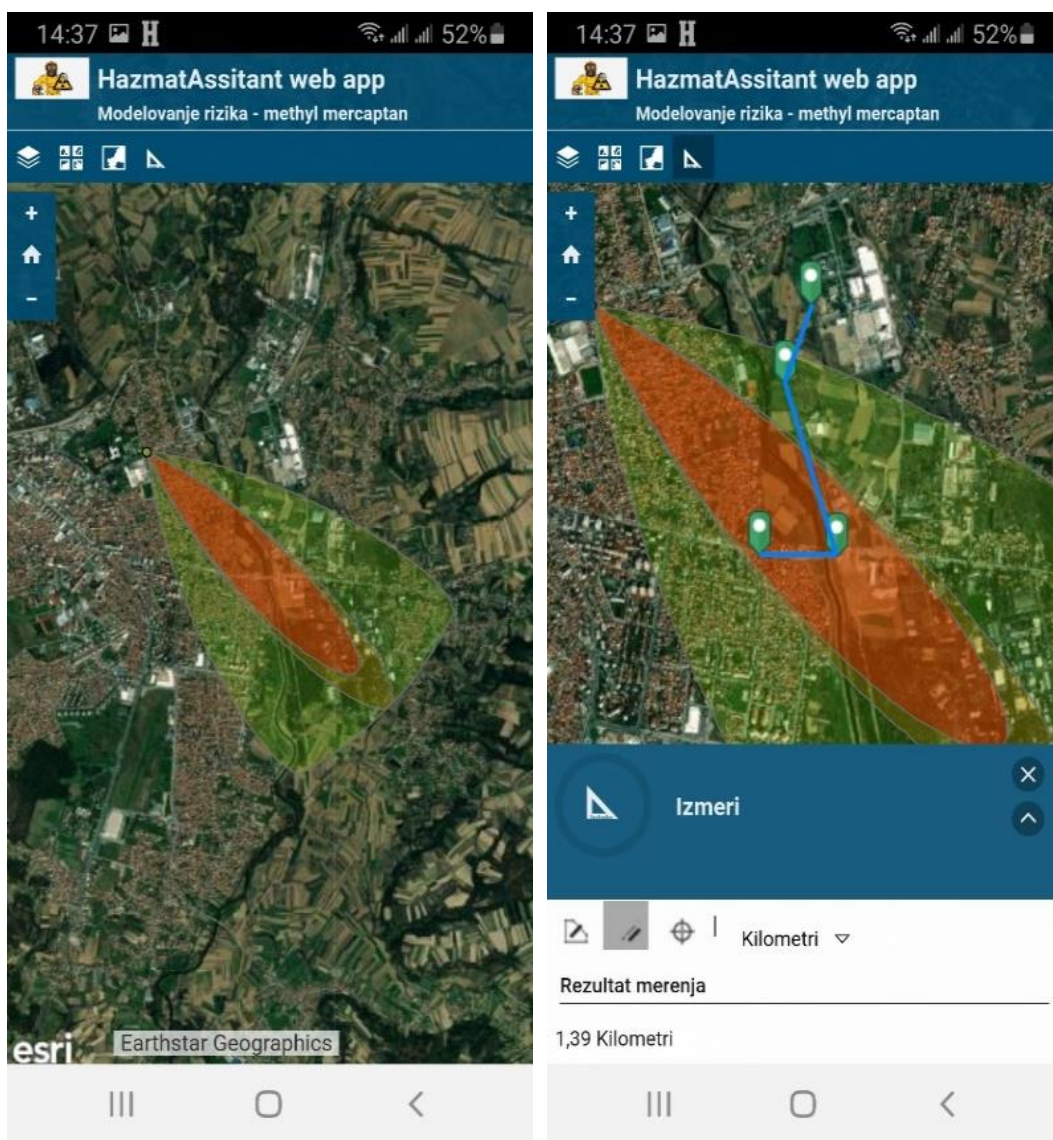
Korišćenjem ove ekranske forme prikazuje se mapa sa ucrtanom lokacijom akcidenta i modelom zone ugroženosti koji je izračunat u KOC-u na osnovu svih podataka koje smo prosledili. Takođe, mogu se koristiti i određeni ranije kreirani izveštaji o vanrednim situacijama koji su bili predmet analiza i postupanja, a mogu se dodati u realnom vremenu. Korisnik može da odgovori, odbije ili samo pregleda izveštaj na mapi.

Ukoliko postoje podaci, na mapi se može videti blizina posebno osetljivih objekata (bolnica, škola, vrtića, tržnih centara i ostalo). Takođe, može se proceniti rastojanje od lokacije incidenta do bilo koje tačke od interesa u prostoru (slika 45). Ukoliko bi aplikacija bila

korišćena preko službenih mobilnih Tetra¹⁸ uređaja onda bi se na mapi moglo prikazati i prisustvo policijskih patrola u okolini.



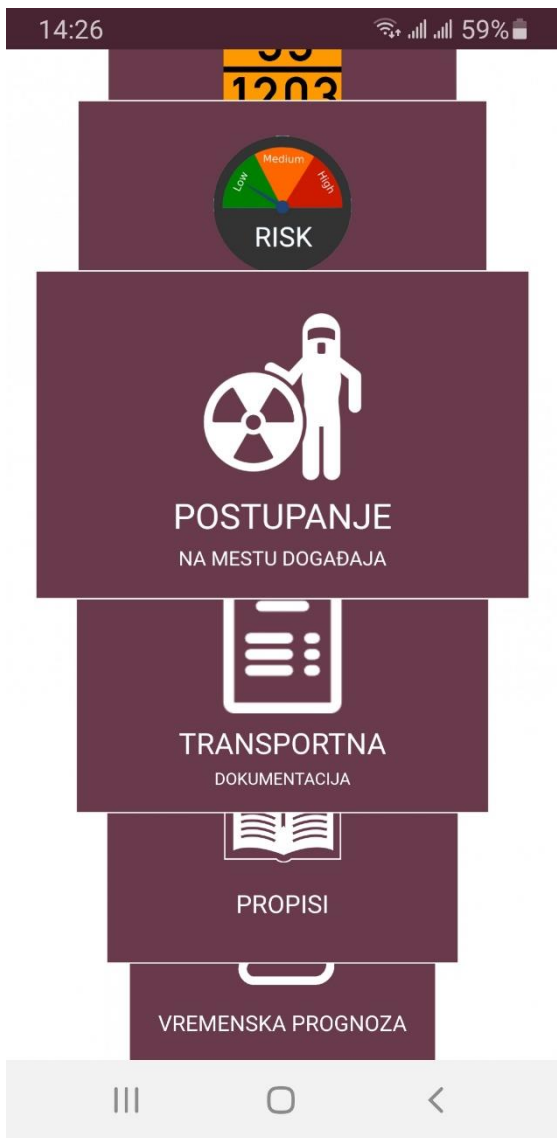
¹⁸ TETRA (eng. TERrestrial (Trans European) Trunking RAdio) - otvoreni sistem digitalnih mobilnih *treking* radio telefonskih komunikacija razvijen na osnovu standarda koji je usvojio Evropski Institut za Telekomunikacione Standarde (ETSI). Koristi se u MUP-u RS.

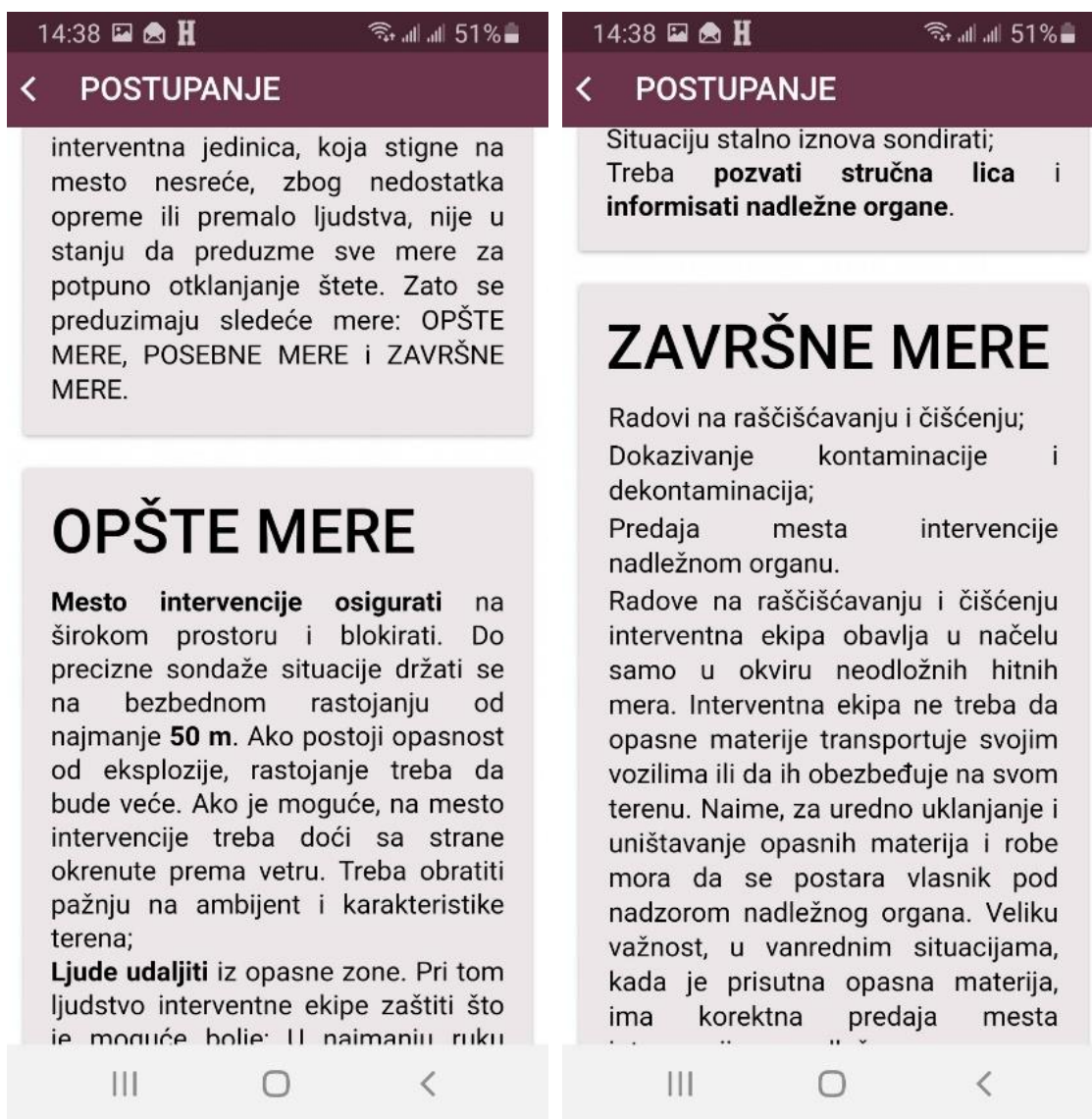


Slika 45. Prikaz ekranskih formi za modelovanje rizika odnosno prikaza zona ugroženosti

Na ekranskim formama **Postupanje** na mestu događaja definisana su određena pravila prilikom početnog postupanja (slika 46). Mere su svrstane u tri grupe sa detaljnim opisom postupanja:

- opšte,
- posebne i
- završne mere.





Slika 46. Prikaz ekranskih formi za postupanje usled hemijskog akcidenta

4.2.3 Ograničenja

U ovom trenutku mobilna aplikacija može da radi samo na uređajima koji koriste android OS (iOS trenutno nije zastupljen).

Mada je predviđeno da se modelovanje radi u komandnom centru (na osnovu podataka poslatih sa mesta događaja), taj postupak je moguće sprovesti u vrlo kratkom vremenskom periodu (podrazumeva obučenog službenika) što omogućava da se povratna informacija o zonama ugroženosti može dobiti blagovremeno za prvo reagovanje na akcident. Ograničenje je vezano za telekomunikacione veze (provajder, dostupnost mobilnog uređaja) i može se prevazići korišćenjem posebnog sistema komunikacija MUP-a RS.

Svakako će se istraživati i mogućnost razvoja rešenja koje bi omogućilo autonomno rešenje modelovanja na mobilnom uređaju. Na taj način bi se imala dodatna ušteda vremena predviđenog za prenos informacija od strane KOC-a.

Glava 5

ZAKLJUČAK

U narednom periodu broj stanovnika Zemlje će nastaviti da raste. Otvaranje novih postrojenja, stvaranje novih deponija kao i povećanje saobraćaja (drumski, vodeni i vazdušni) će u velikoj meri uticati na povećanje zagađenja vazduha, a samim tim i na kvalitet života svih ljudi. U tom smislu ekološka forenzika kao naučna oblast, u istražnom i naučnom smislu kroz različite metode i tehnike daje podršku u otkrivanju učinilaca različitih vrsta krivičnih dela iz oblasti ekologije i zaštite životne sredine.

Kontrola kvaliteta vazduha je neophodna radi zaštite atmosfere. Proučavanje i praćenje kvaliteta vazduha ima za cilj kontrolu i smanjenje sadržaja štetnih supstanci u njemu. To smanjenje treba da bude do nivoa, koji se smatraju sigurnim u odnosu na nepoželjne uticaje koje izaziva zagađeni vazduh.

Metode matematičkog modelovanja daju mogućnost objedinjavanja uzroka i posledica zagađenja atmosfere, tj. emisije polutanata u atmosferu i nivoa njene zagađenosti. Modelovanje zagađenosti atmosfere ima ulogu povratne veze između monitoringa kvaliteta atmosferskog vazduha i broja i rasporeda izvora zagađenja. Takođe, modelovanjem se kontroliše i efikasnost različitih projekata, čiji je cilj smanjenje zagađenja okolne sredine. Kao rezultat modelovanja dobija se polje koncentracije polutanata u određenoj oblasti, što nam omogućava procenu rizika za zdravlje ljudi u posmatranoj oblasti.

Kompjutersko modelovanje i vizuelizacija disperzije polutanata u vazduhu je veoma značajno za pokušaje redukcije zagađenja u prirodi. Da bi mogli da razmišljamo i kreiramo nove načine smanjenja zagađenja vazduha, neophodno je da prvo znamo kako se čestice transportuju u prirodi. Postoje dva načina za merenje zagađenja vazduha, merenja u kontrolnim tačkama i matematičko modelovanje kretanja čestica polutanata. Zbog ograničenja obe ove metode, u svetu se najčešće koristi kombinacija merenja u kontrolnim tačkama (kontrolne tačke su optimizovane u odnosu na broj i raspored mernih mesta) i matematičkog modelovanja.

Disperzioni modeli koriste se za proučavanje efekata različitih izvora na kvalitet vazduha, kao i za moguću prognozu koncentracija zagađivača. Poteškoće u modelovanju disperzije zagađivača su naročito izražene zbog nepoznavanja složenih turbulentnih procesa kod aero-zagađenja. Međutim, korišćenjem određenih pretpostavki i aproksimacija, dobijena rešenja odgovaraju posmatranim pojavama.

U tezi je analiziran model advektivne turbulentne difuzije kada se koeficijenti difuzije i brzina vetra menjaju sa visinom. Izraz kojim se opisuje normalizovana koncentracija polutanata u vazduhu za dva slučaja (kada je inverzioni sloj atmosfere na velikoj visini i kada je izvor zagađenja blizu površine tla) nađen je analitičkim putem. Do ovih izraza se došlo rešavanjem dvodimenzionalne jednačine advektivne turbulentne difuzije.

Koncentracija zagađivača se smanjuje sa povećanjem visine dimnjaka pri nepromenjenoj brzini vetra. Povećanjem visine dimnjaka maksimalna koncentracija se pomera na veće udaljenosti od dimnjaka i istovremeno vrednosti maksimalne koncentracije imaju manju vrednost. Takođe, koncentracija se menja u zavisnosti od stanja atmosfere odnosno od klase stabilnosti atmosfere, brzine vetra, brzine kretanja sumpordioksida na izlasku iz dimnjaka, temperature okoline kao i temperature na izlasku iz dimnjaka.

U daljim istraživanjima ovi matematički modeli se mogu implementirati u realne sisteme, a uz podatke dobijene praćenjem specifične površine u blizini izvora zagađenja i korišćenjem Geografskog informacionog sistema, dobija se koncentracija i pravac širenja gasovitih supstanci u odnosu na geotopografski sadržaj koji je korišćen za predikciju i analizu područja pokrivanja. Na ovaj način dobija se moćan alat za preventivno delovanje i analizu širenja štetnih materija, što bi pomoglo praćenju krizne situacije kao i sanaciju i uklanjanje opasnosti sa što manje posledica.

Hemijski akcidenti su verovatno najopasniji od svih akcidenata. Ne mogu se unapred predvideti, a mogu da budu sa veoma teškim posledicama. Zato je neophodno analizirati sva mesta u tehnološkom procesu proizvodnje, transportu i tehnološkom procesu eksploatacije i na osnovu analiza raditi na prevenciji. Prevencija može da smanji posledice, ali rizik od nastanka udesa uvek postoji.

Kada do akcidenta već dođe, potrebno je veoma brzo reagovati. Brzina je ključni faktor u evakuaciji, monitoringu i sanaciji. Od velike važnosti je i pravilno donošenje odluka, jer u suprotnom svaka greška je fatalna, a cena za to su ljudski životi.

Kada se u obzir uzmu sve činjenice, čovek se može prepoznati kao direktan ili indirektan faktor uzroka udesa. Iz tog razloga je neophodno sprovesti edukaciju ljudi, kako pripadnika

Sektora za vanredne situacije i ostalih policijskih službenika, onih koji manipulišu opasnim materijama i onih koji mogu uticati na njen transport, tako i običnog građanstva.

Studije slučaja kao i simulacije hemijskih nesreća predstavljaju jednostavne i jako pouzdane softverske metode u različitim fazama analize rizika. Nemogućnost analize podataka i simulacije u svim godišnjim dobima su ograničenja ovog rada. Budući da se analizirana studija slučaja odnosi na letnji, odnosno zimski period, zone opasnosti i procena rizika u proleće i jesen se mogu razlikovati od date studije slučaja.

Originalno mobilno aplikativno rešenje HAZMAT ASSISTANT povećava situacionu svest kod ranog reagovanja na hemijske akcidente. Aplikacija daje policijskim službenicima alternativnu i dodatnu mogućnost procene ugroženog područja kod ranog reagovanja čineći njihovo postupanje efikasnijim pogotovo u smislu zaštite života ljudi, infrastrukture, biljnog i životinjskog sveta odnosno celokupne životne sredine.

Glava 6

LITERATURA

1. Abramowitz, M., Stegun, I.A. (1972). *Handbook of mathematical functions*, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series - 55.
2. Adler, M.W., van Ommeren, J., Rietveld, P., (2013). *Road congestion and incident duration*, *Economics of Transportation*, Volume 2, Issue 4, December 2013, pp. 109–118, ISSN 2212-0122.
3. Adomian, G., (1992). *A review of the decomposition method and some recent results for nonlinear equation*, *Math. Comput. Model.* 13 (7) pp. 17-43;
4. Adomian, G. (1994). *Solving Frontier Problems of Physics: The Decomposition Method*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,;
5. Amezaga, J.M., Ambituuni, A., Werner, D., (2015). *Risk assessment of petroleum product transportation by road: A framework for regulatory improvement*, *Safety Science*, Volume 79, November 2015, Pages 324–335, ISSN 0925-7535.
6. Barry and Chorley, (1998). *Atmosphere, Weather and Climate, Seventh edition*, Taylor & Francis, New York.
7. Berlyand, M.E. (1975). *Contemporary problems of atmospheric diffusion and air pollution*. Hydromet press.
8. Bernatik, A.; Zimmerman, W.; Pitt, M.; Strizik, M.; Nevrlý, V.; Zelinger, Z. *Modelling accidental releases of dangerous gases into the lower troposphere from mobile sources*. *Process Saf. Environ. Protect.* 2008, 86, 198–207.
9. Bertilsson, J., Niehorster, D.C., Fredriksson, P.J., Dahl, M., Granér, S., Fredriksson, O., Mårtensson, J.M., Magnusson, M., PA Fransson, P. A & Nyström M. (2020). *Towards systematic and objective evaluation of police officer performance in stressful situations*, *Police Practice and Research*, 21 (6): 655-669.
10. Blackadar, A., (1997). *Turbulence and Diffusion in the Atmo-sphere: Lectures in Environmental Sciences*, Springer-Verlag.

11. Borzenkova, I.I., Turchinovich, I.Ye. (2009). *History of atmospheric composition, Environmental structure and function: climate system – Vol. II - History of Atmospheric Composition*, Eolss Publishers Co. Ltd., Oxford, United Kingdom, pp. 184-204.
12. Briggs, G.A., Gifford Jr., (1971). „*Some recent analyses of plume rise observations of plume rise observations*”, in Proceedings of the Second International Clean Air Congress, H. M. Englund and W. T. Berry, Eds., academic Press, New York, pp. 1029-1032.
13. Briggs, G., (1975). *Plume Rise Predictions, in Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses*, Workshop Froceedings, Boston, Mass., pp. 59-111, American Meteorological Society, Boston, Mass.
14. Builtjes P., Paine R., (2010). *The problem - Air pollution*, Chapter 1 of Air Quality Modeling-Theories, Methodologies, Computational techniques and Available Databases and Software, The Envirocomp institute.
15. Businger, J., (1973). *Turbulent transfer in the atmospheric surface layer*, In: Workshop on Micrometeorology (D.A. Haugen, ed.). Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA, pp 67-100.
16. Buske D, Vilhena MT, Moreira DM, Tirabassi T, (2007). *Simulation of pollutant dispersion for low wind conditions in stable and convective planetary boundary layer*. Atmos. Environ. 41, pp. 5496–5501, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.044.
17. Buske D, Vilhena MT, Moreira DM, Tirabassi T, (2007). “*An analytical solution of the advection-diffusion equation considering nonlocal turbulence closure*”. Environ. Fluid Mech., Vol. 7, pp.43-54.
18. Butcher J.C. (1987). *The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge-Kutta and general linear methods*. Wiley and Sons, New York.
19. Carter, W. N. (2008). *Disaster management: A disaster manager's handbook*. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank. of Criminal Investigation and Criminology, 69(4). pp. 279-298.
20. Chanady, G., (1973). *Turbulent diffusion in the environment*. D. Reidel Publ. Co. Publishing Company, Dordrecht, Holland. pp 205.
21. Chang, N., Y. Wei, C. Tseng, and C. Kao. (1997). *The Design of a GIS-Based Decision Support System for Chemical Emergency Preparedness and Response in an Urban Environment*. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 67-94.
22. Chitumalla, Pavan Kumar, (2008). et al. "Emergency response applications: Dynamic plume modeling and real-time routing." IEEE Internet Computing.
23. Citro, L., Gagliardi, R.V., (2012). *Risk assessment of hydrocarbon release by pipeline*. Chem. Eng. Trans. 28, pp. 85–90.
24. Crank J., (1975). *The Mathematic of Diffusion*, Clarendon Press Oxford.

25. Costa, C., Vilhena, M., Moreira, D., Tirabassi, T. , (2006). *Semi-analytical solution of the steady three-dimensional advection diffusion equation in the planetary boundary layer*; Atmos. Environ. 40.
26. Costa, C., Vilhena, M., Moreira, D., Tirabassi, T. (2009). *Semi-analytical solution of the steady three-dimensional advection-diffusion equation in the planetary boundary layer*; Atmos. Environ. 29, pp. 5659-5669.
27. Cotta, R.M., (1993). *Integral Transforms in Computational Heat and Fluid Flow*. CRC Press, Boca Raton, FL.
28. Cotta, R.M., Mikhailov, M., (1997). *Heat Conduction: Lumped Analysis, Integral Transforms, Symbolic Computation*. Wiley, Chichester, England, pp. 352.
29. Cvetković, V., Roder, G., Öcal, A., Tarolli, P., & Dragičević, S. (2018). *The role of gender in preparedness and response behaviors towards flood risk in Serbia*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(12). pp. 2761. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15122761>
30. Čvorović Z., (1999) „Odgovor na hemijski akcident“, Zadužbina Andrejević, Beograd.
31. Ćirić D.M., Tošić B.S., (1997). *Spatial temperature distribution out of doors*, International Journal of Modern Physics B, Vol. 11, No. 14, pp. 1743-1752,
32. Daly A., Zannetti P., (2007). *Air Pollution Modeling-An overview*, Chapter 2 of Ambient Air Pollution, The Arab School for Science and Technology,
33. Degrazia, G., Moreira, D., Vilhena, M., (2001). *Derivation of an eddy diffusivity depending on source distance for vertically nonhomogeneous turbulence in a Convective Boundary Layer*; J.Appl. Meteorol .40, pp 1233-1240.
34. Dingman, S. L., (2014). *Physical Hydrology*. Waveland Press, Inc.
35. Ditta, A.; Figueroa, O.; Galindo, G.; Yie-Pinedo, R., (2018). *A review on research in transportation of hazardous materials*. Socio-Econ. Plan Sci. 2018, 68, 100665.
36. Dragović, M., (2013). *Prilog razvoju i implementaciji matematičkih modela disperzije gasnih polutanata*, Magistarska teza, Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore, Podgorica.
37. Dragović, M., Stojanović, R., Škraba, A., Blečić, D., Cerović, M., Nikolić, G. (2012). *Simulacija disperzije vazdušnih polutanata iz industrijskih izvora u Matlabu*, Informacione tehnologije IT'12, Žabljak, pp. 108-111.
38. Erkut, E., and F. Gzara., (2008). *Solving the Hazmat Transport Network Design Problem*. Computers & Operations Research, Vol. 35, No. 7, pp. 2234-2247.
39. Erkut, E., and A. Ingolfsson., (2000). *Catastrophe Avoidance Models for Hazardous Materials Route Planning*. Transportation Science, Vol. 34, No. 2, pp. 165-179.

40. Erkut, E., S. A. Tjandra, and V. Verter. (2007). *Hazardous Materials Transportation*. Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 14, pp. 539-621.
41. Ermak, D., (1976). *An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source*, Atmos. Environ. 11 pp. 231-237.
42. Essa, K., El-Otaify, M., (2007). *Mathematical model for hermitized atmospheric dispersion in low winds with eddy diffusivities as linear functions of down wind distance*; Meteor. Atmos. Phys. 96, pp. 265-275.
43. Essa, K. and El-Otaify, M., (2008). *Atmospheric vertical dispersion in moderate winds with eddy diffusivities as power law functions*; Meteor. Zeit. 17, pp. 013-018.
44. Fabiano, B., Currò, F., Palazzi, E., Pastorino, R., (2002). *A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous good transportation*, Journal of Hazardous Materials, Volume 93, Issue 1, pp. 1–15, ISSN 0304-3894.
45. Fabiano, B., Currò, F., Reverberi, A.P., Pastorino, R., (2005). *Dangerous good transportation by road: from risk analysis to emergency planning*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 18, Issues pp. 4–6, 403–413, ISSN 0950-4230.
46. Fedorovich E., Kaiser R., (1998). in E. J. Plate et al. (eds.), *Buoyant Convection in Geophysical Flows*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 327-370
47. Filipović D., (2000). „*Geoprostorno modelovanje rizika u životnoj sredini*“ - doktorska disertacija, Geografski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
48. Gifford, F., (1961). *Use of routine observations for estimating atmospheric dispersion*, Nucl. Safety 2, pp. 47–57.
49. Gear C.W. (1971). *Numerical initial value problem for ordinary differential equations*. Printice-Hall, Englewood Cliffs, New York.
50. Geroliminis, N., Karlaftis, M.G., Skabardonis, A., (2009). *A spatial queuing model for the emergency vehicle districting and location problem*, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 43, Issue 7, pp. 798–811, ISSN 0191-2615.
51. Gryning, S. E., Holtslag, A. A. M., Irwin, J. S. and Sivertsen, B., (1987). “*Applied dispersion modeling based on meteorological scaling parameters*”, Atmos. Environ., 21, 1, pp. 79-89.
52. Guo, X.L., Verma, M., (2010). *Choosing vehicle capacity to minimize risk for transporting flammable materials*. J. Loss Prev. Process Ind. 23 (2). pp. 220–225.
53. Hairer E., Wanner G. (1991). *Solving ordinary differential equations. Part II: Stiff problems*. Springer, Berlin.)

54. Hanna, S.R., Briggs, G.A., Hosker, R.P., (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*. DOE/TIC 11223, Department of Energy, 102 pp.
55. Hanna, S., J. Chang, and D. Strimaitis., (1993). *Hazardous Gas Model Evaluation with Field Observations*. Atmospheric Environment.Part A.General Topics, Vol. 27, No. 15, pp. 2265-2285.
56. Hinrichsen, K., (1986). *Comparison of four analytical dispersion models for near-surface releases above a grass surface*, Atmos. Envir. 20, pp. 29-40.
57. Holmes NS, Morawska L, (2006). *A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available*, Atmos. Environ., vol. 40, No. 30, pp. 5902–5928, DOI 10.1016/j.atmosenv.2006.06.003.
58. Hong Yang, Kaan Ozbay, Kun Xie, (2014). *Assessing the risk of secondary crashes on highways*, Journal of Safety Research, Volume 49, Pages 143.e1–149, ISSN 0022-4375.
59. Horst, T., Slinn, W., (1984). *Estimates for pollution profiles above finite area sources*, Atmos. Environ. 18, pp. 1339-1346.
60. Huang C.H., (1979). *Atmpsheric Environment*, Pergamon Press Ltd.,Vol.13., pp. 453-363.
61. Hunt, K., (2005). *Emergency Response Planning and Integrating ALOHA Plume Models*. ArcNews. Summer 2005. Retrieved February 12, 2007 from <http://www.esri.com/news/arcnews/summer05articles/geneseecounty.html>.
62. Hunt, J., Weber, A., (1979). *A Lagrangian statistical analysis of diffusion from a ground level source in a turbulent boundary layer*; Q. J. R. Meteorol. Soc. 105, pp. 423-443
63. Ilijazi, V., Vulović, A., Lamovec, J., Jaćimovski, S., (2019). *Assessment of risk for transporting hazardous materials*,. XIV Internacional Conference Road Safety in Local Community, Kopaonik, April 10-13. 2019; –ISBN 978-86-7020-419,ISBN 978-86-7020-419-5, COBISS.SR-ID 275367436
64. Ilijazi Venezija, Miladinović Slobodan. (2020) *The role of software tools in risk assessment got from an accident and emissions of hazardous materials*, International scientific conference “Archibald Reis Days “, Thematic conference proceedings of international significance, University of Criminal Investigation and Police Studies, Belgrade, 2020 –ISBN 978-86-7020-453-9,ISBN 978-86-7020-190-3, COBISS.SR-ID 206896908, pp. 679-691
65. Ilijazi Venezija, Jaćimovski Stevo, Milić Nenad, Popović Brankica (2021). *Software-supported visualization of mathematical spatial-time distribution models of air-pollutant emissions*. Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 80, October 2021, pp. 915-923,
66. Indra N. Sinha, Mrinal K. Ghose & Gurdeep Singh, (2001). *Classification of air pollution dispersion models: A Critical review*. Proceedings of the National Seminar on

- Environmental Engineering with special emphasis on Mining Environment, NSEEME-2004, 19-20, March 2004;
67. Jaćimovski S., Miladinović S., Ilijazi V., Zorić V.M., Šetrajčić I.J., Armaković S., Šetrajčić J.P., (2012), *Linear expansion of air pollution*, II International Conference Ecology of Urban Areas 2012, Proceedings, ISBN-978-86-7672-172-6, COBISS-ID 274263047, pp. 62-67
 68. Jaćimovski S., Miladinović S., Radovanović R., Ilijazi V., (2013), *Distribution of the concentration of sulphur dioxide into the atmosphere from point source*, pp. 50-57, International Conference "Ecology of Urban Areas 2013" (3; 2013; Ečka), ISBN 978-86-7672-210-5, COBISS.SR-ID 280921863
 69. Jaćimovski S., Stojičić S., Miladinović S., Radovanović R., Ilijazi V., (2014), *Use of GIS technology in the assessment of the spread of air pollution.*, IV International Conference, Ecology of Urban Areas", Zrenjanin, 9-10. 10.2014, str 43-54, ISBN 978-86-7672-237-2, COBISS.SR-ID 290142983
 70. Jaćimovski S., Miladinović S., Stojičić S., Ilijazi V., (2015), *Some models of air pollution assessment in road transport*, International scientific conference „Archibald Reis Days“, Thematic conference proceedings of international significance, Academy of Criminalistic and Police Studies, Belgrade, Vol. 3, pp. 29-43, ISBN 978-86-7020-321-1
 71. Jaćimovski S., Miladinović S., Radovanović R. Ilijazi V. (2017). *Use of Gaussian mathematical model in the distribution of sulphur dioxide into the atmosphere from point source*. Tehnički vjesnik-Technical gazette, 24 (Supplement 1), 157-162, <https://doi.org/10.17559/TV-20150716093937ISSN 1330-3651>, (Print), ISSN 1848-6339 (Online)
 72. Jakala, M., Stephen D., (2007). „A GIS enabled air dispersion modeling tool for emergency management." Papers in Resource Analysis. Saint Mary's University of Minnesota Central Services Press, Winona.
 73. Joseph, S., David, S., Robert, Y., (2020). *User's Guide for the CALFUFF Dispersion Model*, Each Tech, Inc. Concord, MA 01742
 74. Kampa M, Castanas E, (2008). *Human health effects of air pollution*, Environmental Pollution, vol. 151, pp. 362-367, DOI 10.1016/j.envpol.2007.06.012.
 75. Kara, B. Y., E. Erkut, and V. Verter. (2004). *Accurate Calculation of Hazardous Materials Transport Risks*. Operations Research Letters, Vol. 31, No. 4, pp. 285-292.
 76. Kinateder, M., Gromer, D., Gast, P., Buld, S., Müller, M., Jost, M., Nehfischer, M., Mühlberger, A., Pauli, P., (2015). *The effect of dangerous goods transporters on hazard*

- perception and evacuation behavior – A virtual reality experiment on tunnel emergencies*, Fire Safety Journal, Volume 78, pp. 24–30, ISSN 0379-7112.
77. Koch, W. , (1989). *A solution of the two-dimensional atmospheric diffusion equation with height-dependent diffusion coefficient including ground-level absorption*, Atmos. Environ. 23, pp. 1729-1732.
 78. Kumar, P., Sharan, M., (2010). *An analytical model for dispersion of pollutants from a continuous source in the atmospheric boundary layer*, Centre for Atmospheric Sciences, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi India., vol. 466, No. 2114, pp.383-406.
 79. Kumar, A., Goyal, P. (2012). *An Analytical Model for Pollutants dispersion released from different sources in atmospheric boundary layer*, Journal of Environmental Research and Development, Vol. 7, No.1., pp. 131-138.
 80. Lagzi, I., Meszaros, M., Gelybo, G., Leeslossy, A., (2013). *Atmospheric chemistry*, Eötvös Loránd University.
 81. Lambert J. D. (1992). *Computational methods in ordinary differential equations*. Academic Press, New York.
 82. Lazaridis, M., (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*, Springer Science, Business Media B.V., pp. 201-232.
 83. Leelossy, A. Molnar, F. Izsak, F. Havasi, A. Lagzi, I. Meszaros R., (2014). *Dispersion Modeling of Air Pollutants in the Atmosphere: a review*. Central European Journal of Geosciences, 6(3). pp. 257-278.
 84. Li, J., Chen, Y-T. (2008). *Computational Partial Differential Equations Using MATLAB®*, CRC Press
 85. Lin CL, Tawhai MH, Hoffman EA, (2013). *Multiscale image-based modeling and simulation of gas flow and particle transport in the human lungs*, WIREs Syst Biol Med, vol. 5, pp. 643–655, DOI 10.1002/wsbm.1234.
 86. Lin, J. and Hildemann, L., (1996). *Analytical solutions of the atmospheric diffusion equation with multiple sources and height-dependent wind speed and eddy diffusivities*; Atmos. Environ. 30, pp. 239-254.
 87. Lin, J. and Hildemann, L., (1997). *A generalized mathematical scheme to analytically solve the atmospheric diffusion equation with dry deposition*, Atmos. Environ. 31, pp. 59-71.
 88. Liu, X., Saat, M.R., Barkan, C.P.L., (2013). *Integrated risk reduction framework to improve railway hazardous materials transportation safety*. J. Hazard. Mater. 260, pp. 131–140.

89. Ludwig, F.L., Dabberdt, W.F. (1976). *Comparison of Two Practical Atmospheric Stability Classification Schemes in an Urban Application*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 15, pp. 1172-1176.
90. Macdonald, R., (2003). *Theory and objectives of air dispersion modelling: Appendix A*, University of Waterloo, Waterloo.
91. Mannan, S., (2013). *Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control*. Butterworth Heinemann.book.
92. Margai, Florence Lansana., (2001). *"Health risks and environmental inequity: a geographical analysis of accidental releases of hazardous materials."* The Professional Geographer, pp. 422-434.
93. Masters, G.M. (1998). *Environmental Engineering and Science*, Prentice Hall.
94. McMullen, R., (1975) *The Change of Concentration Standard Deviations with Distance*, Journal of the Air Pollution Control Association, pp. 1057-1058.
95. Milazzo, M. F., G. Ancione R. Lisi, C. Vianello ve G. Maschio. (2009). *"Risk management of terrorist attacks in the transport of hazardous materials using dynamic geoevents"*, Journal of Loss Prevention in The Process Industries, pp. 625-633.
96. Milic Nenad, Popovic Brankica, Ilijazi Venezija and Ilijazi Erzen (2017), *Spatial data visualization as a tool for analytical support of police work Chapter 2* in Kuk&Randelovic eds. Knowledge Discovery in Cyberspace: Statistical Analysis and Predictive Modeling Nova Science Publishers, pp. 19-52, ISBN: 978-1-53610-570-4 (e-book).
97. Milić Nenad, Milidragović Dragan (2021) *The use of technologies in achieving real time situational awareness during police intervention*, International scientific conference „Archibald Reis Days“, Thematic conference proceedings of international significance, University of Criminal Investigation and Police Studies, Belgrade, 2021, pp. 271-279. ISBN 978-86-7020-470-6,ISBN 978-86-7020-190-3
98. Monin, A., (1958). *The Structure of Atmospheric Turbulence*, Theory Probab. Appl. 3, pp. 266-296,.
99. Moreira DM, Tirabassi T, Carvalho JC, (2005). *Plume dispersion simulation in low wind conditions in stable and convective boundary layers*, Atmos. Environ., vol. 39, No. 20, pp. 3643-3650, DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.03.004.
100. Moreira D.M., Vilhena M.T., Tirabassi T., Buske D. e Cotta R., (2005). *"Near-source atmospheric pollutant dispersion using the new GILTT method"*. Atmos. Environ., Vol. 39, pp. 6290-6295,

101. Moreira, D.M., Vilhena, M.T., Buske, D. e Tirabassi, T., (2006). "*The GILTT solution of the advection-diffusion equation for an inhomogeneous and nonstationary PBL*". Atmos. Environ., Vol. 40, pp. 3186-3194,
102. Moreira, D., Rizza, U., Vilhena, M. and Goulart, A., (2005). *Semi-analytical model for pollution dispersion in the planetary boundary layer*, Atmos. Environ. 39, pp. 2689-2697 .
103. Moreira, D., Vilhena, M., Tirabassi, T., Costa, C. and Bodmann, B., (2006). *Simulation of pollutant dispersion in atmosphere by the Laplace transform: the ADMM approach*. Water Air Soil Pollut, Water Air Soil Pollut. 177, pp. 411-439.
104. Moreira, D., Vilhena, M., Buske, D., Tirabassi, T., (2009). *The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere*, Atmos. Res. 92, pp. 1-17.
105. Morrison, R. D and Murphy, B. L. (2005). *Environmental Forensics: Contaminant, Specific Guide*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-507751-4.X5021-6>
106. Neira M., (2016). World Health Organization, *Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*.
107. Nieuwstadt, F. and Van Dop, (1982). *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*, D. Reidel Publishing Company.
108. Nieuwstadt, F., (1980). *An analytic solution of one-dimensional time dependent diffusion equation in the atmospheric boundary layer*, Atmos.Environ. 14, pp. 1361-1364.
109. Nieuwstadt, F. and van Ulden, A., (1978). *A numerical study on the vertical dispersion of passive contaminants from a continuous source in the atmospheric surface layer*, Atmos. Environ. 12, pp. 2119-2124.
110. Nikezić, D.P. (2016). *Matematičko modelovanje rasprostiranja zagađujućih materija u vazduhu u okolini nuklearnih i industrijskih objekata*, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
111. Nikezić D.P., (2017). *Modeling air concentration of fly ash in Belgrade emitted from thermal power plants TNTA and TNTB*, Process Safety and Environmental protection 106, pp. 274-283.
112. Patel, M. H., and A. J. Horowitz. (1994). *Optimal Routing of Hazardous Materials Considering Risk of Spill*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 28, No. 2, pp. 119-132.
113. Pasquill, F. (1961). *The estimation of the dispersion of windborne material*, The Meteorological Magazine, vol 90, No. 1063, pp 33-49.
114. Pivato Alberto, Gwinett Claire, Varghese George, (2020). *Environmental Forensics / DETRITUS / Volume 10 - 2020 / pages III-V*. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13963>;

115. Puliafito, E., M. Guevara, and C. Puliafito, (2003). *Characterization of Urban Air Quality using GIS as a Management System*. Environmental Pollution, Vol. 122, No. 1, pp. 105-117.
116. Rajković, B., Mesinger, F. (2002). *Mikrometeorologija*. Beograd: Univerzitet u Beogradu.
117. Ramasamy, E.V., Abbasi, T., Khan, F.I., & Abbasi, (2013). S.A. *Regional EIA and Risk Assessment in a Fast Developing Country*. New York: Nova Science.
118. Richtmayer R.D., Morton K.W. (1967). *Difference methods for initial value problems*. Interscience Publishers, New York.
119. Ristić, S. (2015). *Unapređenje modela angažovanja interventnih timova u hemijskim akcidentima izazvanim transportom opasnih materija*, Doktorska disertacija, Fakultet bezbednosti, Univerzitet u Beogradu.
120. Roberts, O., (1923). *The theoretical scattering of smoke in a turbulent atmosphere*; Proce. Roy. Soc. London 104, pp. 640-654.
121. Schnelle, K.B. and Dey, (1999). *P.R Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide* McGraw-Hill Professional. ISBN 0-07-058059-6.
122. Seinfeld, J. H., S. N. Pandis, (2016). *Atmospheric chemistry and physics, from air pollution to climate change*, a Wiley-interscience publication, J.Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
123. Sharan, M., Yadav, A.K., Sing, M.P. (1995). *Comparison of sigma schemes for estimation of air pollutant dispersion in low winds*, Atmospheric Environment, Pergamon Press Ltd. Vol. 29, pp. 2051-2059.
124. Sharan, M., Singh, M. and Yadav, A., (1996). *A mathematical model for the atmospheric dispersion in low winds with eddy diffusivities as linear function of downwind distance*; Atmos. Environ. 30, pp. 1137-1145.
125. Sharan, M. and Modani, M. ,(2005). *An analytical study for the dispersion of pollutants in a finite layer under low wind conditions*; Pure appl. geophys. 162, pp. 1861-1892.
126. Sharan, M. and Modani, M., (2006). *A two-dimensional analytical model for the dispersion of air-pollutants in the atmosphere with a capping inversion*; Atmos. Environ. 40 34793489,
127. Sharan, M. and Kumar, P., (2009). *An analytical model for crosswind integrated concentrations released from a continuous source in a finite atmospheric boundary layer*; Atmos. Environ. 43, pp. 2268-2277.
128. Smith, F. (1957). *The diffusion of smoke from a continuous elevated point source into a turbulent atmosphere*; J. Fluid Mech. 2, pp. 49-76.
129. Smith, F., (1962). *The problem of deposition in atmospheric diffusion of particulate matter*, J. atmos. Sci. 19, pp. 429-434,

130. Smith G. D. (1978). *Numerical solution of partial differential equations: Finite differences*. Oxford University Press, Oxford.
131. Stetter H. J. (1973). *Analysis of discretisation methods for ordinary differential equations*. Springer, Berlin.
132. Stockie J.M., (2011). *The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling*, SIAM Review, Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 53, No. 2, pp. 349–372
133. Stull, R. B. (2003). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, pp.357–358, Kluwer Acad., Dordrecht.
134. Sutton, O.G. (1953). *Micrometeorology*, McGraw-Hill Book Company, New York.
135. Sweta, L. O. (2014). *Early warning systems and disaster management using mobile crowdsourcing*. International Journal of Science and Research, 3(4). pp. 356-365.
136. Therese, J., Fajardo, B., Oppus, C., (2009). “*A mobile disaster management system*,”International Journal of Communications, vol. 3, issue 3.
137. Thompson, R., (1998). *Controlled Atmosphere Storage of Fruits and Vegetables*. Routledge, New York, NY.
138. Tirabassi, T., Buske, D., Moreira, D. and Vilhena, M., (2008). *A two dimensional solution of the diffusion equation with dry deposition to the ground*, J. Appl. Meteorol. Climatol. 47, pp. 2096-2104.
139. Tirabassi, T., Moreira, D., Vilhena, M. and Goulart, A., (2010). *A multi-layer model for pollutants dispersion with dry deposition to the ground*, Atmos. Environ. 44, pp. 1859-1865.
140. Tirabassi, T., Tiesi, A., Vilhena, T., Bodmann, J. and Buske, D. (2011). *An Analytical simple formula for the ground level concentration from a point source*, Atmos. 2, pp. 21-35.
141. Tomaszewski, B., (2003). *Geographic Information Systems (GIS) for Disaster Management*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York.
142. Tošić B.S., Šetrajčić J.P., Jaćimovski S.K., (2018)., *Metodi teorijske fizike I*, KPA, Beograd
143. Turner, D., (1994). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, 2nd Edition, CRC Press, ISBN 1-56670-023-X
144. Van der Houven P.J. (1977). *Construction of integration formulas for initial value problems*. North-Holland, Amsterdam.
145. Verhage, A., Noppe, J., Feys, Y & Ledegen E.(2018). *Force, stress and decision making within the Belgian police. The impact of stressful situations on police decision making*. Journal of Police and Criminal Psychology, 33, p.345–357.

146. Victoria, M., Pineda, G., (2012). *“Exploring the potentials of a community-based disaster risk management system, the Philippine experience”*, International Journal of Innovation, Management and Technology, vol.3, no.6.
147. Vilhena M.T., Rizza U., Degrazia G., Mangia C., Moreira D.M., Tirabassi T., (1998). *“An analytical air pollution model: development and evaluation”*. Contribution to Atmospheric Physics, pp. 315-320.
148. Vilhena M.T., Costa C.P., Moreira D.M. and Tirabassi T., (2008). *“A semianalytical solution for the three-dimensional advection-diffusion equation considering non-local turbulence closure”*, Atmospheric Research, Vol. 90, pp 63-69,
149. Vulović Aleksandra, Ilijazi Venezija, Jaćimovski Stevo. (2017), *Analysis of turbulent diffusion model with variable coefficients in case of stationary point source*, Thematic Conference Proceedings of International Significance Archibald Reiss Days, Academy of Criminalistic and Police Studies, Belgrade, ISBN 978-86-7020-387-7, vol. 3, pp. 307-320
150. Vulovic Aleksandra, Ilijazi Venezija, Lamovec Jelena, Jacimovski Stevo. (2018), *Assessment of air pollution distribution from radioactive sources and its impact on human health*, Thematic Conference Proceedings of International Significance Archibald Reiss Days, Academy of Criminalistic and Police Studies, Belgrade , ISBN 978-86-7020-408-9, vol. 2, pp. 475-483
151. Zannetti, P., (2013) *Air Pollution Modeling Theories, Computational Methods and Available Software*, Computational Mechanics Publications, Springer Science & Business Media, ISBN 978-1-4757-4467-5.
152. Zannetti P., (1990). *Air Pollution Modeling*, Springer Science+Business Media, LLC, New York.
153. Zhang, J., J. Hodgson, and E. Erkut. (2000). *Using GIS to Assess the Risks of Hazardous Materials Transport in Networks*. European Journal of Operational Research, Vol. 121, No. 2, pp. 316-329.
154. Zhang Z, Kleinstreuer C, (2001). *Effect of Particle Inlet Distributions on Deposition in a Triple Bifurcation Lung Airway Model*, Journal of Aerosol Medicine, vol. 14, No. 1, pp. 13-29, DOI 10.1089/08942680152007864.
155. Zauderer, E. (2006). *Partial Differential Equations of Applied Mathematics*, J.Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
156. Štrbac, D., Petrović-Gegić, A., Mirosavljević, Z., (2019). *Uvod u inženjerstvo zaštite životne sredine*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.
157. Wazwaz A.M. (1998), *A comparison between Adomian decomposition method and Taylor series method in the series solutions*, Applied Mathematics and Computation 97, pp. 37-44

- Applied Mathematics and Computation* 97 (1998), 37~14, Elsevier
158. West, D., Valentini, E., (2013). "How mobile devices are transforming disaster relief and public safety", *Issues in Technology Innovation*, p. 5.
 159. Wortmann, S., Vilhena, M., Moreira, D. and Buske, D., (2005). *A new analytical approach to simulate the pollutant dispersion in the PBL*, *Atmos. Environ.* 39, pp. 2171-2178.
 160. Yamamoto, G. and Shimanuki, A., (1961). *Numerical Solution of the Equation of Atmospheric Turbulent Diffusion*; *Sci. Reports Tohoku Univ.*, ser V, Geophysics 12, pp. 24-35.
 161. Yang, J., Li, F., Zhou, J., Zhang, L., Huang, L., Bi, J., (2010). *A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008*. *J. Hazard. Mater.* 184 (1-3). pp. 647-653
 162. Yeh, G. and Brutsaert, W., (1971). *A solution for simultaneous turbulent heat and vapor transfer between a water surface and the atmosphere*; *Bound. Layer Meteor.* 2, pp. 64-82.
 163. Yeh, G. and Tsai, Y., (1976). *Analytical three-dimensional transient modeling of effluent discharges*, *Water Resour. Res.* 12, pp. 533-540.
 164. Yonglong, L., Guilian Wang, Jian Xu., (2000). *Application of GIS technology in chemical emergency response*, *Journal of Environmental Sciences (China)*.
 165. izvor: www.cerc.co.uk, pristupljeno 6.6.2021
 166. izvor: <https://ceres.vlahi.com/response.html>, pristupljeno 6.6.2021
 167. izvor: <http://pocajt.tmf.bg.ac.rs/gasovi/Docs/Modelovanje%20atmosferske%20disperzije.pdf>, pristupljeno 12.03.2021
 168. izvor: <http://www.edf.com>, pristupljeno 10.05.2021
 169. izvor: <http://https://www.epa.gov/comeo/aloha-software>, pristupljeno 17.05.2021
 170. izvor: http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_alt.htm, pristupljeno 17.05.2021
 171. izvor: http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm, pristupljeno 17.05.2021
 172. izvor: <http://www.epa.vic.gov.au/air/epa>, pristupljeno 17.05.2021
 173. izvor: <http://www.esri.com/news/arcnews/summer05articles/genesee-county.html>, pristupljeno 19.05.2021
 174. izvor: <http://http://www.risoe.dtu.dk>, pristupljeno 21.07.2021
 175. izvor: http://www.smhi.se/foretag/m/dispersion_eng.htm, pristupljeno 10.05.2021
 176. izvor: <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>, pristupljeno 17.05.2021
 177. Давыдов А.С., (1973) *Квантовая механика*, Наука, Москва
 178. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М., (1970), *Уравнения в частных производных математической физики*, Высшая школа, Москва

179. Марчук Г.И., (1982). *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*, Москва, Наука,.

Glava 7

DODATAK 1

7.1 Operatorsko rešenje jednačine molekulske difuzije

Transport primesa kroz atmosferu se ostvaruje različitim mehanizmima. Osnovni mehanizmi su molekulska difuzija i advektivna difuzija. Molekulska difuzija se ostvaruje zahvaljujući razlici u koncentracijama primesa između pojedinih delova atmosfere duž gradijenta koncentracija. Jednačinu molekularne difuzije rešavamo operatorskim metodom (Давыдов А.С., 1973; Ćirić & Tošić, 1997).

Jednačina molekulske difuzije u jednoj dimenziji se može napisati u obliku:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7.1.1)$$

Ako se traži partikularno rešenje za granični slučaj, ono je oblika:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = Q \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) \quad (7.1.2)$$

Uvedimo operatore:

$$\hat{T}_t = \frac{\partial}{\partial t}; \quad \hat{R}_x = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (7.1.3)$$

Tada se jednačina difuzije (7.1.2) može napisati kao:

$$(\hat{T}_t - \hat{R}_x) C = Q \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) \quad (7.1.4)$$

čije je rešenje:

$$C = (\hat{T}_t - \hat{R}_x)^{-1} Q \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) \quad (7.1.5)$$

Izvršimo odgovarajuće transformacije

$$(\widehat{T}_t - \widehat{R}_x)^{-1} = \left[\widehat{T}_t (1 - \widehat{T}_t^{-1} \widehat{R}_x) \right]^{-1} = (1 - \widehat{T}_t^{-1} \widehat{R}_x)^{-1} \widehat{T}_t^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} \widehat{T}_t^{-n-1} \widehat{R}_x^{-1} \quad (7.1.6)$$

i napišimo relaciju u razvijenom obliku, izražavajući Dirakove funkcije u integralnom obliku (Abramowitz & Stegun, 1972).

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \widehat{T}_t^{-n-1} \widehat{R}_x^{-1} e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} dk dt \quad (7.1.7)$$

Nadalje, operatori deluju na funkcije s desne strane i dobija se:

$$\widehat{R}_x e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} = D(-ik)^2 e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} = -Dk^2 e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} \quad (7.1.8)$$

$$\widehat{T}_t e^{-k(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} = -i\omega e^{-k(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} \quad (7.1.9)$$

$$\widehat{R}_x e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} = D(-ik)^2 e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} = -Dk^2 e^{-ik(x-x_0) - i\omega(t-t_0)} \quad (7.1.10)$$

Sada se izrazi (7.1.8)-(7.1.10) zamene u (7.1.7). Izraz za sumu pod integralom je:

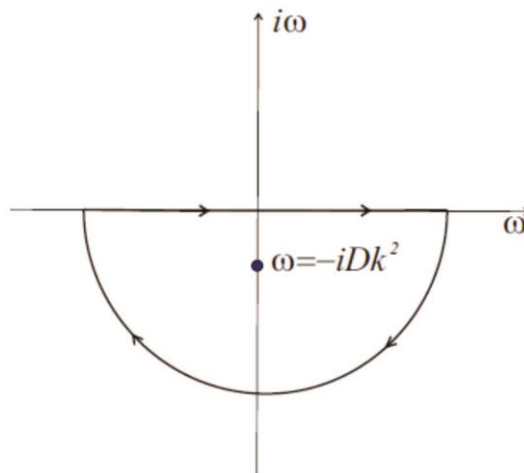
$$\sum_{n=0}^{\infty} (-i\omega)^{n-1} (-Dk^2)^n = \frac{1}{-i\omega} \frac{1}{1 - \left(\frac{-Dk^2}{-i\omega} \right)} = \frac{1}{-i\omega} \frac{i\omega}{i\omega - Dk^2} = -\frac{1}{i\omega - Dk^2} = \frac{i}{\omega + iDk^2} \quad (7.1.11)$$

Koncentracija se, posle navedenih transformacija, piše u obliku:

$$C = \frac{Qi}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik(x-x_0)} dk \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega(t-t_0)}}{\omega + iDk^2} dt \quad (7.1.12)$$

Integral $I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\omega(t-t_0)}}{\omega + iDk^2} dt$ se rešava teorijom reziduuma funkcije kompleksnih promenljivih.

Integral ima pol I reda koji iznosi $\omega = -iDk^2$.



Slika 47. Kontura obilaska pola podintegralne funkcije u kompleksnoj ravni

$$\text{Res}(f, z_0) = \frac{1}{(n-1)!} \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{d^{n-1}}{dz^{n-1}} [f(z)(z-z_0)^n]$$

Za pol prvog reda kao u našem slučaju rezuduom je

$$\text{Res I} = \lim_{z \rightarrow z_0} f(z)(z-z_0) = e^{-i(-iDk^2)(t-t_0)} = e^{-Dk^2(t-t_0)}$$

Integral je $I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\omega(t-t_0)}}{\omega + iDk^2} dt = -2\pi i \text{Res}(f, z_0) = -2\pi i e^{-Dk^2(t-t_0)}$ (znak $-$ potiče od smera obilaska konture). Iz ovoga nalazimo izraz za koncentraciju polutanata pri molekularnoj difuziji

$$C = \frac{Qi}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} (-2\pi i) e^{-ik(x-x_0) - Dk^2(t-t_0)} dk = \frac{Q}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-Dk^2(t-t_0) - ik(x-x_0)} dk \quad (7.1.13)$$

Integral ovog tipa ima rešenje oblika $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-a\eta^2 - 2b\eta} d\eta = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{\frac{b^2}{a}}$. Kako je u našem slučaju

$a = D(t-t_0)$; $2b = i(x-x_0)$, konačno nalazimo rešenje jednačine molekulske difuzije u obliku:

$$C = \frac{Q}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{D(t-t_0)}} e^{\frac{[i(x-x_0)]^2}{4D(t-t_0)}} = \frac{Q}{\sqrt{4\pi D(t-t_0)}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4D(t-t_0)}} \quad (7.1.14)$$

Glava 8

DODATAK 2

8.1 Softverski paketi za odgovarajuće modele disperzije zagađenja vazduha

Tabela 9. Tabelarni prikaz postojećih softverskih paketa za odgovarajuće modele disperzije zagađenja vazduha (Indra, Mrinal & Gurdeep, 2001).

AEROPOL	Razvijen u Estoniji. Program se oslanja na stacionarni Gausov model disperzije i omogućava korišćenje tačkastih, terenskih i linijskih izvora i izračunavanje suvog i vlažnog taloženja. AEROPOL je opisao Kasik (Kassik, 1997) (Kassik, 2000) i potvrdio na međunarodno prihvaćen način.
AIRVIRO	Razvijen u Švedska i koristi se za proračune urbanog zagađenja vazduha (Gausov model numeričke disperzije)
ALOHA	ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) je program za procena transporta gasa i disperzije u atmosferi u vanrednim uslovima. Ona uzima u obzir i toksikološka i fizička svojstva zagađivača i karakteristike lokacije koja se proučava, kao što su atmosferski uslovi i uslovi ispuštanja.
APRAC-3	Program se koristi za izračunavanje prosečne vrednosti ugljen -monoksida po urbanim lokacijama po satu.
BLP	Program koristi model plutajuće linije perjanice Gausovog modela disperzije koji se koristi u industrijskim postrojenjima
CALINE-3	Izračunava koncentraciju ugljen-monoksida u blizini autoputeva i magistralnih ulica i puteva.
CALINE 4	Poboljšana verzija CALINE 3 koja uključuje emisije iz autoputeva, raskrsnica i parkirališta.
CALMPRO	Program razvijen od strane EPA na bazi Gausovog modela. Model izračunava koncentracije po satima.
CAP88-PC	Razvili su ga USEPA i OAK Ridge Nacionalna laboratorija, a koristi ih Institut za fiziku u Estoniji za proučavanje disperzije iz industrijskih postrojenja.
CDM-2	Ovaj program koristi model disperzije u kome se disperzija određuje na osnovu dugoročne nestabilne koncentracije zagađivača.

COMPLEX I	Program se bazira na merenjima u više tačaka sa podešavanjem terena. Takođe, koristi datum i meteorološke podatke za izračunavanje koncentracije pomoću DOLINE algoritama
COMPLEX II	Sličan program kao i COMPLEX I sa tom razlikom što se kod ovog modela koriste Paskvil-Giford (Paskuill-Gifford) sigma ipsilon parametri.
CCOMPLEX/PFM	Modifikovana verzija COMPLEX I i II, koja sadrži opciju za proračuni potencijalnog toka disperzije.
DEGADIS	Program koristi model disperzije gustog gasa (The Dense Gas Dispersion Model -DEGADIS). To je matematički model disperzije koji se može koristiti za modelovanje disperzije opasnih gasova u atmosferu. Njegov opseg primenljivosti uključuje emisije opasnih gasova kod kontinualanih izvora, trenutnih izvora i izvora sa ograničenim trajanjem emisije
DIMULA	DIMULA (Modeli disperzije više izvora) koristi simulacioni model zasnovan na aproksimaciji Gausovog oblaka, sa posebnom korekcijom koja se odnosi na mirne uslove (gde klasična analitička formula nije primenljiva). Obuhvata tačkaste, površinske ili linijske izvore i ravne terene. DIMULA ima korisnički interfejs koji omogućava lak unos podataka i prikaz izlaznih koncentracija.
HIWAY 2	Program koristi model kod proračuna koncentracije zagađivača niz vetar na kolovozima puteva iz sata u sat.
INPUFF	Program je zasnovan na Gausovom puff modelu i koristi se kod analiza oslobađanja zagađujućih supstanci u periodu od nekoliko minuta do nekoliko sati
ISCLT	Program se koristi kod kontinualnih industrijskih izvora i bazira se na stacionarnom Gausovom modelu, koji se može koristiti za izračunavanje dugoročnih koncentracija zagađivača iz industrijskih izvora.
ISCST	Program se koristi za izračunavanje kratkoročnih koncentracija zagađivača iz industrijskog izvora. Zasnovan je na Gausovom modelu stacionarnog stanja.
KAPPA-G	Program simulira zagađenje vazduha iz tačkastog izvora koristeći Gausovu aproksimaciju za horizontalnu difuziju Koristi informacije o vertikalnom profilu vetra i na osnovu nje vrši procenu. Program uzima u obzir više tačkastih izvora i više vremenskih intervala, od kojih svaki karakterišu različiti meteorološki uslovi.
LONGZ	Program je dizajniran za izračunavanje dugotrajne koncentracije zagađivača emitovanih od većeg broja izvora u urbanim područjima.
MESOPLUME	Program koristi model perjanice (ili „savijenog pramena“) dizajniran za izračunavanje koncentracije SO ₂ i SO ₄ na velikoj udaljenosti.
MESOPUFF-2	Program je kreiran na bazi Gausovog puf modela sa regionalnom skalom promenljive putanje, dizajniran da simulira kvalitet vazduha više tačkastih izvora na velikim udaljenostima.
MPTER	Program kreiran na bazi Gausovog modela sa više tačkastih izvora i sa opcionim vremenskim parametrima.

MPTDS	Program predstavlja modifikaciju MPTER programa koji uzima u obzir gravitaciju, promenu temperature i taloženje zagađivača.
OCD	Program dizajniran za modele disperzije na moru i priobalju. Koristi direktno merenje atmosfereke turbulencije za izračunavanje koncentracija na kopnu iz emisije na moru.
PAL-2	Program koristi Gausov stacionarni algoritam i vrši procenu koncentracije stabilnih izvora zagađenja iz tačkastih, površinskih i linijskih izvora.
PALDS	Modifikovani program PAL -2, koji ima sposobnost da eksplicitno tretira gravitaciono taloženje i smanjenje zagađivača taloženjem prilikom proračunate koncentracije.
PBM	Jednostavan stacionarni numerički program koji računa po satu prosek ozona i drugih fotohemijskih zagađivača.
PRISE	Program PRIZE (Plume Rise and Dispersion Model) izračunava sve faze ravnotežne i neravnotežne disperzije, uzimajući u potpunosti u obzir meteorološke uslove okoline.
PTPLU-2	Program koristi Gausov model disperzije tačkastih izvora za procenu maksimalne površinske koncentracije za jednočasovne koncentracije.
PTDIS	Program omogućava procenu trenutne koncentracije niz vetar od izvora do udaljenosti koju odredi korisnik.
PTMAX	Program vrši analizu maksimalnih kratkoročnih koncentracija iz Tačkastog izvora u funkciji klasa stabilnosti i brzine vetra.
PTMTP	Program procenjuje koncentracije iz više tačkastih izvora, proizvoljno lociranih na ili iznad nivoa zemlje.
PULVUE-2	Program je dizajniran da predvidi transport, atmosfereku difuziju, hemijsku konverziju, optičke efekte i površinsko taloženje prilikom emisije zagađivača iz tačkastih izvora.
ROADWAY-2	Program koristi numerički model konačne razlike i može da predviđa koncentraciju zagađivača u blizini kolovoza. Sličan CALINE-X
SHORTZ	Program je dizajniran za izračunavanje trenutnih koncentracija zagađujućih materija emitovanih iz velikog broja tačkastih izvora u urbanim sredinama.
TCM2B	Program je dizajniran u Teksaskom klimatološkom institutu, koristi Gausov model perjanice za određivanje dugoročnih prosečnih koncentracija zagađujućih materija.
TEM8AB	Program je dizajniran na bazi stacionarnog Gausovog puff modela za određivanje kratkoročnih koncentracija zagađujućih materija.
VALLEY	Program koristi varijantu Gausovog modela disperzije koji omogućava izračunavanje koncentracija na bilo kojoj vrsti terena.