Izbor visine dimnjaka UPOV-Osijek s obzirom na kriterij emisije sumporovodika, merkaptana i amonijaka

Matić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:501160

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Iva Matić

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Iva Matić

Izbor visine dimnjaka UPOV-Osijek s obzirom na kriterij emisije sumporovodika, merkaptana i amonijaka

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Iva Matić

BROJ INDEKSA: 518

KATEDRA: **Katedra za privrednu hidrotehniku**

PREDMET: Modeliranje toka i pronosa u podzemlju

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Izbor visine dimnjaka UPOV-Osijek s obzirom na kriterij emisije sumporovodika, merkaptana i amonijaka

Opis zadatka: Na osnovu dobivenih podloga (situacija), podataka o mjerenim vrijednstima vjetra s mjerne postaje Aerodrom-Čepin, te podacima o emisijama spojeva sumporovodika, merkaptana i amonijaka, kandidat treba:
-pregledati zakonsku regulativu iz područja problematike diplomskog rada te jasno prikazati zakonom definirane granične vrijednosti koncentracija navedenih spojeva
-napraviti obradu mjerenja vjetra
-dati prikaz i tumačenja varijabilnosti polja koncentracije unutar oblaka za slučaj advekcije kroz četiri statistička momenta
-odabrati model za kvantifikaciju varijance konentracije unutar oblaka za slučaj uključenja turbulentne difuzije
-Beta distribucijom opisati varijacije koncentracije u stacionarnim uvjetima ispuštanja navedenih spojeva
-na osnovu 95% -nih fraktila koncentracije pojedinog spoja dokazati i propisati minimalnu visinu dimnjaka za koju neće doći do prekoračenja zakonskih normi u pogledu mjerenih koncentracija

U Splitu, 4.3. 2016.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Veljko Srzić

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Prof. dr. sc. Ivica Boko

Izbor visine dimnjaka UPOV-Osijek s obzirom na kriterij emisije sumporovodika, merkaptana i amonijaka

Sažetak: Izgradnjom Uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u Osijeku predviđen je dimnjak za ispuštanje plinova u atmosferu. Ispuštanje kemijskih spojeva utječe na kvalitetu života u okolini UPOV-a pa stoga zakon propisuje maksimalne dozvoljene vrijednosti koje smiju biti zabilježene. Za simulaciju oblaka i kvantifikaciju koncentracije korišten je advektivni model sa utjecajem turbulentne difuzije. Promjenom visine dimnjaka do konačnog zadovoljenja zakonom propisanih vrijednosti na rubu postrojenja dolazi se do konačne visine dimnjaka.

Ključne riječi:

Osijek, uređaj za pročišćavanje otpadnih voda, dimnjak

Wastewater treatment plant Osijek funnel height selection based on the criteria hydrogen sulfide, mercaptan and ammonium emission criteria

Abstract: Work deals with concentration characterization caused by hydrogen sulfide, mercaptan and ammonium emission from the funnel.Considered transport mechanisms are avdection and turbulent diffusion. Funnel height is investigated based on the concentration treshold proposed by legislation.

Keywords:

Osijek, wastewater treatment plant, funnel

Zahvaljujem mentoru doc.dr.sr Veljku Srziću na pomoći pri pisanju ovoga rada.

Hvala kolegama i prijateljima koji su mi studijski put učinili lakšim i ljepšim.

Posebno hvala mojoj obitelji na velikoj podršci tijekom studiranja.

Sadržaj

1. Uvod ... 3
2. Izvori onečišćenja i udaljenosti do granica područja UPOV-Osijek ... 4
3. Zakonska regulativa ... 5
4. Analiza vjetrova ... 8
4.1. Karakteristike vjetrovne klime u Hrvatskoj ... 8
4.2. Mjerenje vjetra ... 10
4.3. Tehničke karakteristike mjernog uređaja ... 11
4.4. Rezultati mjerenja ... 13
5. Opis transportnih mahanizama obuhvaćenih analizom ... 21
5.1. Matematički modeli za širenje efluenata u atmosferi ... 21
5.2. Opća jednadžba difuzije efluenata ... 22
5.3. Gaussov model difuzije iz točkastog izvora ... 25
5.4. Parametri difuzije ... 27
5.5. Nedostaci Gaussovog modela difuzije ... 28
6. Analiza bezdimenzionalnih momenata ... 30
6.1. Analiza i usporedba momenata za čisti advektivni transport ... 32
6.1.1. Usporedba 2D i 3D slučaja raspršenja ... 32
6.1.2. Analiza momenata za 3D slučaj na različitim visinama od izvora onečišćenja 35
6.2. Analiza i usporedba momenata koncentracije za advektivno-difuzni transport ... 42
6.2.1.Analiza varijance koncentracije unutar strukture oblaka ... 45
6.2.2.Analiza varijance koncentracije unutar strukture oblaka u x-y ravnini ... 47
6.2.3.Utjecaj brzine vjetra na varijancu koncentracije ... 52
6.2.4.Utjecaj brzine vjetra na varijancu koncentracije u x-y ravnini ... 54
6.2.5.Utjecaj turbulentne difuzije na varijancu koncentracije ... 55
6.2.6.Utjecaj turbulentne difuzije na varijancu koncentracije u x-y ravnini ... 57
7. Beta distribucija, Beta(α, β) ... 58
7.1. Beta distribucija za advektivni transport ... 59
7.2. Beta distribucija za advektivno-difuzivni transport ... 60
7.2.1. Analiza vrijednosti CDF Beta distribucije ... 60
7.2.2.Utjecaj turbulentne difuzije na CDF Beta distribucije ... 68
8. Kvantifikacija 95% fraktila koncentracije za potrebe izbora visine dimnjaka ... 73
8.1. Vrijednosti 95% fraktila za sumporovodik i merkaptane ... 73
8.2. Vrijednosti 95% fraktila za amonijak ... 73

9. Izbor najkritičnije kombinacije ulaznih parametara za procjenu 95% - nog fraktila koncentracije 74
10. Zaključak 81
11. Literatura 83

1. Uvod

Atmosfera je veoma kompleksan, fizikalno - kemijski sustav stoga je modeliranje tog sustava izuzetno složeno. Kada je riječ o utjecajima industrijskih izvora onečišćenja na okoliš, redovito nas zanimaju koncentracija i rasprostiranje efluenata (onečišćivača) u atmosferi, njihovo taloženje na zemljištu, odnosno prizemne koncentracije onečišćivača. Proces rasprostiranja nekog efluenta i njegova koncentracija ovisi o kretanju atmosferskih masa (vjetrova), miješanju zraka po visini, kemijskim reakcijama efluenata i/ili radioaktivnom raspadu u atmosferi te brzini taloženja. [14] U ovom radu razmatra se utjecaj brzine vjetra, udaljenosti od izvora onečišćenja, difuzije i visine ispuštanja onečišćenja na vrijednosti koncentracija na rubu promatranog područja na visini 1(m) iznad tla.

U razmatranje se uzimaju ispuštanja sumporovodika (H_2S), merkaptana (CH_3-SH; C_2H_5-SH) i amonijaka (NH_3) iz dimnjaka UPOV-Osijek te se određuje potrebna visina dimnjaka da bi se sprječile štetne posljedica po ljudsko zdravlje, kvalitetu življenja i okoliš u cjelini.

Transport navedenih spojeva u atmosferi ponajprije se objašnjava mehanizmima advekcije i turbulentne difuzije. Utjecaj advekcije promatran je kroz četiri statistička momenta polja koncentracije i funkciju gustoće koja je u potpunosti definirana odnosom učestalosti nultih i inicijalnih vrijednosti koncentracije.

Turbulentna difuzija transportni je mehanizam koji u najvećoj mjeri utječe na redukciju vrijednosti koncentracije unutar oblaka. Utjecaj turbulentne difuzije analiziran je kroz drugi statistički momenta i dvoparametarsku funkciju gustoće vjerojatnosti.

Procjena polja koncentracije na rubu UPOV-a Osijek provedena je temeljem vrijednosti 95 % fraktila. Usporedbom sa zakonski propisanim vrijednostima dolazi se do minimalne visine dimnjaka UPOV-a Osijek.

2. Izvori onečišćenja i udaljenosti do granica područja UPOV-Osijek

Pet je izvora zagađenja na području UPOV-Osijek:
-četiri difuzna izvora: 471/472 - Anoksični i aerobni biološki sustav
482 - Sekundarni taložnici
413 - Komora za uklanjanje pijeska i masti
442 - Primarni taložnik
-jedan točkasi izvor: 800 - Jedinica kontrole neugodnih mirisa(dimnjak)

U Tablici 2.1. se vidi količina tvari koju pojedini izvor onečišćenja ispušta. [22]

Tablica 2.1.Detaljne vrijednosti emisija za H_2S, CH_3-SH (C_2H_5-SH) i NH_3 iz pojedinih dijelova UPOV-Osijek

				Otpuštene tvari (mg/hm^2)		
Broj	**Specifikacija**	**Volumensko otpuštanje (Nm^3/h)**	**Površina (m^2)**	**H_2S**	**CH_3-SH C_2H_5-SH**	**NH_3**
482	Sekundarni taložnici		3312,00	0,50	0,10	0,10
471/472	Anoksični i aerobni biološki sustav		1511,00	0,50	0,10	0,10
442	Primarni taložnik		720,00	1,00	1,00	1,00
413	Komora za uklanjanje pijeska i masti		192,00	80,00	10,00	15,00
800	Jedinica kontrole neugodnih mirisa	20533,00	mg/m^3	0,025	0,025	0,05

Granične vrijednosti emitiranih plinova trebaju biti provjerene na granici UPOV-Osijek za reprezentativne smjerove vjetra. Udaljenosti od izvora onečišćenja do granice UPOV-Osijek su prikazane u Tablici 2.

Tablica 2.2.Udaljenosti izvora onečišćenja od granice UPOV-Osijek ovisno o smjeru vjetra

SMJER VJETRA	**UDALJENOST IZVORA ONEČIŠĆENJA OD GRANICE UPOV (m)**				
	800	**471/472**	**482**	**413**	**442**
N	109,5	108,5	200,3	134,6	162,0
NE	86,0	108,8	196,2	133,2	150,7
E	74,0	150,5	251,8	113,5	162,3
SE	120,0	170,0	106,9	105,7	105,0
S	94,3	127,5	65,1	80,0	74,9
SW	135,8	164,2	89,2	114,0	97,3
W	534,2	418,0	355,6	494,0	445,1
NW	253,8	232,0	216,7	293,8	236,3

3. Zakonska regulativa

S obzirom na emisije onečišćujućih tvari u zrak iz UPOV-Osijek kakvoća zraka u okolnom području je ugrožena. Da bi se izbjegle, sprječile ili smanjile štetne posljedica po ljudsko zdravlje, kvalitetu življenja i okoliš u cjelini potrebno je držati se odluka donesenih u Hrvatskom saboru:

-Zakon o zaštiti zraka (NN 130/11)

-Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 117/12)

-Uredba o razinama onečišćujućih tvari u zrak (NN 117/12)

Prema zakonu o zaštiti zraka nepokretni izvori onečišćenja, kakve imamo na UPOV "Osijek", se dijele na:

– točkasti: kod kojih se onečišćujuće tvari ispuštaju u zrak kroz za to oblikovane ispuste (postrojenja, tehnološki procesi, industrijski pogoni, uređaji, građevine i slično)

– difuzni: kod kojih se onečišćujuće tvari unose u zrak bez određena ispusta/dimnjaka (uređaji, određene aktivnosti, površine i druga mjesta) [15]

Mjerenje emisije onečišćujućih tvari provodi se prvim, povremenim, kontinuiranim i posebnim mjerenjem na ispustu/dimnjaku nepokretnog izvora prema pravilima iz Uredbe o graničnim vrijednostima emisija onečišćenja tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 117/12).[16]

Emisija iz točkastog izvora je ispuštanje onečišćujućih tvari u zrak iz ispusta nepokretnog izvora, a iskazuje se emisijskim veličinama: masenim protokom i/ili masenom koncentracijom te emisijskim faktorom.Emitirani maseni protok (kg/h) je produkt izmjerene masene koncentracije onečišćujuće tvari na ispustu nepokretnog izvora i izmjerenog protoka otpadnog plina u razdoblju emisije otpadnih plinova (razdoblje bez emisije ne uzima se u obzir). Masena koncentracija onečišćujuće tvari u otpadnom plinu je masa onečišćujuće tvari po jedinici volumena ispuštenog otpadnog plina svedena na isto stanje otpadnog plina na koje je definirana i GVE bez obzira na koje se stanje otpadnog plina odnosi izvorno izmjerena koncentracija. [16]

Učestalost mjerenja emisije za ispust nepokretnog izvora određuje se na temelju omjera između emitiranog masenog protoka ($Q_{emitirani}$) i graničnog masenog protoka ($Q_{granični}$):

Tablica 3.1.Učestalost mjerenja emisije za ispust nepokretnog izvora

$Q_{emitirani}/Q_{granični}$	**Učestalost mjerenja emisije**
0,5 do ≤1	– povremena mjerenja, najmanje jedanput u pet godina
>1 do 2	– povremena mjerenja, najmanje jedanput u tri godine
>2 do 5	– povremena mjerenja, najmanje jedanput godišnje
>5	– kontinuirano mjerenje

Na temelju članka 52. Zakona o zaštiti zraka (»Narodne novine«, br. 130/2011), ministar zaštite okoliša i prirode donio je Pravilnik o praćenju kvalitete zraka. Na temelju tog pravilnika donešene su automatske metode mjerenja koncentracija merkaptana, amonijaka, sumporovodika . [20]

Tablica 3.2.Automatske metode mjerenja H_2S i NH_3

Onečišćujuća tvar	**Princip mjerne/analitičke metode**	**Metoda mjerenja**
H_2S	UV fluorescencija uz prethodno uklanjanje SO_x i konverziju H_2S u SO_2	Kontinuirano mjerenje analizatorom
NH_3	UV fluorescencija uz prethodno uklanjanje SO_x i koverziju H_2S u SO_2	Kontinuirano mjerenje analizatorom

Tablica 3.2. prikazuje opće prihvaćene metode sakupljanje uzoraka uz provjeru uzorkovanja zraka sa mjeračem protoka sljedivim prema HRN EN ISO/IEC 17025 te laboratorijske analize opće prihvaćenim medodama uz provjeru mjerne sljedivosti sukladno HRN EN ISO/IEC 17025. [9]

Granične vrijednosti koncentracija s obzirom na kvalitetu življenja za amonijak (NH_3), merkaptane (CH_3-SH; C_2H_5-SH) i sumporovodik (H_2S) definirane su u Uredbi o razinama onečišćujućih tvari u zrak (NN 117/12). [17]

Tablica 3.3.Granične vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na kvalitetu življenja (dodijavanje mirisom) (NN 117/12)

Onečišćujuća tvar	**Vrijeme osrednjavanja (h)**	**Granična vrijednost (µg/m^3)**	**Učestalost dozvoljenih prekoračenja(puta u kalendarskoj godini)**
Sumporovodik (H_2S)	1	7	24
	24	5	7
Merkaptani (CH_3-SH; C_2H_5-SH)	24	3	7
Amonijak (NH_3)	24	100	7

Kao što se vidi, granične vrijednosti se kreću od 3 µg/m^3 za merkaptane do 100 µg/m^3 za amonijak. Vrijeme osrednjavanja može biti 1 ili 24 sata. Obaslučaja treba provjeriti pri ocjenjivanju vrijednosti koncentracije na granici UPOV. Prekoračenje graničnih vrijednosti možemo promatrati, ali uzimajući u obzir dopuštenu učestalost prekoračenja po NN 117/12. [16]

Da bi se mogla vršiti usporedba rezultata mjerenja emisija i granične vrijednosti koncentracija onečišćenja potrebno je definirati:

-granica tolerancije (GT): postotak granične vrijednosti za koji ona može biti prekoračena pod za to propisanim uvjetima

-granična vrijednost (GV): razina onečišćenosti koju treba postići u zadanom razdoblju, ispod koje, na temelju znanstvenih spoznaja, ne postoji ili je najmanji mogući rizik od štetnih učinaka na ljudsko zdravlje i/ili okoliš u cjelini i jednom kada je postignuta ne smije se prekoračiti

- granična vrijednost emisije (GVE): najveća dopuštena emisija, izražena ili koncentracijom onečišćujućih tvari u ispušnim plinovima i/ili količinom ispuštanja/unošenja onečišćujućih tvari u određenom vremenu [15]

Rezultati mjerenja uspoređuju se s graničnim vrijednostima koncentracije prikazanim u Tablici 3.3.

Smatra se da su udovoljene GVE ako su na temelju kontinuiranih mjerenja u kalendarskoj godini:

– sve srednje 24-satne provjerene vrijednosti manje od GVE,

– 97% polusatnih provjerenih srednjih vrijednosti manje od 1,2 GVE,

– sve polusatne provjerene srednje vrijednosti manje od dvostruke GVE [16]

4. Analiza vjetrova

4.1. Karakteristike vjetrovne klime u Hrvatskoj

Hrvatska se nalazi u pojasu između euroazijske kopnene mase i sjeverne Afrike, odnosno između sjevernog Atlantika i Sredozemnog mora. U sjevernom Atlantiku se ciklonalna područja stvaraju cijele godine, a zimi je ciklogenetsko područje i Sredozemlje. Ciklone nad Hrvatsku uglavnom dolaze s polarne i arktičke fronte nošene zapadnim vjetrovima. Na prednjoj strani tih ciklona struji topliji maritimni zrak (poznata islandska i genovska ciklona). Njihov je utjecaj najčešći u jesen i zimi. Blizina Atlantika se ljeti očituje kroz utjecaj azorske anticiklone koja najčešće ojača u srpnju i djeluje na čitavom Zapadnom Sredozemlju. Uz azorsku anticiklonu, ljeti se stvaraju i anticiklone nad sjevernom Afrikom i Bliskim istokom. Zbog toga u ljetnim mjesecima najčešće prevladava stabilno i lijepo vrijeme, sa sjeverozapadnim strujanjem. U zimskim mjesecima, zbog bržeg i većeg hlađenja kopna nastaje poznata sibirska anticiklona – prostrano kontinentalno područje visokog tlaka zraka. U siječnju se azorski i sibirski maksimum spajaju u jedinstveno područje visokog tlaka zraka, dok se nad Sredozemljem i sjevernim Atlantikom zadržava barometarski minimum. Takva raspodjela tlaka zraka uvjetuje prevladavajuće sjeverno i sjeveroistočno strujanje zimi. Dakle, za vremenske prilike nad Hrvatskom tijekom godine , posebno je važno pomicanje islandske ciklone te azorske i sibirske anticiklone. [12]

Vjetar nastaje kao posljedica horizontalne razlike atmosferskog tlaka. Gdje god takve razlike postoje, a one nastaju uslijed različitih temperatura, uspostavlja se zračna struja koja ih nastoji poništiti. Smjer vjetra određen je u velikoj mjeri položajem višeg i nižeg tlaka: vjetar puše od višeg tlaka prema nižem skrećući pri tom na sjevernoj polutki na desno i pronalazeći najlakši put među preprekama koje mu čini konfiguracija terena. Brzina vjetra, a time i njegovo djelovanje na izložene predmete, ovisi o tome koliki je gradijent tlaka. Što je veća razlika na određenoj udaljenosti, to brže zrak struji. Brzina vjetra se smanjuje na neravnom terenu zbog trenja, a povećava se na mjestima gdje zrak struji kroz uski prolaz. Na pojedinim mjestima ima posebnih okolnosti koje povećavaju brzinu vjetra iz određenog smjera. U nas se to događa u obalnom području kad hladan zrak s kopna struji prema moru. [18]

Možemo razlikovati klimu vjetra u kontinentalnom dijelu Hrvatske od one na priobalju i otocima. Kontinentalni dio Hrvatske karakteriziraju maksimalne 10-minutne brzine vjetra manje od 18 m/s i maksimalni udari do 40 m/s. Za razliku od toga na analiziranim lokacijama priobalja i otoka izmjerene 10-minutne brzine dosežu vrijednosti iznad 25 m/s, maksimalni udari i iznad 45 m/s. U kontinentalnom dijelu, u kojem uglavnom prevladava slab do umjeren vjetar promjenjivog smjera, ekstremne brzine se javljaju najčešće uz prolazak frontalnih poremećaja iz W-NW smjerova u proljetnim mjesecima što potvrđuje razdioba čestina smjera ekstremnog vjetra i učestalost vjetra ekstremne brzine tijekom godine. [2]

Vjetrovi najveće brzine i učestalosti koji se javljaju u Hrvatskoj su bura i jugo.

Bura je jak, hladan i pretežito suh vjetar koji puše sa sjeveroistoka i na udare. Bura puše po nekoliko sati do nekoliko dana. Javlja se tijekom cijele godine iako je njena učestalost u pojedinim godinama različita. Na istočnoj obali Jadrana učestalost bure opada od sjeverozapadnog prema jugoistočnom dijelu. Prevladava zimi kada s prekidima može potrajati do dva tjedna. Zimski vjetar je u prosjeku jači od ljetnog.

Oblik kopna ima gotovo odlučujući utjecaj na smjer i brzinu bure, pa može puhati od NNW do ENE. Takvoj skupini pripada bura na prednjoj strani anticiklone koja se u ožujku ili travnju obično pojavljuje u Europi i na svojoj strani vodi zračno strujanje čak od polarnih krajeva do Jadrana. U unutrašnjosti Hrvatske i na Jadranu tada puše hladan vjetar iz sjevernog ili sjevernoistočnog kvadranta, a bura u podnožju primorskih planina je olujna, pa čak i orkanska. [19]

Na postanak bure utječe polje atmosferskog tlaka nad srednjom Europom i Jadranom, odnosno Sredozemljem. Pri tome je važan osnovni smjer strujanja u donjoj troposferi, određen položajem ciklone u Sredozemlju ili jačanjem grebena visokog tlaka zraka nad srednjom ili istočnom Europom prema našim krajevima, stoga se razlikuje ciklonska i anticiklonska bura. Buru mogu izazvati i ljetni kratkotrajni prodori hladnog zraka u obliku hladne fronta iza koje se svakih nekoliko dana svježa zračna masa a Atlantika napredujući prema istoku prelije do Velike Kapele i Velebita, a djelomično i među bosanskim planinama.

Bura se od svih ostalih vjetrova na Jadranu osobito razlikuje po naglom početku i mahovitosti. Srednja brzina bure u nekom razdoblju mnogo je manja od pojedinih udara. Brzine bure su oko 10-15 m/s, dok udari vjetra poprimaju vrijednosti i do 50 m/s. Najjači mah bure zabilježen je na Masleničkom mostu kod Zadra 21.prosinca 1998. i iznosio je 69 m/s. [5]

Jugo je tipičan vjetar Jadranskog mora, uvjetovan općim južnim strujanjem nastalim zbog Sredozemne ciklone ili na Jadranu, a samo ponekad kao dio strujanja vjetra široko koji puše na širem prostranstvu Sredozemlja, dolazeći iz Afrike. Jugo nije široko, no ponekad široko može prerasti u jugo, a nikada obratno. Široko je tipičan vjetar koji puše nad sjevernom Afrikom prelazeći preko Sredozemnog mora ponekad zalazi u Jadransko more.

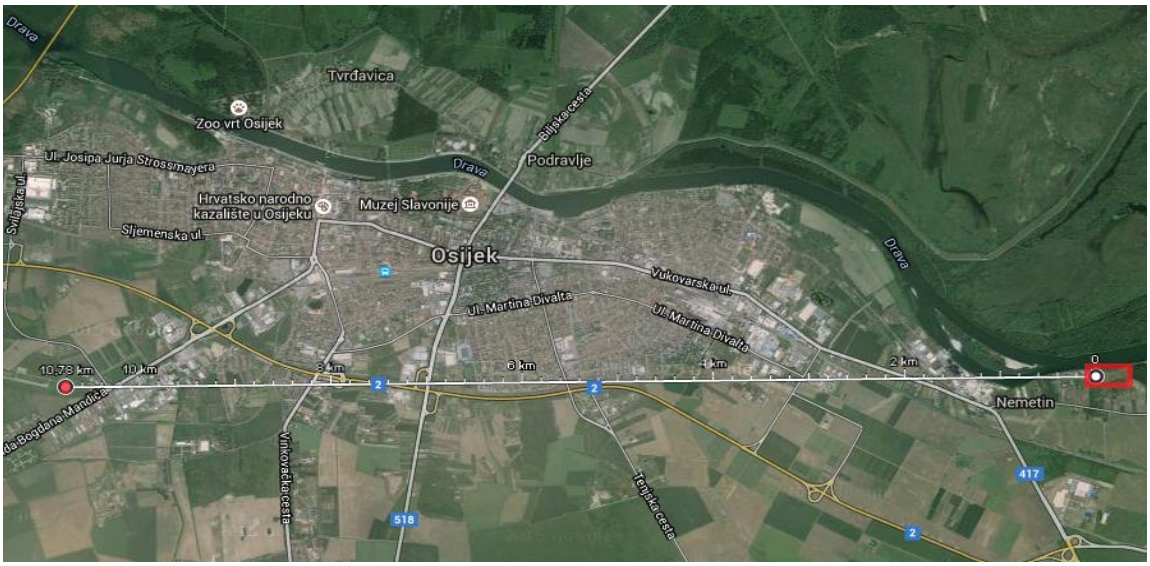
Jugo obično puše iz južnog kvadranta, dok sve bliže obali zbog utjecaja orografije i trenja skreće na jugoistočni kvadrant. To je topao i vlažan vjetar, koji se javlja uz oblačno i kišovito vrijeme. Puše po nekoliko dana ujednačenom brzinom od oko 10 m/s. Rijetko ostaje kao slab vjetar, ali često postane olujni dosežući i do 30 m/s. Jugo se javlja u svim godišnjim dobima, premda je znakovitije za hladno doba te je zimski vjetar jači od ljetnog. Zimi obično traje po tjedan dana, no ponekad s kraćim periodima može potrajati i do tri tjedna. Ljeti traje do tri dana. [6]

4.2. Mjerenje vjetra

Vjetar kao vektorska veličina potpuno je određen kad su poznati njegov smjer i brzina. Pod smjerom vjetra se podrazumijeva strana svijeta otkuda vjetar puše. Obično se ne određuje trenutni nego srednji smjer vjetra za određeno razdoblje (najčešće 2-min ili 10-min srednjak). Pod brzinom vjetra se podrazumijeva put što ga prevali čestica zraka u jedinici vremena. Mjeri se srednja brzina vjetra, ali se mjeri i trenutna brzina. Smjer vjetra se određuje ružom vjetrova prema glavnim zemljopisnim stranama na 8 ili 16 smjerova. Također se mjeri u stupnjevima (°), obično po 10°azimuta od 0°do 360°. Azimut (kut) se računa od sjevera (N) preko istoka (E), gdje je 90°istočni, 180°južni, 270°zapadni a 360°sjeverni vjetar. Izostanak vjetra se označava s 0 (nije sjeverni vjetar), dok je promjenjiv smjer vjetra obilježen s 99 ili VRB. Brzina vjetra se izračunava u jedinicama brzine: m/s i km/h.Smjer vjetra se mjeri vjetruljom, a brzina anemometrima, dok se oboje mjeri anemografima. Vjetrulja i anemometar pokazuju trenutačnu vrijednost smjera odnosno brzine vjetra, a anemografi neprekidno bilježe njegovu vrijednost. [7]

Mjerenja smjera i brzine vjetra na području Hrvatske provode se najvećim dijelom u okviru rada mreže postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Na tim postajama su anemometri postavljani poštujući u maksimalno mogućoj mjeri preporuke Svjetske meteorološke organizacije. Preporuka je WMO-a da se osjetnici za mjerenje brzine i smjera vjetra postavljaju na 10 m visine iznad otvorenog prostora. Pod otvorenim prostorom podrazumijeva se područje u kojem razmak između instrumenta za mjerenje smjera i brzine vjetra i okolnih prepreka iznosi najmanje desetorostruko više od visine tih prepreka. [3]

Podaci s kojim se raspolaže za ovaj rad su srednje satne vrijednosti brzine vjetra i smjer vjetra za razdoblje od 1. siječnja 2011 do 31. prosinca 2012 mjereni na stanici Osijek-Čepin. Stanica Osijek-Čepin je najbliža hidrometeorološka postaja Uređaju za pročišćavanje otpadne vode u Osijeku i nalazi se 10,7 km zapadno od zadane lokacije.



Slika 4.1.Položaj Osijek-Čepin meteorološke postaje i Uređaja za pročišćavanje otpadne vode Osijek

4.3. Tehničke karakteristike mjernog uređaja

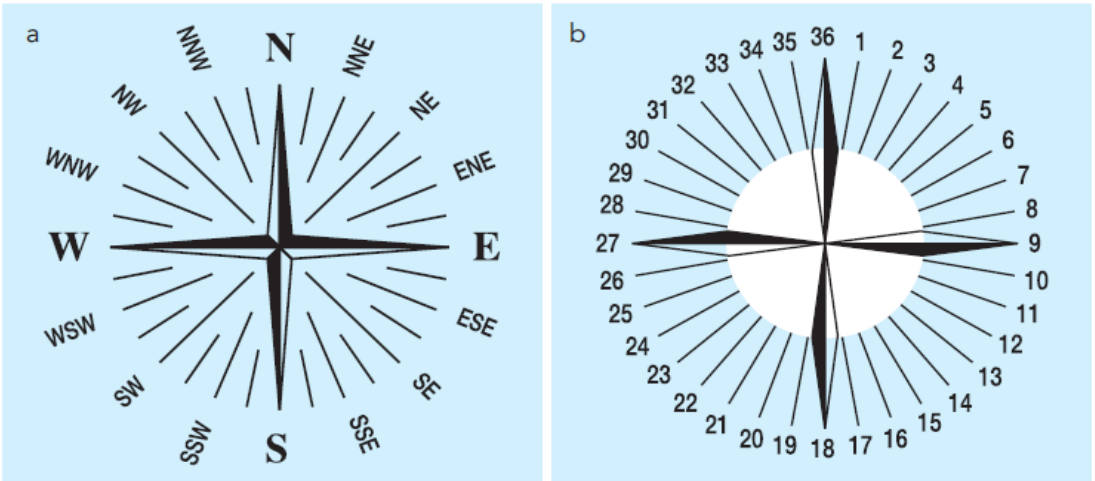
Na meteorološkoj postaji Osijek-Čepin koristi se Vaisala WAS425 ultrazvučni anemometar. Ultrazvučni anemometar koristi ultrazvučne valove za mjerenje brzine i smjera vjetra. Brzina vjetra određuje se tako da se mjeri vrijeme koje je potrebno ultrazvučnom impulsu da prođe put između fiksnog odašiljača i fiksnog prijemnika. Brzina vjetra će povećati ili smanjiti brzinu zvuka ovisno o tome u kojem smjeru vjetar puše. Određuje se komponenta brzine vjetra na tom putu. Vrlo su prikladni za mjerenje turbulencija. [1] Izmjerena brzina ne ovisi o nadmorskoj visini, temperaturi ni vlažnosti.

Tablica 4.1.Vaisala WAS425 - tehnički podatci

Vrsta istrumenta	impulsni
Mjerni sustav	µM
BRZINA VJETRA	
Uzorkovanje	1s
Opseg mjerenja	0,1 do 65 m/s
Razlučivost	0,1 m/s
Preciznost	0,1 m/s
Izlazni signal	impulsni
Osrednjavanje	10-minutno
SMJER VJETRA	
Opseg mjerenja	1°-360°
Razlučivost	1°
Preciznost	2°

Naš naziv	Međunarodne kratice	Naziv međunarodnih kratica	32 smjera	36 smjerova	Stupnjevi*
sjever – sjeveroistok	NNE	North-North-East	02	02, 03	22,5
sjeveroistok	NE	North-East	04	04, 05	45
istok-sjeveroistok	ENE	East-North-East	06	06, 07	67,5
istok	E	East	08	08, 09, 10	90
istok-jugoistok	ESE	East-South-East	10	11, 12	112,5
jugoistok	SE	South-East	12	13, 14	135
jug-jugoistok	SSE	South-South-East	14	15, 16	157,5
jug	S	South	16	17, 18, 19	180
jug-jugozapad	SSW	South-South-West	18	20, 21	202,5
jugozapad	SW	South-West	20	22, 23	225
zapad-jugozapad	WSW	West-South-West	22	24, 25	247,5
zapad	W	West	24	26, 27, 28	270
zapad-sjeverozapad	WNW	West-North-West	26	29, 30	292,5
sjeverozapad	NW	North-West	28	31, 32	315
sjever-sjeverozapad	NNW	North-North-West	30	33, 34	337,5
sjever	N	North	32	35, 36, 01	360
tišina	C	Calm	00	00	

Slika 4.2.Naziv vjetra, kratica, međunarodni naziv, 32 smjera, 36 smjerova i stupnjevi počinjući od sjevera



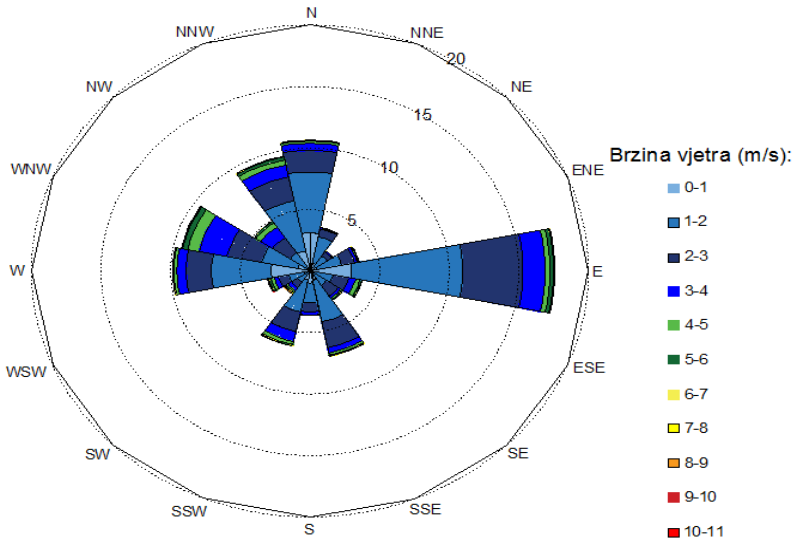
Slika 4.3.Ruža vjetrova s 32 smjera (a) i ruža vjetrova s 36 smjerova

4.4. Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja se prikazuju relativnim tablicama kontigencije u kojima se nalaze učestalosti vjetrova po brzinama i po smjeru iz kojega pušu. Tablice kontigencije se izrađuju iz srednjih satnih vrijednosti brzine i smjera vjetra,ručunajući učestalosti iz ukupnih podataka za potrebno razdoblje. U stupcima se nalazi razdioba vjetra po brzini a u redcima po smjeru vjetra. Na temelju tablica kontigencije izrađuju se ruže vjetrova.

Tablica 4.2.Relativna tablica kontigencije za razdoblje od 1.siječnja 2011 do 31. prosinca 2012; postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST (%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,64	2,22	0,64	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61
4	0,32	1,18	0,36	0,09	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98
6	0,52	1,81	0,92	0,22	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,59
8	2,99	7,99	4,30	1,59	0,37	0,24	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	17,54
10	0,25	1,44	1,15	0,49	0,31	0,16	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	3,85
12	0,16	1,23	1,05	0,21	0,13	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	2,87
14	0,83	3,39	2,14	0,43	0,18	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	7,07
16	0,98	1,61	0,75	0,23	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61
18	0,70	2,68	1,67	0,79	0,27	0,09	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	6,22
20	0,20	0,89	0,50	0,31	0,16	0,07	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00	2,24
22	0,39	1,18	0,72	0,33	0,24	0,15	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	3,10
24	2,79	4,27	1,81	0,68	0,19	0,05	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	9,85
26	0,88	2,65	2,52	2,07	0,82	0,38	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	9,43
28	0,26	1,50	1,46	1,06	0,41	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	4,87
30	1,63	4,20	1,95	1,02	0,41	0,24	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	9,52
32	3,10	4,94	1,75	0,59	0,17	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	10,64
UČESTALOST(%)	**16,62**	**43,20**	**23,66**	**10,22**	**3,81**	**1,79**	**0,49**	**0,16**	**0,03**	**0,01**	**0,01**	100,00

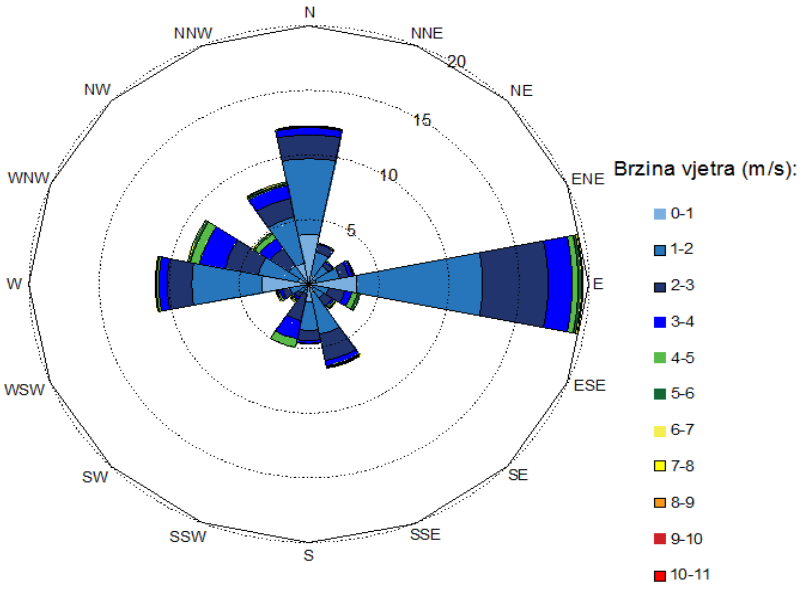


Slika 4.4.Ruža vjetrova za razdoblje od 1.sječnja 2011. do 31.prosinca 2012. godine; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za razdoblje 2011. i 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada, zapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Tablica 4.3.Relativna tablica kontigencije za 2011. godinu, postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST (%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,63	1,86	0,62	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,21
4	0,30	1,36	0,36	0,13	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,16
6	0,56	1,67	0,67	0,26	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30
8	3,43	8,97	4,68	1,73	0,41	0,23	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	19,55
10	0,14	1,30	1,17	0,53	0,37	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,73
12	0,16	1,10	0,75	0,15	0,13	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,37
14	0,70	3,26	2,09	0,40	0,07	0,08	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	6,66
16	1,37	2,22	0,77	0,23	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,62
18	0,75	2,15	1,44	0,67	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,20
20	0,18	0,70	0,33	0,21	0,10	0,08	0,05	0,07	0,00	0,00	0,00	1,73
22	0,35	1,06	0,56	0,21	0,13	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	2,43
24	3,35	5,02	1,78	0,61	0,16	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	11,00
26	0,79	2,89	2,43	1,88	0,64	0,21	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	8,86
28	0,25	1,48	1,59	0,92	0,44	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	4,86
30	1,63	3,64	1,51	1,02	0,18	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	8,09
32	3,84	5,86	1,86	0,56	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	12,24
UČESTALOST(%)	**18,44**	**44,54**	**22,62**	**9,58**	**3,06**	**1,31**	**0,31**	**0,14**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	100,00

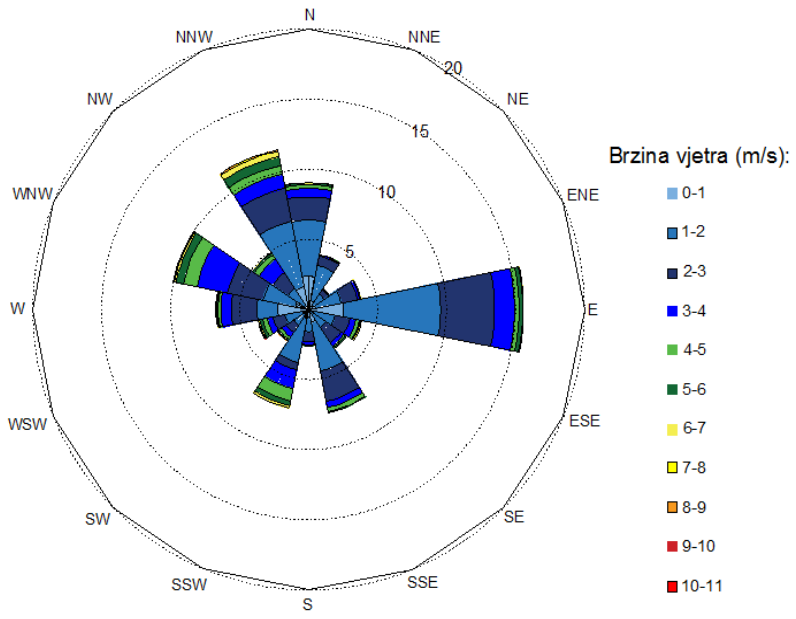


Slika 4.5.Ruža vjetrova za 2011. godinu; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za razdoblje 2011. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada, zapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Tablica 4.4.Relativna tablica kontigencije za 2012. godinu; postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST (%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,64	2,58	0,65	0,11	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,01
4	0,33	1,01	0,36	0,06	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,79
6	0,48	1,95	1,17	0,18	0,07	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,89
8	2,55	7,02	3,91	1,46	0,33	0,24	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	15,55
10	0,37	1,58	1,12	0,45	0,25	0,09	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	3,97
12	0,15	1,35	1,35	0,28	0,13	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,37
14	0,95	3,53	2,19	0,46	0,30	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,48
16	0,58	1,00	0,72	0,23	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,59
18	0,65	3,20	1,89	0,91	0,34	0,18	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	7,25
20	0,22	1,08	0,66	0,41	0,22	0,07	0,07	0,01	0,01	0,00	0,00	2,75
22	0,44	1,31	0,87	0,45	0,34	0,21	0,08	0,02	0,03	0,01	0,01	3,77
24	2,22	3,53	1,85	0,76	0,22	0,07	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	8,71
26	0,96	2,42	2,61	2,27	0,99	0,55	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00	10,01
28	0,28	1,52	1,33	1,20	0,38	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	4,88
30	1,63	4,77	2,38	1,02	0,64	0,40	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	10,95
32	2,36	4,02	1,63	0,62	0,26	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	9,03
UČESTALOST(%)	**14,81**	**41,87**	**24,71**	**10,86**	**4,55**	**2,27**	**0,68**	**0,17**	**0,06**	**0,01**	**0,01**	100,00

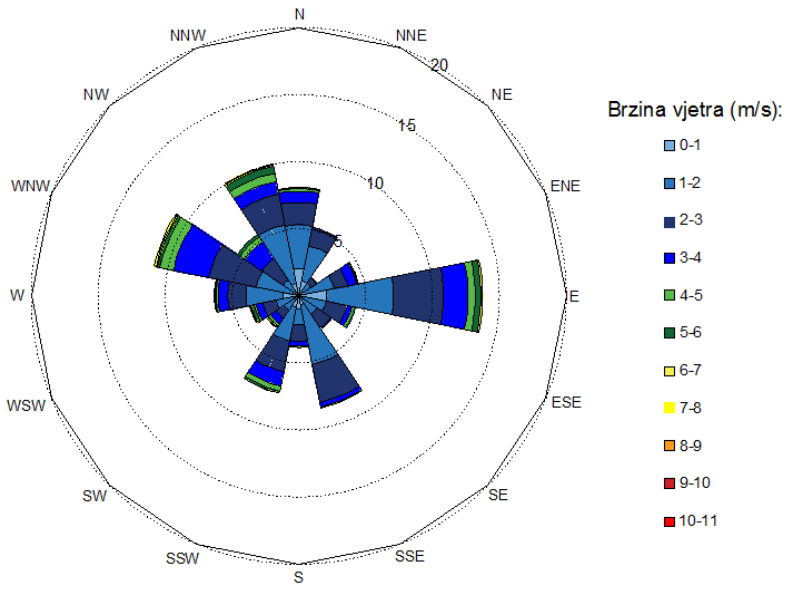


Slika 4.6.Ruža vjetrova za 2012. godinu; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za razdoblje 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s. Vjetrovi najvećih brzina se javljaju iz smjera zapad-jugozapad i dosežu do11 m/s.

Tablica 4.5.Relativna tablica kontigencije za zimsko razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST(%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	1,08	2,71	1,29	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,19
4	0,30	0,83	0,48	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,65
6	0,39	2,30	1,01	0,30	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,13
8	2,11	4,98	3,72	1,84	0,55	0,41	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	13,75
10	0,11	1,97	1,61	0,34	0,18	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,34
12	0,14	1,52	1,24	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94
14	0,67	4,55	2,87	0,34	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,49
16	0,96	1,22	1,19	0,39	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,86
18	0,85	2,59	2,34	1,08	0,37	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	7,39
20	0,14	1,17	0,73	0,51	0,18	0,07	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	2,92
22	0,34	1,38	0,99	0,55	0,11	0,25	0,05	0,05	0,02	0,00	0,00	3,74
24	1,88	2,78	1,35	0,73	0,14	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
26	0,51	2,75	3,60	2,69	1,03	0,21	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	11,02
28	0,16	1,24	1,91	1,56	0,41	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,51
30	0,94	4,45	2,34	0,96	0,60	0,53	0,11	0,05	0,00	0,00	0,00	9,99
32	2,02	3,28	1,63	0,85	0,21	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,08
UČESTALOST(%)	**12,60**	**39,72**	**28,31**	**12,30**	**3,99**	**2,25**	**0,57**	**0,23**	**0,02**	**0,00**	**0,00**	**100,00**

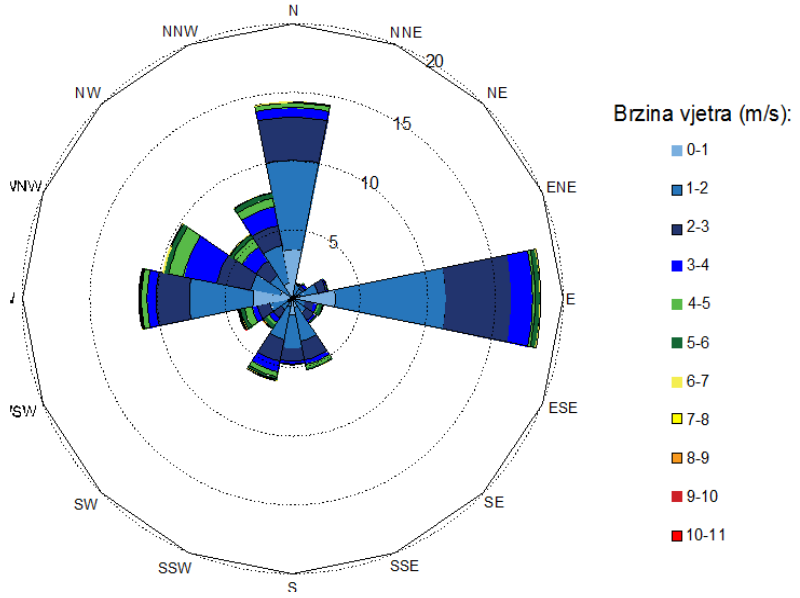


Slika 4.7.Ruža vjetrova za zimsko razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za zimsko razdoblje 2011. i 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Tablica 4.6.Tablica kontigencije za proljetno razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST(%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,25	0,76	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15
4	0,07	0,78	0,25	0,18	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33
6	0,58	1,31	0,64	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69
8	3,15	8,21	4,78	1,61	0,18	0,30	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	18,36
10	0,16	0,78	0,62	0,30	0,18	0,25	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	2,32
12	0,09	1,10	0,69	0,18	0,02	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,16
14	0,67	2,48	1,38	0,35	0,32	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	5,27
16	1,20	2,46	0,85	0,23	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,81
18	0,60	2,44	1,61	0,78	0,39	0,16	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	6,10
20	0,12	0,87	0,69	0,41	0,25	0,21	0,09	0,02	0,02	0,00	0,00	2,69
22	0,35	1,36	0,92	0,44	0,55	0,30	0,12	0,02	0,05	0,02	0,02	4,14
24	2,92	4,72	2,44	0,69	0,41	0,07	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	11,36
26	0,92	2,25	2,53	2,51	1,13	0,39	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	9,80
28	0,18	1,82	1,27	1,24	0,76	0,30	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	5,64
30	1,17	2,74	1,52	1,40	0,62	0,37	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	7,87
32	3,52	6,53	3,13	0,71	0,35	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	14,31
UČESTALOST(%)	**15,94**	**40,63**	**23,42**	**11,23**	**5,31**	**2,51**	**0,74**	**0,09**	**0,09**	**0,02**	**0,02**	**100,00**

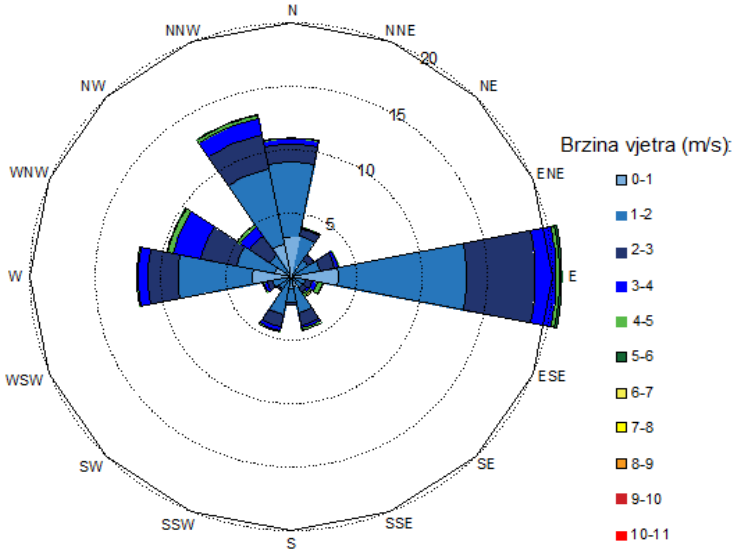


Slika 4.8.Ruža vjetrova za proljetno razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za proljetno razdoblje 2011. i 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada, zapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Tablica 4.7.Tablica kontigencije za ljetno razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST(%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,44	2,80	0,62	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,98
4	0,31	1,27	0,49	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,11
6	0,44	1,84	1,13	0,24	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,73
8	3,60	9,82	5,25	1,60	0,27	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,69
10	0,24	0,89	0,51	0,40	0,38	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,47
12	0,18	0,93	0,33	0,18	0,24	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93
14	0,76	2,13	1,02	0,20	0,16	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	4,29
16	0,96	1,04	0,24	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,27
18	0,31	2,71	1,02	0,31	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,45
20	0,24	0,91	0,18	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38
22	0,33	1,13	0,44	0,22	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,24
24	2,98	5,69	2,27	0,78	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,85
26	1,27	2,98	2,78	2,16	0,47	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,69
28	0,49	1,53	1,82	0,87	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,96
30	2,62	6,02	2,73	1,31	0,29	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	13,00
32	3,13	5,91	1,42	0,44	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,96
UČESTALOST(%)	**18,32**	**47,63**	**22,27**	**8,89**	**2,51**	**0,27**	**0,09**	**0,02**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**100,00**

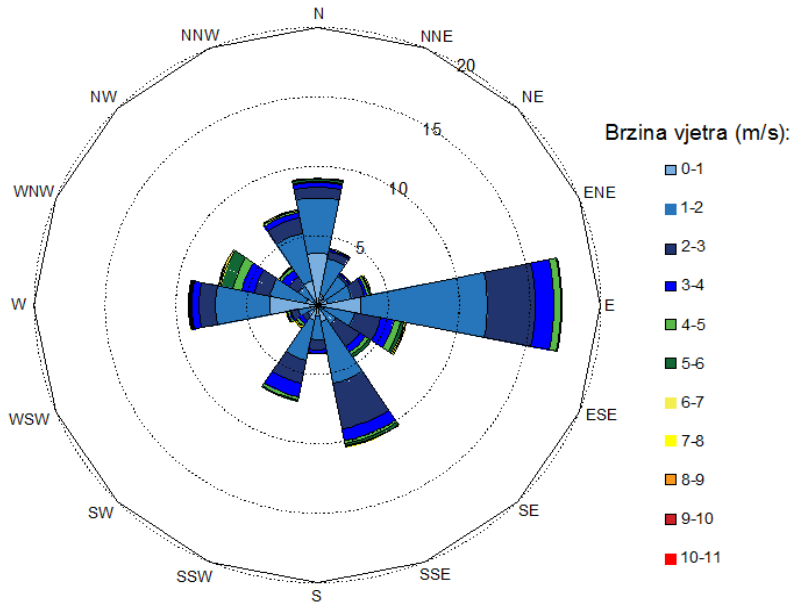


Slika 4.9.Ruža vjetrova za ljetno razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za ljetno razdoblje 2011. i 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, sjever-sjeverozapada, zapada i zapad-sjeverozapada. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Tablica 4.8.Tablica kontigencije za jesensko razdoblje 2011-2012;postaja Osijek-Čepin

SMJER VJETRA	BRZINA VJETRA (m/s)											UČESTALOST(%)
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	
2	0,78	2,61	0,55	0,14	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,13
4	0,59	1,88	0,19	0,09	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	2,83
6	0,69	1,78	0,88	0,21	0,17	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82
8	3,06	8,93	3,37	1,31	0,50	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	17,26
10	0,50	2,16	1,90	0,93	0,50	0,21	0,14	0,05	0,00	0,00	0,00	6,39
12	0,21	1,38	1,99	0,50	0,24	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,53
14	1,23	4,49	3,37	0,85	0,21	0,19	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	10,42
16	0,78	1,73	0,71	0,28	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54
18	1,07	2,97	1,71	1,00	0,24	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,05
20	0,31	0,59	0,40	0,31	0,21	0,02	0,02	0,12	0,00	0,00	0,00	1,99
22	0,55	0,85	0,52	0,09	0,17	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28
24	3,37	3,85	1,16	0,52	0,07	0,07	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	9,12
26	0,81	2,61	1,12	0,90	0,64	0,90	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	7,15
28	0,21	1,42	0,81	0,57	0,21	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,32
30	1,76	3,51	1,14	0,38	0,14	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	7,03
32	3,75	3,96	0,78	0,36	0,07	0,19	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	9,14
UČESTALOST(%)	**19,68**	**44,73**	**20,61**	**8,45**	**3,44**	**2,21**	**0,59**	**0,28**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**100,00**



Slika 4.10.Ruža vjetrova za jesensko razdoblje 2011-2012; postaja Osijek-Čepin

U prikazanoj tablici kontigencije i pripadnoj ruži vjetrova za jesensko razdoblje 2011. i 2012. godine se vidi da je najučestaliji vjetar iz istočnog smjera, no velik utjecaj imaju i vjetrovi sa sjevera, zapada i jug-jugoistoka. Najučestalija brzina je između 1-2 m/s.

Gledajući ukupne godišnje raspodijele za 2011., 2012. i za obje godine zajedno može se zaključiti da raspodijela vjetrova ne varira mnogo. Iz prikazanih tablica kontigencije i ruža vjetrova može se zaključiti da je po učestalosti dominantan vjetar iz smjera istok (E). Još su učestali vjetrovi s zapada (W i WNW) te sjevera (N i NNW). Mala razlika se primjećuje samo u učestalosti jug-jugozapadnog i zapadnog vjetra 2012. godine. Najučestalije brzine su između 1-2 te 2-3 m/s. Vjetar s najvećim brzinama (do 10-11 m/s) je iz smjera jugozapada.

Raspodijela po godišnjim dobima se malo razlikuje. Najučestaliji vjetar u svim godšnjim dobima je s istoka(E), a nakon njega sa zapada(W) i sjevera(N). Zimi i u jesen prevladava jug-jugoistočni vjetar, a na proljeće, ljeti i zimi sjever-sjeverozapadni i zapad-sjeverozapadni vjetar. Najučestalije brzine vjetrova u svim godišnjim dobima su između 1-2 i 2-3 m/s. Najveće brzine se javljaju iz smjera zapad-jugozapad.

5. Opis transportnih mahanizama obuhvaćenih analizom

5.1. Matematički modeli za širenje efluenata u atmosferi

Uobičajeno se u praksi zbivanja složenih fizikalnih sustava opisuju matematičkim modelima. Atmosfera je veoma kompleksan, fizikalno - kemijski sustav stoga je modeliranje tog sustava izuzetno složeno. Kada je riječ o utjecajima industrijskih izvora onečišćenja na okoliš, redovito nas zanimaju koncentracija i rasprostiranje efluenata (onečišćivača) u atmosferi, njihovo taloženje na zemljištu, odnosno prizemne koncentracije onečišćivača. Proces rasprostiranja nekog efluenta i njegova koncentracija ovisi o kretanju atmosferskih masa (vjetrova), miješanju zraka po visini, kemijskim reakcijama efluenata i/ili radioaktivnom raspadu u atmosferi te brzini taloženja.
Budući da je riječ o sustavu velikog volumena, proračun fizikalnih parametara se provodi unutar manjeg ograničenog prostora koji se naziva kontrolni volumen. Veličina kontrolnog volumena se bira ovisno o vrsti analize koja se provodi (lokalna, regionalna ili globalnih razmjera). Modeli ove vrste u literaturi se pojavljuju kao kutijasti modeli (box model). Ponekad se kod kutijastog modela analiziraju parametri unutar samo jednog kontrolnog volumena. U takvim slučajevima otpada mogućnost analize prostorne raspodjele koncentracije efluenata pa se unutar tog volumena promatraju koncentracije i drugi parametri samo u funkciji vremena. Bitno složeniji proračuni su kod primjene jednodimenzionalnih, dvodimenzionalnih, a pogotovo kod trodimenzionalnih modela gdje, osim u vremenu, promatramo i prostorne promjene koncentracija efluenata.
Suština matematičkog modeliranja je u postavljanju zakona o očuvanju mase, energije, količine gibanja te transportnih jednadžbi za sve efluente u proračunu unutar kontrolnog volumena. Potrebno je modelirati i fizikalne interakcije između susjednih volumena, a nepotrebno je isticati da se radi o proračunima izuzetne kompleksnosti koji zahtjevaju dugo vrijeme rada računala. U načinu promatranja atmosferskih procesa razlikuju se dvije vrste matematičkih modela:
1. Eulerov model atmosfere - promatraju se difuzivne promjene unutar stacionarnih volumena uzduž trajektorije mlaza/dima,
2. Lagrangeov model atmosfere – promatraju se promjene unutar kontrolnih volumena u kretanju u smjeru širenja efluenata.

Najkompleksniji proračuni raspodjele koncentracija efluenata na većim prostorima (pa i na cijeloj površini Zemlje) rješavaju se trodimenzionalnim modelima atmosfere. To se ponajprije odnosi na proračun raspodjele efluenata koji imaju globalne učinke (ugljični dioksid i drugi staklenički plinovi). Ne može se zanemariti da se podjednako koriste i jednodimenzionalni modeli (kod određivanja vremenske promjene koncentracija nekog značajnog sastojka atmosfere, primjerice ozona, po visini atmosfere) i dvodimenzionalni modeli kod proračuna visinskih i prizemnih koncentracija efluenata koji uzrokuju kisele kiše (primjerice SO2 i NOx, emitirani na nekom području). Proračuni s 3D modelima, su ne samo složeni zbog velikog broja kontrolnih volumena, nego i sadrže veliku dozu nesigurnosti zbog velikog broja ulaznih podataka, od kojih su mnogi nedovoljno definirani. U sljedećih nekoliko poglavlja bit će predstavljena teorija vezana uz disperziju tj. rasprostiranje efluenata u atmosferi, utjecaj stanja atmosfere te neki od postojećih propisanih trodimenzionalnih modela disperzije. [14]

5.2. Opća jednadžba difuzije efluenata

Kako bi opisali putanju izvjesne količine plinovitog efluenta u atmosferi potrebno je uvidjeti kakvim se zakonima taj efluenat rasprostire. Da bi realno opisali zbivanja u atmosferi potrebno je obuhvatiti sve utjecaje koji uzrokuju njezinu promjenu. Tada bi trebali brzine kretanja atmosferskih masa, tj. vjetrova, smatrati ovisnima o unutarnjim razlikama tlakova koji su rezultat zagrijavanja i hlađenja zraka hlapljenjem i kondenzacijom vlage zbog razmjene energije između atmosfere, sunčevog zračenja i zemljinog zračenja. Dakle, osim zakona o očuvanju mase potrebno je uključiti i zakone o očuvanju energije i količine gibanja vlažnog zraka.
Zanemarujući sve ove zavisnosti i fokusirajući se na malo područje, odnosno na jedan kontrolni volumen (KV), mogu se donekle pretpostaviti tri utjecajna faktora:
- atmosferska ili turbulentna difuzija $q_{i,difuzija}$;
- promjena koncentracije uslijed advekcije (kretanja fluida) $q_{i,advekcija}$;
- dodatna količina efluenta unutar KV-a uzrokovana odvijanjem kemijskih reakcija$q_{i,reakt}$;
- količina efluenata unesena u KV iz nekog vanjskog izvora S_i.

Kako bi se sagledali njihov utjecaj na vremensku promjenu koncentracije rasplinutog efluenta unutar KV-a postavit će se jednadžba o očuvanju mase M (kg):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = q_{i,advekcija} + q_{i,difuzija} + q_{i,reakt} + S_i \tag{5.2.1}$$

Količine fluida (uzrokovane advekcijom i difuzijom) jednake su razlikama njihovih ulaznih i izlaznih vrijednosti te dobivamo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \sum_{i}^{x,y,z} (q_{i,ul}^{adv} - q_{i,izl}^{adv}) + \sum_{i}^{x,y,z} (q_{i,ul}^{dif} - q_{i,izl}^{dif}) + q_{i,reakt} + S_i \tag{5.2.2}$$

Kako bi proračunali difuzivni fluks u i izvan KV-a koristimo Fickov zakon koji za x smjer glasi:

$$q_{xi,ul}^{dif} = -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left.\frac{\partial C_i}{\partial x}\right|_1 \tag{5.2.3}$$

$$q_{xi,izl}^{dif} = -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left.\frac{\partial C_i}{\partial x}\right|_2 \tag{5.2.4}$$

gdje je $A_{yz} = \delta y \cdot \delta z$ površina kroz koju ulazi i izlazi difuzivni fluks, a $K_x(^{m^2}/_s)$ horizontalni difuzivni koeficijent. Indeks 1 stoji za ulazni presjek, a indeks 2 za izlazni presjek. Negativni predznak postoji zbog difuzije koja govori da efluenat difundira iz područja veće u područje manje koncentracije i time je promjena negativna.

$$q_{xi}^{dif} = q_{xi,ul}^{dif} - q_{xi,izl}^{dif} = -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left(\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_1 - \frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_2\right) \tag{5.2.5}$$

Nadalje, da bi riješili $\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_1$ i $\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_2$ koristimo razvoj u Taylorov red kao korisni alat za linearnu aproksimaciju funkcije $f(x) = f(x_0) + \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x_0} dx$ te se primjenom dobiva:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_2 = \frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_1 + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_1\right) dx \tag{5.2.6}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_1 - \frac{\partial C_i}{\partial x}\Big|_2 = -\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} dx \tag{5.2.7}$$

$$q_{xi}^{dif} = K_x \cdot A_{yz} \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} dx = K_x \cdot V \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \tag{5.2.8}$$

Analogno za smjerove y i z promjena mase u KV-u uslijed difuzije iznosi:

$$q_{yi}^{dif} = K_y \cdot A_{xz} \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} dy = K_y \cdot V \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} \tag{5.2.9}$$

$$q_{zi}^{dif} = K_z \cdot A_{xy} \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} dz = K_z \cdot V \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \tag{5.2.10}$$

Zbog anizotropnosti atmosfere u izvedenim jednadžbama koriste se koeficijenti difuzije različiti za svaki smjer širenja efluenta.

Promjena mase unutar kontrolnog volumena ovisi i o promjeni uzrokovanoj advekcijom, tj. kretanjem fluida. Ako se brzina kretanja fluida odnosno vjetra prikaže u kartezijevom koordinatnom sustavu dobivamo komponente brzina $v_x, v_y \; i \; v_z$. Protoci uslijed promjene koncentracije vjetrom su:

$$q_{xi,ul}^{adv} = v_x \cdot A_{yz} \cdot C_{i,ul} \qquad C_{i,ul} = C_i|_1 \tag{5.2.11}$$

$$q_{xi,izl}^{adv} = v_x \cdot A_{yz} \cdot C_{i,izl} \qquad C_{i,izl} = C_i|_2 \tag{5.2.12}$$

Analogno prethodno provedenom izračunu dobivamo protoke:

$$q_{xi}^{adv} = -v_x \cdot V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} \tag{5.2.13}$$

$$q_{yi}^{adv} = -v_y \cdot V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} \tag{5.2.14}$$

$$q_{zi}^{adv} = -v_z \cdot V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} \tag{5.2.15}$$

Vraćajući tako dobivene protoke iz (5.2.15) i (5.2.14), (5.2.13) i (5.2.12) nazad u (5.2.2) te pritom uzimajući u obzir $M = C_i \cdot V$ te $q_{i,reakt} = C_i \cdot V$ dobivamo:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = C_i + \frac{S_i}{V} + K_x \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - (v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z}) \quad (5.2.16)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} = C_i + \frac{S_i}{V} + K_x \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \quad (5.2.17)$$

Uvodeći supstancijalnu derivaciju (derivacija koncentracije prema vremenu i prostornim koordinatama $C_i = C_i(t, x, y, z)$ te Laplace-ov operator svodimo jednadžbu na:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_i + \frac{S_i}{V} + K \cdot \nabla^2 \cdot C_i \quad (5.2.18)$$

To je opći oblik jednadžbe za proračun disperzije efluenata u atmosferi. [14]

5.3. Gaussov model difuzije iz točkastog izvora

Gaussov model difuzije je najčešći model za modeliranje onečišćenja zraka. Zasnovan je na jednostavnoj jednadžbi koja opisuje trodimenzionalno polje koncentracija generirano iz točkastog izvora pod stacionarnim meteorološkim i uvjetima emitiranja zagađenja. (1)
Putanja plinovitih efluenata ispuštenih u atmosferu u nekoj točki prostora opisuje se perjanicom koja se proteže u smjeru kretanja zraka (vjetra). Opće ponašanje putanje nekog efluenta uzrokovano je turbulentnom atmosferskom difuzijom te se efluent ovisno o temperaturnom profilu širi s povećanjem udaljenosti od mjesta ispuštanja. Ovo nije tipičan primjer atmosferske difuzije (zbog prisutnosti vjetrova), već je riječ o kombinaciji difuzije i turbulentnog miješanja zraka.

Kako bi se opisalo takvo gibanje koristi se opća jednadžba difuzije:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_i + \frac{S_i}{V} + K \cdot \nabla^2 \cdot C_i \tag{5.3.1}$$

Pretpostavi se da se u određenom volumenu zraka ne odvijaju kemijske reakcije kojim bi nastala dodatna količina efluenata Ci te nepostojanje dodatnih izvora efluenata S_i. Time dobiva se:

$$\frac{dC_i}{dt} = K \cdot \nabla^2 \cdot C_i \tag{5.3.2}$$

ili prošireno:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} = K_x \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \tag{5.3.3}$$

Pretpostavi se, nadalje, da je kao i u dosadašnjim razmatranjima brzina vjetra jednolika s visinom te u horizontalnom smjeru iznosi v_s . Time je $v_x = v_s$,$v_y = v_z = 0$. Također zbog činjenice da je horizontalna difuzija malena u usporedbi s brzinom kretanja zraka u tom smjeru može je se zanemariti te dobivamo:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} = K_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \tag{5.3.4}$$

Nadalje, ako emisiju efluenata u atmosferu Q(kg/m^{2}s) smatramo konstantnom u vremenu konačni oblik diferencijalne jednadžbe glasi:

$$v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} = K_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \tag{5.3.5}$$

Rješenje ove diferencijalne jednadžbe uz korištenje rubnih uvjeta (koncentracija iščezava kada x i z teže u beskonačnost; maksimalna je kod x = 0 i z = 0; koordinate su jednake nuli u ishodištu emisije efluenata) dobiva se bezdimenzijskom analizom parcijalne diferencijalne jednadžbe te njezinim pretvaranjem u običnu diferencijalnu jednadžbu i glasi:

$$C_i = \frac{Q}{4\pi\sqrt{K_y \cdot K_z}} e^{\frac{-v_s}{4x}(\frac{y^2}{K_y}+\frac{z^2}{K_z})} \tag{5.3.6}$$

Dobivena jednadžba pokazuje da raspodijela koncentracija efluenata u smjerovima y i z ima oblik Gaussove funkcije raspodijele greške f(z), čiji je oblik $f(z) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{-k^2 \cdot z^2}$ sa varijancom $\sigma^2 = \frac{1}{2k^2}$. Usporedbom vidimo da je standardna devijacija za smjerove y i z,

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{2xK_y}{v_s}} \tag{5.3.7}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{2xK_z}{v_s}} \tag{5.3.8}$$

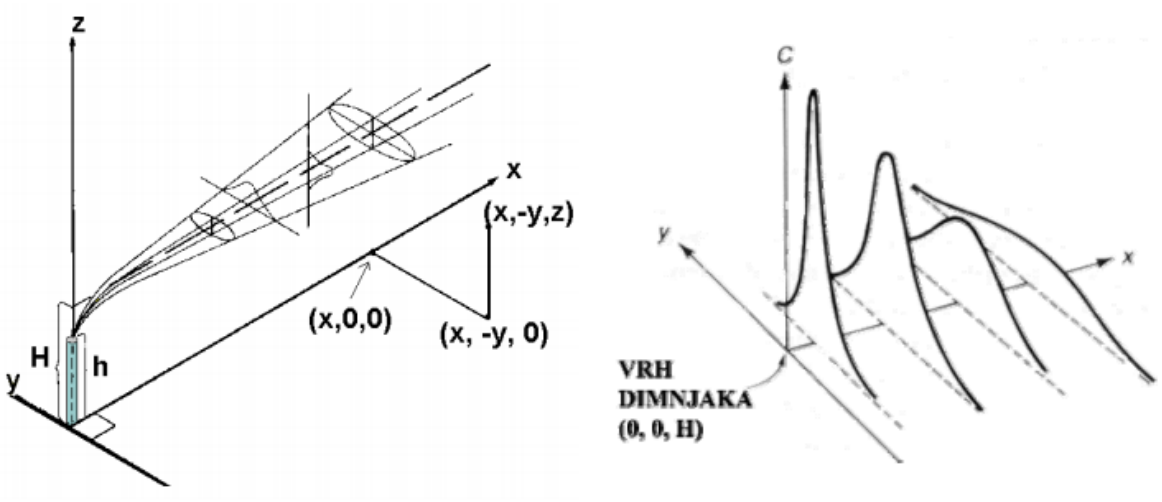
Uvrštenjem natrag u (5.3.6) dobiva se raspodjela koncentracije u smjerovima y i z u funkciji srednje brzine v_s i standardnih devijacija koje se za ovakav primjer nazivaju koeficijent horizontalne disperzije σ_y i koeficijent vertikalne disperzije σ_z :

$$C_i = \frac{Q}{v_s \cdot 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} e^{-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}+\frac{z^2}{2\sigma_z^2})} \tag{5.3.9}$$

Ova jednadžba je dobivena uz pretpostavku emisije efluenata iz središta koordinatnog sustava. U stvarnosti se efluenti ispuštaju s neke visine (visina dimnjaka z = h), a širenje postoji samo kod pozitivnih vrijednosti z . Rješenje ovakvog slučaja diferencijalne jednadžbe se dobiva korištenjem metode simetričnih (zrcalnih) slika te glasi:

$$C_i = \frac{Q}{v_s \cdot 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \left\{ e^{-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}+\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2})} + e^{-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}+\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2})} \right\} \tag{5.3.10}$$

Izgled zvonolikog oblika raspodijele koncentracija u poprečnom presjeku na nekoj nizstrujnoj udaljenosti od izvora (dimnjaka) je prikazana na slici 5.1. [14]



Slika 5.1.Prikaz Gaussove razdiobe koncentracije u yz plohama s obzirom na udaljenost od dimnjaka[14]

5.4. Parametri difuzije

Uobičajeno se koeficijenti difuzije za smjerove y i z određuju eksperimentalno za niz tipiziranih atmosferskih uvjeta. Tako izračunati koeficijenti se koriste za izračunavanje koncentracija efluenata pomoću dobivenih funkcija raspodijele. Što je veća nestabilnost atmosfere, to će brže rasti koeficijenti difuzije s udaljenošću. Pasquill je korištenjem eksperimentalnih podataka postavio 6 tipova atmosferskih uvjeta, počevši od najnestabilnije do stabilne atmosfere, nazvanih A, B, C, D, E i F klase stabilnosti. Koeficijente atmosferske difuzije prema Pasquill-Guiford-ovim klasama stabilnosti postavio je Turner (1995) za korištenje u Industrial Source Complex (ISC) modelu difuzije razvijenom kod USEPA-e (1995) prema sljedećim formulama.

Parametar difuzije bočno na smjer vjetra (y smjer) se računa:

$$\sigma_y = 465{,}12 \cdot x \cdot \mathrm{tg}\theta \tag{5.4.1}$$

gdje su: σy - parametar difuzije u y smjeru
x- udaljenost od izvora (km)
$\theta = c - d \cdot \ln(x)$ (radijani)
c,d - P-G koeficijenti

Proračun parametra difuzije u vertikalnom (z) smjeru σ_z je kompliciraniji jer vrijedi nad ograničenoj udaljenosti od izvora. Proračun je dan sljedećom formulom:

$$\sigma_z = a \cdot x^b \tag{5.4.2}$$

gdje su: σ_z - parametar difuzije u z smjeru
x- udaljenost od izvora (km)
a,b - P-G koeficijenti

Koeficijenti a, b, c i d mogu se pronaći u tablicama ISC modela difuzije na stranicama EPA-inog ogranka za propisane standarde (www.epa.gov\scraam001) (Regulatory models). [13]

5.5. Nedostaci Gaussovog modela difuzije

Danas je u svijetu Gaussov model difuzije primjenjen u, svim propisima reguliranim, modelima kao što su najpoznatiji ISC (Industrial Source Complex) i Screen 3D modeli distribuirani kod EPA-e (US Environmental Protection Agency). Nažalost, mnogi korisnici tih modela su potpuno nesvjesni svih pretpostavki i ograničenja te pogrešno vjeruju da preciznost postignuta današnjim računalima ujedno predstavlja i postignutu točnost. U mnogim modelima difuzije, određivanje koncentracije onečišćivača pomoću prizemnih receptora nad uzgonski uzdignutom perjanicom dispergiranog plina koji sadrži onečišćivač uključuje dva glavna koraka:
1. Proračunavanje visine do koje se perjanica uzdiže na određenoj nizstrujnoj udaljenosti od dimnjaka. Proračunata visina dizanja dodaje se na visinu izvora onečišćivača (visina dimnjaka) kako bi se dobila tzv. "efektivna visina dimnjaka", također poznata kao "visina središnjice perjanice" ili jednostavno "visina emisije".
2. Koristeći Gaussove jednadžbe difuzije proračunavaju se prizemne koncentracije pod perjanicom.

Pretpostavke i ograničenja
U izvodu Gaussove jednadžbe difuzije korišteno je mnoštvo pretpostavki i ograničenja i to samo za jedan izvor onečišćenja te kontinuiranu uzgonski podignutu perjanicu nad ravnim terenom. Stoga taj model nije pravo rješenje. Danas već postoje mnogo sofisticiraniji modeli koji uključuju više izvora onečišćenja na kompleksnom terenu. Najvažnije pretpostavke i ograničenja odnose se na:

-točnost predviđanja visine dizanja perjanice budući da ta visina utječe na visinu emisije korištenu u Gaussovoj jednadžbi disperzije;
- točnost koeficijenata difuzije (vertikalna i horizontalna standardna devijacija distribucije emisije) korištenih u Gaussovom modelu difuzije;
- pretpostavka osrednjenog vremenskog perioda predstavljenog proračunatim prizemnim koncentracijama onečišćivača pomoću koeficijenata difuzije korištenih u Gaussovom modelu difuzije; drugim riječima, da li proračunate prizemne koncentracije predstavljaju 5-minutne, 10-minutne, 15-minutne, 30- minutne ili jednosatne osrednjene koncentracije?

Pored ovih pretpostavki i ograničenja u izvodu Gaussove jednadžbe postoje i one kojima su podvrgnute metode određivanja određenih parametara u Gaussovom modelu. Te metode uključuju:

određivanje klasifikacije atmosferske stabilnosti (karakterizira stupanj turbulencije potreban za povećanje difuzije),
određivanje profila vjetra zbog efektivne visine,
te konverzije kratkotrajnih prizemnih koncentracija iz jednog srednjeg vremena u drugi.

Mnogi autori ukazali su na nedostatke tog modela, nažalost, usprkos kritike, postoji široko vjerovanje da modeli difuzije mogu predvidjeti koncentracije dispergirane perjanice s faktorom dva ili tri u usporedbi sa stvarnim koncentracijama u prirodi. Naime, ima i onih koji vjeruju kako su ovi modeli čak i točniji. Izvod Gaussove jednadžbe zahtjeva pretpostavku o konstantnim uvjetima nad cijelom dužinom putanje perjanice od izvora emisije pa sve do nekog nizstrujnog prizemnog receptora. Ipak, ne može se reći s razumnom sigurnošću kako je brzina vjetra na visini središnjice dima i klasa atmosferske stabilnosti zaista poznata te konstantna duž cijele putanje oblaka. Ako je to u nekom slučaju i istina, radi se o čistom slučaju najčešće na velikim udaljenostima. Također, određivanje točne brzine vjetra i klase stabilnosti uzduž središnjice ("simetrale") dima zahtijeva :
a) predviđanje točnog dizanja dima,
b) točan odnos brzine vjetra i visine,
a nijedno od njih nije još ostvareno.

Kratak prikaz svih ograničenja i pretpostavke uočenih do sada:
- brzina vjetra i njezin smjer su konstantni od točkastog izvora do receptora;
- atmosferska turbulencija je također konstantna duž cijele putanje dima;
- cijela perjanica je homogena, što znači da nema taloženja ili ispiranja čestica dima; čestice dima nisu absorbirane u vodi, u zraku niti u vegetaciji; efluenti nisu podvrgnuti kemijskim transformacijama (neki današnji modeli uzimaju u obzir taloženje i kemijske transformacije, ali odvojeno od Gaussove jednadžbe disperzije);
- samo vertikalna i poprečna difuzija postoji (nema nizstrujne difuzije);
- oblik disperzije je probabilistički i može se točno opisati Gaussovom distribucijom.
- perjanica se širi u čunjastom obliku dok putuje nizstrujno, dok je idealni čunjasti oblik samo jedan od mnogih uočenih oblika perjanica;
- uvjeti terena mogu se upotrijebiti korištenjem jednog skupa difuzijskih koeficijenata za ruralno područje te drugog skupa koeficijenata za urbano područje; osnovna Gaussova jednadžba disperzije ne uključuje režime terena kao što su doline, planine i obale

Gaussov model pretpostavlja jedan idealizirani stacionarni slučaj s konstantnim meteorološkim uvjetima duž velikih udaljenosti, idealiziranu geometriju perjanice, jednoliki ravan teren, kompletiranu bilancu mase i točnu Gaussovu raspodijelu. Takav se idealan slučaj zaista rijetko dogodi. [14]

6. Analiza bezdimenzionalnih momenata

Funkcija distribucije koncencentracije priklatno se opisuje s prva četiri momenta. Proračun momenata za ovaj rad je rađen u MS Excelu. Na temelju Gaussovog modela za difuziju iz jedne točke najprije je proračunata srednja vrijednost koncentracija (C_{mean}) unutar oblaka. Srednja vrijednost koncentracije normirana je maksimalnom vrijednošću koncentracije (C_0) koja se javlja pri minimalnoj brzini vjetra iznad profila dimnjaka (x=0). Iz normiranih srednjih vrijednosti koncentracije dobivene su normirane vrijednosti varijance koncentracije.

$$VarC = C_{mean}(C_0 - C_{mean}) \tag{6.1}$$

$$VarC = C_{mean}^{norm}(1 - C_{mean}^{norm}) \tag{6.2}$$

Momente oko ishodišta (α=0) zovemo apsolutnim momentima. Centralnim momentima nazivamo momente oko aritmetičke sredine (α=$\bar{x}$). Prema tome, srednja vrijednost je prvi moment, a varijanca drugi centralni moment. Pomoću njih dobiveni su koeficijenti asimetrije (skewness) i spljoštenosti (kurtosis).

Odnos centralnih momenata i momenata oko ishodišta:

$$M_2 = m_2 - m_1^2 \tag{6.3}$$

$$M_4 = m_3 - 3 \cdot m_2 \cdot m_1 + 2 \cdot m_1^3 \tag{6.4}$$

$$M_4 = m_4 - 4 \cdot m_3 \cdot m_1 + 6 \cdot m_2 \cdot m_1^2 - 3 \cdot m_1^4 \tag{6.5}$$

Izračun trećeg i četvrtog momenta:

$$m_3 = \left(\frac{m_2}{m_1^2}\right)^2 \cdot m_1^3 \tag{6.6}$$

$$m_4 = \left(\frac{m_2}{m_1^2}\right)^3 \cdot m_1^4 \tag{6.7}$$

Koeficijet asimetrije je omjer trećeg centralnog momenta i standardne devijacije na treću potenciju.

$$\alpha_3 = \frac{M_3}{\sigma^3} \tag{6.8}$$

Kaže se da je skup podataka negativno asimetričan ako je $\alpha_3<0$, pozitivno simetričan ako je $\alpha_3>0$. $\alpha_3=0$ znači da je skup podataka simetričan. Grafički, histogram simetričnog skupa podataka je simetričan u odnosu na vertikalni pravac koji prolazi aritmetičkom sredinom. Kada je skup podataka pozitivno asimetričan histogram je nagnut u lijevo u odnosu na

vertikalni pravac, a kada je skup podataka negativno asimetričan histogram je nagnut u desno u odnosu na vertikalni pravac.

Zaobljenost modalnog vrha distribucije mjeri se koeficijentom spljoštenosti ili zaobljenosti. Koeficijent spljoštenosti je omjer cečtvrtog centralnog momenta i standardne devijacije na četvrtu potenciju.

$$\alpha_4 = \frac{M_4}{\sigma^4} \tag{5.9}$$

Ako je: $\alpha_4 = 3$, distribucija ima zaobljenost normalne krivulje
$\alpha_4 > 3$, distribucija je oblikom šiljastija od normalne krivulje i
$\alpha_4 < 3$, distribucija je oblikom plosnatija od normalne krivulje. [8]

Na temelju prva četiri momenta može se zaključiti kako izgleda funkcija distribucije koncentracije i prema njoj računati kritične vrijednosti na rubu područja.

Najprije je napravljena analiza i usporedba momenata za 2D i 3D slučaj da se utvrdi da li model na ispravan način interpretira pojavu i da se dobije uvid u odnose između ta dva slučaja, tj. da li dimenzionalnost problema utječe na procjenjenu vrijednost koncentracije.

Nakon toga se promatraju i analiziraju momenti za 3D slučaj na različitim visinama od izvora zagađenja.

Svi proračuni momenata su rađeni s minimalnom brzinom koja se javlja u rasponu od dvije godine (2011. i 2012.), a iznosi 0,1 (m/s) s obzirom da rezultira maksimalnim vrijednostima koncentracije.

Cijeli postupak se provodi za slučaj čistog advektivnog transporta a nakon toga za advektivno-difuzivni transport koristeći izraze Samforda i Sullivana (1995.)[21] za izračun varijance koncentracije.

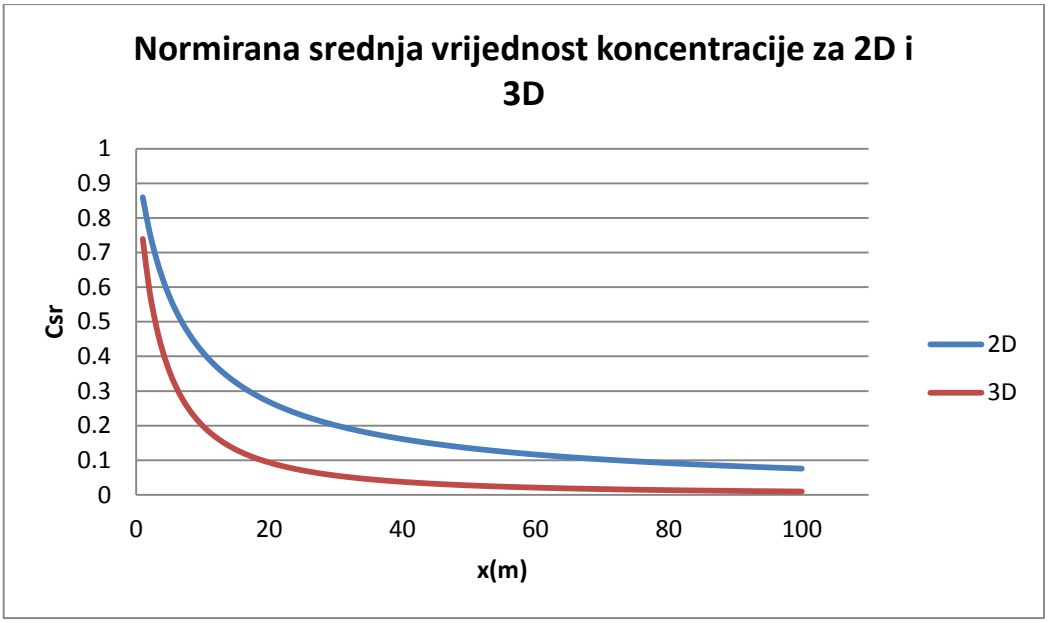
6.1. Analiza i usporedba momenata za čisti advektivni transport

6.1.1. Usporedba 2D i 3D slučaja raspršenja

Promatraju se normirane vrijednosti srednje vrijednosti koncentracije i normirane vrijednosti varijance koncentracije za dvodimenzionalni (2D) i trodimenzionalni (3D) slučaj transporta onečišćenja uzimajući u obzir samo advektivni transport. Razlika u proračunu za 2D i 3D slučaj je u tome što se za 2D slučaj isključuje djelovanje raspršenja u z-smjeru. Gaussova jednadžba za 2D slučaj raspršenja izgleda:

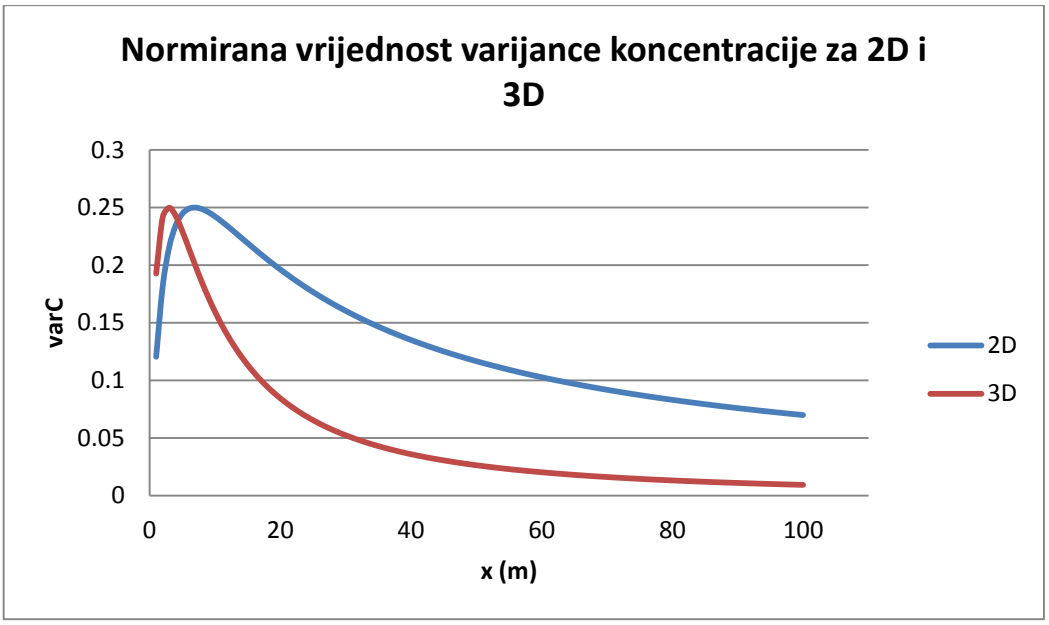
$$C_i = \frac{Q}{v_s \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y} e^{-(\frac{y^2}{2\sigma_y^2})} \tag{6.1.1}$$

Usporedba vrijednosti momenata se promatra na visini z=0(m), tj. na visini izvora onečišćenja.



Slika 6.1.Usporedba normirana srednja vrijednost koncentracije za 2D i 3D

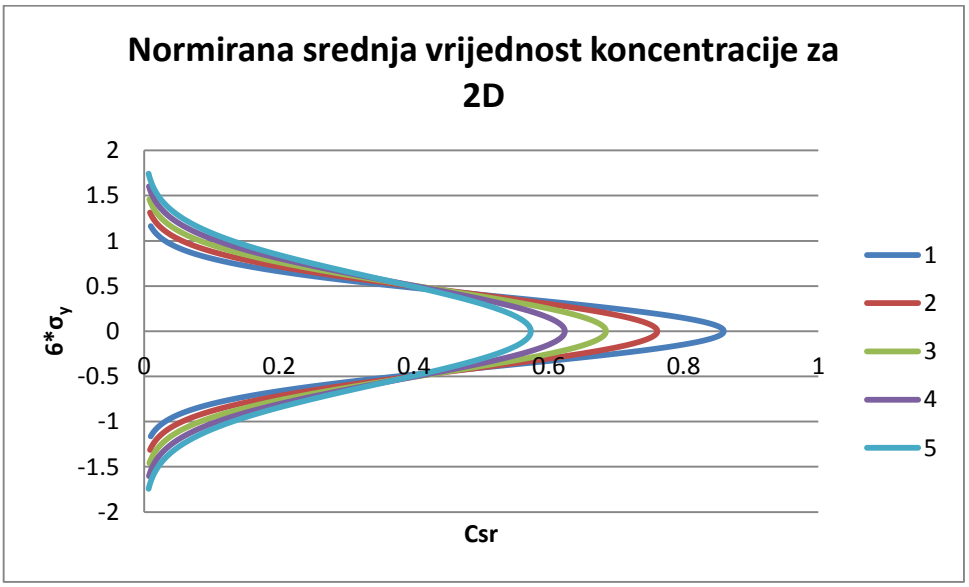
Usporedbom normirane srednje vrijednosti koncentracije pri udaljavanju od izvora za 2D i 3D slučaj, uočava se da srednja vrijednost koncentracije opada brže za 3D slučaj jer se širenje oblaka zagađenja odvija i u okomitom (z) smjeru, tj. uvodi se novi stupanj slobode koji razultira intenzivnijem smanjenju srednje vrijednosti koncentracije.



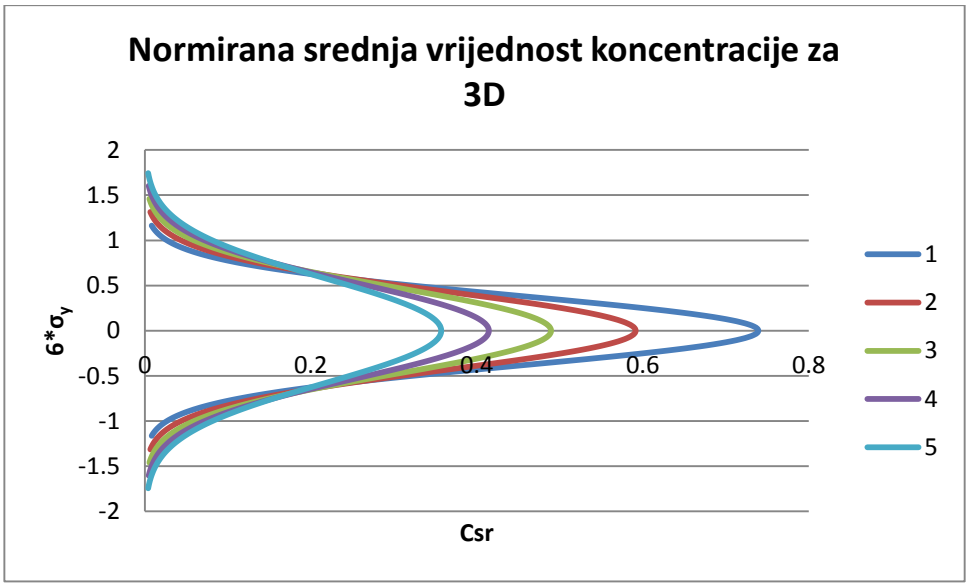
Slika6.2.Usporedba normirane vrijednost varijance koncentracije za 2D i 3D

Usporedbom normirane vrijednosti varijance koncentracije pri udaljavanju od izvora za 2D i 3D slučaj, uočava se da varijanca koncentracije opada brže za 3D slučaj. Za slučaj 3D oblak posjeduje jedan stupanj slobode više za širenje, čime se drastično smanjuje srednja vrijednost a time i varijanca. Maksimalna vrijednost normirane varijance iznosi 0,25 što je na gornjoj slici i vidljivo. Zbog širenja u dodatnom smjeru srednja vrijednost na manjoj udaljenosti u odnosu na slučaj 2D pada ispod 0,5 što uzrokuje brži pad varijance koncentracije.

Uspoređuje se i normirana srednja vrijednost koncentracije te normirana vrijednost varijance koncentracije promatrane u horizontalnoj ravnini.

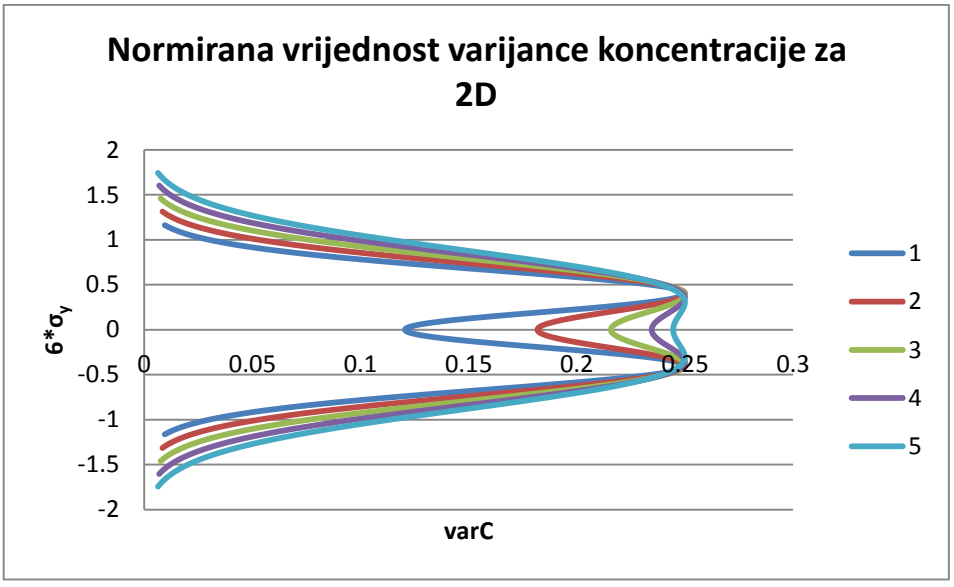


Slika 6.3.Normirana srednja vrijednost koncentracije za 2D slučaj

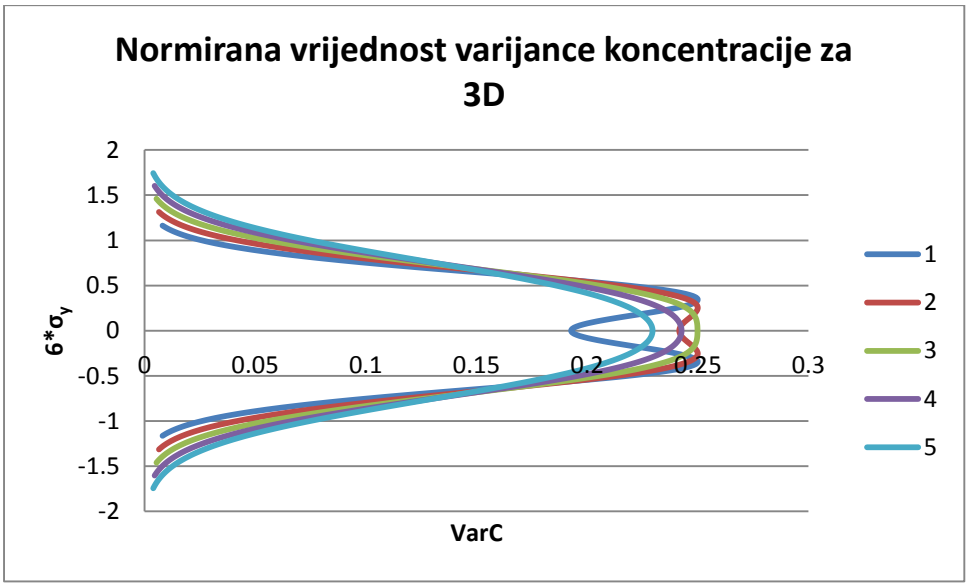


Slika 6.4.Normirana srednja vrijednost koncentracije za 3D slučaj

Usporedbom normirane srednja vrijednosti koncentracije za 2D i 3D slučaj u horizontalnoj ravnini uočava se da se veće vrijednosti javljaju u 2D slučaju.



Slika 6.5.Normirana vrijednost varijance koncentracije za 2D slučaj

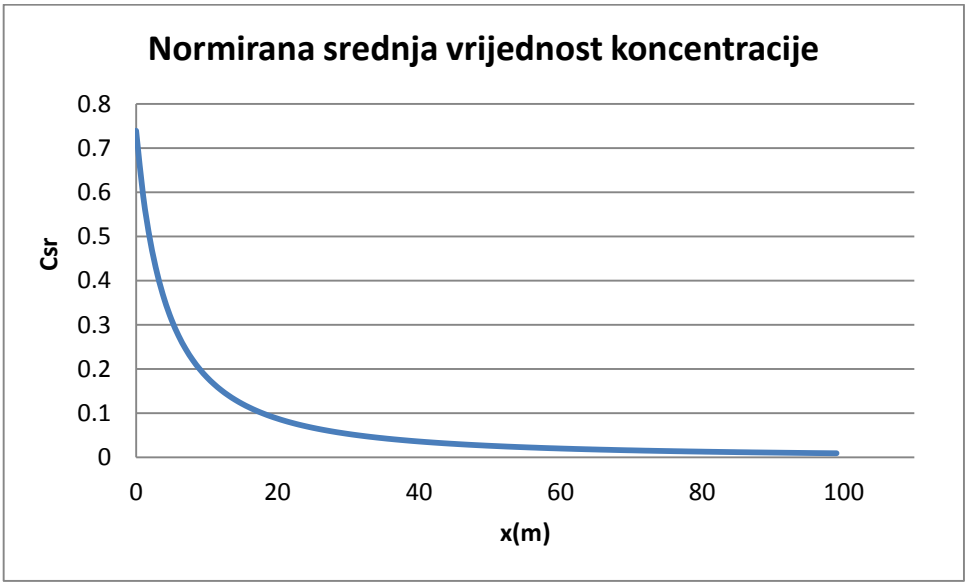


Slika 6.6.Normirana vrijednost varijance koncentracije za 3D slučaj

Uočava se da je maksimalna normirana vrijednost varijance koncentracije za 2D i 3D slučaj ista i iznosi 0,25. To je maksimalna moguća vrijednost normirane varijance koncentracije. U oba slučaja javlja se bimodalnost varijance za presjeke u blizini izvora onečišćenja. Bimodalnost iščezava brže za 3D slučaj.

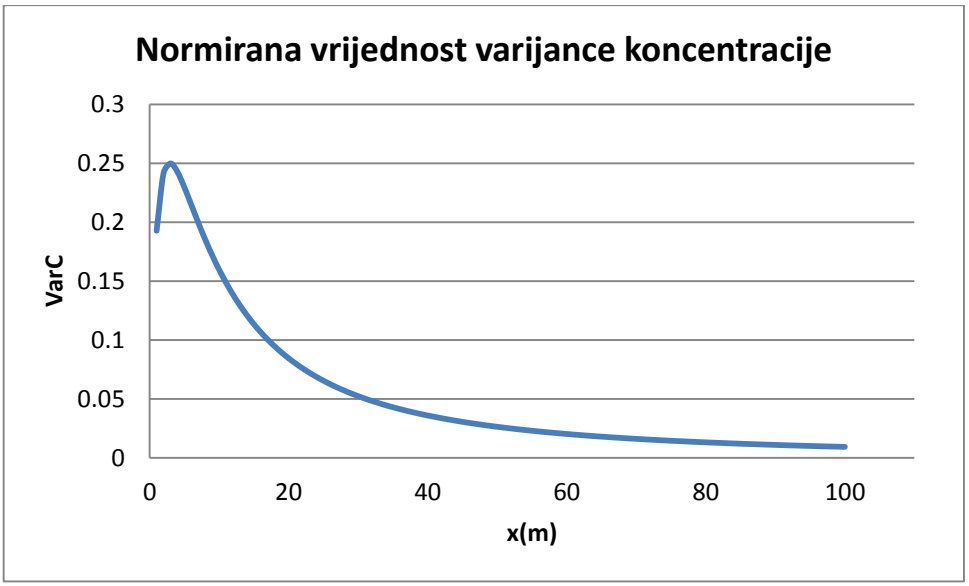
6.1.2. Analiza momenata za 3D slučaj na različitim visinama od izvora onečišćenja

Analiza momenata na z=0(m)



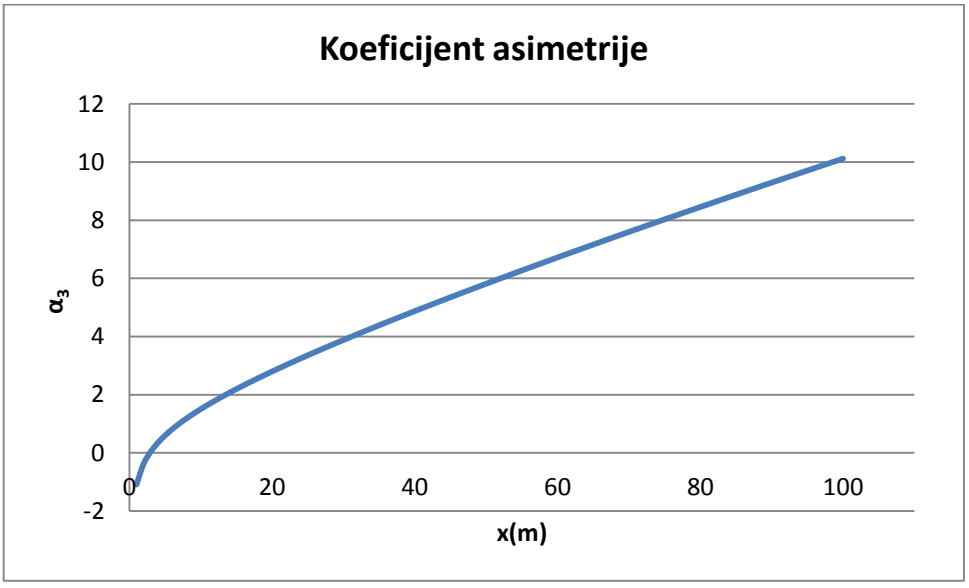
Slika 6.7.Normirana srednja vrijednost koncentracije

Slika 6.7. prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane srednje vrijednosti koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini centralne linije zagađenja. Srednja vrijednost koncentracije opada kako se udaljava od izvora onečišćenja.



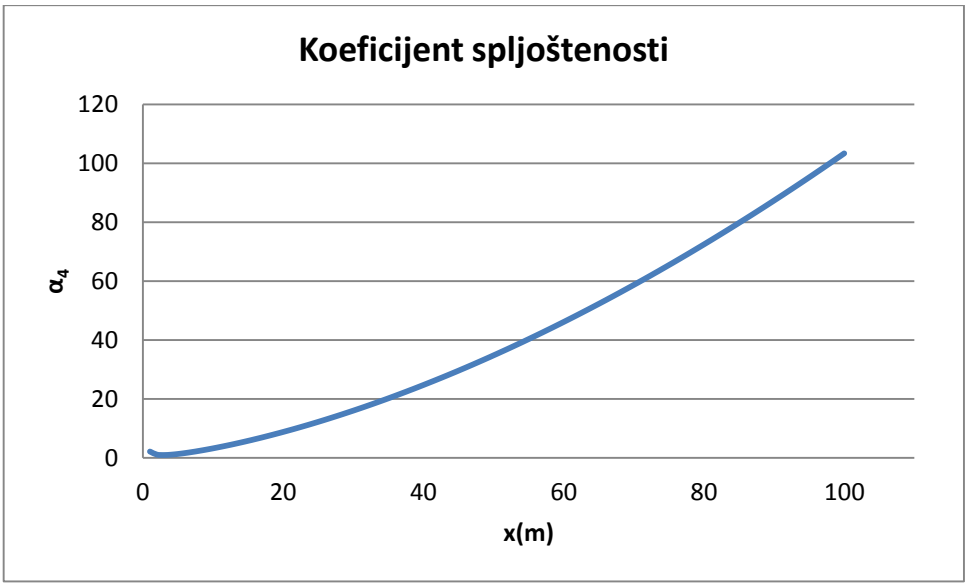
Slika 6.8.Normirana vrijednost varijance koncentracije

Slika 6.8. prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane vrijednosti varijance koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini centralne linije zagađenja. Normirana vrijednost varijance koncentracije opada kako se udaljavamo od izvora onečišćenja baš kao i srednja vrijednost.



Slika 6.9.Koeficijent asimetrije

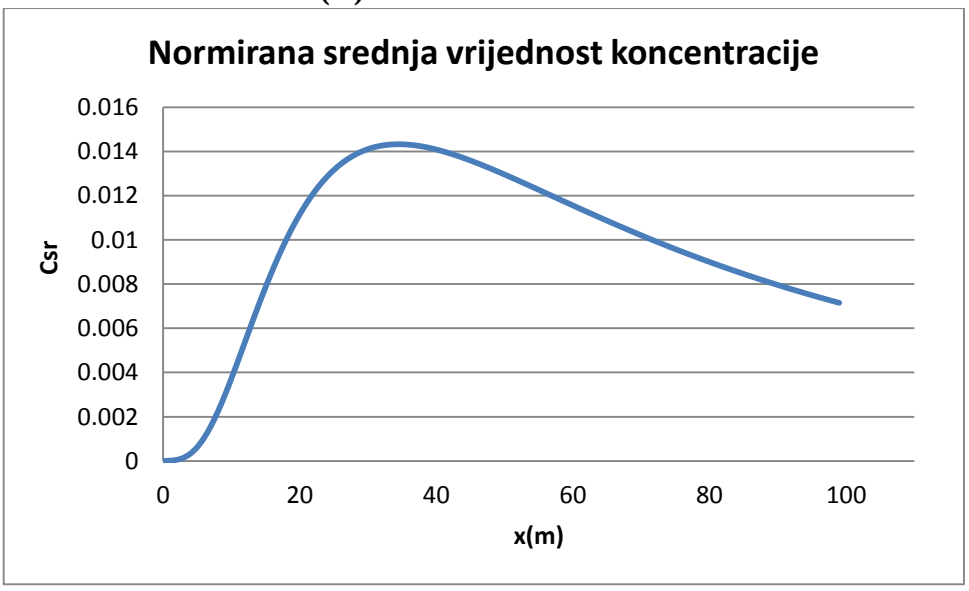
Slika 6.9. prikazuje kretanje koeficijenta asimetrije pri udaljavanju od izvora na visini centralne linije zagađenja. Vrijednost koeficijenta asimetrije raste pri udaljavanju od izvora zagađenja. Rast koeficijenta asimetrije označava pozitivnu asimetriju, tj. nagnutost funkcije distribucije prema lijevo. Nagnutost funkcije distribucije lijevo označava približavanje vrijednosti nuli, tj. opadanje učestalosti početnih vrijednosti koncentracije kako se udaljavamo od izvora onečišćenja.



Slika 6.10.Koeficijent spljoštenosti

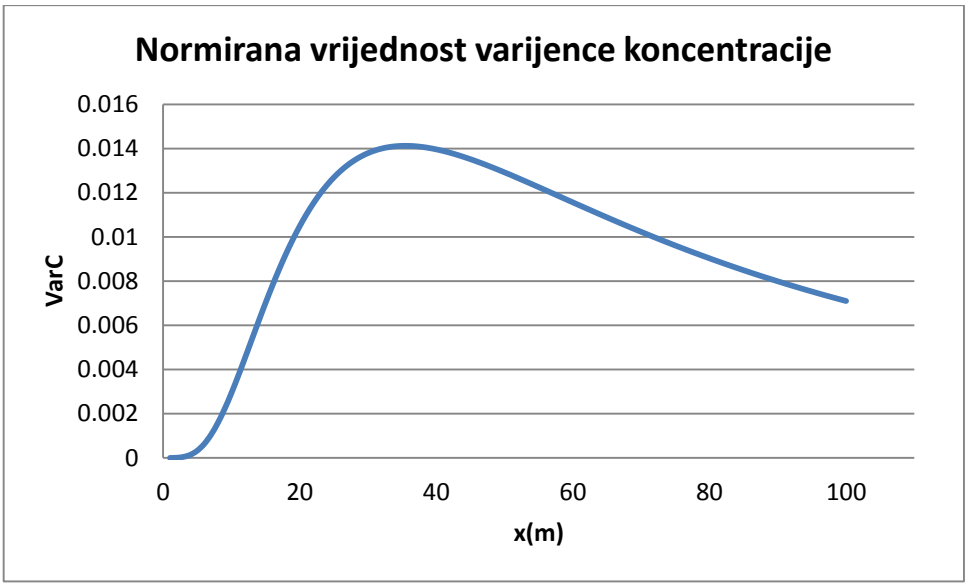
Slika 6.10. prikazuje kretanje koeficijenta spljoštenosti pri udaljavanju od izvora na visini centralne linije zagađenja. Vrijednosti koeficijenta spljoštenosti rastu pri udaljavanju od izvora zagađenja što označava niže vrijednosti vrha funkcije distribucije, tj. funkcija teži prelasku u ravnu liniju. Zaključuje se da vrijednosti učestalosti inicijalnih koncentracija opadaju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja.

Analiza momenata na z=2(m)



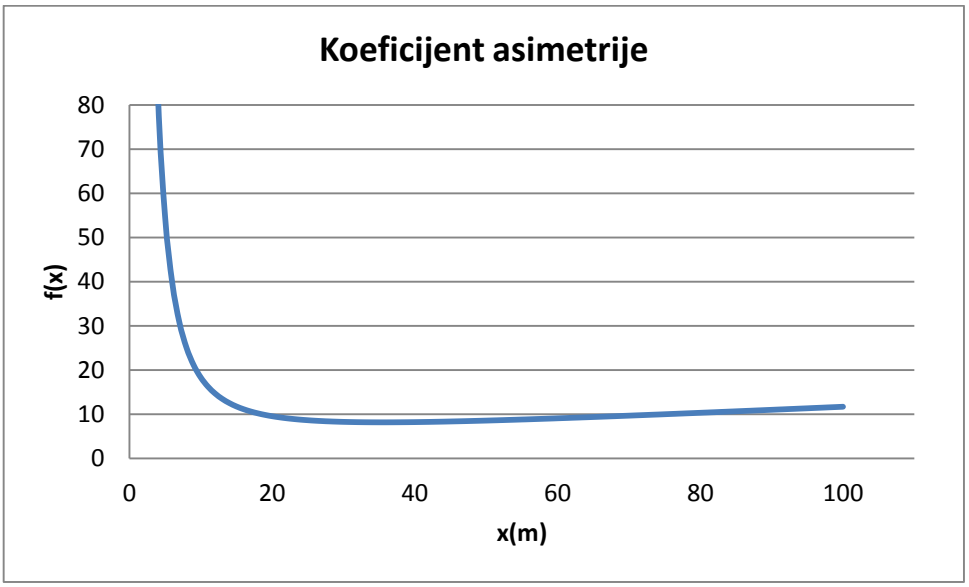
Slika 6.11.Normirana srednja vrijednost koncentracije

Slika 6.11 prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane srednje vrijednosti koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini 2(m) od centralne linije zagađenja. Uočava se da je maksimum srednje vrijednosti koncentracije odmaknut od izvora onečišćenja, x=0(m) i da su vrijednosti u blizini izvora minimalne. To se događa je presjek oblaka na 2(m) iznad centralne linije ne zahvaća vrijednosti koncentracija čija je vrijednost disperzije manja od 2(m).



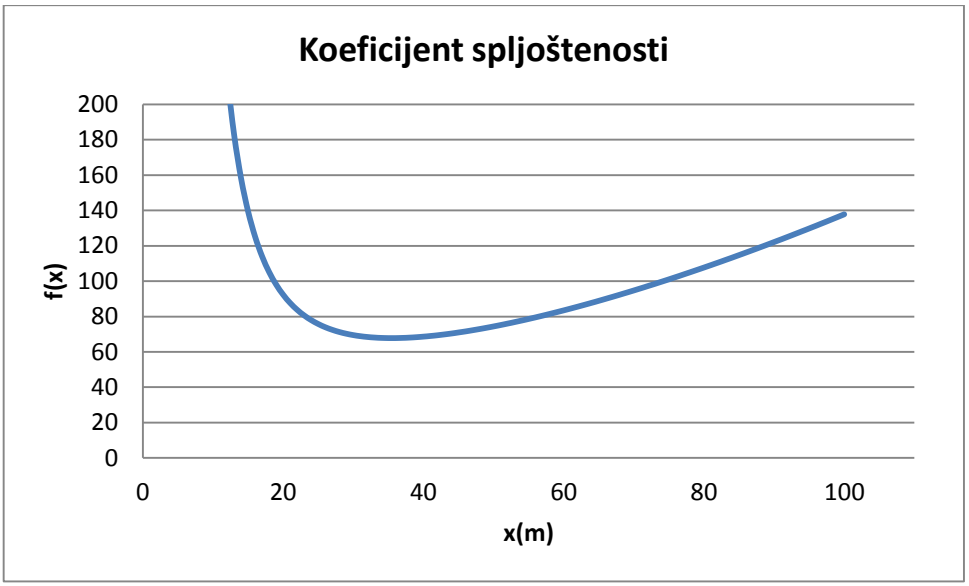
Slika 6.12.Normirana vrijednost varijance koncentracije

Slika 6.12. prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane vrijednosti varijance koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini 2(m) od centralne linije zagađenja. Primjećuje se da prikaz normiranih vrijednosti varijance koncentracije ima isti oblik kao i prikaz normirane srednje vrijednosti koncentracije.



Slika 6.13.Koeficijent asimetrije

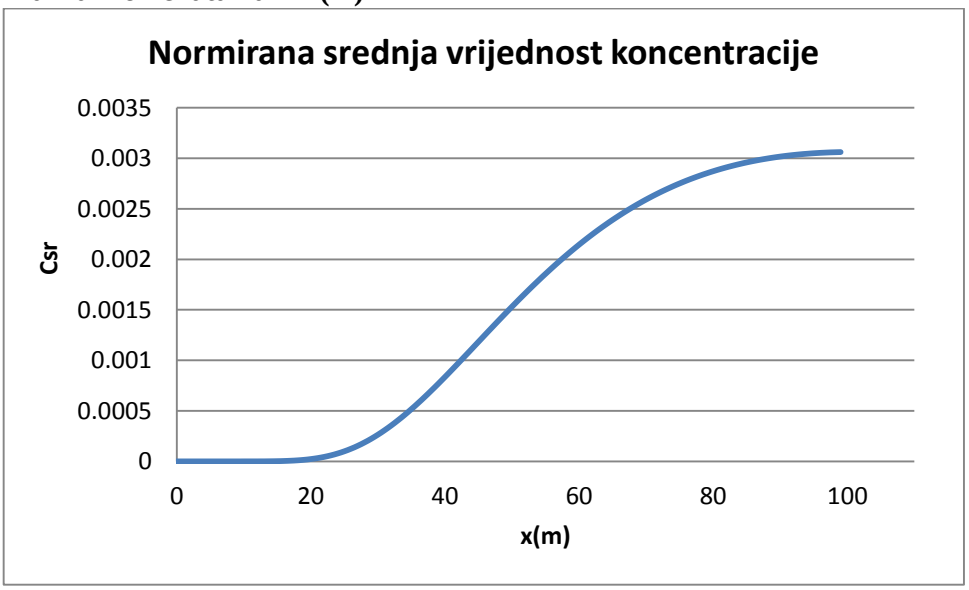
Slika 6.13. prikazuje kretanje koeficijenta asimetrije pri udaljavanju od izvora onečišćenja na visini 2(m) od centralne linije. Nije uzet cijeli prikaz nego samo dio gdje se odvija najveća promjena. Uočava se da koeficijent asimerije pada i relativno brzo poprima minimalne vrijenosti. Pad vrijednosti koeficijenta asimerije se događa jer presjekom na visini z=2(m) se ne obuhvaćaju vrijednosti koncentracija u blizini izvora te je srednja vrijednost koncentracije i varijance u tim presjecima približna nuli. Pozitivna vrijednost koeficijenta asimetrije označava nagnutost lijevo, te se primjećuje da je za presjeke u blizini izvora onečišćenja funkcija distribucije skroz nagnuta lijevo, tj. približna nuli. Vrijednosti koeficijenta asimetrije nakon toga rastu te se uvijek pozitivne.



Slika 6.14.Koeficijent spljoštenosti

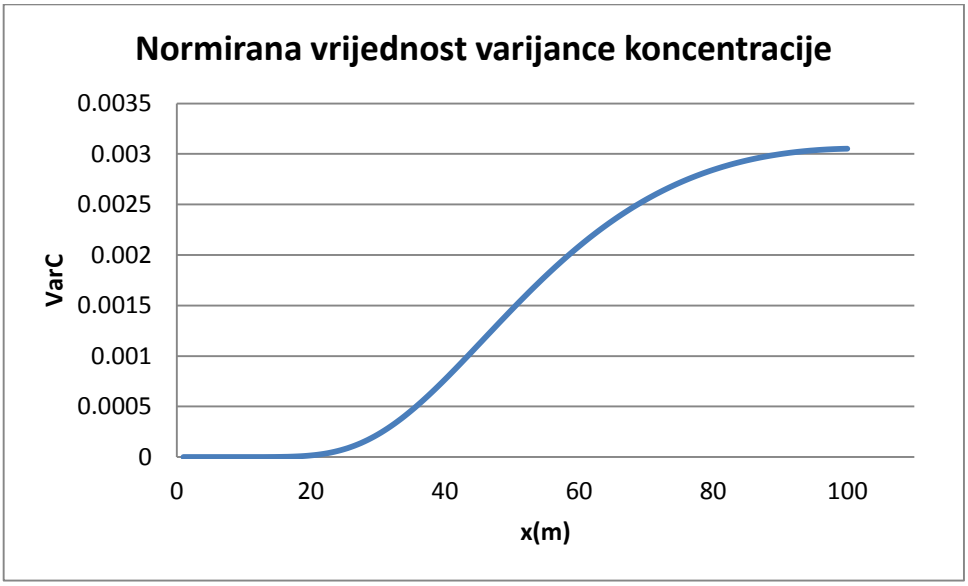
Slika 6.14. prikazuje kretanje koeficijenta spljoštenosti pri udaljavanju od izvora na visini 2(m) od centralne linije zagađenja. Nije uzet cijeli prikaz nego samo dio gdje se odvija najveća promjena. Koeficijent spoljoštenosti pri malim udaljenostima ima velike vrijednosti jer ne zahvaćamo presjeke čija je disperzija manja od 2(m). Srednje vrijednosti koncentracije i vrijednosti varijance u tim presjecima su približni nuli pa koeficijent spljoštenosti ima velike vrijednosti. Nakon dosega minimuma koeficijent spljoštenosti raste.

Analiza momenata na z=4(m)



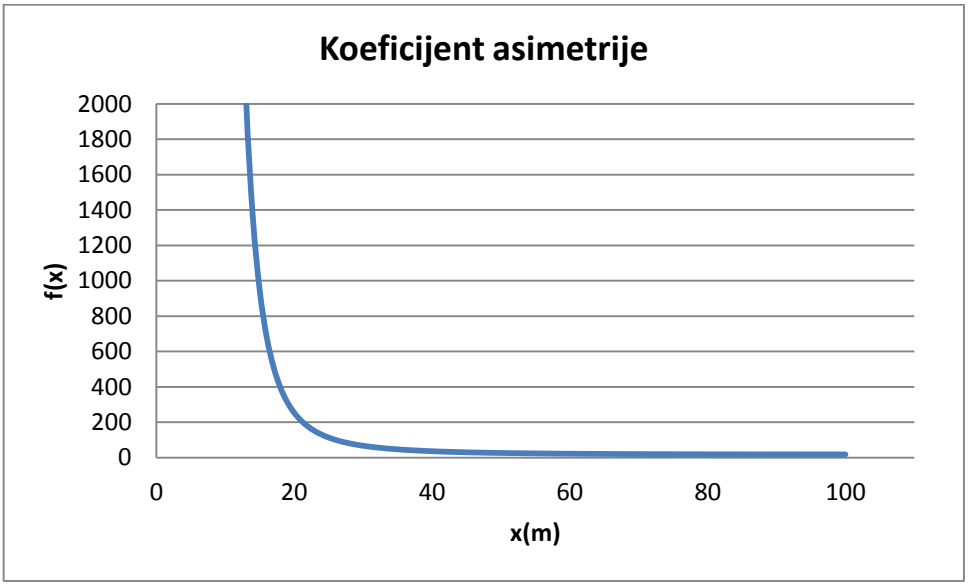
Slika 6.15.Normirana srednja vrijednost koncentracije

Slika 6.15. prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane srednje vrijednosti koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini 4(m) od centralne linije zagađenja. Normirana srednja vrijednost koncentracije počinje rasti tek za one vrijednosti čija disperzija prelazi 4(m) jer je presjek tu postavljen. Nakon toga vrijednosti rastu da bi se maksimalna vrijednost javila na kraju promatranog područja.



Slika 6.16.Normirana vrijednost varijance koncentracije

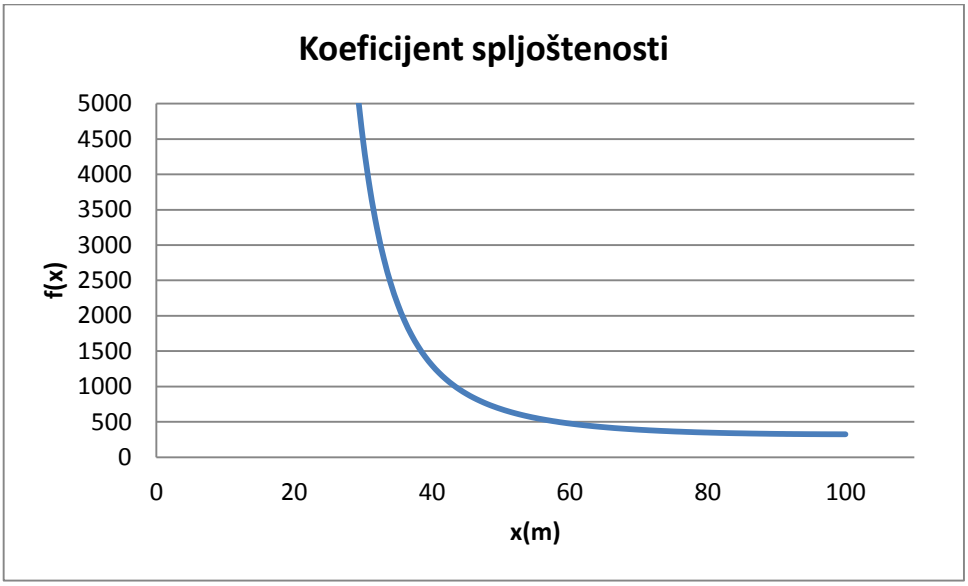
Slika 6.16. prikazuje kretanje maksimalne vrijednosti normirane vrijednosti varijance koncentracije pri udaljavanju od izvora na visini 4(m) od centralne linije zagađenja. Primjećuje se da prikaz normiranih vrijednosti varijance koncentracije ima isti oblik kao i prikaz normirane srednje vrijednosti koncentracije.



Slika 6.17.Koeficijent asimetrije

Slika 6.17. prikazuje kretanje koeficijenta asimetrije pri udaljavanju od izvora onečišćenja na visini 4(m) od centralne linije. Nije uzet cijeli prikaz nego samo dio gdje se odvija najveća promjena. Uočava se da koeficijent asimerije pada i relativno brzo poprima minimalne vrijenosti. Pad vrijednosti koeficijenta asimerije se događa jer na visini z=4(m) ne sječemo presjeke u blizini izvora te je srednja vrijednost koncentracije i varijance u tim presjecima približna nuli. Pozitivna vrijednost koeficijenta asimetrije označava nagnutost

lijevo, te se primječuje da je za presjeke u blizini izvora onečišćenja funkcija distribucije skroz nagnuta lijevo, tj. približna nuli. Vrijednosti koeficijenta asimetrije nakon toga rastu te se uvijek pozitivne.



Slika 6.18.Koeficijent spljoštenosti

Slika 6.18. prikazuje kretanje koeficijenta spljoštenosti pri udaljavanju od izvora na visini 4(m) od centralne linije zagađenja. Nije uzet cijeli prikaz nego samo dio gdje se odvija najveća promjena. Koeficijent spoljoštenosti pri malim udaljenostima ima velike vrijednosti jer ne zahvaćamo presjeke čija je disperzija manja od 4(m). Srednje vrijednosti koncentracije i vrijednosti varijance u tim presjecima su približni nuli pa koeficijent spljoštenosti ima velike vrijednosti. Nakon dosega minimuma koeficijent spljoštenosti raste.

Sa odmicanjem od centra oblaka prema rubu srednja vrijednost i varijanca opadaju dok skošenost i spljoštenost rastu. Posljedica je to dominacije učestalosti nultih vrijednosti koncentracije i približavanja težišta ispod funkcije gustoće vjerojatnosti koncentracije ka nuli.

6.2. Analiza i usporedba momenata koncentracije za advektivno-difuzni transport

Nakon analize momenata za 3D slučaj za čisti advektivni transport analizira se i advektivno-difuzivni transport. Advektivno-difuzivni transport čine dva osnovna mehanizma pronosa tvari a to su translacija i difuzija.

U vremenski osrednjenoj, zaglađenoj perjanici oblaka onečišćenja definira se središnja linija i smanjenje onečišćujućiš tvari s obe strane se aproksimira Gaussovom krivuljom. Povlači se paralela između Gaussovog širenja i molekularne difuzije, što je posljedica linearne veze između difuznog fluksa i gradijenta koncentracije definiranog Fick-ovim zakonom:

$$F = -n_0 \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \tag{6.2.1}$$

gdje F predstavlja fluks molekularne difuzije a D je koeficijent molekularne difuzije (m^2/s). Fick-ov zakon je postulat na kojem je izgrađena teorija molekularne difuzije.

Molekularna difuzija je previše spora da bitno doprinese atmosferskom transportu, ali proces disperzije koji proizlazi iz turbulentnih kretanja zraka nalikuje na molekularnu difuziju. [11]

Turbulentna difuzija je transport mase, topline ili količine gibanja u sustavu, zbog slučajnih kretnji ovisnih o vremenu. Događa se kada turbulentni fluid dosegne kritično stanje što je rezultat kombinacije gradijenta koncentracije, gradijenta gustoće i visoke brzine. Događa se mnogo brže od molekularne difuzije i stoga je izuzetno značajan za probleme koji se tiču miješanja i transporta u atmosferi. [10]

Po analogiji s molekularnom difuzijom, definira se empirijski koeficijent turbulentne difuzije K_z kao:

$$\bar{F} = -n_0 \cdot K_z \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \tag{6.2.2}$$

gdje je F turbulentni fluks, a C srednja vrijednost koncentracije.

Kako je K_z empirijska veličina, treba biti određena eksperimentalno istovremenim mjerenjima F i C/z. U praksi, nalazi se da K_z ne ovisi toliko o vrsti difuzije, i s određenom pouzdanosti može se izraziti u donjim slojevima troposfere kao funkcija:

(a) brzine vjetra i hrapavost površine (koji određuju mehaničku turbulenciju izdizanja iz sudar toka zraka s preprekama),

(b) zagrijavanje površine (koja određuje plovnost turbulencije)

(c) visina (koji određuje veličinu turbulentnih vrtloga).

Red veličine vrijednosti Kz su $10^{-2} – 10^{1}$ m^2/s u stabilnoj atmosferi, $10^{0} – 10^{2}$ m^2/s u blizini neutralne atmosfere i $10^{1} – 10^{3}$ m^2/s u nestabilnoj atmosferi. [11]

Vrijednost varijance koncentracije za slučaj advektivno-difuzivnog transporta je izračunata prema izrazima Sawforda i Sullivana (1995.)[21]:

$$\overline{C^2}(z,t) = C(z,t) \cdot \beta^2 \cdot [\alpha(t) \cdot C_0(t) - C(z,t)] \tag{6.2.3}$$

gdje su:

$$\alpha(t) = 2 \cdot \left[\frac{(1+\hat{\sigma}^2(t))^2}{(1+2\cdot\hat{\sigma}^2(t))^{3/2}}\right]^{\frac{1+2\cdot\hat{\sigma}^2(t)}{2\cdot\hat{\sigma}^2(t)}} \tag{6.2.4}$$

$$\beta^2(t) = \frac{1+2\cdot\hat{\sigma}^2(t)}{1+\hat{\sigma}^2(t)} - 1 \tag{6.2.5}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_p}{\sigma_0} \tag{6.2.6}$$

Sawford i Sullivan su pri definiranju izraza σ_0^2 i σ_p^2 odredili kao:

$$\sigma_0^2 = a_0 + 2 \cdot K \cdot \frac{x}{u} \tag{6.2.7}$$

$$\sigma_p^2 = 2 \cdot K \cdot \frac{x}{u} \tag{6.2.8}$$

Za izračun vrijednosti varijance koncentracije za advektivno-difuzni transport po Sawfordu i Sullivanu (1995.) koriste se koeficijenti α i β. Njihove granične vrijednost za bezdimenzionalni (normirani) slučaj su izračunate kao:

$$\beta^2 \cdot \bar{C}(\alpha \cdot C_0 - \bar{C}) < \bar{C} \cdot (C_0 - \bar{C}) \tag{6.2.9}$$

$$\alpha \cdot C_0 - \bar{C} < \frac{\bar{C} \cdot (C_0 - \bar{C})}{\beta^2 \cdot \bar{C}} \tag{6.2.10}$$

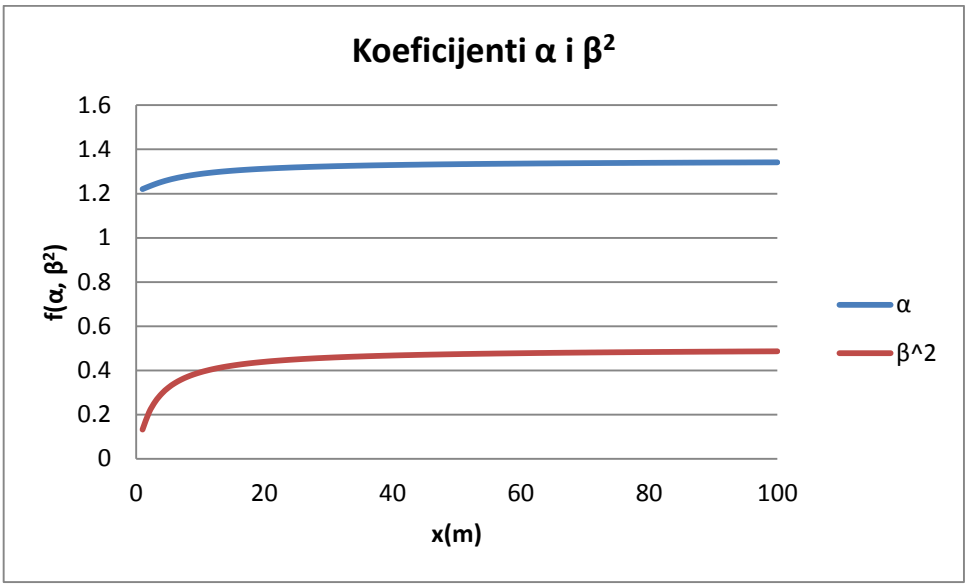
$$\alpha - \bar{C} < \frac{1-\bar{C}}{\beta^2} \tag{6.2.11}$$

$$\alpha < \frac{1-\bar{C}}{\beta^2} + \bar{C} \tag{6.2.12}$$

$$\beta^2 \cdot \bar{C} < \bar{C} \tag{6.2.13}$$

$$\beta^2 < 1 \tag{6.2.14}$$

Koeficijent α poprima vrijednosti veće od 1, a koeficijent β manje od 1. To je i vidljivo na slici 6.19.



Slika 6.19.Prikaz vrijednosti α i β^2 po x osi za Z=0(m), U=1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

U ranijem dijelu ovoga rada σ_o i σ_p su izračunati prema izrazima:

$$\sigma_{y,0} = 465{,}12 \cdot x \cdot tg\theta + \frac{D}{6} \tag{6.2.15}$$

$$\sigma_z = a \cdot x^b + \frac{D}{6} \tag{6.2.16}$$

Izjednačavenjem izraza dobijaju se vrijednost turbulentnog koeficijenta difuzije K_z.

Red veličine vrijednosti turbulentnog koeficijenta difuzije Kz dobiven usporedom je 10^{-3} – 10^{-2} m^2/s u stabilnoj atmosferi, 10^{-2} – 10^{-1} m^2/s u neutralnoj atmosferi i 10^{-1} – 10^{1} m^2/s u nestabilnoj atmosferi. Dobivene vrijednosti odgovaraju vrijednostima karakterističnim za atmosferu [21].

Kako je koeficijent turbulentne difuzije reda veličine 10^{-2} (m^2/s) zaključujemo da on ima dominantan utjecaj nad molekularnom difuzijom koja je reda veličine 10^{-8} (m^2/s).

U daljnjem radu čistim advektivnim transportom će se označavati transport koji sadrži mehanizme translacije, a advektivno-difuzivnim transportom će se označavati transport tvari koji sadrži mehanizme translacije, molekularne difuzije i turbulentne difuzije. Pri tome turbulentna difuzija ima dominantan utjecaj.

Za daljnji proračun uzimaju se vrijednost turbulentnog koeficijenta difuzije Kz=10^{-2} (m^2/s) kao referentnu vrijednost te je napravljena usporedba s Kz=10^{-4} (m^2/s).

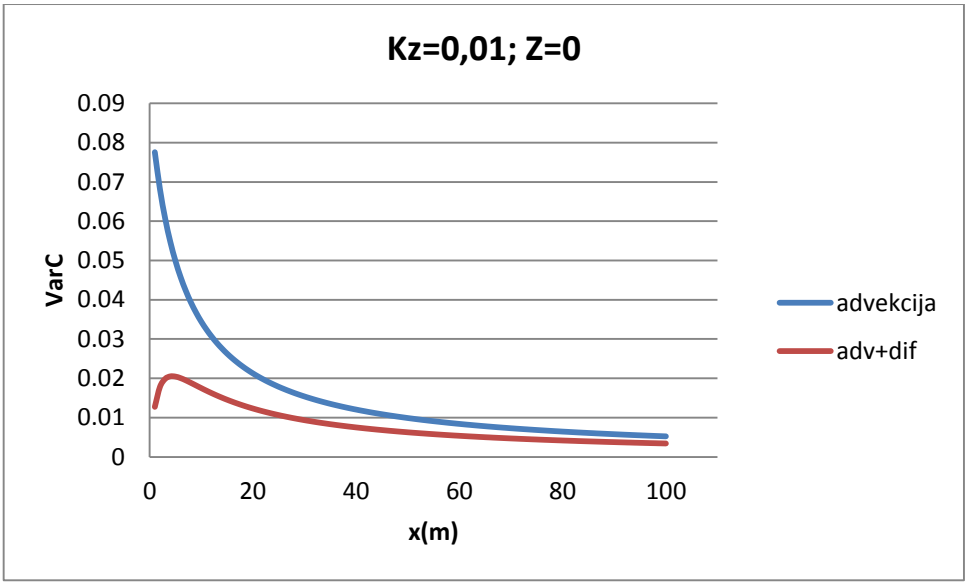
Tom vrijednošću aproksimira se molekularna difuzija koja je reda veličine 10^{-8} (m^2/s) i turbulentna difuzija reda veličine 10^{-2} (m^2/s).

U daljnjem proračunu prikazana je ovisnost vrijednosti varijance koncentracije o vrijednosti turbulentnog koeficijenta difuzije i brzine vjetra na različitim udaljenostima od izvora onečišćenja i različitim udaljenostima od središnje linije onečišćenja.

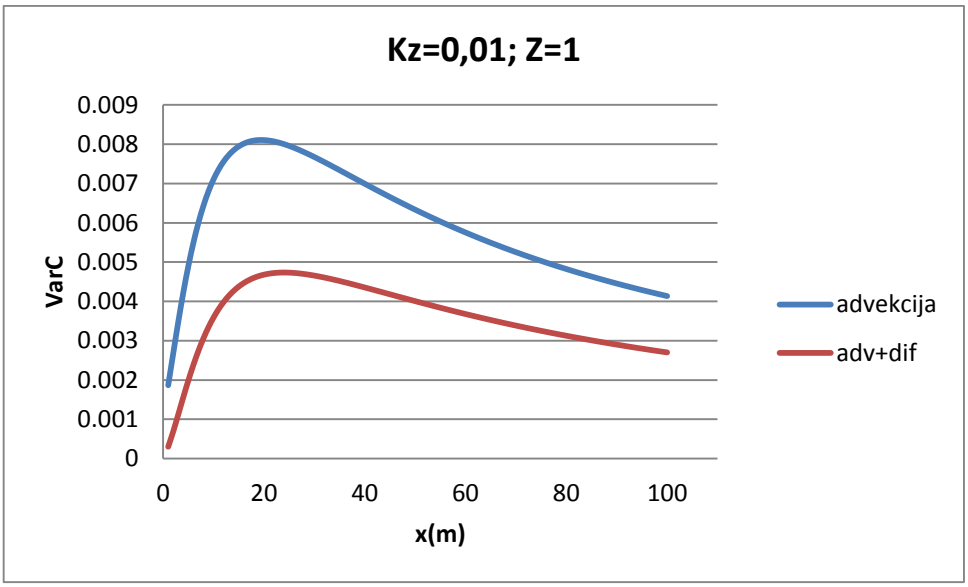
Analiza kretanja varijance koncentracije se radi s vrijednošću Kz=0,01 (m^2/s) jer ta je vrijednost dobivena kao referentna vrijednost koeficijenta turbulentne difuzije.

6.2.1.Analiza varijance koncentracije unutar strukture oblaka

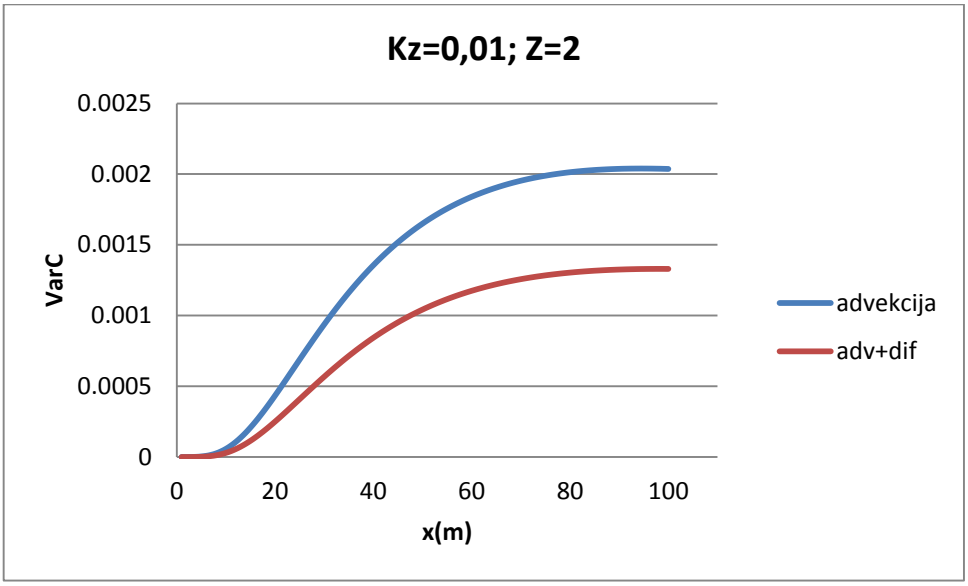
-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=1(m/s) za različite visine iznad osi oblaka.



Slika 6.20.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=0(m)



Slika 6.21.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=1(m)



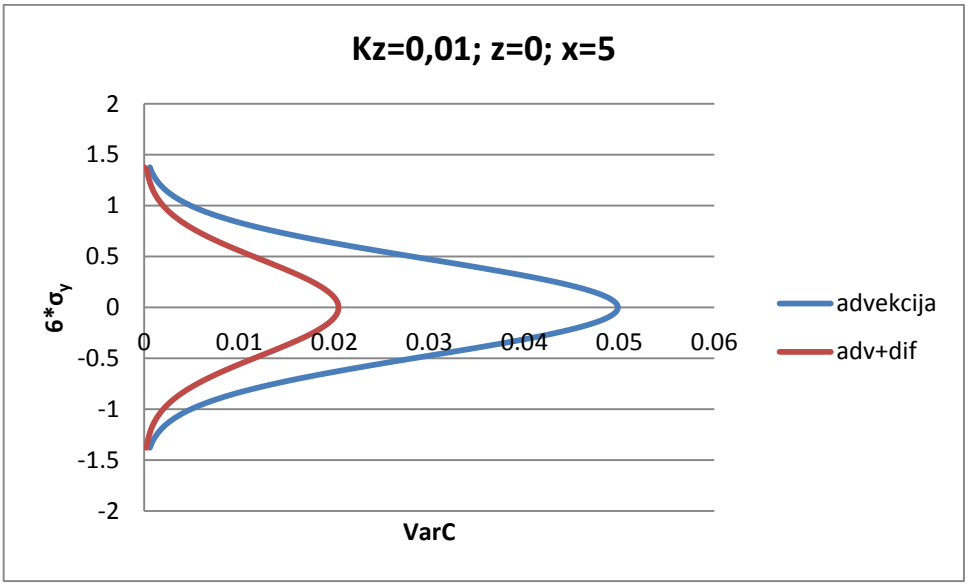
Slika 6.22.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za K_z=0,01(m^2/s) na visini Z=2(m)

Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije po osi x na različitim visinama od izvora onečišćenja uočava se da vrijednosti opadaju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja. Na središnjoj liniji onečišćenja (Z=0(m)) događa se konstantno opadanje vrijednosti varijance za čisti advektivni transport. Vrijednosti varijance za advektivo-difuzni transport na malim udaljenostima od izvora raste radi odnosa α i β pomoću kojih su računate vrijednosti. Na visini Z=1(m) se uočava da je maksimum srednje vrijednosti varijance koncentracije odmaknut od izvora onečišćenja i da su vrijednosti u blizini izvora minimalne. To se događa jer presjek oblaka na Z=1(m) iznad centralne linije ne zahvaća vrijednosti koncentracija čija je vrijednost disperzije manja od 1(m). Na visini Z=2(m) se uočava da je maksimum vrijednosti varijance koncentracije odmaknut od izvora onečišćenja i da postiže maksimum tek na većim udaljenostima od izvora. To se događa jer presjek oblaka na Z=2(m) iznad centralne linije ne zahvaća vrijednosti koncentracija čija je vrijednost disperzije manja od 2(m) te radi manjeg širenja oblaka zagađenja.

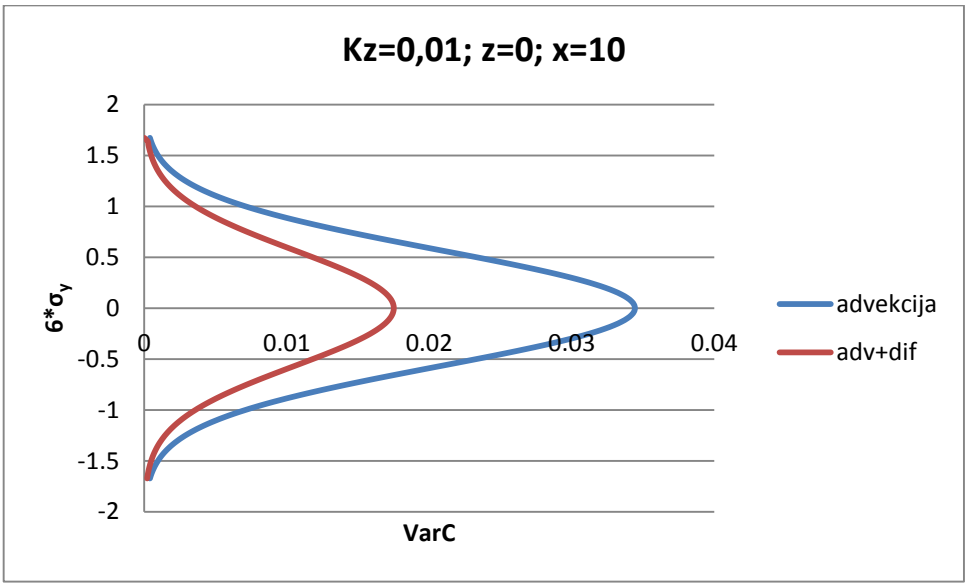
Uočava se i da su vrijednosti za advektivno-difuzivni transport manje nego za čisti advektivni transport na svim visinama i udaljenostima od izvora onečišćenja. Razlog tomu je što radi turbulentne difuzije dolazi do bržeg i većeg razrijeđenja koncentracije koji rezultira i opadanjem varijance koncentracije.

6.2.2.Analiza varijance koncentracije unutar strukture oblaka u x-y ravnini

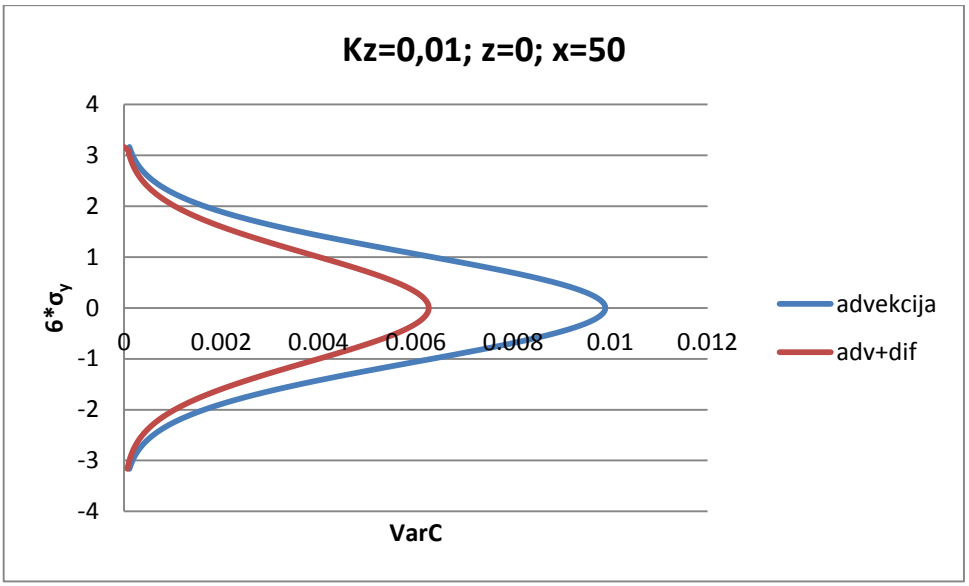
-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=1(m/s), Z=0(m) i x=5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja.



Slika 6.23.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=5(m) na visini Z=0(m)



Slika 6.24.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=10(m) na visini Z=0(m)

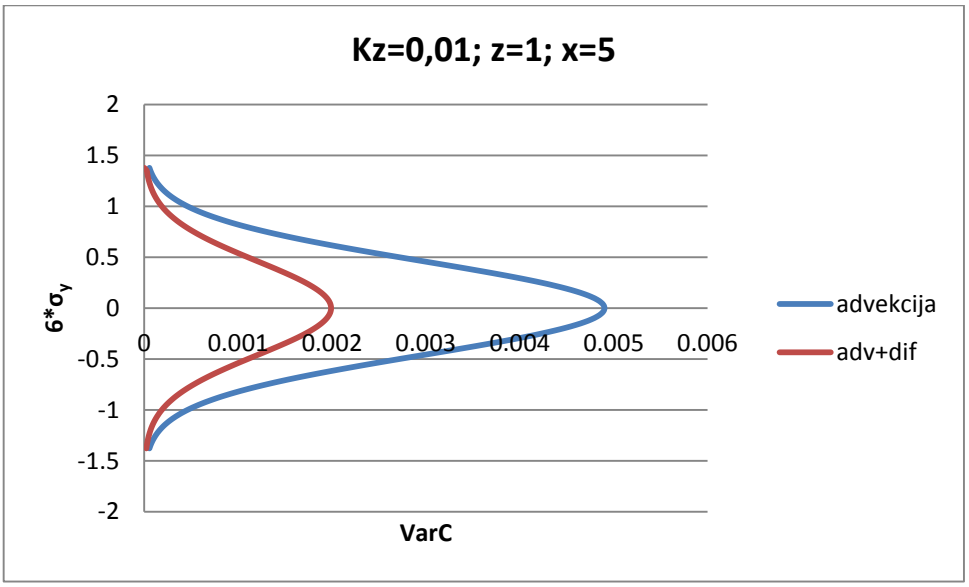


Slika 6.25.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za K_z=0,01(m^2/s), x=50(m) na visini Z=0(m)

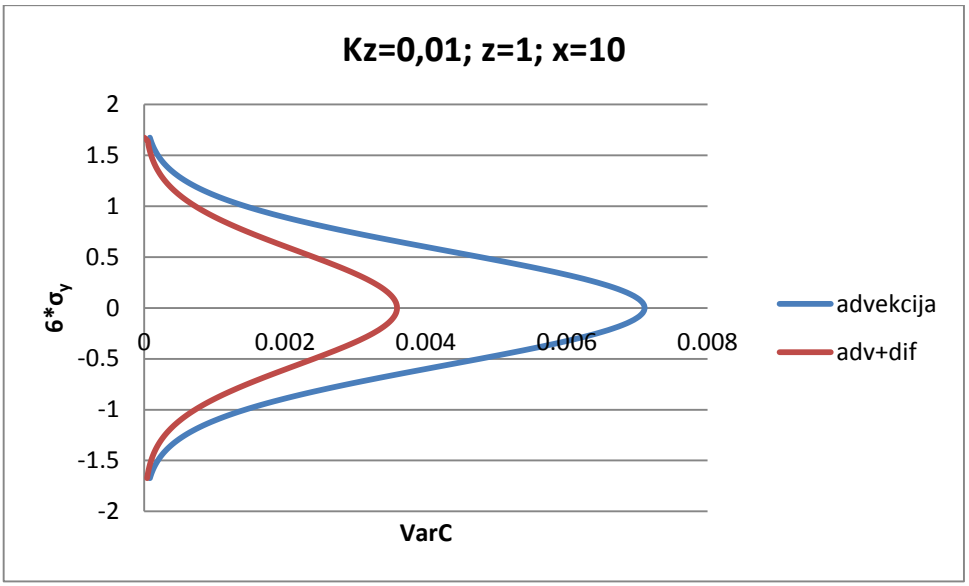
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu na visini osi oblaka uočava se da vrijednosti varijance opadaju kako se udaljevamo od izvora onečišćenja ali se širi presjek oblaka.

Vrijednosti advektivno-disperzivnog transporta uvijek su niže od vrijednosti čistog advektivnog transporta ali im se približavaju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja. Turbulentna difuzija se razvija u vremenu i ima značajnije djelovanje na presjeke udaljenije od izvora onečišćenja.

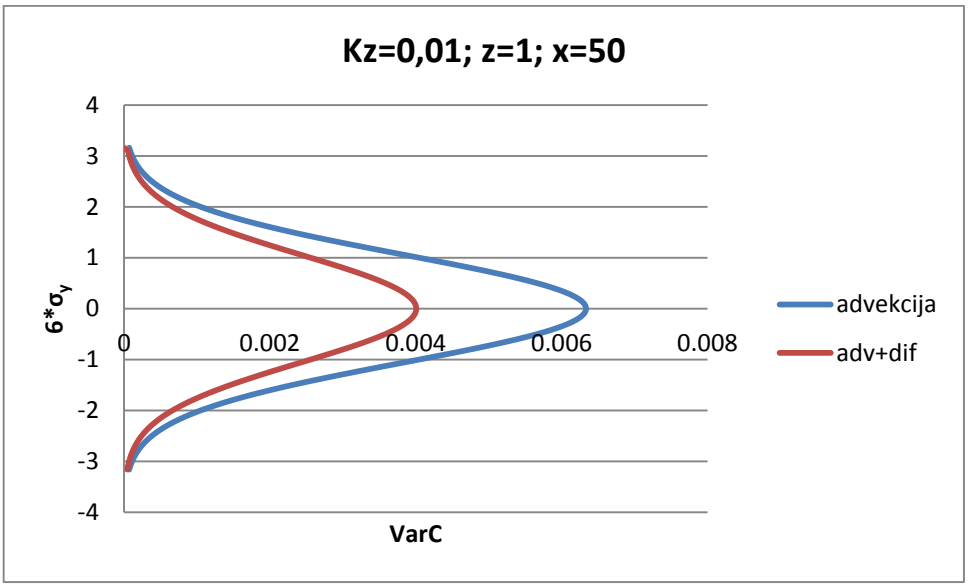
-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za $K_z=10^{-2}$(m^2/s), U=1(m/s), Z=1(m) i x=5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja.



Slika 6.26.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za K_z=0,01(m^2/s), x=5(m) na visini Z=1(m)



Slika 6.27.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za K_z=0,01(m^2/s), x=10(m) na visini Z=1(m)

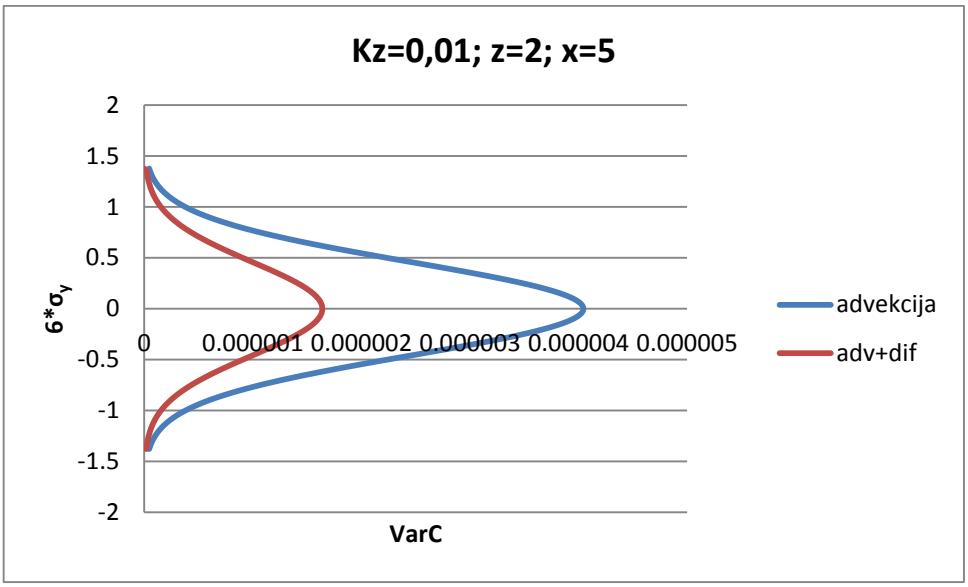


Slika 6.28.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za K_z=0,01(m^2/s), x=50(m) na visini Z=1(m)

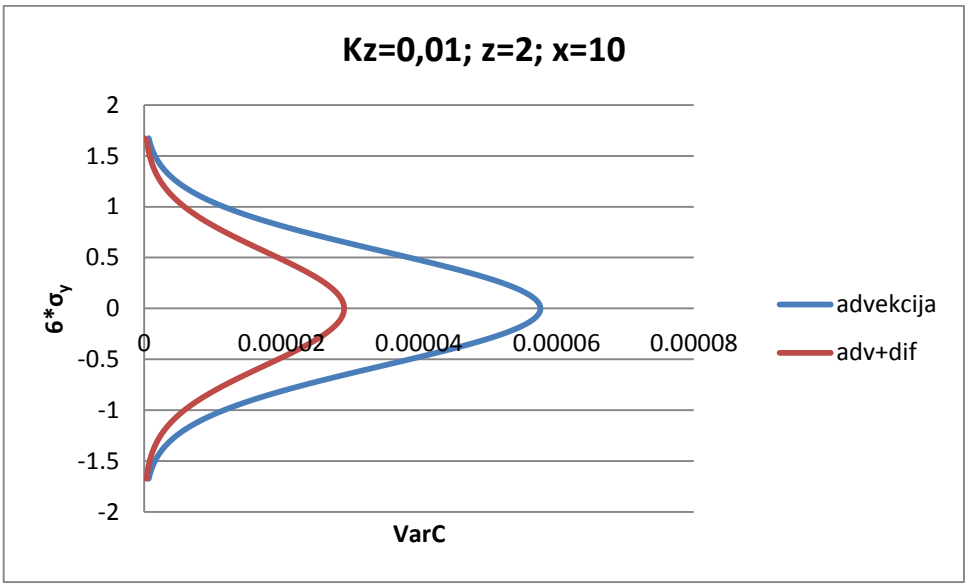
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu na visini Z=1(m) uočava se da vrijednosti varijance najprije rastu, a zatim opadaju nakon što dosegnu maksimum na udaljenosti oko 20(m) od izvora onečišćenja. Širina oblaka se povećava kako se udaljavamo od izvora onečišćenja kako je pokazano u (6.2.7) i (6.2.8).

Vrijednosti advektivno-difuzivnog transporta uvijek su niže od vrijednosti čistog advektivnog transporta ali im se približavaju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja.

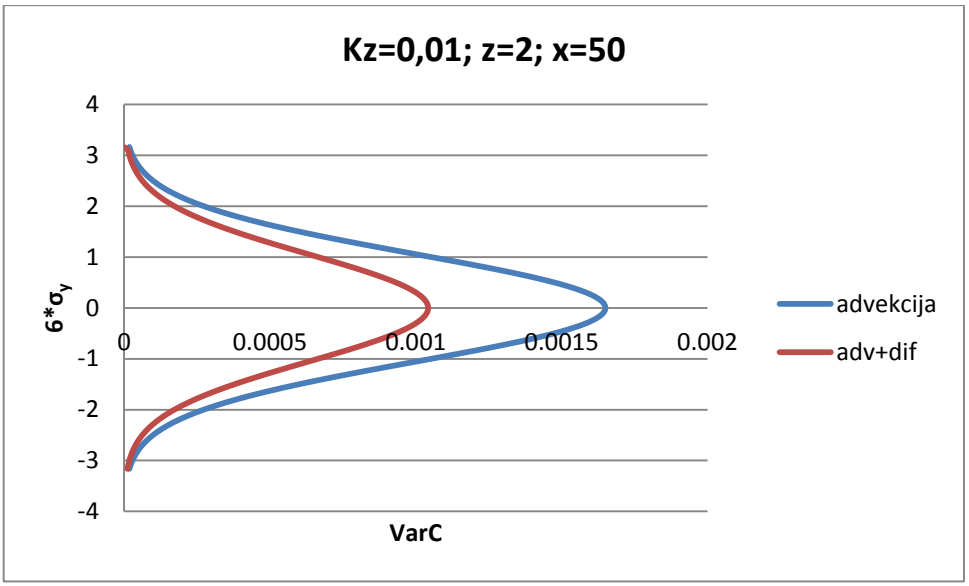
-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=1(m/s), Z=2(m) i x=5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja.



Slika 6.29.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=5(m) na visini Z=2(m)



Slika 6.30.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=10(m) na visini Z=2(m)



Slika 6.31.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za K_z=0,01(m^2/s), x=50(m) na visini Z=2(m)

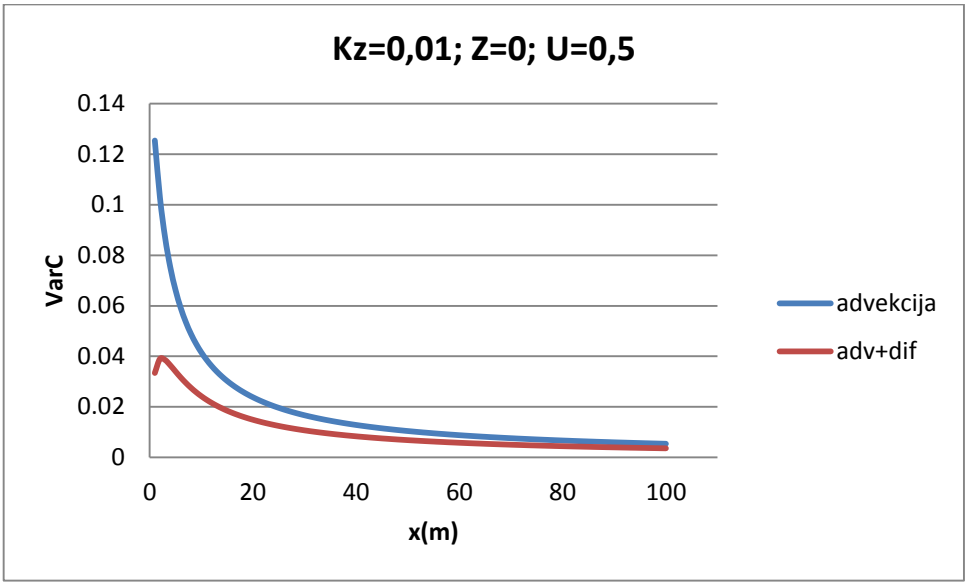
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu na visini Z=2(m) uočava se da vrijednosti varijance rastu kako se udaljevamo od izvora onečišćenja dok ne dosegne maksimum. Razlog tomu je jer presjek na Z=2(m) ne zahvaća one presjeke koji imaju disperziju manju od 2(m). Nakon toga slijedi opadanje vrijednosti. Presjek oblaka se širi kako se udaljavamo od izvora onečišćenja.

Vrijednosti advektivno-disperzivnog transporta uvijek su niže od vrijednosti čistog advektivnog transporta ali im se približavaju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja. Turbulentna disperzija ima značajniju ulogu na rubnim djelovima oblaka jer je u tim područjima veći gradijent koncentracije.

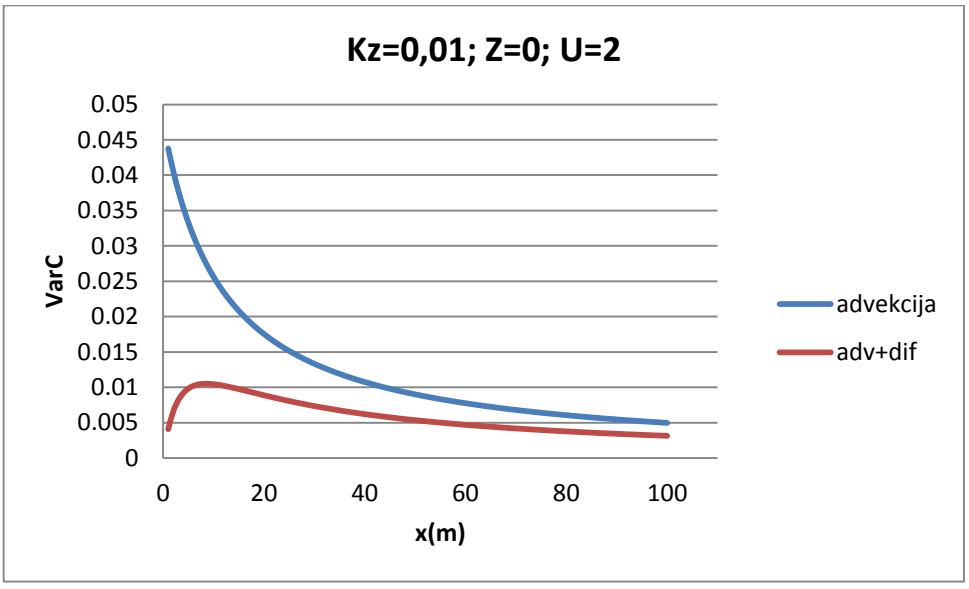
6.2.3.Utjecaj brzine vjetra na varijancu koncentracije

Utjecaj brzine vjetra na varijancu primarno se može objasniti utjecajem brzine na srednju vrijednost koncentracije prema izrazu (5.3.9).

-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=0,5 i 2(m/s), Z=0(m).



Slika 6.32.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=0(m) i brzinu vjetra U=0,5(m/s)

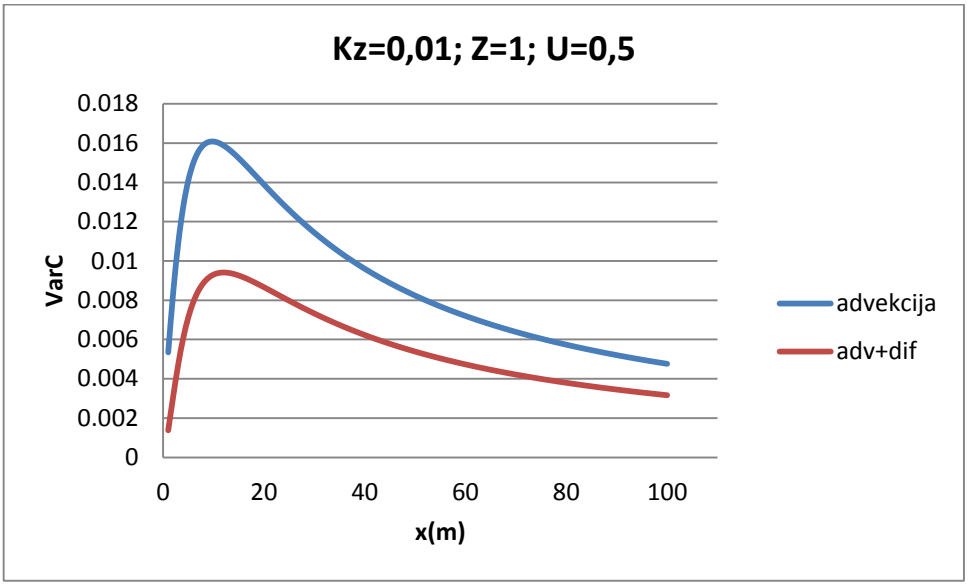


Slika 6.33.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=0(m) i brzinu vjetra U=2,0(m/s)

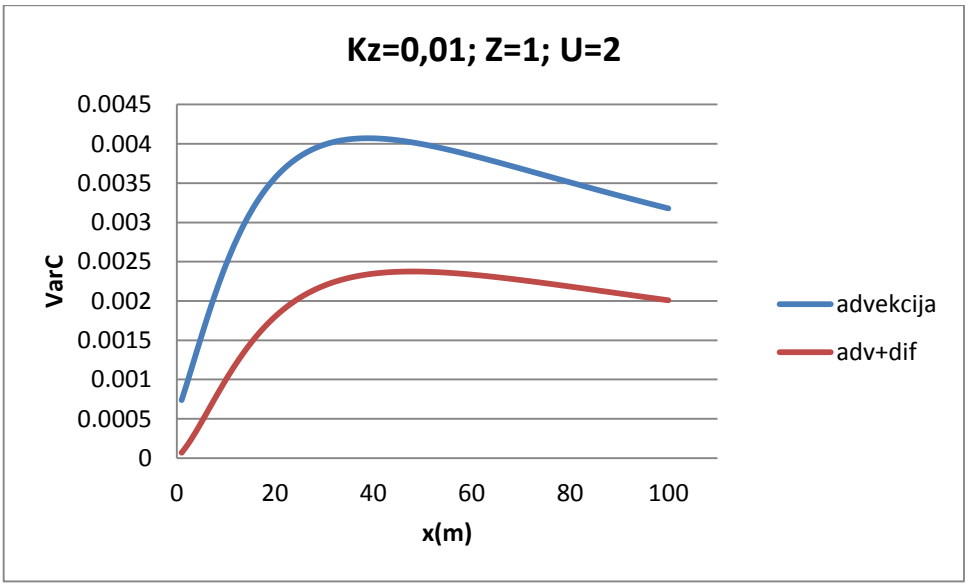
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije po osi x na visini Z=0(m) za različite brzine vjetra uočava da su vrijednosti varijance veće što je brzina vjetra manja.

Veća brzina vjetra doprinoso bržem širenju oblaka i opadanju srednje vrijednosti koncentracije što je izravno povezano s opadanjem varijance koncentracije. Vrijednosti varijance opadaju s udaljavanjem od izvora onečišćenja.

-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=0,5 i 2(m/s), Z=1(m).



Slika 6.34.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=1(m) i brzinu U=0,5(m/s)

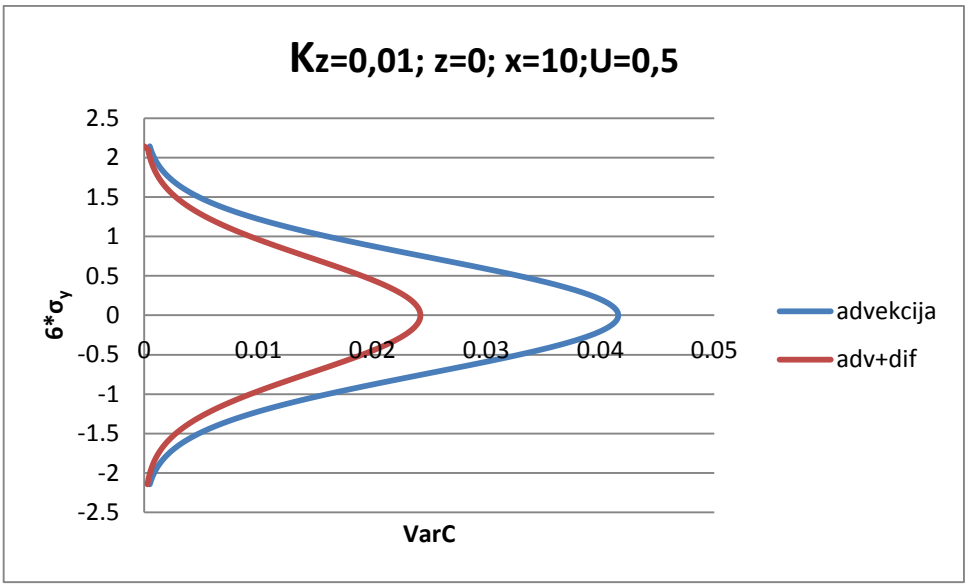


Slika 6.35.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ na visini Z=1(m) i brzinu U=2,0(m/s)

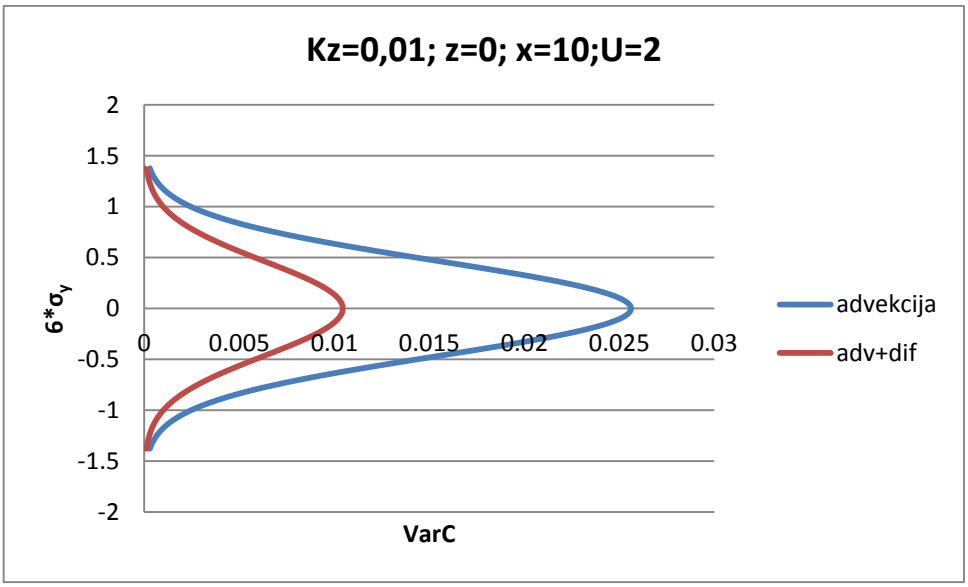
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije po osi x na visini Z=1(m) za različite brzine vjetra uočava da su vrijednosti varijance veće što je brzina vjetra manja. Najprije se događa rast vrijednosti varijance koncentracije ali maksimumi se za različite brzine ne nalaze na istom mjestu. Veća brzina vjetra smanjuje širenje oblaka onečišćenja pa se mjesto maksimalne vrijednosti varijance se udaljava od izvora onečišćenja.

6.2.4.Utjecaj brzine vjetra na varijancu koncentracije u x-y ravnini

-Prikaz vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=0,5 i 2(m/s), Z=0(m) i x=10(m).



Slika 6.36.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=10(m) na visini Z=0(m) i brzina U=0,5(m/s)



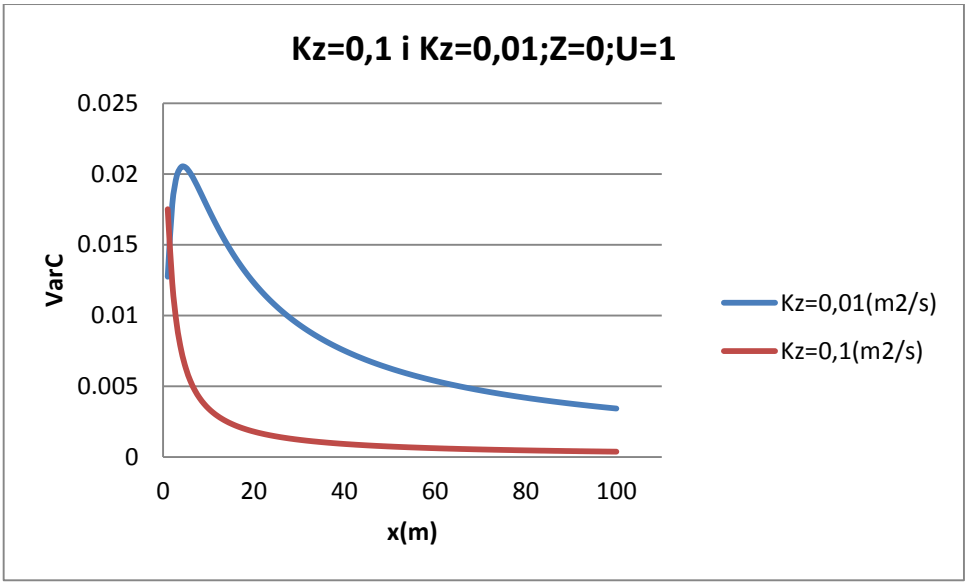
Slika 6.37.Kretanje vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za $K_z=0,01(m^2/s)$, x=10(m) na visini Z=0(m) i brzina U=2,0(m/s)

Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije u tlocrtu za različite brzine vjetra uočava se da su vrijednosti varijance veće za manju brzinu vjetra. Razlog tomu je jer manje brzine manje šire i raspršuju oblak onečišćenja pa je varijanca koncentracije veća.

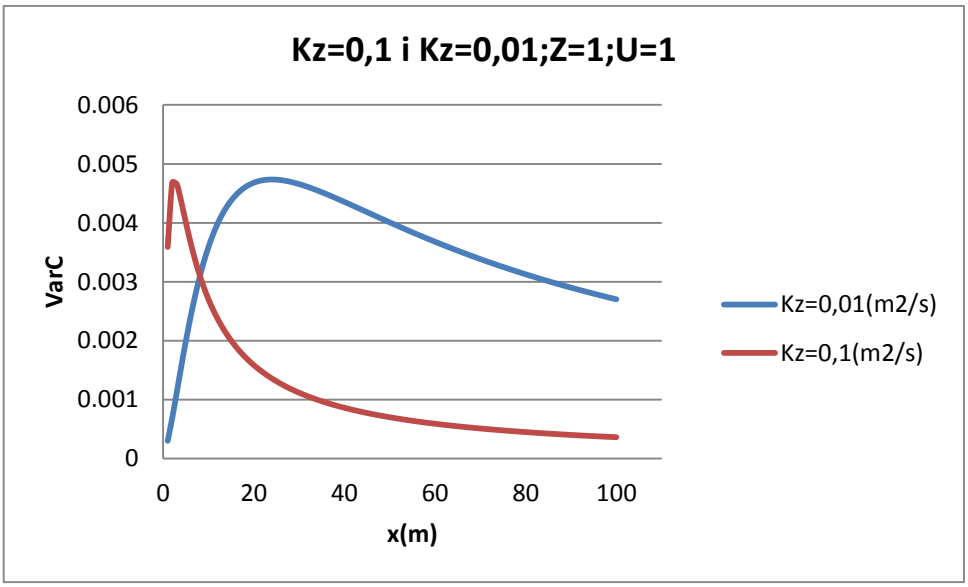
Vrijednosti advektivno-disperzivnog transporta uvijek su niže od vrijednosti čistog advektivnog transporta ali poprimaju veće vrijednosti za manju brzinu jer je pri većoj brzini advektivna komponenta transporta dominantna.

6.2.5.Utjecaj turbulentne difuzije na varijancu koncentracije

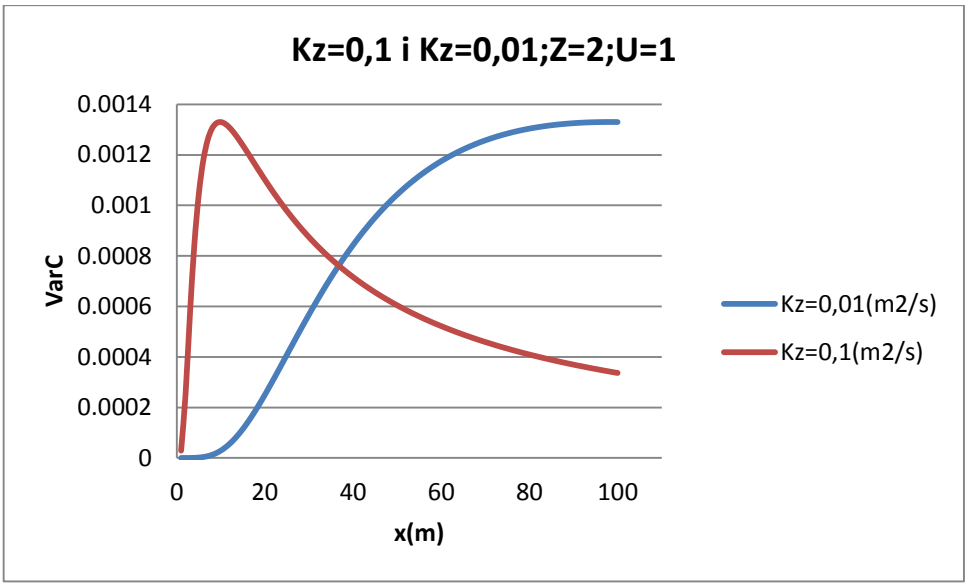
-Prikaz usporedbe vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ i $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=1(m/s) na visinama Z=0, 1 i 2(m).



Slika 6.38.Usporedba vrijednosti varijance koncentracije po osi x za $K_z=0,01(m^2/s)$ i $K_z=0,1(m^2/s)$ na visini Z=0(m)



Slika 6.39. Usporedba vrijednosti varijance koncentracije po osi x za Kz=0,01(m2/s) i Kz=0,1(m2/s) na visini Z=1(m)

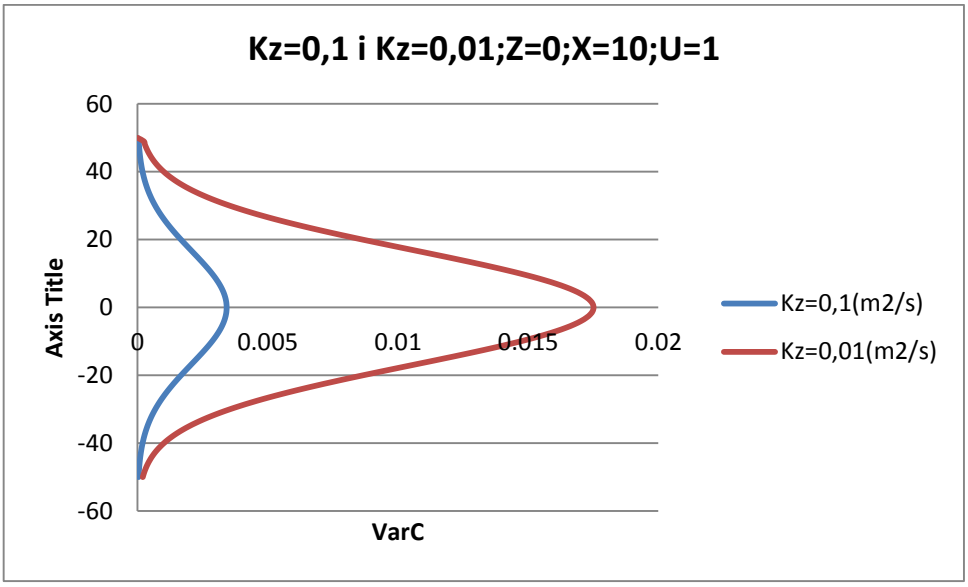


Slika 6.40. Usporedba vrijednosti varijance koncentracije po osi x za Kz=0,01(m2/s) i Kz=0,1(m2/s) na visini Z=2(m)

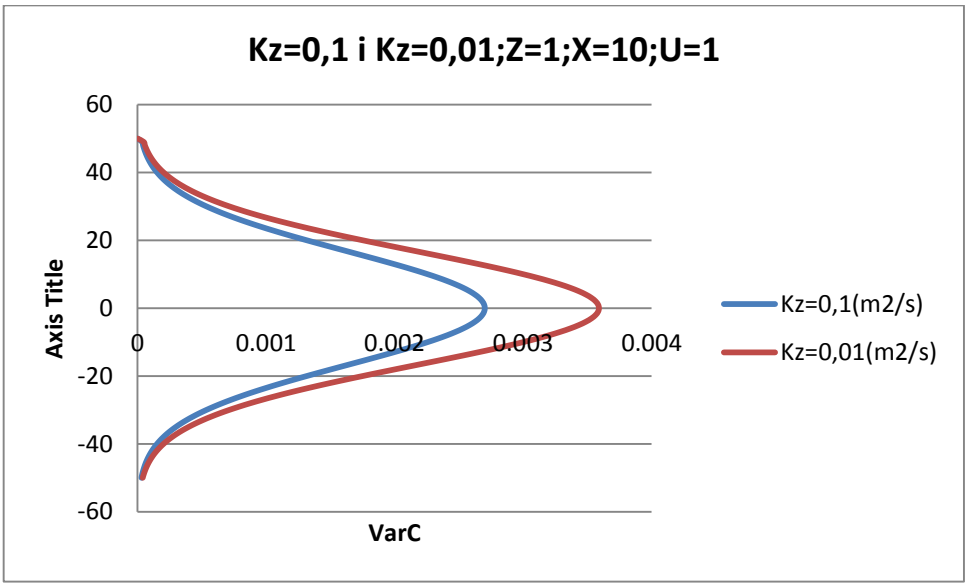
Usporedbom kretanja vrijednosti varijance koncentracije po osi x za K_z=0,01(m^2/s) i K_z=0,1(m^2/s) na različitim visinama od izvora onečišćenja uočava se da vrijednosti opadaju kako se udaljevamo od izvora onečišćenja. Na središnjoj liniji onečišćenja (Z=0(m)) imamo konstantno opadanje vrijednosti varijance za oba slučaja. Na visini Z=1(m) i Z=2(m) se uočava da je maksimum srednje vrijednosti varijance koncentracije odmaknut od izvora onečišćenja i da se vrijednosti varijance povećavaju. To se događa jer presjeci oblaka na Z=1(m) i Z=2(m) iznad centralne linije ne zahvaćaju vrijednosti varijance koncentracija čija je vrijednost disperzije manja od 1 tj. 2(m). Kako je za K_z=0,1(m^2/s) širenje veće, maksimumi vrijednosti varijance koncentracije su bliže izvoru onečišćenja.

6.2.6.Utjecaj turbulentne difuzije na varijancu koncentracije u x-y ravnini

-Prikaz usporedbe vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ i $K_z=10^{-2}(m^2/s)$, U=1(m/s), x=10(m) i Z=0 i 1(m).



Slika 6.41. Usporedba vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za Kz=0,01(m2/s) i Kz=0,1(m2/s) na visini Z=0(m) I x=10(m)



Slika 6.42. Usporedba vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini za Kz=0,01(m^2/s) i Kz=0,1(m^2/s) na visini Z=1(m) i x=10(m)

Usporedbom vrijednosti varijance koncentracije u x-y ravnini na visinama Z= 0 i 1(m) uočava se da su vrijednosti veće za $K_z=0,01(m^2/s)$ za oba slučaja. Pri koeficijentu turbulentne difuzije $K_z=0,01(m^2/s)$ događa se manje širenje oblaka te veće vrijednosti koncentracije. Kako je veće širenje oblaka za $K_z=0,1(m^2/s)$, pri udaljavanju od središnje osi vrijednosti se približavaju jedna drugoj.

7. Beta distribucija, Beta(α, β)

Neka su α, β > 0. Za neprekidnu slučajnu varijablu X s vrijednostima u R, kaže se da se ravna po Beta distribuciji, Beta(α, β) ako vrijedi:

$$f(x|\alpha,\beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha,\beta)} 1\Big|_{[0,1](x)} \tag{7.1}$$

gdje je:

$$B(\alpha,\beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)} \tag{7.2}$$

-Oznaka: $X \sim Beta(\alpha,\beta)$ (7.3)

-Očekivanje ok X: $E_{\alpha,\beta}(X) = \frac{\alpha}{\alpha+\beta}$ (7.4)

-Varijanca od X: $Var_{\alpha,\beta}(X) = \frac{\alpha\beta}{[(\alpha+\beta)^2(\alpha+\beta+1)]}$ (7.5)

Nepoznat paramatri (α, β) beta distribucije, članovi intervala $[0,1]$, moguće je odrediti primjenom metode momenata ako su poznata prva dva momenta (srednja vrijednost i varijanca). Parametri metode momenata su:

$$\alpha = \bar{X}\left[\frac{\bar{X}(1-\bar{X})}{\bar{v}} - 1\right] \tag{7.6}$$

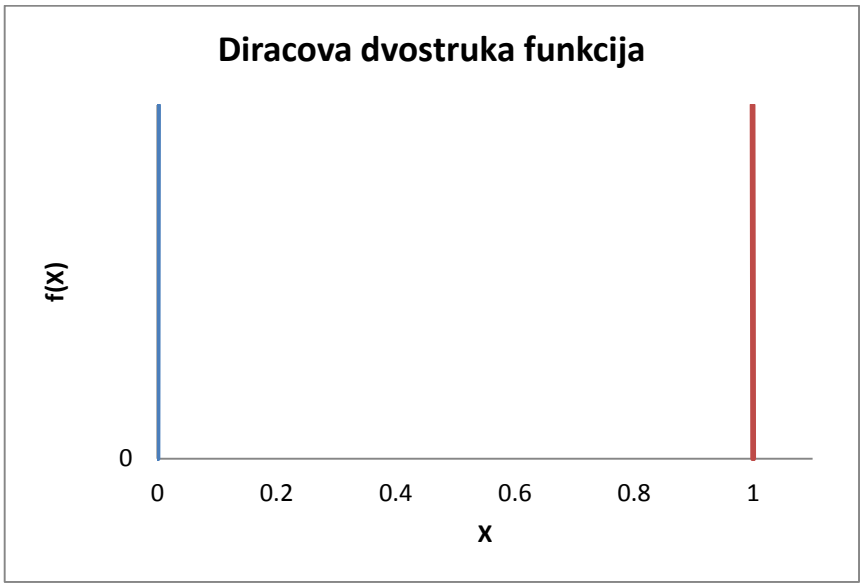
$$\beta = (1-\bar{X})\left[\frac{\bar{X}(1-\bar{X})}{\bar{v}} - 1\right] \tag{7.7}$$

pri čemu su: $\bar{X}$- srednja vrijednost uzorka,

$\bar{v}$- varijanca uzorka. [4]

7.1. Beta distribucija za advektivni transport

Za advektivni transport normirana vrijednost varijance je računata kao $var = \bar{X}(1 - \bar{X})$. Tada se pri proračunu parametara Beta distribucije (α, β) dobivaju vrijednosti nula za oba parametra. Ako su oba parametra Beta distribucije jednaka nula tada se dobiva dvostruka Dirac-ova funkcija s identičnom učestalosti nula i jedinica (C_0) što je i očekivano.



Slika 7.1.Dvostruka Dirac-ova funkcija s jednakim vrijednostima 0 i 1

Generalno se vjerojatnost pojedine koncenracije za advektivni transport može prikazati pomoću:

$$p(C; \boldsymbol{x}, t) = \gamma(\boldsymbol{x}, t)\delta[C(\boldsymbol{x}, t) - C_0] + [1 - \gamma(\boldsymbol{x}, t)]\delta[C(\boldsymbol{x}, t)] \qquad (7.1.1)$$

Ovom jednadžbom uvijek se dobija Dirac-ova funkcija kao rješenje funkcije gustoće vjerojatnosti i kumulativna funkcija gustoće sa skokom.

7.2. Beta distribucija za advektivno-difuzivni transport

Za analizu rezultata advektivno-disperzivnog transporta upotrijebit će se također Beta distribucija.

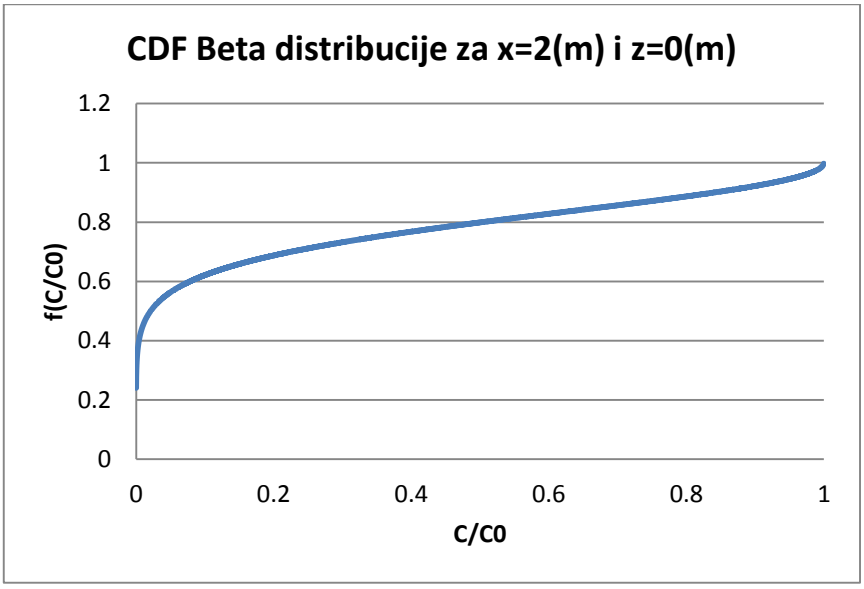
Promatraju se kumulativne funkcije gustoće Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja. Vrijednosti Z su određene kao središnja linija onečišćenja (Z=0(m)) i maksimalno širenje oblaka u pojedinom smjeru. Za prikaz se uzima minimalna i maksimalna brzina vjetra za smjerove koje promatramo i one iznose 0,1(m/s) i 8(m/s). Proračun se radi za koeficijent turbulentne difuzije K_z=0,01(m^2/s), a zatim se uspoređuje s rezultatima proračuna za K_z=0,0001(m^2/s).

Za advektivno-disperzivni transport funkcija gustoće Beta distribucije poprima realne vrijednosti koje se mogu prikazati pomoću:

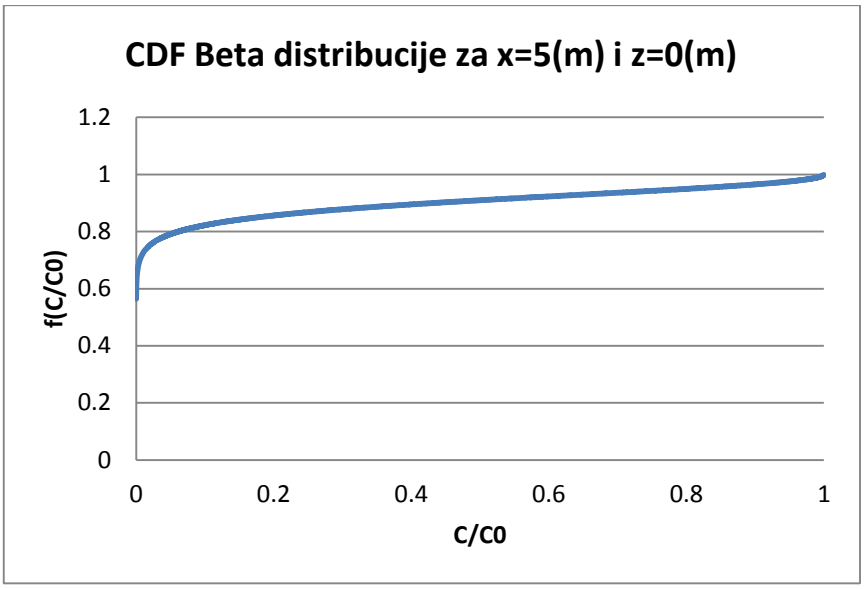
$$p(C;\boldsymbol{x},t) = \gamma(\boldsymbol{x},t)g(C;\boldsymbol{x},t) + [1-\gamma(\boldsymbol{x},t)]\delta[C(\boldsymbol{x},t)] \qquad (7.2.1)$$

7.2.1. Analiza vrijednosti CDF Beta distribucije

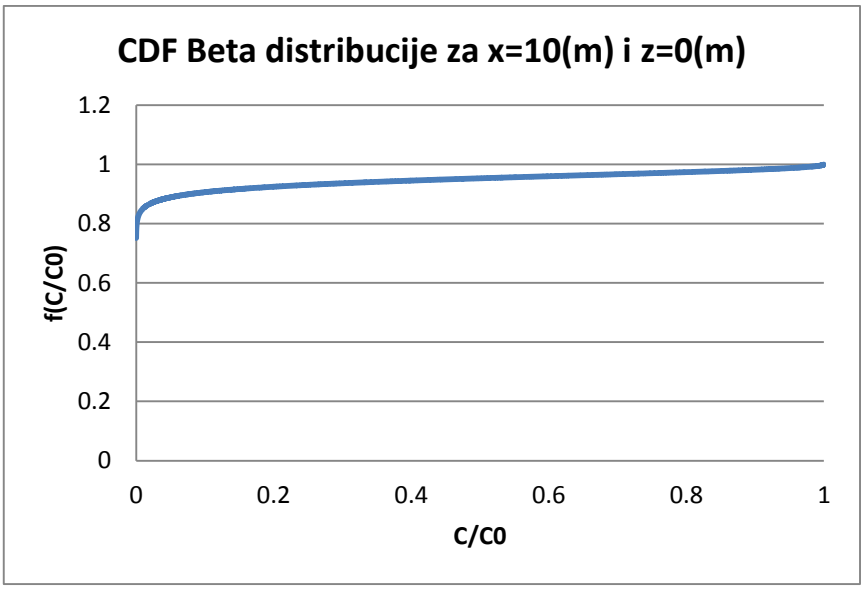
-Prikaz kumulativne funkcije distribucije koncentracije $K_z=10^{-2}$(m^2/s), U=0,1(m/s), Z=0(m) i x=2, 5, 10 i 50(m).



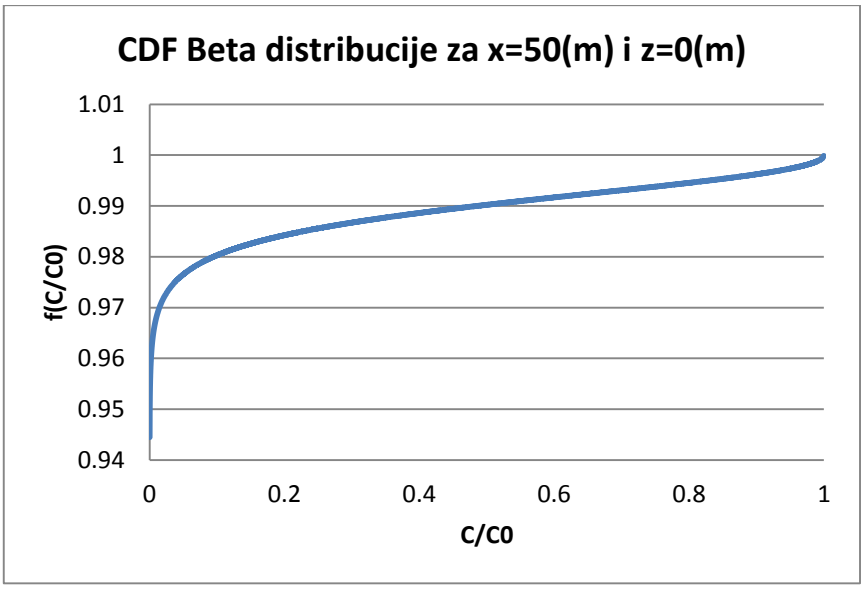
Slika 7.2.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=2(m) i z=0(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



Slika 7.3.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



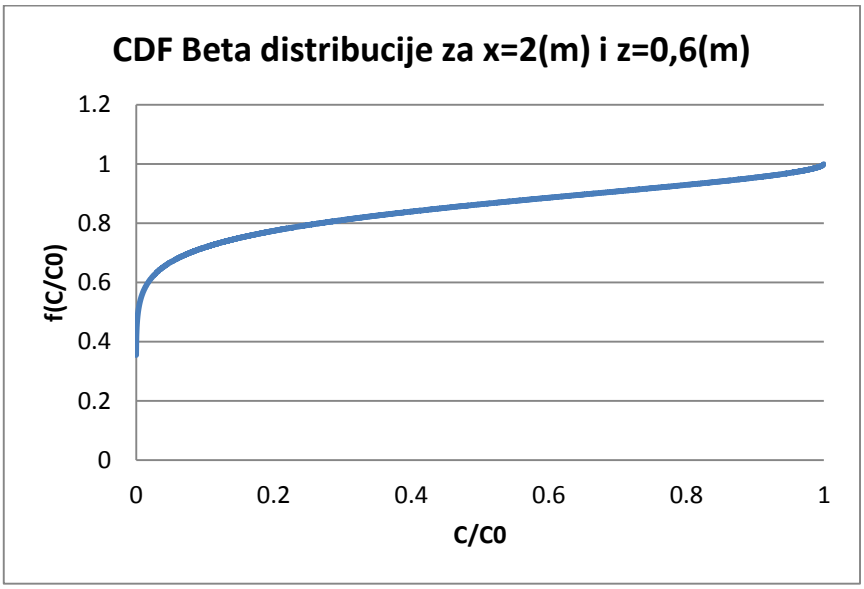
Slika 7.4.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=0(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



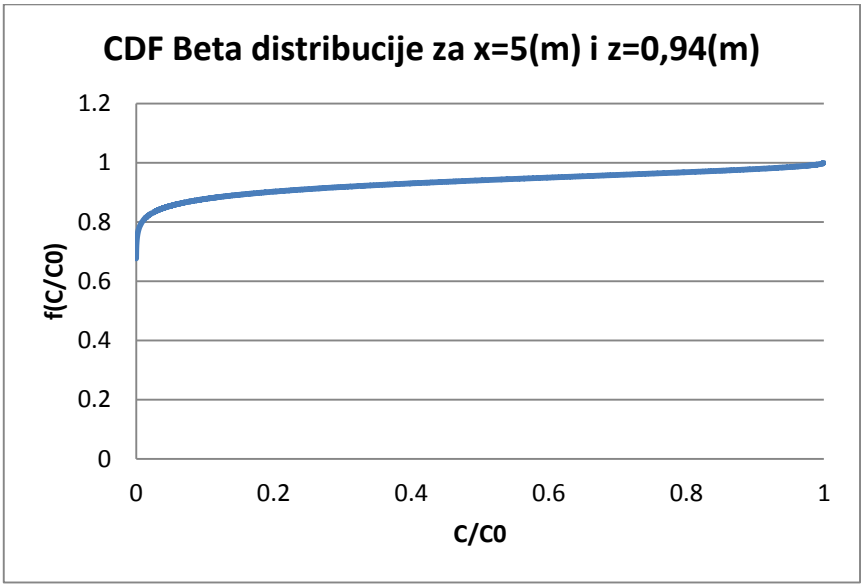
Slika 7.5.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=0(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

Usporedbom kumulativne funkcije Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na središnjoj liniji (z=0(m)) uočava se da se pri udaljavanju od izvora onečišćenja vrijednosti beta funkcije približuju vrijednosti 1 i da se učestalost vrijednosti nula povećava. Što je presjek bliže izvoru onečišćenja veća je zastupljenost nenultih vrijednosti koncentracije i polaganiji je prijelaz između nule i jedinice. Kako je u ovom prikazu uzeta minimalna brzina vjetra uočava se da je promjena vrijednosti relativno spora.

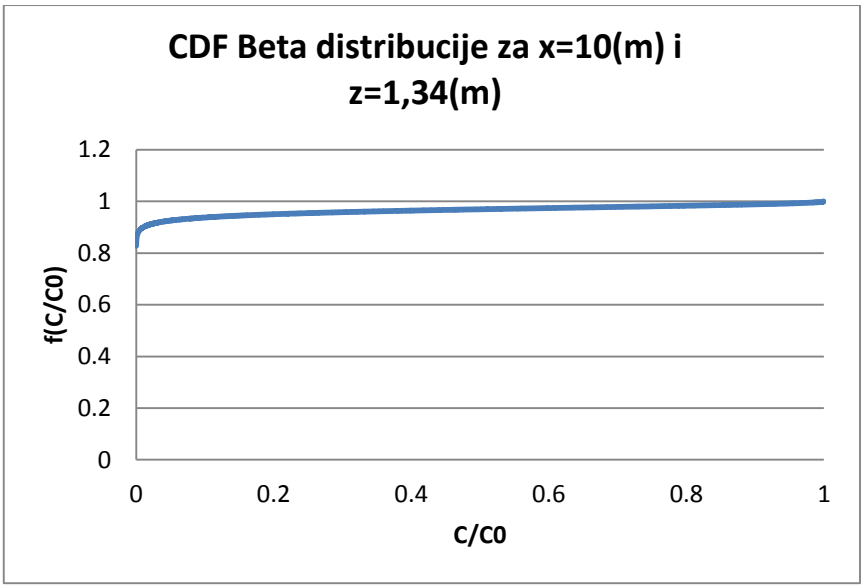
-Prikaz kumulativne funkcije distribucije koncentracije $K_z=10^{-2}$(m^2/s), U=0,1(m/s), x=2, 5, 10 i 50(m) na rubu oblaka.



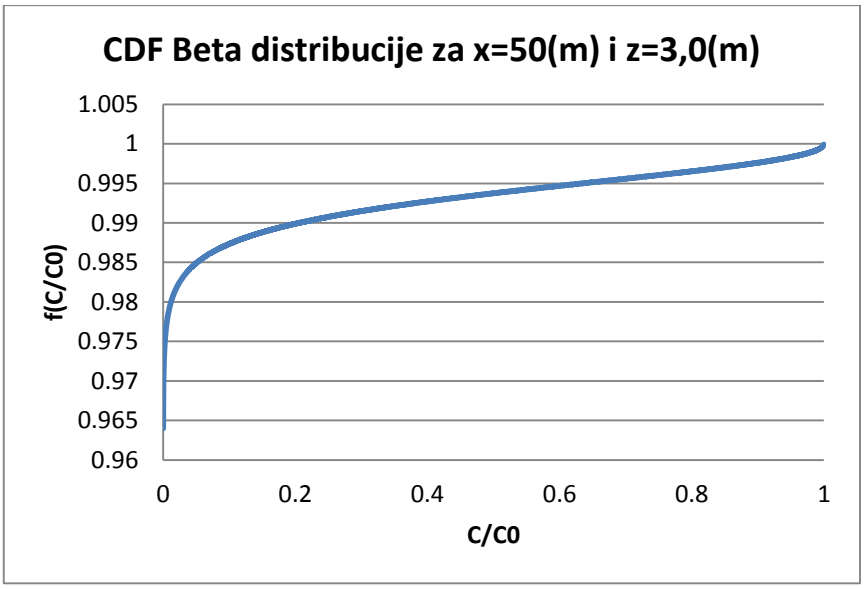
Slika 7.6.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=2(m) i z=0,6(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



Slika 7.7.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0,94(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



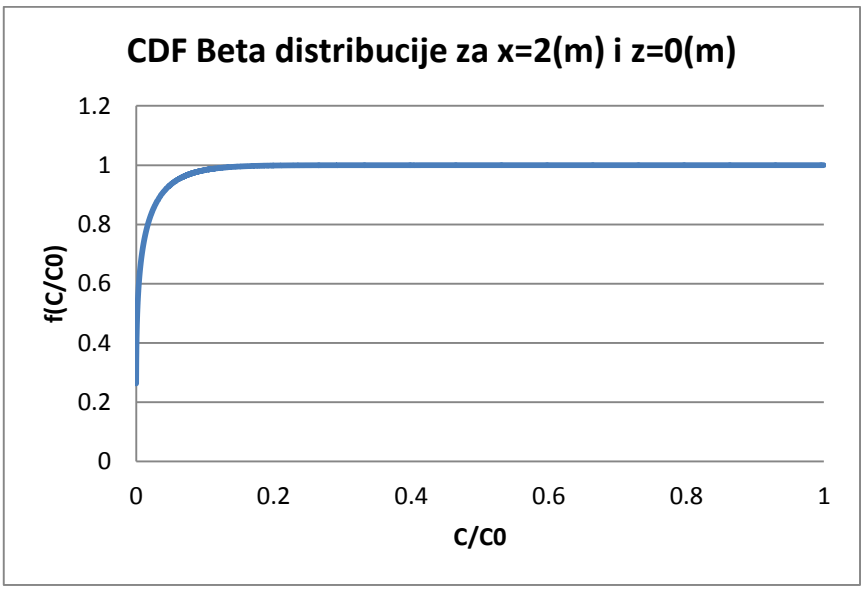
Slika 7.7.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=1,34(m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



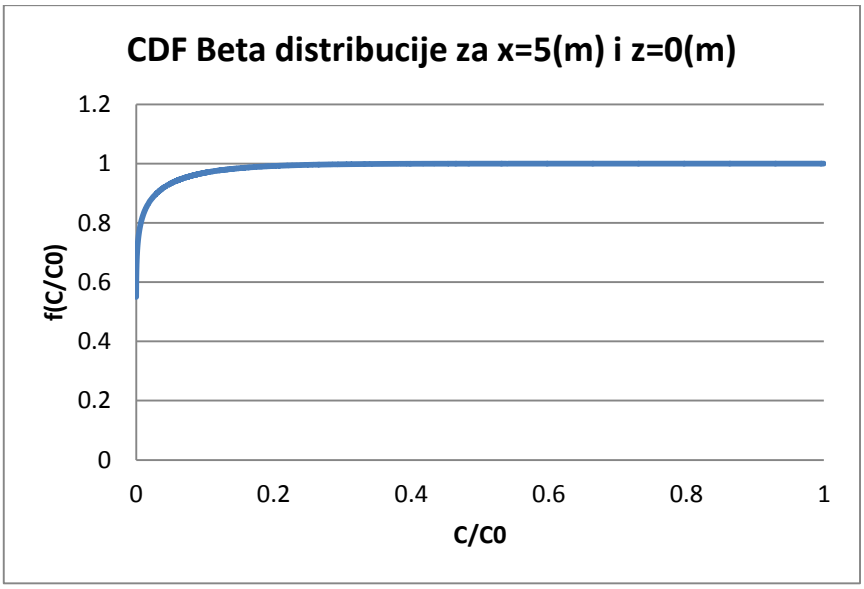
Slika 7.8.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=3,0 (m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

Usporedbom kumulativne funkcije Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na rubu oblaka uočava se da se pri udaljavanju od izvora onečišćenja vrijednosti beta funkcije približuju vrijednosti 1 i da se učestalost vrijednosti nula povećava. Učestalosti nula su veće nego na središnjoj liniji zbog izraženijeg gradijenta koji doprinosi razrijeđenju koncentracije i najbrže djeluje po rubovima oblaka.

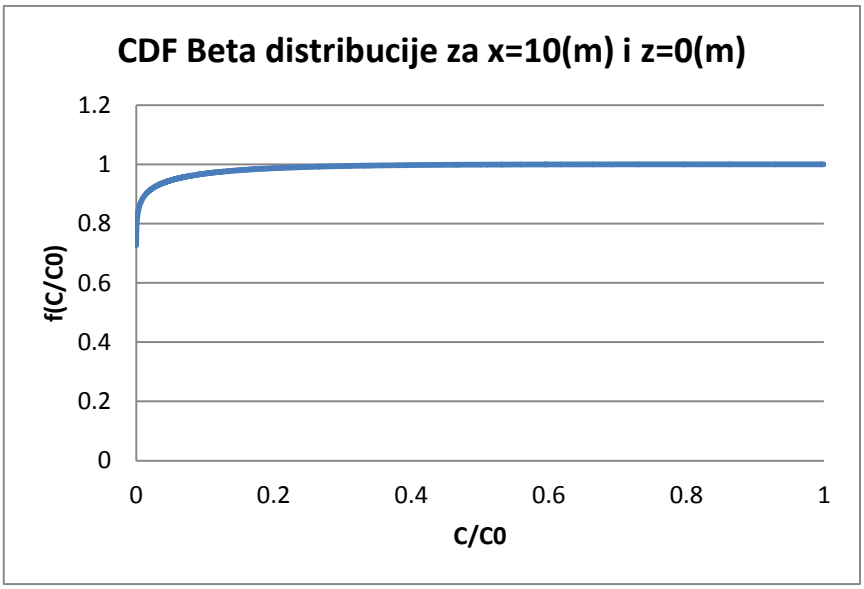
-Prikaz kumulativne funkcije distribucije koncentracije $K_z=10^{-2}$(m^2/s), U=8(m/s), Z=0(m) i x=2, 5, 10 i 50(m).



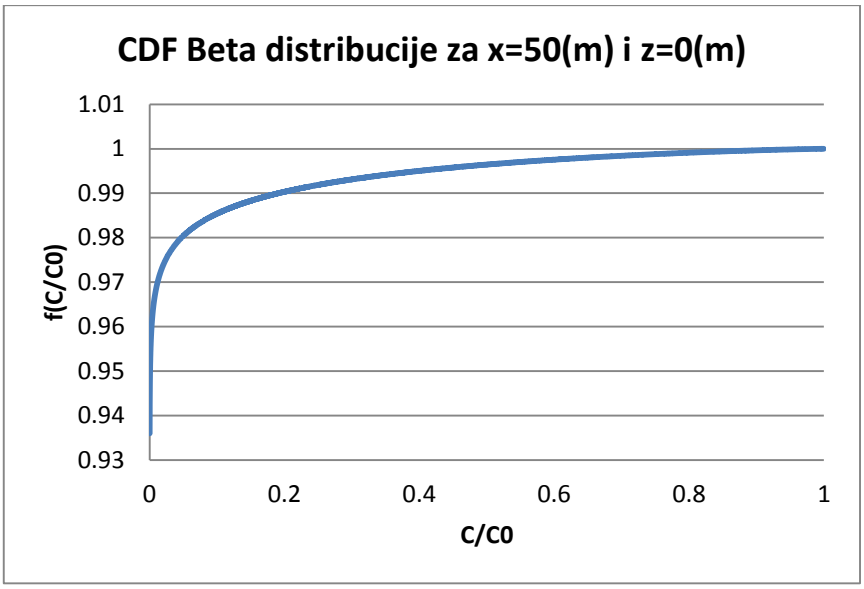
Slika 7.9.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=2(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



Slika 7.10.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



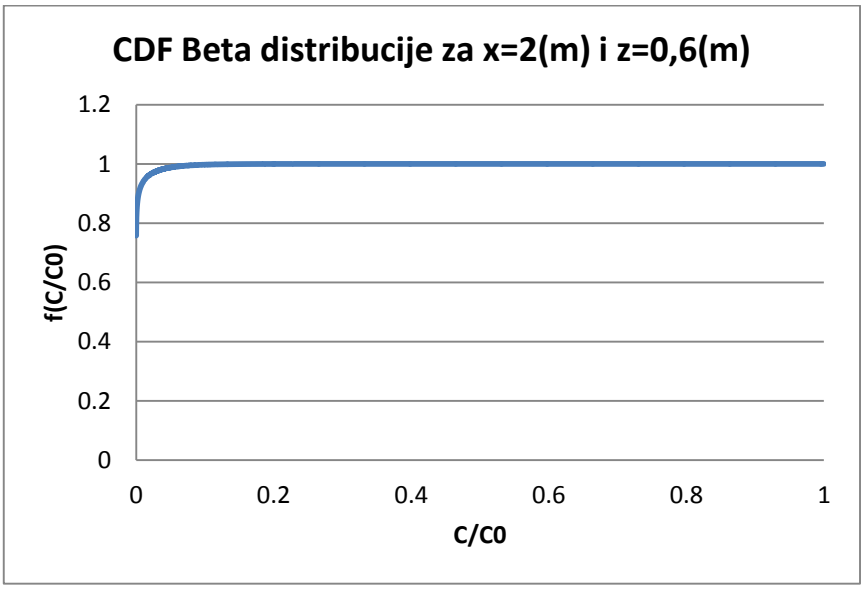
Slika 7.11.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



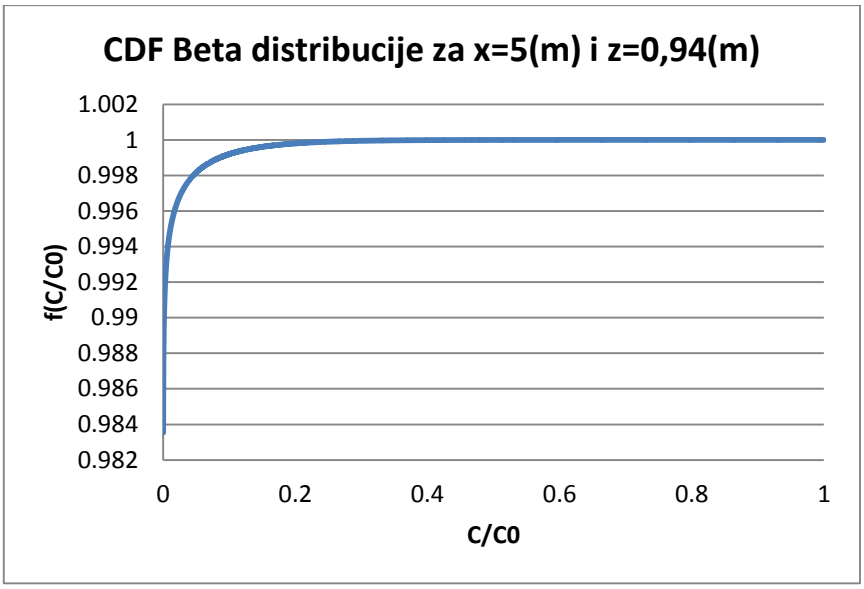
Slika 7.12.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

Usporedbom kumulativne funkcije Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na središnjoj liniji (z=0(m)) za maksimalnu brzinu vjetra uočava se da su vrijednosti nula relativno slične slučaju s minimalnom brzinom. No, vrijednosti beta distribucije mnogo brže dosegnu maksimum, tj. vrijednosti 1. Posljednje je posljedica drastično većeg razrijeđenja koje se očitava primarno kroz utjecaj povećane brzine na razrijeđenje. Zaključujemo da brzina vjetra utječe na brži pad vrijednosti koncentracije.

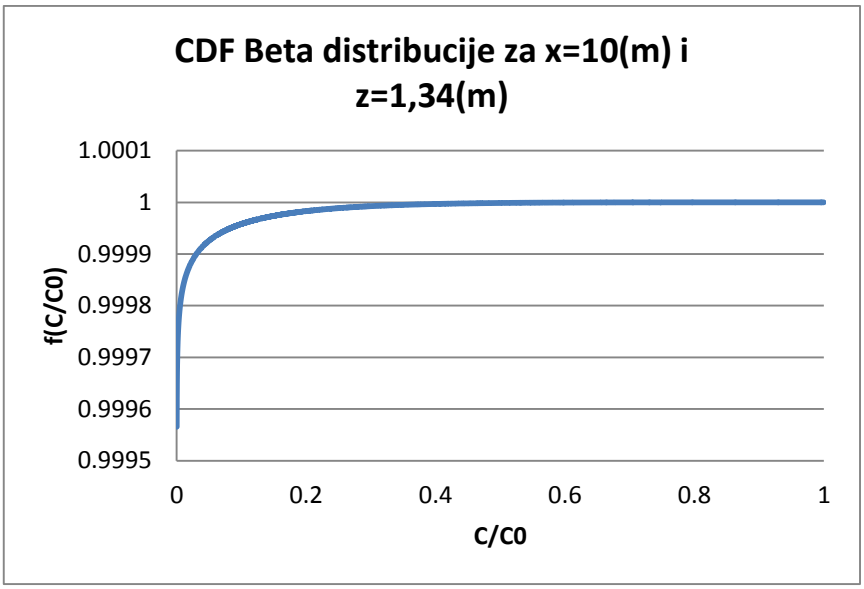
-Prikaz kumulativne funkcije distribucije koncentracije $K_z=10^{-2}$(m^2/s), U=0,1(m/s),x=2, 5, 10 i 50(m) na rubu oblaka.



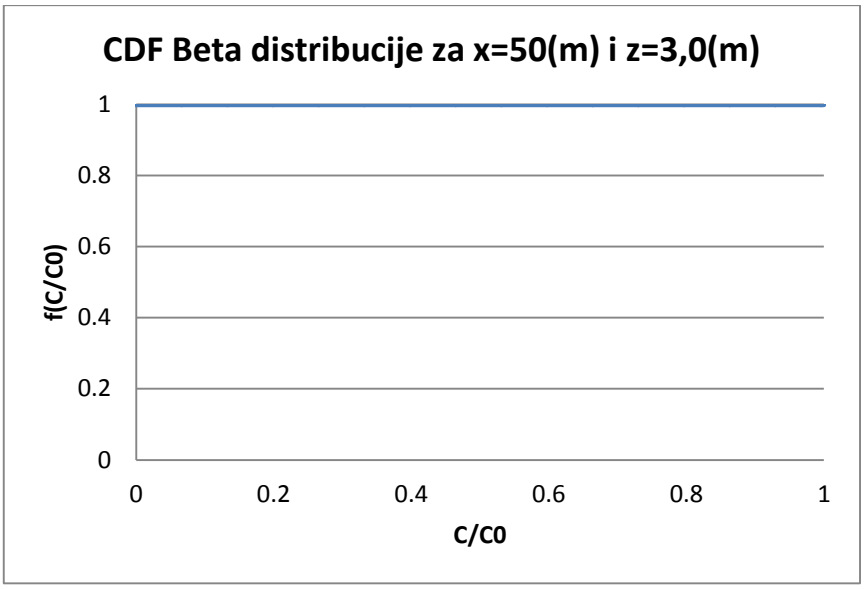
Slika 7.13.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=2(m) i z=0,6 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



Slika 7.14.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0,94 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)



Slika 7.15.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=1,34 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

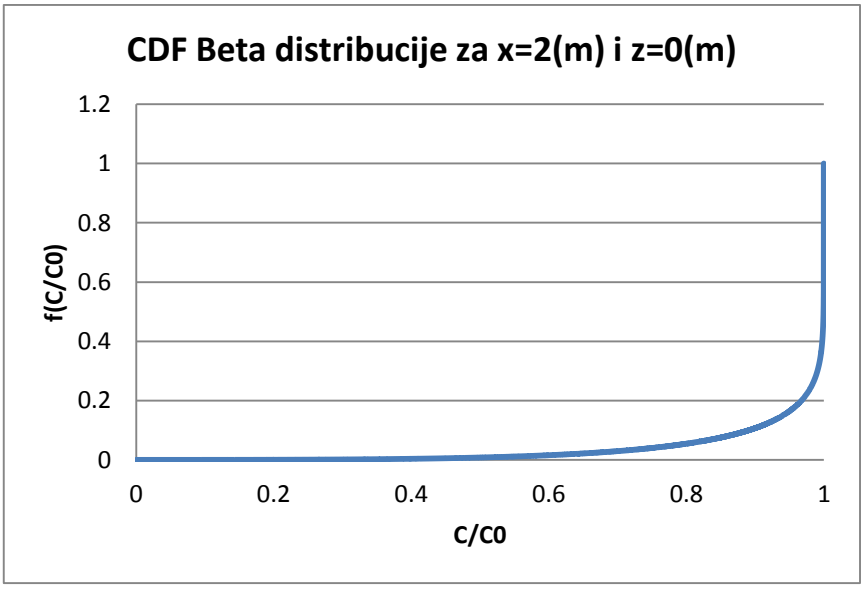


Slika 7.16.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=3,0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,01(m^2/s)

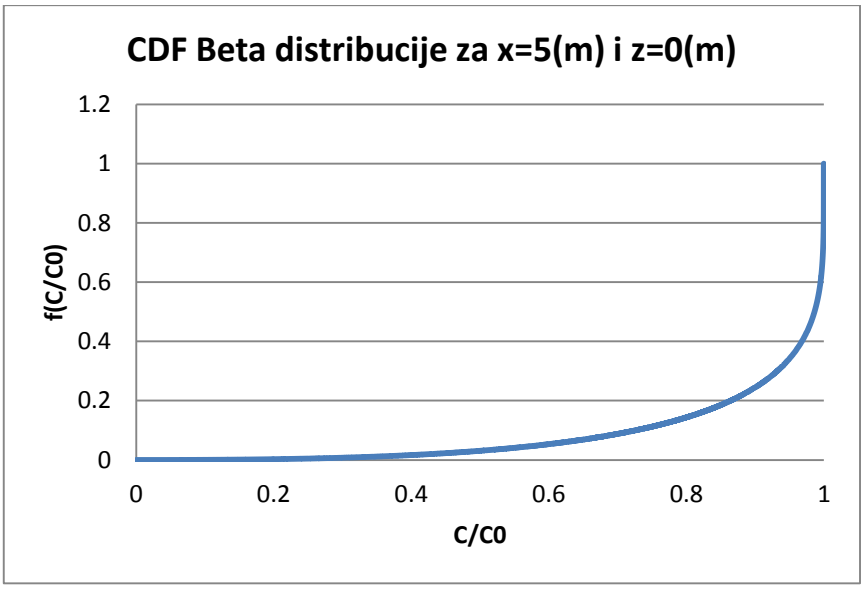
Usporedbom kumulativne funkcije beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na rubu oblaka za maksimalnu brzinu vjetra uočava se da se sve vrijednosti prerastaju u jedinicu. Zaključujemo da maksimalna brzina vjetra na rubovima oblaka dovodi do maksimalnog raspršenja koncentracije.

7.2.2.Utjecaj turbulentne difuzije na CDF Beta distribucije

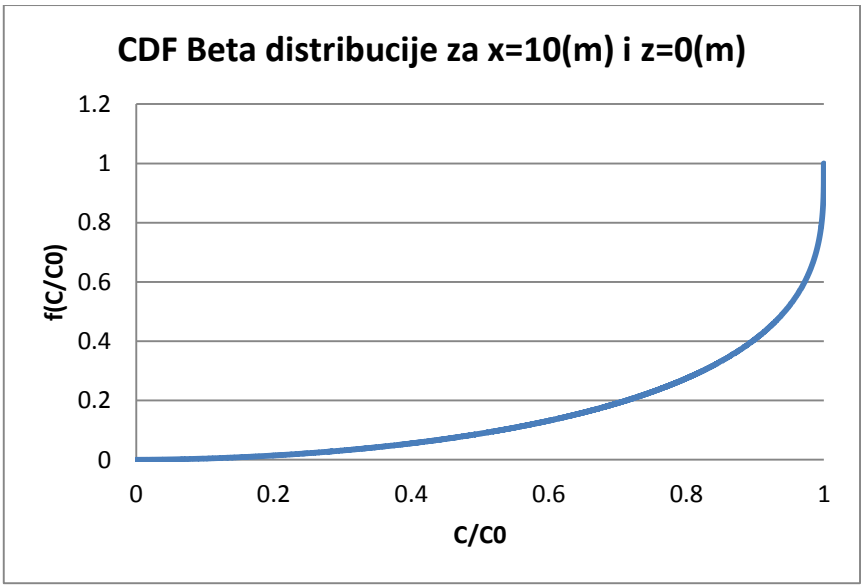
-Prikaz rezultata na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) na središnjoj liniji onečišćenja (Z=0(m)) za U=0,1(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s).



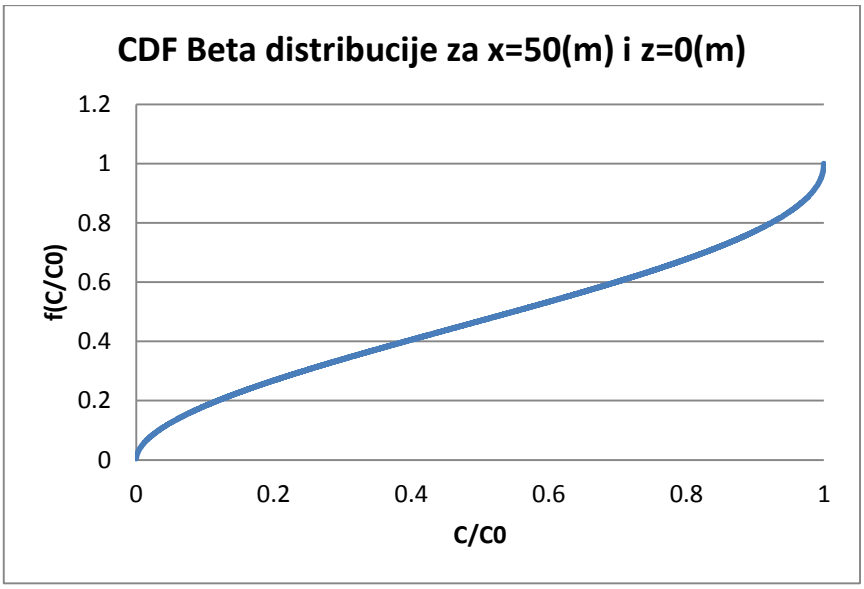
Slika 7.17.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=2(m) i z=0 (m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



Slika 7.18.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0 (m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



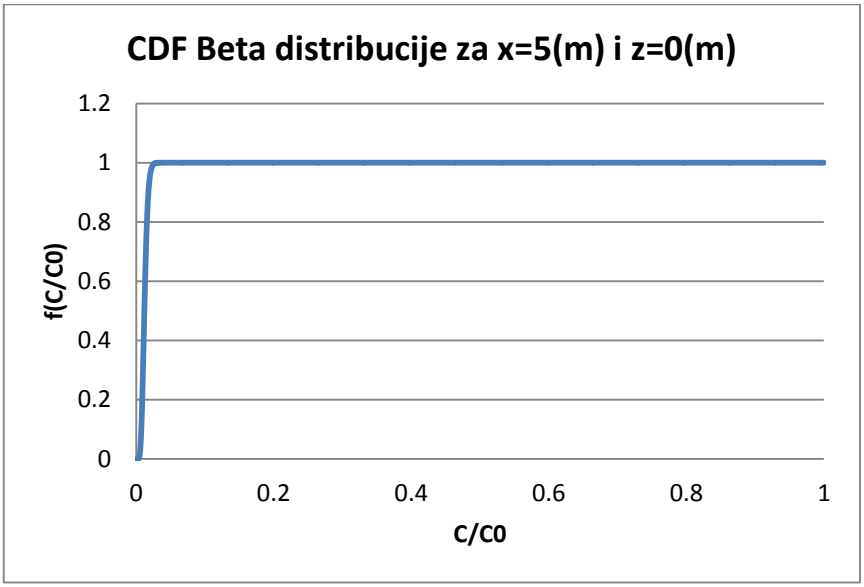
Slika 7.19.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=0 (m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



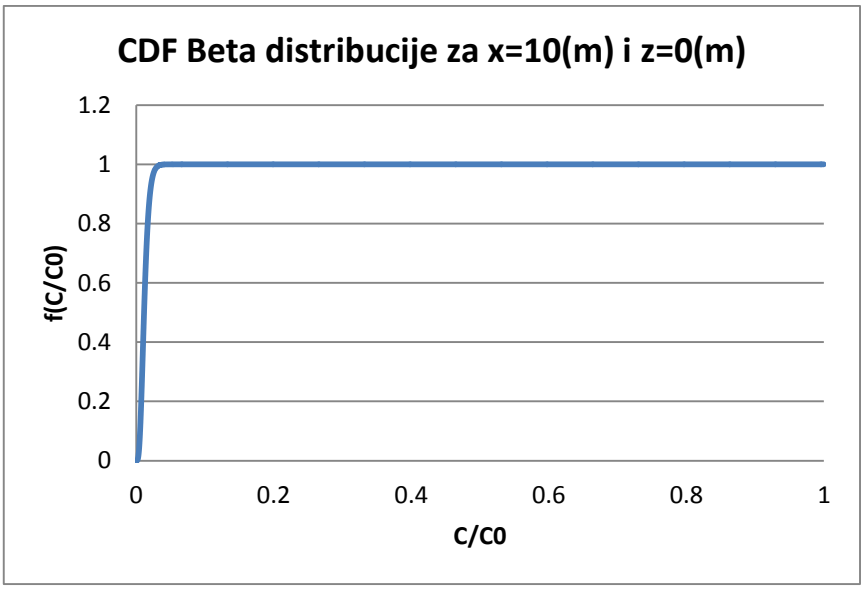
Slika 7.20.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=0 (m) za U=0,1(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)

Usporedbom kumulativne funkcije Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na središnjoj liniji (z=0(m)) za minimalnu brzinu vjetra i K_z=0,0001(m^2/s) uočava se da vrijednosti Beta distribucije imaju vrijednosti jedinice za presjeke bliže izvoru onečišćenja i da te vrijednosti relativno sporo opadaju. Iz toga zaključujemo da minimalna brzina i K_z=0,0001(m^2/s) uzrokuju jako sporo širenje i razrijeđenje oblaka što rezultira velikom učestalosti maksimalnih koncentracije. Težište površine ispod funkcije gustoće vjerojatnosti koncentracije se prebacuje s desne na lijevu stranu što je popraćeno promjenom predznaka koeficijenta asimetrije iz negativnog u pozitivni. Spljoštenost se mijenja na isti način s tim da ne može uzeti negativne vrijednosti. Usporedbom s rezultatima s većim koeficijentom turbulentne disperzije i istom brzinom zaključuje se da koeficijent turbulantne disperzije ima dominantan utjecaj na transport onečišćenja.

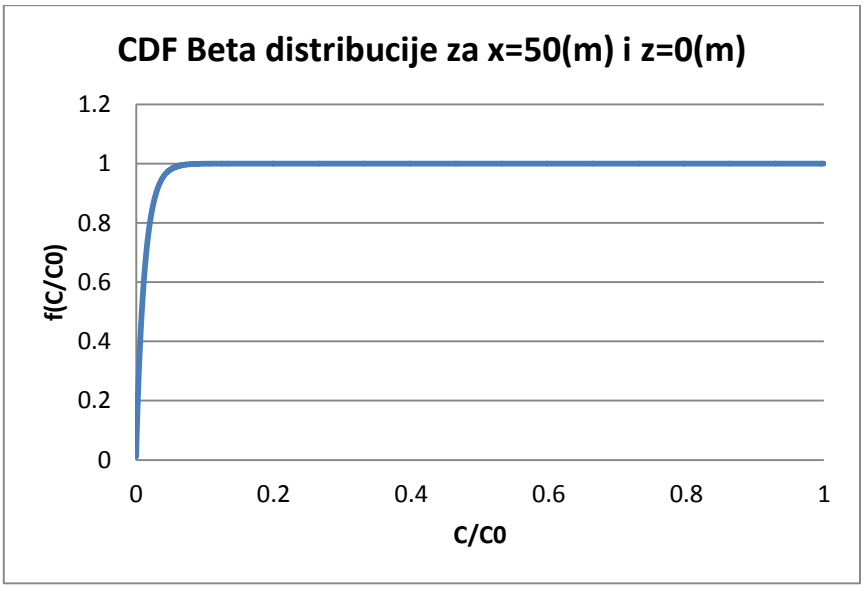
-Prikaz rezultata na udaljenosti x=2(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



Slika 7.21.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=5(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



Slika 7.22.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=10(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)



Slika 7.23.Kumulativna funkcija distribucije koncentracije na udaljenosti x=50(m) i z=0 (m) za U=8,0(m/s) i K_z=0,0001(m^2/s)

Usporedbom kumulativne funkcije Beta distribucije na udaljenostima 2, 5, 10 i 50(m) od izvora onečišćenja na središnjoj liniji (z=0(m)) za maksimalnu brzinu vjetra i K_z=0,0001(m^2/s) uočava se da vrijednosti beta distribucije imaju nagli skok između vrijednosti nula i jedinica i da vrlo brzo poprimaju maksimalnu vrijednost.

8. Kvantifikacija 95% fraktila koncentracije za potrebe izbora visine dimnjaka

Iz gornjih prikaza kumulativne funkcije gustoće Beta distribucije izvučeni su 95% fraktili. Analizom je pokazano da manja brzina vjetra uzrokuje veće vrijednosti koncentracija. Stoga su uzeti 95% fraktili za brzinu U=0,1(m/s).

8.1. Vrijednosti 95% fraktila za sumporovodik i merkaptane

Vrijednosti maksimalne koncentracije iznad izvora onečišćenja za sumporovodik i merkaptane iznosi C_0=2,042595(mg/m3).

Tablica 8.1. Vrijednosti 95% fraktila za sumporovodik i merkaptane za U=0,1(m/s)

		$K_z=10^{-2}(m^2/s)$	$K_z=10^{-4}(m^2/s)$
2(m)	z=0(m)	1,957214529	2,042595
	rub oblaka	1,80973917	0,719871756
5(m)	z=0(m)	1,641020823	2,042595
	rub oblaka	1,231684785	0,241741118
10(m)	z=0(m)	0,942453333	2,042595
	rub oblaka	0,401982696	0
50(m)	z=0(m)	0,000612779	2,033893545
	rub oblaka	0	0

8.2. Vrijednosti 95% fraktila za amonijak

Vrijednosti maksimalne koncentracije iznad izvora onečišćenja za amonijak iznosi C_0=4,08519(mg/m3).

Tablica 8.2. Vrijednosti 95% fraktila za amonijak za U=0,1(m/s)

		$K_z=10^{-2}(m^2/s)$	$K_z=10^{-4}(m^2/s)$
2(m)	z=0(m)	3,914429058	4,08519
	rub oblaka	3,61947834	1,439743512
5(m)	z=0(m)	3,282041646	4,08519
	rub oblaka	2,46336957	0,483482237
10(m)	z=0(m)	1,884906666	4,08519
	rub oblaka	0,803965392	0
50(m)	z=0(m)	0,001225557	4,067787091
	rub oblaka	0	0

9. Izbor najkritičnije kombinacije ulaznih parametara za procjenu 95% - nog fraktila koncentracije

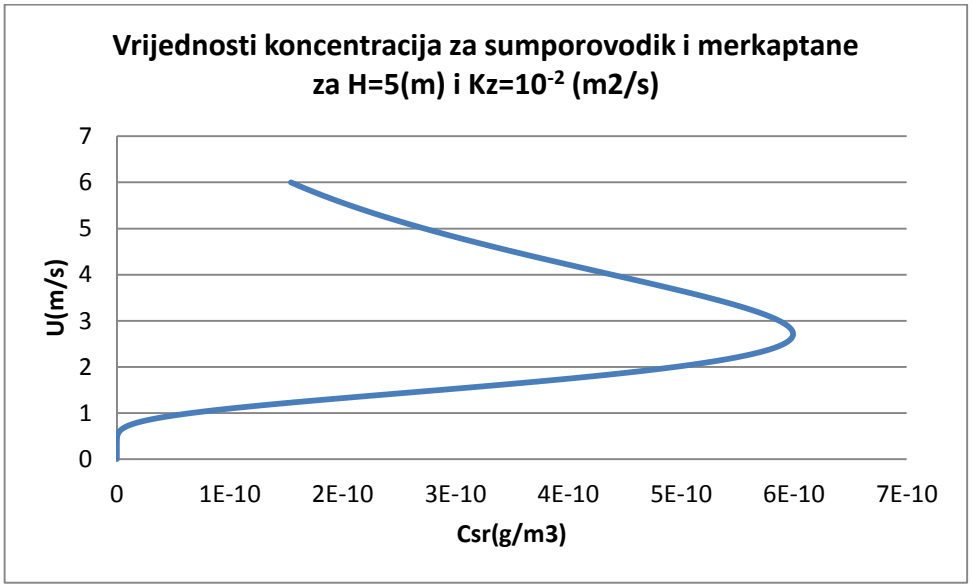
Rezultati proračuna za ovaj rad će biti prikazani u obliku ovisnosti brzine vjetra i koeficijenta turbulentne difuzije jer je utvrđeno da ta dva faktora imaju najveći utjecaj na raspored koncentracija u promatranom području.

Promatra se srednja vrijednost koncentracije na maksimalnoj udaljenosti do ruba UPOV-Osijek (534,2 (m)) na visini 1(m) iznad tla. Uzeta je maksimalna udaljenost jer je utvrđeno da se na toj udaljenosti, pri odabranoj visini 1(m) iznad tla, javljaju maksimalne srednje vrijednosti.

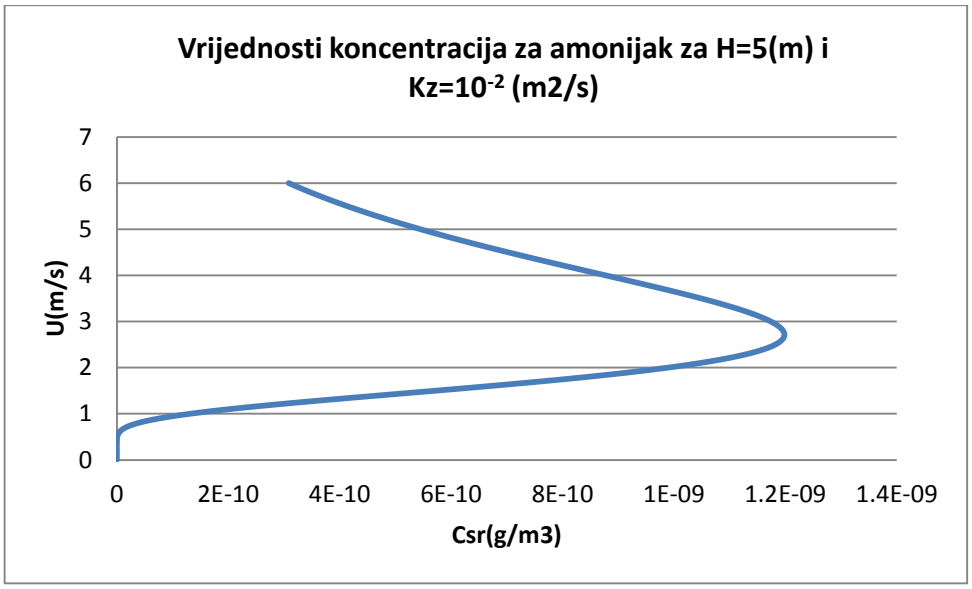
Prikazani su rezultati za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$, $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ i $K_z=10^{2}(m^2/s)$. Koeficijenti turbulentne disperzije $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ i $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ predstavljaju uvjete stabilne atmosfere kakvi su uočeni na promatranom području. Radi dodatne sigurnosti radi se i proračun s $K_z=10^{2}(m^2/s)$ koji predstavlja uvjete nestabilne atmosfere.

Dobiveni rezultati se uspoređuju s zakonski dozvoljenim koncentracijama koje iznose $5 \cdot 10^{-6} g/m^3$ za sumporovodik, $3 \cdot 10^{-6} g/m^3$ za merkaptane i $10^{-4} g/m^3$ za amonijak.

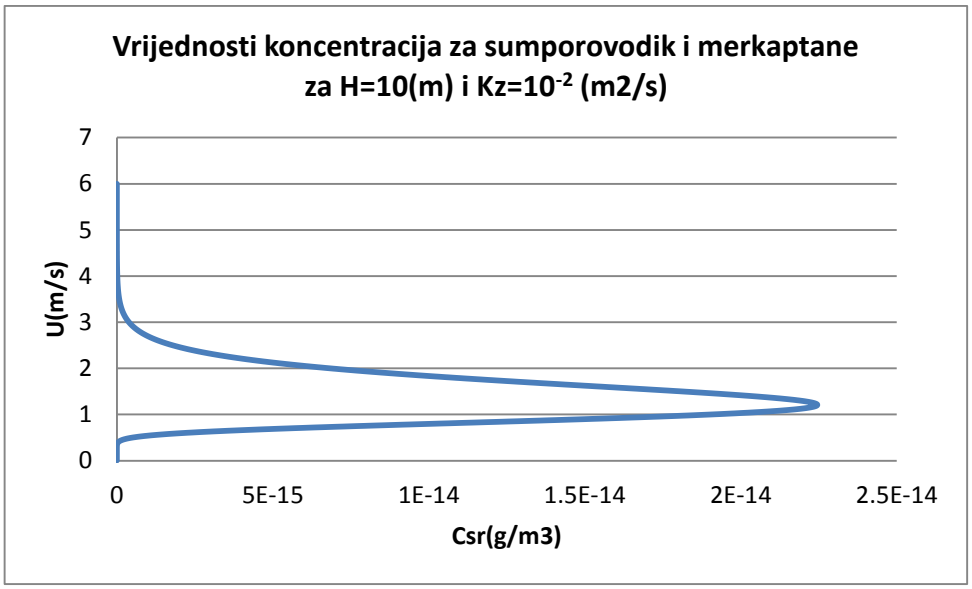
Promatraju se vrijednosti koncentracije za dimnjak visine 5 i 10 (m) na udaljenosti x=534,2(m) i visini 1(m) iznad tla.



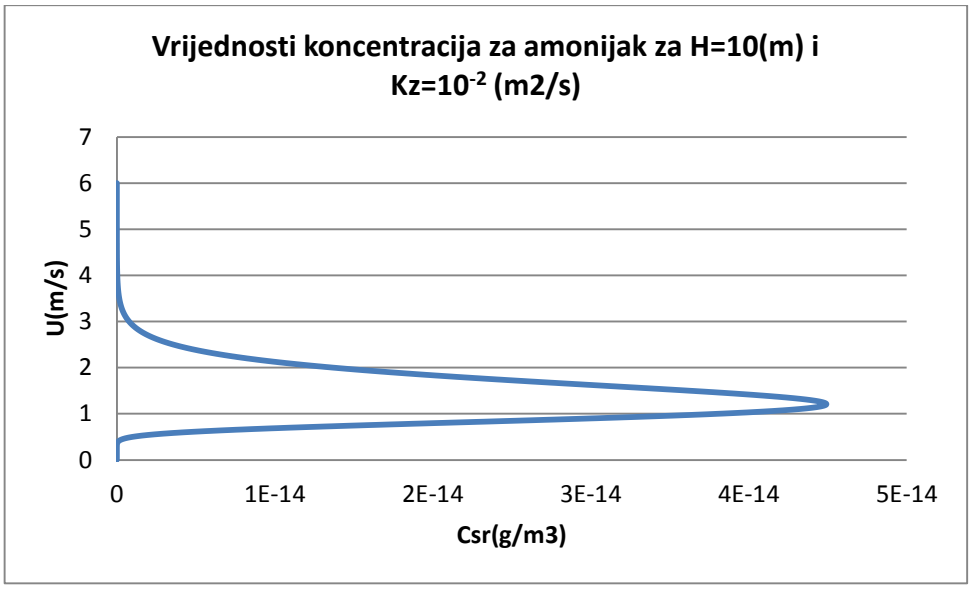
Slika 8.1.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 5(m)



Slika 8.2.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ za amonijak za dimnjak visine 5(m)

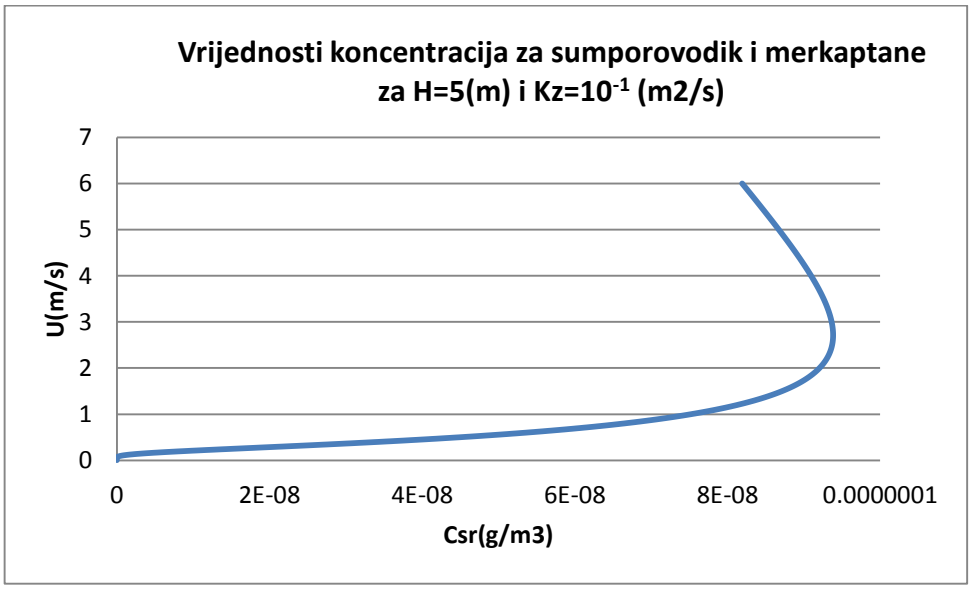


Slika 8.3.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 10(m)

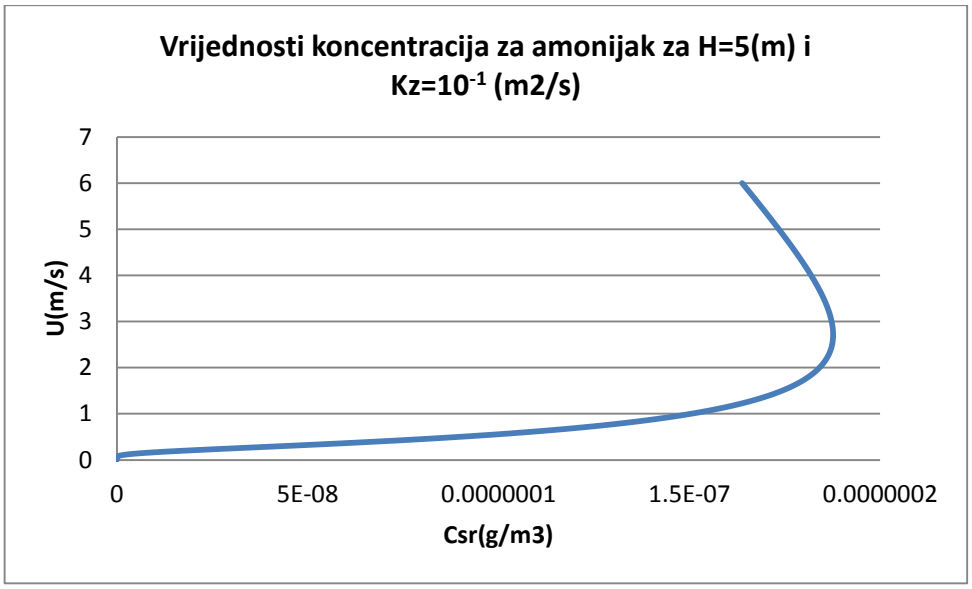


Slika 8.4.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ za amonijak za dimnjak visine 10(m)

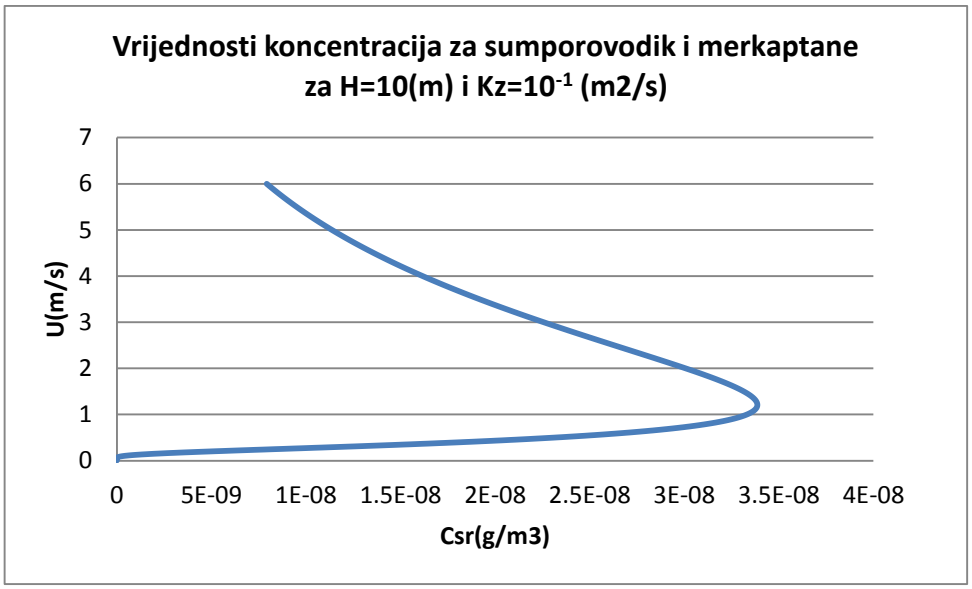
Usporedbom rezultata vrijednosti koncentracija po brzini za $K_z=10^{-2}(m^2/s)$ za različite visine dimnjaka uočava se da se javljaju veće vrijednosti za visinu dimnjaka 5(m). Vrijednosti koncentracije najprije se smanjuju jer pri minimalnim vrijednostima brzine koncentracije ne dosežu visinu na kojoj se mjeri koncentracija. Koncentracija se postupno povećava prema izrazu (6.2.7) i doseže maksimum. Nakon toga se postupno smanjuje te ima brži pad za veću visinu dimnjaka.



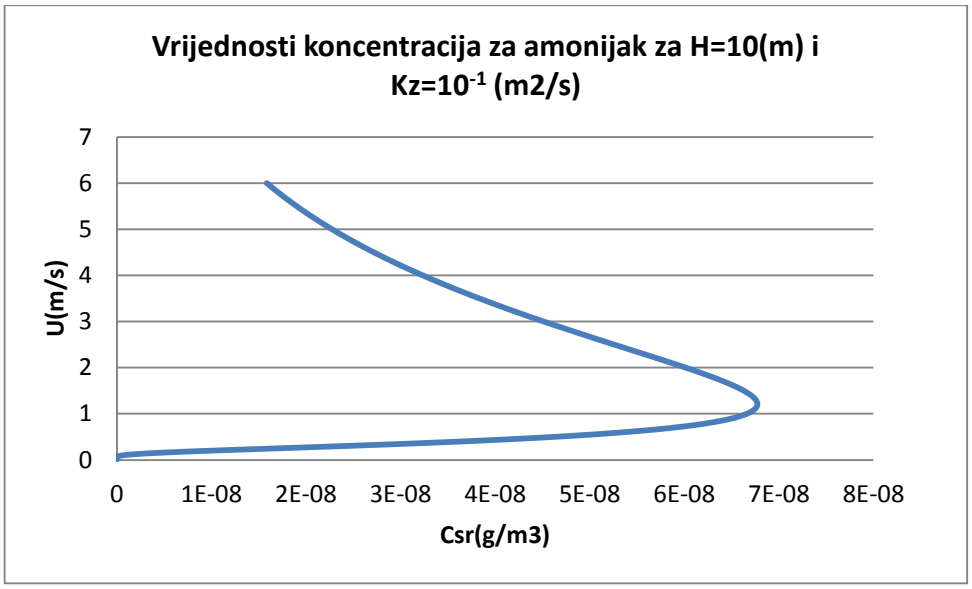
Slika 8.5.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 5(m)



Slika 8.6.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ za amonijak za dimnjak visine 5(m)

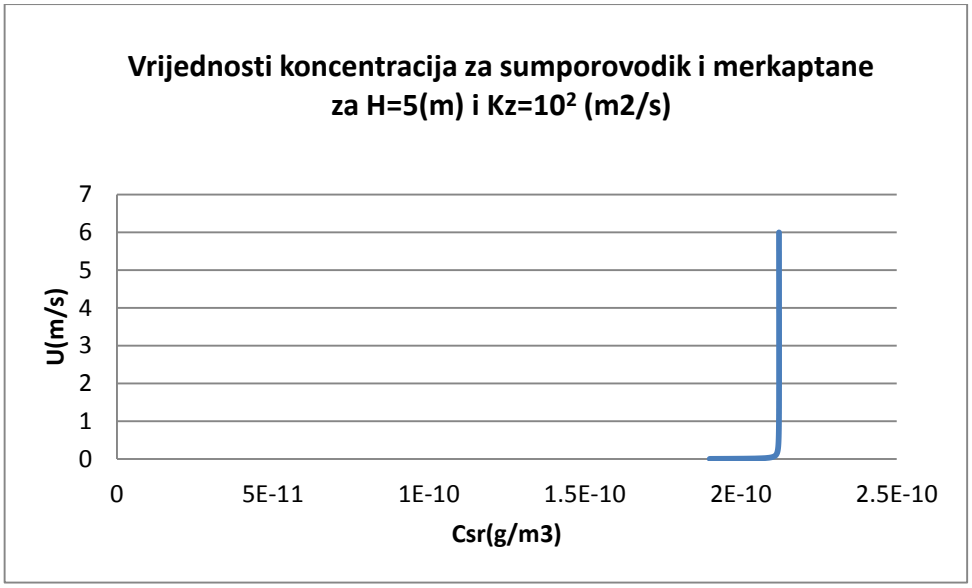


Slika 8.7.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 10(m)

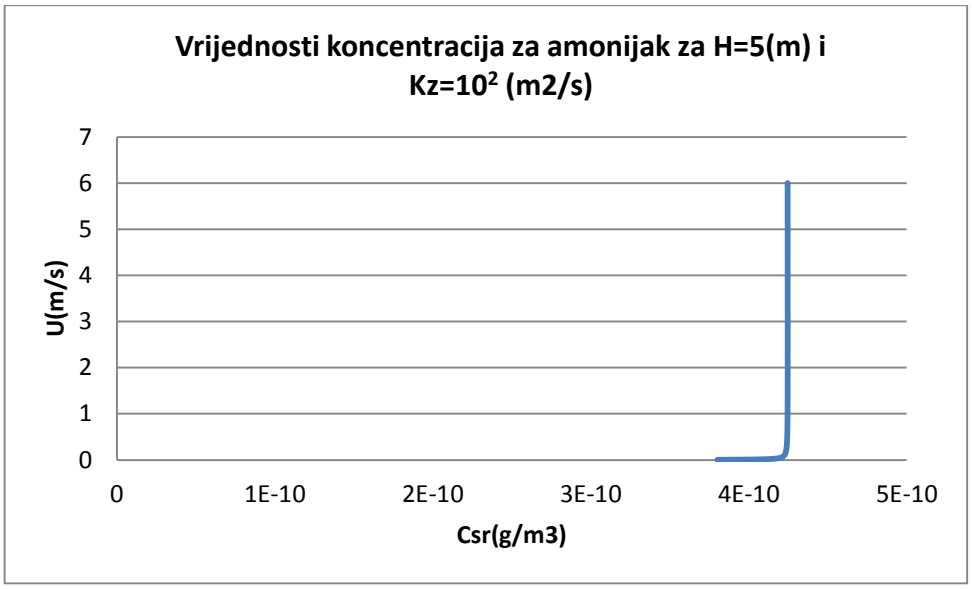


Slika 8.8.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 10(m)

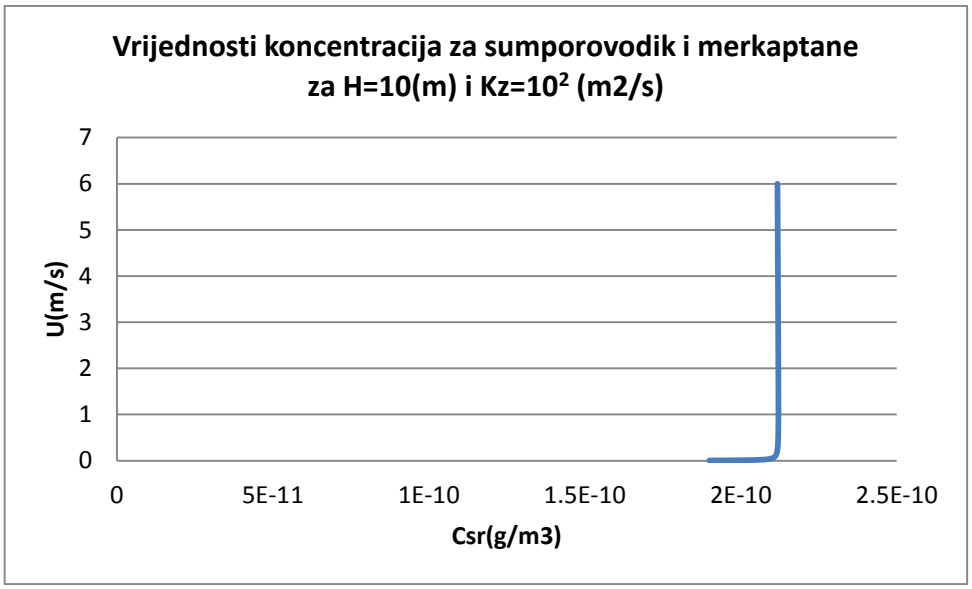
Usporedbom rezultata vrijednosti koncentracija po brzini za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ za različite visine dimnjaka uočava se da se javljaju veće vrijednosti za visinu dimnjaka 5(m). Vrijednosti koncentracije najprije se smanjuju jer pri minimalnim vrijednostima brzine koncentracije ne dosežu visinu na kojoj se mjeri koncentracija. Koncentracija se postupno povećava prema izrazu (6.2.7) i doseže maksimum. Nakon toga se postupno smanjuje te ima brži pad za veću visinu dimnjaka. Vrijednosti koncentracije su veće nego za $K_z=10^{-1}(m^2/s)$ te se događa i veće širenje oblaka.



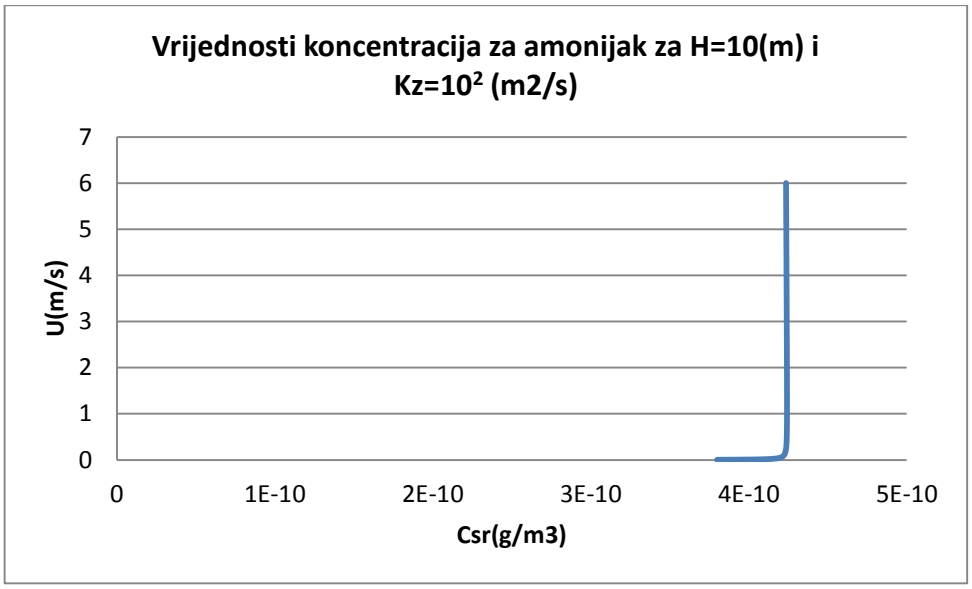
Slika 8.9.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^{2}(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 5(m)



Slika 8.10.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^2(m^2/s)$ za amonijak za dimnjak visine 5(m)



Slika 8.11.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^2(m^2/s)$ za sumporovodik i merkaptane za dimnjak visine 10(m)



Slika 8.12.Srednje vrijednosti koncentracije po brzini za $K_z=10^2(m^2/s)$ za amonijak za dimnjak visine 10(m)

Usporedbom rezultata vrijednosti koncentracija po brzini za $K_z=10^2(m^2/s)$ za različite visine dimnjaka uočava se da gotovo nema razlike u vrijednostima koncentracije za različite visine dimanjaka. Na vrijednosti koncentracije najveći utjecaj ima koeficijent turbulentne difuzije $K_z=10^2(m^2/s)$ koji je relativno velik te ima dominantan utjecaj na širenje onečišćenja.

Analizom dobivenih rezultata uočava se da ni za jednu kombinaciju brzine vjetra, koeficijenta turbulentne disperzije i visine dimnjaka srednja vrijednost koncentracije ne prelazi granične vrijednosti.

10.Zaključak

Cilj ovog diplomskog rada bio je ispitati kako brzina vjetra, udaljenost od izvora onečišćenja, visina ispuštanja onečišćenja i koeficijent turbulentne disperzije utječu na raspodijelu vrijednosti koncentracije u prostoru te utvrditi minimalnu visinu dimnjaka da bi vrijednosti koncentracije na rubu promatranog područja bile unutar zakonskih okvira.

Utjecaj analiziranih parametara interprtira se kroz nekoliko pokazatelja vidljivih u kumulativnoj funkciji distribucije (CDF) koncentracije; učestalost maksimalne koncentracije, učestalost nultih vrijednosti koncentracije te maksimalna vrijednost koncentracije koja ima nenultu učestalost pojavljivanja.

Analiza rezultata za advektivni transport je odvojena od analize za advektivno-disperzivni transport. Pokazano je da su vrijednosti uvijek veće za advektivni transport. Koeficijent turbulentne disperzije ima velik utjecaj na smanjenje vrijednosti koncentracije i ima najveće djelovanje na rubovima oblaka onečišćenja.

Promatrajući analizu rezultata za oba slučaja uočava se da se srednje vrijednosti koncentracije i vrijednosti varicance koncentracije smanjuju kako se udaljavamo od izvora onečišćenja. Gledajući kretanje vrijednosti koncentracije po visini uočava se da su maksimalne vrijednosti uvijek na središnjoj liniji oblaka te se smanjuju kako se udaljavamo u bilo kojem smijeru.

U pogledu sigurnosti,manje vrijednosti brzina vjetra rezultiraju većim koncentracijama ,što navedeni model opisuje dobro. U izradi analize uočeno je kako definiranje prametara Beta distribucije iz varijance dobivene modelom Samford i Sullivan (1995) rezultira povećanim učestalostima većih koncentracija s povećanjem udaljenosti. Ova činjenica nije fizikalno objašnjiva pa se zaključuje kako navedeni model ima smanjenu točnost za velike brzine vjetra. Ovaj slučaj nije kritičan u pogledu ostvarenja maksimalnih vrijednosti koncentracije.

Vrijednosti brzine vjetra također su bitne u analizi rezultata. Utvrđeno je da s povećanjem brzine vjetra oblak ostaje niže s obzirom na dominanatan utjecaj vjetra na oblak

Tablica 9.1. Utjecaj parametara na srednju vrijednost koncentracije i varijancu koncentracije

	Udaljenost od izvora x(m)	Visina ispuštanja H(m)	Brzina vjetra U(m/s)	Koef. turbu. disp. et(m2/s)
Srednja vrijednost koncentracije	—	—	—	—
Varijanca koncentracije	—	—	—	—

Utvrđeno je da ni za jednu kombinaciju relevantnih čimbenika neće doći do prekoračenja zakonom propisanih graničnih vrijednosti koncentracije unutar granica područja UPOV-Osijek te se za minimalnu visinu dimnjaka može uzeti visina od 5(m).

No, kako u ovom radu nisu uzeti u obzir utjecaji temperature zraka i tla, vlažnosti zraka i drugi čimbenici koji bi mogli imati utjecaj na raspored koncentracija te kako su promatrane vrijednosti samo unutar UPOV-Osijek predlaže se da se ovaj rad uzme samo kao okvirna procijena vrijednosti koncentracije i visine dimnjaka.

11. Literatura

[1]Anemometar, Ultrazvučni anemometar, RL:https://hr.wikipedia.org/wiki/Anemometar, (13.02.2016.)

[2]Bajić, A., (2011.) Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom, Doktorski rad, Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet, str.32

[3]Cf. ibid., str.28

[4]Bogojević, I., (2015.) Bayersovska regresijska analiza, Diplomski rad, Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet

[5] Gelo, B.,(2010.) Opće i pomorska meterologija, Zadar, Sveučilište u Zadru, str.156-158

[6] Cf.ibid., str.161

[7] Cf.ibid., str.432-434

[8]Huzak, M., (2006.) Vjerojatnost i matematička statistika, Sveučilište u Zagrebu, PMF-Matematički odjel, Zagreb

[9]HRN EN ISO/IEC 17025; Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija

[10]https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulent_diffusion

[11]http://acmg.seas.harvard.edu/people/faculty/djj/book/bookchap4.html

[12] Klima u Hrvatskoj, Geografska raspodjela kopna i mora, URL: http://crometeo.hr/klima/, (13.02.2016.)

[13]Macdonald, R., (2003.) Theory and objectives of air dispersion modelling: Appendix A, University of Waterloo, Waterloo

[14]Meštrović, T., (2003.) Simulacija dinamike perjanice sumpornog dioksida za stacionarne uvjete atmosfere, Diplomski rad, Rijeka: Tehnički fakultet

[15]Narodne novine (2011); Zakon o zaštiti okoliša, Zagreb:Narodne novine d.d.

[16]Narodne novine (2012); Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora, Zagreb: Narodne novine d.d.

[17]Narodne novine (2012); Uredba o razinama onečišćujućih tvari u zraku, Zagreb: Narodne novine d.d.

[18] Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M. (2001.) Vrijeme i klima Hrvatskog Jadrana, Zagreb, Dr.Feletar, str.117-118

[19] Cf.ibid., str.126-130

[20]Pravilnik o praćenju kvalitete zraka (2011.), Narodne novine 130, Zagreb

[21]Samford B.L.; Sullivan P.J. (1995.), Contaminant concentration field, Department of Applied Mathematics, University of Western Ontario, London, Ontario

[22]Srzić, V. (2013), WWTP odor final report