

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 1
		Listova : 81

SADRŽAJ

1. PREDGOVOR.....	3
2. UVOD.....	4
3. PREGLED DOSADAŠNJIH RADOVA I SAZNANJA	5
4. MATEMATIČKI MODELI ZA ŠIRENJE EFLUENATA U ATMOSFERI	8
4.1. OPĆA JEDNADŽBA DISPERZIJE EFLUENATA	9
4.2. STANJE ATMOSFERE.....	13
4.2.1. Utjecaj stanja atmosfere na disperziju efluenata iz industrijskih dimnjaka ...	15
4.2.2. Ostali utjecajni faktori na disperziju efluenata	17
4.3. GAUSSOV MODEL DISPERZIJE EFLUENATA IZ TOČKASTOG IZVORA ..	18
4.3.1. Parametri disperzije.....	20
4.3.2. Nedostaci Gaussovog modela disperzije	22
4.4. OSNOVNE BRIGGSOVE JEDNADŽBE TRAJEKTORIJE DIMA	24
4.4.1. Zakon o očuvanju mase.....	25
4.4.2. Zakon o očuvanju količine gibanja	26
4.4.3. Zakon o očuvanju energije.....	27
4.4.4. Dvotrećinski zakoni.....	30
5. KOMPJUTERSKO SIMULIRANJE DIFUZIJE I KONVEKCIJE ONEČIŠĆENJA ZRAKA	33
5.1. NUMERIČKO MODELIRANJE.....	33
5.2. FLUENT SOFTVERSKI PAKET	34
5.2.1. Jednadžba o očuvanju mase.....	35
5.2.2. Jednadžba o očuvanju količine gibanja	36
5.2.3. Jednadžba o očuvanju energije.....	36
5.2.4. Transportne jednadžbe za kemijske spojeve (opće jednadžbe difuzije i konvekcije)	37
5.2.5. K-e turbulentni model	37
5.3. PRIPREMA GEOMETRIJE	40
5.4. MASENI UDJELI EFLUENATA.....	45
5.4.1. Maseni udjeli iz kotla G4	45
5.4.2. Maseni udjeli iz kotla G5	48
5.4.3. Maseni udjeli zajedničkog dimnjaka kotla G4 i kotla G5.....	50
5.4.4. Maseni udjeli iz peći VH-1, VACUUM FLASH-a.....	51
5.4.5. Maseni udjeli iz CO-BOJLERA i peći FH-2 FCC procesa.....	54
5.4.6. Maseni udjeli zajedničkog dimnjaka peći VH-1, CO-BOJLERA i peći FH-2 FCC procesa.....	57
5.5. PROFILI VJETRA	58
5.6. POSTUPAK MODELIRANJA U FLUENTU	59
6. PRIKAZ REZULTATA	66

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 2
		Listova : 81

6.1. PRIKAZ PRIZEMNIH KONCENTRACIJA.....	66
6.1.1. <i>Smjer vjetra</i> $(x,y)=(-1,1)$	66
6.1.2. <i>Smjer vjetra</i> $(x,y)=(0,1)$	68
6.1.3. <i>Smjer vjetra</i> $(x,y)=(1,1)$	69
6.1.4. <i>Smjer vjetra</i> $(x,y)=(1,0)$	71
6.1.5. <i>Smjer vjetra</i> $(x,y)=(1,-1)$	72
6.2 PRIKAZ KONCENTRACIJA U POPREČNOM PRESJEKU	75
7. ZAKLJUČAK	77
8. LITERATURA.....	78
9. PRILOZI.....	81

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 3
		Listova : 81

1. PREDGOVOR

Iznimno mi je važno spomenuti kako sam za vrijeme pisanja diplomskog rada naišao na veliko razumijevanje osoba u mojoj okolini, koje su mi davale čvrstu potporu u privođenju ovog diplomskog rada kraju. Iznimno bih se zahvalio prof.dr.sc. Zoranu Mrši, mome mentoru, koji je bio prisutan u svim fazama nastanka diplomskog rada te mi je ustupio računalo na svom zavodu bez kojeg ne bi mogao realizirati moj rad. Također bih se zahvalio asistentu Zoranu Čariji, dipl.ing. koji je uvijek bio spreman ponuditi mi pomoć kad bi se našao pred nekim problemom.

Na kraju se zahvaljujem mojoj djevojci i obitelji bez čije prisutnosti i potpore sve ovo jednostavno ne bi imalo smisla.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 4
		Listova : 81

2. UVOD

Diplomski rad «KONPJUTERSKO SIMULIRANJE DIFUZIJE I KONVEKCIJE ONEČIŠĆENJA ZRAKA» sastoji se od dva područja. U prvom dijelu bit će opisana dosadašnja saznanja o pojavama u atmosferi koje na izravan način utječu na disperziju polutanata/efluenata/onečišćivača zraka iz izvora onečišćenja unutar industrijskih postrojenja. Industrijsko postrojenje bit će predstavljeno kao točkasti izvor onečišćenja budući da u prirodi postoje još i linijski, površinski i volumenski izvori onečišćenja (kao što su požari površinski izvori onečišćenja u atmosferu). prikazat će se propisani model disperzije baziran na Gaussovoj funkciji distribucije greške te Briggsove jednadžbe za podizanje dima (mlaza efluenata) iz dimnjaka u atmosferu.

Svrha teoretskog poznavanja pojava disperzije u atmosferi značajna je radi određivanja prizemnih koncentracija onečišćenja koje na direktan način utječu na zdravlje ljudi, flore i faune na tom području. Sva veća zagađenja atmosfere uzrokovana su ljudskim faktorom te je od iznimne važnosti da ljudi doprinesu očuvanju svog okoliša i svojega zdravlja upravo na način da se bolje upoznaju s problemom.

U drugom dijelu bit će opisan primjer određivanja prizemnih koncentracija onečišćivača emitiranih iz dva dimnjaka na industrijskom postrojenju INA-e u Urinju (zajednički dimnjak kotla G4 i kotla G5 pogona energane i zajednički dimnjak FCC za peći VACUUM FLASH-a i FCC procesa) te njihova disperzija nad čitavim područjem Bakarskog zaljeva i manje okolice. Disperzija će se modelirati za brzine vjetra od 2.5, 5 i 10 ms⁻¹ i to u pet različitih smjerova južnih vjetrova. Kako bi se to izvršilo koristit će se I-DEAS za generiranje mreže nad modelom te FLUENT softverski alat za modeliranje računarske dinamike fluida. Opisat će se način rada FLUENT-a, tj. vrste numeričkog modeliranja koje alat nudi, priprema ulaznih podataka kao što su topografija terena (geometrija modela), proračun potrebnih masenih udjela efluenata koji se emitiraju iz dimnjaka, nametnuti profil vjetra za određena atmosferska stanja, zatvaranje sustava jednadžbi odabirom određenog turbulentnog modela, diskretizacija modela te adaptacija nad određenim područjem domene. Na kraju bit će dan prikaz dobivenih rezultata te njihovo pojašnjenje.

Odabir ove teme bio je logičan nastavak dosadašnjeg rada na kolegijima *Znanstveno istraživanje u strojarstvu* i *Računarska dinamika fluida*. Područje atmosferske mehanike fluida je vrlo raznoliko i interesantno jer daje izravan doprinos saznanjima čovjekovog utjecaja na okoliš te omogućuje predviđanje pojava koje su proizvod upravo takvih utjecaja (kisele kiše, itd.) i njihovo pravovremeno spriječavanje. Uski dodir s ekologijom, odnosno s očuvanjem okoliša u kojem živimo, osnovni je razlog odabira ove teme.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 5
		Listova : 81

3. PREGLED DOSADAŠNJIH RADOVA I SAZNANJA

Pojave složenih procesa u prirodi mogu se opisati matematičkim modelima. Kada izvor onečišćenja emitira kemikaliju (efluenat) u atmosferu s nekom ishodišnom koncentracijom (masa po jedinici volumena), kemikalija ne zadržava svoju početnu koncentraciju. Atmosferski procesi djeluju na efluens tako da ga rasprše niz vjetar postižući razrjeđenje koncentracije. Jednostavno rečeno, modeli zračne disperzije su računarski alati koji koriste matematičke jednadžbe kako bi opisali procese disperzije. Poznavajući karakteristike inicijalnog ispuštanja efluenata, moguće je upotrebom modela zračne disperzije predvidjeti zračne koncentracije efluenata na određenoj nizstrujnoj receptorskoj lokaciji.

Modeli disperzije igraju značajnu ulogu u politici propisivanja kvalitete zraka. Zakon o zaštiti zraka i donešeni propisi u njemu uspostavili su standarde za zaštitu čovjekovog zdravlja i okoliša zbog potencijalno štetnih utjecaja onečišćenja zraka. Ti standardi bazirani su ili prema koncentraciji efluenata u zraku ili prema opasnosti po zdravlje. Izvori onečišćenja mogu koristiti modele disperzije kako bi pokazali da će utjecaji emisije efluenata ostati ispod primjenjivih propisanih standarda. Naime, izrada i primjena modela disperzije uvelike je vođena propisima kvalitete zraka.

Primjena propisanih modela balansirana je političkim (zakonskim) ciljevima i znanosti o disperziji. Konzervativni modeli propisno odobreni jedva dostižu realne uvjete, a i to čine uz visoki stupanj netočnosti i nesigurnosti. Ipak, oni koji donose te propise zaista žele promicati kontinuiranost i iskrenost što se tiče usavršavanja propisanih modela. Prema tome, rezultati modela disperzije bit će «krivi» tek kada svi koji ih koriste ne ustanove slične «krive» rezultate. Zbog toga se događa da prolaze godine testiranja i poboljšanja prije nego novi, tehnički «bolji» modeli disperzije dobiju zeleno svijetlo od strane vladinih organizacija koje donose takve propise (Sjedinjene države: EPA – Environmental Protection Agency, Europa: EEA – European Environmental Agency, itd.)¹.

Prvi pokušaji da se popravi kvaliteta zraka ili ukaže na njeno onečišćenje datiraju u daleku prošlost²:

- 900. g. p.n.e. - Egipatski kralj Tukulti komentira onečišćenje uzrokovano od postavljanja asfalta u gradu Hit;
- 61 .g. n.e. – Seneka komentira «Čim sam pobjegao iz te turobne atmosfere grada (Rima) i toga odvratnog mirisa iz zadimljenih kuhinja koje, kad se koriste, ispuštaju pogubnu mješavinu dima i čađe, opazio sam koliko je moje zdravlje narušeno»;

¹ Vidi: Westbrook, James A., Air Dispersion Models: Tools to Assess Impacts from Pollution Sources, American Bar Association, Natural Resources & Environment, Vol 13, No. 4, 1999. god.

² Vidi: Heidorn, K.C., A Chronology of Important Events In the History of Air Pollution Meteorology to 1970, Air Quality and Meteorology Section, Air Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario, M5S 1Z8, Canada

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 6
		Listova : 81

- 852. g. n.e. – London je već poznat po zagađenom zraku; Edinburgh dobiva nadimak «Stari smrdljivac» (škot. «Auld Reekie»);
- 1257. g. n. e. – Engleska kraljica Eleanor protestira kako je Nottingham prezadimljen i time nenastanjiv; odlučuje preseliti se u Tutbury Castle četrdesetak kilometara dalje u potrazi za čistim zrakom;
- 1273. g. n.e. – Prvi zakon o snižavanju količine dima (*The First Smoke Abatement Law*) je donesen u Londonu; njime se zabranila upotreba ugljena kao «štetan po zdravlje».

Modeli zračne disperzije prešli su velik put od kada je prvi model napravljen u početku dvadesetog stoljeća. U to vrijeme su zračne emisije iz industrijskih i mobilnih izvora bile zaista nekontrolirane, a o procesu disperzije se malo toga znalo. Kako bi se započelo upoznavanje s takvim procesima bilo je neizbježno, kao i u mnogim drugim primjerima, da se dogode strašne nesreće³:

- tijekom Prvog Svjetskog rata ispušteno je mnogo plinskih bojnih otrova;
- uslijed jednog znanstvenog eksperimenta o zagađenju zraka godine 1948. zbog naglog prekomjernog ispuštanja polutanata iz industrijskih dimnjaka u okolicu Donore, Pennsylvania umrlo je 20 ljudi (tisuće bolesnih);
- zbog onečišćenog zraka u Londonu, također uslijed istraživanja, umrlo je 1952. godine 4000 ljudi.

S početka 50-tih započelo je istraživanje procesa disperzije zbog mogućih utjecaja pada atomske bombe. U 60-tim i 70-tim pioniri znanosti o disperziji, F. Pasquill i F.A. Gifford, sastavili su jednostavne krivulje disperzija koje su se mogle upotrijebiti u modeliranju. Još jedan znanstvenik, G.A. Briggs, izveo je jednadžbe koje opisuju ponašanje emisije dima. Računarska oprema je bila ograničena, kalkulacije modela disperzije su često bile završavane ručno ili pomoću relativno grubih računskih kodova. Danas, najsnažnija osobna računala postižu kalkulacije u minutama što je na prijašnjim računalima trajalo danima.

Kako bi se stvorili propisi koji bi propisali granične vrijednosti onečišćenja donešeni su *Zakoni o zaštiti zraka* (USA (*Clean Air Act*) 1963. god., Hrvatska 1995. god.). Od donošenja do danas *Zakon o zaštiti zraka* nadopunjen je brojnim amandmanima. Donešeni su propisi i standardi za rizične onečišćivače koji uključuju:

- ozon i uzročnike nastanka ozona (hlapljivi organski spojevi i dušikovi oksidi),
- slobodne čestice,
- dušični dioksid,
- sumporni dioksid,
- ugljični dioksid,
- i preostali.

³ Heidorn, Keith C., Lecture 13. Diffusion Modelling Concepts – Geography 373 – Applied Climatology, University of Victoria, ljetni semestar 2001. god.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 7
		Listova : 81

Kako bi se regulirali izvori onečišćenja, u svrhu podržavanja donešenih propisa, potrebno je bilo osmisliti učinkovitu metodu za predviđanje utjecaja zračnog onečišćenja. Utjecaj emisije na koncentracije kritičnih onečišćivača zraka može se izračunati koristeći:

1. opremu za monitoring stanja okolišnjeg zraka,
2. simulacijom modela disperzije.

Modeliranje disperzije ima nekoliko prednosti nad korištenjem eksperimentalne opreme:

- nemoguće je provoditi eksperiment za utjecaje iz nepostojećih izvora
- modeliranje disperzije posjeduje fleksibilnost pri planiranju (moguće je provesti mnoge «što – ako» scenarije)
- moguće je modelirati utjecaje maksimalnih onečišćenja za razna vremenska osrednjenja pod najgorim meteorološkim uvjetima
- cijena modeliranja je mnogo efikasnija (i vremenski i novčano).

Slijedom toga, modeliranje disperzije je postalo cijenjeni alat za utvrđivanje podložnosti propisima Zakona o zaštiti zraka.

4. MATEMATIČKI MODELI ZA ŠIRENJE EFLUENATA U ATMOSFERI

Uobičajeno je u praksi da se 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), mješanju zraka po visini, kemijskim reakcijama efluenata i/ili radioaktivnom raspadu u atmosferi te brzini taloženja.

Budući da se radi o sustavu velikog volumena, proračun fizikalnih parametara je moguće provesti unutar manjeg ograničenog prostora koji se obično 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.

Sušтина 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 zahtijevaju 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 SO_2 i NO_x , 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.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 9
		Listova : 81

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.

4.1. OPĆA JEDNADŽBA DISPERZIJE EFLUENATA

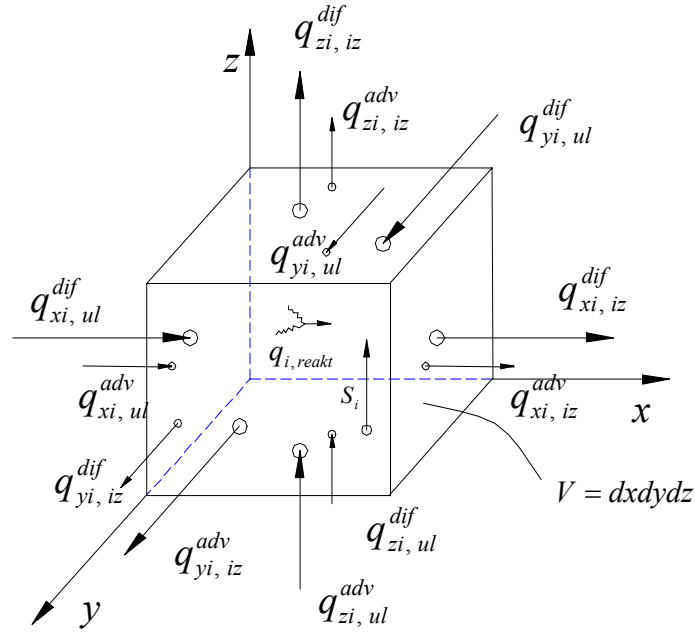
Kako bi opisali putanju izvjesne količine plinovitog efluenta u atmosferi potrebno je uvidjeti kakvim se zakonima taj efluenat rasprostire. Da bi realno opisali zbivanja u atmosferi potrebno je obuhvatiti sve utjecaje koji uzrokuju njezinu promjenu. Tada bi trebali brzine kretanja atmosferskih masa, 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 (slika 2.1.), odnosno na jedan kontrolni volumen (KV), mogu se donekle pretpostaviti tri utjecajna faktora:

- **atmosferska 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 unešena u KV iz nekog **vanjskog izvora** S_i .

Kako bi sagledali njihov utjecaj na vremensku promjenu koncentracije rasplinutog efluenta unutar prikazanog KV-a postaviti ćemo jednadžbu o očuvanju mase M (kg):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = q_{i,reakt} + S_i + q_{i,advekcija} + q_{i,difuzija} \quad (1)$$



Slika 2.1. Kontrolni volumen

Prema prikazanome, količine fluida (uzrokovane advekcijom i difuzijom) jednake su razlikama njihovih ulaznih i izlaznih vrijednosti te dobivamo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = q_{i,reakt} + S_i + \sum_i^{x,y,z} (q_{i,ul}^{adv} - q_{i,iz}^{adv}) + \sum_i^{x,y,z} (q_{i,ul}^{dif} - q_{i,iz}^{dif}) \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} q_{xi,ul}^{dif} &= -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_1 \\ q_{xi,iz}^{dif} &= -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_2 \end{aligned} \quad (3)$$

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 efluent difundira iz područja veće u područje manje koncentracije i time je promjena negativna.

$$q_{xi}^{dif} = q_{xi,ul}^{dif} - q_{xi,iz}^{dif} = -K_x \cdot A_{yz} \cdot \left(\left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_1 - \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_2 \right) \quad (4)$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 11
		Listova : 81

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

$$\left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_2 = \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_1 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_1 \right) dx \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_1 - \left. \frac{\partial c_i}{\partial x} \right|_2 = -\frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} dx \quad (6)$$

$$q_{xi}^{dif} = K_x \cdot A_{yz} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} dx = K_x \cdot V \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (7)$$

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

$$q_{yi}^{dif} = K_y \cdot A_{xz} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} dy = K_y \cdot V \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} \quad (8)$$

$$q_{zi}^{dif} = K_z \cdot A_{xy} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} dz = K_z \cdot V \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \quad (9)$$

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 vjetera prikaže u kartezijevom koordinatnom sustavu dobivamo komponente brzina v_x, v_y i v_z . Protoci uslijed promjene koncentracije vjetrom su:

$$\begin{aligned} q_{xi,ul}^{adv} &= v_x \cdot A_{yz} \cdot c_{i,ul} & c_{i,ul} &= c_i|_1 \\ q_{xi,lz}^{adv} &= v_x \cdot A_{yz} \cdot c_{i,lz} & c_{i,lz} &= c_i|_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Analogno prethodno provedenom izračunu dobivamo protoke:

$$q_{xi}^{adv} = -v_x \cdot V \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x}; \quad q_{yi}^{adv} = -v_y \cdot V \cdot \frac{\partial c_i}{\partial y}; \quad q_{zi}^{adv} = -v_z \cdot V \cdot \frac{\partial c_i}{\partial z} \quad (11)$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 12
		Listova : 81

Vraćajući tako dobivene protoke iz (11) i (7), (8) i (9) nazad u (2) te pritom uzimajući u obzir $M = c_i \cdot V$ te $q_{i,reakt} = C_i \cdot V$ dobivamo:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = C_i + S_i / V + K_x \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} - \left(v_x \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial c_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) \quad (12)$$

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

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:

$$\frac{Dc_i}{Dt} = C_i + S_i / V + K \cdot \nabla^2 c_i \quad (13)$$

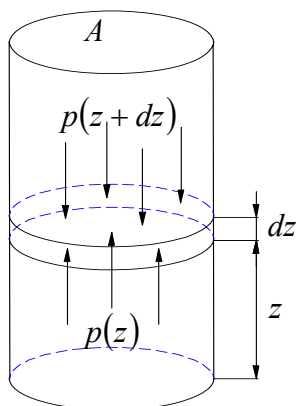
To je opći oblik jednadžbe za proračun disperzije efluenata u atmosferi.

4.2 STANJE ATMOSFERE

Disperzija efluenata u atmosferi ovisi o fizikalnom stanju atmosfere koje uključuje raspodjelu temperature po visini, turbulenciju i vjetrove. Jedan od najbitnijih pokazatelja koji karakteriziraju stanje atmosfere je promjena temperature i tlaka po visini. Temperaturni profili atmosfere su uvjetovani mnogim utjecajima kao što su grijanje i hlađenje zemljine površine, kretanje zračnih masa, postojanje oblaka i topografskih prepreka. Kako bi prikazali temperaturne profile, a budući da je zrak slab vodič topline, koristimo, referentnu, **adijabatsku** promjenu (ekspanzija idealnog plina bez izmjene topline s okolinom).

Na slici 2.2.1. je prikazan stupac zraka presjeka A i u njemu segment visine dz . Nad segmentom dz djeluju tlakovi $p(z)$ i $p(z+dz)$. Sumu svih sila nad segmentom u vertikalnom smjeru određuje relacija

$$A \cdot p(z) - A \cdot p(z+dz) = \rho \cdot A \cdot g \cdot dz \quad (14)$$



Slika 2.2. Segment zraka

gdje je ρ gustoća zraka.

Jednadžba izjednačuje sile tlaka (koje djeluju na segment) i težinu tog segmenta, te se može pisati kao

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \rho \cdot g \quad (15)$$

Kako bi riješili ovu jednadžbu razmotrit će se opća plinska jednadžba $p(z) \cdot V = GRT$, tj. za jedinični volumen

$$p(z) = C_1 \cdot \rho \cdot T \quad (16)$$

Plinska konstanta R ne ovisi o visini te je uključena u konstantu C_1 . Za adijabatsku, tj. izentropsku promjenu stanja karakteristična je veza temperature i tlaka

$$T = C_2 \cdot p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (17)$$

ili

$$p = C_3 \cdot T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (18)$$

gdje su C_2 i C_3 konstante, a κ je odnos specifičnih toplina zraka po konstantnom tlaku i konstantnom volumenu. Prema ovim ovisnostima temperatura je ovisna o tlaku, a time onda i prema visini z .

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 14
		Listova : 81

Diferenciranjem po z u (18) dobivamo:

$$\frac{dp}{dz} = C_2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} T^{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{\kappa - 1}{\kappa - 1}} \cdot \frac{dT}{dz} = C_3 \cdot T^{\frac{1}{\kappa - 1}} \cdot \frac{dT}{dz} \quad (19)$$

Iz (16) slijedi

$$\rho = C_4 \cdot \frac{p}{T} = C_4 \cdot \frac{C_3 \cdot T^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{T} = C_5 \cdot T^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (20)$$

Uvrštenjem (19) i (20) u (15) dobivamo

$$-C_3 \cdot T^{\frac{1}{\kappa - 1}} \frac{dT}{dz} = C_5 \cdot T^{\frac{1}{\kappa - 1}}$$

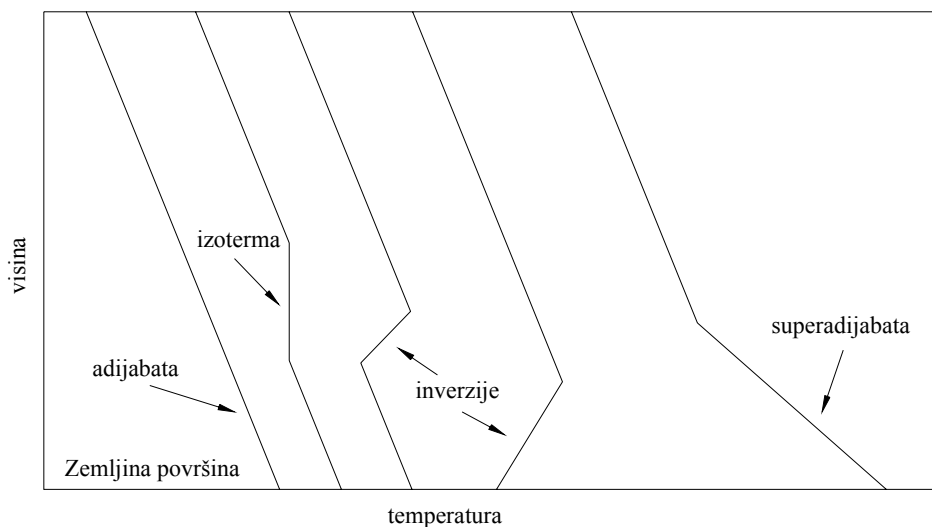
te nakon sređivanja

$$\frac{dT}{dz} = C_6 \quad (21)$$

Time je pokazano da adijabatsku promjenu stanja karakterizira linearna promjena temperature atmosfere po visini. U prosjeku se temperatura zraka smanjuje otprilike 1K za svakih 100 m visine.

U stvarnosti vertikalni profil atmosfere često odstupa od adijabatskog. Slučaj kada je temperaturni pad s visinom brži od adijabatskog nazivamo **superadijabatski**. Takvo stanje atmosfere okarakterizirano je NESTABILNIM. Ako je pak temperaturni pad sporiji (po visini) od adijabatskog imamo STABILNO stanje. Stabilno stanje karakteriziraju dva specijalna slučaja: **izoterma** kod koje je temperatura po visini konstantna te **inverzija** kod koje temperatura raste s visinom. Adijabatsko stanje atmosfere karakterizira se kao NEUTRALNO.

Primjeri ovih slučajeva mogu se potražiti u atmosferskim procesima. Zemlja danju prima energiju od Sunca i grije se, obratno noću se hladi i zrači energiju u atmosferu. Superadijabatno stanje može nastati unutar nekoliko stotina metara visine u vedrom danu s laganim vjetrom kada vruća zemljina površina zagrijava atmosferu čija je temperatura mnogo niža. Suprotno je situacija kada u vedroj noći zbog isijavanja energije nastane naglo hlađenje zemljine površine do temperature niže od temperature zraka iznad površine zemlje. Tim procesom nastaje inverzija. Inverzija također može nastati i u određenom visinskom rasponu (pojava ne dotiče zemljinu površinu) za vrijeme anticiklone (uvjeti visokog tlaka) kada dolazi do vertikalnog propadanja zračnih masa koje pri tome vrše adijabatsku kompresiju pri čemu se ta zračna masa zagrijava.



Slika 2.3. Karakteristične raspodjele temperature atmosfere u funkciji visine

4.2.1. Utjecaj stanja atmosfere na disperziju efluenata iz industrijskih dimnjaka

Kao što smo već napomenuli temperaturni profil je vrlo značajan za disperziju efluenata u atmosferu. Radi lakšeg objašnjenja utjecaja stanja atmosfere zamislimo mali volumen zraka koji sadrži neki efluenat (za početak iste temperature kao i okolni zrak u slučaju adijabate) ispušten u atmosferu na nekoj visini h (primjerice visina industrijskog dimnjaka). Zračna struja imat će tendenciju da taj volumen povuče prema gore ili prema dole.

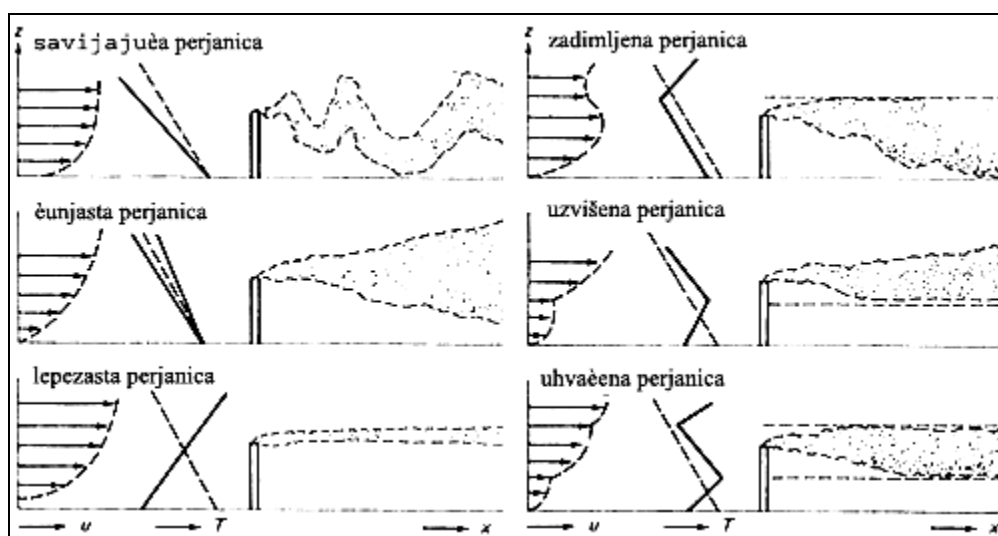
Superadijabatsko stanje atmosfere – Pri kretanju prema gore temperatura u ispuštenom volumenu zraka postaje veća od okolnog zraka i zbog toga njegova gustoća postaje rjeđom te ima tendenciju nastavka kretanja prema gore. Pri kretanju prema dole temperatura mu postaje manja od okolnog zraka i prema tome gustoća veća te nastavlja kretanje prema dole. Takvu pojavu kretanja zraka kod koje ne postoji tendencija zaustavljanja na nekoj razini karakteriziramo **nestabilnom**. Superadijabatsko stanje time pogoduje atmosferskoj disperziji efluenata.

Inverzno stanje atmosfere – Pri kretanju prema gore temperatura u ispuštenom volumenu postaje manja i time gustoća veća od okolišnjeg zraka te time ima tendenciju kretanja prema dole. Obrnuto, kod kretanja prema dole volumen dobiva tendenciju kretanja prema gore. Time u oba dva slučaja tendencija je ispuštenog volumena povratak na razinu ispuštanja te takav slučaj karakteriziramo **stabilnim**. Inverziju dakle karakterizira stabilnost koja ne pogoduje atmosferskoj disperziji.

Adijabatsko stanje atmosfere – Kod adijabate nema razlike u temperaturama okolišnjeg zraka i ispuštenog volumena te stoga nema niti tendencije kretanja u bilo kojem smjeru. Ovakvu pojavu karakterizira **neutralno** stanje atmosfere.

U stvarnosti je temperatura efluenata koji izlaze iz dimnjaka veća od okolišnjeg zraka i stoga se ispušteni volumen diže na visinu veću od visine dimnjaka sve dok se temperature volumena i zraka oko njega ne izjednače. Tek u tom slučaju na smjer kretanja počinje utjecati temperaturni profil.

Pri promatranju dima koji izlazi iz dimnjaka u uvjetima horizontalnog strujanja zraka primjećuje se stabilni trag kod inverzije i adijabatskog profila temperature te nestabilni trag (krivuljanje, vrtloženje te brzo približavanje zemlji) kod superadijabatskog profila temperature.



Slika 2.4. Utjecaj temperaturnih profila na putanju dima

Na Slici 2.4. prikazane su vrste takozvanih «perjanica» dima koje nastaju pod djelovanjem temperaturnih profila atmosfere⁴.

Čunjasta perjanica (eng. *Coning Plume*) – Osnovni oblik putanje dima pod neutralnim i malo nestabilnim uvjetima. Dim se širi te oblikuje stožac (čunj) sa vrhom u vrhu dimnjaka. Pod tim uvjetima koncentracije u bilo kojoj točki lagano variraju.

Savijajuća perjanica (eng. *Looping Plume*) – Ovakva pojava nastaje pod snažnim konvektivnim uvjetima kada je efluenat uhvaćen u krivuljanje gore-dole uslijed vertikalnog kretanja zraka izazvanog uspinjanjem toplih čestica u zraku i spuštanjem hladnih čestica u zraku. Takva perjanica ima izgled prodrmanog konopa zavezanog za vrh dimnjaka. Ovakav slučaj se smatra najboljim slučajem difuzije.

Lepezasta perjanica (eng. *Fanning Plume*) – Pri stabilnim uvjetima atmosfere, tj. pri inverziji perjanica poprima izgled lepeze. Gledana sa strane ima vrlo tanak izgled s jedva primjetnim čunjastim širenjem, dok gledana s vrha ima oblik lepeze koja se širi iz vrha dimnjaka. Ovakav dim se širi jako sporo te uslijed velike visine dimnjaka ne mora dotaknuti zemlju čak nekoliko kilometara.

⁴ Vidi 3.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 17
		Listova : 81

Ova tri tipa perjanice dima šire iz dimnjaka pod djelovanjem kretanja zraka i atmosferske stratifikacije temperaturnim profilom koji j u cijelom području jednolik u svojoj stabilnosti. Postoje i specijalni slučajevi kod kojih je na ponašanje dima odgovoran nejednolik, višeslojan temperaturni profil.

Uzvišena perjanica (eng. *Lofting Plume*) – Uzvišenje perjanice dešava se pri ispuštanju dima u atmosferu čiji je donji dio u stabilnom sloju, inverziji, a iznad njega se nalazi nestabilni sloj. Postojanje inverzije pri kretanju zraka na gore izaziva promjenu kretanja prema dole, ali dizanje dima nestabilnim slojem puno je jače. Dim se širi u obliku gornje polovice stošca Čunjaste perjanice.

Zadimljena perjanica (eng. *Fumigating Plume*) - U ovom slučaju inverzni sloj je iznad središnjice dima te nestabilni sloj ispod njega. Raspršenje dima događa se uspravno, ali dispergirajući prema dole te uzrokujući povećane prizemne koncentracije efluenata. Zadimljena perjanica nastaje svakodnevno kada noćna inverzija uz površinu započinje nestajati s jutarnjim grijanjem sunca. Grijanje sunca relativno brzo uništava inverziju pretvarajući stabilni donji sloj atmosfere u vrlo nestabilan u vremenu manjem od jednog sata. Ali ako je grijanje suncem onemogućeno, primjerice oblačnim vremenom, prijelaz iz stabilnog u nestabilno može trajati satima i izazvati visoke koncentracije onečišćivača na površini zemlje.

Zarobljena (uhvaćena) perjanica (eng. *Trapped Plume*) – Sličan slučaj zadimljenoj perjanici kod kojeg je nestabilni sloj malo slabiji te difuzija prema dole sporija. Time su koncentracije uz površinu, za razliku od onih kod zadimljene perjanice, puno manje. Ovakav slučaj može trajati puno duže zbog slabijeg isijavanja površine. To se dešava u urbanim područjima gdje je lagano zagrijavanje atmosferskog sloja uz površinu uzrokovano gradskim emisijama topline. Iznad takvog slabo nestabilnog sloja formiran je inverzni sloj.

4.2.2. Ostali utjecajni faktori na dispeziiju efluenata

Topografija terena i promjene na površini zemlje također mogu utjecati na promjenu ponašanja dima. Dim koji se započinje širiti iznad vode ili kopna uz obalu može drugačije reagirati, nego onaj ispušten u unutrašnjosti pri jednakim općim meteorološkim uvjetima. Gradska, urbana područja također različito utječu na ponašanje dima, nego ruralna područja podižući hrapavost terena i svoj toplinski karakter.

Uz ovakve uvjete ne može se zaboraviti spomenuti i specijalne slučajeve topografija terena kao što su uvale, kanjoni i drugi specifični oblici u prirodi koji mogu na svoj specifičan način utjecati na ponašanje dima.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 18
		Listova : 81

4.3. GAUSSOV MODEL DISPERZIJE EFLUENATA IZ TOČKASTOG IZVORA

Putanja izvjesne količine 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 efluenat 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 mješanja zraka.

Kako bi opisali takvo gibanje koristimo opću jednadžbu disperzije (13)

$$\frac{Dc_i}{Dt} = C_i + S_i / V + K \cdot \nabla^2 c_i.$$

Pretpostavimo da se u određenom volumenu zraka ne odvijaju kemijske reakcije kojim bi nastala dodatna količina efluenata C_i te nepostojanje dodatnih izvora efluenata S_i . Time dobivamo

$$\frac{Dc_i}{Dt} = K \cdot \nabla^2 c_i \quad (22)$$

ili prošireno

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial c_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial c_i}{\partial z} = K_x \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \quad (23)$$

Pretpostavimo, 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 disperzija malena u usporedbi s brzinom kretanja zraka u tom smjeru može ju se zanemariti te dobivamo

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} = K_y \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \quad (24)$$

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

$$v_x \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} = K_y \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \quad (25)$$

Rješenje ove diferencijalne jednačbe 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 jednačbe te njezinim pretvaranjem u običnu diferencijalnu jednačbu i glasi:

$$c_i = \frac{Q}{4\pi\sqrt{K_y K_z}} e^{-\frac{v_s}{4x} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right)} \quad (26)$$

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

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{2xK_y}{v_s}}, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{2xK_z}{v_s}}.$$

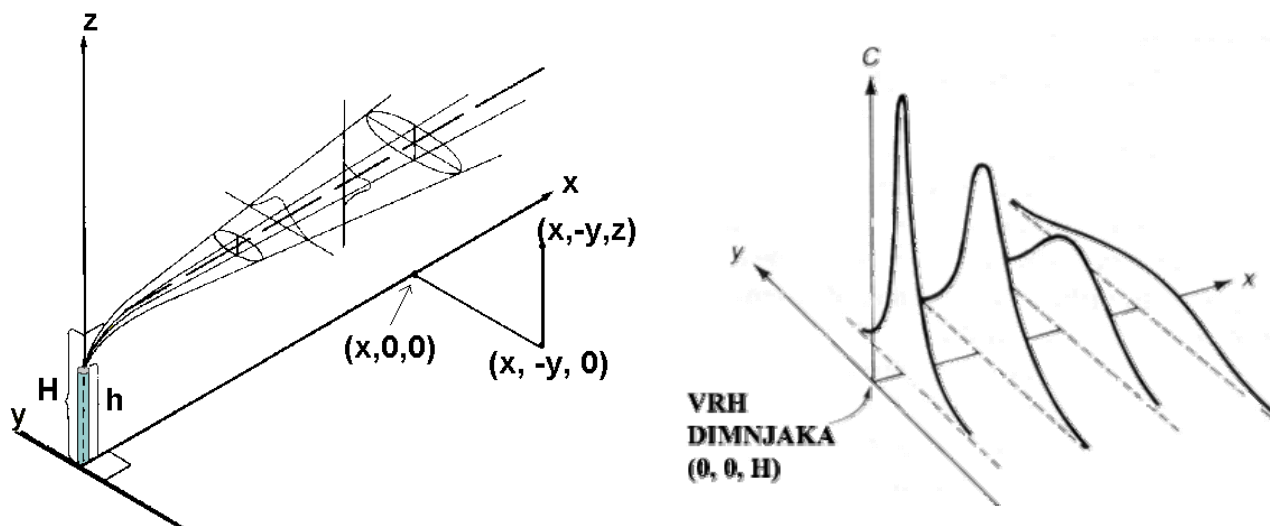
Uvrštenjem nazad u (26) dobivamo raspodijelu koncentracije u smjerovima y i z u funkciji srednje brzine v_s i standardnih devijacija koje za ovakav primjer nazivamo **koeficijent horizontalne disperzije** σ_y i **koeficijent vertikalne disperzije** σ_z :

$$c_i = \frac{Q}{2\pi v_s \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right)} \quad (27)$$

Ova jednačba 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 jednačbe se dobiva korištenjem metode simetričnih (zrcalnih) slika te glasi

$$c_i = \frac{Q}{2\pi v_s \sigma_y \sigma_z} \left\{ e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right)} + e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right)} \right\} \quad (28)$$

Izgled zvonolikog oblika raspodjele koncentracija u poprečnom presjeku na nekoj nizstrujnoj udaljenosti od izvora (dimnjaka) je prikazana na slici 2.5.



Slika 2.5. Prikaz Gaussove razdiobe koncentracija u yz plohama s obzirom na udaljenost od dimnjaka

4.3.1. Parametri disperzije

Uobičajena je praksa da se koeficijenti disperzije za smjerove y i z određuju eksperimentalno za niz tipiziranih atmosferskih uvjeta. Tako izračunate koeficijente koristimo za izračunavanje koncentracija efluenta pomoću dobivenih funkcija raspodjele. Što je veća nestabilnost atmosfere, to će brže rasti koeficijenti disperzije 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 tzv. **klase stabilnosti**. Koeficijente atmosferske disperzije prema Pasquill-Guiford-ovim klasama stabilnosti postavio je Turner (1995) za korištenje u Industrial Source Complex (ISC) modelu disperzije razvijenom kod USEPA-e (1995) prema sljedećim formulama

$$\sigma_y = 465.11628 \cdot x \cdot \tan(TH)$$

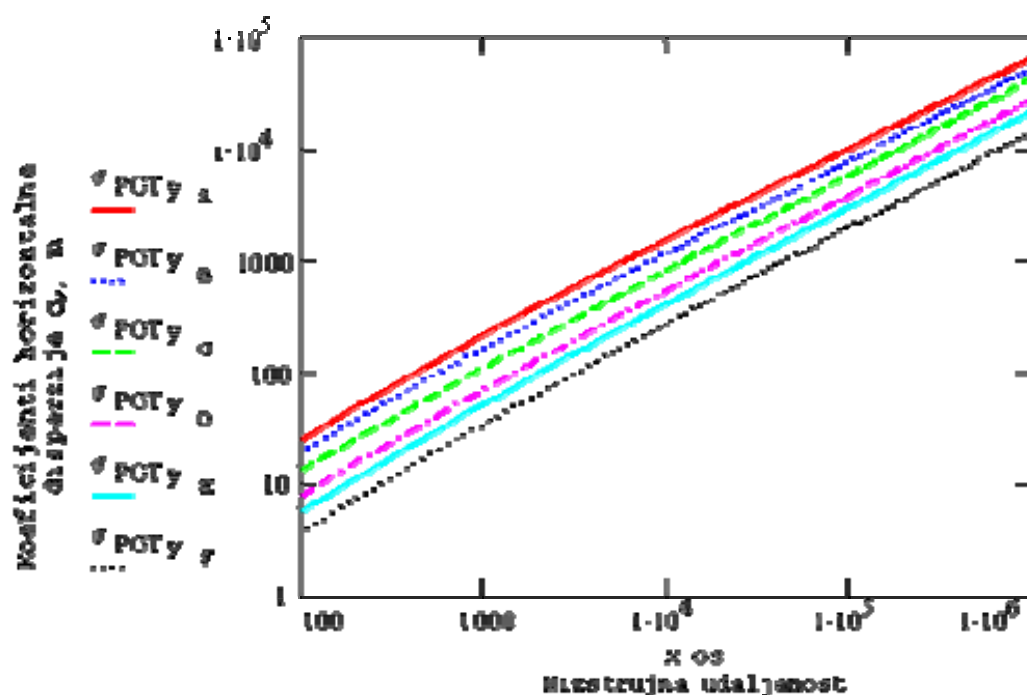
gdje je

$$TH = 0.01745[c - d \cdot \ln(x)]$$

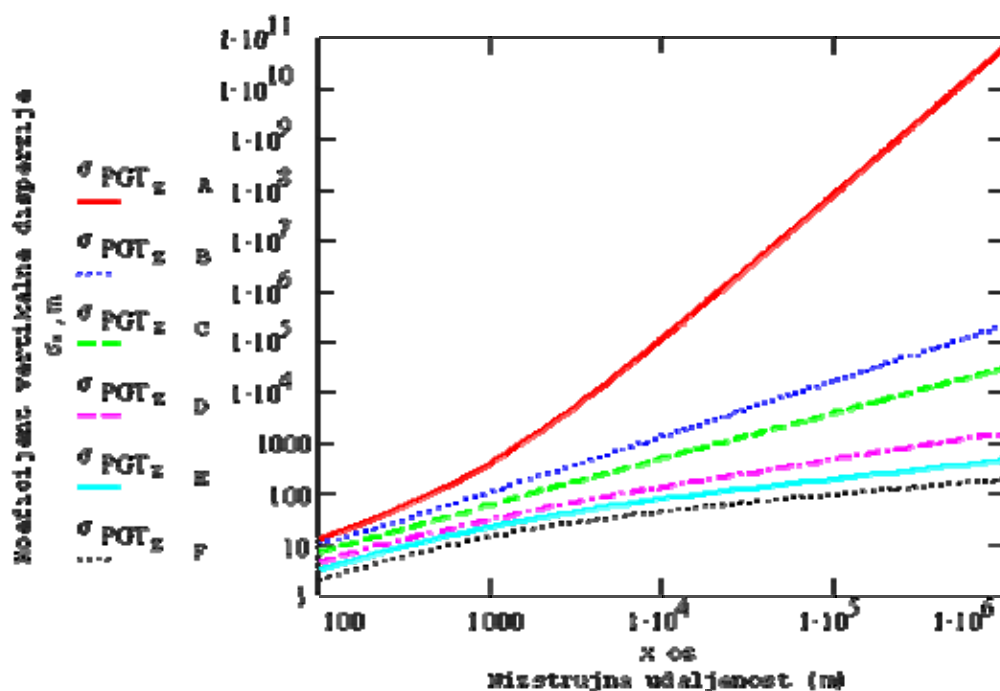
i

$$\sigma_z = a \cdot x^b$$

Koeficijenti a, b, c i d mogu se pronaći u tablicama ISC modela disperzije na stranicama EPA-inog ogranka za propisane standarde (www.epa.gov/scraam001) (*Regulatory models*). Na slici 2.6. i slici 2.7. prikazani su vertikalni i horizontalni (poprečni na presjek dima) koeficijenti disperzije u zavisnosti o udaljenosti od dimnjaka.



Slika 2.6. Koeficijenti horizontalne disperzije u ovisnosti o klasama stabilnosti i udaljenosti od izvora



Slika 2.7. Koeficijenti vertikalne disperzije u ovisnosti o klasama stabilnosti i udaljenosti od izvora

4.3.2. Nedostaci Gaussovog modela disperzije

Danas je u svijetu Gaussov model disperzije 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 disperzije, 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 disperzije proračunavaju se prizemne koncentracije pod perjanicom.

Pretpostavke i ograničenja. U izvodu Gaussove jednadžbe disperzije 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 koeficijena disperzije (vertikalna i horizontalna standardna devijacija distribucije emisije) korištenih u Gaussovom modelu disperzije;
- pretpostavka osrednjenog vremenskog perioda predstavljenog proračunatim prizemnim koncentracijama onečišćivača pomoću koeficijena disperzije korištenih u Gaussovom modelu disperzije; 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 disperzije), određivanje profila vjeta 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 disperzije 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.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 23
		Listova : 81

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 dima. 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 disperzija postoji (nema nizstrujne disperzije);
- 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 disperzijskih 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 raspodjelu. Takav se idealan slučaj zaista rijetko dogodi.

4.4. OSNOVNE BRIGGSOVE JEDNADŽBE TRAJEKTORIJE DIMA

Do sada smo razmatrali model disperzije efluenata kod kojeg je dim već dostignuo maksimalnu visinu dizanja, tj. kada se stvorio temperaturni ekvilibrij između toplijeg mlaza iz dimnjaka i atmosferskog zraka nošenog poprečnim vjetrom. Trajektorija dima do konačne visine dizanja dima modelima disperzije nije obuhvaćena, već su je dugi niz godina zasebno od disperzije razmatrali mnogi znanstvenici. U početku se oslanjalo na čiste eksperimentalne podatke koji tada još uvijek nisu bili precizni. Ali u mnogim literaturi moguće je pronaći radove na tu temu s predloženim jednadžbama ovisnosti visine središnjice dima o udaljenosti od dimnjaka. Uglavnom su zaključci bili bazirani na tome kako je ovisnost visine dizanja direktno ovisna o omjerima brzine izlaznog mlaza i brzine vjetra ili ovisnosti kinetičkih energija mlaza i kinetičke energije okolišnjeg zraka. Jednadžbe dobivene fitiranjem iz eksperimentalnih podataka bile su previše neprecizne i vrijedile unutar kratke domene putanje dima.

Uočeno je da bi trebalo postaviti osnovne fizikalne jednadžbe kao što su jednadžba kontinuiteta, zakon o očuvanju potencijalne energije te zakon o očuvanju količine gibanja kako bi se opisala trajektorija dima. Opći pristup težio je postaviti “**integralni**” model gdje bi raspodjela temperature i brzine unutar perjanice dima bila pretpostavljena jednolikom kroz poprečni presjek dima. Sukladno tome varijable koje se promatraju unutar poprečnog presjeka dima imaju prekid na granici perjanice dima i okolišnjeg zraka. To mjesto prekida naziva se “**rubni sloj perjanice**” (eng. *plume boundary layer*). Zbog činjenice da se integralnim modelom ne uzima u obzir utjecaj turbulencije postoji jedan zakon manje u sustavu nego broj varijabli dima te je potrebno uvesti jednu pretpostavku više kako bi se zatvorio sustav jednadžbi. Danas, najčešće korištenu pretpostavku, uveo je Taylor 1948. god. tzv. “**relaciju ulaska**” (eng. *entrainment relation*). U njoj se pretpostavlja da je brzina ulaska v_e (brzina kojom okolišnji zrak prodire, ulazi u perjanicu dima kroz rubni sloj perjanice) proporcionalna brzini dima unutar perjanice u_{sc} .

Ovakav pristup postao je relativno uspješan u predviđanju trajektorije dima pod stabilnim ili neutralnim atmosferskim stanjima, gdje turbulencija generirana uzgonom i momentom unutar perjanice dominira nad atmosferskom turbulencijom. Hoult i Weil su 1972. god. testiranjima u zračnim tunelima utvrdili parametre ulaska za vertikalnu perjanicu (kod brzina vjetra manjih od 1 m/s) $\alpha = 0.11$ te za savinute perjanice (pod većim brzinama vjetra) $\beta = 0.6$. Na temelju daljnjih pojednostavljenja (jednolika brzina vjetra i jednolika termalna stratifikacija) te dimenzijskom analizom Briggs je 1975. god. razvio skup empiričkih formula za uzgonski podignute perjanice. Te formule predstavljaju bazu za predviđanje podizanja dima kod mnogih propisanih modela odobrenih od EPA-e kao što su ISC3 (USEPA, 1995.) te CALPUFF (Scire, 1998.).

Predviđanje podizanja dima pod nestabilnim (konvektivnim) stanjima atmosfere mnogo je kompliciranije jer se ne može ignorirati turbulenciju okoliša (atmofere). Mali volumen zraka podignut pod nestabilnom atmosferom ima tendenciju puno većeg pomaka od izvorne lokacije. Time se Taylorova relacija ulaska mora dodatno mijenjati. Kod dominacije malih turbulencija Slawson i Csanady 1967. god. Predložili su da atmosferska turbulencija dominira procesima ulaska kroz rubni sloj, tj. kako bi brzina ulaska trebala biti ovisna o

turbulentnoj energiji disipacije prije nego proporcionalna lokalnoj brzini perjanice. Nasuprot tome, velike turbulencije utječu na vijuganje perjanice gore-dole kao kod savijajuće perjanice (eng. *looping plume*). Model za takvu vrstu podizanja dima razvio je Weil 1986. god. i predložio da se vertikalnu komponentu brzine okolišnjeg zraka tretira kao slučajnu varijablu u propisanoj funkciji gustoće vjerojatnosti.

Iako precizne samo kod stabilne i neutralne stratifikacije atmosfere Briggsove jednadžbe iz 1984. god. oslonac su za usporedbu svim današnjim istraživanjima na tom području. To je razlog zašto će se u nastavku objasniti put nastanka tih jednadžbi.

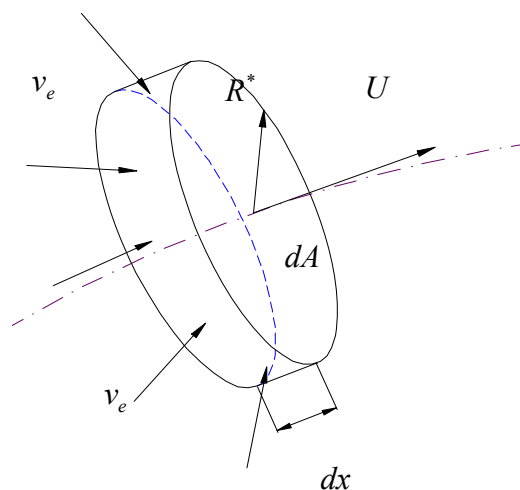
Kretanje uzgonskog dima može se opisati bilancom mase (relacija ulaska), bilancom količine gibanja i bilancom energije.

4.4.1. Zakon o očuvanju mase

Ukupna količina mase koja prođe kroz jediničnu površinu kružnog presjeka dA radijusa R^* nošena brzinom vjetra U jednaka je onoj količini mase koja prodire kroz rubni sloj perjanice

$$m_{\text{vjetra}} = m_{\text{ulaska}}$$

$$\rho \cdot U \cdot dA = \rho \cdot v_e \cdot (2 \cdot R^* \cdot \pi \cdot dx)$$



Slika 2.8. Jedinični volumen presjeka rubnog sloja perjanice

Uvođenjem Taylorove relacije ulaska s koeficijentom proporcionalnosti β koji se naziva “**koeficijent ulaska**” ($v_e = \beta \cdot w^*$) dobivamo

$$U \cdot d(R^{*2} \cdot \pi) = \beta \cdot w^* \cdot 2R^* \cdot \pi \cdot dx^* \quad (29)$$

gdje je

R^* - radijus poprečnog presjeka perjanice

w^* - vertikalna komponenta brzine dima

U - srednja brzina vjetra

x^* - nizstrujna koordinata

te dobivamo

$$U \frac{dR^{*2}}{dx^*} = 2\beta \cdot w^* \cdot R^* \quad (30)$$

4.4.2 Zakon o očuvanju količine gibanja

Navier-Stocksova jednadžba opisuje promjenu količine gibanja sustava

$$\rho \frac{Du}{Dt} \left(= \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \text{grad}) \cdot u \right) = g\rho - \text{grad } p + \nu \cdot \nabla^2 u \quad (31)$$

ili razvijeno u kartezijev koordinativni sustav

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= g_x \rho - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= g_y \rho - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= g_z \rho - \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

te uvodimo pretpostavke:

- brzina je duž cijele perjanice konstantna ($\frac{\partial u}{\partial t} = 0$);
- na njezinu promjenu utječe samo brzina mlaza u smjeru nizstrujno od izvora;

$$\begin{aligned} u = U &\Rightarrow \frac{\partial U}{\partial x^*} = \frac{\partial U}{\partial y^*} = \frac{\partial U}{\partial z^*} = 0 \\ (u \cdot \nabla)u &\Rightarrow v = 0 \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial x^*} = \frac{\partial v}{\partial y^*} = \frac{\partial v}{\partial z^*} = 0 \\ w = w^* &\Rightarrow \frac{\partial w^*}{\partial y^*} = 0; w^* \cdot \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0(?) \end{aligned}$$

- fluid nije viskozan što znači da nema trenja u toku fluida ($\nu \cdot \nabla^2 u = 0$);
- gravitacija djeluje samo u smjeru obrnutom od z^* $g_x = g_y = 0$; $g_z = -g$;
- atmosferski tlak može se podijeliti na hidrostatski tlak i na fluktuacije izazvane terenom ili drugim pojavama $p(x, y, z, t) = p_o(x, y, z, t) + \tilde{p}(x, y, z, t)$ te se iz toga zaključuje kako na hidrostatski tlak utječe samo promjena visine kao u (15) te da je gradijent fluktuacija tlaka zanemariv

$$\frac{\partial p_o}{\partial t} = \frac{\partial p_o}{\partial x^*} = \frac{\partial p_o}{\partial y^*} = 0; \frac{\partial p_o}{\partial z^*} = -\rho_o g; \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x^*} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial y^*} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial z^*} = 0;$$

- sukladno se i gustoća i temperatura mogu rastaviti na okolišnju i fluktuirajuću $\rho(x, y, z, t) = \rho_o(x, y, z, t) + \tilde{\rho}(x, y, z, t)$; $T(x, y, z, t) = T_o(x, y, z, t) + \tilde{T}(x, y, z, t)$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 27
		Listova : 81

Sad se mogu u pojednostavljenom obliku ispisati jednačbe zakona o očuvanju količine gibanja, gdje prva i druga jednačba otpadaju te ostaje samo treća vezana za vertikalnu brzinu

$$\begin{aligned}
 (\rho_o + \tilde{\rho}) \cdot U \frac{\partial w^*}{\partial x^*} &= -g\rho_o - g\tilde{\rho} - \frac{\partial p_o}{\partial z^*} \\
 \rho_o \cdot U \frac{\partial w^*}{\partial x^*} &= -g\tilde{\rho}
 \end{aligned} \tag{33}$$

Uvodeći apsolutnu vrijednost fluktuacije gustoće te zapis $\tilde{\rho} = |\Delta\rho|$ i činjenicu da se površina poprečnog presjeka izražena u obliku R^{*2} mijenja duž putanju perjanice konačna jednačba glasi

$$U \cdot \frac{\partial(R^{*2} \cdot w^*)}{\partial x^*} = R^{*2} g \frac{|\Delta\rho|}{\rho_o} \tag{34}$$

4.4.3. Zakon o očuvanju energije

Zakon o očuvanju energije definira brzinu vremenske promjene kao zbroj unutrašnje i kinetičke energije fluida unutar kontrolnog volumena te je jednaka snazi vanjskih masenih i površinskih sila i brzini dovođenja topline fluidu (toplinskom toku).

$$\rho \cdot de = \rho \cdot d\left(u + \frac{v^2}{2}\right) = \rho \cdot f \cdot v + v \cdot \text{div } \sigma + \text{div } q \tag{35}$$

Ukupna promjena energije jednaka je zbroju unutrašnje enrgije sustava i njene kinetičke energije. Unutrašnja energija sustava sastoji se iz dozačene joj topline i predane u obliku rada tlačnih sila $du = dh - \frac{dp}{\rho}$. Koristeći se zakonom o očuvanju kinetičke energije koji direktno proizlazi iz zakona o očuvanju količine gibanja te glasi

$$\rho \cdot d\left(\frac{v^2}{2}\right) = \rho \cdot f \cdot v + v \cdot \text{div } \sigma \tag{36}$$

te izrazom za unutarnju energiju susatava dobivamo izraz

$$\rho \cdot d\left(h - \frac{p}{\rho}\right) = \text{div } q \tag{37}$$

Ako za entalpiju sustava uvedemo izraz kojim je ukupna sadržana toplota u sustavu jednaka umnošku specifične topline pri konstantnom tlaku i promjene temperature sustava

$$dh = c_p \cdot dT \quad (38)$$

te ako diferenciramo cijelu jednadžbu (37) po vremenu dobivamo izraz

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{DT}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \frac{D}{Dt} \text{div } q \quad (39)$$

Razvojem divergencije ukupne dovedene topline u sustav na toplinski fluks i prostornu promjenu topline konačna jednadžba glasi

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{DT}{Dt} \left(= \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) - \frac{Dp}{Dt} = q + \nabla \cdot k \nabla T \quad (40)$$

Ako se uvedu pretpostavke:

- atmosferski tlak može se podijeliti na hidrostatski tlak i na fluktuacije izazvane terenom ili drugim pojavama $p(x^*, y^*, z^*, t) = p_o(x^*, y^*, z^*, t) + \tilde{p}(x^*, y^*, z^*, t)$ te se iz toga zaključuje kako na hidrostatski tlak utječe samo promjena visine kao u (15) te da je gradijent fluentucija tlaka zanemariv

$$\frac{\partial p_o}{\partial t} = \frac{\partial p_o}{\partial x^*} = \frac{\partial p_o}{\partial y^*} = 0; \frac{\partial p_o}{\partial z^*} = -\rho_o g; \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x^*} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial y^*} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial z^*} = 0;$$
- sukladno se i gustoća i temperatura mogu rastaviti na okolišnju i fluktuirajuću

$$\rho(x^*, y^*, z^*, t) = \rho_o(x^*, y^*, z^*, t) + \tilde{\rho}(x^*, y^*, z^*, t)$$

$$T(x^*, y^*, z^*, t) = T_o(x^*, y^*, z^*, t) + \tilde{T}(x^*, y^*, z^*, t);$$
- ne postoji dodatnih izvora topline (toplinski fluks) u kontrolni volumen ($q = 0$);
- provođenje topline je konstantno ($\nabla \cdot k \nabla T = k \nabla^2 T$), a pri tome je $\nabla^2 T = 0$ zbog korištenja integralnog modela koji definira temperaturu konstantnom unutar rubnog sloja perjanice;
- ne postoji vremenska promjena temperature $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$;

dobivamo sljedeći pojednostavljeni oblik bilance energije

$$(\rho_o + \tilde{\rho})c_p \left(U \frac{\partial T_o}{\partial x^*} + w^* \frac{\partial T_o}{\partial z^*} + U \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x^*} + w^* \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z^*} \right) - w^* \frac{dp_o}{dz} = 0$$

U prvom članu razlike s desne strane jednakosti pojavljuju se gradijenti atmosferske temperature i temperaturnih fluktuacija. Zbog činjenice da ne postoji promjena atmosferske

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 29
		Listova : 81

temperature niz putanju perjanice $\frac{\partial T_o}{\partial x^*} = 0$ i činjenice da su fluktuacije u vertikalnom polju zanemarive zbog linearnog vertikalnog temperaturnog profila stanja atmosfere $\frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} = 0$ preostaje nam

$$\rho_o c_p \left(U \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x^*} + w^* \frac{\partial T_o}{\partial z^*} \right) - w^* \frac{dp_o}{dz^*} = 0 \quad (41)$$

Daljnijim modifikacijama

$$\begin{aligned} \rho_o c_p U \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x^*} - w^* \cdot \left(\frac{dp_o}{dz^*} - \rho_o c_p \frac{\partial T_o}{\partial z^*} \right) &= 0 \\ \rho_o c_p U \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x^*} &= -w^* \cdot \left(\rho_o g + \rho_o c_p \frac{\partial T_o}{\partial z^*} \right) / : (\rho_o c_p) \\ U \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x^*} &= - \left(\frac{g}{c_p} + \frac{\partial T_o}{\partial z^*} \right) w^* / \cdot \left(\frac{g}{T_o} R^{*2} \right) \end{aligned}$$

dobivamo

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(U R^{*2} g \frac{\tilde{T}}{T_o} \right) = N^2 \cdot R^{*2} \cdot w^* \quad (42)$$

gdje je $N^2 = -\frac{g}{T_o} \left(\frac{g}{c_p} + \frac{\partial T_o}{\partial z} \right)$ Brunt–Väisälä-ina uzgonska frekvencija koja definira stupanj atmosferske stabilnosti te je ovisna o pozadiskoj (okolišnjoj) temperaturi $T_o(z)$.

Do sada smo izveli bilancu mase (30), momenta (34) i energije (42). Kako bi se pojednostavilo njihovo rješenje, tj. smanjio broj nepoznanica u sustavi, uvodi se tzv. **Boussinesqova aproksimacija**. To je pojednostavljenje koje se odnosi na postojanje malih varijacija u gustoćama okolišnjeg zraka i emisije efluenata. Tada se može pisati

$$\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = \frac{T - T_o}{T_o} \quad (43)$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 30
		Listova : 81

Pomoću ove aproksimacije izraz bilance energije prelazi u

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(UR^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \right) = N^2 \cdot R^{*2} \cdot w^* \quad (44)$$

Ako kao u početku pretpostavimo čisto stabilno stanje atmosfere tada Brunt–Väisälä-ina uzgonska frekvencija N^2 postaje jednaka nuli i time dobivamo

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(UR^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \right) = 0 \quad (45)$$

4.4.4. Dvotrećinski zakoni

Do izvoda jednadžbi putanje perjanice dolazimo koristeći bilance mase, momenta i energije te uzimajući u obzir određene početne uvjete⁵:

- omjer početne brzine mlaza fluida iz dimnjaka i brzine vjetra predstavlja početni nagib središnjice dima

$$w^* = U \frac{dz^*}{dx^*}; \quad (46)$$

- radijus jediničnog volumena koji promatramo za nizstrujnu udaljenost $x^* = 0$ iznosi $R^*(x^* = 0) = R_o^*$;
- početna visina dima jednaka je nuli ($z^*(x^* = 0) = 0$).

Iz bilance mase (30) te korištenjem početnog uvjeta (46) dobivamo

$$\begin{aligned} U \frac{\partial R^{*2}}{\partial x^*} &= 2\beta \cdot w^* \cdot R^* \\ U \frac{\partial R^{*2}}{\partial x^*} &= 2\beta \cdot U \frac{dz^*}{dx^*} R^* \quad / : (R^* \cdot U) \\ dR^* &= 2\beta dz^* \quad / \int \\ R^* - R_o^* &= 2\beta z^* \\ R^* &= R_o^* + 2\beta \cdot z^* \end{aligned} \quad (47)$$

⁵ Vidi: Zhang, Xiaoming & Ghoinem, Ahmed F., A computer model for the rise and dispersion of winf-blown, buoyancy-driven plumes – I. Neutrally stratified atmosphere, Pegamon Press Ltd., *Atmospheric Environment*, Vol. 27A, No. 15, str. 2295-2311, 1993. god.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 31
		Listova : 81

Integracijom konačnog izraza za bilancu energije dobivamo

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(UR^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \right) = 0 \quad / \int$$

$$UR^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} = konst. = F_b \quad (48)$$

gdje je F_b **uzgonski fluks**.

Iz bilance momenta (34) i uvjeta (46) izvodimo

$$U \cdot \frac{\partial (R^{*2} \cdot w^*)}{\partial x^*} = R^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \quad / \int$$

$$R^{*2} \cdot w = R^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \cdot x^* \cdot \frac{1}{U}$$

$$R^{*2} \frac{dz^*}{dx^*} = R^{*2} g \frac{|\Delta \rho|}{\rho_o} \cdot x^* \cdot \frac{1}{U^2}$$

te uvođenjem izraza za uzgonski fluks dobivamo

$$R^{*2} \frac{dz^*}{dx^*} = \frac{F_b}{U^3} x^* \quad (49)$$

Zbog činjenice da se promjer promatranog presjeka R^* mijenja s visinom z^* uvodimo iz (47)

$$(R_o^* + \beta z^*)^2 dz^* = \frac{F_b}{U^3} x^* dx^* \quad / \int$$

$$\frac{1}{3} (R_o^* + \beta z^*)^3 \cdot \frac{1}{\beta} \Big|_0^{z^*} = \frac{1}{2} \frac{F_b}{U^3} x^{*2}$$

$$\frac{1}{3} (R_o^* + \beta z^*)^3 \cdot \frac{1}{\beta} - \frac{1}{3} (R_o^*)^3 \cdot \frac{1}{\beta} = \frac{1}{2} \frac{F_b}{U^3} x^{*2}$$

$$(R_o^* + \beta z^*)^3 - (R_o^*)^3 = \frac{3\beta}{2} \frac{F_b}{U^3} x^{*2}$$

te konačno rješavajući po z^* dobivamo

$$z^* = \frac{1}{\beta} \left\{ \left(\frac{3\beta F_b}{2U^3} x^{*2} + R_o^{*3} \right)^{1/3} - R_o^{*3} \right\} \quad (50)$$

tzv. “**prošireni dvotrećinski zakon**” te uzevši u obzir pretpostavku ($\beta z^* \gg R_o^*$) dobivamo

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 32
		Listova : 81

$$z^* = \frac{3}{2\beta^{2/3}} \left(\frac{F_b^{1/3} \cdot x^{*2/3}}{U} \right) \quad (51)$$

tzv. “**klasični dvotečinski zakon**”.

5. KOMPJUTERSKO SIMULIRANJE DIFUZIJE I KONVEKCIJE ONEČIŠĆENJA ZRAKA

5.1. NUMERIČKO MODELIRANJE

Analitičke metode kao i inače u drugim područjima znanosti koriste se samo u najjednostavnijim slučajevima fizikalnih ili drugih sistema kako bi opisali određeno stanje toga sustava. Čak i tada se moraju primijeniti određena pojednostavljenja (nazovimo ih pretpostavkama i ograničenjima) kako bi analitička metoda ipak donijela jedno zadovoljavajuće rješenje. Već godinama znanstvenici pokušavaju riješiti jednadžbe koje opisuju fizikalne procese u prirodi i tehnici bez nekog naročitog učinka, ako se radi o općim oblicima jednadžbi kod kojih ne postoje pojednostavljenja. Takve su upravo jednadžbe trodimenzionalnih modela disperzije odnosno sustavi parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Tada nam u pomoć pristižu **numeričke metode**.

Osnovna razlika numeričkih od analitičkih metoda je da analitikom pokušavamo doći do jedinstvenog rješenja koje će važiti za cijelu domenu, koja se promatra, što znači da se u bilo kojoj točki domene sustava može dobivenim analitičkim rješenjem utvrditi stanje sustava u toj točki. Numeričke metode nasuprot analitičkim razdvajaju **cijelu domenu sustava** (koja se još u numerici naziva **geometrija sustava**), koju promatramo, kao konačni broj malih kontrolnih volumena te su u njima i na njihovim rubovima postavljaju zakoni koji u njima vrijede. Temeljna značajka jednog malog kontrolnog volumena je u tome što rješenje u jedinoj njegovoj točki direktno je ovisno o vrijednostima rješenja u točkama kontrolnih volumena koji ga okružuju. Takav pristup, kada od cijele domene dobivamo konačan veliki broj malih kontrolnih volumena, nazivamo **diskretizacija sustava**. Načini diskretizacije su različiti, od samih odabira oblika kontrolnih volumena te do različitih načina preoblikovanja diferencijalnih jednadžbi u njihove diskretizirane oblike.

Nadalje, potrebno je naglasiti kako diskretizacijom te primjenom diskretiziranih jednadžbi koje opisuju sustav dobivamo rješenja u **konačnom broj točaka sustava**. Povećanjem broja kontrolnih volumena, tj. smanjenjem njihove veličine, dobivamo veći broj točaka u kojima možemo dobiti rješenje, što nam govori o tome da se krećemo prema točnijoj slici fizikalnog sustava koji se opisuje. Iz toga se zaključuje da što je veći broj kontrolnih volumena, tim je opis sustava sve točniji. Ograničenje u primjeni velikog broja točaka (u numeričkim metodama točke sustava nazivamo **čvorovima**) je direktno vezano uz mogućnosti računala koja koristimo. Često je, osim dolaženja do samih rješenja, potrebno to obaviti u što kraćem vremenskom roku. Razlozi tome mogu biti raznoliki: od ograničenog vremena koje nam stoji na raspolaganju za izračunavanje do činjenice da vremenska efikasnost ostavlja nam dovoljno vremena za dotrade, konzultacije i poboljšanja.

Numeričke metode i diskretizacija sustava pruža nam mogućnost **adaptacije** kontrolnih volumena. Naime, kao što smo ranije iznijeli, vrijednost rješenja u nekom čvoru (točki) diskretizirane domene ovisi i mijenja se ovisno o vrijednosti rješenja u susjednim čvorovima. Ako su razlike u vrijednostima susjednih čvorova velike (**veliki gradijenti**) tada je potreba da, za opisivanje što točnijih vrijednosti varijabli sustava, povećamo broj

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 34
		Listova : 81

kontrolnih volumena nad tom domenom (što direktno znači da će ti kontrolni volumeni biti manji od prethodnih) kako bi smanjili velike gradijente na tom području (**poboljšavanje** – eng. **refinement**). Suprotno velikim gradijentima postoje na određenim dijelovima domene također i gradijenti koji su dovoljno mali te približno jednaki kroz niz od nekoliko čvorova u redu. Kod takvih čvorova s **malim gradijentima** postoji mogućnost da takvih nekoliko kontrolnih volumena spojimo u jedan volumen (**ugrubljivanje** – eng. **coarsening**).

Ovaj kratki uvod u numeriku dovoljno je informativan za opis načina modeliranja koji će se koristiti. Danas u svijetu postoji velik broj vrlo sofisticiranih aplikacija za numeričke analize vezane uz specifična područja tehničkih znanosti. Jedan od najsofisticiranijih u području računarke dinamike fluida, a koji će se koristiti, je softverski paket FLUENT.

5.2. FLUENT SOFTVERSKI PAKET

FLUENT je računarski program za modeliranje strujanja fluida i prijenosa topline u kompleksnoj geometriji. FLUENT omogućuje potpunu fleksibilnost mreže kojom rješava korisnički problem s nestrukturiranim mrežama koje mogu biti generirane u kompleksnoj geometriji s relativnom lakoćom. Tipovi mreža koje podržava uključuju: 2D trokutaste/kvadrilateralne, 3D tetragonalne/heksagonalne/piramidaste/prizmaste i mješane (hibridne) mreže. FLUENT također omogućuje ugrubljivanje i poboljšavanje mreže na temelju rezultata strujanja. Takva, rješenjem adaptivna, sposobnost mreža naročito je važna za točnije predviđanje strujnog polja u područjima velikih gradijenata kao što su slojevi slobodnog trenja i rubni slojevi. Usporedno rješenju dobivenom strukturiranom mrežom ova sposobnost značajno smanjuje potrebno vrijeme za generiranje dobre mreže.

FLUENT je napisan u C programskom jeziku i omogućuje potpunu fleksibilnost i snagu koju pruža ovaj programski jezik. Prema tome omogućeno je pravo dinamičko alociranje memorije, efektivno strukturiranje podataka i fleksibilna kontrola konvergencije sustava fizikalnih jednažbi. U dodatku FLUENT koristi klijent/server arhitekturu koja omogućuje rad FLUENT-a kao odvojenih istovremenih procesa na klijentovim sučeljima i snažnim serverima. Radi efikasnog korištenja sadržava interaktivno kontroliranje procesa te potpunu fleksibilnost računala ili operativnog sustava.

Sve funkcije potrebne za dobivanje rješenja i prikaz rezultata pristupne su kroz interaktivno, menuima vođeno, sučelje. Korisničko sučelje je napisano u Scheme jeziku (dijalekt LISP-a). Napredni korisnik može korištenjem Scheme jezika prilagoditi i poboljšati sučelje programirajući makro datoteke menu-a i funkcija.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 35
		Listova : 81

FLUENT rješavač posjeduje mogućnosti modeliranja:

- strujanje u 2D ili 3D geometrijama koristeći nestrukturiranu, rješenjem adaptivnu, mrežu sa svim tipovima elemenata prije spomenutim.
- strujanje stišljivog i nestišljivog fluida
- stacionarna tranzijentna analiza
- laminarna i turbulentna strujanja
- prijenos topline konvekcijom (uključujući i prirodnu i nametnutu konvekciju)
- njutonovsko i nenjutonovsko strujanje
- konduktivni-konvektivni prijenos topline
- prijenos topline radijacijom
- mješanje i reakcije kemijskih spojeva uključujući podmodele izgaranja i modeliranje reakcija površinskog taloženja
- modeliranje proizvoljnih volumetrijskih izvora masa, momenata, topline, turbulencije i kemijskih spojeva.
- modeliranje strujanja kroz porozan materijal
- dvofazno strujanje (uključujući kavitaciju)
- strujanje slobodne površine s kompleksnim oblicima ploha
- I drugo.

Kako bi riješio sve te modele FLUENT koristi numerički diskretizirane jednadžbe očuvanja mase, količine gibanja, energije, zatim transportne jednadžbe kemijskih spojeva i jednadžbe turbulentnih modela korištene za zatvaranje sustava jednadžbi i dr. Svaka od ovih jednadžbi dolazi u općem formatu koji se sastoji od svih utjecajnih faktora. Utjecajne faktore uključuje korisnik prema tome što zahtjeva fizikalni sistem koji modelira. Također svaka od ovih jednadžbi dolazi i u svom transformiranom stanju (za cilindrični koordinativni sustav te sferni sustav) .

Za naš slučaj uključene su sve jednadžbe te je odabran **k-e turbulentni model** koji se sastoji od dvije nove jednadžbe.

5.2.1 Jednadžba o očuvanju mase

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (52)$$

vrijedi kako za stišljive tako i za nestišljive fluide. S_m je masa dodana kontinuiranoj fazi od druge dispergirane faze (isparivanje kapljica vode).

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 36
		Listova : 81

5.2.2. Jednadžba o očuvanju količine gibanja

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (53)$$

gdje je p statički tlak, g_i gravitacijska sila tijela, F_i vanjska sila tijela (nastaje kao product interakcije sa dispergiranim fazom). F_i je također i izvor kao porozni medij ili korisnički definirani izvor. τ_{ij} je tenzor naprezanja dan sa

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (54)$$

u čemu je μ molekularna viskoznost, a drugi član razlike utjecaj diletacije volumena.

5.2.3. Jednadžba o očuvanju energije

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (55)$$

gdje je

k_{eff} – efektivni konduktivitet ($k_{eff} = k + k_t$);

k_t – turbulentni toplinski konduktivitet određen turbulentnim modelom koji se koristi;

$J_{j'}$ - difuzijski fluks kemijskog spoja j' ;

$(\tau_{ij})_{eff}$ - devijatorni tenzor naprezanja

Prva tri izraza s desne strane jednadžbe predstavljaju konduktivitet, difuziju kemijskih spojeva i viskozna disipacija (oslobađanje toplinske energije uslijed viskoznog trenja).

S_h – uključuje toplinu kemijskih reakcija i bilo kojeg drugog volumetrijskog izvora topline definiranog od strane korisnika

U jednadžbi (55)

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (56)$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 37
		Listova : 81

gdje je entalpija definirana za idealni plin kao $h = \sum_j m_j h_j$ te za nestišljivi fluid kao

$h = \sum_j m_j h_j + \frac{p}{\rho}$ gdje je m_j udjel mase j-tog kem. spoja te $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$ gdje je $T_{ref} = 298.15$ K referentna atmosferska temperatura.

5.2.4. Transportne jednadžbe za kemijske spojeve (opće jednadžbe difuzije i konvekcije)

Kada modeliramo difuziju i konvekciju efluenta potrebno je uključiti konzervativne jednadžbe za kemijske spojeve (efluente). Tada je potrebno definirati maseni udio kemijskog spoja, m_j , unutar jednadžbe konvekcije i difuzije za taj spoj. Takva diferencijalna jednadžba glasi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{i',i} + R_{i'} + S_{i'} \quad (57)$$

gdje je

$R_{i'}$ - količina mase koja nastane ili nestane prilikom kemijskih reakcija

$S_{i'}$ - količina mase nastale dodatkom iz dispergirane faze ili svakog korisnički definiranog izvora mase

Ako u model uključimo N kem. spojeva ili elemenata bit će uključeno N-1 jednadžbi u solver.

5.2.5. K-e turbulentni model

Za zatvaranje sustava odgovornih jednadžbi odabran je najjednostavniji turbulentni model. To je standardni k-e turbulentni model kojeg predstavljaju dvije transportne jednadžbe u kojima se potpuno odvojeno rješavaju dvije nove varijable: brzina turbulencije izražena kinetičkom energijom turbulencije k i turbulentna dužina izražena količinom disipacije turbulencije ε . Ovaj model je jedan od najpraktičnijih modela za proračune strujanja fluida. Njegova snaga, ekonomičnost te zadovoljavajuća točnost nad širokim područjem turbulentnih strujanja objašnjava njegovu popularnost u industrijskim strujanjima

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 38
		Listova : 81

i simulacijama prijenosa topline sve od kada su ga Jones i Launder predložili 1972. god.⁶ To je poluempirički model čije derivacije jednadžba modela ovise o fenomenološkim razmatranjima i empirizmu.

Derivacija transportnih jednadžbi za k i ε provedena je pretpostavkom da je cijelo područje domene modela potpuno turbulentno i efekti molekularne viskoznosti zanemarivi te je stoga ovaj model primjenjiv samo za potpuno turbulentna strujanja.

Kinetičku turbulentnu jednadžbu predstavlja jednadžba

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (58)$$

gdje je

G_k - produkcija kinetičke energije zbog gradijenata osrednjene brzine definirana kao

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i};$$

G_b - produkcija kinetičke energije turbulencije zbog uzgona definirana kao

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i};$$

β - koeficijent toplinske ekspanzije;

μ_t - turbulentna viskoznost (eng. “*eddy viscosity*”) $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ gdje je $C_\mu = 0.09$

Pr_t - turbulentni Prandtlov broj za energiju koji iznosi 0.85;

Y_M - doprinos diletacije fluktuacije u turbulentnom stišljivom fluidu na globalnu količinu disipacije (taj je doprinos vezan za stišljivi fluid pri visokim Machovim brojevima);

σ_k - turbulentni Prandtlov broj za kinetičku energiju turbulencije ($\sigma_k = 1$).

Turbulentna energija disipacije proračunava se prema

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (59)$$

gdje su

⁶ Launder, B. E. i Spalding, D. B., Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, England, 1972.

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ - konstante te iznose $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ te $C_{3\varepsilon}$ definiran kao stupanj utjecaja uzgona na disipaciju $C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$ gdje je v projekcija brzine strujanja na vektor gravitacijskog ubrzanja;
 σ_ε - turbulentni Prandtlov broj za količinu disipacije turbulencije ($\sigma_\varepsilon = 1.3$).

Također odabirom standardnog k-e modela u jednadžbu energije (55) definiran je turbulentni toplinski konduktivitet $k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 40
		Listova : 81

5.3. PRIPREMA GEOMETRIJE

Kod svakog numeričkog modeliranja, dvodimenzionalnog ili trodimenzionalnog, potrebno je definirati zatvorenu domenu unutar koje će se vršiti modeliranje. Za modeliranje difuzije i konvekcije onečišćenja iz dimnjaka na Urinju korišten je box model čije su stranice određene donjom granicom koju predstavlja topografija terena te gornjom granicom koju predstavlja xy ploha na visini od 3000 m nadmorske visine. Visina od 3000 metara odabrana je kako ne bi utjecala na vertikalnu disperziju na način da ograniči širenje perjanice dima. Bočne stranice modela definirane su krajevima korištene topografije terena gdje razlikujemo istočnu stranicu (smjer Kraljevica), zapadnu stranicu (smjer Kostrena), južnu stranicu (smjer mora) te sjevernu stranicu (smjer Gorski Kotar) (Slika 3.3.1.). U tako definiran kutijasti model dodana su dva dimnjaka iz postrojenja rafinerije nafte u Urinju iz kojih ćemo pratiti emisije efluenata u atmosferu. Lokacije te dimenzije dimnjaka dane su sljedećim podacima:

Inicijalne koordinate

$X_o = 5459500.0$

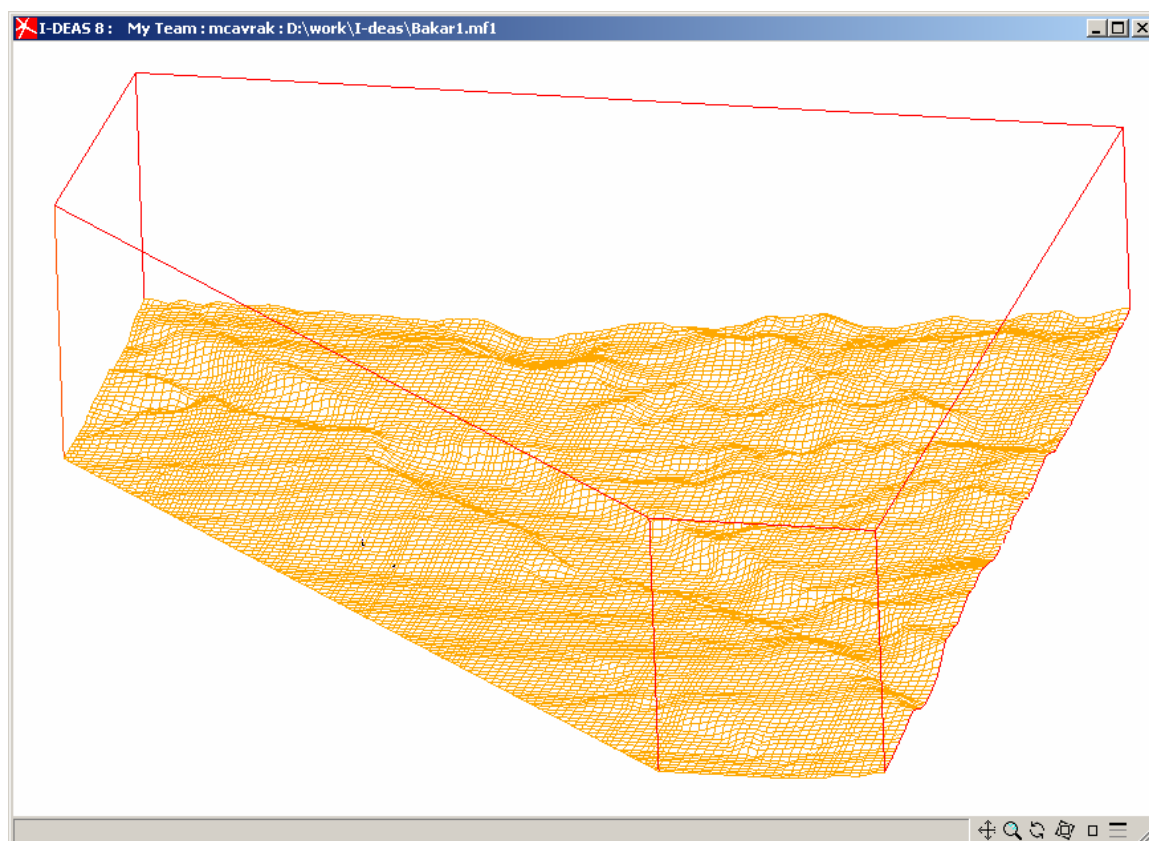
$Y_o = 5010000.0$

Tablica 3.3.1.

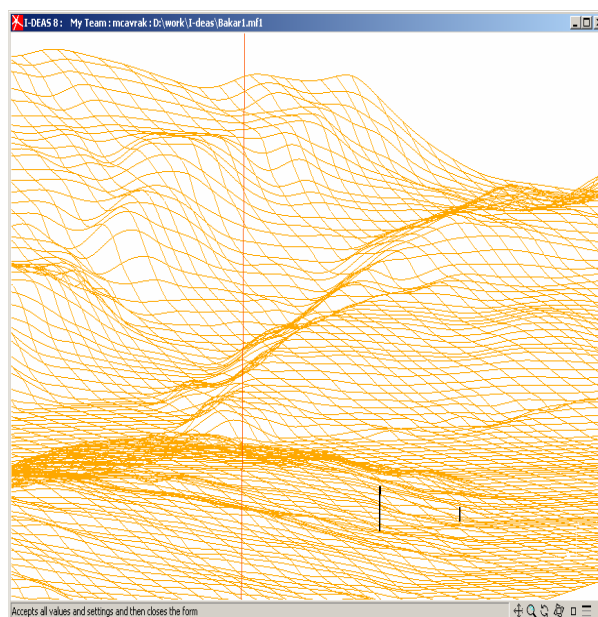
Zajednički dimnjak	Apsolutne koordinate			Relativne koordinate			Visina dimnjaka	Promjer dimnjaka
	X_a (m)	Y_a (m)	Z_a (m)	X_r (m)	Y_r (m)	Z_r (m)	H_s (m)	D_s (m)
G4+G5	5463864.40	5015393.00	7.70	4364.40	5393.00	7.70	35.00	2.62
FCC	5463400.00	5015900.00	28.00	3900.00	5900.00	28.00	124.00	4.10

Za definiciju topografije terena korišteni su podaci o receptorskim visinama za svakih sto metara udaljenosti u smjeru x i y osi kartezijevog koordinatnog sustava. Ukupan broj točaka iznosi u x smjeru 113 te u y smjeru 121 što ukupno daje 13673 točaka za koje su poznate njihove visine u smjeru z osi. Ti podaci primarno su dani u tekstualnoj datoteci složeni u jednostavnom [formatu](#). Budući da smo odabrali I-DEAS CAD program za generiranje geometrije modela, na osnovu ovih podataka potrebno je bilo konvertirati podatke o koordinatama točaka u jedan od formata kojim bi I-DEAS mogao učitati zadane točke terena ([konverzija u C++-u](#)). Nakon konverzije formata iz tekstualnog zapisa u I-DEAS-u primjeren [Iges format](#) točke smo importirali u IDEAS. Za formiranje plohe terena koristili smo I-DEAS-ovu naredbu za generiranje plohe kroz matricu točaka (*Fit Surface to Points*). Paralelno tome definiran je kvadar čiju osnovicu čini površina projekcije plohe terena na XY plovu sa koordinatom $Z = 0$, a visinu predstavlja unaprijed definirana vrijednost od 3000 m. Iz donje strane kvadra izrezali smo plovu terena te dobili kvadar čiju je donju stranicu zamijenila ploha terena. Na taj način formiran je početni kutijasti model (Slika 3.3.1.). Nadalje, kako bismo definirali i u kutijasti model unijeli dva dimnjaka nacrtali smo dva cilindra dužine i promjera prema podacima o dimnjacima iz Tablice 3.3.1. Na temelju podataka o lokaciji dimnjaka u relativnim koordinatama odrezali ta dva dimnjaka iz

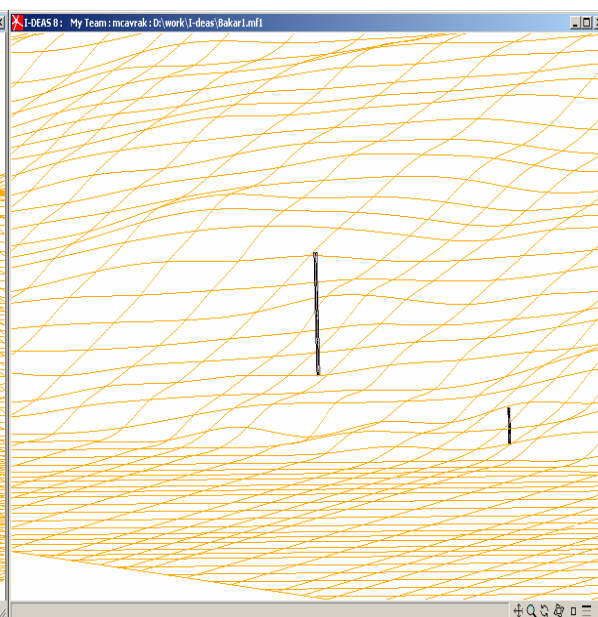
kutijastog modela upravo na prave lokacije u ovom relativnom prostoru (Slika 3.3.2.). Na slici je vidljivo da smo južnu te istočnu stranicu prerezali pod kutem od 45° kako bismo kasnije uštedjeli na vremenu konvergencije budući da je nad morem nepotrebno računati. Sljedeći korak je **generiranje mreže**. Kako bi generirali mrežu nad kutijastim modelom podignut je I-DEAS-ov modul za simulaciju *Simulation* te pokrenuti ploču s alatom za umrežavanje, *Meshing*. Odabran je trokutasti tip elemenata za umreženje rubnih stranica, terena te gornje granice (*Shell Meshing*). Za generiranje mreže unutar modela (*Solid Mesh*) odabran je tetraedarski tip elementa. Za vrstu mreže odabrana je nestrukturirana mreža (*free meshing*) kako bi lakše prionula na plohu terena. Odabir broja elemenata kreće se od 2 do 5 elemenata na plaštu i vrhu dimnjaka, 100 na terenu, 500 na rubnim stranicama te 1000 na gornjoj stranici. Nakon provedenog umreženja, a zbog činjenice da su dimnjaci, geometrijski gledano, mali u usporedbi sa cijelom domenom uočeno je najgušće umreženje oko dimnjaka te u pojedinim djelovima plohe terena gdje je potreba za manjim elementima bila važna zbog bolje prilagodbe mreže terenu. Na slici 3.3.5. prikazano je umreženje terena.



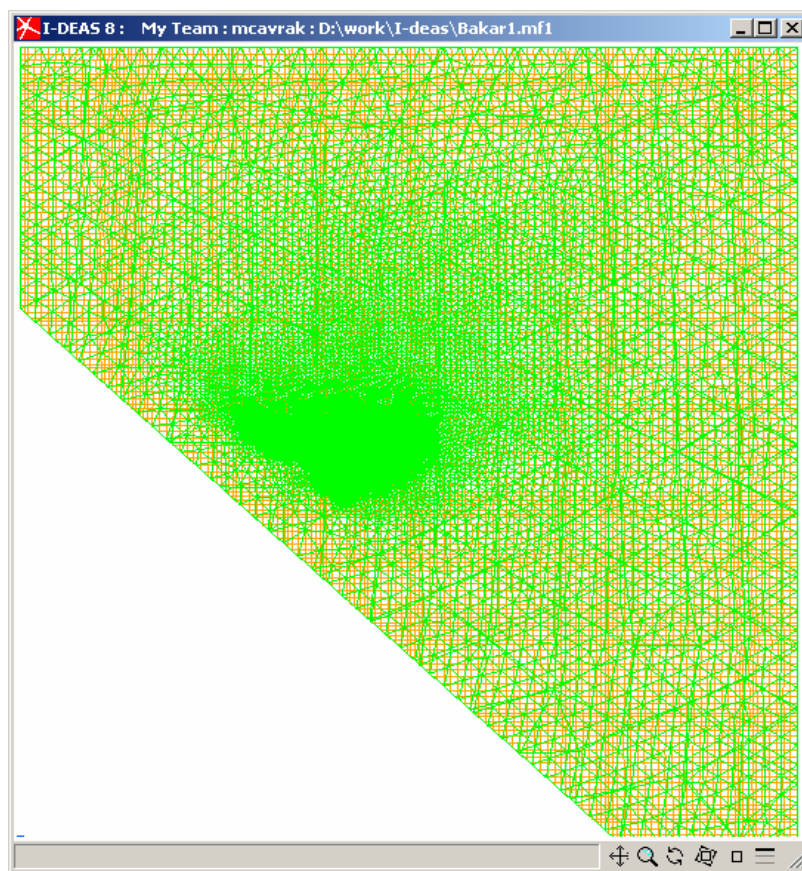
Slika 3.3.1. Prikaz početnog kutijastog modela generiranog u I-DEAS-u



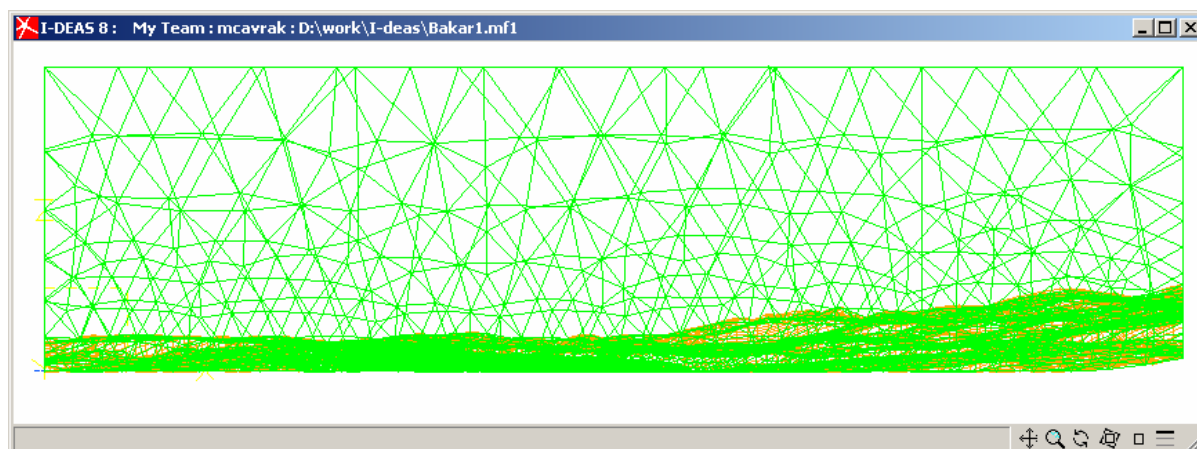
Slika 3.3.2. Prikaz dimnjaka s istočne strane



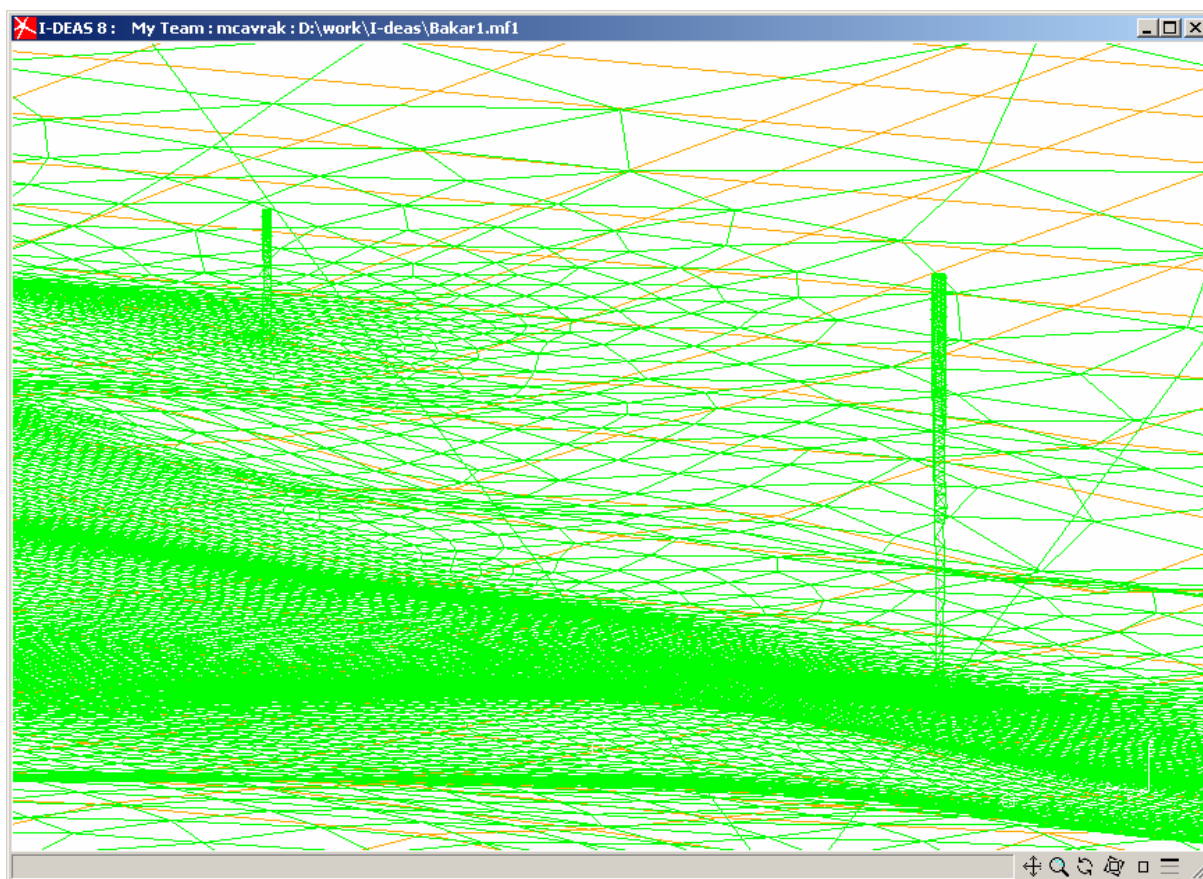
Slika 3.3.3. Prikaz dimnjaka s južne strane



Slika 3.3.5. Pogled na mrežu sa gornje stranice



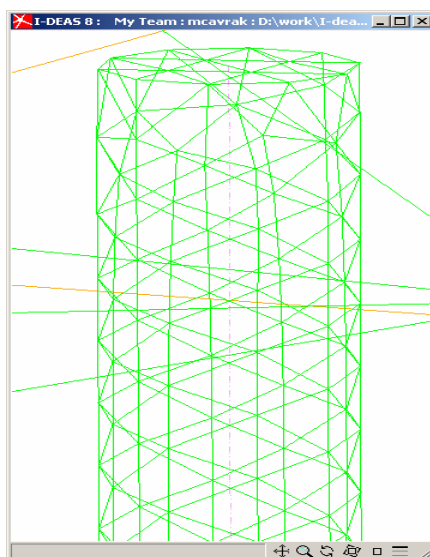
Slika 3.3.6. Pogled na mrežu po rubovima sa južne strane



Slika 3.3.7. Prikaz gustoće mreže u neposrednoj blizini oba dimnjaka

Moguće je uočiti kako dimnjaci imaju veći broj elemenata pri vrhu, a manji pri dnu te im je izgled blago stožast s vrhom u dnu dimnjaka. To je iz razloga što se s većim brojem elemenata na dnu dimnjaka nije moglo generirati mrežu zbog limitacija koje I-DEAS nameće. Pri korištenju nestrukturirane mreže I-DEAS automatski navlači mrežu tj. smanjuje ili povećava elemente na određenim područjima kako bi bio u stanju dostići broj definiranih čvorova na rubovima. Tako su na dnu dimnjaka FCC definirana dva čvora, a na svim rubnim

stranicama po 100 ili više čvorova. U slučaju kada bismo povećali broj čvorova na dnu dimnjaka, a zadržali isti na rubnim stranicama I-DEAS ne bi bio u stanju da zgenerira mrežu jer tražimo od njega preveliki raspon navlačenja koji nije u stanju izvršiti.



Slika 3.3.8. Prikaz omreženja vrha dimnjaka

Na kraju tako definirana mreža eksportirana je u *I-DEAS Simulation Universal file* formatu koji je pogodan za učitavanje (import) u Fluent.

5.4. MASENI UDJELI EFLUENATA

Postupak uključivanja efluenata te relevantnih jednadžbi za transport efluenata i na kraju podešavanje masenih udjela efluenata u rubnih uvjeta za dimnjake G4+5 i FCC prikazano će biti nešto kasnije. Ali prije nego što prikazemo postupak potrebno je proračunati sve sudionike tj njihove početne koncentracije ili masene protoke kako bi bili u stanju u FLUENT unijeti masene udjele pojedinih efluenata.

Određivanje masenih udjela plinovitih produkata izgaranja na izlazu iz dimnjaka provodi se koristeći već izmjerene vrijednosti masenih protoka [34] te proračunom onih produkata koji nisu izmjereni. Za proračun neizmjenjenih produkata koristimo jednadžbe za izračun produkata izgaranja. U ovom radu koriste se za modeliranje dva dimnjaka: zajednički dimnjak G4+G5 i zajednički dimnjak FCC kao što je i prikazano kod definicije geometrije. Za proračun je bitno uvidjeti da oba dimnjaka u stvarnosti predstavljaju zajednički dimnjak više procesa izgaranja. Zajednički dimnjak G4+G5 je dimnjak u kojeg dolaze odvojenim ispušnim vodovima plinovi iz kotla G4 i kotla G5 pogona energane i zajednički dimnjak FCC u kojeg dolaze ispušni plinovi iz CO-BOJLERA i peći FH-1 FCC procesa i peći VH-2 VACUUM FLASH-a. Stoga je potrebno posebno proračunati masene udjele procesa izgaranja u svakom ložištu te zbrojiti masene udjele svih plinova koji dolaze u jedan od zajedničkih dimnjaka. Takav proračun slijedi u nastavku.

5.4.1. Maseni udjeli iz kotla G4

Izmjerene vrijednosti:

Tablica 3.1.

Volumni protok plinova (vlažni)	V_{pl}	79927	m^3 / h
Temperatura plinova	T_{pl}	494	K
Potrošnja goriva	G_g	6400	kg / h
Emisije plinova			
Krute čestice	G_g	3.573	kg/h
CO	G_g	7.833	kg/h
NO ₂	G_g	41.402	kg/h
SO ₂	G_g	330.818	kg/h
O ₂	[O ₂]	2.8	% (vol.)
CO ₂	[CO ₂]	13.7	% (vol.)
Emisije anorganskih spojeva	G_g	0.135	kg/h

Emisije krutih čestica i anorganskih spojeva se zanemaruju zbog malih vrijednosti kojima utječu na onečišćenje. Također nećemo ih uzimati u obzir pri procesu izgaranja.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 46
		Listova : 81

Osim sudionika za koje postoje izmjereni podaci u procesima izgaranja nastaje također H_2O te N_2 koji ne sudjeluje u procesu izgaranja. Za određivanje njihovih emisija potrebno je još poznavati i sastav goriva koje izgara. U slučaju kotla G4 to je **srednje teško loživo ulje**.

Prema izmjerenim i preporučenim vrijednostima sastav goriva je sljedeći:

Tablica 3.2.

Maseni udjeli (%) u gorivu					
C	H	O+N	S	W	A
86	9.495	1	3.39	0.1	0.015

Za izračun volumena vode nastale tijekom izgaranja koristimo stehiometrijsku formulu

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} (1.24 \cdot (9 \cdot H + W)) \left(m_{n_{vode}}^3 / kg_{goriva} \right)$$

gdje su H i W maseni udjeli vode i vlage u gorivu.

Uvrštavanjem dobivamo

$$V_{H_2O} = 1.060882 \left(m_{n_{vode}}^3 / kg_{goriva} \right)$$

tj. za G_{goriva} količina nastale vode iznosi

$$V_{H_2O} = 6789.6448 \left(m_{n_{vode}}^3 / h \right)$$

Vrijednosti $[O_2]$ i $[CO_2]$ odnose se kao volumni postoci protoka vlažnih plinova te se izračunavaju kao

$$V_{O_2} = \frac{[O_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{2.8}{100} \cdot 79927 = 2237.956 \left(m_{n_{O_2}}^3 / h \right)$$

$$V_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{13.7}{100} \cdot 79927 = 10949.999 \left(m_{n_{O_2}}^3 / h \right)$$

Ostale izmjerene emisije izražene su u odnosu na zadani volumni udio kisika u otpadnom plinu i mogu se izračunati prema formuli za korekciju

$$G_{i, kor} = \left(\frac{21 - [O_2]_{zad}}{21 - [O_2]_{mjer}} \right) \cdot G_i$$

gdje je $[O_2]_{zad} = 3\%$ te slijedi

$$G_{CO, kor} = \left(\frac{21-3}{21-2.8} \right) \cdot 7,833 = 7.746923 \text{ (kg / h)}$$

$$G_{NO_2, kor} = \left(\frac{21-3}{21-2.8} \right) \cdot 41,402 = 40.94703 \text{ (kg / h)}$$

$$G_{SO_2, kor} = \left(\frac{21-3}{21-2.8} \right) \cdot 330,818 = 327.1826 \text{ (kg / h)}$$

tj. preračunato u m_n^3/h prema relaciji $V_{n,i} = G_{i, kor} \cdot \frac{22.4}{M}$ gdje je M molekularna težina ($kg/kmol$) dobivamo

$$V_{n, CO} = 7.746923 \cdot \left(\frac{22.4}{28} \right) = 6.197538 \text{ (m}_n^3/h)$$

$$V_{n, NO_2} = 40.94703 \cdot \left(\frac{22.4}{46} \right) = 19.93942 \text{ (m}_n^3/h)$$

$$V_{n, SO_2} = 327.1826 \cdot \left(\frac{22.4}{64} \right) = 114.5139 \text{ (m}_n^3/h)$$

zanemarujući kao što je već rečeno krute čestice i anorganske spojeve.

Količina dušika koji nije sudjelovao u izgaranju dobije se kao razlika ukupnog volumnog protoka ispušnih plinova te svih preostalih efluenta prema relaciji

$$V_{n, N_2} = V_{n, pl} - (V_{n, CO} + V_{n, NO_2} + V_{n, SO_2} + V_{n, O_2} + V_{n, CO_2} + V_{n, H_2O}) = 59808.749 \text{ (m}_n^3/h)$$

Proračun masenih protoka proizlazi iz jednadžbe $[i] = \frac{G_i}{G_{uk}}$ te su prikazani u tablici

Tablica 3.3.

i	$V_{n,i} \text{ (m}_n^3/h)$	$[i]_{vol} \%$	$M \text{ (kg / kmol)}$	$G_i \text{ (kg / h)}$	$[i]_{mas} \%$
CO	6,1975	0,0078	28	7,7469	0,0074
CO2	10949,9990	13,7000	44	21508,9266	20,4266
SO2	114,5139	0,1433	64	327,1826	0,3107
O2	2237,9560	2,8000	32	3197,0800	3,0362
H2O	6789,6448	8,4948	18	5455,9646	5,1814
NO2	19,9394	0,0249	46	40,9470	0,0389
N2	59808,7493	74,8292	28	74760,9366	70,9989
Ukupno	79927,0000			105298,7844	

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 48
		Listova : 81

5.4.2. Maseni udjeli iz kotla G5

Izmjerene vrijednosti dane su tablicom

Tablica 3.4.

Volumni protok plinova (vlažni)	V_{pl}	42864	m^3 / h
Temperatura plinova	T_{pl}	452	K
Potrošnja goriva	G_g	3090	kg / h
Emisije plinova			
Krute čestice	G_g	1.796	kg/h
CO	G_g	4.629	kg/h
NO_2	G_g	19.374	kg/h
SO_2	G_g	175.657	kg/h
O_2	$[O_2]$	4.7	% (vol.)
CO_2	$[CO_2]$	12.3	% (vol.)
Emisije anorganskih spojeva	G_g	0.08	kg/h

Emisije krutih čestica zanemaruju se zbog malih vrijednosti kojima utječu na onečišćenje i nećemo ih uzimati u obzir pri procesu izgaranja.

Osim sudionika za koje postoje izmjereni podaci u procesima izgaranja nastaje također H_2O te N_2 koji ne sudjeluje u procesu izgaranja. Za određivanje njihovih emisija potrebno je još poznavati i sastav goriva koje izgara. U slučaju kotla G4 to je **srednje teško loživo ulje**.

Prema izmjerenim i preporučenim vrijednostima sastav goriva dan tablicom 3.2.

Za izračun volumena vode nastale tijekom izgaranja koristimo stehiometrijsku formulu

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} (1.24 \cdot (9 \cdot H + W)) \left(m_{nvode}^3 / kg_{goriva} \right)$$

gdje su H i W maseni udjeli vode i vlage u gorivu.

Uvrštavanjem dobivamo

$$V_{H_2O} = 1.060882 \left(m_{nvode}^3 / kg_{goriva} \right)$$

tj. za G_{goriva} količina nastale vode iznosi

$$V_{H_2O} = 3278.1254 \left(m_{nvode}^3 / h \right).$$

Vrijednosti $[O_2]$ i $[CO_2]$ odnose se kao volumni postoci protoka vlažnih plinova te se izračunavaju kao

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 49
		Listova : 81

$$V_{O_2} = \frac{[O_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{4.7}{100} \cdot 42864 = 2014.608 \text{ (} m_{n_{O_2}}^3 / h \text{)}$$

$$V_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{12.3}{100} \cdot 42864 = 5272.272 \text{ (} m_{n_{O_2}}^3 / h \text{)}$$

Ostale izmjerene emisije izražene su u odnosu na zadani volumni udio kisika u otpadnom plinu i mogu se izračunati prema formuli za korekciju

$$G_{i, kor} = \left(\frac{21 - [O_2]_{zad}}{21 - [O_2]_{mjer}} \right) \cdot G_i$$

gdje je $[O_2]_{zad} = 3\%$ te slijedi

$$G_{CO, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 4.7} \right) \cdot 4.629 = 5.111779 \text{ (} kg / h \text{)}$$

$$G_{NO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 4.7} \right) \cdot 19.374 = 21.3964 \text{ (} kg / h \text{)}$$

$$G_{SO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 4.7} \right) \cdot 175.657 = 193.9771 \text{ (} kg / h \text{)}$$

tj. preračunato u m_n^3 / h prema relaciji $V_{n, i} = G_{i, kor} \cdot \frac{22.4}{M}$ gdje je M molekularna težina ($kg/kmol$) dobivamo

$$V_{n, CO} = 5.111779 \cdot \left(\frac{22.4}{28} \right) = 4.089423 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, NO_2} = 21.3946 \cdot \left(\frac{22.4}{46} \right) = 10.41824 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, SO_2} = 193.9771 \cdot \left(\frac{22.4}{64} \right) = 67.89197 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

zanemarujući kao što je već rečeno krute čestice i anorganske spojeve.

Količina dušika koji nije sudjelovao u izgaranju dobije se kao razlika ukupnog volumnog protoka ispušnih plinova te svih preostalih efluenata prema relaciji

$$V_{n, N_2} = V_{n, pl} - (V_{n, CO} + V_{n, NO_2} + V_{n, SO_2} + V_{n, O_2} + V_{n, CO_2} + V_{n, H_2O}) = 32216.595 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 50
		Listova : 81

Proračun masenih protoka proizlazi iz jednadžbe $[i] = \frac{G_i}{G_{uk}}$ te su prikazani u tablici

Tablica 3.6.

i	$V_{n,i} (m^3/h)$	$[i]_{vol} \%$	$M (kg/kmol)$	$G_i (kg/h)$	$[i]_{mas} \%$
CO	4,0894	0,0095	28	5,1118	0,0091
CO ₂	5272,2720	12,3000	44	10356,2486	18,3753
SO ₂	67,8920	0,1584	64	193,9771	0,3442
O ₂	2014,6080	4,7000	32	2878,0114	5,1065
H ₂ O	3278,1254	7,6477	18	2634,2079	4,6739
NO ₂	10,4182	0,0243	46	21,3946	0,0380
N ₂	32216,5950	75,1600	28	40270,7437	71,4531
Ukupno	42864,0000			56359,6951	

5.4.3. Maseni udjeli zajedničkog dimnjaka kotla G4 i kotla G5

Maseni udio efluenta koji izlaze iz zajedničkog dimnjaka dobijamo kada zbrojimo vrijednosti masenih protoka pojedinog efluenta iz kotla G4 (Tablica 3.3.) i kotla G5 (Tablica 3.6.) te ih podijelimo s ukupnim masenim protokom oba kotla.

Tablica 3.7.

i	$G_i (kg/h)$	$[i]_{vol} \%$	$V_i (m^3/h)$	$[i]_{vol} \%$
CO	16,2105	0,000100	17.9857	0.000083
CO ₂	31865,1752	0,197020	28543.9950	0.132392
SO ₂	648,3521	0,004009	319.6288	0.001482
O ₂	6075,0914	0,037562	7385.3128	0.034254
H ₂ O	8090,1725	0,050021	17713.8707	0.082160
NO ₂	76,3703	0,000472	53.3311	0.000247
N ₂	114964,1427	0,710816	161568.6421	0.749381
Ukupno	161735,5146		215602.7662	

Koristeći podatke o ukupnom volumnom protoku te promjeru dimnjaka izračunata je brzina izlaznih efluenta iz dimnjaka G4+G5 prema izrazu

$$v = \frac{V_{uk}}{3600 \cdot A} = \frac{V_{uk}}{3600 \cdot \frac{D^2 \pi}{4}} = \frac{4 \cdot 215602.7662}{3600 \cdot 2.616^2 \cdot \pi} = 11.1 (ms^{-1})$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 51
		Listova : 81

Dobivena brzina efluenata malo odstupa od izmjerene koja iznosi $12.28 \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ te smo preuzeli proračunatu.

5.4.4. Maseni udjeli iz peći VH-1, VACUUM FLASH-a

Izmjerene vrijednosti:

Tablica 3.8.

Volumni protok plinova (vlažni)	V_{pl}	64388	m^3 / h
Temperatura plinova	T_{pl}	388	K
Gorivo : mješano (Loživog ulje + Loživi plin)			
Potrošnja loživog plina	G_{lu}	3007	kg / h
Potrošnja loživog ulja	$V_{n, lp}$	976.5	m^3 / h
Emisije plinova			
Krute čestice	G_{krute}	1.874	kg/h
CO	G_{CO}	7.791	kg/h
NO_2	G_{NO_2}	21.409	kg/h
SO_2	G_{SO_2}	148.543	kg/h
O_2	$[O_2]$	6.1	% (vol.)
CO_2	$[CO_2]$	12.3	% (vol.)

Emisije krutih čestica zanemaruju se zbog malih vrijednosti kojima utječu na onečišćenje i nećemo ih uzimati u obzir pri procesu izgaranja.

Osim sudionika za koje postoje izmjereni podaci u procesima izgaranja nastaje također H_2O te N_2 koji ne sudjeluje u procesu izgaranja. Za određivanje njihovih emisija potrebno je još poznavati i sastav goriva koje izgara. U slučaju peći VH-1 to je mješavina loživog ulja i loživog plina.

Sastav loživog ulja dan je tablicom 3.2.

Za izračun volumena vode nastale tijekom izgaranja loživog ulja koristimo stehiometrijsku formulu

$$V_{H_2O, lu} = \frac{1}{100} (1.24 \cdot (9 \cdot H + W)) \left(m_{n\text{vode}}^3 / kg_{\text{goriva}} \right)$$

gdje su H i W maseni udjeli vode i vlage u gorivu.

Uvrštavanjem dobivamo

$$V_{H_2O, lu} = 1.060882 \left(m_{n\text{vode}}^3 / kg_{\text{goriva}} \right)$$

tj. za G_{goriva} količina nastale vode iznosi

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 52
		Listova : 81

$$V_{H_2O, lu} = 3278.1254 \left(m_{nvode}^3 / h \right).$$

Sastav loživog plina dan je sljedećom tablicom

Tablica 3.10.

kemijska formula	naziv	X (H)	Y (C)	Vol. %	Y/2 * Vol.
H_2	vodik	-	-	53,62	
CH_4	metan	1	4	16,86	
C_2H_6	etan	2	6	13,14	39,42
C_3H_8	propan	3	8	10,97	43,88
C_4H_{10}	izobutan	4	8	2,41	9,64
C_4H_{10}	n-butan	4	8	2,09	8,36
C_5H_{12}	izopentan	5	10	0,47	2,35
C_5H_{12}	n-pentan	5	10	0,37	1,85
H_2S	sumporovodik			0,38	
				Ukupno	105,5

Za izračun volumena vode nastale tijekom izgaranja loživog plina koristimo stehiometrijsku formulu

$$V_{H_2O, lp} = \frac{1}{100} \cdot \left(H_2 + 2 \cdot (CH_4 + C_2H_6) + \sum \frac{Y}{2} \cdot C_X H_Y \right).$$

Uvrštavanjem dobivamo

$$V_{H_2O, lp} = 1.9284 \left(m_{nvode}^3 / m_{n, lp}^3 \right)$$

tj. za $V_{n, lp}$ količina nastale vode iznosi

$$V_{H_2O, lp} = 1883.083 \left(m_{nvode}^3 / h \right).$$

Zbroj količine vode nastale izgaranjem loživog ulja i loživog plina iznosi

$$V_{n, H_2O} = 5073.155 \left(m_n^3 / h \right).$$

Vrijednosti $[O_2]$ i $[CO_2]$ odnose se kao volumni postoci protoka vlažnih plinova te se izračunavaju kao

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 53
		Listova : 81

$$V_{O_2} = \frac{[O_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{6.1}{100} \cdot 64388 = 3927.668 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{12.3}{100} \cdot 64388 = 7919.724 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

Ostale izmjerene emisije izražene su u odnosu na zadani volumni udio kisika u otpadnom plinu i mogu se izračunati prema formuli za korekciju

$$G_{i, kor} = \left(\frac{21 - [O_2]_{zad}}{21 - [O_2]_{mjer}} \right) \cdot G_i$$

gdje je $[O_2]_{zad} = 3\%$ te slijedi

$$G_{CO, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.1} \right) \cdot 7.791 = 9.411946 \text{ (} kg / h \text{)}$$

$$G_{NO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.1} \right) \cdot 21.409 = 25.86322 \text{ (} kg / h \text{)}$$

$$G_{SO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.1} \right) \cdot 148.543 = 179.4479 \text{ (} kg / h \text{)}$$

tj. preračunato u m_n^3 / h prema relaciji $V_{n, i} = G_{i, kor} \cdot \frac{22.4}{M}$ gdje je M molekularna težina ($kg/kmol$) dobivamo

$$V_{n, CO} = 9.411946 \cdot \left(\frac{22.4}{28} \right) = 7.529557 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, NO_2} = 25.86322 \cdot \left(\frac{22.4}{46} \right) = 12.59426 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, SO_2} = 179.4479 \cdot \left(\frac{22.4}{64} \right) = 62.80677 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

zanemarujući kao što je već rečeno krute čestice i anorganske spojeve.

Količina dušika koji nije sudjelovao u izgaranju dobije se kao razlika ukupnog volumnog protoka ispušnih plinova te svih preostalih efluenata prema relaciji

$$V_{n, N_2} = V_{n, pl} - (V_{n, CO} + V_{n, NO_2} + V_{n, SO_2} + V_{n, O_2} + V_{n, CO_2} + V_{n, H_2O}) = 47384.52 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 54
		Listova : 81

Proračun masenih protoka proizlazi iz jednadžbe $[i] = \frac{G_i}{G_{uk}}$ te su prikazani u tablici

Tablica 3.11.

i	$V_{n,i} (m^3/h)$	$[i]_{vol} \%$	$M (kg/kmol)$	$G_i (kg/h)$	$[i]_{mas} \%$
CO	7,5296	0,0117	28	9,4119	0,0111
CO ₂	7919,7240	12,3000	44	15556,6007	18,3690
SO ₂	62,8068	0,0975	64	179,4479	0,2119
O ₂	3927,6680	6,1000	32	5610,9543	6,6253
H ₂ O	5073,1548	7,8790	18	4076,6422	4,8136
NO ₂	12,5943	0,0196	46	25,8632	0,0305
N ₂	47384,5226	73,5922	28	59230,6533	69,9385
Ukupno		64388,0000		84689,5736	

5.4.5. Maseni udjeli iz CO-BOJLERA i peći FH-2 FCC procesa

Izmjerene vrijednosti:

Tablica 3.12.

Volumni protok plinova (vlažni)	V_{pl}	63854	m^3/h
Temperatura plinova	T_{pl}	343	K
Gorivo : loživi plin			
Potrošnja loživog ulja	$V_{n,lp}$	2730	m^3/h
Emisije plinova			
Krute čestice	G_{krute}	2.21	kg/h
CO	G_{CO}	4.406	kg/h
NO ₂	G_{NO_2}	19.539	kg/h
SO ₂	G_{SO_2}	90.61	kg/h
O ₂	$[O_2]$	6.4	% (vol.)
CO ₂	$[CO_2]$	8.3	% (vol.)

Emisije krutih čestica zanemaruju se zbog malih vrijednosti kojima utječu na onečišćenje i nećemo ih uzimati u obzir pri procesu izgaranja.

Osim sudionika za koje postoje izmjereni podaci u procesima izgaranja nastaje također H₂O te N₂ koji ne sudjeluje u procesu izgaranja. Za određivanje njihovih emisija potrebno je još poznavati i sastav goriva koje izgara.

Prema izmjerenim vrijednostima sastav goriva je isti kao u tablici 3.10.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 55
		Listova : 81

Za izračun volumena vode nastale tijekom izgaranja loživog plina koristimo stehiometrijsku formulu

$$V_{H_2O, lp} = \frac{1}{100} \cdot \left(H_2 + 2 \cdot (CH_4 + C_2H_4) + \sum \frac{Y}{2} \cdot C_X H_Y \right)$$

Uvrštavanjem dobivamo

$$V_{H_2O, lp} = 1.9284 \left(m_{n, lp}^3 / m_{n, lp}^3 \right)$$

tj. za $V_{n, lp}$ količina nastale vode iznosi

$$V_{H_2O, lp} = 5264.532 \left(m_{n, lp}^3 / h \right)$$

Vrijednosti $[O_2]$ i $[CO_2]$ odnose se kao volumni postoci protoka vlažnih plinova te se izračunavaju kao

$$V_{O_2} = \frac{[O_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{6.4}{100} \cdot 63854 = 4086.656 \left(m_{n, O_2}^3 / h \right)$$

$$V_{CO_2} = \frac{[CO_2]}{100} \cdot V_{pl} = \frac{8.3}{100} \cdot 63854 = 5299.882 \left(m_{n, CO_2}^3 / h \right)$$

Ostale izmjerene emisije izražene su u odnosu na zadani volumni udio kisika u otpadnom plinu i mogu se izračunati prema formuli za korekciju

$$G_{i, kor} = \left(\frac{21 - [O_2]_{zad}}{21 - [O_2]_{mjer}} \right) \cdot G_i$$

gdje je $[O_2]_{zad} = 3\%$ te slijedi

$$G_{CO, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.4} \right) \cdot 4.406 = 5.432055 \left(kg / h \right)$$

$$G_{NO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.4} \right) \cdot 19.539 = 24.08918 \left(kg / h \right)$$

$$G_{SO_2, kor} = \left(\frac{21 - 3}{21 - 6.4} \right) \cdot 90.61 = 111.711 \left(kg / h \right)$$

tj. preračunato u m_n^3 / h prema relaciji $V_{n, i} = G_{i, kor} \cdot \frac{22.4}{M}$ gdje je M molekularna težina ($kg/kmol$) dobivamo

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 56
		Listova : 81

$$V_{n, CO} = 5.432055 \cdot \left(\frac{22.4}{28} \right) = 4.345644 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, NO_2} = 24.08918 \cdot \left(\frac{22.4}{46} \right) = 11.73038 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

$$V_{n, SO_2} = 111.711 \cdot \left(\frac{22.4}{64} \right) = 39.09884 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

zanemarujući kao što je već rečeno krute čestice i anorganske spojeve.

Količina dušika koji nije sudjelovao u izgaranju dobije se kao razlika ukupnog volumnog protoka ispušnih plinova te svih preostalih efluenata prema relaciji

$$V_{n, N_2} = V_{n, pl} - (V_{n, CO} + V_{n, NO_2} + V_{n, SO_2} + V_{n, O_2} + V_{n, CO_2} + V_{n, H_2O}) = 49147.76 \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$$

Proračun masenih protoka proizlazi iz jednadžbe $[i] = \frac{G_i}{G_{uk}}$ te su prikazani u tablici

Tablica 3.13.

i	$V_{n, i} \text{ (} m_n^3 / h \text{)}$	$[i]_{vol} \%$	$M \text{ (} kg / kmol \text{)}$	$G_i \text{ (} kg / h \text{)}$	$[i]_{mas} \%$
CO	4,3456	0,0068	28	5,4321	0,0066
CO2	5299,8820	8,3000	44	10410,4825	12,6872
SO2	39,0988	0,0612	64	111,7110	0,1361
O2	4086,6560	6,4000	32	5838,0800	7,1148
H2O	5264,5320	8,2446	18	4230,4275	5,1556
NO2	11,7304	0,0184	46	24,0892	0,0294
N2	49147,7551	76,9690	28	61434,6939	74,8702
Ukupno	63854,0000			82054,9161	

5.4.6. Maseni udjeli zajedničkog dimnjaka peći VH-1, CO-BOJLERA i peći FH-2 FCC procesa

Maseni udio efluenata koji izlaze iz zajedničkog dimnjaka dobijamo kada zbrojimo vrijednosti masenih protoka pojedinog efluenta iz peći VH-1 (Tablica 3.11.) i peći FH-2 (Tablica 3.13.) te ih podijelimo sa ukupnim masenim protokom oba kotla.

Tablica 3.14.

i	$G_i (kg/h)$	$[i]_{mas} \%$	$V_i (m^3/h)$	$[i]_{vol} \%$
CO	14,8440	0,000089	16.1616	0.000094
CO ₂	25967,0832	0,155730	17915.0291	0.104314
SO ₂	291,1589	0,001746	138.3906	0.000806
O ₂	11449,0343	0,068662	10716.8950	0.062401
H ₂ O	8307,0697	0,049819	13824.8658	0.080498
NO ₂	49,9524	0,000300	32.6383	0.000190
N ₂	120665,3472	0,723654	129097.1683	0.751696
Ukupno	166744,49		171741.1487	

Brzina kojom izlaze efluenti iz dimnjaka definirana je koristeći relaciju $v = \frac{V}{A} = \frac{4 \cdot V}{3600 \cdot D^2 \cdot \pi}$

te je dobivena brzina od $3.613 (ms^{-1})$. Ova vrijednost točno se poklapa sa izmjerenom koja iznosi $3.63 (ms^{-1})$.

5.5. PROFILI VJETRA

Za istraživanje korišten je eksponencijalni oblik promjene brzina vjetra s visinom. Brzina vjetra na vrhu dimnjaka u_s dana je u ovisnosti o izmjerenoj brzini vjetra u_{ref} na referentnoj visini mjerenja z_{ref} (korištena je referentna visina od 10 m) izrazom (pri čemu je h_s fizička visina dimnjaka):

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (6)$$

gdje je p eksponent brzine vjetra. Vrijednost p definirana je u funkciji kategorije stabilnosti i klase brzine vjetra.

Vrijednosti eksponenta brzine vjetra dane su tablicom

Tablica 3.15.

Kategorija stabilnosti	Ruralni eksponent	Urbani eksponent
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

Za unos profila vjetra u FLUENT potrebno je napisati kod u C++ programskom jeziku. Prikazan je kod za brzinu vjetra od 2.5 ms^{-1} uz ruralni eksponent brzine vjetra za klasu stabilnosti E (pripremljeni su i kodovi za brzine vjetrova 5 ms^{-1} uz ruralni eksponent za E klasu stabilnosti i 10 ms^{-1} uz ruralni eksponent za D klasu stabilnosti:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_z_velocity_2_5E, thread, nv)
{
    face_t f;
    real x[ND_ND];
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        F_PROFILE(f, thread, nv) = 2.5 * pow(x[2]/10, 0.35);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 59
		Listova : 81

5.6. POSTUPAK MODELIRANJA U FLUENT-U

Modeliranje u FLUENT-u zahtjeva niz pripremnih radnji i podešavanje brojnih parametara prije nego se pokrene rješavač sustava jednažbi u diskretiziranoj domeni modela. Ti koraci su sljedeći:

1. Kreiranje geometrije modela;

Opis kreiranja geometrije dali smo u poglavlju 3.3.

2. Pokretanje 2D ili 3D rješavača u FLUENT-u;

Kada pokrećemo FLUENT-u potrebno je naznačiti kako želimo modelirati. Dvodimenzionalni rješavač se odnosi na modeliranje u jednoj ravnini tj. u dvodimenzionalnom prostoru. Primjeri takvih modela su razna strujanja u cilindričnim cijevima te u strujnim poljima gdje na varijable koje promatramo ne utječe ili malo utječe efekt treće dimenzije. Zbog toga iz jednažbi ispadaju svi efekti vezani uz treću z dimenziju. Za razliku od 2D postoji odabir 3D modeliranja kod kojeg postoje promjene varijabli u sve tri dimenzije. Odabran je 3D rješavač.

3. Unos geometrije;

Geometrija se učitava korištenjem naredbe (*File->Import->I-DEAS Universal file*) jer smo iz I-DEAS-a iznijeli geometriju upravo u tom formatu.

4. Provjera i izmjena geometrije;

Prilikom transfera geometrija se može izmjeniti te je potrebno odmah nakon unosa geometriju provjeriti: uočiti da su svi izračunati volumeni geometrije pozitivnog predznaka jer bi u slučaju negativnih predznaka rješavač iznio krive tj. neželjene rezultate (*Grid->Check*). Također potrebno je iznova definirati ishodišnje koordinate te voditi računa o eventualnoj izmjeni koordinatnih osi (*Grid->Translate*). Nadalje geometrija koju smo učitali sastoji se od jednog bloka te je bilo potrebno odvojiti pojedine stranice domene kako bi ih kasnije identificirali i dodijelili im odgovarajući rubne uvjete (*Grid->Separate->Faces*, *Grid->Merge*). Tijekom cijele provjere i izmjene geometrije vizualno smo pratili izgled geometrije kako bi zaista bili uvjereni da sve ide kao što smo i zamislili na početku (*Display->Grid*).

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 60
		Listova : 81

5. Odabir definicije rješavača;

Odabran je individualni rješavač (*Define->Models->Solver->Segregated*) koji je standardan za FLUENT i kod kojeg se sve zakonite jednačbe rješavaju zasebno jedna od druge. Postoji i mogućnost da se pojedine jednačbe rješavaju simultano (rješavaju se istovremeno jednačbe količine gibanja i energije, eng. *Implicit coupled solver*).

6. Odabir osnovnih jednačbi;

Odabran je turbulentni *k-ε* model (*Define->Models->Viscous->k-epsilon->Standard*), postojanje kemijskih spojeva (što uključuje rješavanje transportnih jednačbi konvekcije i difuzije pojedinih kemijskih spojeva iz poglavlja 3.2.4) (*Define->Models->Species->Multiple Species*) koja automatski uključuje energetska jednačbu zbog postojanja razlika u gustoćama i temperaturi pojedinih kemijskih spojeva koje ćemo uključiti.

Postoji još niz mogućnosti: od odabira laminarnog strujanja te niza drugih turbulentnih modela, radijacije, diskretne faze te određenih polutanata kao NO_x i čađe do korisnički definiranih veličina kao poroznih materijala, izmjenjivača topline i dr.

7. Definicija materijala i njihovih osobina;

Iz baze podataka odabrana je za tip materijala mješavina u koju su iz baze podataka o materijalima uključeni kemijski spojevi SO₂, CO, CO₂, N₂, O₂, H₂O te zrak. (*Define->Materials*)

8. Definicija operativnih uvjeta;

Definiran je referentni tlak od 101325 Pa, te gravitacijska akceleracija $g_x = g_y = 0$; $g_z = -9.81 \text{ ms}^{-1}$.

9. Unos profila brzina;

Kako bi definirali profil brzine u domeni modela uveden je odgovarajući profil brzina (*Define->User-Defined->Functions->Interpreted*).

10. Definicija rubnih uvjeta;

Kako bi definirali rubne uvjete potrebno je za svaki slučaj smjera vjetra unaprijed odrediti kakav će rubni uvjet pojedine stranice modela imati. Definicija rubnih uvjeta ovisi o našem predviđanju kako će strujanje koje modeliramo izgledati, tj. što predstavlja ulazne presjeke strujnog polja, a što izlazne presjeke, što je zid (nema protoka kroz zidove) te da li postoje ravnine simetrije ili ne. Ulazni i izlazni presjeci mogu biti definirani na razne načine u FLUENT-u. Kao ulazne presjeke (rubni uvjet: ulaz brzine) (eng. *Velocity inlet*) definirali smo vrhove

dimnjaka kao izlazne presjeke efluenata iz dimnjaka te je definirana izlazna brzina, temperatura i maseni udjeli pojedinih definiranih kemijskih spojeva prema podacima iz poglavlja 3.3. i 3.4. Teren i plaševi obiju dimnjaka su definirani kao zid (eng. *Wall*) s definiranim stupnjem površinske hrapavosti 0.5. Gornja stranica geometrije modela definirana je učitanim profilom vjetra kao rubni uvjet: ulaz brzine. Bočne stranice su definirane različito ovisno o smjeru južnog vjetra. Bočne stranice od kojih puše vjetar definirane su profilima brzine i smjerom vektora brzine kao rubni uvjeti: ulaz brzine, a bočne stranice prema kojima puše vjetar te dispergira efluente poprimile su rubni uvjet: strujni izlaz (eng. *Outflow*). Ovakav rubni uvjet korišten je iz razloga što su odgovorne varijable nepoznate na tim stranicama, tj. izlazima iz strujnog polja te ih tako definirani rubni uvjet predviđa kao jednake susjednim čvorovima unutar domene. Koristeći strujni izlaz kao rubni uvjet povećavamo vrijeme konvergencije (prosjeck je 120 iteracija) ali omogućujemo točniju sliku strujnog polja. Ako bi koristili rubni uvjet tlačni izlaz (eng. *Pressure outlet*) vrijeme konvergencije bilo bi 50 iteracija, ali imali bi ograničene izlazne presjeke iz strujnog polja nametnutim tlakom i temperaturom. Prikaz odabranih naziva i rubnih uvjeta bočnih stranica za svaki smjer vjetra prikazan je u sljedećoj tablici.

Tablica 3.6.1. Južna stranica 1

x-vektor smjera vjetra	y-vektor smjera vjetra	Rubni uvjet
-1	1	Velocity inlet
0	1	Velocity inlet
1	1	Velocity inlet
1	0	Velocity inlet
1	-1	Velocity inlet

Tablica 3.6.2. Južna stranica 2

x-vektor smjera vjetra	y-vektor smjera vjetra	Rubni uvjet
-1	1	Velocity inlet
0	1	Velocity inlet
1	1	Velocity inlet
1	0	Velocity inlet
1	-1	Outflow

Tablica 3.6.2. Sjeverna stranica

x-vektor smjera vjetra	y-vektor smjera vjetra	Rubni uvjet
-1	1	Velocity inlet
0	1	Outflow
1	1	Outflow
1	0	Velocity inlet
1	-1	Velocity inlet

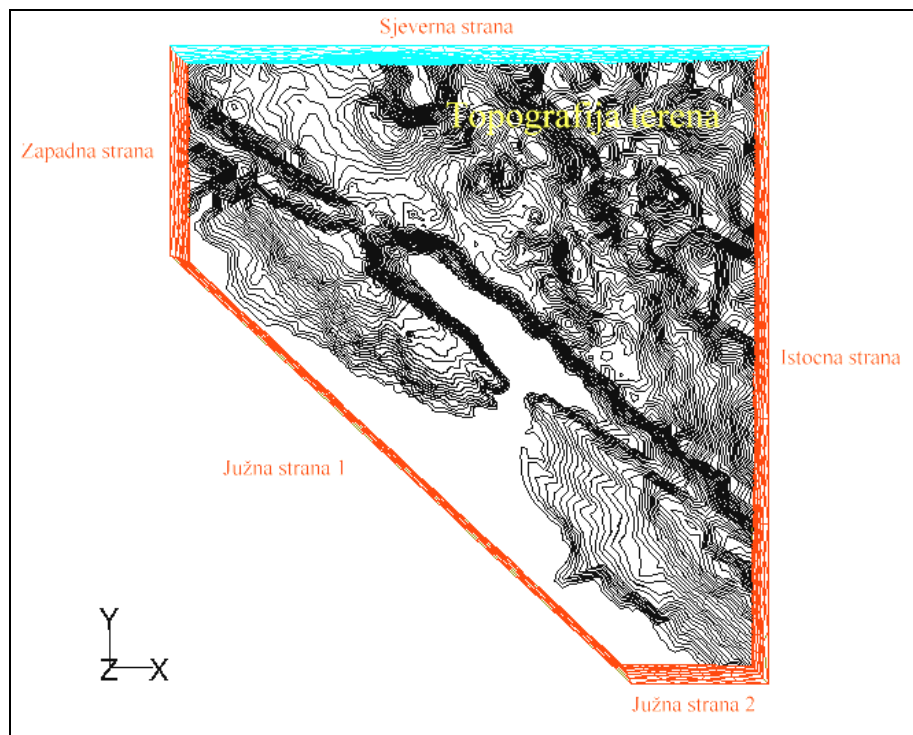
Tablica 3.6.2. Zapadna stranica

x-vektor smjera vjetra	y-vektor smjera vjetra	Rubni uvjet
-1	1	Outflow
0	1	Velocity inlet
1	1	Velocity inlet
1	0	Velocity inlet
1	-1	Velocity inlet

Tablica 3.6.2. Istočna stranica

x-vektor smjera vjetra	y-vektor smjera vjetra	Rubni uvjet
-1	1	Velocity inlet
0	1	Outflow
1	1	Outflow
1	0	Outflow
1	-1	Outflow

Kod smjerova vjetra, gdje su obje južne stranice ulazi brzine, definirana je jedna stranica spajanjem ovih dviju. Također je obavljeno spajanje svih stranica koje su poprimile rubni uvjet *strujni izlaz*, iz razloga što je za *strujni izlaz* potrebno definirati količinu izlaznog materijala kroz pojedinu stranicu. Kako je ta količina za pojedinu stranicu nepoznata spojene su sve u jednu te je na njoj definirana količina izlaza jednaka jedinici tj. potpunom izlazu materijala kroz nju.



Slika 3.6.1. Prikaz topografije +terena i stranica kutijastog modela

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 63
		Listova : 81

11. Odabir kontrolnih parametara rješavača

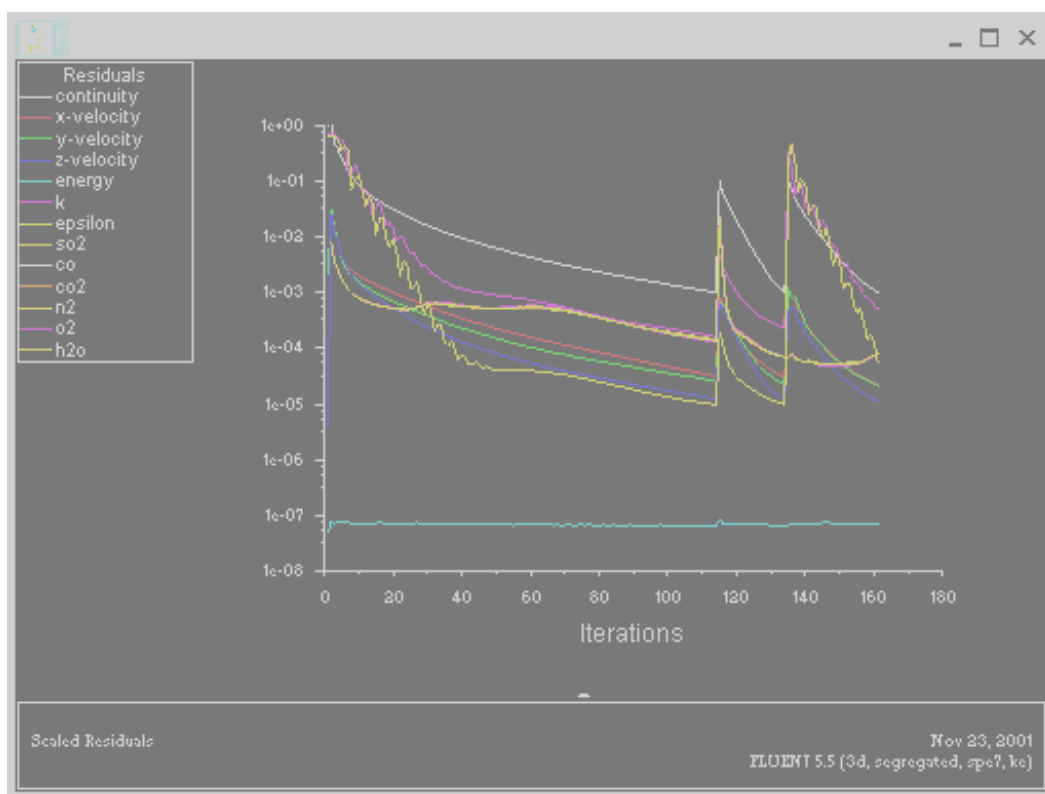
Kontrolni parametri rješavača omogućuju uključivanje ili isključivanje pojedinih jednadžbi iz proračuna, definiciju faktora podrelaksacije rješavača sustava diferencijalnih jednadžbi te odabir načina diskretizacije sustava jednadžbi. U našem slučaju nismo mjenjali definirane parameter. Tijekom proračuna modificirani su neki od podrelaksirajućih faktora kako bi se ubrzala konvergencija jednadžbi (*Solve->Control->Solution*).

12. Inicijalizacija

Inicijalizacijom se definiraju početni uvjeti za rješavač sistema diferencijalnih jednadžbi. Nad cijelom domenom (u svakom čvoru) definiraju se tada početne vrijednosti varijabla koje se rješavaju, a moguće je definirati početne uvjete korisničkim unošenjem vrijednosti varijabli ili odabirom vrijednosti varijabli nad jednim stranicom modela čije smo rubne uvjete netom prije podesili. Za sve smjerove vjetra odabrali smo vrijednosti rubnih uvjeta stranice koja predstavlja ulaz vjetra u strujno polje.

13. Pokretanje rješavača

Rješavaču se pridaje broj iteracija kao znak kraja proračunavanja. Unijeli smo maksimum od 300 iteracija. (*Solve->Iterate*). Rješavač na grafičkom sučelju FLUENT-a prikazuje razliku vrijednosti trenutne i prethodne iteracije svake varijable. U numeričkim metodama kako iteracije teku tako te razlike, tj. "greške" opadaju dok sve ne postignu limite koji su im definirani (*Solve->Controls->Limits*). Za jednadžbu kontinuiteta, jednadžbe količine gibanja, transportne jednadžbe pojedinih kem. spojeva i turbulentnih modela postavljena je greška zadovoljenja od 0.001, a za jednadžbu očuvanja energije 0.000001. Težnju grešaka ka sve manjim vrijednostima nazivamo, a dosad smo već i nazivali, "**konvergencija**". Konvergencije pojedinih jednadžbi, osim tekstualnim zapisom, možemo pratiti grafičkim prikazom ovisnosti konvergencije i broja iteracija tzv. **Ostataka** (eng. *Residuals*). (*Solve->Monitors->Residuals->Plot*) kao prikazano na slici 3.6.2.

Slika 3.6.2. Prikaz panela *Residuals*

Nakon uspješne konvergencije svih jednadžbi tj. postizanja svih limita rješavač je riješio sustav jednadžbi.

14. Pregled rezultata

Dobivši rezultate možemo analizirati rezultate nad cijelim područjem domene kao što je prikazano u poglavlju 4. Pregledom, tj. analizom rezultata moguće je uočiti eventualne propuste u pripremi fizičkog modela ili samim odabirom određenih parametara.

15. Snimanje rezultata

16. Adaptacija

Na početku je bolje krenuti u modeliranje sa nešto grubljom mrežom kako bi konvergencija trajala kraće. Kasnije tijekom analize moguće je ugušćivati mrežu, tj. vršiti adaptaciju za dobivanje točnijih rješenja na željenim područjima domene (manji gradijenti brzina, bolji prikaz difuzije onečišćivača, itd.). Adaptacija koju smo proveli bazirala se na gradijentima brzine nad područjem (**maskom**) značajnih koncentracija onečišćivača. Takvom adaptacijom bolje je razlučeno

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 65
		Listova : 81

područje difuzije onečišćenja. Također je izvršena adaptacija nad vrhom dimnjaka (površinom izlaznog presjeka efluenata iz dimnjaka) kako bi se dobilo na većem broju čvorova nad područjem iz kojeg izvire kemijski spojevi. Takva adaptacija po rubovima (eng. *Boundary adaption*) primjenjena je tri puta za tri ćelije nad dimnjakom, potom za dvije i na kraju za jednu.

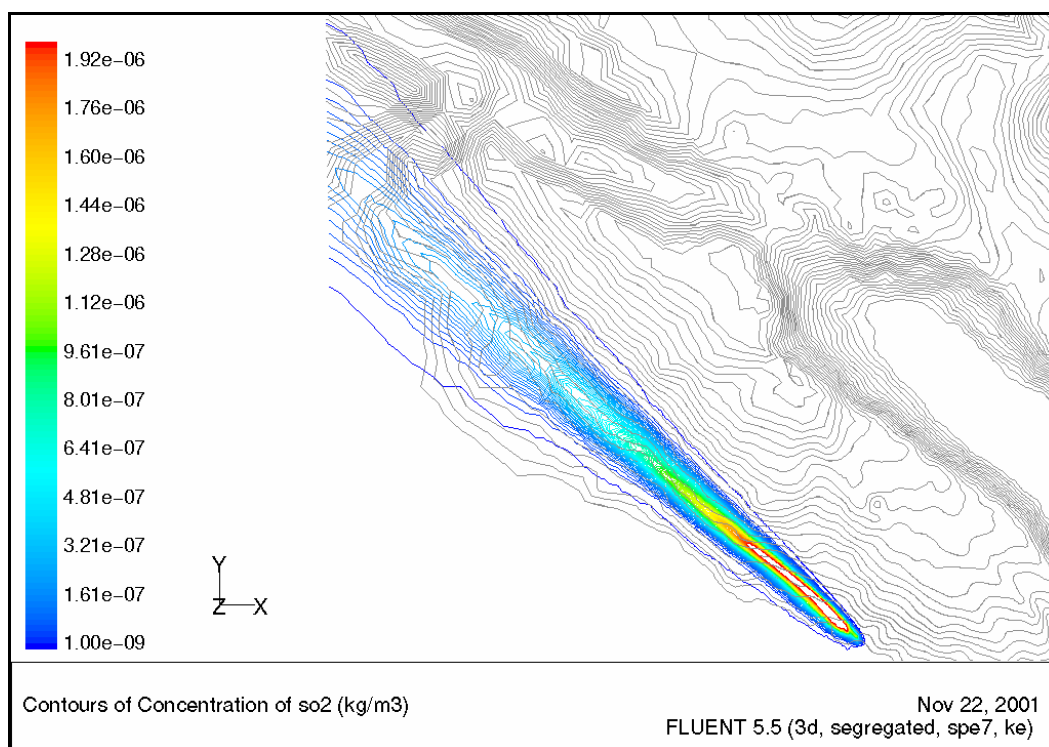
Nakon izvršene adaptacije mreže prema rješenjem dobivenih rezultata ponovimo postupak pokretanja rješavača bez da smo prije inicijalizirali domenu. Time nastavljamo iz trenutka gdje je prethodna iteracija završila (skokovi u ostacima (*residuals*) Slika 3.6.2.)

6. PRIKAZ REZULTATA

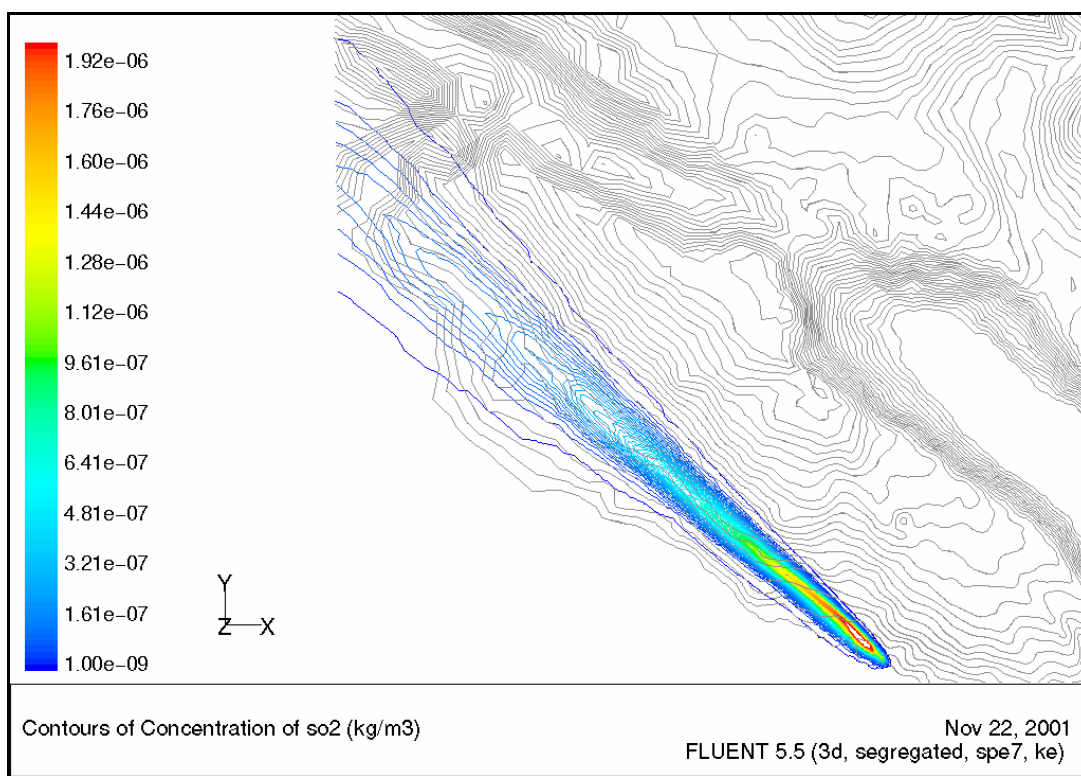
6.1. PRIKAZ PRIZEMNIH KONCENTRACIJA

Prikazat ćemo koncentracije sumpor-(IV)oksida kroz svih pet smjerova vjetra. Ostali onečišćivači neće biti prikazani jer su za rasprostiranje onečišćivača odgovorne iste transportne jednačbe. Jedina uočljiva razlika je u koncentracijama, koje promatrane za istu točku prostora, poprimaju drugačije vrijednosti zavisno od onečišćivača. Kao potvrdu prikazat ćemo kasnije usporedbu sumpor-(IV)oksida (SO_2), ugljik-(IV)oksida (CO_2) i dušika (N_2) Slika 6.1.X.

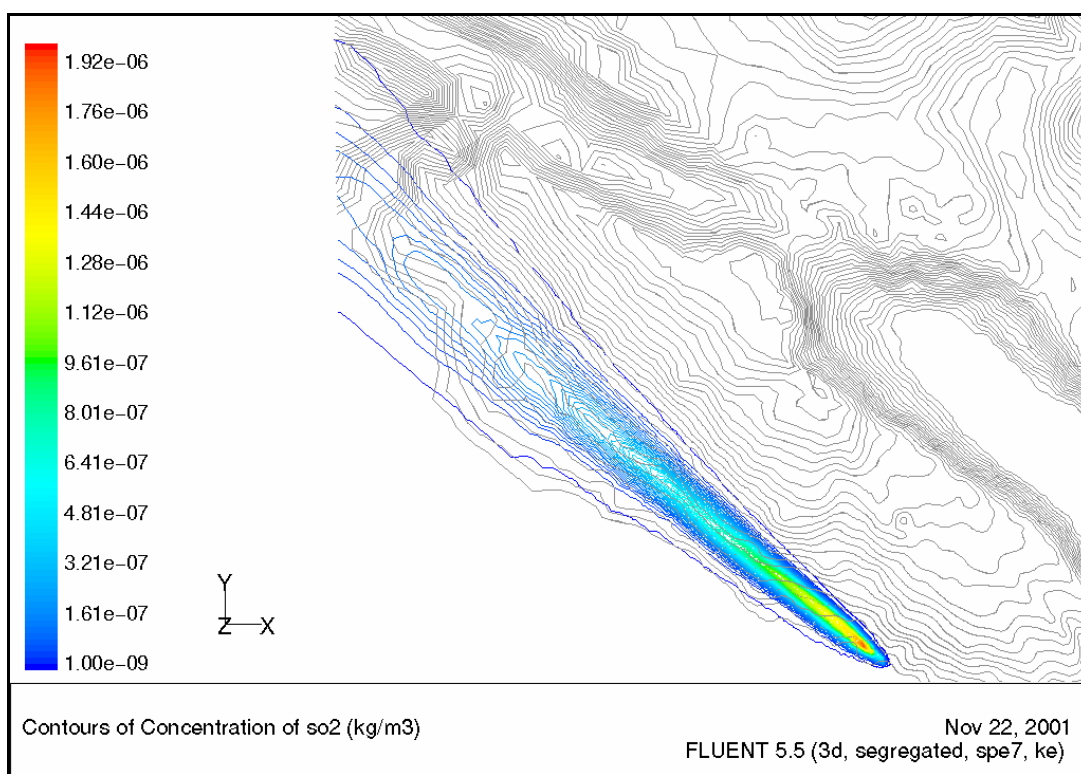
6.1.1. Smjer vjetra (x,y)=(-1,1)



Slika 6.1.1. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (-1,1) te brzinu vjetra od 2.5 ms^{-1}

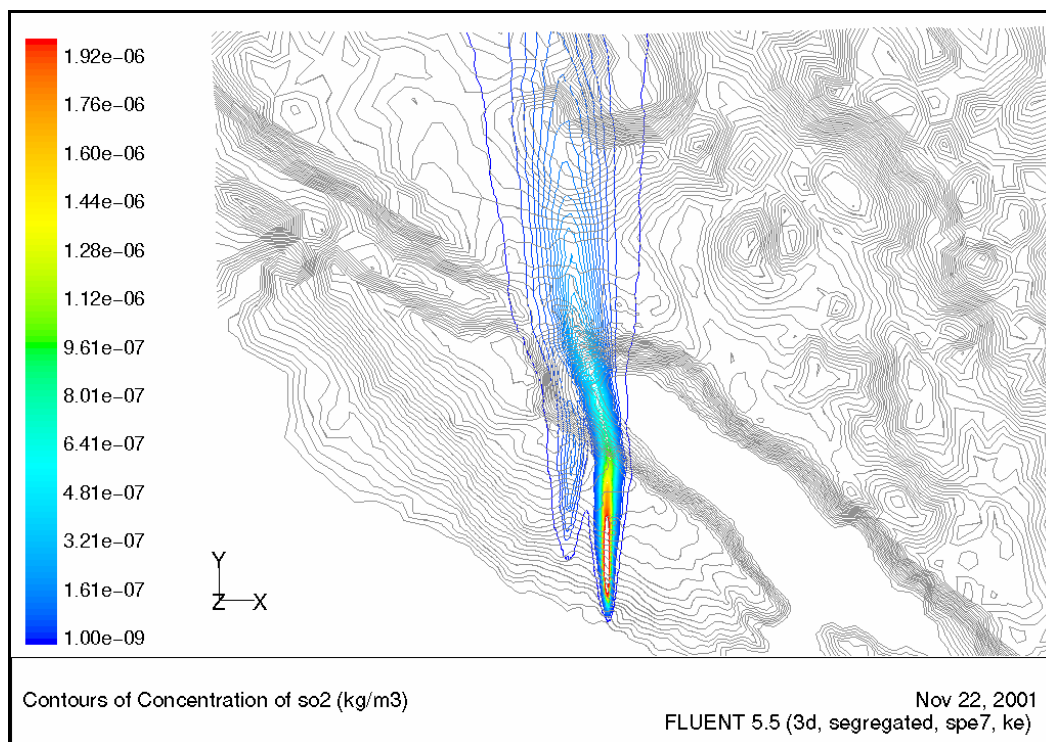


Slika 6.1.2. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (-1,1) te brzinu vjetra od 5 ms^{-1}

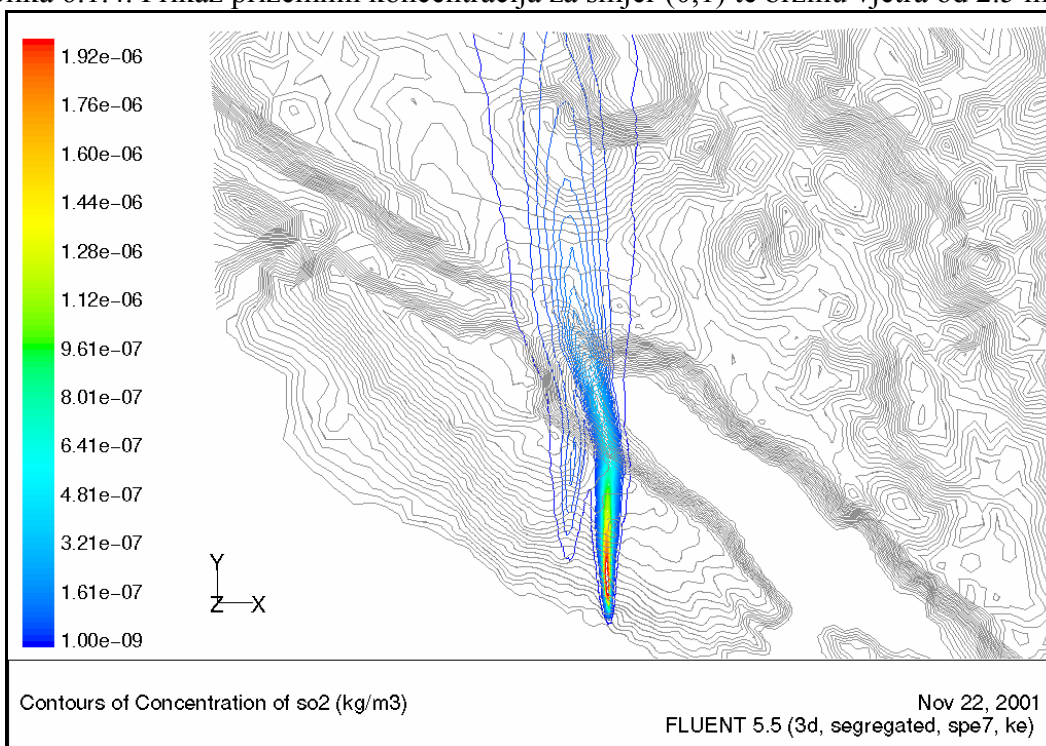


Slika 6.1.3. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (-1,1) te brzinu vjetra od 10 ms^{-1}

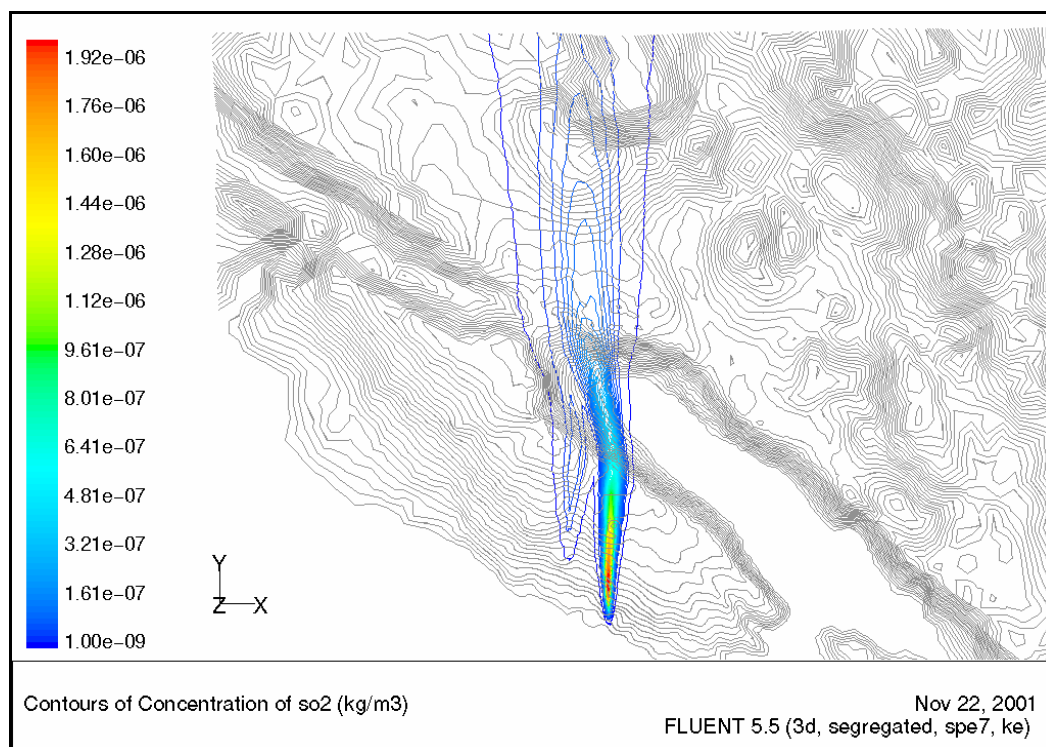
6.1.2. Smjer vjetra (x,y)=(0,1)



Slika 6.1.4. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (0,1) te brzinu vjetra od 2.5 ms⁻¹

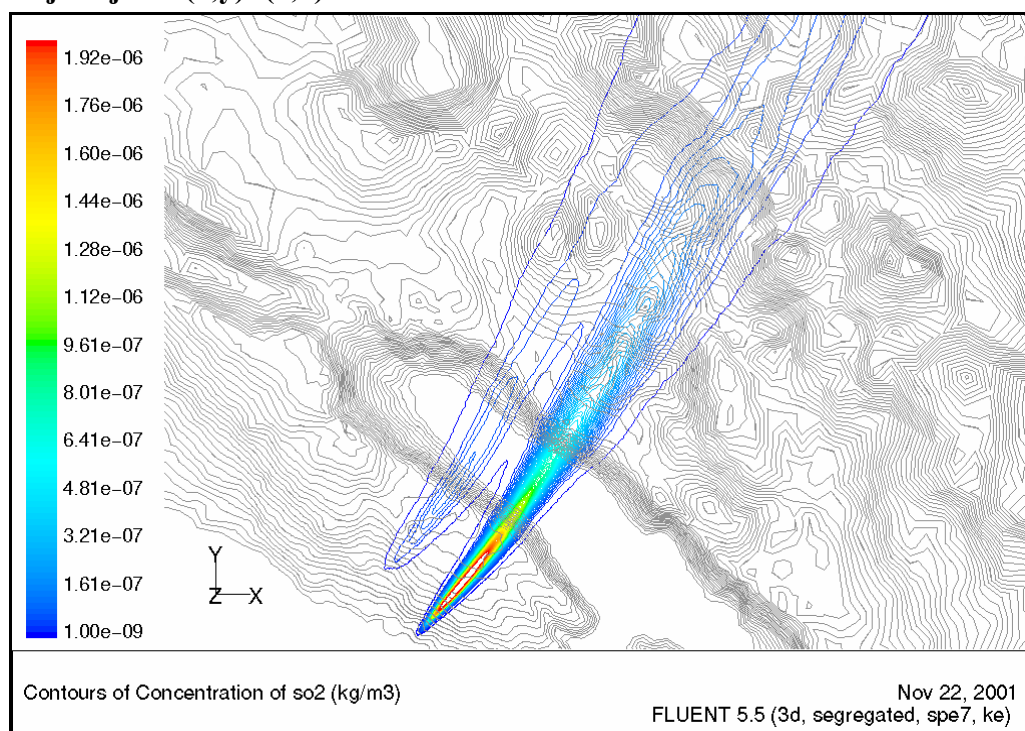


Slika 6.1.5. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (0,1) te brzinu vjetra od 5 ms⁻¹

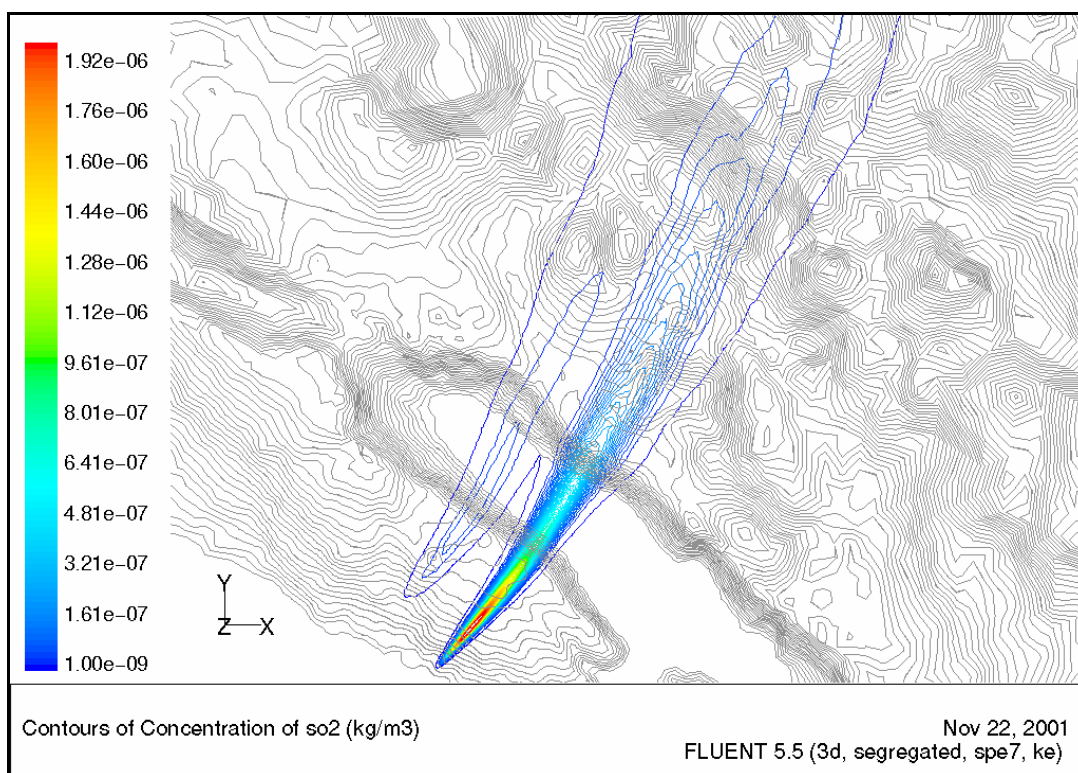


Slika 6.1.6. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (0,1) te brzinu vjetra od 10 ms^{-1}

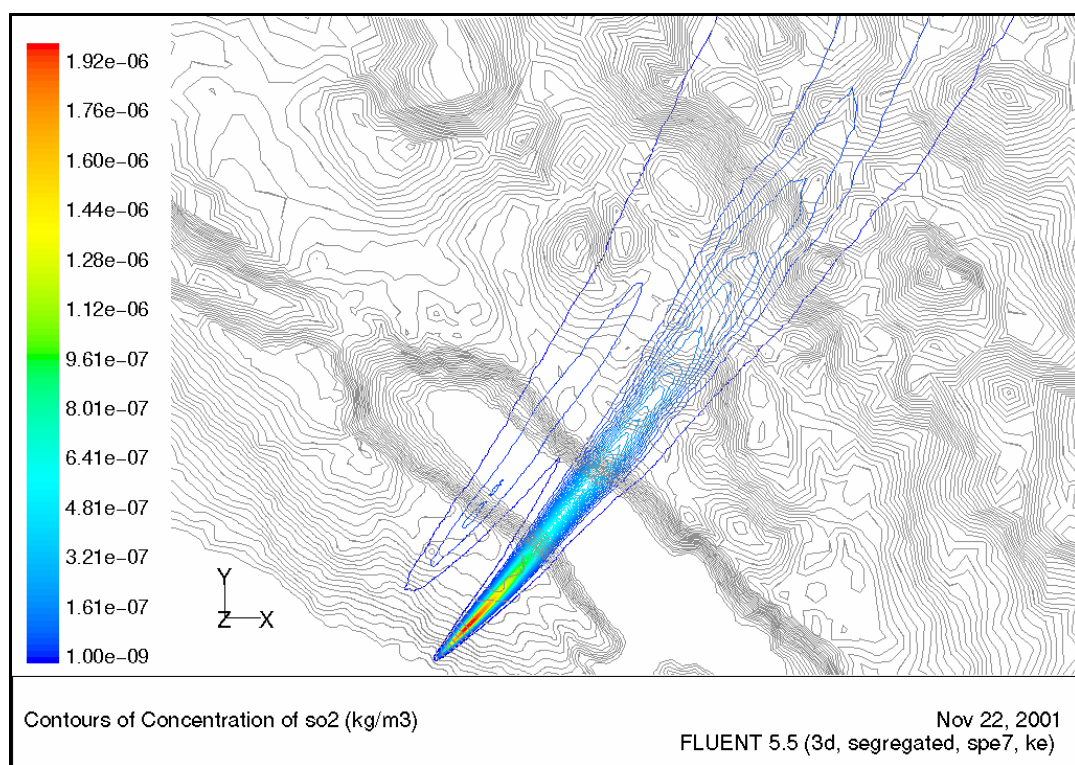
6.1.3. Smjer vjetra (x,y)=(1,1)



Slika 6.1.7. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,1) te brzinu vjetra od 2.5 ms^{-1}

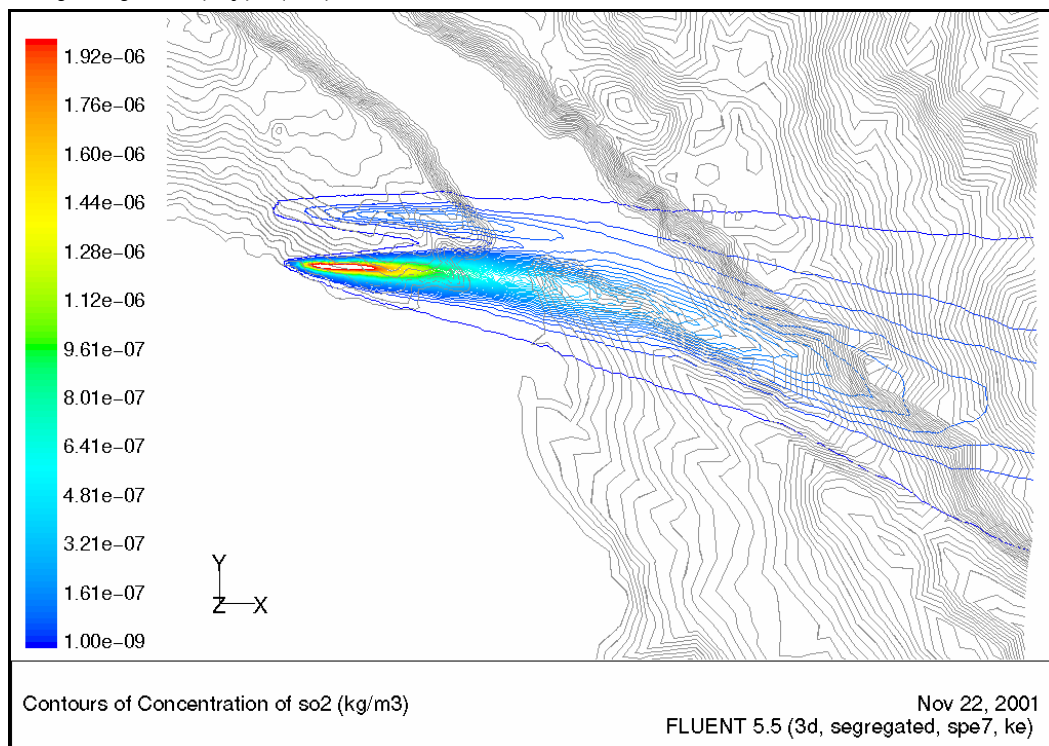


Slika 6.1.8. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,1) te brzinu vjetra od 5 ms^{-1}

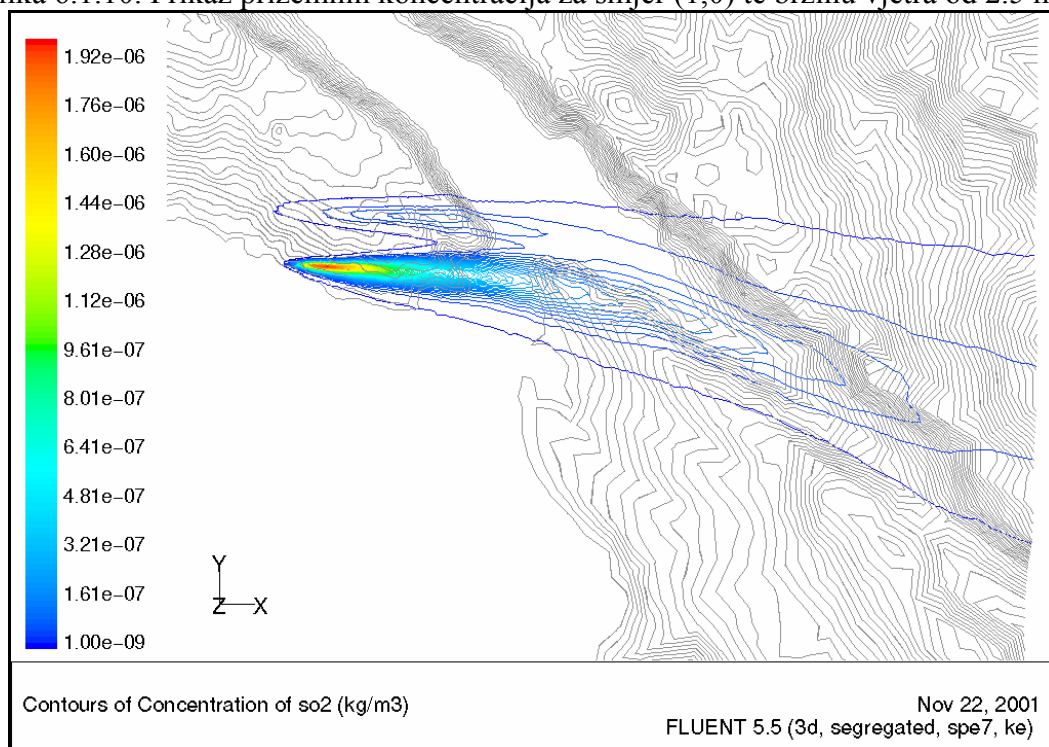


Slika 6.1.9. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,1) te brzinu vjetra od 10 ms^{-1}

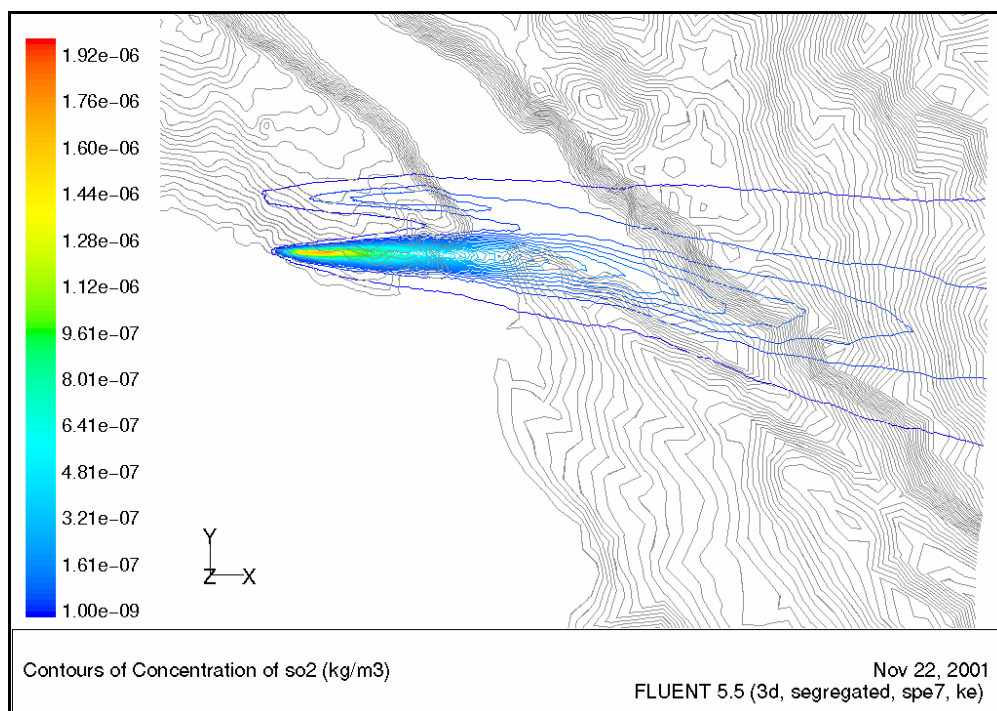
6.1.4. Smjer vjetra (x,y)=(1,0)



Slika 6.1.10. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,0) te brzinu vjetra od 2.5 ms^{-1}

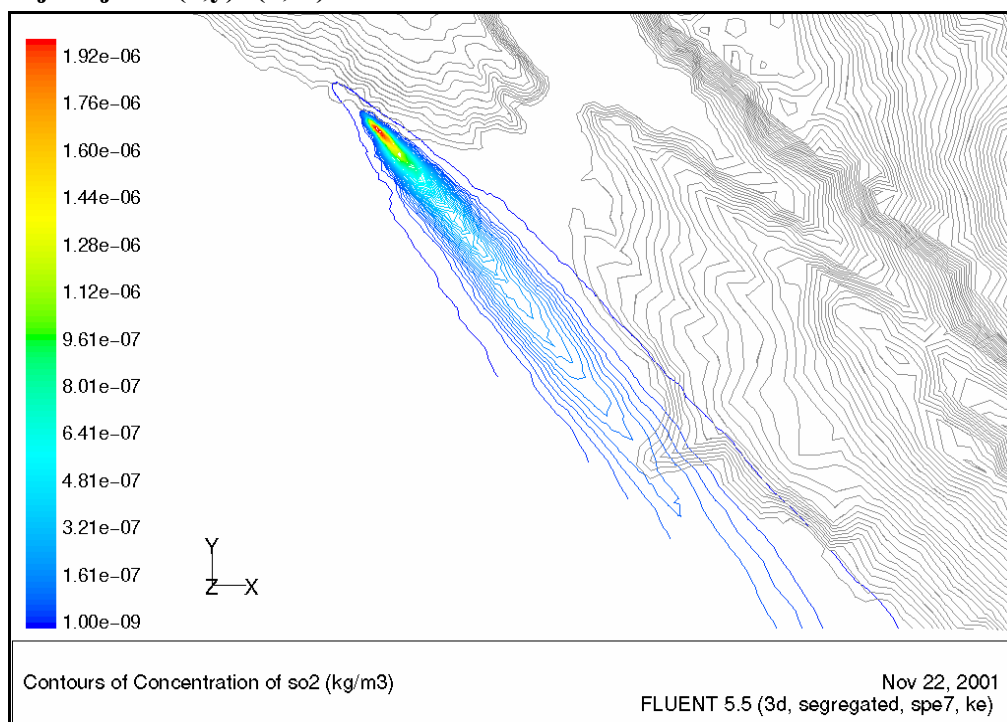


Slika 6.1.11. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,0) te brzinu vjetra od 5 ms^{-1}

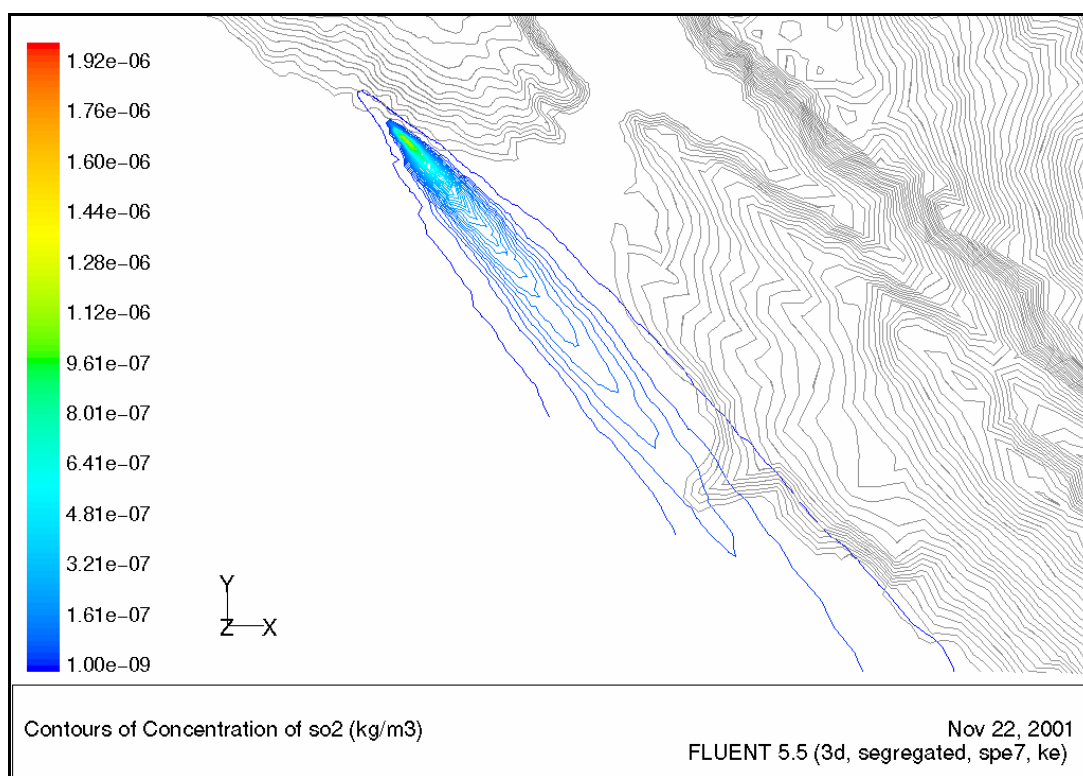


Slika 6.1.12. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,0) te brzinu vjetra od 10 ms⁻¹

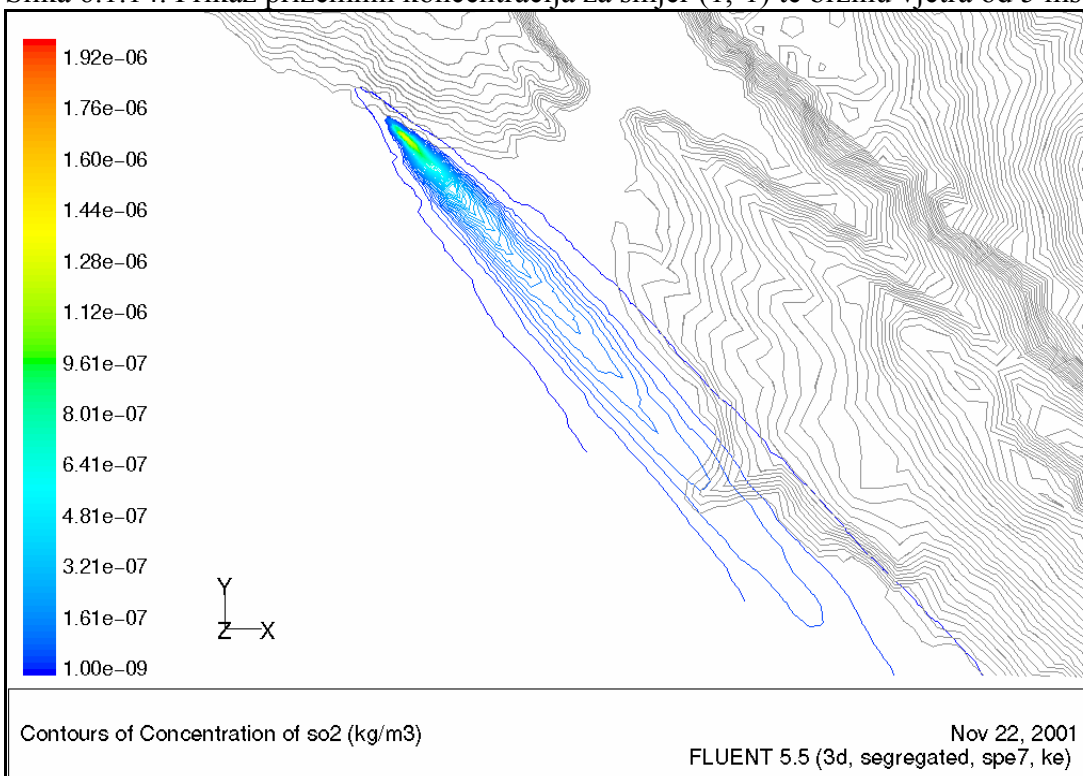
6.1.5. Smjer vjetra (x,y)=(1,-1)



Slika 6.1.13. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (-1,1) te brzinu vjetra od 2.5 ms⁻¹



Slika 6.1.14. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,-1) te brzinu vjetra od 5 ms^{-1}



Slika 6.1.15. Prikaz prizemnih koncentracija za smjer (1,-1) te brzinu vjetra od 10 ms^{-1}

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 74
		Listova : 81

Na temelju ovdje prikazanih slika moguće je uočiti bočnu disperziju na svakom od ispitanih vjetrova. Horizontalna disperzija je pri svim nizstrujnim udaljenostima skoro linearna te je također promjena disperzije, s promjenom brzine vjetra, skoro neznatna. Ovakvi rezultati opravdavaju Pasquill-Guiford-Turnerove koeficijente horizontalne disperzije sa [slike 2.7](#). To je vidljivo na primjeru vjetra (1,-1) gdje vjetar puše prema moru koji se može poistovijetiti sa ravnim terenom.

Na primjeru prizemnih koncentracija iz dimnjaka FCC za vjetar (1,1) uočeno je nešto manja prizemna koncentracija pri većim brzinama vjetra (Slika 6.1.7., 6.1.8., 6.1.9.). Uočeno smanjenje vertikalne disperzije, s povećanjem brzine, ovisi o povećanju advekcije i time slabijeg pada onečišćenja prema tlu.

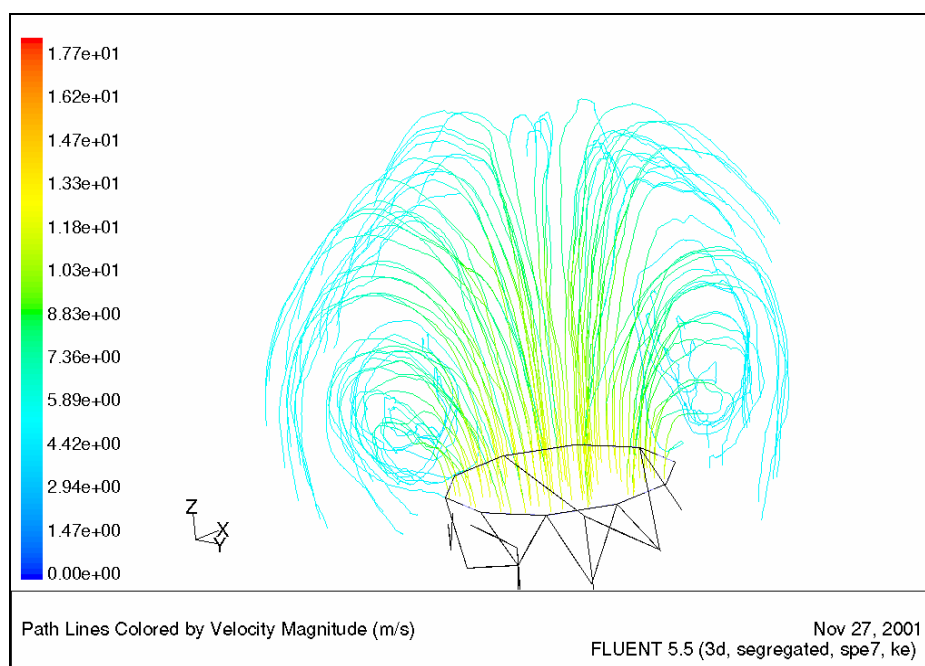
Naročito je važno primjetiti već spomenutu specifičnost korištenja numeričkog modeliranja, a to je kako se na ovaj način dobijaju trajektorije dima u direktnoj zavisnosti od polja brzina u box modelu. Uočljivo je na slikama za vjetrove (0,1) i (1,0) gdje na dvije različite strane Bakarskog zaljeva perjanica skreće svoju putanju paralelno zaljevu te unutar zaljeva. Također uočljiv je nešto slabiji nagib putanje kod vjetra (1,1), a za veće brzine vjetra.

6.2 PRIKAZ KONCENTRACIJA U POPREČNOM PRESJEKU

Odabrali smo primjer smjera vjetra (-1,1) zbog toga što je u tom smjeru prvo veće nastanjeno naselje (Kostrena) te je od iznimne važnosti poznavati koncentracije onečišćenja prvenstveno u tom smjeru. Smjer vjetra u ovom primjeru skoro se poklapa sa smjerom udaljenosti dvaju dimnjaka te će zbog toga na koncentraciju u poprečnom presjeku utjecati zajednički efluenat iz dimnjaka G4+G5 i FCC, ali tek nakon što dim iz dimnjaka G4+G5 dostigne dimnjak FCC.

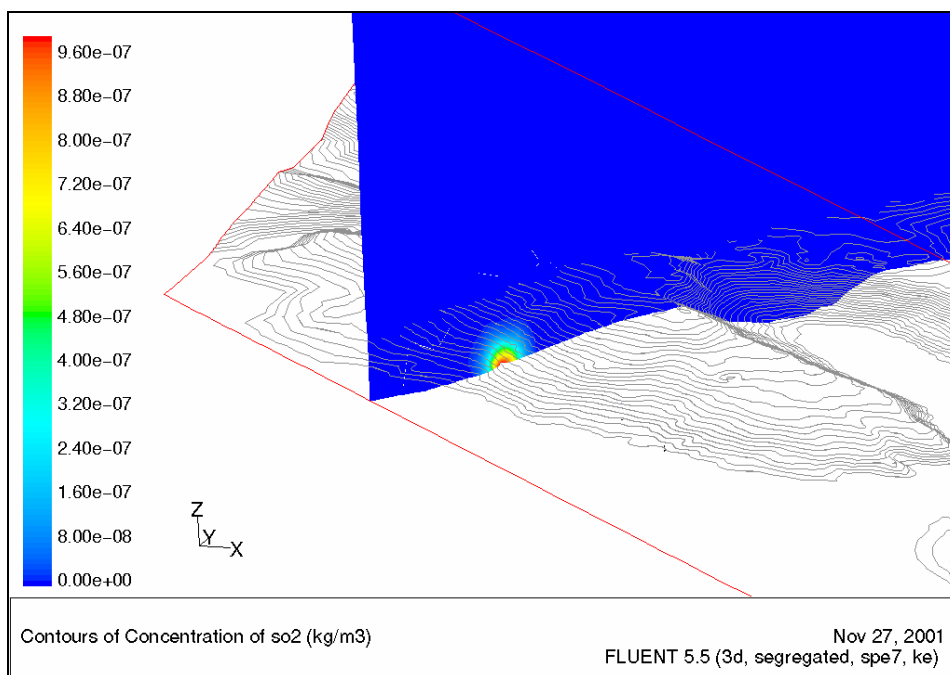
Promatrajući koncentracije efluenata i vektore brzina na poprečnom presjeku od bilo kojeg od oba dimnjaka pa sve do udaljenosti od nekoliko metara od njih uočen je **par suprotno - rotirajućih vrtloga** (eng. *Counter-rotating vortex pair*) poznatiji pod nazivom "konjska potkova". Nakon par metara taj vrtlog već isčezava zbog jake advekcije vjetra. Nastanak vrtloga nizstrujno od dimnjaka, u primjerima ulaska efluenata iz dimnjaka u poprečnu struju vjetra, objašnjava se time što struja vjetra nejednoliko prodire kroz rubni sloj poprečnog presjeka perjanice dima. Na rubnim djelovima dimnjaka u poprečnom presjeku na struju vjetra utjecaj struja vjetra je puno jači, te su čestice na tim djelovima jače nošene vjetrom, nego one čestice efluenata koje izlaze iz unutrašnjeg djelu dimnjaka. Time vrtlog obuhvaća čestice efluenata koje su bliže rubu (Slika 6.2.1.). U prilogu se nalaze animacije vrtloga te je iz njih sasvim vidljiv nastanak vrtloga i razdvajanje perjanice na dva dijela.

Razlog što vrtlog isčezava sa većim udaljenostima, a ne bi trebao sukladno istraživanjima koja govore u prilog opstanka vrtloga na puno veće nizstrujne udaljenosti (do 15-20 visina dimnjaka nizstrujno), možemo uočiti u još uvijek pregruboj mreži. Gruba mreža na stranicama gdje vjetar ulazi u domenu jasno upućuje i odražava se na nedovoljnu točnost izračunatog profila vjetra u cijelom strujnom polju (brzina vjetra na receptorskoj visini od 10 m u blizini dimnjaka ne odgovara predviđenoj brzini od 2.5 ms^{-1} , već iznosi $4-5 \text{ ms}^{-1}$).

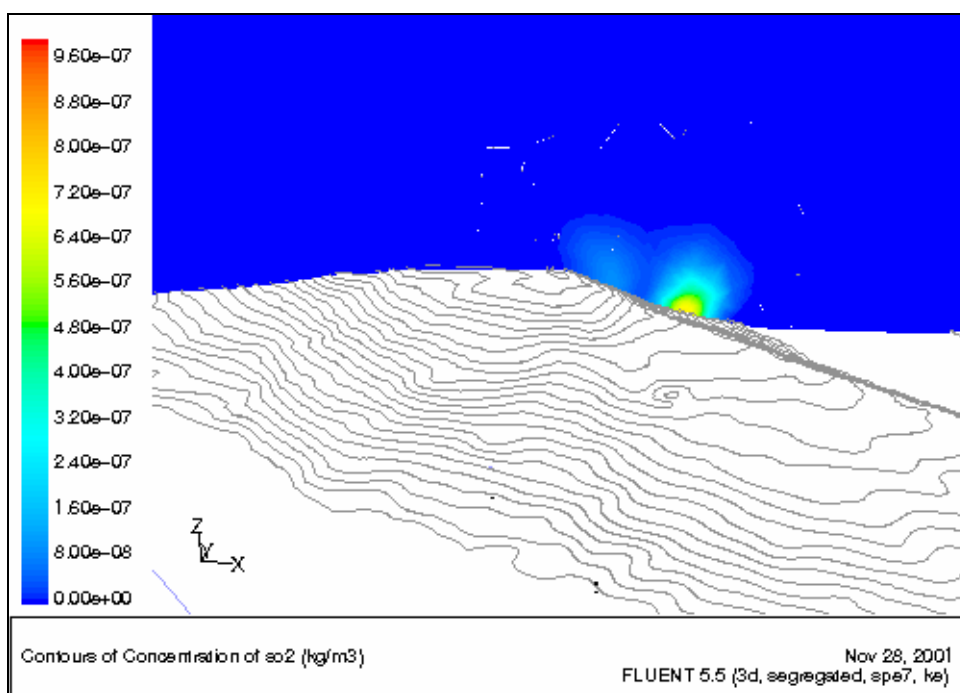


Slika 6.2.1. Par suprotno - rotirajućih vrtloga

Približavanjem dimnjaku FCC uočen je neznatan pomak središnjice dima prema njemu. Nastavkom promatranja uočljivo je kako koncentracije opadaju, a maksimumi na svakom presjeku se nalaze na terenu (Slika 6.2.2.). Takav rezultat moguće je objasniti laganim povišenjem terena koji ne dozvoljava podizanje dima te se dim drži terena. Isto je primjećeno i kod drugih smjerova vjetra (Slika 6.2.3. i animacija za smjer (0,1) u prilogu).



Slika 6.2.2. Prikaz koncentracija u poprečnom presjeku 1700 m od dimnjaka G4+G5



Slika 6.2.2. Prikaz koncentracija u poprečnom presjeku 1800 m od dimnjaka G4+G5

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 77
		Listova : 81

7. ZAKLJUČAK

Danas, u svakom većem gradu postoje industrijski kompleksi koji nesumljivo, barem u malim količinama, zagađuju okoliš. Zagađenost svuda oko nas potaknulo je na razmišljanje brojne organizacije širom svijeta da učine napore kako bi se osigurala ljepša budućnost ljudskog stanovništva i okoliša u kojem živimo. Krenula je bujica saznanja, događaja pa i nesretnih okolnosti vezanih uz istraživanja o onečišćivačima. Pojavili su se Pasquill, Guifford, Weiss, Briggs te ukazali na moguća rješenja za predviđanje onečišćenja (koristimo njihove jednadžbe i dan danas). Osmišljeni su zakoni koji utječu na prevenciju zagađenja i prihvaćeni modeli disperzije koji će propise i provoditi u djelo. Koristimo se danas čak i najsuvremenijim pomagalicama kao što su superbrza računala te Lidar sisteme za vremensko praćenje onečišćenja absorpcijom svjetlosnih snopova. Naizgled čini se da je praćenje atmosferskog onečišćenja u našim rukama te da su čak i matematički modeli zadovoljavajući. Ali slika u prirodi izgleda sasvim drugačije. Potrebno je još mnogo rada kako bismo utvrdili zaista ono što jest u prirodi. Priroda je moćna, ne zanemaruje ništa nasuprot nama koji zanemarujući, ograničavajući, pretpostavljajući (krivo) dolazimo do samo jedne od brojnih alternacija prirode. Sve smo to već u teoriji modela disperzije primjetili pa kao da smo to i zaboravili.

Sva rješenja postavljenih jednadžbi složenog kemijsko – fizikalnog sustava pred nama dobivena su strogim ograničenjima. Koristili smo moćne alate i na kraju nismo dobili potpuno sve što smo htjeli. Perjanica se niti kod jednog smjera vjetra nije podignula sukladno očekivanjima. Vrtlog je nestao već pri par prvim nizstrujnih metara. Ali, neke od karakteristika i specifičnosti smo uočili. Uočen je utjecaj strujnog polja na skretanje perjanice dima što ne možemo uzeti za gotov oblik njene trajektorije. Uočena je specifičnost utjecaja jedne perjanice na drugu. Što nije razlog da će takav utjecaj postojati i u nekim sličnim, ali neznatnim razlikama drugačijim modelima. Možda će se u nastavku istraživanja perjanica ipak podići dovoljno visoko. Možda će sve na kraju izgledati znatno drugačije kada se ustanovi pravi profil vjetra te dovoljno ugusti mreža uz teren.

Činjenica je da smo napravili mnogo propusta i da je potrebno još mnogo dorade i saznanja. Potrebno je obraditi vrtlog u kompleksnom terenu. Na tom području već niz godina rade Xiomang Zhang i Abdul Ghuinem sa M.I.T.-a te je napravljen velik pomak u njegovom proučavanju. Najveći je zahvat kompleksni teren sa mnogo izvora onečišćenja. Toliko je kompleksan da je potrebno proučavati zasebno svaku promjenu početnih parametara u zavisnosti od ostalih. Također, naročito je važno promatrati penetracijski sloj perjanice te utvrditi pravu ovisnost brzine ulaska. Konačno, idealno bi bilo ne izostaviti ijedan utjecaj iz atmosfere, ijednu promjenu početnih uvjeta te sagledavati sustav kao nestacionarni zbog promjenjivih smjerova vjetra na našem području. Nastavak jednog takvog istraživanja uvelike premašuje ovu diplomsku radnju.

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 78
		Listova : 81

8. LITERATURA

1. Г.Н. Абрамовича, Теория Турбулентных Струй, Наука, Москва, 1984.
2. ALOFT model, The Smoke plume
3. ANT – Laboratorij za analitiku i toksikologiju d.o.o., Zapisnik br. 99016-1E o mjerenjima i analizama emisija onečišćujućih tvari u poduzeću INA-Industrija nafte d.d. Rafinerija nafte Rijeka, Kostrena – pogon energane, studeni 1998. god.
4. ANT – Laboratorij za analitiku i toksikologiju d.o.o., Zapisnik br. 99016-3E o mjerenjima i analizama emisija onečišćujućih tvari u poduzeću INA-Industrija nafte d.d. Rafinerija nafte Rijeka, Kostrena – FCC POSTROJENJE, prosinac 1998. god.
5. Beychok, Milton R. Error propagation in air dispersion modelling, 2001. god., (<http://www.air-dispersion.com/default.htm>)
6. Chang, Joseph C., Vongsaard, Jearanai, Development of a Generalized Numerical Plume Trajectory Model, CSI 801 Term Project, 1998, (<http://weatherdoctor.terrashare.com/geography373/index.htm>)
7. Dai, Z., Tseng, L.K., i Faeth, G.M., Mixture-fraction and velocity statistics in fully-developed plumes, Combustion Institute/Eastern States Section, Chemical and Physical Processes in Combustion, Technical Meeting, Princeton, NJ, listopad 1993. god., str. 173-176, (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire93/art031.html>)
8. Dispersion of airborne effluents, Lara Environmental, Inc., 1997. god., (<http://ce597n.www.ecn.purdue.edu/~wenning/project/index.whtml>)
9. Drvodelić, Milan, Englesko Hrvatsko-srpski rječnik, Školska knjiga, Zagreb, 1962. god.
10. Filipović, Rudolf, Englesko Hrvatskosrpski Rječnik, treće izdanje, ZORA, Zagreb, 1963. god.
11. FLUENT 5 User's guide Volume 2, Fluent Incorporated, 1998. god.
12. FLUENT 5 User's guide Volume 3, Fluent Incorporated, 1998. god.
13. Grupa autora, Rječnik Elektronike englesko-hrvatski i hrvatsko-engleski, LOGOS, Split, 1991. god.
14. Heidorn, K.C., A Chronology of Important Events In the History of Air Pollution Meteorology to 1970, Air Quality and Meteorology Section, Air Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario, M5S 1Z8, Canada, (<http://www.ametsoc.org/AMS/sloan/cleanair/pdfdocs/heidorn.pdf>)
15. Heidorn, Keith C., Lecture 13. Diffusion Modelling Concepts – Geography 373 – Applied Climatology, University of Victoria, ljetni semestar 2001. god., (<http://weatherdoctor.terrashare.com/geography373/index.htm>)
16. Hwang, Robert R., Numerical simulation on Turbulent Jets in a crossflow of stratified fluids, Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan
17. Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II – Description of model algorithms, EPA-454/B-95/003b, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, listopad 1995. god., (<http://www.epa.gov/ttn/scram/userg/regmod/isc3v2.pdf>)

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 79
		Listova : 81

18. Jirka, Gerhard H., Five asymptotic regimes of a round buoyant jet in stratified crossflow, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, 1999.god., (<http://www.iahr.nl/membersonly/grazproceedings99/doc/000/000/234.htm>)
19. Kiš, Miroslav, Englesko-hrvatski i hrvatsko-engleski informatički rječnik, Naklada Ljevak, Zagreb, 2000. god.
20. Lavelle, J. W., Buoyancy-driven plumes in rotating, stratified cross flows: Plume dependence on rotation, turbulent mixing, and cross-flow strength, National Oceanic and Atmospheric Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, Washington, *Journal of Geophysical Research*, 102(C2), 3405-3420 (1997), (<http://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/lave1687/model.shtml>)
21. Lee, J.H.W., Mixing of submerged buoyant jets: advected puffs and thermals, Departement of Civil Engineering, The University of Hong Kong, prosinac 2000. god., (http://www.hku.hk/civil/envhydraulics/pro_03.htm)
22. Revised (4) Report on the Algorithmic Language Scheme, (<http://swissnet.ai.mit.edu/~jaffer>)
23. Robins,A.G. University of Surrey, Apsley,D.D., National Power, Carruthers,D.J., McHugh,C.A. i Dyster,S.J. CERC Ltd., Plume rise model specification, ADMS 3 Technical Specification, 2000. god., (http://www.cerc.co.uk/software/pubs/ADMS3TechSpec/P11_02H_00.pdf)
24. Sangras, R. & Faeth,G.M., Buoyant turbulent jets and plumes: III Round turbulent nonbuoyant starting jets and puffs and buoyant starting plumes and thermals, U.S. Departement of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Laboratory for Building and Fire Research (NIST Grant No. 60NANB8D0081), 1999. god., (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire99/art155.html>)
25. SCHETZ, A. Joseph, Injection and mixing in turbulent flow, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980. god. (rusko izdanje, MIR, Moskva, 1984. god.)
26. SCREEN3 Model User's Guide, EPA-454/B-95-004, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, listopad 1995. god., (<http://www.epa.gov/ttn/scram/userg/screen/screen3d.pdf>)
27. Socolofs, Lecture 2: The Diffusion Equation – Mixing, Transport, and Transformation, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Oktobar 2001. god., (http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/ifh/stud/StoTra/ws/downloads/Lectures/EFM1/chap3/efm1_4.pdf)
28. Sonin, A. Ain, Fundamental Laws of Motion for Particles, Material Volumes, and Control Volumes, Departement of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, August 2001. god., (http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/fundamental_laws.pdf)
29. Sonin, A. Ain,Equation of Motion for Viscous Fluids (8th edition), Departement of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, August 2001. god., (http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/viscous_flow_eqn.pdf)
30. Sonin, A. Ain, The Physical Basis of DIMENSIONAL ANALYSIS (2nd edition), Departement of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001. god., (http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/DA_unified.pdf)

ZAVOD ZA TEH. MEH. I RAČ. INŽ.	DIPLOMSKI RAD	List : 80
		Listova : 81

31. Sopta, Luka, MATEMATIKA II, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1995. god.
32. Tehnička Enciklopedija 8 (Meh-Mos) str. 112-137, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1982. god.
33. Westbrook, James A., Air Dispersion Models: Tools to Assess Impacts from Pollution Sources, American Bar Association, Natural Resources & Environment, Vol 13, No. 4, 1999. god., (<http://www.wei-air.com/article.pdf>)
34. Zhang, Xiaoming & Ghoinem, Ahmed F., A computer model for the rise and dispersion of wind-blown, buoyancy-driven plumes – II. Linearly stratified atmosphere, United States Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR-93-637, 1993. god., (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire93/art082.html>)
35. Zhang, Xiaoming & Ghoinem, Ahmed F., A computer model for the rise and dispersion of wind-blown, buoyancy-driven plumes – I. Neutrally stratified atmosphere, Pergamon Press Ltd., *Atmospheric Environment*, Vol. 27A, No. 15, str. 2295-2311, 1993. god., (<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire93/art045.html>)

9. PRILOZI

1. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (-1,1) i brzinu 2.5 ms⁻¹ ([anim.](#))
2. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (-1,1) i brzinu 5 ms⁻¹ ([anim.](#))
3. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (-1,1) i brzinu 10 ms⁻¹ ([anim.](#))

4. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (0,1) i brzinu 2.5 ms⁻¹ ([anim.](#))
5. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (0,1) i brzinu 5 ms⁻¹ ([anim.](#))
6. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (0,1) i brzinu 10 ms⁻¹ ([anim.](#))

7. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,1) i brzinu 2.5 ms⁻¹ ([anim.](#))
8. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,1) i brzinu 5 ms⁻¹ ([anim.](#))
9. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,1) i brzinu 10 ms⁻¹ ([anim.](#))

10. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,0) i brzinu 2.5 ms⁻¹ ([anim.](#))
11. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,0) i brzinu 5 ms⁻¹ ([anim.](#))
12. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,0) i brzinu 10 ms⁻¹ ([anim.](#))

13. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,-1) i brzinu 2.5 ms⁻¹ ([anim.](#))
14. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,-1) i brzinu 5 ms⁻¹ ([anim.](#))
15. Prizemne koncentracije SO₂ za vjetar (1,-1) i brzinu 10 ms⁻¹ ([anim.](#))

16. Koncentracije u poprečnim nizstrujnim presjecima za vjetar od 2.5 ms⁻¹ te smjer (-1,1) ([anim.](#))

17. Koncentracije u poprečnim nizstrujnim presjecima za vjetar od 2.5 ms⁻¹ te smjer (0,1) ([anim.](#))

18. Par suprotno – rotirajućih vrtloga ([animacija_1](#) step 10s; [animacija_2](#) step 20s)