

Analiza disperzije onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora u urbanoj sredini primjenom numeričkih metoda

Dominik Pavlović¹, Jakov Baleta¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, Hrvatska

Autor za korespondenciju: Jakov Baleta, baleta@simet.hr

Sažetak — Povećanje koncentracija onečišćujućih tvari u okolišu predstavlja ozbiljan rizik za ljudsko zdravlje i ekosustave. Suвременa tehnologija omogućuje nadzor i smanjenje emisija, čime se reducira i kontrolira negativan utjecaj na okoliš. Ovaj rad prikazuje primjenu numeričkih metoda kao alata za analizu onečišćujućih tvari u urbanim sredinama, s naglaskom na disperziju emisija iz stacionarnih izvora. Primjena numeričkih metoda provoditi će se kroz računalnu dinamiku fluida (RDF) gdje će se simulirati disperzija onečišćujućih tvari iz TE-TO Sisak i INA Rafinerije Sisak tijekom jednog reprezentativnog dana. Osim dobivenih podataka za industrijske izvore, zadat će se i meteorološki uvjeti koji su preuzeti iz numeričkih sustava za atmosferska istraživanja i prognoze vremena. Rezultati su prikazani u obliku rasprostranjenosti dimnih perjanica te koncentracije SO_2 i NO na različitim visinama. Treba naglasiti da se analizom pokazalo kako tijekom promatranog razdoblja nisu zabilježena prekoračenja graničnih vrijednosti za SO_2 u naseljenim zonama, što ukazuje na zadovoljavajuću kvalitetu zraka.

Ključne riječi — računalna dinamika fluida; disperzija onečišćujućih tvari; urbana sredina; emisije SO_2 ;

I. UVOD

Industrijski razvoj i porast svjetske populacije uzrokuju povećanu potrošnju energije, što rezultira emisijama onečišćujućih tvari koje negativno utječu na zdravlje ljudi i okoliš. Najveći udio energije i dalje se dobiva iz fosilnih goriva, čime se povećavaju koncentracije stakleničkih plinova i produkata izgaranja kao što su NO_x , SO_x i CO , što doprinosi globalnom zatopljenju, kiselim kišama i degradaciji zraka [1]. Zrak, voda i tlo izloženi su i prirodnim i antropogenim izvorima onečišćenja, pri čemu ljudske aktivnosti imaju dominantan utjecaj.

U ovom radu analizira se disperzija onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora pomoću metode kontrolnih volumena i računalne dinamike fluida. Učinkovitost RDF-a u modeliranju disperzije onečišćujućih tvari iz industrijskih dimnjaka u urbanoj sredini opisana je i potvrđena u literaturi [2], pri čemu ova studija predstavlja RDF simulaciju disperzije CO_2 iz termoelektrane u urbanom području. U navedenom radu je postignuto zadovoljavajuće slaganje simulacijskih i eksperimentalnih rezultata, gdje je pogreška simulacije jedan red veličine manja od pogreške mjerenja.

Simulacija u ovom radu provedena je za područje grada Siska koristeći emisijske podatke iz TE-TO Sisak i INA Rafinerije Sisak te meteorološke podatke iz WRF modela.

Poseban naglasak stavljen je na ispitivanje prostorne raspodjele koncentracija SO_2 i NO , s ciljem ocjene utjecaja industrije na kvalitetu zraka u urbanom okruženju. Rezultati simulacije analizirani su na različitim visinama domene, a rad uključuje opis korištenih postrojenja, matematičkog modela te postavki numeričkog proračuna. Na kraju su izneseni zaključci i preporuke za daljnja istraživanja.

II. OPIS URBANE SREDINE I INDUSTRIJSKIH IZVORA

Urbanu sredinu u radu predstavlja Grad Sisak, koji je ujedno i upravno središte Sisačko-moslavačke županije. Smješten je na jugoistočnom dijelu sjeverozapadne Hrvatske i prostire se na površini od $422,8 \text{ km}^2$ s oko 40 000 stanovnika. Zahvaljujući položaju uz plovne rijeke Savu, Kupu i Odru, Sisak je povijesno razvijao snažnu industriju, trgovinu i promet. U periodu industrijskog jačanja, najznačajniji utjecaj na okoliš su imala postrojenja koja su se nalazila u Rafineriji nafte (INA) te HEP-ova termoelektrana [3]. Navedene dvije industrije su ujedno i glavni izvor onečišćenja u radu.

III. MATEMATIČKI MODEL

Razvijene su različite numeričke metode za rješavanje složenih problema u računalnoj dinamici fluida. Među njima, metoda konačnih volumena numerička je tehnika koja se koristi za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje predstavljaju zakone očuvanja, dijeleći područje na kontrolne volumene i osiguravajući ravnotežu tokova na njihovim granicama. Zahvaljujući svojim konzervativnim svojstvima i mogućnosti primjene na strukturiranim i nestrukturiranim mrežama, metoda konačnih volumena izuzetno je pogodna za analizu problema koji uključuju strujanje fluida, prijenos topline i difuziju [4].

U računalnoj dinamici fluida, kako bi simulacije bile realistične i točne, važno je osigurati očuvanje nekoliko ključnih zakona fizike, a to su: zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja energije, i zakon očuvanja kemijske vrste. Standardna transportna jednadžba predstavlja opći matematički oblik koji objedinjuje zakone očuvanja u analizi strujanja fluida. Ova metoda omogućava precizno modeliranje prijenosa tvari, energije, gibanja i kemijskih reakcija unutar fluida, osiguravajući da su svi zakoni pravilno očuvani tijekom simulacije, čime se postiže visoka preciznost i realističnost u rezultatima. Kroz matematički model, računalna dinamika fluida rješava algebarske oblike opće transportne jednadžbe (1), koja se može prikazati sljedećim izrazom:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \phi)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi(\phi). \quad (1)$$

U navedenoj jednačbi, prvi član s lijeve strane predstavlja nestacionarni član, koji opisuje lokalnu vremensku promjenu promatranog fizikalnog svojstva. Drugi član predstavlja konvekcijski doprinos, odnosno transport svojstva uzrokovan strujanjem fluida. Treći član je difuzijski član, koji predstavlja difuzijski tok kroz stranice prostornog volumena, dok zadnji član označava volumensku gustoću nastajanja ili nestajanja fizikalnog svojstva [1].

IV. POSTAVKE NUMERIČKE SIMULACIJE

Simulacija se provodi u komercijalnom računalnom paketu AVL Fire® koji predstavlja industrijski standard za računalnu dinamiku fluida u području motora s unutrašnjim izgaranjem. Upotrebom ovog programa potrebno je odrediti geometriju, postaviti mrežu kontrolnih volumena, zadati početne i rubne uvjete. Postavke simulacije uključuju parametre ulaznog vjetra, pri čemu su podaci preuzeti iz meteorološkog modela WRF (eng. *Weather Research and Forecasting*), koji se koristi za prognoze i atmosferska istraživanja.

Simulacija se provodi za urbano područje grada Siska, pri čemu je domena s definiranim rubnim uvjetima oblikovana prema Sl. 1 i koordinatnim točkama grada (Tablica 1).



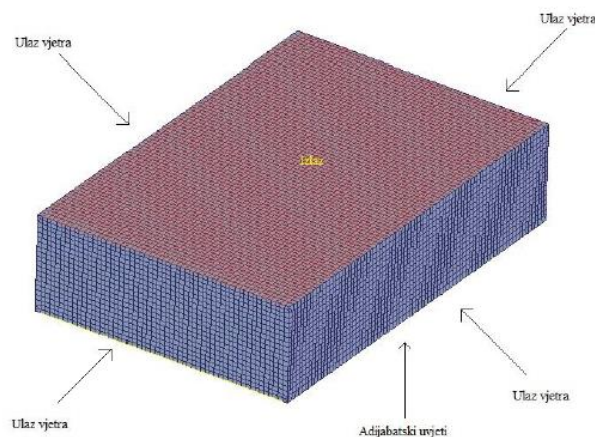
Sl. 1. Prikaz područja grada Siska [5]

Rubne točke koje opisuju geometriju grada Siska zadane su koordinatnim točkama koje su navedene u Tablici 1.

TABLICA 1. KOORDINATNE TOČKE KOJE PREDSTAVLJAJU KRAJNJE TOČKE DOMENE

Točke	Zemljopisna širina, °	Zemljopisna dužina, °
1 (ishodište)	45,436587	16,353278
2	45,436587	16,423981
3	45,510633	16,423981
4	45,510633	16,353278

Ulazni podaci za vjetar odnose se na četiri rubne koordinatne točke koje pokrivaju cijelu visinu domene i opisuju područje grada Siska, dok su vrijednosti za preostale točke unutar domene određene linearnom interpolacijom. Odabrani podaci obuhvaćaju razdoblje od 1. do 2. prosinca 2015. godine tijekom 24 sata, te sadrže komponente brzine vjetra i turbulentnu kinetičku energiju. Visina domene iznosi 2000 m, širina 8230 m, a dužina 5530 m. Na Sl. 2 prikazana je mreža s označenim rubnim uvjetima, pri čemu nisu uključeni ulazi emisija iz dimnjaka.



Sl. 2. Prikaz mreže sa selekcijama za rubne uvjete

Podaci za ulazne emisije u domenu zadani su na temelju izmjerenih vrijednosti emisija onečišćujućih tvari iz dimovodnih kanala peći rafinerije i termoelektrane. Mjerenja za rafineriju potječu iz 2007. godine, dok su podaci za termoelektanu preuzeti iz 2009. godine. Zbog ograničene dostupnosti mjerenih podataka nije bilo moguće provesti simulaciju s ulazima koji odgovaraju istom vremenskom razdoblju, što je onemogućilo i validaciju simulacijske studije. U računalnoj domeni modelirano je ukupno pet dimnjaka: dva pripadaju termoelektani, a tri rafineriji. Pritom u glavni dimnjak rafinerije dodane su prosječne emisijske vrijednosti osam pojedinačnih peći. Za izlazni rubni uvjet postavljen je konstantni statički tlak u iznosu od 0,8 bara, uzimajući u obzir linearni pad tlaka s visinom. Na donjoj granici domene primijenjen je adijabatski rubni uvjet. Za modeliranje turbulencije korišten je etablirani k-ε model. Kriterij konvergencije postiže se kada reziduali fizikalnih veličina padnu četiri reda veličine u odnosu na početno rješenje. Vremenska diskretizacija provedena je primjenom Eulerove implicitne sheme prvog reda. Sprega polja brzine i tlaka ostvarena je korištenjem SIMPLE algoritma. Za jednačbu kontinuiteta primijenjena je shema centralnih razlika, dok je za jednačbu količine gibanja korištena kombinacija uzvodne sheme i sheme centralnih razlika, s faktorom miješanja od 0,5. Energetska i skalarna jednačba, kao i jednačbe za turbulenciju, riješene su primjenom uzvodne diferencijske sheme.

V. STUDIJA UTJECAJA RAČUNALNE MREŽE

Studiju utjecaja mreže potrebno je provesti kako bi se osigurala neovisnost numeričkih rezultata o veličini i gustoći mreže. Prilikom simulacije toka fluida ili prijenosa topline,

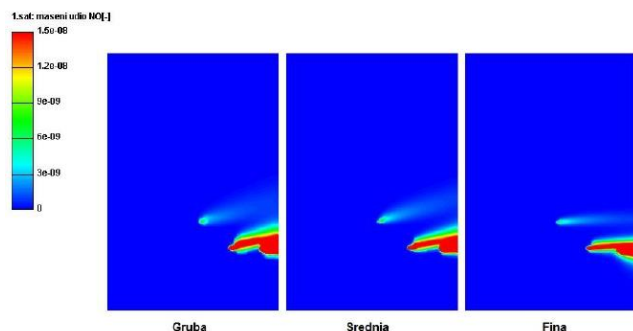
geometrija analiziranog tijela igra ključnu ulogu pri odabiru tipa mreže, bilo da se radi o strukturiranoj, nestrukturiranoj, heksaedarskoj, tetraedarskoj ili poliedarskoj mreži. Korištenje pregrube mreže može dovesti do netočnih rezultata i numeričke nestabilnosti, dok previše gusta mreža značajno povećava vrijeme računanja i računalne resurse bez nužnog poboljšanja točnosti [6].

Analiza računalne mreže u ovom radu obuhvatila je tri različite razine rezolucija mreža, označene kao gruba, srednja i fina mreža, koje se međusobno razlikuju prema ukupnom broju kontrolnih volumena. U Tablici 2 prikazane su maksimalne i minimalne dimenzije kontrolnih volumena za svaku od analiziranih mreža.

TABLICA 2. VRIJEDNOSTI VELIČINA KONTROLNIH VOLUMENA ZA SVAKU MREŽU

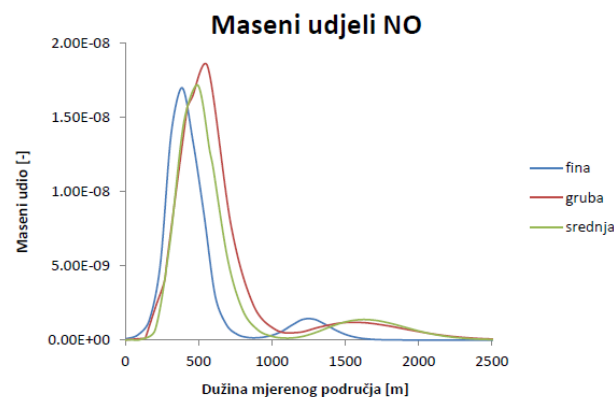
Naziv mreže	Min. veličina kontrolnog volumena, m	Maks. veličina kontrolnog volumena, m
Gruba	18,75	150
Srednja	12,5	100
Fina	9,375	75

Usporedba mreža provedena je na temelju koncentracije NO izmjerene na visini od 2 metra u prvom satu simulacije. Važno je istaknuti da su rezultati promatrani duž linije koja presijeca sve dimne perjanice unutar domene. Na temelju usporedbe odabrana je mreža koja pruža najbolji omjer između točnosti rezultata i zahtjeva za računalnim resursima. Na Sl. 3 prikazani su rezultati za svaku od analiziranih mreža.



Sl. 3. Prikaz rezultata različitih rezolucija mreža

Iz dobivenih podataka uočljive su razlike u širenju dimne perjanice i koncentracijama NO. Kod grube mreže zabilježeno je šire područje s maksimalnim vrijednostima koncentracije, a perjanica pokazuje veću rasprostranjenost u odnosu na srednju i finu mrežu. Smjer širenja perjanice kod grube i srednje mreže pokazuje određenu sličnost, dok je u usporedbi s finom mrežom uočena izraženija razlika. Perjanice dobivene srednjom i finom mrežom pokazuju slične koncentracije NO, uz manja odstupanja u orijentaciji smjera širenja. Rezultati masenih udjela NO za različite mreže prikazani su grafički na Sl. 4.

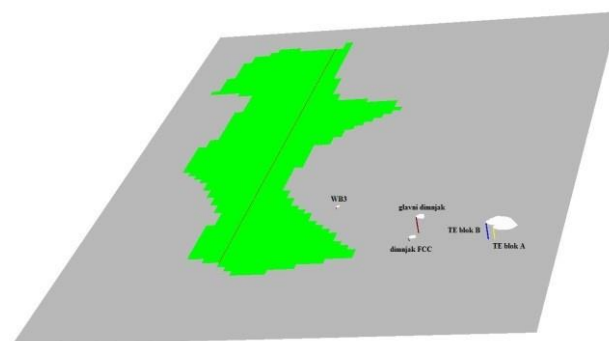


Sl. 4. Prikaz rezultata masenih udjela NO za tri mreže

Kod grube mreže zabilježene su najviše vrijednosti koncentracije NO, dok su rezultati za srednju i finu mrežu međusobno usporedivi i pokazuju slične vrijednosti. Promatrajući raspodjelu duž analiziranog područja, maksimalna koncentracija kod fine mreže dosegnuta je na udaljenosti manjoj od 500 metara, dok su kod preostalih dviju mreža vršne vrijednosti zabilježene na nešto većim udaljenostima, nakon 500 metara. Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da fina i srednja mreža daju usporedive vrijednosti koncentracija, dok gruba i srednja mreža pokazuju sličan prostorni raspored perjanica. Uzimajući u obzir broj kontrolnih volumena i dobivene rezultate, srednja mreža pokazala se kao najpovoljnije rješenje jer zahtijeva manje računalnih resursa uz zadržavanje zadovoljavajuće razine točnosti. Stoga je u nastavku simulacija disperzije onečišćujućih tvari na području grada Siska provedena sa srednjom mrežom.

VI. REZULTATI

U okviru simulacije analizira se disperzija SO_2 i NO na promatranom području, s glavnim izvorima emisije lociranim na industrijskim dimnjacima. Rezultati se interpretiraju kroz prikaz dimnih perjanica koje potječu iz industrijskih izvora. U realnim atmosferskim uvjetima, oblik dimne perjanice određuje niz čimbenika, uključujući brzinu i smjer vjetera, topografiju terena, prisutnost drugih atmosferskih tvari, doba dana te opće atmosferske uvjete. Pregled dobivenih rezultata odnosi se na područje grada Siska, pri čemu je gušće naseljeni dio prikazan zelenom bojom (Sl. 5).



Sl. 5. Simulirano područje

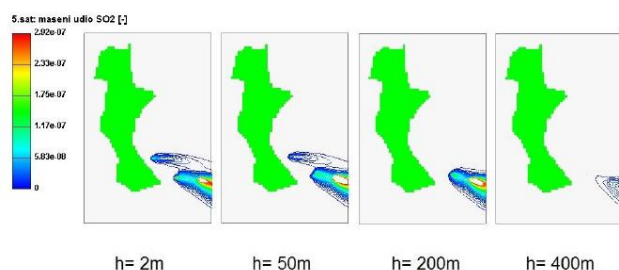
Za prikaz rezultata odabrana su tri reprezentativna sata koja obuhvaćaju početak i kraj dana, te jedan sat unutar tog intervala, kako bi se ilustrirala dnevna varijabilnost disperzije.

A. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije SO_2

Ulazak emisija u domenu odvija se na različitim visinama i pri različitim brzinama zbog različitosti visina, promjera te masenih protoka dimnjaka. Ulazak vjetra odvija se na bočnim stranama domene pri čemu se vrijednosti razlikuju s obzirom na dužinu, širinu i visinu domene za dani sat.

Na temelju podataka o emisijama iz dimnjaka, dobivene su koncentracije onečišćujućih tvari izražene u ppm. Ove koncentracije usklađene su s graničnim vrijednostima za emisije SO_2 , kako je propisano *Uredbom o razinama onečišćujućih tvari u zraku* (NN 117/12 i 84/17). Granična vrijednost koncentracije SO_2 u zraku, relevantna za zaštitu ljudskog zdravlja, iznosi $350 \mu g/m^3$ za vremensko usrednjavanje od jednog sata, a ta je vrijednost preračunata u masene udjele. Rezultati su analizirani za tri vremenska trenutka simulacije — peti, četrnaesti i dvadesetreći sat — kako bi se obuhvatile promjene u uvjetima, temeljenog na podacima iz WRF modela. Također, na slikama su prikazani rezultati na različitim visinama, pri čemu se mogu uočiti značajne promjene u obliku dimne perjanice.

Na Sl. 6 prikazana je disperzija SO_2 s pripadajućim vrijednostima koncentracija na različitim visinama domene za 5. sat simulacije.

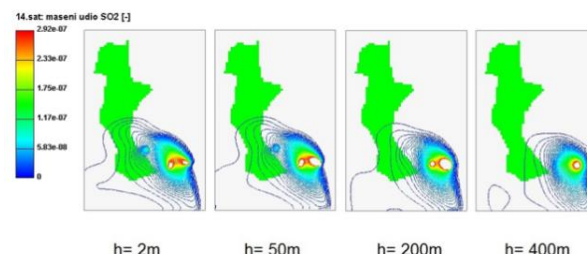


Sl. 6. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

Dimna perjanica prikazuje vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari iz različitih smjerova, ovisno o smjeru i brzini vjetra. Dimne perjanice koje izlaze iz dimnjaka imaju usko kanalizirani oblik, što rezultira malim širinama perjanica i relativno uniformnom distribucijom vjetra. Ovi uvjeti omogućuju dimnim perjanicama da se šire na veće udaljenosti i dulje zadržavaju u atmosferi, a slabija disperzija na krajevima dimnih perjanica doprinosi smanjenju koncentracija na tim područjima. Zbog toga je koncentracija onečišćujućih tvari na tlu, odnosno na visini od 2 m, najizraženija, posebno u blizini dimnjaka. To se objašnjava padom temperature dimnih plinova, što uzrokuje povećanje njihove gustoće. Kada gustoća plinova postane veća od gustoće okolnog zraka, plinovi se počinju kretati prema dolje, čime se smanjuje učinkovitost disperzije u atmosferi. Na visini od 50 m koncentracije označene crvenom bojom smanjuju se, a to se pripisuje višim dimnjacima koji omogućuju bolju disperziju. Ipak, na visini od 50 m također je zabilježeno povećanje koncentracije u predjelu gdje je smješten dimnjak visine 42 m, a to povećanje koncentracije označeno je svijetloplavom bojom. Dimnjaci

koji su niži, na svakoj visini za koju su prikazani rezultati, imaju sve slabije izraženu dimnu perjanicu. Na visinama od 200 i 400 m dimna perjanica iz tih dimnjaka potpuno nestaje, što je posljedica njihovih relativno malih visina.

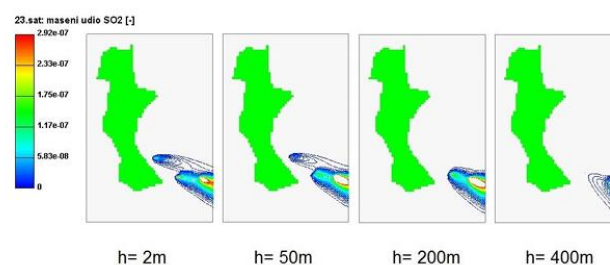
U četrnaestom satu, prema Sl. 7, uočene su značajne razlike u odnosu na peti sat. Dimna perjanica je šira i time omogućuje bolju disperziju na veće udaljenosti. Promatrani sat ima visoke koncentracije SO_2 i gotovo je jednako postojana na svim visinama u odnosu na druge sate.



Sl. 7. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

U realnim uvjetima, faktori koji utječu na razlike u koncentracijama dimnih plinova mogu se povezati s stanjem atmosfere, doba dana, meteorološkim uvjetima te drugim čimbenicima. Povećana brzina vjetra može uzrokovati širenje dimne perjanice na veće udaljenosti, čime dolazi do povećanja koncentracija onečišćujućih tvari pri tlu. Na temelju ovoga, može se zaključiti da nepokretni industrijski izvori grada Siska predstavljaju potencijalnu prijetnju od onečišćenja čak i za područja koja se nalaze na značajnim udaljenostima od industrijske zone. Udaljenost na kojoj će dimna perjanica biti prisutna ovisi o čimbenicima koji utječu na njezino širenje, poput brzine i smjera vjetra te specifičnih lokalnih atmosferskih uvjeta.

Prikazana dimna perjanica zahvaća naseljeniji dio grada, označen zelenom bojom, pri čemu je emisija SO_2 veća u odnosu na peti sat simulacije. Dimna perjanica ne pokazuje značajne promjene s visinom, no male razlike primjećuju se na visini od 400 m, gdje nije prisutna perjanica iz manjeg dimnjaka, a doprinos emisijama iz rafinerijskih dimnjaka je znatno slabiji. Prema rezultatima prikazanim na Sl. 8, dolazi do smanjenja koncentracije SO_2 , a u odnosu na koncentracije propisane Uredbom za granične vrijednosti emisija (GVE), dimna perjanica obuhvaća manja područja u odnosu na rezultate za 14. sat simulacije.

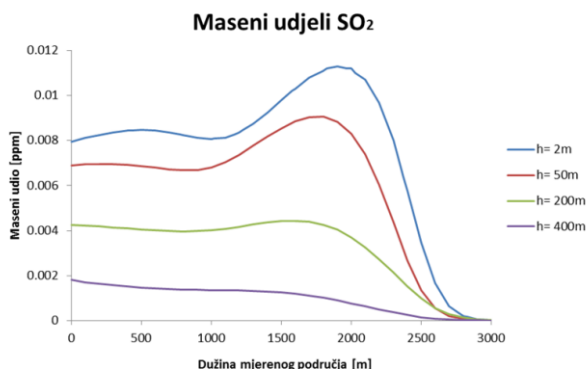


Sl. 8. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

U usporedbi s prethodnim satom simulacije, dimna perjanica u 23. satu nije toliko prostrana te se smanjuje s

povećanjem visine. Ipak, oblik perjanice ostaje sličan onome iz petog sata, što ukazuje na to da je perjanica usko kanalizirana, a vjetar uniforman, pri čemu je moguće njezino širenje na veće udaljenosti. Perjanica iz glavnog dimnjaka na 400 m nije značajno izražena, a rezultati su slični onima u prethodnim satima simulacije. Emisije iz dimnjaka termoelektrane (TE) stvaraju dimnu perjanicu koja ostaje postojana na visini od 400 m kroz sve sate simulacije.

Dijagramski prikaz rezultata za 14. sat simulacije prikazan je na Sl. 9. Rezultati se odnose na presjek koji prolazi sredinom područja označenog zelenom bojom na Sl. 5.

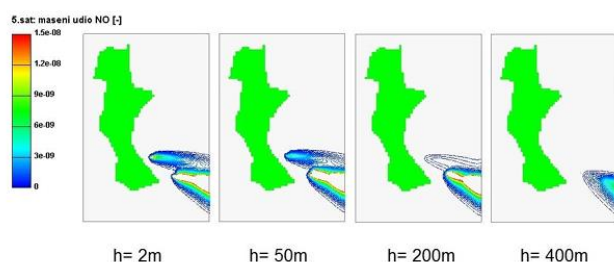


Sl. 9. Dijagramski prikaz masenih udjela SO_2 na različitim visinama za 14. sat

Usporedba dobivenih rezultata ukazuje na to da maksimalna zabilježena koncentracija SO_2 prevladava na visini od 2 m, dok se duž promatranog područja najveće vrijednosti bilježe na udaljenosti od približno 2000 m od izvora emisije. Nadalje, može se zaključiti da koncentracija onečišćujuće tvari opada s porastom visine, te na visini od 400 m pokazuje znatno niže vrijednosti. Emisije u okviru promatranog područja prostiru se do udaljenosti od oko 3000 m. Duljina i prostorni doseg dimne perjanice u značajnoj mjeri ovise o brzini i smjeru vjetra u trenutku emisije. Važno je istaknuti kako je iz priloženog dijagrama vidljivo da granična vrijednost koncentracije nije prekoračena tijekom analiziranog sata.

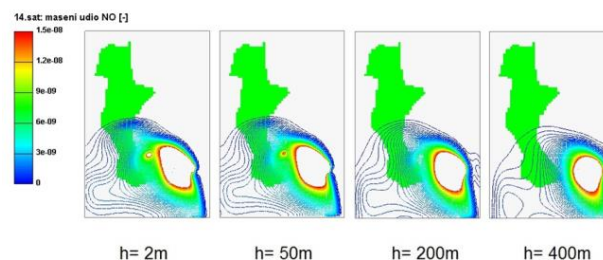
B. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije NO

U okviru ovog istraživanja, NO je uzet kao reprezentativni spoj skupine NO_x , budući da dominira u emisijama industrijskih izvora. Sljedeći prikazi ilustriraju disperziju NO na različitim visinama, pri čemu su uočene gušće i šire dimne perjanice u usporedbi s onima za SO_2 . Rezultati za 5. sat simulacije prikazani su na Sl. 10.



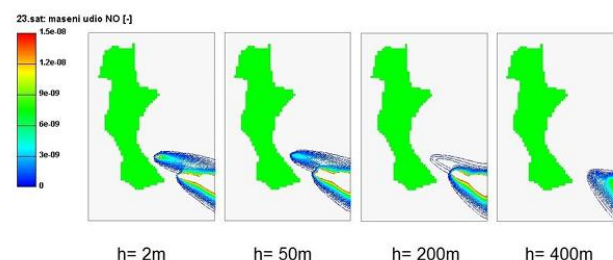
Sl. 10. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija NO

U usporedbi s rezultatima za SO_2 , perjanica NO pokazuje šire prostorno rasprostiranje, s većim područjem maksimalne koncentracije onečišćujuće tvari. Također, smjer kretanja dimne perjanice ostaje nepromijenjen, usmjeren suprotno od gušće naseljenog dijela grada. Daljnjom analizom uočeno je da rafinerijski dimnjaci generiraju perjanice viših koncentracija na gotovo svim visinama u odnosu na termoelektrane izvore. Niži rafinerijski dimnjaci postižu maksimalne koncentracije pri tlu, s postupnim opadanjem vrijednosti koncentracije prema visini od 400 m. Najviše koncentracije NO, emitirane iz glavnog dimnjaka, zabilježene su na visinama od 50 i 200 m, dok su tragovi perjanice detektirani i na visini od 400 m. Rezultati simulacije za 14. sat na Sl. 11, prikazuju dimnu perjanicu sličnog karaktera kao kod emisija SO_2 .



Sl. 11. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO

Rasprostranjenost dimne perjanice pokazuje gotovo ujednačen prostorni raspored na svim visinama na kojima su zabilježene maksimalne koncentracije. Ostvarene maksimalne vrijednosti koncentracija NO, rezultat su kumulativnog doprinosa svih dimnjaka uključenih u simulaciju. Rezultati simulacije za 23. sat prikazani su na Sl. 12.

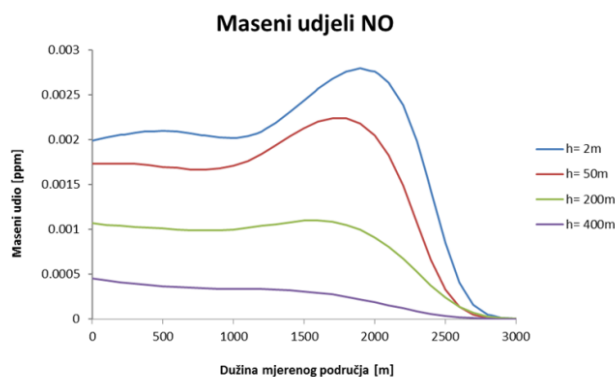


Sl. 12. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija NO

Dimna perjanica zadržava usko kanaliziran oblik, slično kao i tijekom petog sata simulacije, što se može pripisati već prethodno opisanim uniformnim uvjetima vjetra. Maksimalne koncentracije NO u ovom slučaju mogu se uočiti na svim analiziranim visinama, što nije bilo zabilježeno pri ranijim uvjetima vjetra. Na visini od 400 m perjanice pokazuju veću gustoću u usporedbi s prethodno prikazanim rezultatima, pri čemu je posebno vidljiva maksimalna koncentracija dimne perjanice iz dimnjaka termoelektrane. Tijekom promatranog vremenskog razdoblja, gušće naseljeni dio grada ostaje izvan područja izloženosti emisijama.

Dijagramski prikaz koncentracija NO izrađen je i prikazan na Sl. 13. Rezultati se odnose na 14. sat simulacije i prikazani

su na različitim visinama unutar istog mjerila i područja kao i prethodni prikaz za SO_2 .



Sl. 13. Dijagramski prikaz masenih udjela NO na različitim visinama za 14. sat

Analiza dobivenih rezultata ukazuje na to da su najviše koncentracije onečišćujućih tvari zabilježene u blizini tla, pri čemu se s porastom visine bilježi jasan silazni trend vrijednosti koncentracija. Maksimalne vrijednosti ostvarene su na udaljenosti od približno 2000 m duž analiziranog profila, nakon čega koncentracije naglo padaju te, iznad 3000 m, više ne dosežu značajne razine unutar mjerene duljine područja. Posebno izražena razlika u koncentracijama uočena je između visinskih razina od 50 i 200 m, gdje dolazi do naglog smanjenja vrijednosti. Navedeno se može prvenstveno pripisati razlikama u visinama izvora emisije, budući da, kako je prethodno pokazano, niži dimnjaci imaju ograničen doprinos u održavanju stabilnosti i postojanosti dimnih perjanica na višim slojevima atmosfere, osobito na visinama od 200 i 400 m.

VII. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog istraživanja, koji se odnosi na proučavanje disperzije onečišćujućih tvari na određenom području metodom kontrolnih volumena, u potpunosti je ostvaren. Računalna dinamika fluida u programskom paketu AVL Fire®, iako primarno razvijena za simulacije motora s unutrašnjim izgaranjem, pokazala se uspješnom i u kontekstu zadatka razmatranog u ovom radu. Simulacija pruža relevantne rezultate u skladu s postavljenim rubnim uvjetima, što je vidljivo kroz numeričke podatke i vizualne prikaze. Međutim, postizanje još realističnijih rezultata bilo bi moguće implementiranjem dodatnih faktora, poput hrapavosti i albeda tla, što bi poboljšalo izgled dimnih perjanica i utjecalo na njihove koncentracije. Također, točnost simulacije mogla bi se poboljšati uključivanjem drugih izvora onečišćenja, kao što su dodatni nepokretni izvori i emisije s prometnih površina. Za potpunu validaciju primijenjene metode, nužno je usporediti rezultate sa stvarnim podacima s mjernih postaja kakvoće zraka u simuliranom području.

LITERATURA

- [1] M. Martinjak, "Numerička simulacija sustava za selektivnu katalitičku redukciju," Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [2] F. Toja-Silva, J. Chen, S. Hachinger and F. Hase, "CFD simulation of CO_2

dispersion from urban thermal power plant: Analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements," Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, vol. 169, pp. 177-193, 2017.

- [3] G. Sisak, Strateški plan Grada Siska, Sisak, 2014.
- [4] A. M. Saeed and T. A. F. Alfawaz, "Finite Volume Method and Its Applications in Computational Fluid Dynamics," Axioms, vol. 14, no. 5, pp. 359, 2025.
- [5] <https://www.google.com/maps>, pristupljeno 26.10.2019.
- [6] I. Sadrehaghighi, "Mesh Assessment & Quality Issues," CFD Open Series, vol. 2, no. 40, 2023, pp. 10-13.

ABSTRACT

An increase in the concentration of pollutants in the environment poses a serious risk to human health and ecosystems. Modern technology enables the monitoring and reduction of emissions, thereby mitigating and controlling their negative impact on the environment. This paper presents the application of numerical methods as a tool for analyzing pollutants in urban areas, with a focus on the dispersion of emissions from stationary sources. The application of numerical methods will be carried out through computational fluid dynamics (CFD), simulating the dispersion of pollutants from TE-TO Sisak and INA Sisak Refinery during one representative day. In addition to data for industrial sources, meteorological conditions will also be specified, sourced from numerical systems for atmospheric research and weather forecasting. The results are presented in the form of smoke plume dispersion and concentrations of SO_2 and NO at different heights. It is important to emphasize that the analysis showed no exceedances of the limit values for SO_2 in the residential areas during the observed period, indicating satisfactory air quality.

THE ANALYSIS OF POLLUTANT DISPERSION FROM STATIONARY INDUSTRIAL SOURCES IN AN URBAN ENVIRONMENT USING NUMERICAL METHODS.

Dominik Pavlović, Jakov Baleta