

Numerička simulacija disperzije onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora u urbanoj sredini

Pavlović, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:533887>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Dominik Pavlović

DIPLOMSKI RAD

Sisak, listopad 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Dominik Pavlović

NUMERIČKA SIMULACIJA DISPERZIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI
IZ NEPOKRETNIH INDUSTRIJSKIH IZVORA U URBANOJ SREDINI

DIPLOMSKI RAD

Mentor: doc.dr.sc. Jakov Baleta
Stručni voditelj: Damijan Cerinski, mag. ing. aeroing.

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

Predsjednik: prof.dr.sc. Ladislav Lazić
Član: doc.dr.sc. Jakov Baleta
Član: doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović
Zamjenski član: prof. dr. sc. Stjepan Kožuh

Sisak, listopad 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Dominik
PREZIME: Pavlović
MATIČNI BROJ: M61/17

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom:

NUMERIČKA SIMULACIJA DISPERZIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI IZ NEPOKRETNIH INDUSTRIJSKIH
IZVORA U URBANOJ SREDINI

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih
koji su u njemu navedeni.

Sisak, 21.10.2019

(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet
Aleja narodnih heroja 3, p. p. 1. HR - 44103 Sisak
tel.: +385(0)44 533378; 533379; 533380; 533381
faks: +385(0)44 533378
e-mail: dekanat@simet.hr; url: www.simet.unizg.hr

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Jakovu Baleti što mi je omogućio izradu ovog diplomskog rada te na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem stručnom voditelju, Damijanu Cerinskom, mag. ing. aeroing. na velikoj pomoći i utrošenom vremenu prilikom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem i Goranu Gašparacu, mag. phys et geophys. na ustupljenim meteorološkim podacima, bez kojih ovaj diplomski rad ne bi bio moguć.

Za kraj, hvala mojim roditeljima, djevojci Martini i kolegama koji su mi bila podrška tijekom studiranja i tako omogućili bolje studiranje.

SAŽETAK

NUMERIČKA SIMULACIJA DISPERZIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI IZ NEPOKRETNIH INDUSTRIJSKIH IZVORA U URBANOJ SREDINI

Trend povećanja koncentracije onečišćujućih tvari u okolišu dovodi do negativnog utjecaja za zdravlje ljudi i organizme. Razvojem tehnologije čovjek je u mogućnosti smanjiti i pratiti koncentraciju onečišćujućih tvari u okolišu te time ujedno reducirati negativni utjecaj na prirodu čemu svakodnevno svjedočimo. Tema ovog rada odnosi se upravo na korištenje numeričkih metoda kako bi se mogli proučavati i rješavati problemi vezani za ekologiju u naseljenim mjestima.

U ovom radu se upotrebom računalne dinamike fluida proučava disperzija onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora u urbanoj sredini grada Siska tijekom jednog karakterističnog dana. Podaci za ulazne emisije u domeni dobivene su za TE-TO Sisak i INA Rafineriju Sisak. Nadalje, u domeni je zadan i ulaz vjetrova s bočnih strana čiji su podaci preuzeti iz numeričkog sustava za atmosferska istraživanja i prognoze vremena. Dobiveni rezultati simulacije prikazuju dimne perjanice i koncentracije na različitim visinama od tla za SO₂ i NO. Na kraju valja istaknuti kako se tijekom niti jednog simuliranog sata ne premašuje granična vrijednost emisija za SO₂ u naseljenom dijelu grada, čime se kakvoća zraka s obzirom na koncentracije SO₂ ocjenjuje zadovoljavajućom.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida, disperzija onečišćujućih tvari, gradsko naselje, emisije SO₂, emisije NO

SUMMARY

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTANT DISPERSION FROM STATIONARY INDUSTRIAL SOURCES IN URBAN ENVIRONMENT

The trend of increasing concentrations of pollutants in the environment leads to a negative impact on human health and organisms. With the development of technology, people are able to reduce and monitor the concentration of pollutants in the environment, and at the same time reduce the negative impact on nature, which we witness daily. The topic of this thesis deals with application of numerical methods to study and solve environmental problems in populated areas.

In this thesis, computational fluid dynamics is used to study the dispersion of pollutants from stationary industrial sources in the urban environment of the city of Sisak during one characteristic day. Data for inlet domain emissions were obtained for TE-TO Sisak and INA Rafinerija Sisak. Furthermore, the wind input at the domain sides is also prescribed, and the data were taken from the numerical system for atmospheric research and weather forecasts. The simulation results show smoke plumes and concentrations at different heights from the ground for SO₂ and NO. Finally, it should be noted that during any simulated hour the emission limit for SO₂ in the populated part of the city is not exceeded, making the air quality satisfactory with respect to SO₂ concentrations.

Keywords: computational fluid dynamics, dispersion of pollutants, urban settlement, SO₂ emissions, NO emissions

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
1. UVOD	1
1.1. Sumporov dioksid.....	2
1.2. Dušikovi oksidi.....	3
1.3. Ugljikov dioksid.....	4
1.4. Lebdeće čestice PM _{2,5}	6
1.5. Cilj i organizacija diplomskog rada.....	7
2. OPIS URBANE SREDINE I INDUSTRIJSKIH IZVORA	8
2.1. INA – Industrija nafte Sisak.....	8
2.2. Termoelektrana-toplana Sisak (TE-TO Sisak)	9
3. MATEMATIČKI MODEL	11
3.1. Zakon očuvanja mase	11
3.2. Zakon očuvanja količine gibanja.....	11
3.3. Zakon očuvanja energije.....	12
3.4. Zakon očuvanja kemijske vrste	12
3.5. Standardna transportna jednadžba.....	13
3.6. Metoda kontrolnih volumena	13
3.6.1. Diskretizacija standardne transportne jednadžbe	13
3.6.2. Vremenska diskretizacija.....	14
3.6.3. Eulerova eksplicitna shema	14
3.6.4. Eulerova implicitna shema	15
3.7. Sheme diferencije	15
3.7.1. Shema centralnih razlika (Central Differencing Scheme - CDS).....	15
3.7.2. Uzvodna shema (Upwind Differencing Sheme - UDS)	16
3.7.3. Kombinirana shema (Blending scheme).....	16
3.8. Turbulencija.....	16
3.8.1. RANS jednadžbe za viskozno nestlačivo turbulentno strujanje	17
4. POSTAVKE NUMERIČKE SIMULACIJE	19
4.1. Studija utjecaja računalne mreže	22
5. REZULTATI I DISKUSIJA.....	24
5.1. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije SO ₂	24
5.2. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije NO	27
6. ZAKLJUČAK	31
7. LITERATURA.....	32

8. ŽIVOTOPIS	33
9. PRILOG	34
9.1. Satna raspodjela emisija SO ₂	34
9.2. Satna raspodjela NO.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1. Djelovanje onečišćujućih tvari na okoliš [2].....	1
Slika 2. Prikaz emisija SO ₂ za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]	2
Slika 3. Shematski prikaz nastajanja dušikovih spojeva [6]	3
Slika 4. Emisija NO _x (kt/god) za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]	4
Slika 5. Kruženje ugljika u okolišu [9]	5
Slika 6. Emisija CO (kt/god) za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]	5
Slika 7. Projekcija emisija CO ₂ [10]	6
Slika 8. Usporedba PM ₁₀ i PM _{2,5} lebdećih čestica [4].....	6
Slika 9. Emisija PM _{2,5} za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]	7
Slika 10. Prikaz termoelektrane i rafinerije Sisak [13]	8
Slika 11. Satelitski prikaz postrojenja [14]	9
Slika 12. Proračunski čvor [1].....	15
Slika 13. Grafički prikaz relacije (28) [17]	17
Slika 14. Prikaz područja na temelju kojeg je napravljena geometrija za provedbu simulacije	19
Slika 15. Prikaz mreže sa selekcijama za rubne uvjete	20
Slika 16. Simulirano područje s naznakom granica gušće naseljenog područja grada (zeleno)	22
Slika 17. Prikaz rezultata za različite rezolucije mreža.....	23
Slika 18. Prikaz rezultata masenih udjela NO za tri mreže.....	23
Slika 19. Prikaz dimnih perjanica u prvom satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	24
Slika 20. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	25
Slika 21. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	26
Slika 22. Dijagramski prikaz masenih udjela SO ₂ na različitim visinama za 14. sat.....	27
Slika 23. Prikaz dimnih perjanica u prvom satu za vrijednosti koncentracija NO.....	28
Slika 24. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO	28
Slika 25. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija NO	29
Slika 26. Dijagramski prikaz masenih udjela NO na različitim visinama za 14. sat.....	30
Slika 27. Prikaz dimnih perjanica u 1. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	34
Slika 28. Prikaz dimnih perjanica u 2. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	34
Slika 29. Prikaz dimnih perjanica u 3. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	35
Slika 30. Prikaz dimnih perjanica u 4. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	35
Slika 31. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	35
Slika 32. Prikaz dimnih perjanica u 6. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	36
Slika 33. Prikaz dimnih perjanica u 7. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	36
Slika 34. Prikaz dimnih perjanica u 8. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	36
Slika 35. Prikaz dimnih perjanica u 9. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	37
Slika 36. Prikaz dimnih perjanica u 10. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	37
Slika 37. Prikaz dimnih perjanica u 11. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	37
Slika 38. Prikaz dimnih perjanica u 12. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	38
Slika 39. Prikaz dimnih perjanica u 13. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	38
Slika 40. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	38

Slika 41. Prikaz dimnih perjanica u 15. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	39
Slika 42. Prikaz dimnih perjanica u 16. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	39
Slika 43. Prikaz dimnih perjanica u 17. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	39
Slika 44. Prikaz dimnih perjanica u 18. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	40
Slika 45. Prikaz dimnih perjanica u 19. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	40
Slika 46. Prikaz dimnih perjanica u 20. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	40
Slika 47. Prikaz dimnih perjanica u 21. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	41
Slika 48. Prikaz dimnih perjanica u 22. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	41
Slika 49. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	41
Slika 50. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija SO ₂	42
Slika 51. Prikaz dimnih perjanica u 1. satu za vrijednosti koncentracija NO	42
Slika 52. Prikaz dimnih perjanica u 2. satu za vrijednosti koncentracija NO	43
Slika 53. Prikaz dimnih perjanica u 3. satu za vrijednosti koncentracija NO	43
Slika 54. Prikaz dimnih perjanica u 4. satu za vrijednosti koncentracija NO	43
Slika 55. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija NO	44
Slika 56. Prikaz dimnih perjanica u 6. satu za vrijednosti koncentracija NO	44
Slika 57. Prikaz dimnih perjanica u 7. satu za vrijednosti koncentracija NO	44
Slika 58. Prikaz dimnih perjanica u 8. satu za vrijednosti koncentracija NO	45
Slika 59. Prikaz dimnih perjanica u 9. satu za vrijednosti koncentracija NO	45
Slika 60. Prikaz dimnih perjanica u 10. satu za vrijednosti koncentracija NO	45
Slika 61. Prikaz dimnih perjanica u 11. satu za vrijednosti koncentracija NO	46
Slika 62. Prikaz dimnih perjanica u 12. satu za vrijednosti koncentracija NO	46
Slika 63. Prikaz dimnih perjanica u 13. satu za vrijednosti koncentracija NO	46
Slika 64. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO	47
Slika 65. Prikaz dimnih perjanica u 15. satu za vrijednosti koncentracija NO	47
Slika 66. Prikaz dimnih perjanica u 16. satu za vrijednosti koncentracija NO	47
Slika 67. Prikaz dimnih perjanica u 17. satu za vrijednosti koncentracija NO	48
Slika 68. Prikaz dimnih perjanica u 18. satu za vrijednosti koncentracija NO	48
Slika 69. Prikaz dimnih perjanica u 19. satu za vrijednosti koncentracija NO	48
Slika 70. Prikaz dimnih perjanica u 20. satu za vrijednosti koncentracija NO	49
Slika 71. Prikaz dimnih perjanica u 21. satu za vrijednosti koncentracija NO	49
Slika 72. Prikaz dimnih perjanica u 22. satu za vrijednosti koncentracija NO	49
Slika 73. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija NO	50
Slika 74. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija NO	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz emisija u zrak [15].....	10
Tablica 2. Koordinatne točke koje su odabrane za krajnje točke simulacijske domene	19
Tablica 3. Prikaz podataka za sve dimnjake korištene u simulaciji	21
Tablica 4. Podaci za emisije svih peći koje ulaze u glavni dimnjak Rafinerije Sisak	21
Tablica 5. Vrijednosti maksimalnih i minimalnih veličina kontrolnih volumena za svaku mrežu.....	22

POPIS OZNAKA

Latinska slova

Oznaka	Jedinica	Opis
A_f	s^{-1}	Koeficijent brzine reakcije
d	m	Udaljenost dvaju kontrolnih volumena
E_{af}	kJ/mol	Energija aktivacije
F	kg/s	Maseni protok
f_i	m/s^2	Komponente vektora specifične masene sile
J_i	-	Difuzijski tok kemijske komponente
k_{fn}, k_{fp}	ovisno o reakciji	Konstante normalne i povratne reakcije
p	Pa	Termodinamički tlak
q_f	$kg/(m^3 s)$	Progresivna varijabla pojedine reakcije
q_i	W/m^2	Komponente vektora površinske gustoće toplinskog toka
R_i	$kg/(m^3 s)$	Neto produkcija kemijske vrste
s	m^2	Površina kontrolnog volumena
S_ϕ	W/m^3	Izvorski član
S_l	W/m^3	Komponenta izvora veličine ϕ
S_E	W/m^3	Samostalna komponenta izvora veličine ϕ
t	s	Vrijeme
T	K	Temperatura
V	m^3	Volumen
v_f	m/s	Brzina strujanja
v_i, v_j	m/s	Komponente vektora brzine
X_i	-	Molni udio pojedinog sastojka
x_i, x_j	m	Kartezijeve koordinate
Y_i	-	Maseni udio pojedine kemijske vrste

Grčka slova

Oznaka	Jedinica	Opis
γ	-	Faktor miješanja
δ_{ij}	-	Kroneckerov delta
ρ	kg/m^3	Gustoća fluida
σ_{ij}	N/m^2	Komponente simetričnog tenzora naprezanja
φ	-	Generalna varijabla
ϕ	m^{-3}	Volumenska gustoća fizikalne veličine
v_{if}	-	Stehiometrijski koeficijent
μ	Pa s	Dinamička viskoznost
τ	N/m^2	Viskozno naprezanje

Indeksi

Oznaka	Jedinica	Opis
P	-	Proračunski čvor
W, E	-	Susjedni čvorovi
f	-	veličina u središtu stranice volumena

Eksponenti

Oznaka	Jedinica	Opis
n	-	Vrijednosti u novom vremenskom trenutku
o	-	Vrijednosti u starom vremenskom trenutku

POPIS KRATICA

CDS - *Central Differencing Scheme*

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

FAME - *Flexible Automated Meshing Environment*

HEP - *Hrvatska Elektroprivreda*

INA - *Industrija Nafta*

QUICK - *Quadratic upwind*

SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

TE - *Termoelektrana*

TE-TO - *Termoelektrana - Toplana*

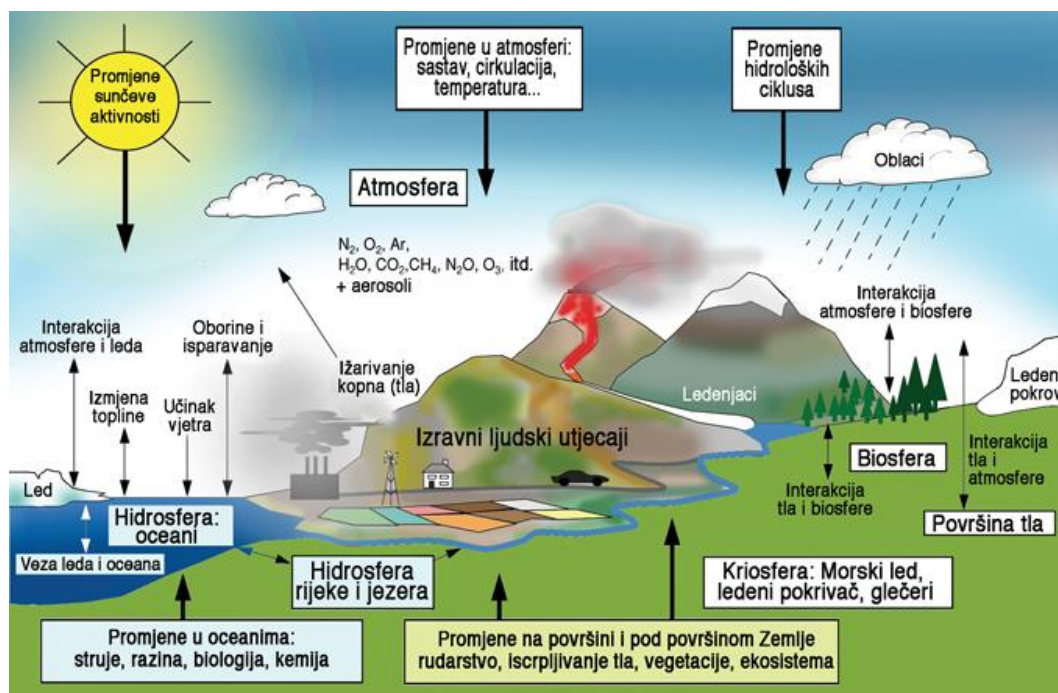
UDS - *Upwind Differencing Scheme*

WRF - *Weather Research and Forecasting*

1. UVOD

Industrijski razvoj i porast svjetske populacije dovode do povećanja potrošnje energije, čime se okoliš opterećuje s onečišćujućim tvarima koje se emitiraju iz industrijskih procesa te imaju negativan utjecaj na zdravlje ljudi i okoliš. Većina energije u svijetu dobiva se iz ekološki neprihvatljivih izvora te se pokušavaju pronaći drugi načini koji bi bili manje štetni za okoliš. Trend povećanja potrošnje energije predviđa se i u budućnosti, pri čemu se najveći dio energije koristi iz fosilnih goriva. Korištenjem fosilnih goriva dolazi do povećanja koncentracije stakleničkih plinova (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC itd.), ali i drugih produkata izgaranja poput CO, NO_x i SO_x . Navedene tvari dovode do stvaranja fotokemijskog smoga, razaranja ozona, globalnog zagrijavanja, pojave kiselih kiša i drugih negativnih djelovanja [1].

Sastavnice okoliša - zrak, voda i tlo, izložene su različitim onečišćujućim tvarima koje se mogu pronaći u okolišu iz prirodnih (dim, leteći pepeo, šumski požari, mikroorganizmi, vulkanski pepeo i plinovi, prirodna radioaktivnost, meteorska prašina, prirodna isparavanja itd.) i antropogenih izvora (proizvodnja toplinske i električne energije, rad industrijskih postrojenja u metalurgiji i kemijskoj industriji, transport, spaljivanje različitih vrsta otpada itd.), pri čemu se mijenja život na Zemlji, što se ogleda u promjeni klime, kvalitete zraka i vode, izumiranju životinjskih i biljnih vrsta, učinkom na zdravlje itd. (Slika 1). Kako bi se navedeno izbjegnulo, nužno je provoditi određene mjere za smanjenje onečišćujućih tvari, odnosno njihovog negativnog utjecaja. Pod pojmom onečišćenje zraka smatra se prisutnost jedne ili više tvari u obliku plinova, para i aerosoli, pri čemu navedena onečišćenja iz zraka dospijevaju u ljudski organizam udisanjem, ingestijom ili perkutano te se, ovisno o intenzitetu i trajanju, mogu pojaviti određene zdravstvene posljedice.



Slika 1. Djelovanje onečišćujućih tvari na okoliš [2]

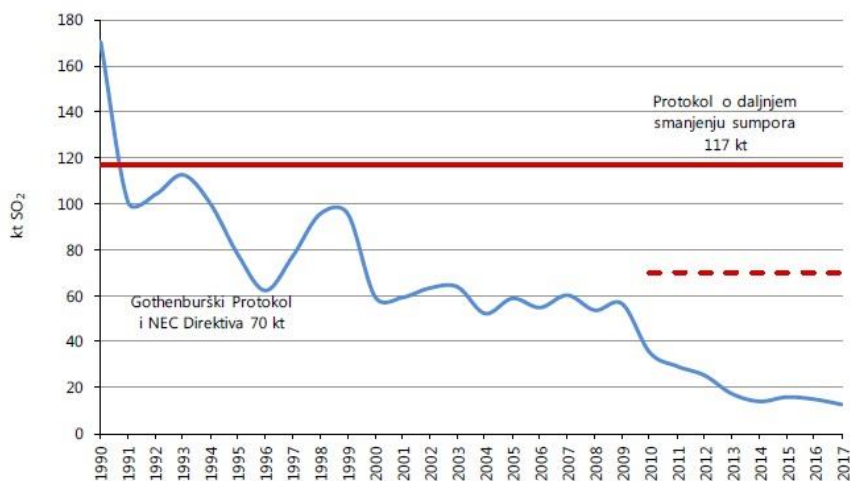
Razvoj industrije kroz povijest nikada nije bio praćen dovoljnom brigom o okolišu i zdravlju ljudi, sve dok se nisu počele događati ekološke katastrofe poput one u Sevesu, Černobilu, Bhopalu i ostale. Danas se pokušava provoditi zaštita okoliša na međunarodnoj razini, a sve je

započelo konferencijom Ujedinjenih naroda o ljudskom okolišu u Stockholmu 1872. godine. Nakon toga dolazi do izražaja politika zaštite okoliša [3].

1.1. Sumporov dioksid

Sumporov dioksid (SO_2) je bezbojan, otrovni plin bez mirisa te otapanjem u vodi daje sumpornu kiselinu. Utjecaj na zdravlje ljudi kod kratkotrajne izloženosti, odnosno akutne izloženosti, uzrokuje iritaciju očiju te utječe na dišni sustav, pri čemu se javlja bol u prsima, kašalj, sekrecija sluzi itd., dok kod kronične izloženosti dolazi do respiratornih simptoma i povećanja broja hospitalizacija. Na okoliš glavni negativni utjecaj imaju u obliku kiselih kiša i zakiseljavanja tla. Najznačajniji prirodni izvori SO_2 su vulkani i šumski požari, dok su drugi manje značajni izvori razgradnja gnojiva, biljnih i životinjskih ostataka, aktivnosti mikroorganizama i ostali. Također, ovaj plin dolazi u okolišu i iz antropogenih izvora koji su veći i značajniji po ispuštenim emisijama u okoliš od prirodnih izvora. Iz antropogenih izvora SO_2 uglavnom dolazi izgaranjem fosilnih goriva za potrebe proizvodnje električne i toplinske energije, ali i iz transporta, postrojenja za dobivanje ugljena, nafte i cementa [4].

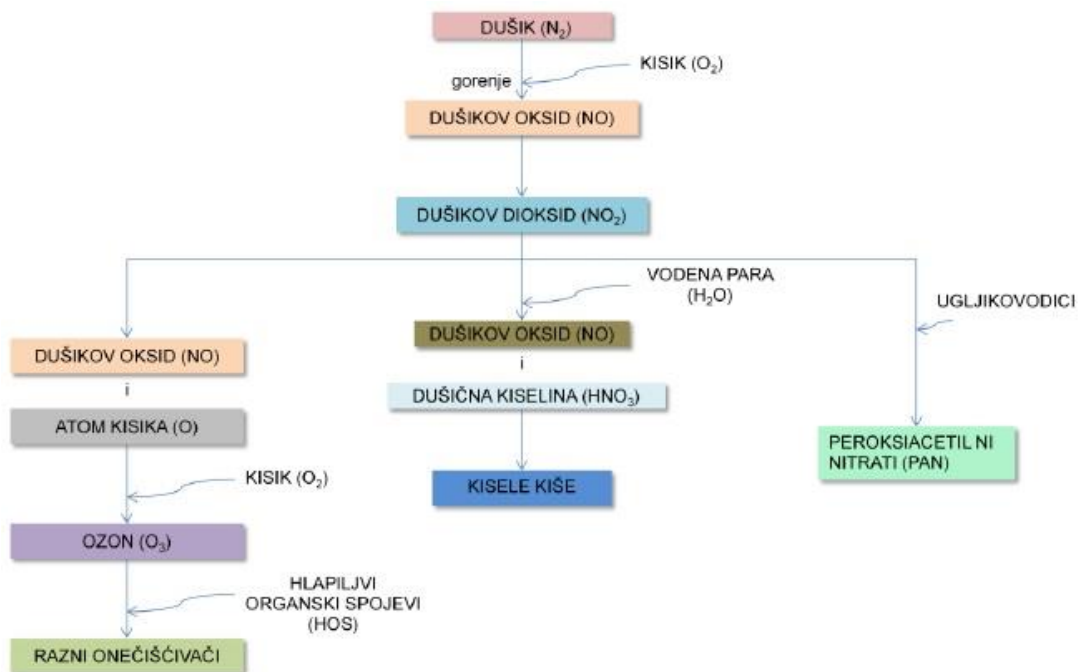
Trendovi emisija onečišćujućih tvari na području Republike Hrvatske prema Izvješću Ministarstva zaštite okoliša i energetike [5] za 2017. godinu pokazuju da iz sektora energetike proizlazi 60,7% ukupne emisije SO_2 . Slika 2 prikazuje smanjenje SO_2 emisija od 1990. godine do 2017. godine iz sektora proizvodnje električne i toplinske energije (za 95,3%), iz graditeljstva i industrije (za 94,9%), iz prometa (za 97,8%), iz proizvodnih procesa (za 85%) te iz malih ložišta (za 95,7%). Znatna smanjenja su rezultat korištenja niskosumpornih goriva kod cestovnog prometa ali i kod stacionarnog izgaranja. Također, do smanjenja emisija SO_2 dolazi za vrijeme rata te korištenjem tehnologija za smanjenje navedenih emisija. Zaključeno je da se od 1990. godine do 2017. godine ukupna emisija SO_2 smanjila za 92,6%, dok se u razdoblju 2016.-2017. godine smanjila za 15,2%. Crvena iscrtkana linija na Slici 2, prikazuje da je u 2017. godini emisija SO_2 bila niža od propisane kvote od 70 kt.



Slika 2. Prikaz emisija SO_2 za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]

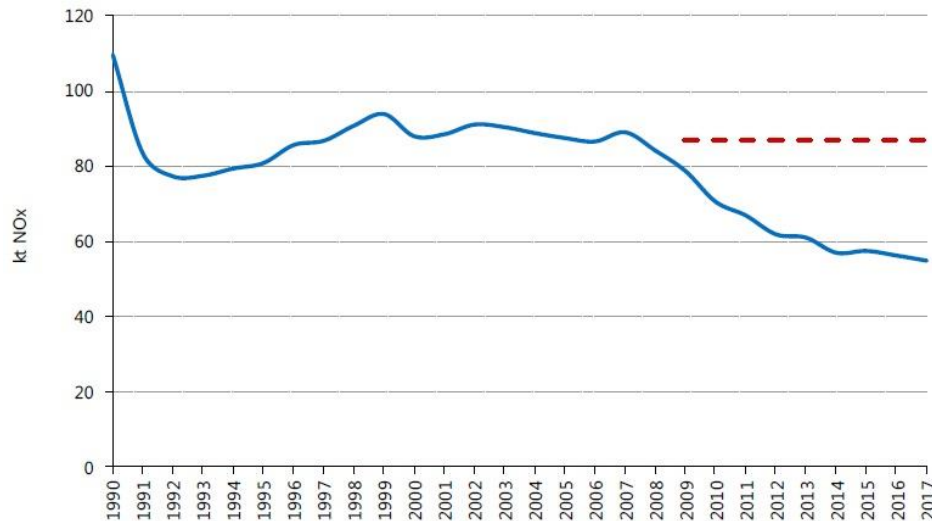
1.2. Dušikovi oksidi

Dušikovi oksidi su spojevi dušika s kisikom čija je formula NO_x ($x=0,5-2$) te predstavljaju značajne onečišćujuće tvari u okolišu koje uglavnom dospijevaju u okoliš iz procesa izgaranja, prometa i djelovanjem elektromagnetskih izboja [3]. Najveći udio dušikovih oksida emitira se u obliku NO te oksidacijom prelazi u NO_2 . Najznačajniji negativni učinci (Slika 3) na okoliš su razaranje ozona, proces eutrofikacije vodenih ekosustava, stvaranje kiselih kiša i fotokemijskog smoga, pri čemu se mogu pojaviti iz prirodnih (vulkanske aktivnosti, dovod iz stratosfere, bakterijski procesi, munje itd.) i antropogenih izvora (izgaranje fosilnih goriva, promet, poljoprivredne emisije, emisije obrade i zbrinjavanja otpada itd.). Štetni učinci na ljudsko zdravlje kod akutne izloženosti pri manjim razinama NO_x su pojava kašlja, otežano disanje, mučnine, nadražene oči, nos i grlo dok kod izloženosti višim razinama dolazi do gušenja, umora, grčeva, vrtoglavice i promjene boje kože u plavo. Kronična izloženost dovodi do pojave srčanih problema, oštećenja pluća (astma) i živčanog sustava, smanjenja plodnosti kod žena kao i do genetičkih promjena [6].



Slika 3. Shematski prikaz nastajanja dušikovih spojeva [6]

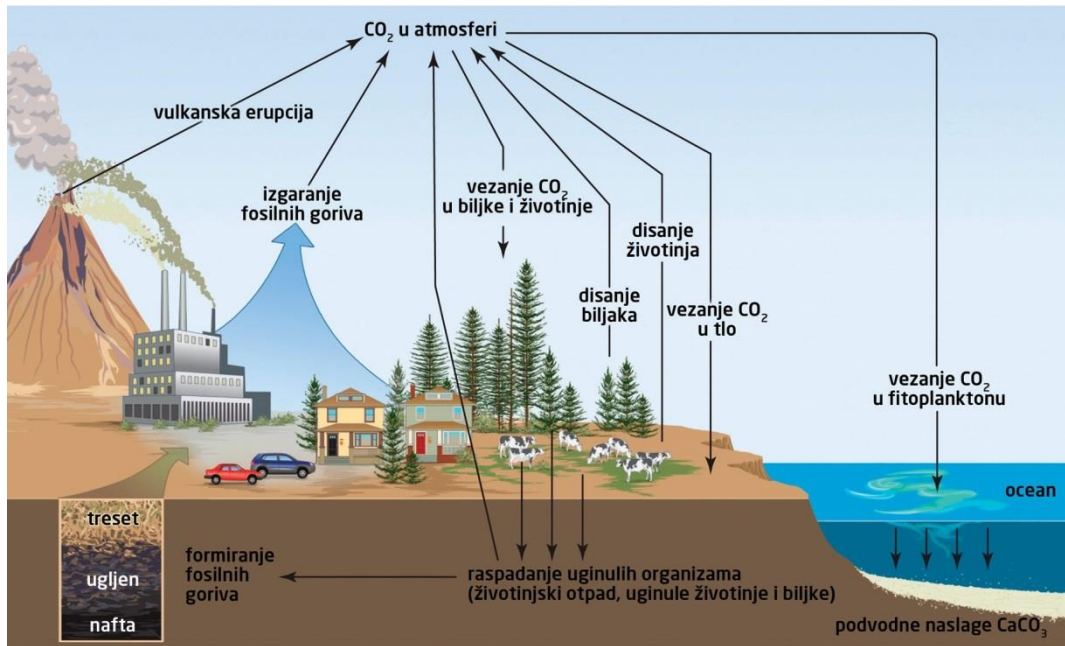
Emisije NO_x u razdoblju od 1990. godine do 2017. godine smanjene su za 50% (Slika 4). Udio emisija NO_x iz energetskog sektora imao je najveći doprinos (85,4%) u 2017. godini. Razlozi smanjenju u prometnom sektoru za 35,7% su najvećim djelom zbog uvođenja katalizatora u vozila te strožih standarda, dok su se kod sektora nepokretne i pokretne (necestovni promet) energetike smanjenja događala zbog manje potrošnje goriva. Smanjenje emisija NO_x u industriji dolazi uglavnom zbog smanjene proizvodnje te obustave proizvodnje aluminijske, celuloze i papira. U poljoprivrednom sektoru smanjenja iznose 31,6% te dolaze zbog manje uporabe N-gnojiva. Smanjenje emisija u razdoblju od 1991. do 1995. godine dolazi zbog rata na području RH, dok smanjenje od 2007. godine dolazi zbog gospodarske krize. Crvena iscrtkana linija označava vrijednost od 87 kt te je prema njoj pokazano da u 2017. godini emisija NO_x ne prekoračuje navedenu vrijednost [5].



Slika 4. Emisija NO_x (kt/god) za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]

1.3. Ugljikov dioksid

Osnovni oblik ugljika u prirodi je CO₂ koji u okoliš dolazi disanjem životinjskih organizama, a kod biljaka se fotosintezom pretvara u ugljikohidrate. Osim disanja, u okoliš dospijeva i upotrebom fosilnih goriva, pri čemu se narušava ravnoteža ugljika te se time značajno utječe na klimu, odnosno na globalno zatopljenje. Nadalje, zbog efekta staklenika dio topline koja dolazi od Sunca se zadržava dok se jedan dio vraća u svemir. Dio koji se zadržava na Zemlji, reemitira se u atmosferi na molekulama vodene pare, metana, dušikova oksida, klorofluorouglijika i dr. stakleničkih plinova pri čemu dolazi do zagrijavanja Zemlje. Povećanjem koncentracije stakleničkih plinova, povećava se i temperatura na Zemlji što dovodi do klimatskih promjena. Posljedice klimatskih promjena događaju se u cijelom svijetu a najizraženije posljedice su topljenje leda, porast razine mora, ekstremni vremenski uvjeti, posljedice na zdravlje, češći toplinski valovi, šumski požari i suše te utjecaj na gospodarstvo i društvo. Kruženje ugljika u prirodi je biogeokemijsko kruženje gdje se ugljik izmjenjuje u svojim oblicima između biosfere, geosfere, hidrosfere i atmosfere. Do biogeokemijskog kruženja ugljika dolazi zbog različitih procesa na Zemlji (kemijski, fizički, biološki itd.) pri čemu se događaju promjene oksidacijsko - redukcijskog stanja [7]. Ciklus ugljika dijeli se na dva ciklusa, odnosno na geološki i biološki ciklus. Geološki ciklus opisuje izmjenu ugljika između litosfere, hidrosfere i atmosfere, dok se kod biološkog ciklusa izmjena odvija između atmosfere i biosfere te traje kraće od geološkog. Navedena dva ciklusa su povezana fotosintezom i respiracijom. Primjer povezanosti ova dva procesa može se proučavati kroz CO₂ koji se koristio u biološkim procesima, pri čemu se iz atmosfere pohranjuje u geološke spremnike te se ugljik, odnosno organska tvar tijekom milijuna godina pretvarala u naftu i ugljen čijim se korištenjem oslobađaju spojevi ugljika u okoliš [8]. Ciklus kruženja ugljika u prirodi prikazan je na Slici 5.

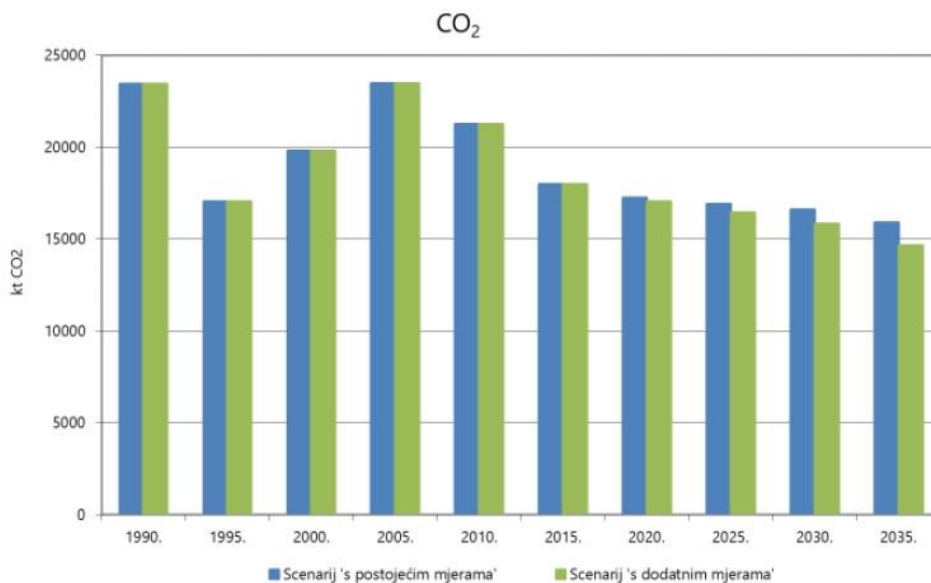


Slika 5. Kruženje ugljika u okolišu [9]

Kako bi se smanjilo negativno djelovanje CO_2 provode se različite mjere kao što su povećanje energetske učinkovitosti, povećanje korištenja obnovljivih izvora energije, trgovina emisija i uvođenjem posebnih naknada za emisije. Prema Izvješću o projekcijama emisija stakleničkih plinova po izvorima [10] prikazane su emisije CO_2 za razdoblje od 1990. do 2017. godine gdje su se primjenjivale određene mjere za njihovo smanjenje (Slika 6). Također su prikazane i projekcije emisija stakleničkih plinova za razdoblje od 2020. do 2035. godine (Slika 7).

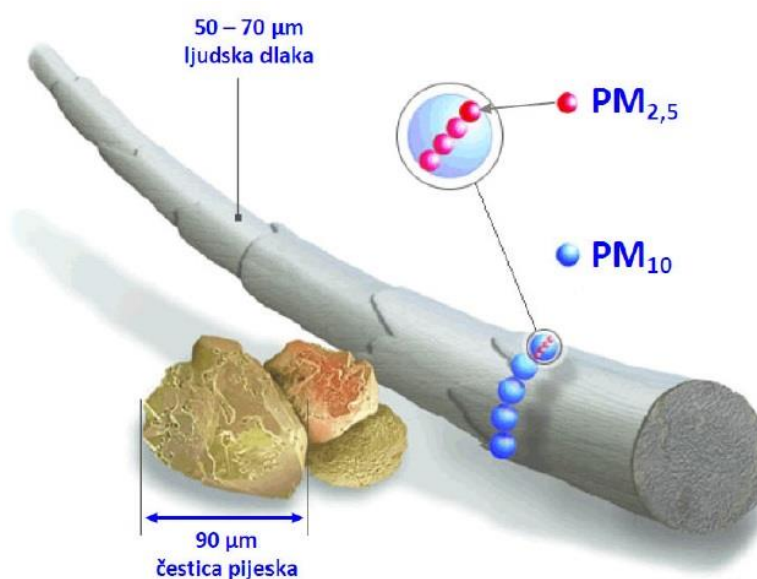


Slika 6. Emisija CO (kt/god) za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]

Slika 7. Projekcija emisija CO₂ [10]

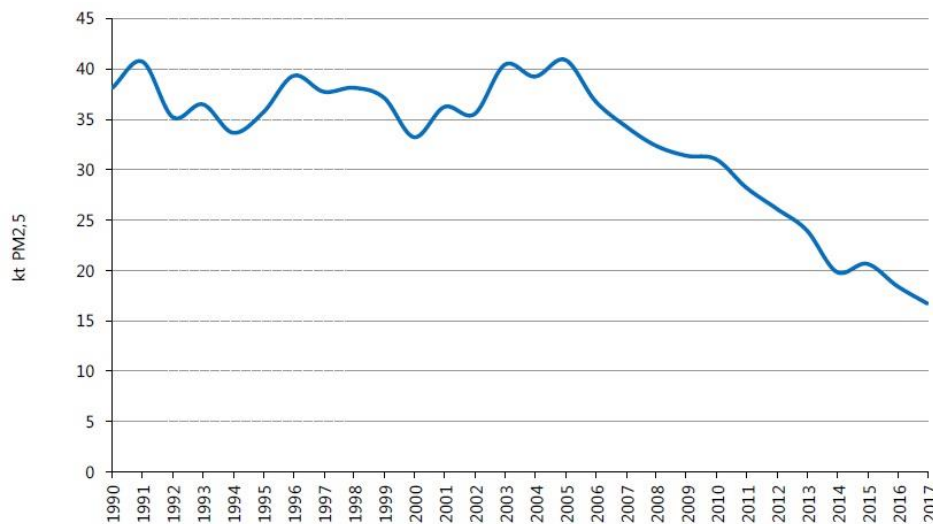
1.4. Lebdeće čestice PM_{2,5}

Lebdeće čestice su onečišćujuće tvari koje se sastoje od mješavine čestica u zraku, a mogu biti primarne (emitirane u zrak iz nekog izvora) i sekundarne (formirane iz prekursora). Za formiranje iz prekursora potrebni su spojevi poput sumporovog dioksida, dušikovih oksida i hlapivih organskih spojeva koji fotokatalitičkim reakcijama dovode do nastajanja tzv. sekundarnih. Kako bi čestice bile stabilne potrebno je njihovo zadržavanje neko vrijeme u lebdećem stanju. U lebdeće čestice ubraja se: prašina (veće od 1 μm), crni dim (može biti u tekućem ili krutom stanju), dim (najčešća veličina je između 1 i 2 μm), vodena magla i prašina (oko 20 μm) te smog (kombinacija dima i magle, uglavnom se pojavljuje kao posljedica sagorijevanja goriva). Lebdeće čestice se mogu podijeliti prema veličini na PM₁₀, PM_{2,5} i PM_{0,1}, pri čemu svaka veličina čestica ima drugačiji učinak na zdravlje (Slika 8). Oznaka PM označava suspendirane lebdeće čestice (engl. *Particulate matter*).

Slika 8. Usporedba PM₁₀ i PM_{2,5} lebdećih čestica [4]

U onečišćenju zraka lebdeće čestice i ozon su prepoznati kao najštetnije tvari za zdravlje čovjeka. Krupnije čestice se zadržavaju u gornjim dišnim putevima, dok lebdeće čestice PM_{2,5} odnosno čestice kojima je promjer <2,5 μm, imaju negativno djelovanje na donje dišne puteve te uzrokuju plućne i srčane bolesti. Što su čestice manje, dublje prodiru u dišne putove i, ovisno o topivosti, lakše prodiru kroz sluznicu, što dovodi do određenih promjena zdravlja [11].

Emisije PM_{2,5} na području Republike Hrvatske smanjene su za 56,2% u razdoblju od 1990. do 2017. godinu (Slika 9). Najveći izvor ovih emisija u 2017. godini dolazi iz sektora energetike (87,2%), od čega 68,5 % u ovom sektoru čine emisije malih ložišta i radnih strojeva. Razlog smanjenju PM_{2,5} od 1990. godine događa se zbog smanjenja emisije PM₁₀ u sektoru nepokretne energetike, gdje se smanjila potrošnja krutih goriva i povećala potrošnja plinovitih i kapljevutih goriva, dok je u prometnom sektoru zapažen rast od 8% zbog povećane uporabe vozila. Značajna smanjenja ovih emisija zapažena su od 2005. godine zbog postupne zamjene tradicionalnih domaćih peći i kotlova te zbog gospodarske krize koja se jako odrazila u građevinskom sektoru. Porast ovih emisija još je zabilježen prilikom izgradnje autoceste odnosno asfaltiranja prometnica 2002. godine [5].



Slika 9. Emisija PM_{2,5} za razdoblje od 1990. do 2017. godine [5]

1.5. Cilj i organizacija diplomskog rada

Cilj rada je dokazati da se metodom kontrolnih volumena može proučavati disperzija onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora na zadanom području. U simulaciji su korišteni podaci iz TE-TO Sisak i INA Rafinerije Sisak za onečišćujuće tvari te podaci za vjetar koji su preuzeti iz WRF modela. Opisani nepokretni industrijski izvori imaju značajan utjecaj na onečišćenje grada Siska te se simulacijom proučava kretanje onečišćujućih tvari pod različitim utjecajem vjetra.

U nastavku rada prikazana su i opisana postrojenja koja se koriste u simulaciji disperzije onečišćujućih tvari u gradu Sisku. Također je opisan matematički model koji se koristi u računalnoj dinamici fluida implementiran u komercijalni programski paket AVL Fire®. Nadalje, kod provođenja simulacije prikazane su postavke numeričke simulacije za zadanu geometriju nakon čega su analizirani rezultati disperzije emisija iz dimnjaka za koncentracije SO₂ i NO na različitim visinama domene. Kraj rada sadrži zaključak i preporuke za daljnji rad.

2. OPIS URBANE SREDINE I INDUSTRIJSKIH IZVORA

Grad Sisak je upravno središte Sisačko-moslavačke županije koja se nalazi na jugoistočnom dijelu sjeverozapadne Hrvatske. Površina Siska zauzima 422,8 km², gdje živi 47,768 ljudi. Kako se nalazi uz rijeke Savu, Kupu i Odru, od čega su Sava i Kupa plovne, to je pogodovalo razvoju gospodarstva, trgovine i prometa kroz povijest, što se i danas može prepoznati [12]. Industrija u Sisku ima značajan utjecaj na okoliš, a među najvećim onečišćivačima su (Slika 10):

- INA Rafinerija nafte – prerada nafte i plina;
- HEP d.d., Termoelektrana – proizvodnja električne energije.



Slika 10. Prikaz termoelektrane i rafinerije Sisak [13]

2.1. INA – Industrija nafte Sisak

INA posjeduje dvije rafinerije koje se nalaze u Rijeci i Sisku. Rafinerija u Sisku je kompleksna rafinerija koja pokriva oko 170 ha površine čija postrojenja posjeduju projektni kapacitet od 4.000.000 t. Većina postrojenja zajedničkim kanalom je spojena na 200-metarski dimnjak iz kojega emisije dopijevaju u okoliš. Postrojenja sadrže primarne i sekundarne procese u koje se ubrajaju atmosferska destilacija, vakuum destilacija, procesi hidrodeshulfurizacije, bitumen, izomerizacija te pomoćne jedinice poput rashladnih sustava, spremnika, postrojenja za obradu otpadnih voda, baklji i drugo. Proizvodi dobiveni u rafineriji Sisak su: ukapljeni naftni plin, motorni benzin, dizelska goriva, gorivo za mlazne motore, petrolej, loživa ulja, naftni koks (zeleni i kalcinirani), bitumen i elementarni sumpor.

Procesom dobivanja navedenih proizvoda dolazi do nastajanja onečišćujućih tvari kao što su sumporovi spojevi (ponajviše SO₂ i H₂S), dušikovi oksidi, ugljikovi oksidi, hlapivi organski spojevi i lebdeće čestice. Kako bi se provodilo praćenje emisija, postoje određeni sustavi upravljanja zaštitom okoliša i zaštitom zdravlja i sigurnosti, pri čemu se na svim ispustima iz

postrojenja redovito provode mjerenja. Procesom izgaranja određenih goriva iz procesnih i energetskih postrojenja (Slika 11), dolazi do ispuštanja emisija u zrak. Postrojenja rafinerije koja doprinose emisijama u zrak su sljedeća:

- 3 ispusta iz energetskih procesa (NGP, K-1, K-2);
- 19 ispusta iz proizvodnih procesa izgaranja bez izravnog kontakta produkata izgaranja sa sirovinom (H-501, H-502, H-503, H-5101, H-5301, H-5302, 301-H-1, 301-H-2, 301-H-3, 301-H-4, 301-PH-3, H-6101, H-6301, H-6801, H-8101, H-8501, 6900-H-001, H-2201, peć za spaljivanje biološkog mulja Lurgi);
- 4 ispusta iz proizvodnih procesa bez izgaranja goriva (baklja KP-4, dimnjak regeneratora FCC, incinerator 9300-H-501, baklja KP-6) [14].



Slika 11. Satelitski prikaz postrojenja [14]

2.2. Termoelektrana-toplana Sisak (TE-TO Sisak)

Termoelektrana-toplana smještena je u industrijskoj zoni grada Siska te je u vlasništvu Hrvatske elektroprivrede d.d. (HEP). Bavi se proizvodnjom električne i toplinske energije, a sadrži sljedeće proizvodne jedinice: Blokove A i B, Blok C, Blok D (BE-TO), pomoćnu kotlovnicu (kotlovi PK1 i PK2) i parni kotao E. Blokovi A i B datiraju od 1970., odnosno 1976. godine, a namijenjeni su za proizvodnju električne energije, pri čemu se kao gorivo koristi mazut koji se dovodi izravno iz rafinerije. Također, osposobljeni su i za rad s plinskim sustavom. Danas se navedeni blokovi ne primjenjuju jer su u 2018. godini emisije onečišćujućih tvari prekoračivale dozvoljene granične vrijednosti. Blok C je izgrađen 2015. godine i od tada počinje s isporukom toplinske energije. Blok D nalazi se u krugu nekadašnje Željezare Sisak, izgrađen je 2017. godine te služi za proizvodnju toplinske i električne energije, gdje se drvena sječka koristi kao

gorivo. Parni kotlovi i blok E, čiji kapaciteti iznose 12,5 t/h pare, služe za proizvodnju toplinske energije [13]. Za proizvodnju električne i toplinske energije potrebna su goriva, voda i pomoćne tvari. Vrste goriva za dobivanje energije su prirodni plin i teško loživo ulje. Potrošnja prirodnog plina iznosi do 260 milijuna m³/godišnje, dok količine teško loživog ulja iznose 128 000 t/godišnje. Voda koja se koristi u TE-TO služi za rashlađivanje i tehnološke potrebe te se uzima iz rijeke Save. Potrošnja vode ovisi o proizvodnji te se na godišnjoj razini smije crpiti do 240 milijuna m³. Također, za pripremu vode potrebno je koristiti kemikalije kao što je HCl, NaOH, FeCl₃, KOH i hidratizirano vapno. U radu postrojenja koriste se i različita maziva. Mjesta ispuštanja emisija i privremenog skladištenja:

- Emisije iz postrojenja u zrak dolaze iz dimnjaka blokova A i B te pomoćne kotlovnice (Tablica 1);
- Rashladne i otpadne vode prolaze kroz postupak obrade, a zatim se ispuštaju u rijeku Savu kao prirodni recipijent;
- Opasni otpad može se privremeno skladištiti u kontejnerima koji se nalaze na betonskoj podlozi ili u zatvorenom skladištu, pri čemu se koriste „big-bag“ vreće [15].

Tablica 1. Prikaz emisija u zrak [15]

Izvor emisije	Onečišćujuće tvari	Mjerna jedinica	Podaci o emisijama	
			Gorivo: mazut	Gorivo: prirodni plin
Ispust dimnjaka bloka A: Kotao A1 Kotao A2 Veliki uređaji za loženje	CO ₂	kt/god	0 – 346.02	
	CO	mg/m ³	5 - 11	0 – 5
	NO _x	mg/m ³	410 - 751	160– 264
	Krute čestice	mg/m ³	26 - 112	< 5
	SO ₂	mg/m ³	1890 – 3276	< 35
Ispust dimnjaka bloka B: Kotao B1 Kotao B2 Veliki uređaji za loženje	CO ₂	kt/god	0 – 508.42	
	CO	mg/m ³	7 - 11	0 – 5
	NO _x	mg/m ³	498 - 726	192– 332
	Krute čestice	mg/m ³	30 - 79	< 5
	SO ₂	mg/m ³	2587 – 3701	< 35
Ispust dimnjaka pomoćne kotlovnice: Kotao PK1 Srednji uređaj za loženje	CO	mg/m ³	0 – 2	1 – 13
	NO _x	mg/m ³	807 – 955	67 – 190
	SO ₂	mg/m ³	2799 – 2931	4 – 5
	Krute čestice	mg/m ³ ili dimni broj	30	Dimni broj 0
Ispust dimnjaka pomoćne kotlovnice: Kotao PK2 Srednji uređaj za loženje	CO	mg/m ³	0 – 68	1 – 9
	NO _x	mg/m ³	792 – 820	105 – 219
	SO ₂	mg/m ³	2933 – 3088	0 – 10
	Krute čestice	mg/m ³ ili dimni broj	154	Dimni broj 0
* Emisije se izražavaju masenom koncentracijom onečišćujućih tvari pri temperaturi od 273.15 K, tlaku od 101.3 kPa te pri standardnom sadržaju O ₂ od 3 %. Emisija CO ₂ izražena je kao ukupna emisija u kilotonama godišnje.				

3. MATEMATIČKI MODEL

Ovaj dio rada donosi pregled najvažnijih matematičkih modela implementiranih u komercijalni programski paket za računalnu dinamiku fluida AVL Fire® korištenog u diplomskom radu za provođenje numeričkih simulacija.

3.1. Zakon očuvanja mase

Zakon očuvanja mase govori da je masa materijalnog volumena konstantna te se može izraziti u integralnom obliku:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M(t)} \rho dV = 0. \quad (1)$$

Kad bi materijalni volumen težio čestici fluida, jednadžba (1) prelazi u diferencijalni oblik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0, \quad (2)$$

gdje v_j predstavlja komponente vektora brzine strujanja fluida, x_j kartezijeve koordinate i ρ gustoću fluida.

3.2. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja kaže da je brzina promjene količine gibanja za neki materijalni volumen jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na isti materijalni volumen. Sljedeća jednadžba prikazuje ovaj zakon u diferencijalnom obliku:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j v_i) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j}, \quad (3)$$

gdje t predstavlja vrijeme, f_i komponente vektora specifične masene sile, a σ_{ji} komponente simetričnog tenzora naprezanja.

Jednadžba za Newtonov zakon viskoznosti uz zanemarivu volumensku viskoznost glasi:

$$\Sigma_{ji} = \mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ji} = 2\mu D_{ji} - \frac{2}{3} \mu D_{kk} \delta_{ji}. \quad (4)$$

Ako u obzir uzmemo termodinamički tlak, tenzor naprezanja može se prikazati prema sljedećem izrazu:

$$\sigma_{ji} = -p \delta_{ji} + \Sigma_{ji}. \quad (5)$$

Iz zakona očuvanja količine gibanja i Newtonovog zakona viskoznosti, dobivaju se Navier-Stokesove jednadžbe kako slijedi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j x_j} + \rho f_i. \quad (6)$$

3.3. Zakon očuvanja energije

Zakon očuvanja energije, koji je još poznat kao prvi glavni stavak termodinamike, izražava da je brzina promjene zbroja unutarnje i kinetičke energije nekog materijalnog volumena jednaka sumi snaga vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na isti materijalni volumen, te brzini izmjene topline materijalnog volumena s okolinom, a glasi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j e) = \rho f_i v_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ji} v_i) - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}. \quad (7)$$

Negativni predznak toplinskog toka predstavlja prijelaz topline s materijalnog volumena na okolinu što znači smanjenje energije materijalnog volumena. U gornjem izrazu q_i su komponente vektora površinske gustoće toplinskog toka, dok član e predstavlja zbroj specifične unutarnje energije u i kinetičke energije $\frac{v^2}{2}$ fluida te glasi:

$$e = u + \frac{v^2}{2}. \quad (8)$$

3.4. Zakon očuvanja kemijske vrste

Osnovni oblik zakona očuvanja kemijske vrste može se prikazati:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j Y_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} J_i + R_i, \quad (9)$$

pri čemu je Y_i maseni udio pojedine kemijske vrste, R_i neto produkcija kemijske vrste, a J_i je difuzijski tok kemijske vrste. R_i se može prikazati kao:

$$R_i = \sum_{f=1}^I v_{if} q_f, \quad (10)$$

gdje je v_{if} stehiometrijski koeficijent, a q_f progresivna varijabla pojedine reakcije koja se može prikazati prema sljedećem:

$$q_f = k_{fn} \prod_{i=1}^K [X_i]^{v'_{if}} - k_{fp} \prod_{i=1}^K [X_i]^{v''_{if}}. \quad (11)$$

U jednadžbi (11) k_{fn} i k_{fp} predstavljaju konstante normalne i povratne reakcije f , dok je X_i molni udio pojedine kemijske vrste. Arrheniusova ovisnost o temperaturi prikazuje se kao:

$$k_{fn} = A_f T^\beta \exp\left(\frac{-E_{af}}{R_c T}\right), \quad (12)$$

gdje je E_{af} energija aktivacije, A_f koeficijent brzine reakcije, a član $\exp\left(\frac{-E_{af}}{R_c T}\right)$ predstavlja Boltzmannov faktor koji iznosi između 0 i 1 [1].

3.5. Standardna transportna jednadžba

Navedeni zakoni očuvanja mogu se svesti na standardni oblik. Standardna transportna jednadžba za opće skalarno polje glasi:

Nestacionarni član	Konvekcijski član	Difuzijski član	Izvorski član
-----------------------	----------------------	--------------------	------------------

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \phi)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi(\phi), \quad (13)$$

pri čemu je ϕ masena gustoća promatranog fizikalnog svojstva, ρ gustoća kontinuuma, t vrijeme, x_i prostorne koordinate, v_i komponente brzine gibanja u smjeru prostornih koordinata x_i , γ_ϕ koeficijent difuzije, a S_ϕ pripadajući izvorski član. U jednadžbi (13) kod navedenih članova, nestacionarni član označava lokalnu promjenu fizikalnog svojstva, konvekcijski član predstavlja transport uslijed strujanja fluida, difuzijski član predstavlja difuzijski tok kroz stranice prostornog volumena, dok izvorski član označava volumensku gustoću nastajanja ili nestajanja fizikalnog svojstva [1].

3.6. Metoda kontrolnih volumena

Metoda kontrolnih volumena primjenjuje se od 70-ih godina prošlog stoljeća za rješavanje zadataka iz mehanike fluida. Prednost ove metode je jednostavnija linearizacija sustava i diskretizacija rubnih uvjeta. Nedostaci se javljaju kod matematičke analize stabilnosti i konvergencije te dolazi do poteškoće kod konstrukcije metode višeg reda.

Diskretizacija predstavlja prvi korak kod numeričkih metoda te se dijeli na diskretizaciju prostora, diskretizaciju vremena i diskretizaciju jednadžbi. Diskretizacija prostora predstavlja aproksimaciju prostorne domene određenim brojem kontrolnih volumena, diskretizacija vremena predstavlja podjelu vremenske domene na određeni broj vremenskih koraka, dok se diskretizacija jednadžbi temelji na zamjeni diferencijalnih jednadžbi sa sustavom algebarskih jednadžbi [16].

3.6.1. Diskretizacija standardne transportne jednadžbe

Razlog provođenja diskretizacije standardne transportne jednadžbe je transformacija integralno-diferencijalnih jednadžbi u odgovarajući sustav algebarskih jednadžbi. U prvom koraku diskretizacije kod metode kontrolnih volumena, na svaki kontrolni volumen geometrijske mreže primjenjuje se integralni oblik opće transportne jednadžbe. Nakon toga se koriste sheme diferencije kojima se modeliraju konvekcijsko-difuzijski protoci fizikalne veličine kroz stranice kontrolnih volumena te se na taj način sustav diferencijalnih jednadžbi

pretvara u sustav algebarskih jednadžbi. Integracija po kontrolnom volumenu V_P i vremenu jednadžbe (13), ima oblik [1]:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{V_P} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{V_P} \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (\rho v_i \phi) dV \right] dt \\ = \int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{V_P} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dV + \int_{V_P} S_\phi(\phi) dV \right] dt. \end{aligned} \quad (14)$$

3.6.2. Vremenska diskretizacija

Diskretizacija kod nestacionarnog strujanja provedi se integriranjem parcijalne diferencijalne jednadžbe prvog reda nekom od prikladnih metoda. Primjenom pojedinih diskretiziranih članova, jednadžba (14) se može izvesti prema sljedećem:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left[\rho_P \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_P V_P + \sum_f F \phi_{f(F,S)} \right] dt \\ = \int_t^{t+\Delta t} \left[\sum_f \gamma_f \left(s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Big|_f \right) + S_l V_P \phi_P + S_E V_P \right] dt. \end{aligned} \quad (15)$$

F u jednadžbi (15) predstavlja konvekcijski protok, s površinu, S_l komponentu izvora veličine ϕ , a S_E komponentu izvora veličine ϕ koja stoji samostalno. Kontrolni volumen je označen indeksom P , dok veličinu u središtu stranice volumena označavamo s indeksom f . Promjene veličine ϕ_P i njezinih gradijenata, zanemarit će se unutar vremenskog koraka. Eksponenti n i o označavaju vrijednosti u novom vremenskom trenutku, odnosno vrijednosti u starom vremenskom trenutku. Potrebno je izabrati način na koji će se vrednovati gore navedene veličine u kontekstu novih i starih vrijednosti gdje se može koristiti Eulerovu eksplicitnu i implicitnu shemu.

3.6.3. Eulerova eksplicitna shema

Eulerova eksplicitna shema je prvog reda točnosti u vremenu i koristi stare vrijednosti ϕ^o , te je predstavljena sljedećom jednadžbom:

$$\rho_P \frac{\phi^n - \phi^o}{\Delta t} V_P + \sum_f F \phi_{f(F,S)}^o = \sum_f \gamma_f s \cdot \frac{\partial \phi^o}{\partial x_j} \Big|_f + S_l V_P \phi_P^o + S_E V_P. \quad (16)$$

Ukoliko vrijednost Courantovog broja, koji se označava s C_o , iznosi više od 1, Eulerova eksplicitna shema postaje nestabilna. Courantov broj izražava se:

$$C_o = \frac{v_f}{d} \Delta t, \quad (17)$$

u kojoj v_f predstavlja brzinu strujanja, a d udaljenost između dvaju kontrolnih volumena.

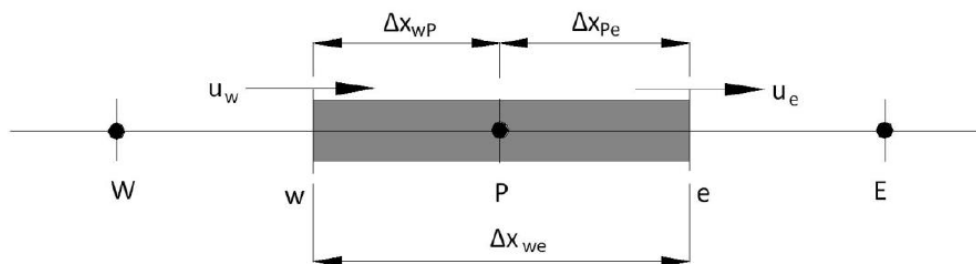
3.6.4. Eulerova implicitna shema

Eulerova implicitna shema je, za razliku od eksplicitne sheme, bezuvjetno stabilna. Koriste se nove vrijednosti ϕ^n , odnosno vrijednosti varijabla za novi trenutak. Ova metoda je prvog reda točnosti u vremenu i garantira ograničenost rješenja, a prikazana je prema sljedećem izrazu:

$$\rho_P \frac{\phi^n - \phi^0}{\Delta t} V_P + \sum_f F \phi_{f(F,S)}^n = \sum_f \gamma_f S \cdot \left. \frac{\partial \phi^n}{\partial x_j} \right|_f + S_l V_P \phi_P^n + S_E V_P. \quad (18)$$

3.7. Sheme diferencije

Sheme diferencije primjenjuju se za definiranje vrijednosti fizikalnih veličina na stranicama između kontrolnih volumena, pri čemu se viši red točnosti postiže uključivanjem vrijednosti fizikalnih veličina iz susjednih čvorova. U sheme diferencije se ubrajaju Eksponecijalna shema, Polinomna Shema, Uzvodna shema, Shema centralnih razlika, QUICK shema, Linearno uzvodna shema, itd. Na Slici 12 je prikaz proračunskog čvora (P) sa susjednim čvorovima (W i E) gdje su rubovi kontrolnih volumena indeksirani s w i e .



Slika 12. Proračunski čvor [1]

3.7.1. Shema centralnih razlika (Central Differencing Scheme - CDS)

Shema centralnih razlika za difuzijski tok kod metode kontrolnih volumena definirana je izrazom:

$$-D \left. \frac{d\phi}{dn} \right|_e = -D(\phi_E - \phi_P). \quad (19)$$

Difuzija se širi u svim smjerovima za razliku od konvekcije što znači da će vrijednosti iz čvorova kontrolnih volumena utjecati na vrijednost vektora difuzijskog toka. Konveksijski transport kod ravnomjerne mreže definiran je prema:

$$\phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2}. \quad (20)$$

Prema navedenim jednadžbama dobiva se ukupni protok [1]:

$$\Delta \phi_e = F \phi_e - D \left. \frac{d\phi}{dn} \right|_e = F \frac{\phi_P + \phi_E}{2} + D(\phi_E - \phi_P). \quad (21)$$

Shema centralnih razlika je drugog reda točnosti i nema svojstvo transportivnosti, te se zbog toga rubni uvjeti postavljaju na granicama gdje to nije potrebno. Također, zadavanju rubnih uvjeta doprinosi i eliptičnost koja se javlja kod ove sheme.

3.7.2. Uzvodna shema (Upwind Differencing Scheme - UDS)

Kako je difuzijski transport simetričan, za diskretizaciju se primjenjuje shema centralnih razlika:

$$-D \frac{d\varphi}{dn} \Big|_e = -D(\varphi_E - \varphi_P). \quad (22)$$

Difuzijski transporti uzvodne sheme i sheme centralnih razlika su jednaki, ali se razlikuju po konvekcijskim transportima, gdje je konvekcijski član izveden prema sljedećem:

$$\varphi_e = \begin{cases} \varphi_P & \text{za } F > 0 \\ \varphi_E & \text{za } F < 0 \end{cases}. \quad (23)$$

Uzvodna shema ukazuje da se za vrijednost φ_e uzima vrijednost u uzvodnom čvoru. Smjer strujanja definira uzvodni čvor (φ_P ili φ_E). Kako je već navedeno, sheme se razlikuju ovisno o vrijednosti φ_e što predstavlja modeliranje konvekcijskog transporta. Protok za pozitivne vrijednosti F prema uzvodnoj shemi diferencije glasi:

$$\Delta\phi_e = F\varphi_e - D \frac{d\varphi}{dn} \Big|_e = F\varphi_P + D(\varphi_E - \varphi_P). \quad (24)$$

Nedostatak ove sheme je što unosi lažnu difuziju te je prvog reda točnosti dok s pozitivne strane daje jednostavno računanje koeficijenata koji su uvijek pozitivni i time se neće dobivati nefizikalne oscilacije rješenja [1].

3.7.3. Kombinirana shema (Blending scheme)

Ova shema predstavlja linearnu kombinaciju uzvodne sheme i sheme centralne diferencije u kojoj je koeficijent φ_e definiran kao:

$$\varphi_e = \gamma\varphi_e^{CDS} + (1 - \gamma)\varphi_e^{UDS}, \quad (25)$$

gdje γ predstavlja faktor miješanja te ako iznosi 1 dobiva se shema centralnih razlika, a ukoliko iznosi 0 onda se radi o uzvodnoj shemi [1].

3.8. Turbulencija

Strujanje fluida se s obzirom na vrijednost Re broja može podijeliti na laminarno i turbulentno. Laminarno strujanje se javlja pri malim brzinama i karakterizira ga postojanje slojeva fluida koji se makroskopski međusobno ne miješaju te imaju različite brzine. Turbulentno strujanje predstavlja oblik strujanja gdje dolazi do nepravilnog vrtložnog gibanja u trenutku kada inercijalne sile fluida nadvladaju viskozne. Pojava turbulentnog strujanja, osim miješanja, rezultira gubicima energije i topline, a fizikalne veličine su ujednačene unutar područja

strujanja. Vrijednost Reynoldsovog broja koristi se kao granica između ova dva režima strujanja, a definira se sljedećim izrazom:

$$Re = \frac{v \cdot x}{\nu}, \quad (26)$$

pri čemu je v brzina strujanja, x karakteristična duljina, a ν kinematička viskoznost [1].

3.8.1. RANS jednadžbe za viskozno nestlačivo turbulentno strujanje

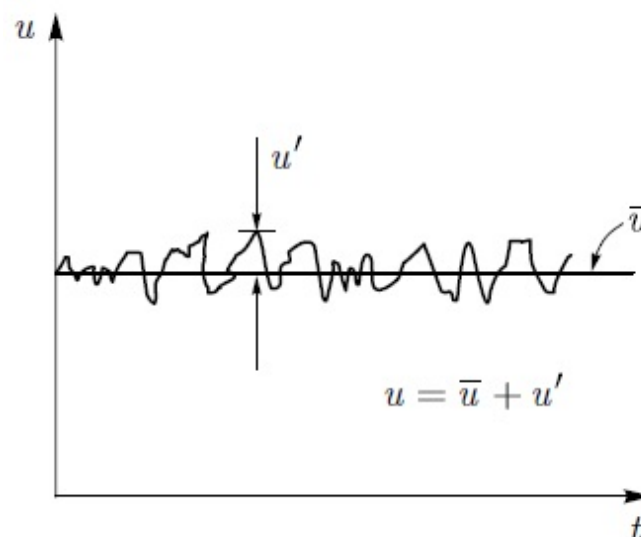
Laminarno nestlačivo strujanje Newtonovskog fluida opisano je Navier-Stokesovim jednadžbama koje glase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} + \overbrace{\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)}^{\tau_{ij}}. \quad (27)$$

U gornjem izrazu nepoznanice predstavljaju komponente polja brzine v_i i polje tlaka p [17]. Pri numeričkom rješavanju Navier–Stokesovih jednadžbi za slučaj razvijenog turbulentnog strujanja diskretizacija bi morala obuhvatiti sve amplitude pulzacija fizikalnih veličina. Također, kako bi se obuhvatile sve frekvencije pulzacija, potrebno je da vremenski korak integracije bude dovoljno mali. Ovakav način rješavanja problema je zahtjevan te se danas najčešće koriste prosječne vrijednosti fizikalnih veličina dobivene Reynoldsovom osrednjavanjem [1].

Trenutna vrijednost fizikalne veličine može se pokazati kao zbroj osrednjene vrijednosti i pulsirajuće komponente (28), kao što je prikazano dijagramom na Slici 13.

$$\begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i + v'_i \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (28)$$



Slika 13. Grafički prikaz relacije (28) [17]

Reynoldsovim osrednjavanjem jednažbi (27) dobije se osrednjeni oblik Navier-Stokesovih jednažbi (eng. *Reynolds Averaged Navier Stokes* - RANS, jednažba (29)), gdje razliku čini predstavnik pulsirajućeg strujanja $-\rho\overline{v_i'v_j'}$, prema izrazu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{v_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{v_i v_j}) = \frac{-\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} + \left[\mu \left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i} \right) - \rho\overline{v_i'v_j'} \right]. \quad (29)$$

Predstavnik pulsirajućeg strujanja ujedno je i član koji označava turbulentnu difuziju količine gibanja te se još naziva Reynoldsovo naprezanje. Ono se može prikazati simetričnim tenzorom sa šest nepoznanica:

$$\tau_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

U ovakvom sustavu ne postoji jedinstveno rješenje jer RANS jednažbe sadrže više nepoznanica nego što ima jednažbi. Kako bi bilo moguće riješiti RANS jednažbe, sustav je potrebno zatvoriti modelima turbulencije, čiji je zadatak uskladiti broj jednažbi s brojem nepoznatih polja [17].

4. POSTAVKE NUMERICKE SIMULACIJE

Simulacija se provodi u komercijalnom računalnom paketu AVL Fire® koji predstavlja industrijski standard za računalnu dinamiku fluida u području motora s unutrašnjim izgaranjem. Primjenom ovog programa potrebno je zadati geometriju, postaviti mrežu kontrolnih volumena, zadati početne i rubne uvjete koji odgovaraju realnim uvjetima te prikazati rezultate.

Urbana sredina za koju se provodi simulacija je područje grada Siska te je domena u kojoj su zadani rubni uvjeti napravljena prema koordinatnim točkama grada čiji je položaj prikazan na Slici 14, a čije su koordinate prikazane u Tablici 2.

Tablica 2. Koordinatne točke koje su odabrane za krajnje točke simulacijske domene

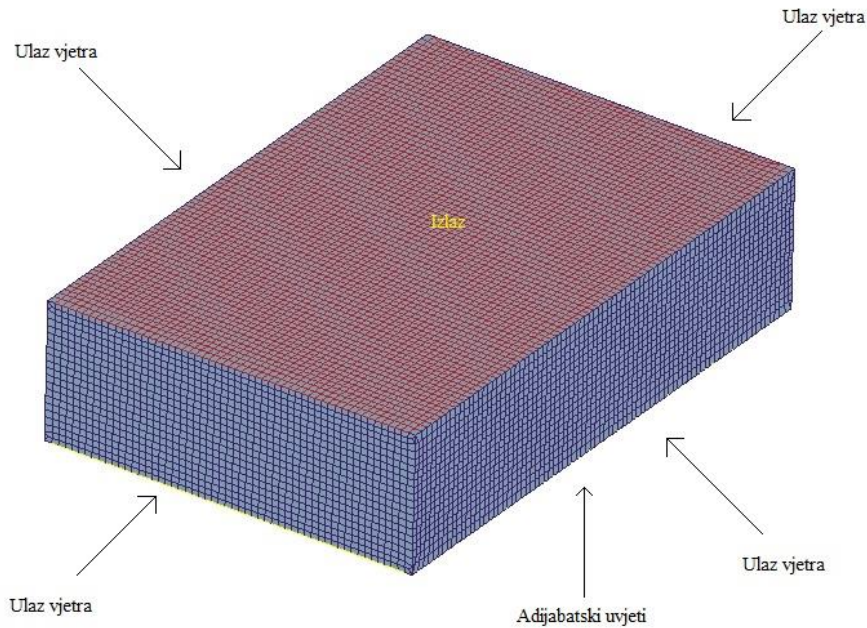
Točke	Zemljopisna širina, °	Zemljopisna dužina, °
1 (ishodište)	45.4365874	16.353278
2	45.436587	16.423981
3	45.510633	16.423981
4	45.510633	16.353278



Slika 14. Prikaz područja na temelju kojeg je napravljena geometrija za provedbu simulacije

Postavke simulacije uključuju parametre za ulaz vjetra čiji su podaci preuzeti s meteorološkog modela WRF (eng. *Weather Research and Forecasting*) koji služi za prognoze i atmosferska istraživanja [18]. Dobiveni podaci za ulaz vjetra odnose se na 4 rubne koordinatne točke za cijelu visinu domene koje opisuju područje grada Siska, dok su ostale točke unutar zadanog područja dobivene linearnom interpolacijom. Podaci ulaza vjetra odabrani su za razdoblje od 1. do 2.12.2015. godine kroz 24 sata i sadrže komponente brzine (u , v i w) te turbulentnu kinetičku

energiju (tke). Visina domene je 2000 m, širina 8230 m i dužina 5530 m. Na Slici 15, prikazana je mreža sa selekcijama za rubne uvjete bez ulaza emisija iz dimnjaka.



Slika 15. Prikaz mreže sa selekcijama za rubne uvjete

Selekcije koje nisu prikazane na Slici 15, odnose se na ulaze emisija onečišćujućih tvari iz dimnjaka termoelektrane i rafinerije. Podaci za navedene ulaze emisija u domenu, zadani su prema izmjerenim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari iz dimovodnih kanala peći rafinerije i termoelektrane, što je dano u Tablici 3. Podaci za rafinerijska mjerenja su iz 2007. godine, dok su podaci za termoelektranu iz 2009. godine. Ograničena dostupnost mjerenih podataka nije dopuštala provođenje simulacije s podacima za isto vremensko razdoblje, a samim time niti validaciju simulacijske studije.

U računalnoj domeni smješteno je 5 dimnjaka, od čega 2 dimnjaka pripadaju termoelektrani (TE blok A i B) i 3 rafineriji (FCC, WB3 i glavni dimnjak), s time da se u glavnom dimnjaku izračunavaju prosječne vrijednosti 8 drugih peći, što je prikazano u Tablici 4.

Tablica 3. Prikaz podataka za sve dimnjake korištene u simulaciji

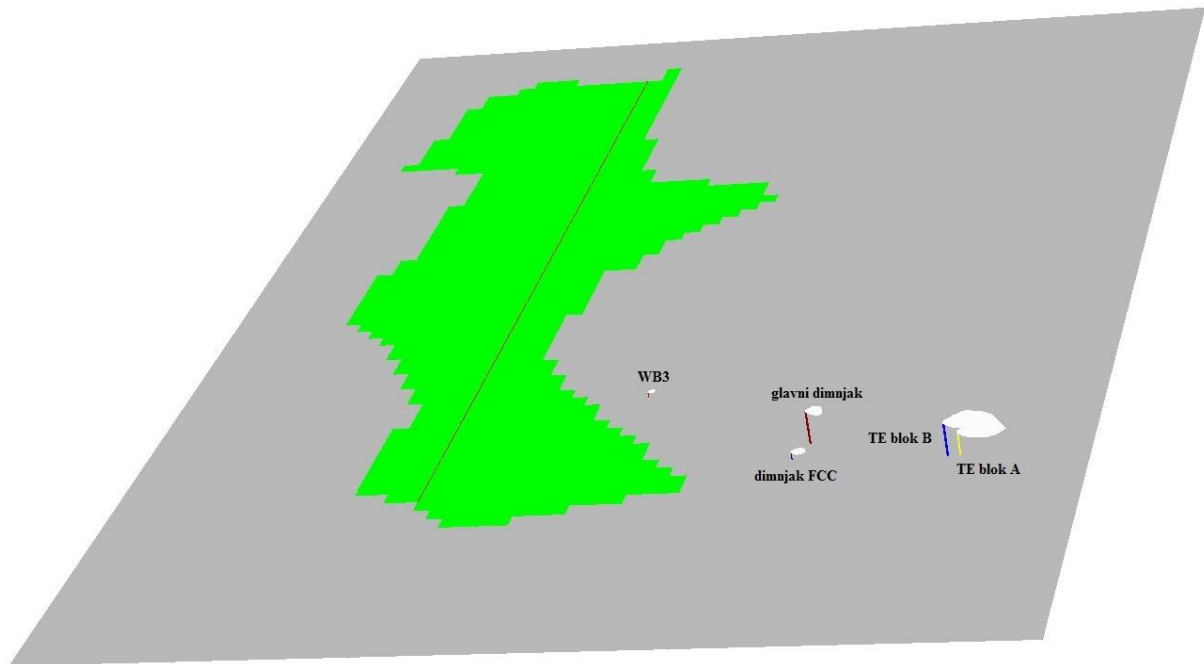
DIMNJACI	Temperatura	Maseni protok	Maseni udjeli, ppm		
	K	kg/h	CO	SO ₂	NO
dimnjak FCC	620	67980	15	695	263
WB3	484	47652	82	443	101
glavni dimnjak	423	361902	9	552	138
TE blok A	433	202767	5	2142	470
TE blok B	433	271391	4	2046	506
DIMNJACI	Dimenzije		Udaljenost od ishodišta (45.436583, 16.353278)		
	promjer, m	visina, m	x	y	
dimnjak FCC	1.31	42	3880	1990	
WB3	0.94	30	2880	2820	
glavni dimnjak	6.25	200	3950	2170	
TE blok A	4.3	140	4820	1970	
TE blok B	6.8	200	4750	1970	

Tablica 4. Podaci za emisije svih peći koje ulaze u glavni dimnjak Rafinerije Sisak

PEĆI	Normirani protok plina (m ³ /h)	Temperatura (°C)	Sadržaj O ₂ (%)	Maseni protok CO (g/h)	Maseni protok SO ₂ (g/h)	Maseni protok NO _x (g/h)
H-6101	102405	398	7.27	443.45	37306.82	15293.38
H-6301	35170	333	6.57	809.11	-	5720.29
H-2201	10930	680	12.40	1373.42	-	1370.02
H-8101	14023	227	11.77	51.31	-	1168.54
H-8501	14638	344	6.73	350.86	-	1605.45
9300 H-501	11471	238	5.60	-	13594.11	-
K-1	50553	199	2.67	269.93	81591.43	25360.86
K-2	53962	197	3.00	413.77	81805.30	25180.86

Kod izlaznog rubnog uvjeta narinut je konstantni statički tlak u iznosu od 0.8 bar. U obzir je uzet linearni pad tlaka s visinom. Na donjoj stranici domene zadan je adijabatski rubni uvjet. Nadalje, za model turbulencije korišten je etablirani $k-\varepsilon$ model. Kriterij konvergencije se postiže kada reziduali fizikalnih veličina padnu četiri reda veličine u odnosu na početno rješenje. Za vremensku diskretizaciju koristi se Eulerova implicitna shema prvog reda. Sprega polja brzine i tlaka izvršena je korištenjem SIMPLE algoritma. Shema centralnih razlika koristi se kod jednadžbe kontinuiteta, dok se kombinirana shema uzvodne i sheme centralnih razlika koristi kod jednadžbe količine gibanja. Faktor miješanja između navedene dvije sheme iznosi 0.5. Energetska i skalarna jednadžba, kao i jednadžbe za turbulenciju koriste uzvodnu shemu diferencije.

U nastavku rada, promatrat će se rezultati područja koje je prikazano na Slici 16, pri čemu je zelenom bojom označeno samo područje gradskog naselja Siska te su navedeni nazivi relevantnih dimnjaka iz industrijske zone.



Slika 16. Simulirano područje s naznakom granica gušće naseljenog područja grada (zeleno)

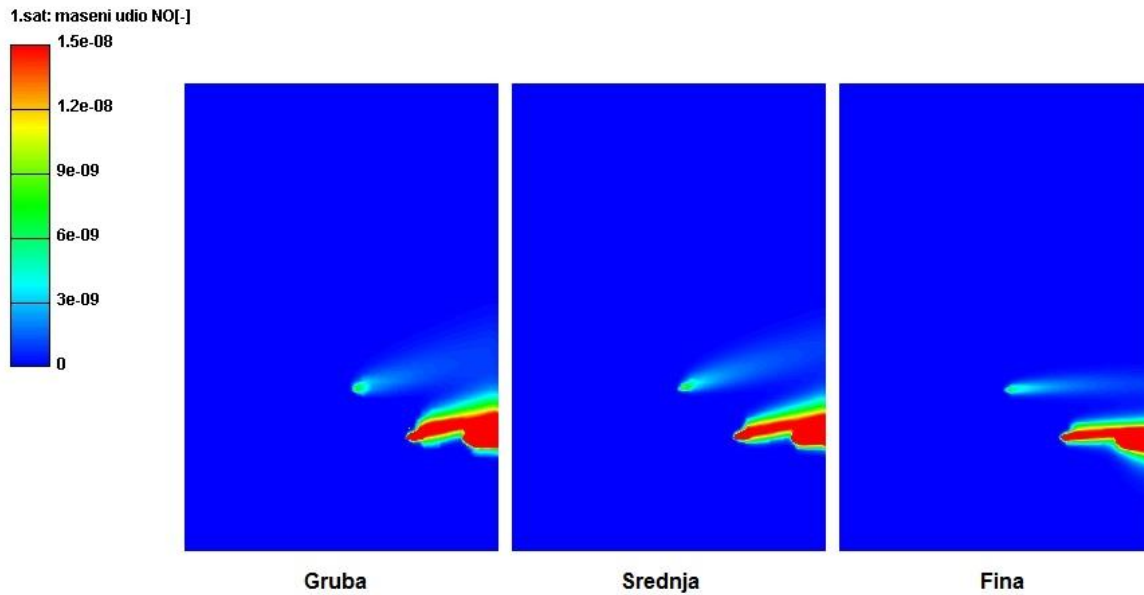
4.1. Studija utjecaja računalne mreže

Mreža kontrolnih volumena generira se pomoću pretprocesora FAME koji je sastavni dio programskog paketa AVL Fire[®]. U ovom djelu rada provodi se studija utjecaja mreže prema opisanim uvjetima u prethodnom poglavlju. Test mreže podrazumijeva dobivanje odgovarajuće točnosti rezultata uz razumno vrijeme računanja. Analiza mreža provodi se na tri rezolucije mreže koje su nazvane gruba, srednja i fina. Navedene mreže se razlikuju po broju kontrolnih volumena te su u Tablici 5 prikazane maksimalne i minimalne veličine kontrolnih volumena za svaku mrežu.

Tablica 5. Vrijednosti maksimalnih i minimalnih veličina kontrolnih volumena za svaku mrežu

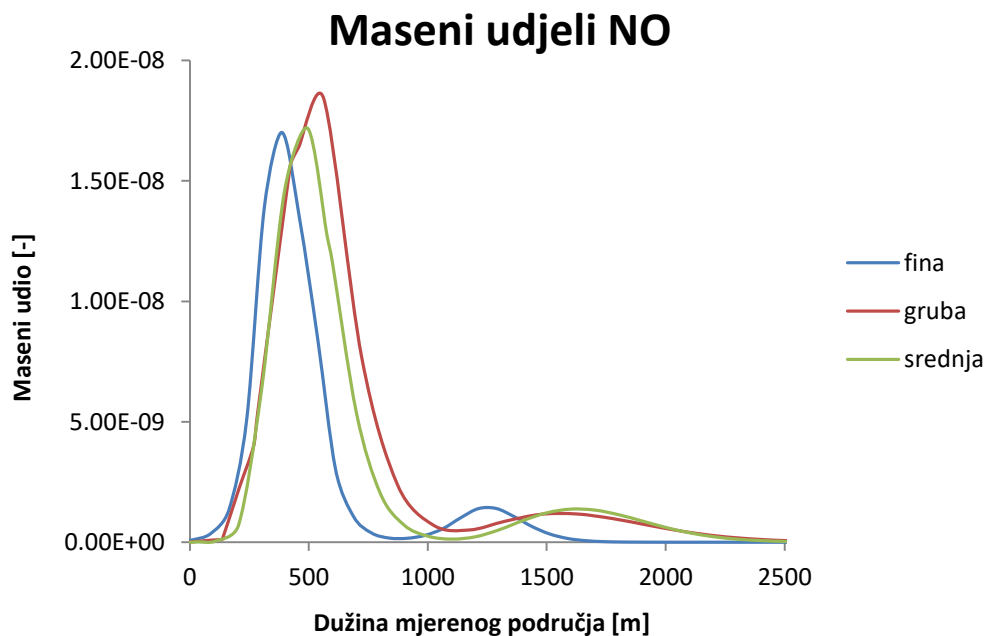
Naziv mreže	Minimalna veličina kontrolnog volumena, m	Maksimalna veličina kontrolnog volumena, m
Gruba	18.75	150
Srednja	12.5	100
Fina	9.375	75

Usporedba triju mreža provodila se prema koncentraciji NO na visini od 2 metra kod prvog sata simulacije. Potrebno je naglasiti da se rezultati mreža uzimaju za ravnu liniju koja presijeca sve dimne perjanice. Nakon usporedbe rezultata odabire se najpogodnija mreža koja nudi kompromis između točnosti i računalnih resursa. U nastavku su prikazani rezultati za svaku od navedenih mreža (Slika 17). Iz rezultata su vidljive promjene dimne perjanice i koncentracija NO. Gruba mreža ima veće područje maksimalne koncentracije i perjanica je rasprostranjenija u odnosu na rezultate dobivene iz druge dvije mreže. Smjer perjanice je sličan kao kod srednje mreže, dok se u odnosu na finiju mrežu smjer vidno razlikuje. Dimne perjanice srednje i fine mreže sadrže slične vrijednosti koncentracija NO i manje odstupanje u njihovim smjerovima.



Slika 17. Prikaz rezultata za različite rezolucije mreža

Usporedba rezultata masenih udjela NO dobivenih na različitim mrežama, prikazana je grafom na Slici 18. Kod grube mreže prikazana je najveća koncentracija NO, dok su kod ostale dvije mreže koncentracije podjednake. Gledano na dužinu mjerenog područja, maksimalna koncentracija kod fine mreže postignuta je prije 500 metara, druge dvije mreže postižu maksimalnu koncentraciju gotovo na istom području poslije 500 metara.



Slika 18. Prikaz rezultata masenih udjela NO za tri mreže.

Iz prikazanog se može zaključiti da fina i srednja mreža imaju slične vrijednosti koncentracija, dok gruba i srednja zauzimaju slično područje. Prema broju kontrolnih volumena i pregledanim rezultatima, srednja mreža zahtjeva manje računalnih resursa i daje razumne rezultate te se u daljnjoj simulaciji disprezije onečišćujućih tvari u gradu Sisku koristila srednja mreža.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Disperzija dimne perjanice ovisi o utjecaju vjetrova i konfiguraciji terena. Ukoliko su podaci za vjetar uniformni, dimna perjanica može postići velike udaljenosti. U realnim uvjetima, doseg velikih udaljenosti uvelike ovisi o topografiji i prizemnom trenju čime se sprječavaju takve situacije. Također, dimna perjanica se u realnim uvjetima može mijenjati zbog drugih tvari u atmosferi, stvarajući druge plinove koji utječu na dinamiku dimne perjanice.

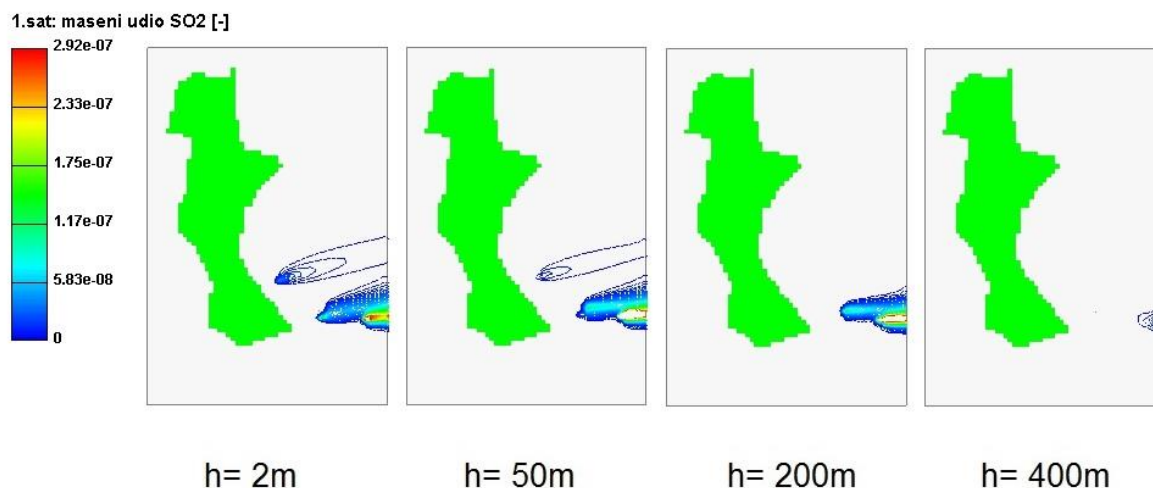
U nastavku rada su opisani rezultati za disperziju SO₂ i NO.

5.1. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije SO₂

Emisije onečišćujućih tvari iz dimnjaka i vjetar ulaze u domenu čije su dimenzije 8230 x 5530 x 2000 m. Ulazak emisija u domenu odvija se na različitim visinama i pri različitim brzinama zbog različitosti visina, promjera te masenih protoka dimnjaka. Ulazak vjetrova 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 za ulaz emisija iz dimnjaka (Tablica 4), dobivaju se rezultati čije su koncentracije izražene u ppm (eng. *parts per million*). Koncentracije u skalama su zadane prema graničnim vrijednostima za emisije SO₂ kako je propisano *Uredbom o razinama onečišćujućih tvari u zraku* (NN 117/12 i 84/17). Granična vrijednost koncentracije SO₂ u zraku, s obzirom na zaštitu zdravlja ljudi, za vrijeme usrednjavanja od jednog sata iznosi 350 µg/m³ te je ta vrijednost preračunata u masene udjele. Rezultati će se promatrati za tri vremenska trenutka simulacije, točnije za prvi, četrnaesti i dvadesetčetvrti sat kako bi do izražaja mogle doći promjene vjetrova koje su se događale kroz 24 sata, odnosno kroz dan za koji su uzeti podaci iz WRF modela. Također, na slikama su prikazani rezultati na različitim visinama, pri čemu se mogu uočiti značajne promjene u obliku dimne perjanice.

Prema prethodno opisanom odjeljku, na Slici 19 prikazana je disperzija SO₂ s pripadajućim vrijednostima koncentracija na različitim visinama domene za prvi sat.



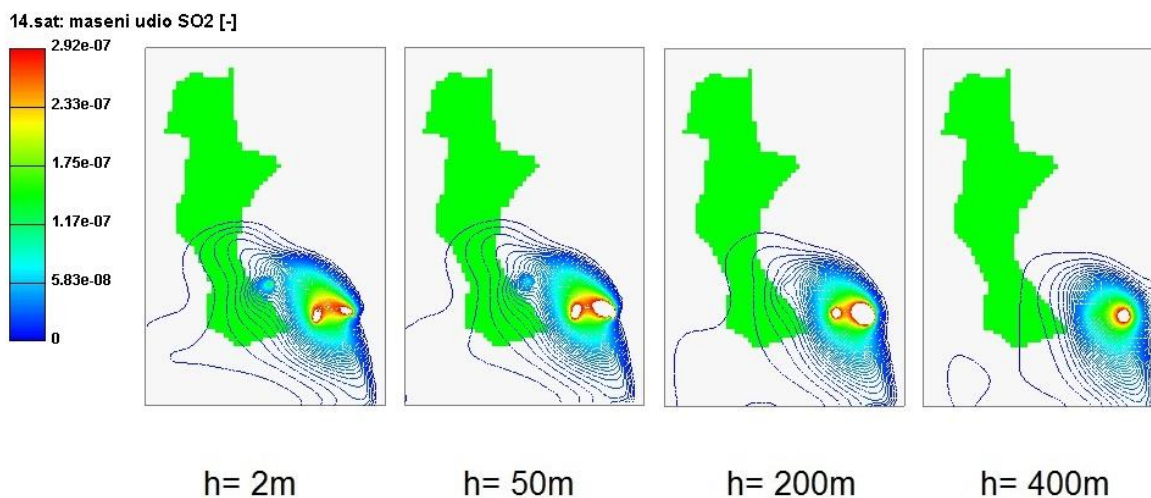
Slika 19. Prikaz dimnih perjanica u prvom satu za vrijednosti koncentracija SO₂

Dimna perjanica prikazuje vrijednosti koncentracija iz različitih smjerova ovisno o vjetru. Dimne perjanice iz dimnjaka su usko kanalizirane, odnosno male širine te je vjetar poprilično uniforman, čime se postižu veće udaljenosti perjanica i duže zadržavanje u zraku. Također, tome doprinosi i slabija disperzija na krajevima dimne perjanice. Navedeno je uzrok manje

koncentracije površinske emisije. S obzirom na različite visine kod prikazanih rezultata, koncentracija onečišćujućih tvari prema navedenoj graničnoj vrijednosti (crvena boja) je najizraženija pri tlu, odnosno na visini od 2 m, a s obzirom na teren, najviše je zahvaćeno područje oko dimnjaka. Razlog tome je što temperatura dimnih plinova pada, čime se povećava gustoća te u trenutku kad postane veća od gustoće okolišnog zraka, plin se počinje kretati prema dolje. Ovakav način nije pogodan za disperziju dimnih plinova u atmosferi. Na visini od 50 m koncentracija označena crvenom bojom je manja, čemu pridonose i visine dimnjaka. Također, dolazi i do povećanja koncentracije kod visine od 50 m u predjelu gdje se nalazi FCC dimnjak visine 42 m. Navedeno povećanje koncentracije je označeno svijetlo plavom bojom. Nadalje, dimnjaci FCC i WB3, na svakoj visini za koju su prikazani rezultati, imaju sve slabije izraženu dimnu perjanicu, dok na visinama od 200 i 400 m ona potpuno nestaje. Glavni razlog tome su male visine navedenih dimnjaka. Pod različitim uvjetima vjetra, vidljive su male promjene smjera dimne perjanice. Do minimalnih promjena smjera dolazi kod visine od 200 m, ukoliko se uspoređi smjer dimnih perjanica na visinama od 2 m i 50 m.

Razlika rezultata kod koncentracije graničnih vrijednosti emisija (GVE) je izraženija kod 200 m u odnosu na 50 m jer se na većim visinama pojavljuje više izvora snažnijih emisija. Na 400 m vidljiva je dimna perjanica samo iz dimnjaka TE, pri čemu je izraženija iz dimnjaka bloka B.

U četrnaestom satu, prema Slici 20, vidljive su značajne razlike u odnosu na prvi 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.

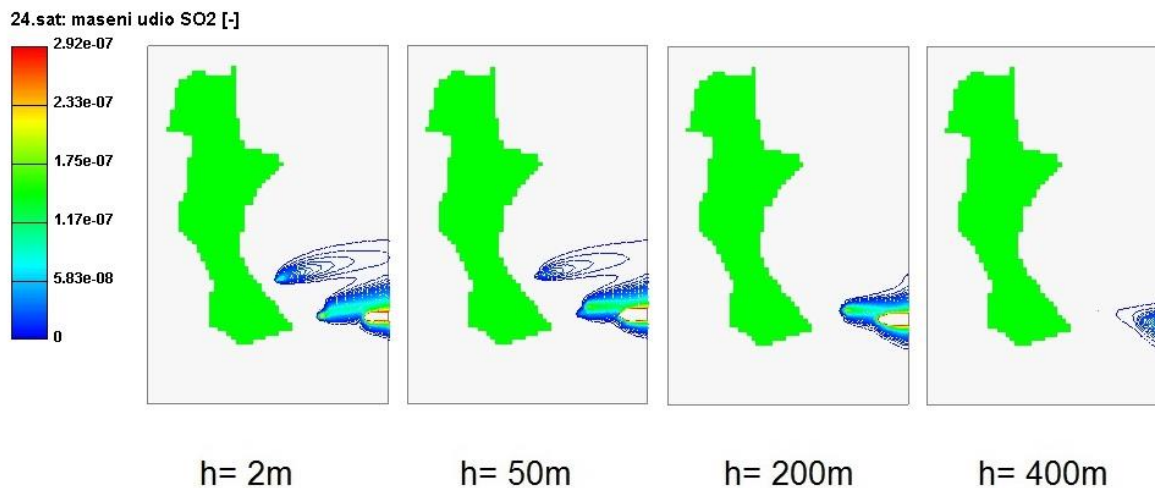


Slika 20. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

U realnim uvjetima razlozi tome mogu se ogledati u stanju atmosfere, dobu dana, meteorološkim uvjetima te drugim utjecajima. Raspršeni dimni plinovi, uz veće brzine vjetra, mogu uzrokovati povećanu koncentraciju pri tlu i disperziju na veće udaljenosti. Iz navedenog se može zaključiti da nepokretni industrijski izvori grada Siska predstavljaju potencijalnu opasnost od onečišćenja čak i za područja koja se nalaze na većim udaljenostima od industrijske zone. Koliku udaljenost će zahvatiti, ovisi o čimbenicima koji djeluju na dimnu perjanicu, a to su brzina i smjer vjetra te lokalni atmosferski uvjeti. Prikazana dimna perjanica zahvaća naseljeniji dio grada označen zelenom bojom te je emisija SO_2 povećana u odnosu na prvi sat. Dimna perjanica se bitno ne mijenja s visinom, jedino se male razlike primjećuju na visini od

400 m gdje ne postoji perjanica iz dimnjaka WB3 zbog visine te je doprinos emisija iz rafinerijskih dimnjaka znatno slabiji.

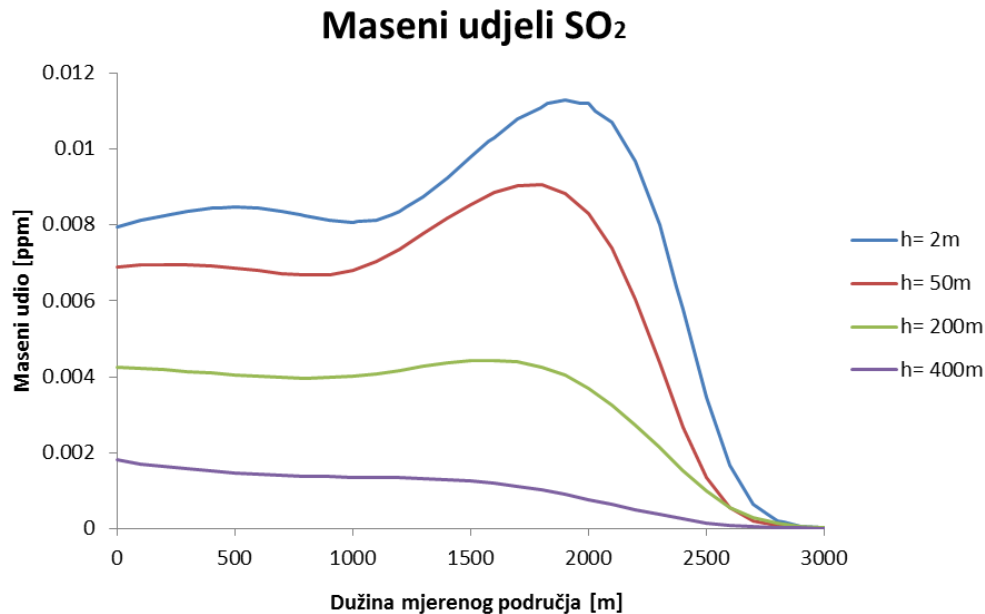
Rezultati sa Slike 21 ukazuju na smanjenje koncentracije i, gledano na koncentracije propisane Uredbom za GVE, perjanica obuhvaća manje područje nego u odnosu na rezultate dobivene za 14. sat.



Slika 21. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

Ukoliko se usporede dimne perjanice, perjanica iz 24. sata nije toliko prostrana i smanjuje se s obzirom na visinu. Nadalje, dimna perjanica je slična kao u prvom satu, što znači da je usko kanalizirana i da je vjetar uniforman te u tim uvjetima perjanica postiže veće udaljenosti. Slična situacija je i s ulazima emisija iz dimnjaka. Područje oko WB3 dimnjaka za ovaj sat sadrži nešto veće koncentracije, ali i dalje perjanica iz navedenog dimnjaka nestaje pri većim visinama zbog visine dimnjaka. Isto vrijedi i za FCC dimnjak. Perjanica iz glavnog dimnjaka na 400 m nije značajno izražena te je slična i kod prethodnih rezultata. Onečišćenja emitirana iz dimnjaka TE stvaraju dimnu perjanicu koja je postojana na 400 m za sve sate simulacije. Vjetar malo mijenja smjer disperzije, što je vidljivo na 50 i 200 m.

Dijagram sa Slike 22 prikazuje vrijednosti koncentracija SO₂ na različitim visinama za 14. sat simulacije na liniji koja prolazi sredinom zeleno označenog područja koje predstavlja gusto naseljeni dio grada (naznačeno na Slici 16).



Slika 22. Dijagramski prikaz masenih udjela SO₂ na različitim visinama za 14. sat

Ukoliko se usporede rezultati, može se zaključiti da je koncentracija SO₂ najveća uz tlo odnosno na visini od 2 m. Postignuta koncentracija je ispod propisanih vrijednosti koje se odnose na granične vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku.

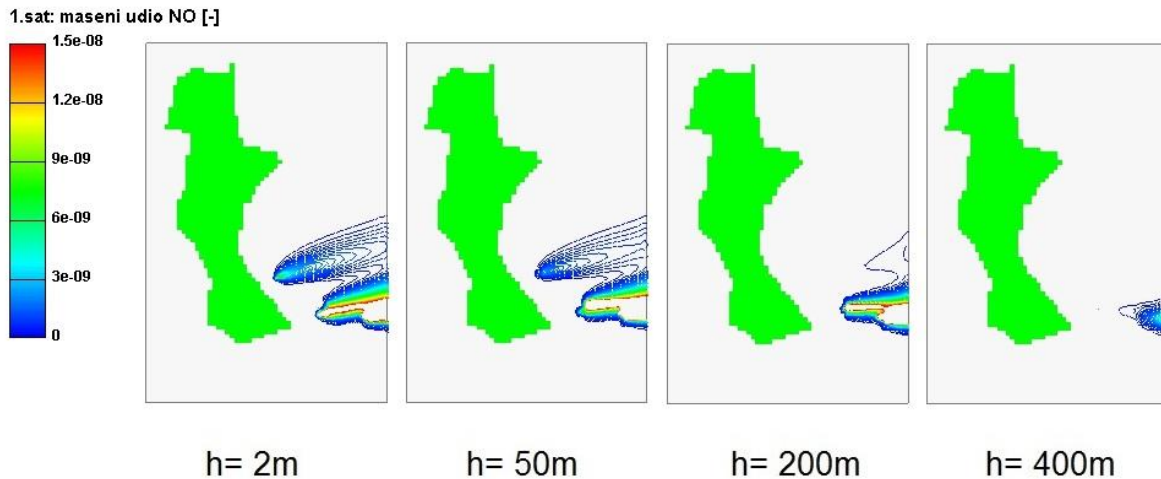
Na visini od 50 m, koncentracija SO₂ nije u blizini kritičnih vrijednosti te, kako se prate rezultati prema visinama od 200 i 400 m, vrijednosti koncentracija padaju prema nuli te postaju sve ujednačeniji u prostoru. Emisije koje ulaze u promatrano područje, obuhvaćaju duljinu od 3000 m što uvelike ovisi o brzini i smjeru vjetra za sat u kojem se provodi simulacija. Navedeno područje je prikazano na Slici 16.

Najveća vrijednost koncentracija SO₂ za visinu od 2 m, gledajući duljinu linije na Slici 16, postignuta je na 2000 m, dok se za ostale visine najveće koncentracije postižu na sve manjoj udaljenosti od ishodišta. Koncentracije na svim visinama nakon 2000 m počinju naglo padati i na 3000 m iznose nula. Na kraju valja istaknuti kako se ni u jednom simuliranom satu ne premašuje GVE za SO₂ u naseljenom dijelu grada označenom zelenom bojom, čime se kakvoća zraka s obzirom na koncentracije SO₂ ocjenjuje zadovoljavajućom.

5.2. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije NO

U ovom djelu rada prikazani su rezultati disperzije NO iz nepokretnih industrijskih izvora na isti način kao i za SO₂. Prikazane vrijednosti koncentracija u rezultatima nisu zadane prema propisanim vrijednostima kao za SO₂, nego su rezultati prikazani prema referentnim vrijednostima simulacije da se dobije zadovoljavajući kontrast. U slučaju NO granične vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku nisu definirane Uredbom o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 117/12 i 84/17). Sljedeće tri slike prikazuju disperziju NO s pripadajućim vrijednostima koncentracija na različitim visinama. Na sljedećim slikama, dimne perjanice su gušće i prostranije te su vrijednosti koncentracija NO manje nego na prethodno opisanim rezultatima za SO₂.

Slika 23 prikazuje rezultate za prvi sat gdje je dimna perjanica slična perjanici s prvog sata za SO₂.

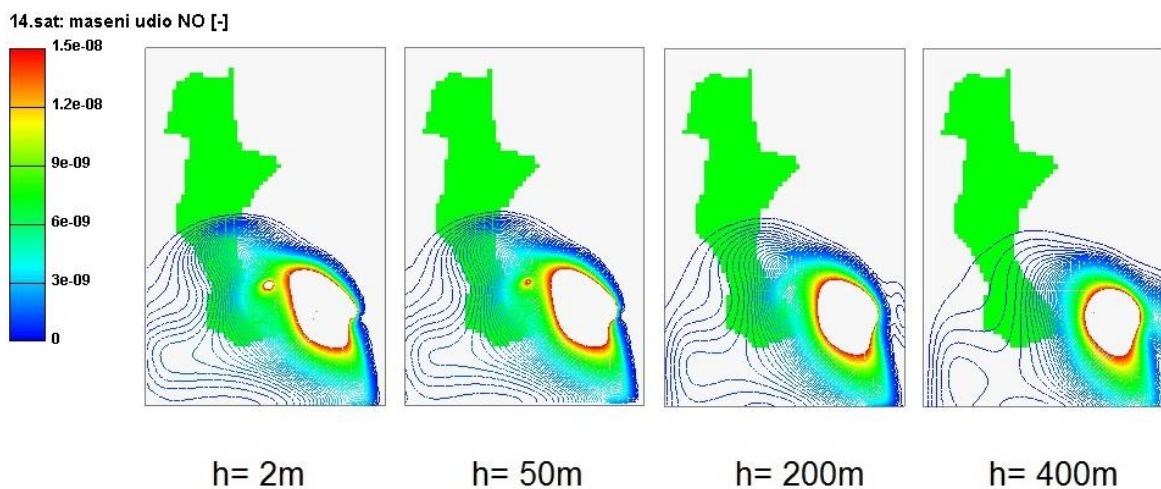


Slika 23. Prikaz dimnih perjanica u prvom satu za vrijednosti koncentracija NO

Dimne perjanice imaju isti smjer jer su rezultati prikazani za isti sat pri čemu na emisije djeluje vjetar jednakih uvjeta. Perjanica za ovaj slučaj je prostranija i obuhvaćena veće područje maksimalne koncentracije promatrane onečišćujuće tvari. Također, ni u ovom slučaju perjanica ne zahvaća područje naseljenijeg djela grada te se kreće u suprotnom smjeru. Vjetar je uniforman i perjanica iz dimnjaka je usko kanalizirana, što omogućava da postigne veće udaljenosti i na takav način utječe na područje koje se nalazi dalje od izvora.

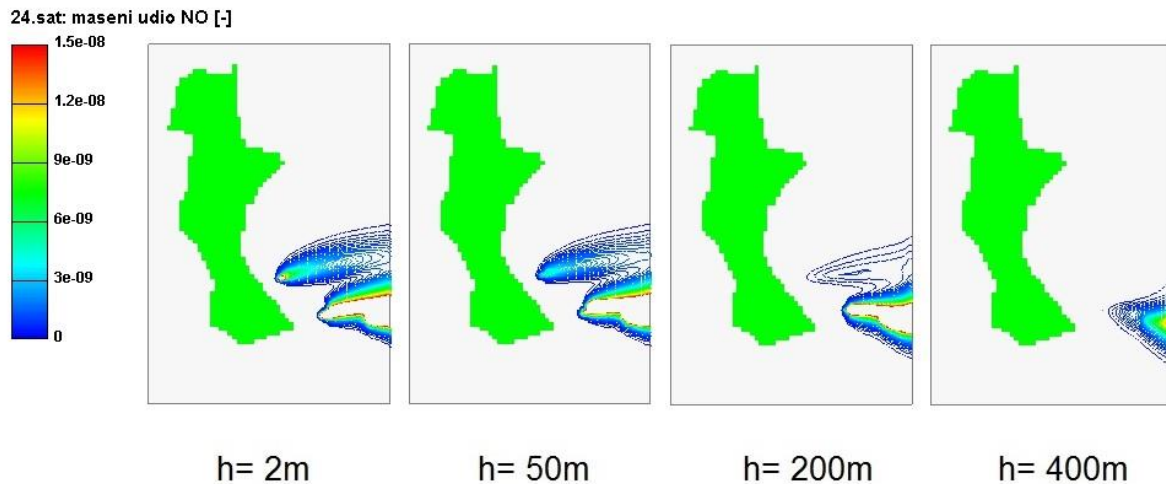
S obzirom na različite visine, dimna perjanica je izraženija u odnosu na perjanicu za SO_2 pri istim uvjetima. Dio dimne perjanice iz WB3 dimnjaka postojan je i na 200 m, što nije bio slučaj kod rezultata za SO_2 . Perjanice rafinerijskih dimnjaka prikazuju veće koncentracije NO u odnosu na dimnjake termoelektrane. FCC dimnjak prikazuje perjanicu koja sadrži najveće koncentracije NO na visini od 2 m, dok na visinama od 50 i 200 m najveće koncentracije NO sadrži perjanica iz glavnog dimnjaka. Dio perjanice iz glavnog dimnjaka je vidljiv i na 400 m, što do sada nije bio slučaj.

Prikaz 14. sata vidljiv je na Slici 24. Uvjeti vjetra daju sličnu perjanicu kao i za SO_2 . Veći dio gusto naseljenog područja grada izložen je utjecaju NO u usporedbi s rezultatima za SO_2 .



Slika 24. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO

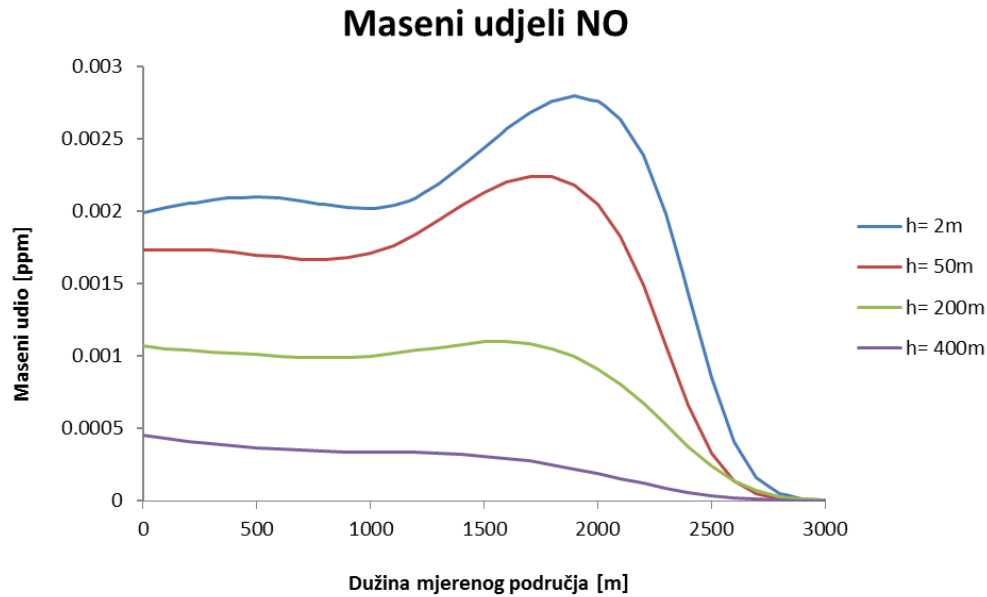
Maksimalna koncentracija, prikazana crvenom bojom, postojana je na svim visinama i do 400 m zahvaća dio naseljenog djela. Na visinama od 2 i 50 m značajan doprinos za maksimalnu koncentraciju ima WB3 dimnjak, dok je dio koncentracije vidljiv i na visini od 200 m. Ostali dimnjaci imaju svoj doprinos za maksimalnu koncentraciju NO na svim visinama. Perjanicu NO iz FCC dimnjaka teže je proučavati zbog rasprostranjene perjanice koju čine ostala tri dimnjaka. Smjer perjanice počinje zahvaćati istočni dio od industrijske zone na 200 m, a još izraženija promjena smjera vidljiva je na 400 m. Dimna perjanica iz 24. sata (Slika 25) slična je kao u prvom satu. Značajna razlika je vidljiva u koncentraciji NO na svim visinama.



Slika 25. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija NO

Dimna perjanica je male širine zbog uniformnog vjetra te je maksimalna koncentracija vidljiva na svakoj visini. Perjanica iz WB3 dimnjaka je rasprostranjenija nego u prvom satu, a naročito na visini od 200 m, što iz prethodnih rezultata nije bilo vidljivo za ovaj niski dimnjak. Emisija NO iz FCC dimnjaka stvara dimnu perjanicu do 50 m visine, dok pri 200 i 400 m nisu vidljive značajne koncentracije NO. Rezultati na 400 m uključuju dimne perjanice iz tri veća dimnjaka, dok su maksimalne koncentracije perjanice nastale iz TE dimnjaka bloka B. U ovom satu nije zahvaćen najnaseljenije dio grada označen zelenom bojom.

Slika 26 prikazuje dijagram masenih udjela NO na različitim visinama za 14. sat simulacije na liniji koja prolazi sredinom zeleno označenog područja koje predstavlja gusto naseljeni dio grada.



Slika 26. Dijagramski prikaz masenih udjela NO na različitim visinama za 14. sat

Područje koje se proučava je isto kao i kod dijagrama za SO_2 . Prema koncentracijama na različitim visinama, može se zaključiti da je koncentracija NO najveća pri tlu, dok se prema visinama koncentracija smanjuje. Veća razlika u koncentraciji se događa na visinama između 50 i 200 m gdje se vrijednosti značajno smanjuju. Razlozi tome su visine dimnjaka jer onečišćujuće tvari iz nižih dimnjaka ne mogu značajno povećavati koncentracije na visinama od 200 ili 400 m. Također, jedan od razloga je kretanje dimnih plinova iz dimnjaka na način da se temperatura dimnih plinova snizi, pri čemu se poveća gustoća i plin se počinje kretati prema tlu. Prema tome, dimnjaci koji su viši doprinose povećanju koncentracije onečišćujuće tvari na visinama od 2 i 50 m. Najveća vrijednost koncentracija na promatranoj liniji (naznačeno na Slici 16) za visinu od 2 m postignuta je na udaljenosti od oko 2000 m. Koncentracija kod svake visine nakon 2000 m počinje naglo padati i na 3000 m iznosi nula. Na drugim visinama najveće koncentracije su zabilježene na manjoj udaljenosti. Koliki će domet emisija postići ovisi o brzini i smjeru vjetra.

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane vrijednosti koncentracija SO_2 koje su uspoređene prema граниčnim vrijednostima iz Uredbe o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 117/12 i 84/17). Također, prikazane su i vrijednosti koncentracija za NO . Navedene onečišćujuće tvari zadane su za ulaz emisija iz dimnjaka u domenu. Podaci koji se koriste u simulaciji su izmjerene vrijednosti emisija iz postrojenja INA Rafinerije Sisak i Termoelektrane Sisak. Nadalje, u domenu s bočnih strana ulazi vjetar čiji su podaci preuzeti iz WRF modela za 4 rubne koordinatne točke, dok su ostale točke unutar domene dobivene linearnom interpolacijom. Domena predstavlja područje grada Siska gdje su prema koordinatnim točkama postavljeni dimnjaci. U domeni je postavljeno pet dimnjaka pri čemu dva pripadaju termoelektrani i tri rafineriji.

Simulacija se provodila za 24 sata pri čemu dobiveni rezultati simulacije prikazuju disperziju onečišćujućih tvari s pripadajućim vrijednostima koncentracija na određenim dijelovima terena i na određenim visinama. Disperzija je opisana preko dimnih perjanica iz kojih se očitavaju vrijednosti koncentracija zadanih emisija prema različitim smjerovima ovisno o vjetru. Gotovo sve dimne perjanice prikazuju najveće koncentracije pri tlu, odnosno na visini od 2 metra. Na kraju valja istaknuti kako se ni u jednom simuliranom satu ne premašuje GVE za SO_2 u naseljenom dijelu grada označenom zelenom bojom, čime se kakvoća zraka s obzirom na koncentracije SO_2 ocjenjuje zadovoljavajućom.

Zadavanjem hrapavosti i albeda tla, dimne perjanice bi izgledale realnije, što bi se također odrazilo i na vrijednosti koncentracija. Rasprostranjenost dimnih perjanica ovisi o uvjetima vjetra i ispuštanju emisija na različitim visinama, što je povezano s visinama dimnjaka. Tako je kod viših dimnjaka dimna perjanica slabije izražena jer temperatura u ispuštenom dimnom plinu pada, čime se povećava gustoća te, u trenutku kad postane veća od gustoće okolišnog zraka, plin se počinje kretati prema tlu, što nije pogodno za disperziju dimnih plinova. Promjene dimne perjanice, ukoliko ih ima, najčešće se događaju na visinama između 50 i 200 metara. Kako bi se dobili realniji rezultati, bilo bi pogodno preuzeti uvjete vjetra iz WRF modela finije rezolucije, a ne samo za rubne koordinatne točke. Također, realnost same simulacije bi se povećala da se postave i drugi izvori, kao što su ostali nepokretni izvori uz dodatak površinskih emisija koje uključuju onečišćujuće tvari iz prometa.

Glavni cilj rada da se metodom kontrolnih volumena može proučavati disperzija na zadanom području, odnosno domeni, je u potpunosti potvrđen. Računalna dinamika fluida u programskom paketu AVL Fire[®], iako namijenjena prvenstveno za motore s unutrašnjim izgaranjem, pokazala se uspješnom i u ispunjavanju zadatka koji se rješavao u ovome radu. Simulacija daje smislene rezultate prema zadanim rubnim uvjetima, što se može primijetiti po brojkama i vizualno, dok bi se realniji rezultati postigli s već navedenim preporukama. Kako bi se izvršila validacija metode, potrebno je napraviti usporedbu s vrijednostima na mjernim postajama kakvoće zraka za područje koje se simulira.

7. LITERATURA

- [1] M. Martinjak, "Numerička simulacija sustava za selektivnu katalitičku redukciju," Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [2] <https://sites.google.com/site/ezasve/energija-i-ekologija/globalno-zatopljenje>. [Pristupljeno: 23.6.2019.].
- [3] T. Sofilić, "Ekotoksikologija," Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2014.
- [4] T. Sofilić, "Zdravlje i okoliš," Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2015.
- [5] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, "Izvješće o proračunu emisija onečišćujućih tvari u zrak na području Republike Hrvatske 2019. (1990. - 2017.)."
- [6] V. Babić, "Izvori i svojstva NOx spojeva," Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015.
- [7] A. Mikić, "Emisije CO₂ i globalno zatopljenje," Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, 2010.
- [8] I. Krajcar Bronić, "Kruženje ugljika i vode u prirodi praćeno izotopima," *Fiz. u Ekol. - 23. ljetna škola Mlad. fizičara*, pp. 50–59, 2007.
- [9] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/02b48628-d27b-467c-b6ec-78c76993c725/kemija-8/m02/j02/index.html>. [Pristupljeno: 25.6.2019.].
- [10] "Izvješće o projekcijama emisija stakleničkih plinova po izvorima i njihovo uklanjanje ponorima Republika Hrvatska," 2019.
- [11] A. Barišić - Jaman, "Analiza mjerenih koncentracija lebdećih čestica (PM 2,5 i PM 10) u zaštićenim područjima hrvatske," Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2016.
- [12] Grad Sisak, "Strateški plan Grada Siska," Sisak, 2014.
- [13] <http://www.hep.hr/proizvodnja/termoelektrane-1560/termoelektrane-toplane/te-to-sisak/1561>. [Pristupljeno: 15.9.2019.].
- [14] Ecoina, "Zahtjev za utvrđivanje objedinjenih uvjeta zaštite okoliša postojećeg postrojenja INA d.d.," Zagreb, 2013.
- [15] "Zahtjev za utvrđivanje objedinjenih uvjeta zaštite okoliša za postojeće postrojenje TE Sisak," Zagreb, 2013.
- [16] A. Vasilj, "Određivanje aerodinamičkih sila pri gibanju automobila izloženog bočnom vjetru," Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [17] A. Pašić, "Određivanje aerodinamičkih sila pri gibanju automobila," Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [18] <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>. [Pristupljeno: 3.10.2019.].

8. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

Ime i prezime: Dominik Pavlović

Datum rođenja: 6.12.1994.

Adresa: A. Cesarca 89, 44000 Sisak

Telefon: +38598714319

E-mail: dominik.pavlovic12@gmail.com

OBRAZOVANJE

- 2014. - 2019. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet
- 2009. - 2013. Građevinski tehničar, Strukovna škola Sisak, Sisak

VJEŠTINE

- Rad na računalu: Microsoft Office: Word, Excel, Powerpoint
Programi za crtanje i projektiranje: AutoCad, SolidWorks, AVL
Fire®
- Strani jezici: Engleski jezik (položene razine A2 i B1)

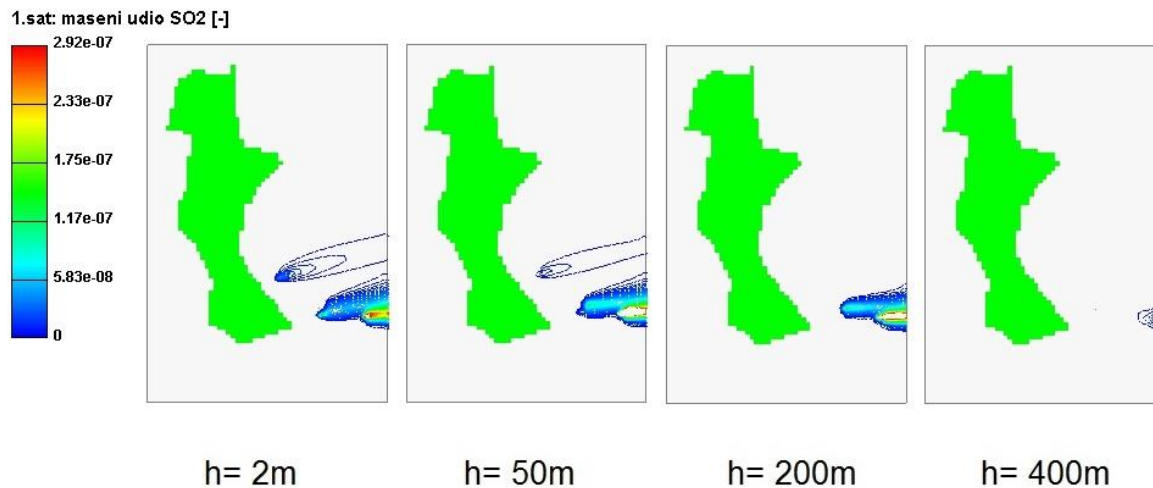
AKTIVNOSTI ZA VRIJEME STUDIJA

- Predsjednika Udruge studentske organizacije Sisak 2017. do 2019. godine,
- Predsjednik Studentskog zbora Metalurškog fakulteta 2018./2019. godine,
- Voditelj organizacije 22. i 23. Tehnologijade za Metalurški fakultet, Trogir 2018. i Makarska 2019. godine,
- Sudjelovanje na 20. i 21. Tehnologijadi, Rovinj 2016. i Umag 2017. godine,
- Sudjelovanje na 17. i 18. Međunarodno savjetovanje ljevača, Opatija 2018. i Sisak 2019. godine,
- Član Upravnog vijeća Studentskog centra Sisak 2018./2019. godine,
- Demonstrator iz kolegija Opća kemija ak. god. 2015./2016.,
- Član Savjeta mladih grada Siska 2019. godine,
- Sudjelovanje na I. međunarodnoj konferenciji „Cjeloviti pristup okolišu“.

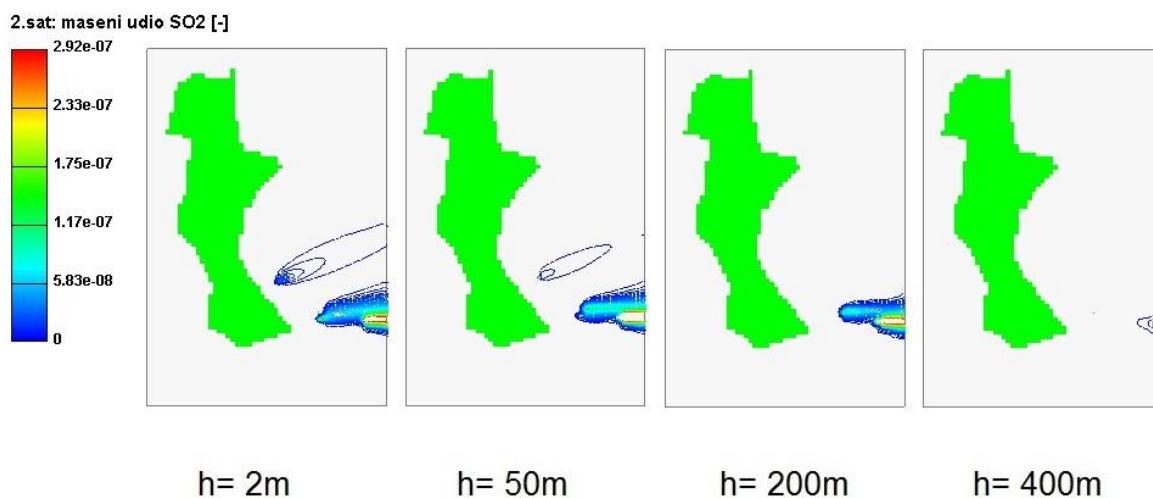
9. PRILOG

U ovom dijelu diplomskog rada prikazane su slike rezultata za svaki sat simulacije iz kojih se mogu vidjeti promjene smjera i koncentracija dimnih perjanica iz sata u sat za SO₂ i NO.

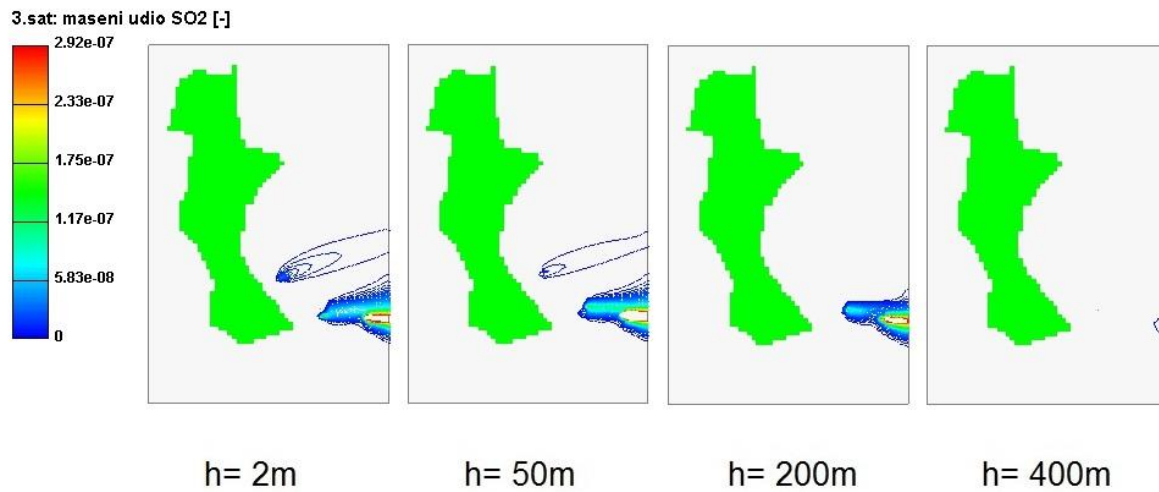
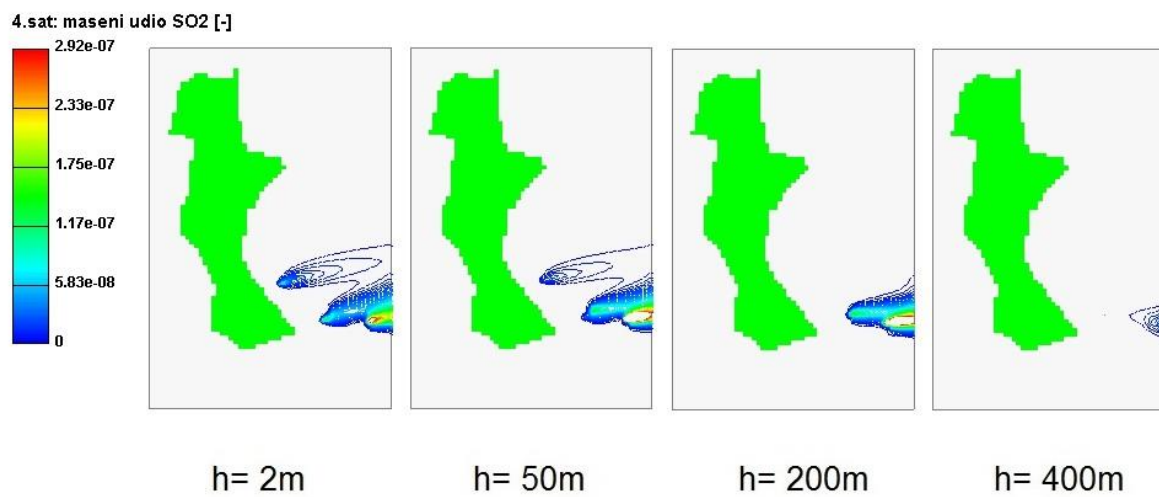
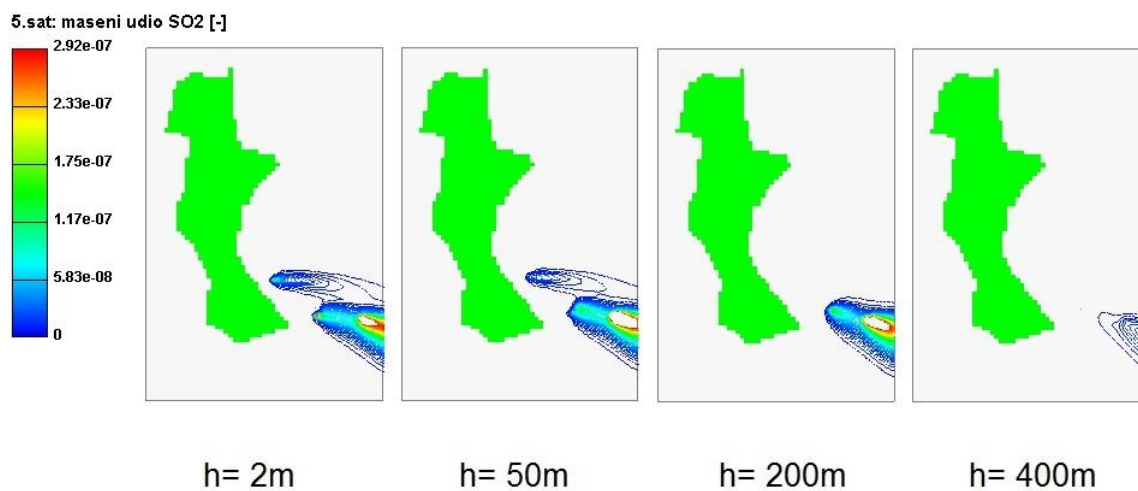
9.1. Satna raspodjela emisija SO₂

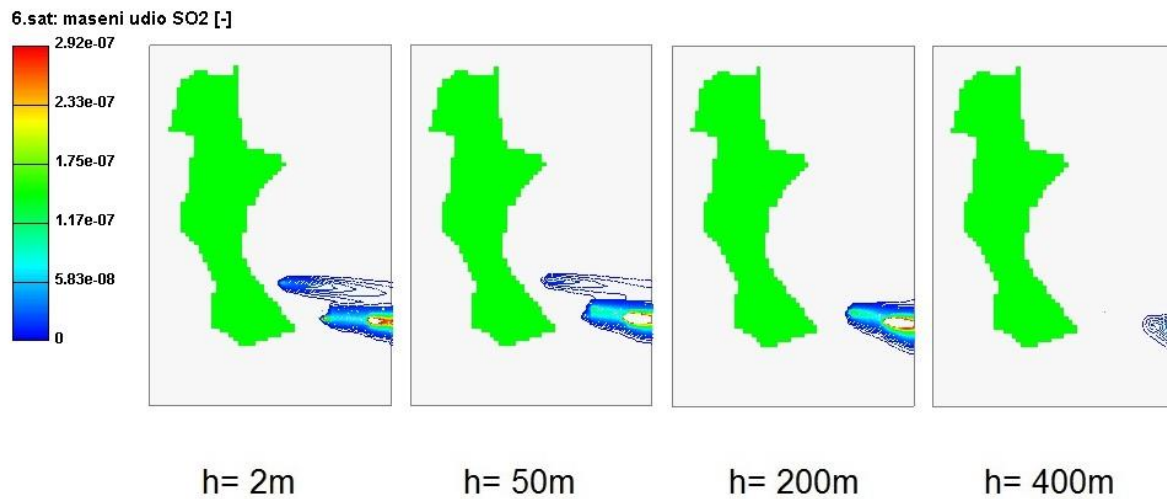
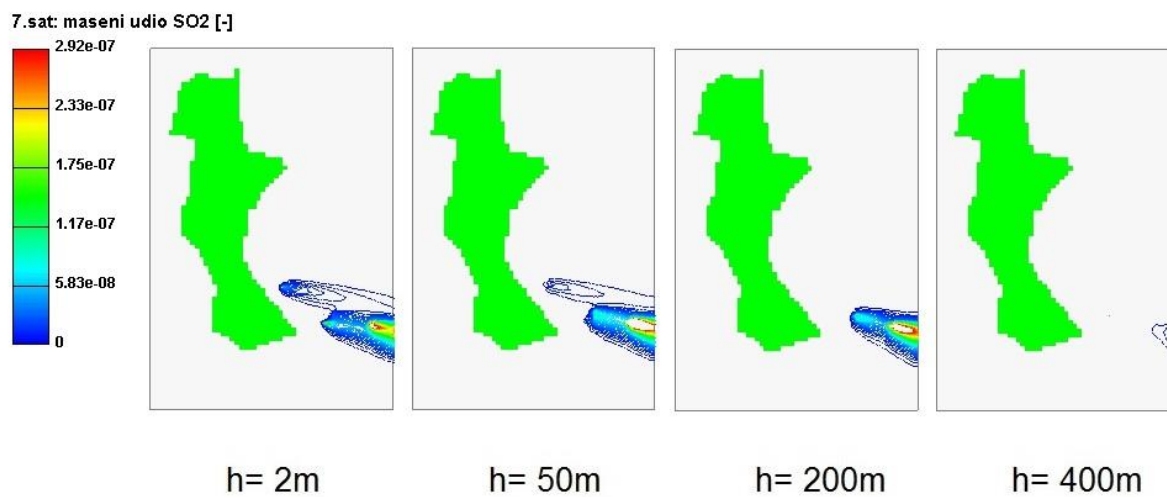
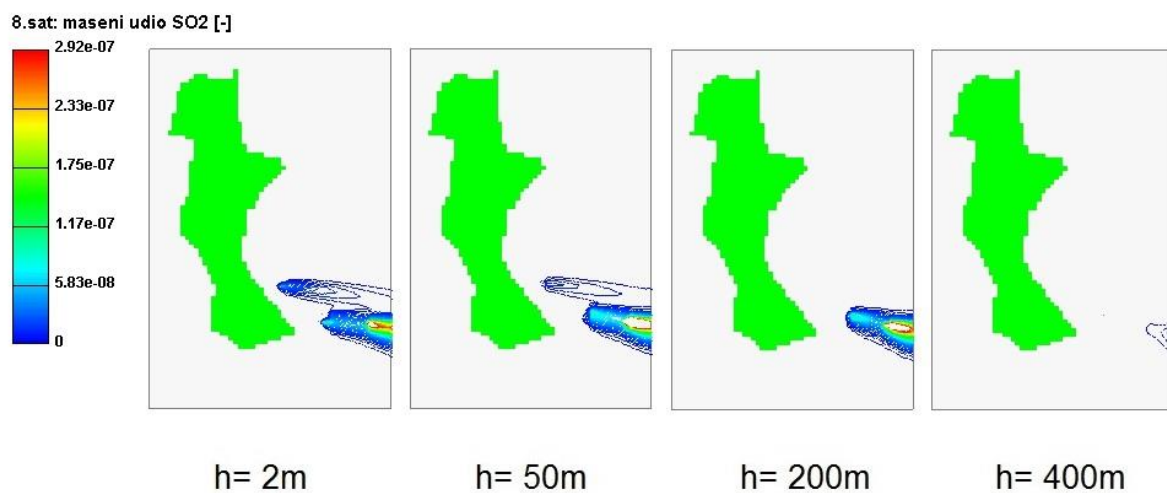


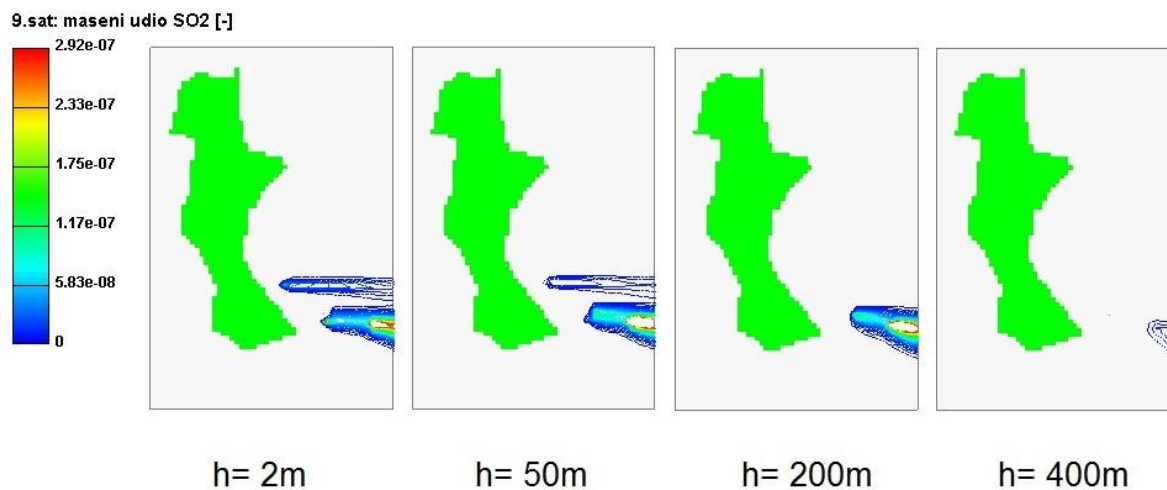
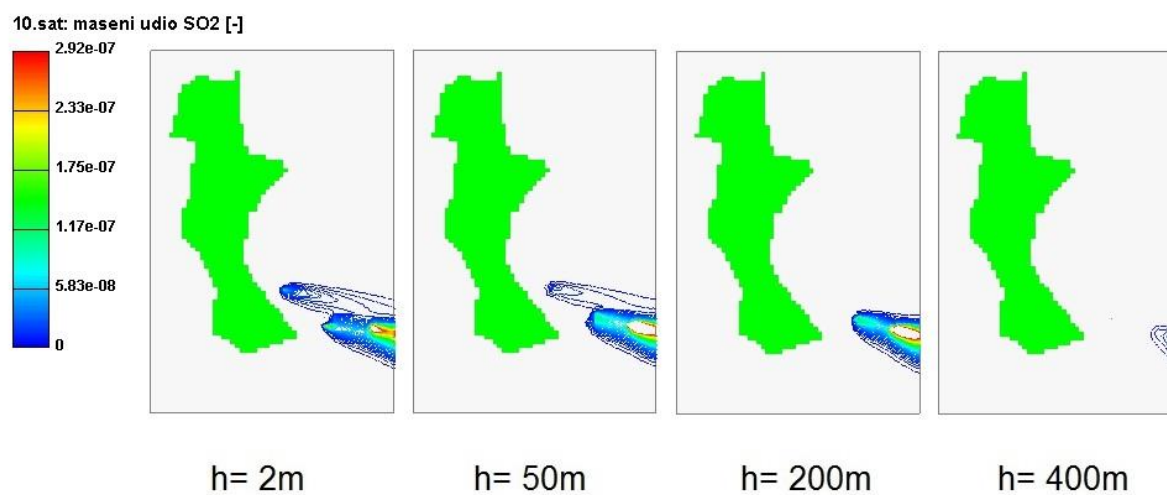
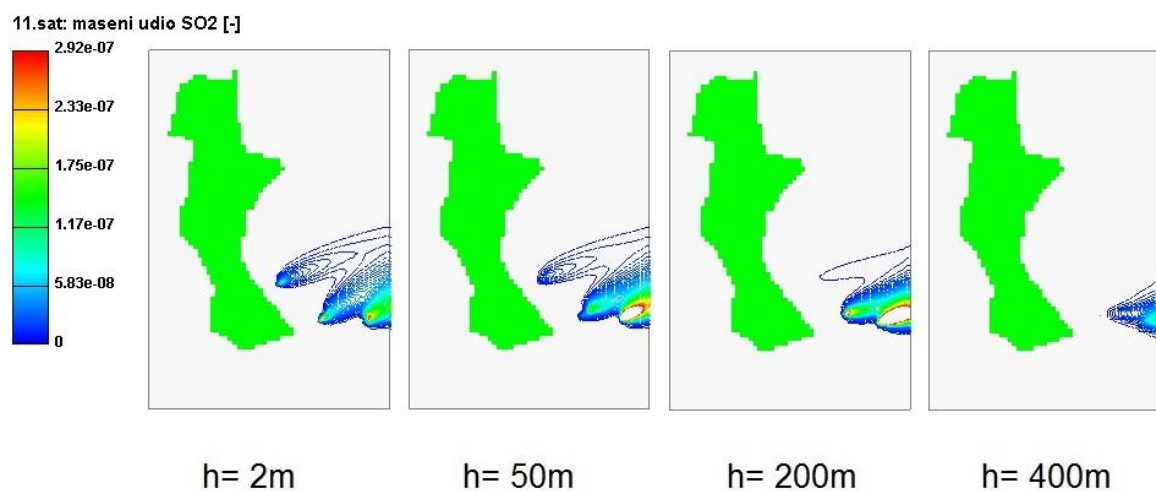
Slika 27. Prikaz dimnih perjanica u 1. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

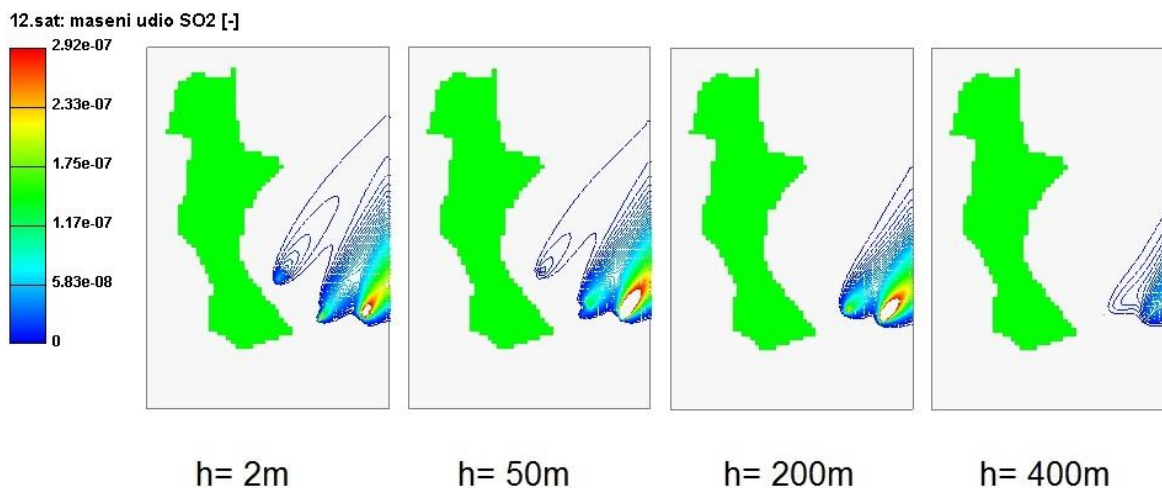
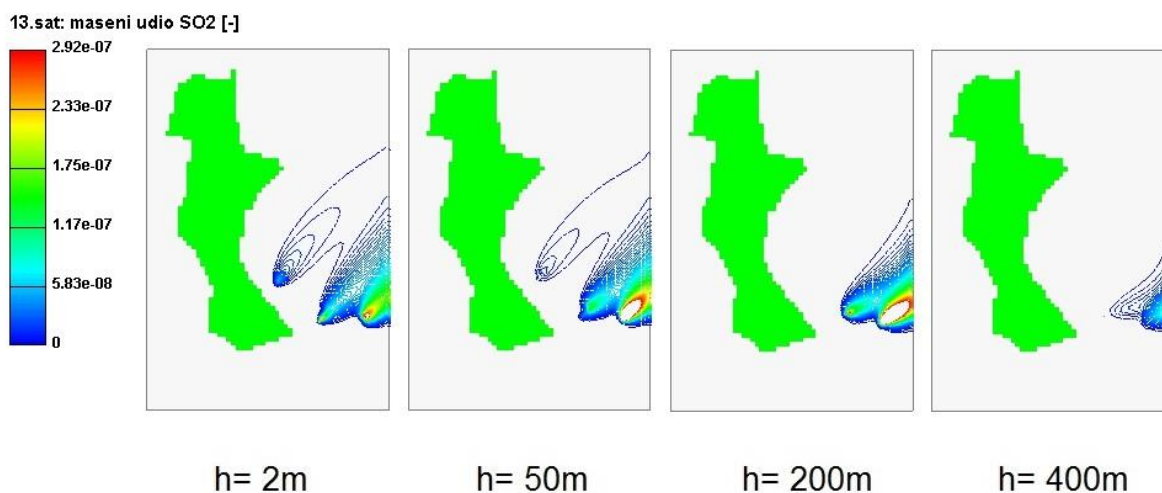
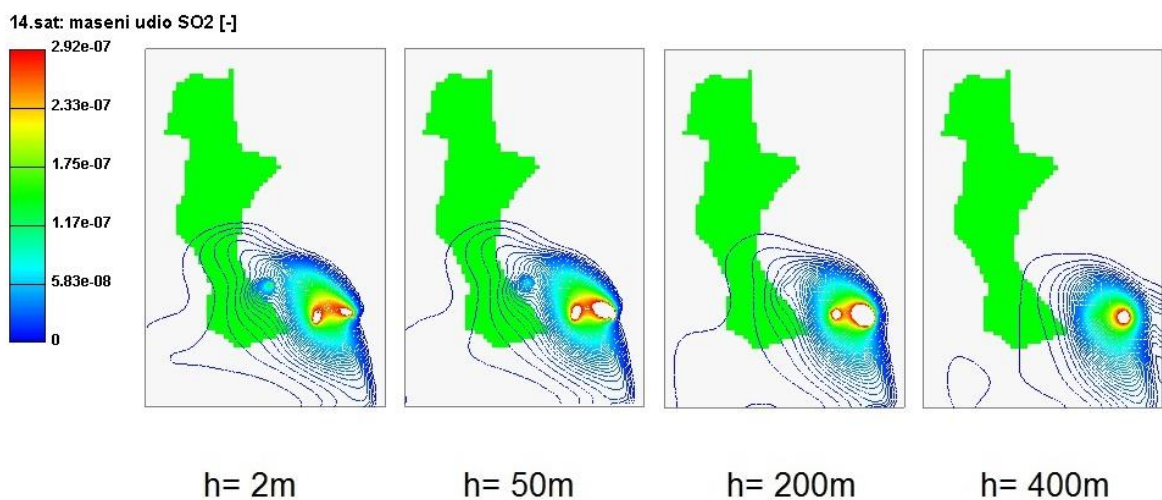


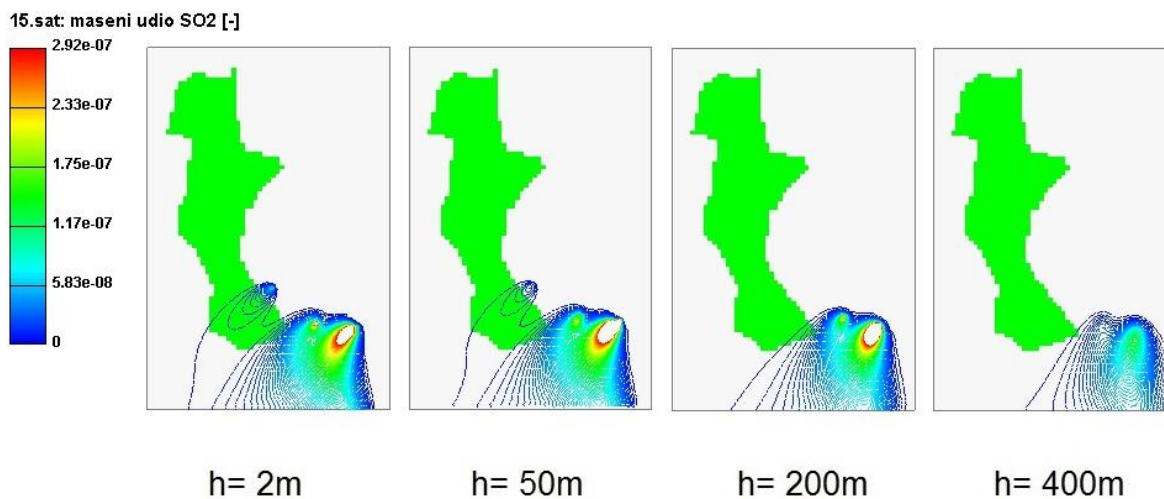
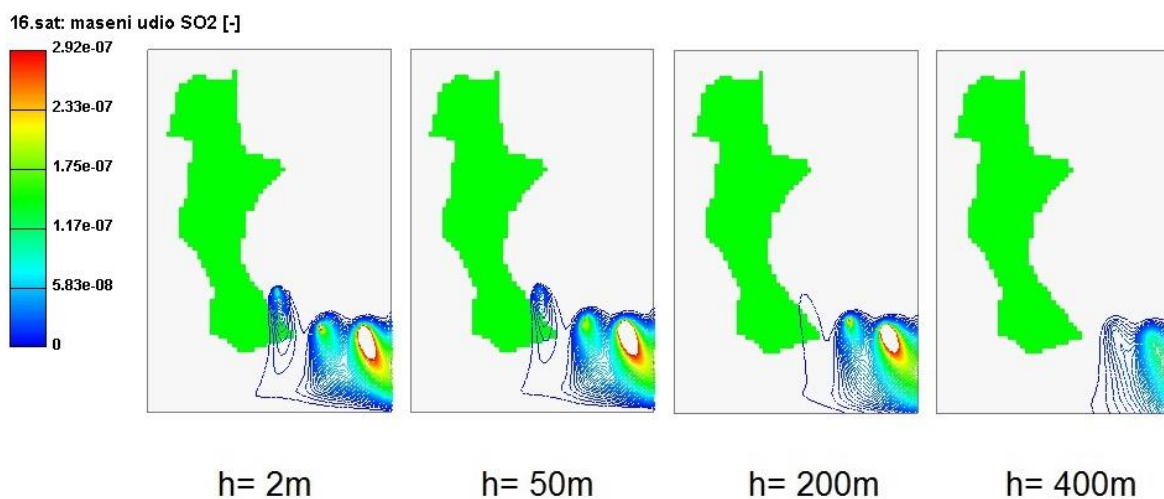
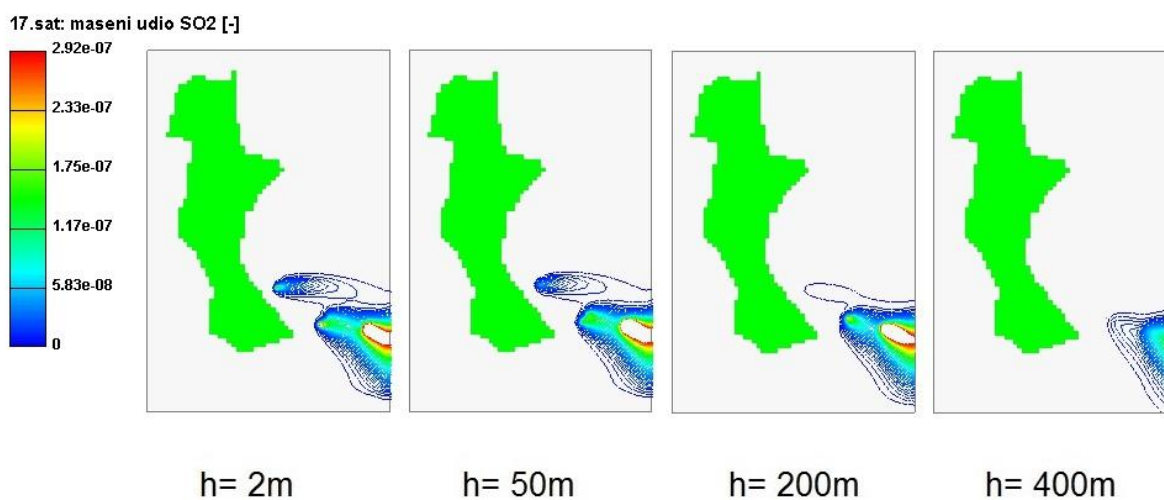
Slika 28. Prikaz dimnih perjanica u 2. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

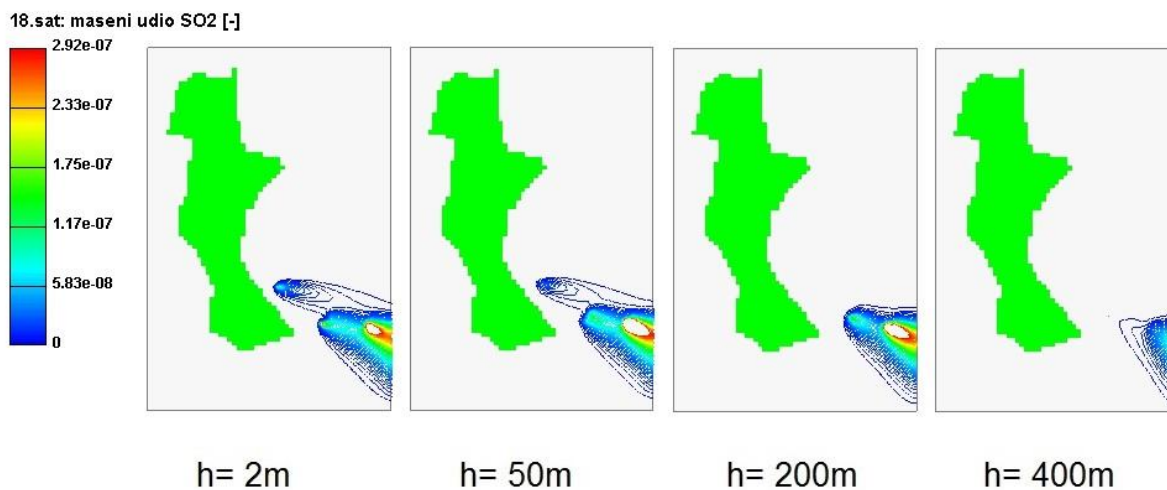
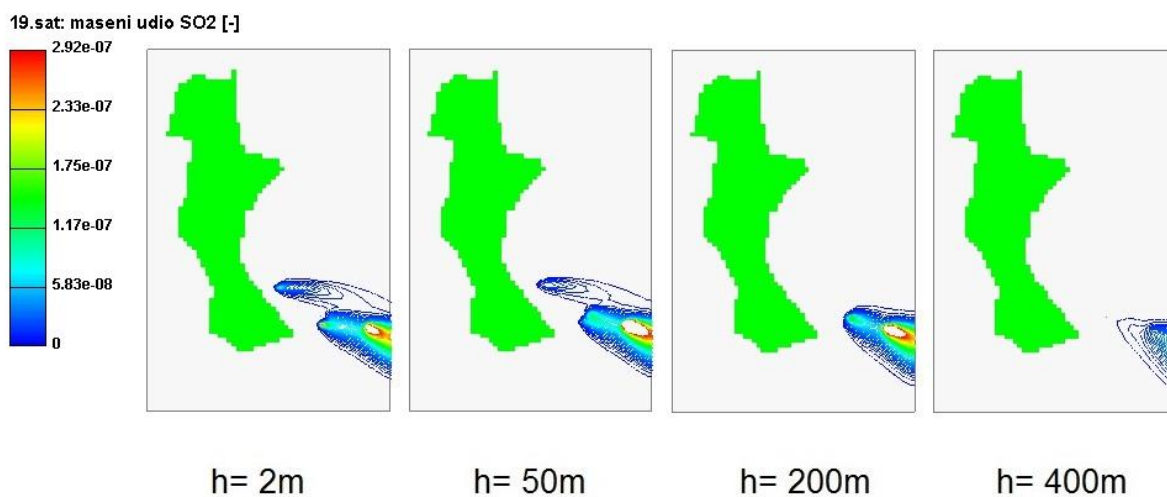
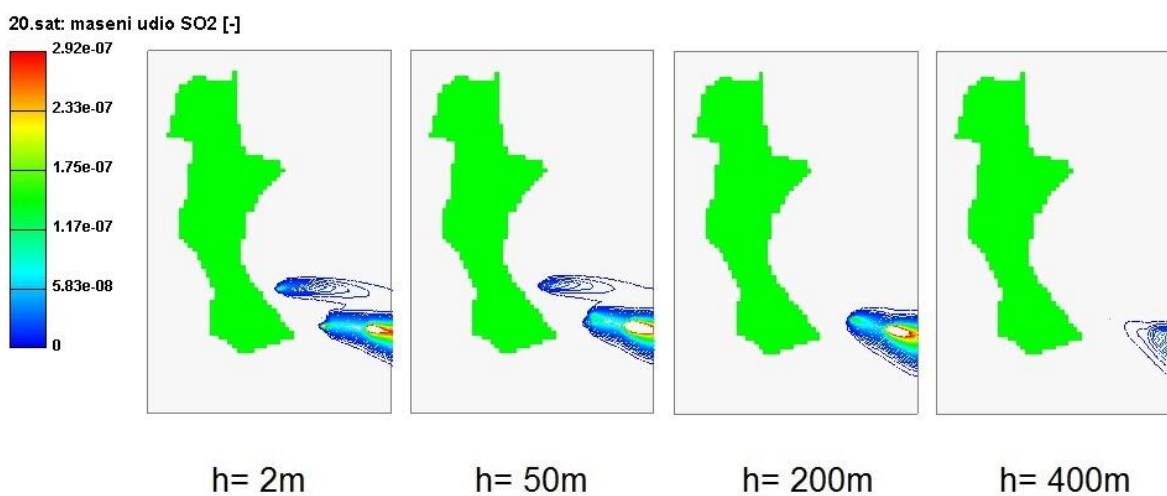
Slika 29. Prikaz dimnih perjanica u 3. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 30. Prikaz dimnih perjanica u 4. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 31. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

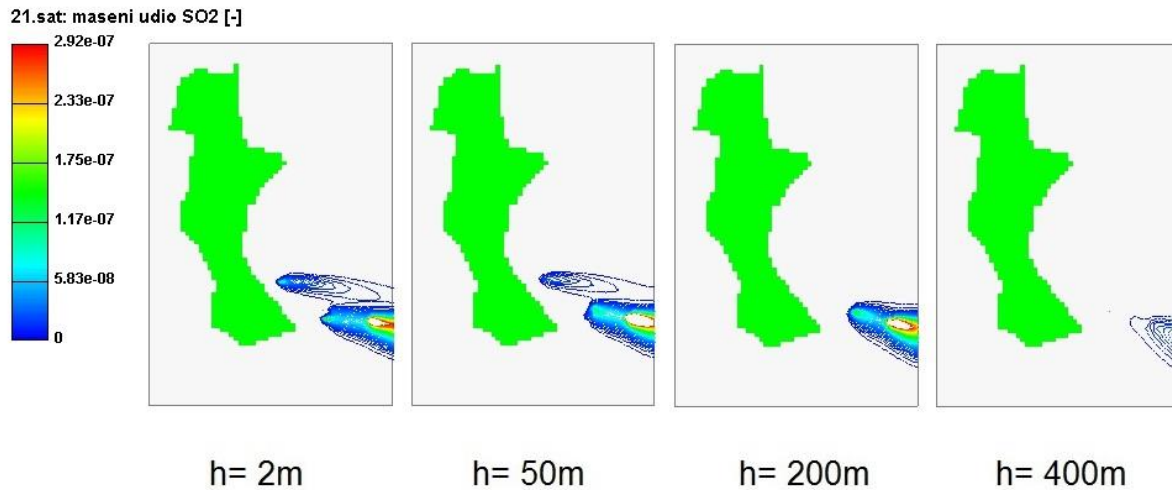
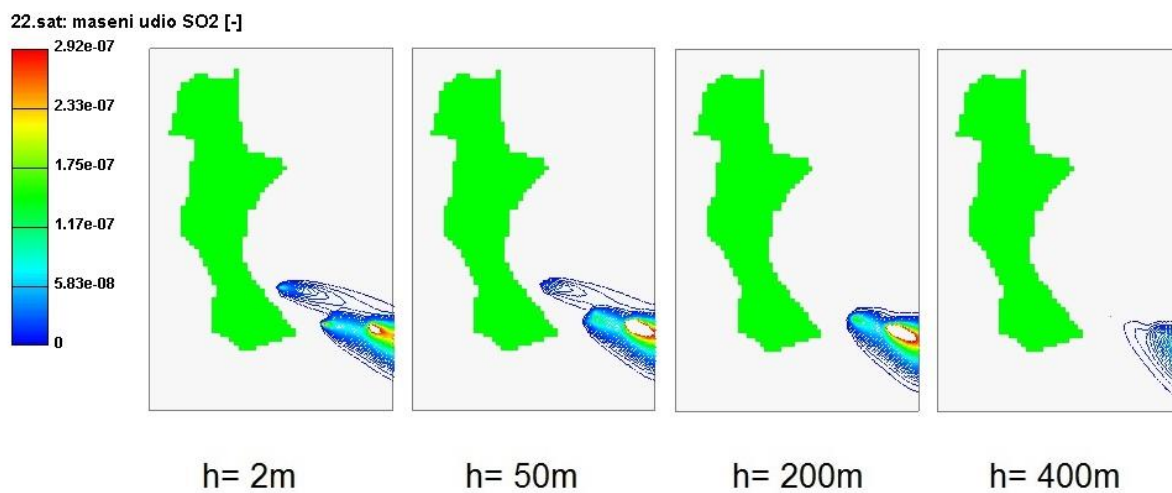
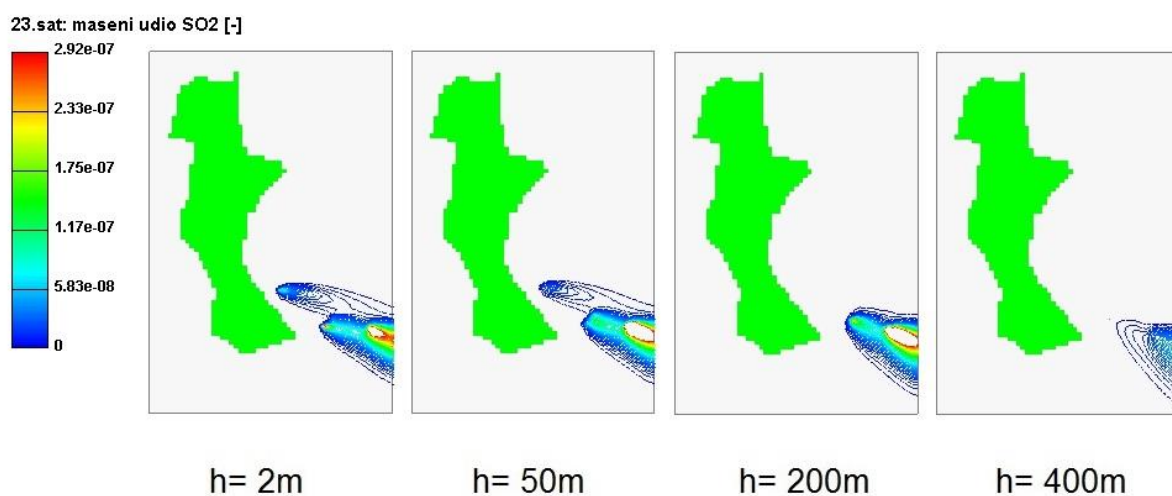
Slika 32. Prikaz dimnih perjanica u 6. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 33. Prikaz dimnih perjanica u 7. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 34. Prikaz dimnih perjanica u 8. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

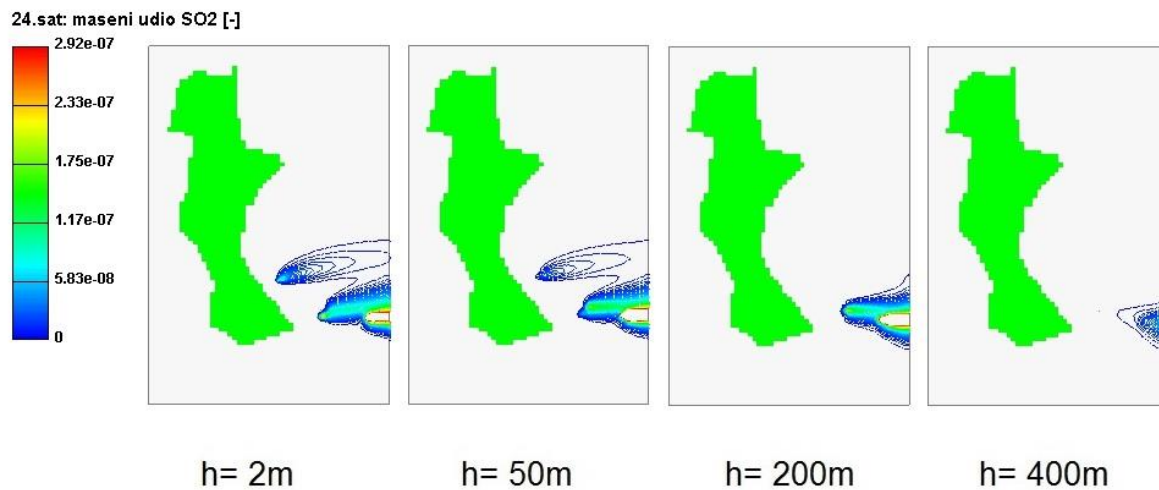
Slika 35. Prikaz dimnih perjanica u 9. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 36. Prikaz dimnih perjanica u 10. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 37. Prikaz dimnih perjanica u 11. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

Slika 38. Prikaz dimnih perjanica u 12. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 39. Prikaz dimnih perjanica u 13. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 40. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

Slika 41. Prikaz dimnih perjanica u 15. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 42. Prikaz dimnih perjanica u 16. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 43. Prikaz dimnih perjanica u 17. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

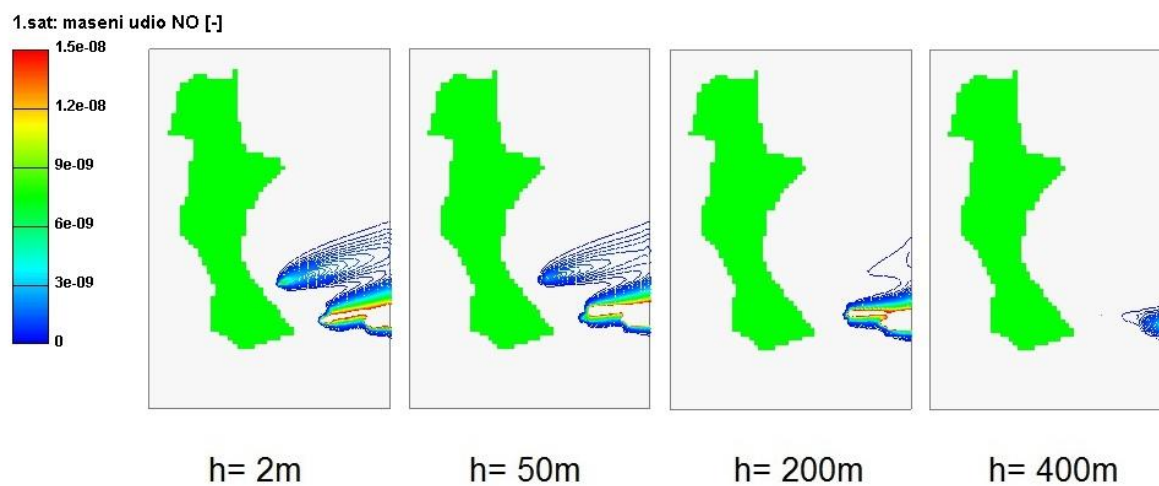
Slika 44. Prikaz dimnih perjanica u 18. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 45. Prikaz dimnih perjanica u 19. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 46. Prikaz dimnih perjanica u 20. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

Slika 47. Prikaz dimnih perjanica u 21. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 48. Prikaz dimnih perjanica u 22. satu za vrijednosti koncentracija SO₂Slika 49. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

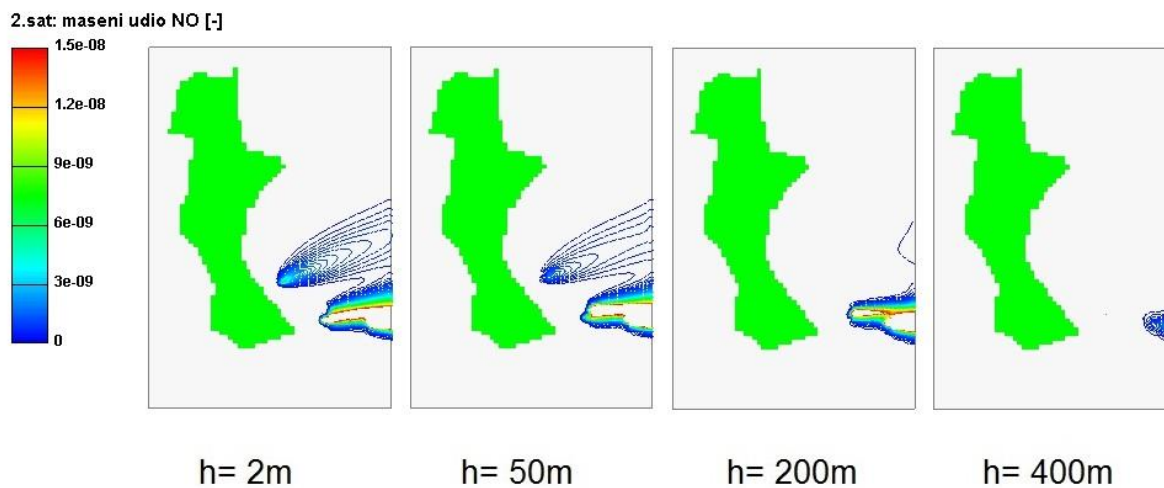


Slika 50. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija SO₂

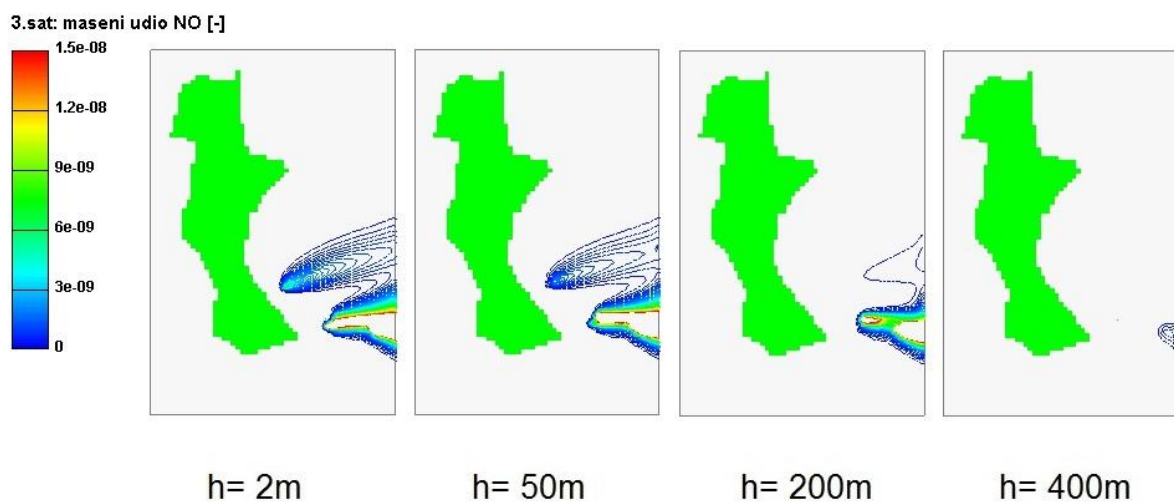
9.2. Satna raspodjela NO



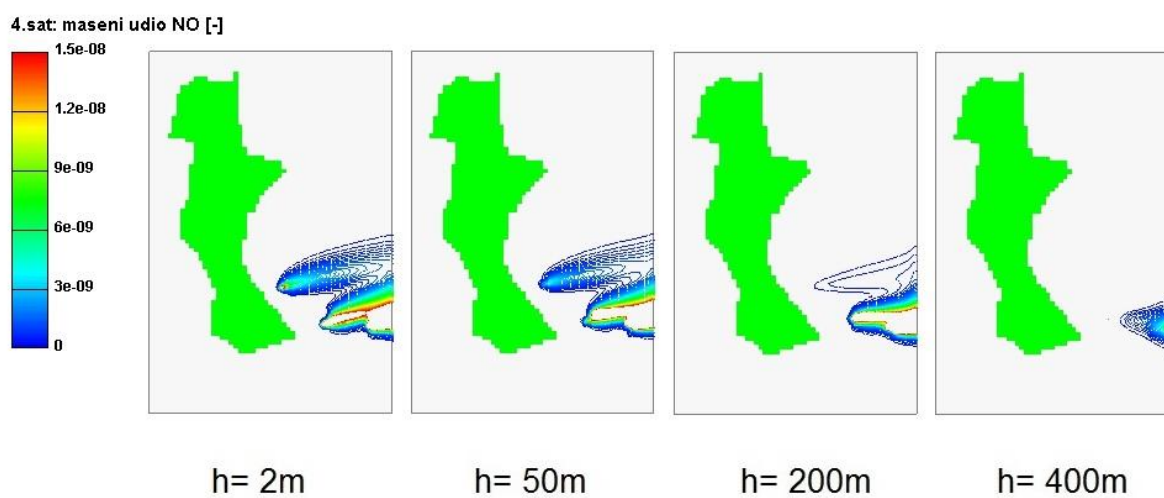
Slika 51. Prikaz dimnih perjanica u 1. satu za vrijednosti koncentracija NO



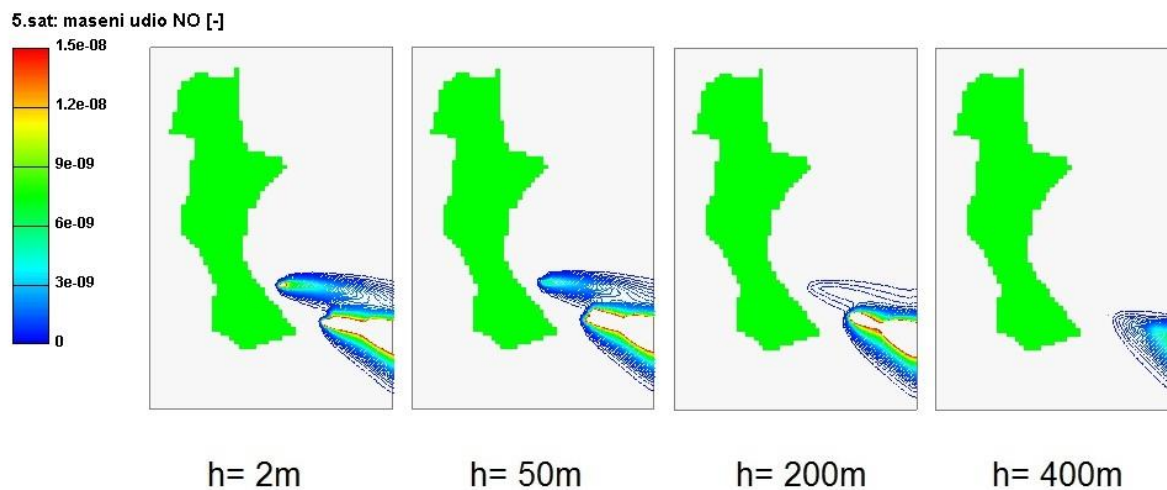
Slika 52. Prikaz dimnih perjanica u 2. satu za vrijednosti koncentracija NO



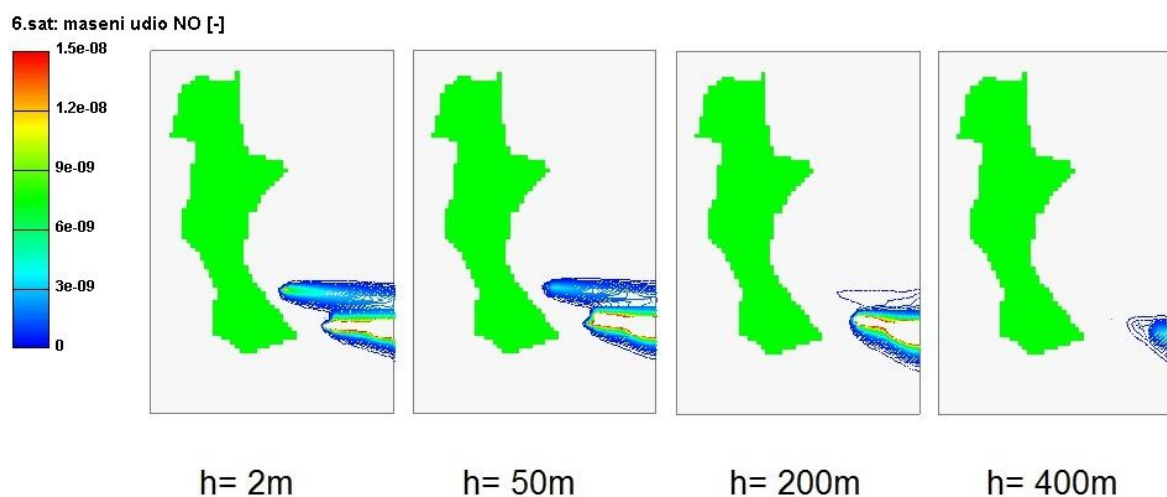
Slika 53. Prikaz dimnih perjanica u 3. satu za vrijednosti koncentracija NO



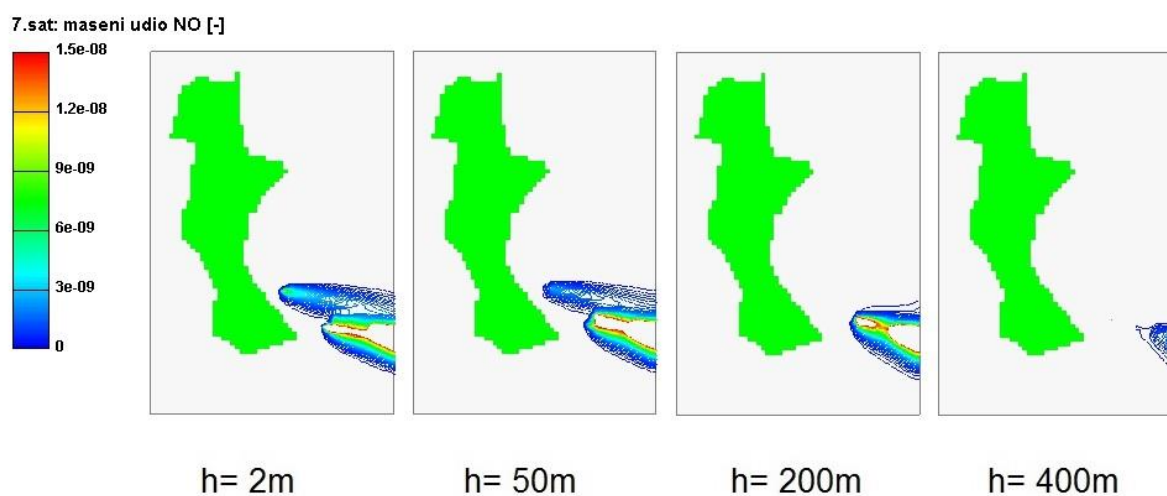
Slika 54. Prikaz dimnih perjanica u 4. satu za vrijednosti koncentracija NO



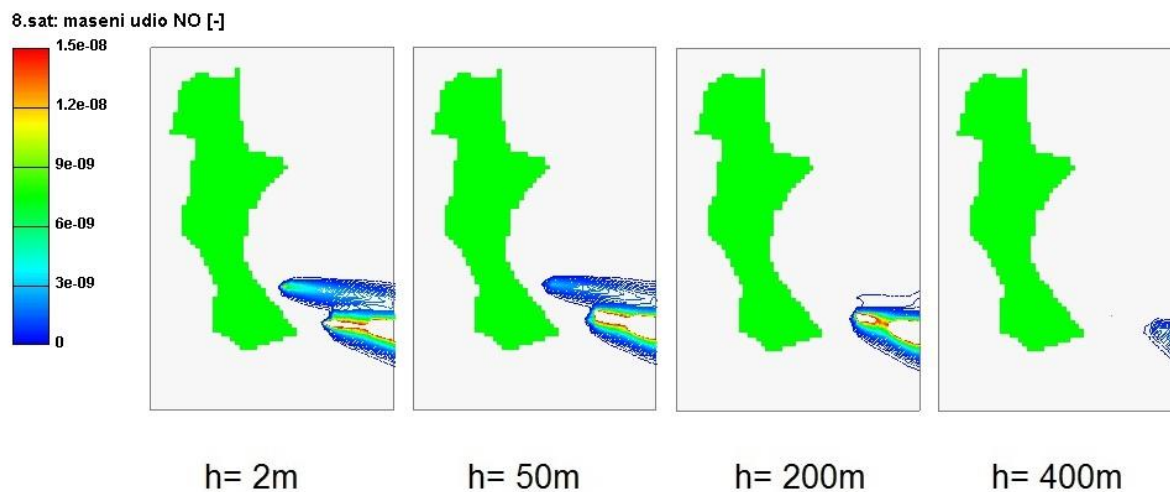
Slika 55. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija NO



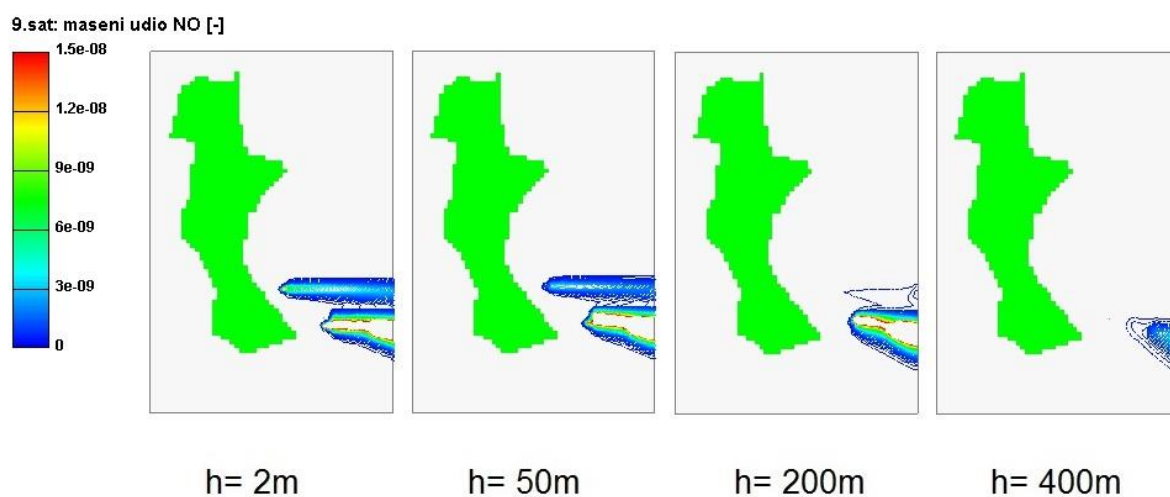
Slika 56. Prikaz dimnih perjanica u 6. satu za vrijednosti koncentracija NO



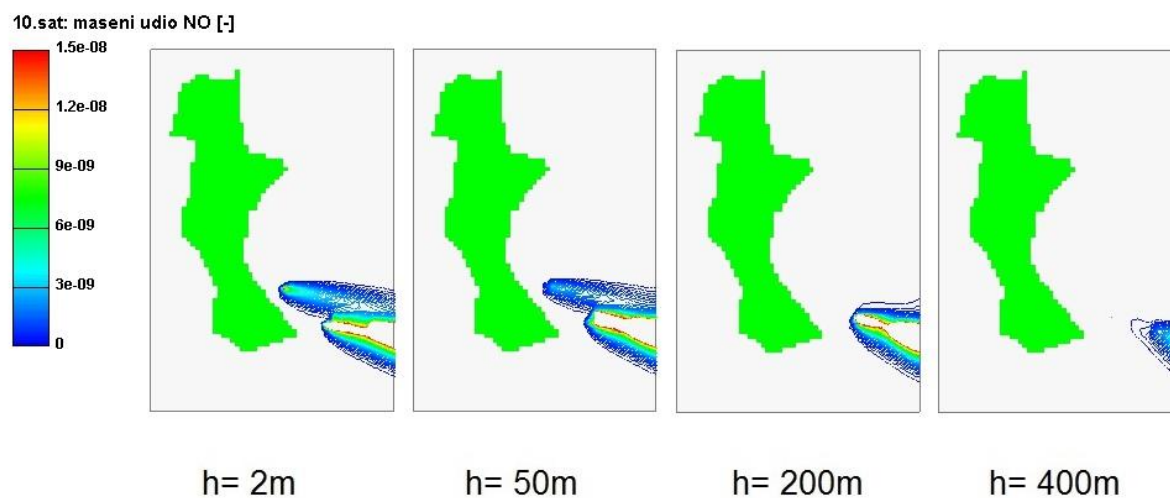
Slika 57. Prikaz dimnih perjanica u 7. satu za vrijednosti koncentracija NO



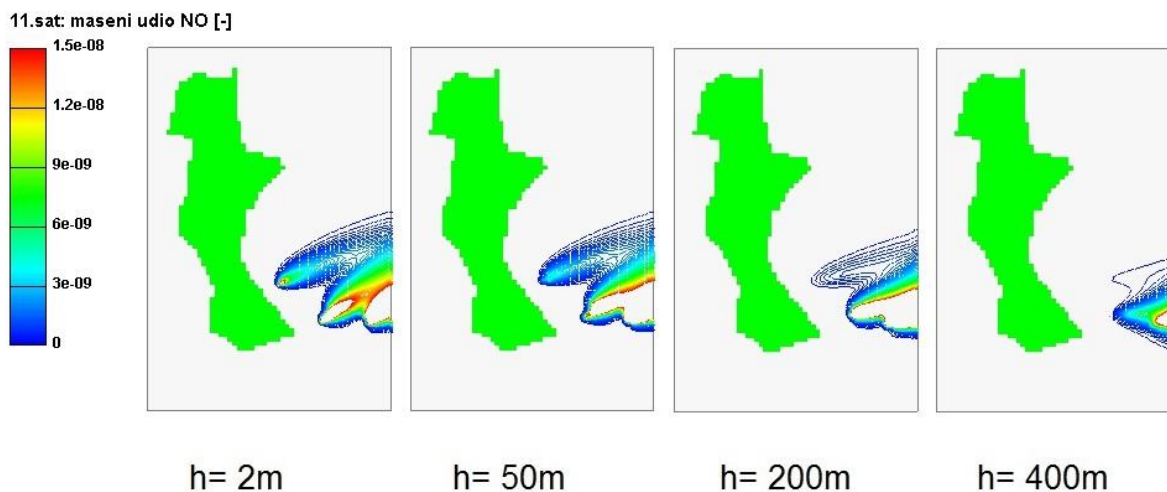
Slika 58. Prikaz dimnih perjanica u 8. satu za vrijednosti koncentracija NO



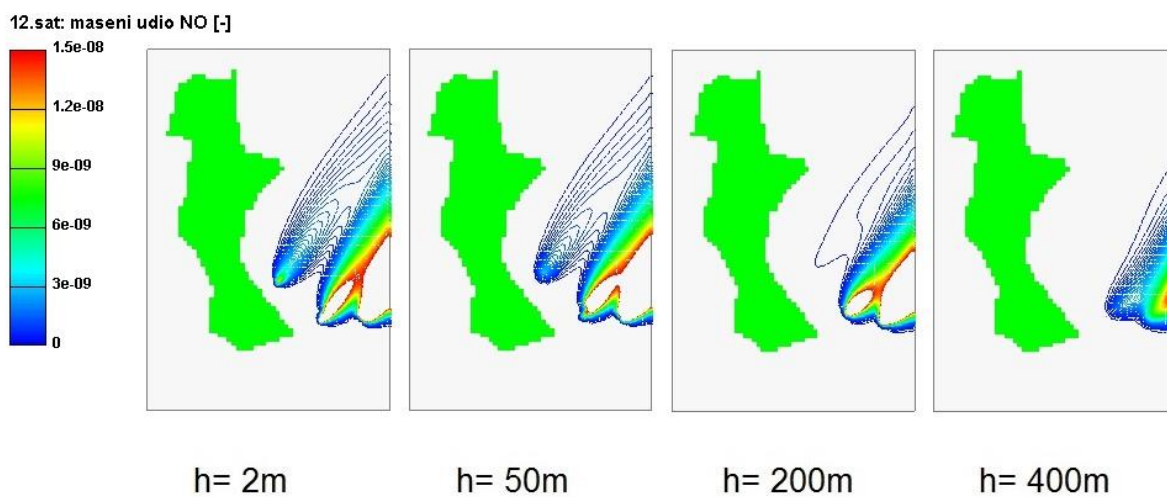
Slika 59. Prikaz dimnih perjanica u 9. satu za vrijednosti koncentracija NO



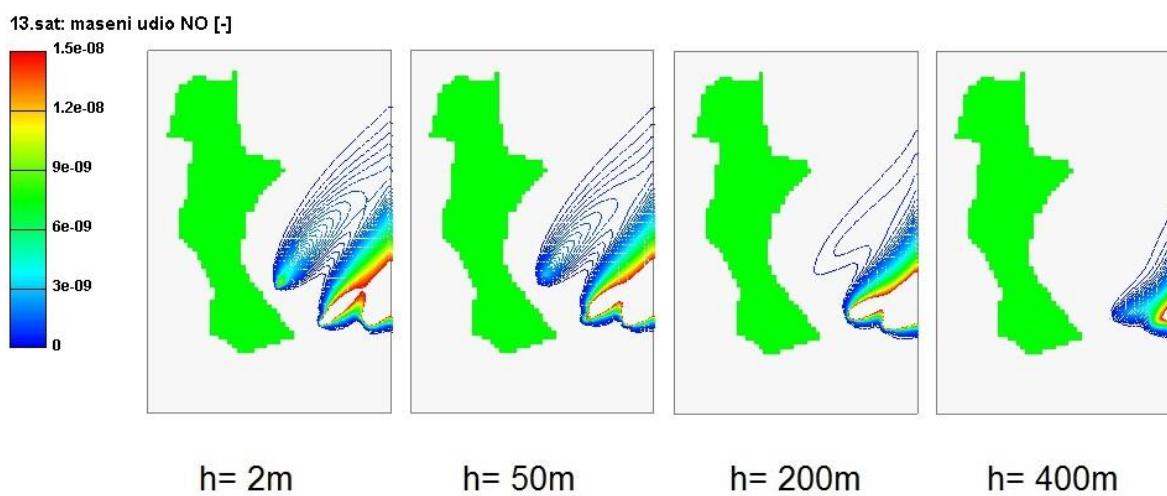
Slika 60. Prikaz dimnih perjanica u 10. satu za vrijednosti koncentracija NO



Slika 61. Prikaz dimnih perjanica u 11. satu za vrijednosti koncentracija NO

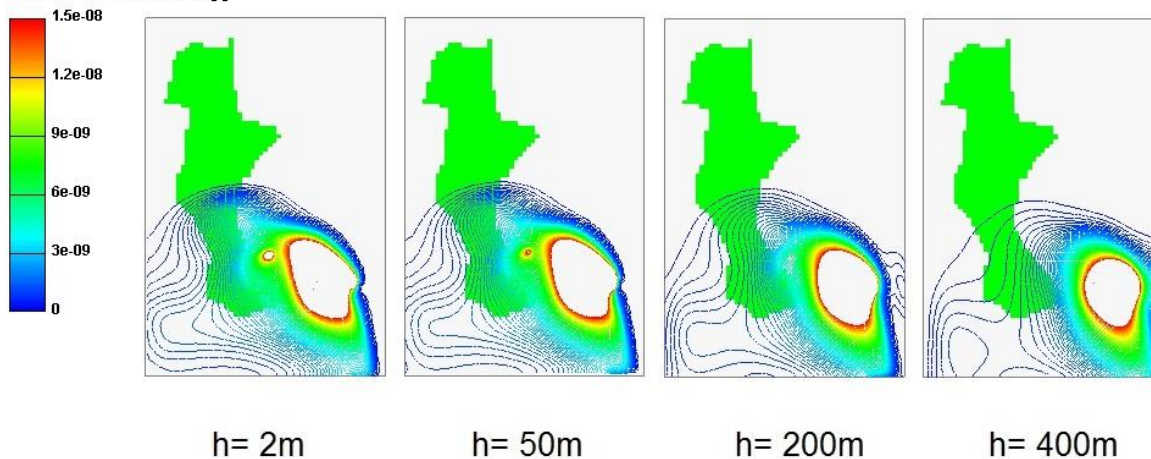


Slika 62. Prikaz dimnih perjanica u 12. satu za vrijednosti koncentracija NO



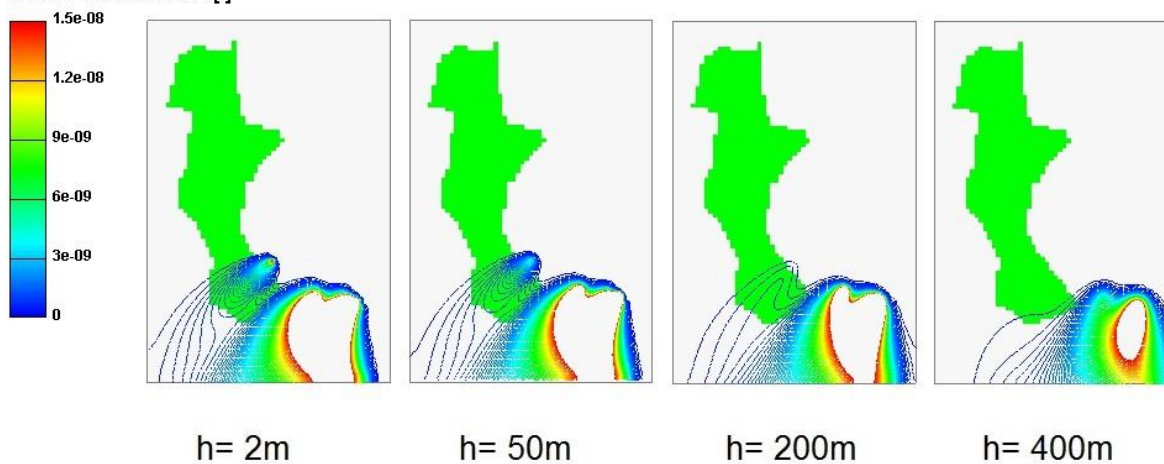
Slika 63. Prikaz dimnih perjanica u 13. satu za vrijednosti koncentracija NO

14.sat: maseni udio NO [-]



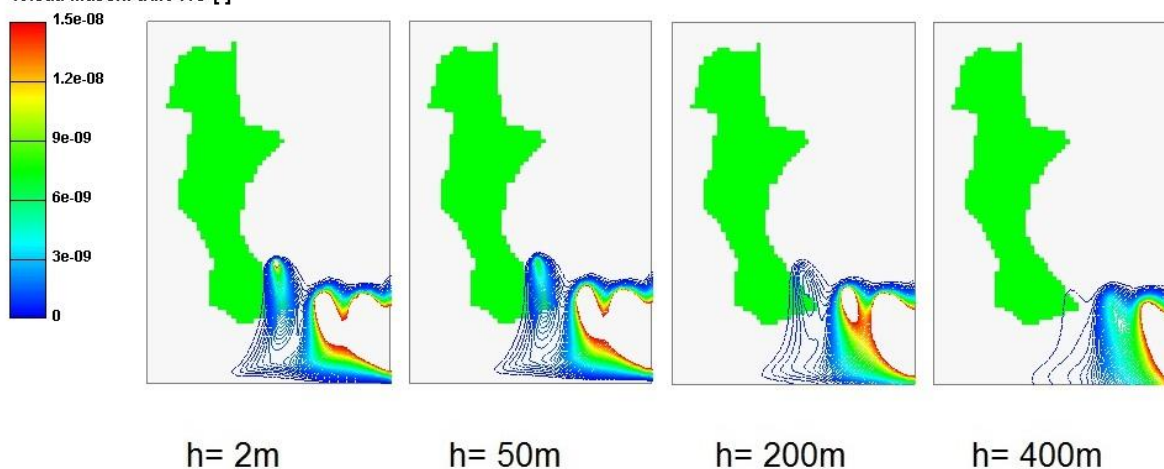
Slika 64. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO

15.sat: maseni udio NO [-]

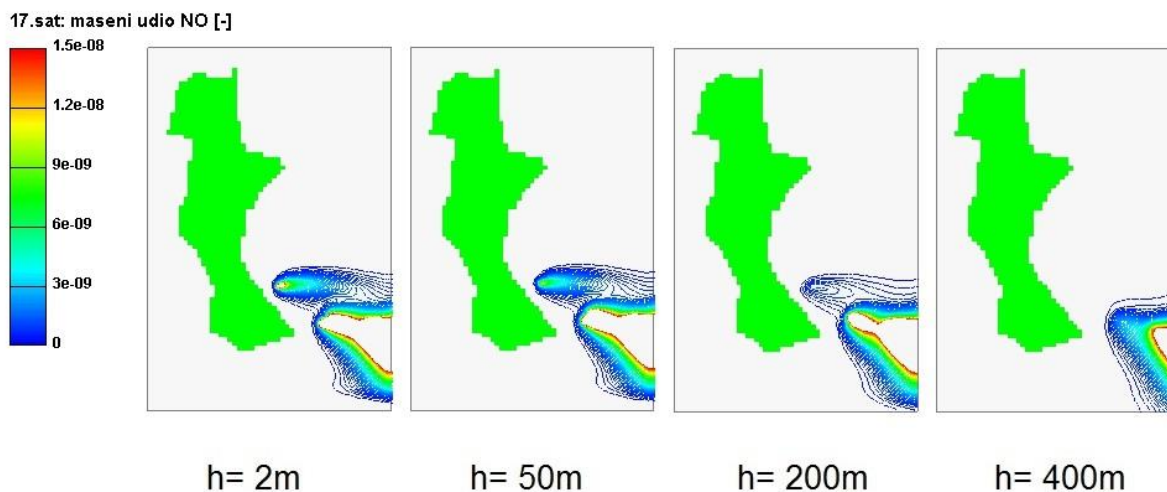


Slika 65. Prikaz dimnih perjanica u 15. satu za vrijednosti koncentracija NO

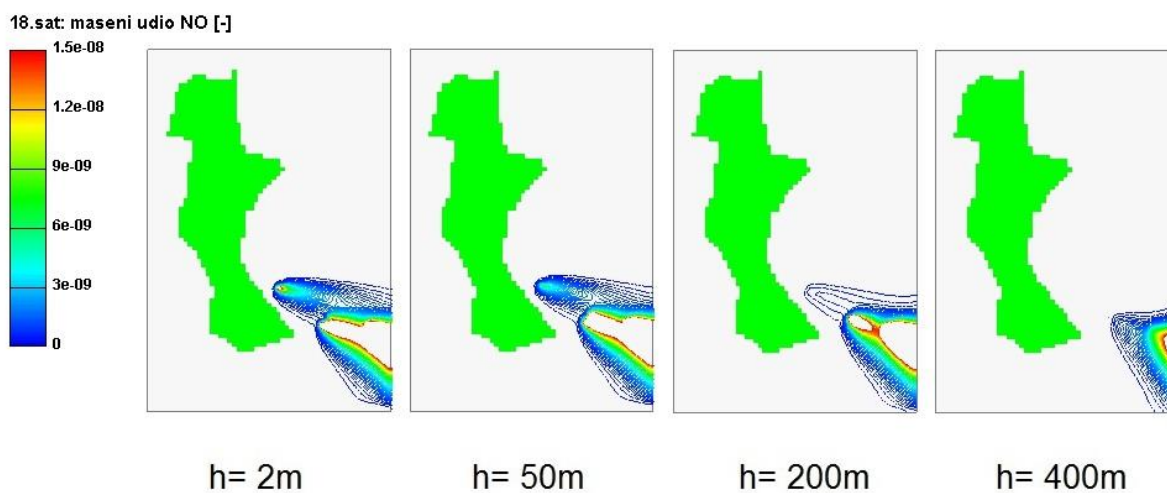
16.sat: maseni udio NO [-]



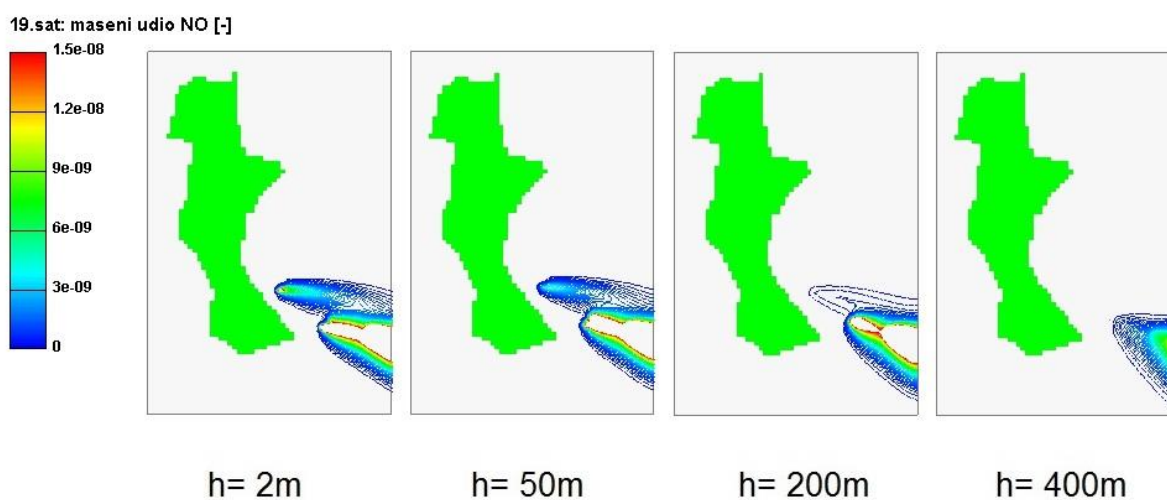
Slika 66. Prikaz dimnih perjanica u 16. satu za vrijednosti koncentracija NO



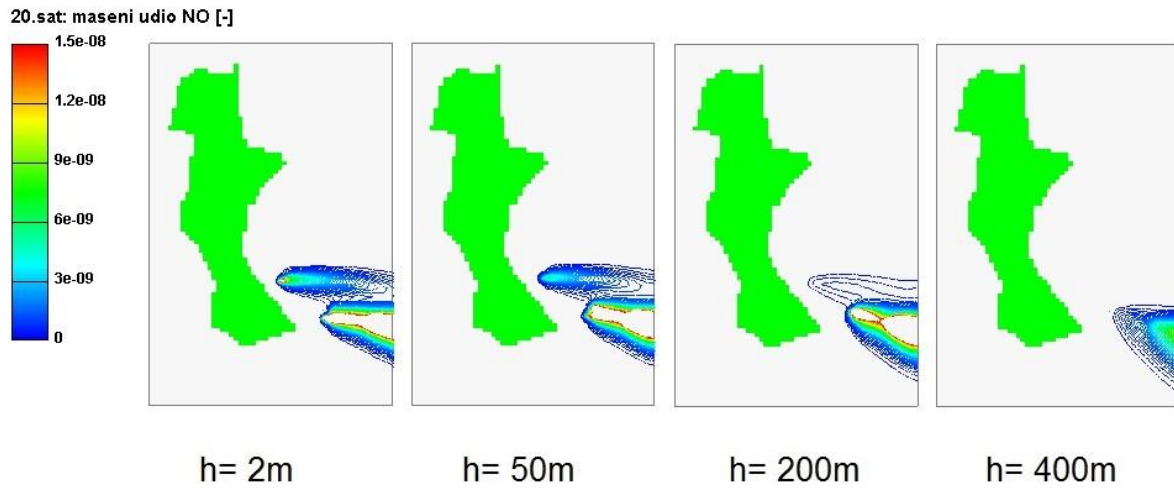
Slika 67. Prikaz dimnih perjanica u 17. satu za vrijednosti koncentracija NO



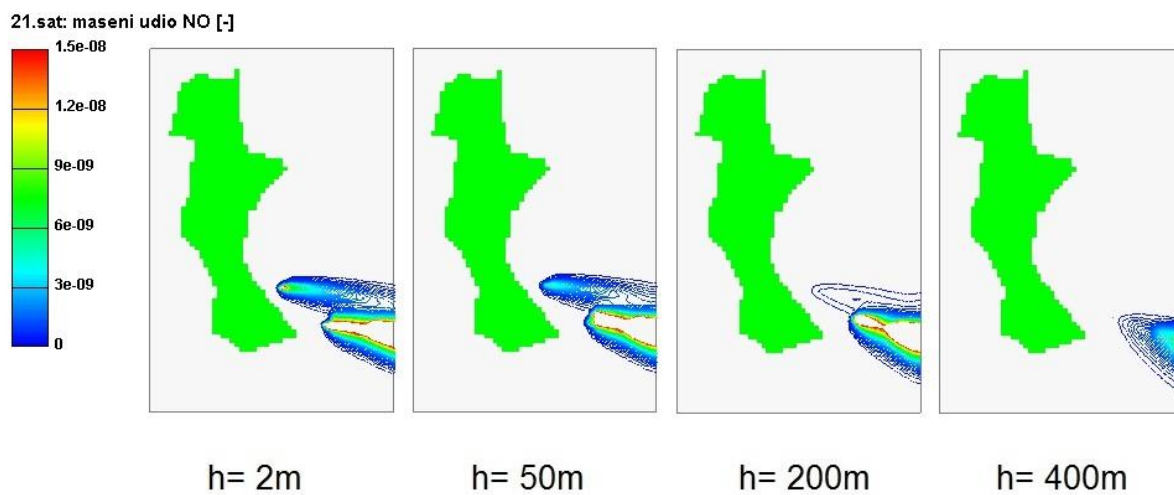
Slika 68. Prikaz dimnih perjanica u 18. satu za vrijednosti koncentracija NO



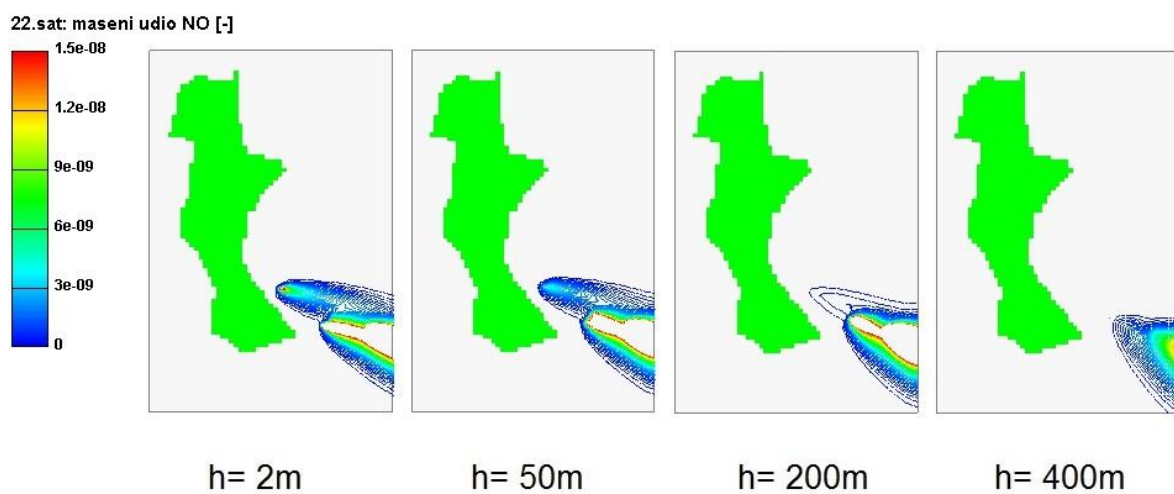
Slika 69. Prikaz dimnih perjanica u 19. satu za vrijednosti koncentracija NO



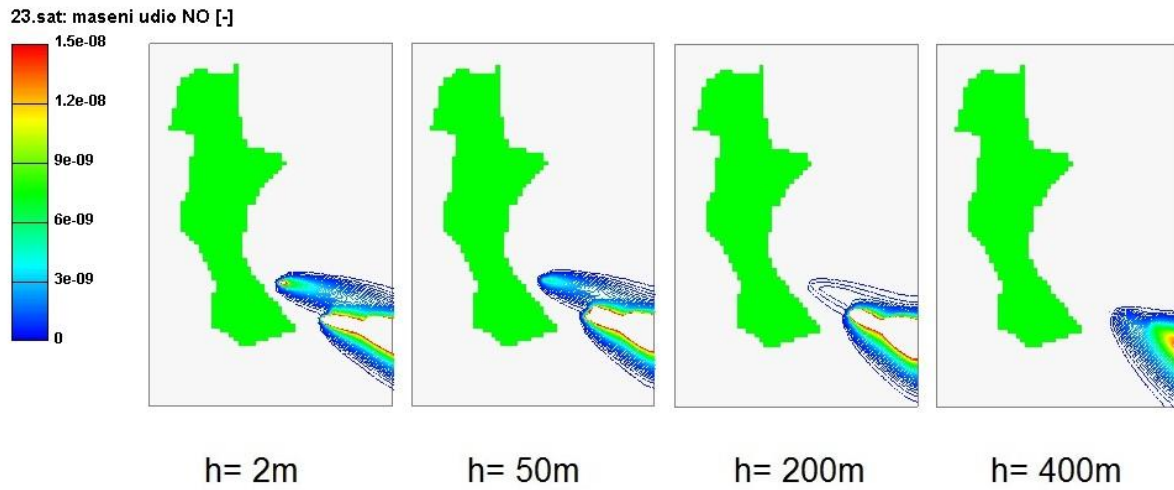
Slika 70. Prikaz dimnih perjanica u 20. satu za vrijednosti koncentracija NO



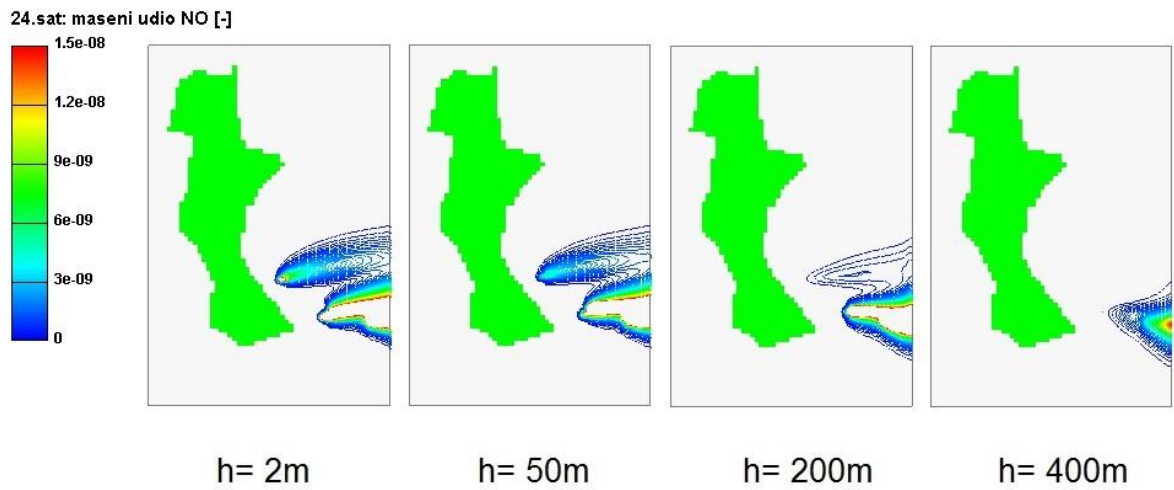
Slika 71. Prikaz dimnih perjanica u 21. satu za vrijednosti koncentracija NO



Slika 72. Prikaz dimnih perjanica u 22. satu za vrijednosti koncentracija NO



Slika 73. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija NO



Slika 74. Prikaz dimnih perjanica u 24. satu za vrijednosti koncentracija NO