

Primljen / Received: 21.3.2023.

Ispravljen / Corrected: 29.1.2024.

Prihvaćen / Accepted: 4.2.2024.

Dostupno online / Available online: 10.3.2024.

Numerička analiza pronosa onečišćenja iz dimnjaka spalionice medicinskog otpada u urbanom okolišu

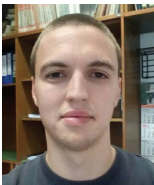
Autori:

Doc.dr.sc. **Damjan Bujak**, dipl.ing.građ.Sveučilišta u Zagrebu
Građevinski fakultet
damjan.bujak@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju



Hanna Miličević, mag. ing. aedif.

Sveučilišta u Zagrebu
Građevinski fakultet
hanna.milicevic@grad.unizg.hr

Tin Kulić, mag. ing. aedif.

Sveučilišta u Zagrebu
Građevinski fakultet
tin.kulic@grad.unizg.hrProf.dr.sc. **Goran Lončar**, dipl.ing.građ.Sveučilišta u Zagrebu
Građevinski fakultet
goran.loncar@grad.unizg.hr

Prethodno priopćenje

Damjan Bujak, Hanna Miličević, Tin Kulić, Goran Lončar

Numerička analiza pronosa onečišćenja iz dimnjaka spalionice medicinskog otpada u urbanom okolišu

Provedene su numeričke analize širenja onečišćenja iz dimnjaka spalionice medicinskog otpada u urbaniziranom okruženju. Istraživanje je usmjereno na iznalaženje pozicije i visine dimnjaka čime se osigurava da poniranje oblaka onečišćenja prema tlu pri opstrujavanju zgrade s dimnjakom (tzv. *downwashing*) posljedično ne ugrožava zdravlje ljudi u neposrednoj blizini dimnjaka. Analiziran je slučaj prisutnosti objekta-zgrade idealizirane geometrije (uz varijaciju visine i duljine zgrade) ispred objekta tipske spalionice s dimnjakom (fiksni dimenzija), te slučaj izvedbe dimnjaka na vrhu zgrade idealizirane geometrije (uz varijaciju pozicije i visine dimnjaka) bez zasebnog objekta spalionice. Praćene su koncentracije onečišćenja na dva metra iznad tla. Rezultati provedenog istraživanja pokazali su da u realnim uvjetima izgradnje (prisutnost zgrada uokolo objekta spalionice) i okoliša (brzina i smjer vjetra) dimnjak treba biti viši za 20 metra od obližnjeg objekta-zgrade ili izveden na sredini krovne konstrukcije u visini 20 metra, a ne uz tehnološku zgradu za postupanje s otpadom (spalionica) sa visinom 2,5 puta većom od same spalionice.

Ključne riječi:

numerički model, dimnjak, medicinski otpad, pronos onečišćenja, urbani okoliš

Research Paper

Damjan Bujak, Hanna Miličević, Tin Kulić, Goran Lončar

A numerical analysis of pollutant dispersion from the chimney of the medical waste incinerator in the urban environment

Numerical analyses were carried out on the dispersion of pollution from the chimney of a medical waste incinerator in an urban environment. The research focused on determining the location and height of the chimney to ensure that the descent of pollution plumes towards the ground, known as "downwashing", does not pose a health risk to people in the immediate vicinity of the chimney. Two scenarios were investigated in the study: the presence of a building with idealized geometry (with height and length variations) in front of a typical waste incinerator with a fixed size chimney and the case of a chimney on top of a building with idealized geometry (with position and height variations) without a separate waste incinerator. The pollutant concentrations were monitored at a height of 2 meters above the ground. The results of the study show that under realistic design conditions (presence of surrounding buildings) and environmental factors (wind speed and direction), the chimney should be positioned 20 meters higher than the adjacent building or in the middle of the roof structure at a height of 20 meters. This is better than a chimney next to the waste disposal facility (incinerator) that is 2.5 times higher than the incinerator itself.

Key words:

numerical model, chimney, medical waste, pollution dispersion, urban environment

1. Uvod

Velika urbana područja povezana su s visokom antropogenom aktivnošću i povišenom koncentracijom onečišćujućih tvari u zraku kao što su ugljikov monoksid (CO), sumporni dioksid (SO₂) i dušikov dioksid (NO₂). Terenska mjerenja koncentracije onečišćujućih tvari u zraku [1, 2] pokazuju prostornu i vremensku varijabilnost [3], pa se radi prepoznavanja interakcije zagađivača s izgrađenim i prirodnim okolišem, osim mjerenja na terenu, učestalo primjenjuju i tehnike fizikalnog i/ili numeričkog modeliranja.

Zbog širokog raspona karakterističnih duljina na kojima dominiraju različiti mehanizmi u procesu pronosa onečišćenja, pojedini su modeli pouzdani samo u određenom rasponu. Za praćenje oblaka onečišćenja na udaljenostima većim od 50 km od izvora (dimnjaka) primjenjuje se Lagrangeov model disperzije čestica, a uspostavlja se spregnuto s atmosferskim numeričkim modelom iz kojeg se preuzimaju podaci o nestacionarnom i nejednolikom polju vjetra u prostornoj rezoluciji od nekoliko km (u današnje vrijeme 2 km) i u vremenskoj rezoluciji od jednog sata [4-7]. Na udaljenosti manjoj od 50 km od izvora uobičajeno se koriste Gaussovi numerički ili analitički modeli pronosa onečišćenja. Tipičan predstavnik Gaussovog modela je AERMOD [8-11]. Potrebno je napomenuti da Gaussovi modeli ne mogu razlučiti elemente pronosa onečišćenja uzrokovane geometrijom zgrada ili varijabilnim okolišnim uvjetima (primarno vjetar) na skali manjoj od jednog sata.

Računalna dinamika fluida (engl. *Computational fluid dynamics* - CFD) nudi najveću prostornu i vremensku rezoluciju za simulaciju širenja onečišćenja zrakom u intenzivno izgrađenom okolišu [12, 13]. Većina istraživanja s primjenom CFD-a oslanja se na primjenu Navier-Stokesovih jednadžbi s Reynoldsovima usrednjavanjem (RANS) i modelima turbulencije zasnovanim na dvije jednadžbe [14-16].

Fizikalnim modeliranjem širenja onečišćenja u urbanim sredinama obuhvaćaju se pojedinačne zgrade ili ulice izvedene u odgovarajućem mjerilu [17-19]. Rezultati istraživanja o utjecaju pravokutnih zgrada na širenje uzgonski neutralnog oblaka onečišćenja prezentirani su u radu [20]. Ispitivanja su provedena za različite omjere visine i širine zgrade, visine izvora u odnosu na visinu zgrade i upadni kut vjetra u odnosu na zgradu. Istraživanja na fizikalnom modelu u zračnom tunelu trebaju značajne financijske troškove i vrijeme potrebno za provedbu eksperimenata, što rezultira ograničenim brojem analiziranih scenarija. Nadalje, broj mjernih pozicija na izvedenim fizikalnim modelima je također ograničen.

U okviru Nacionalnog plana oporavka i otpornosti (NPOO) izravno se dodjeljuju bespovratna sredstva za investiranje u postupanje s otpadom iz bolnica u Zagrebu. Pomoći tih investicija provodi se strateški projekt zdravstvenog sustava u RH, a kojim se želi osigurati cjelovit sustav gospodarenja zaraznim medicinskim otpadom uzimajući u obzir red

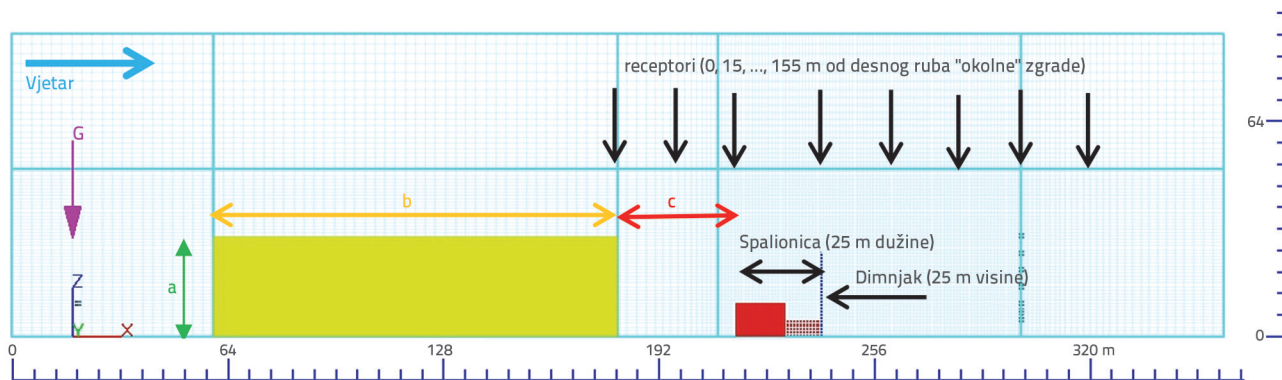
prvenstva gospodarenja otpadom RH uz načela zaštite okoliša, mjere opreznosti, održivost, tehnološku izvedivost i ekonomsku održivost, zaštitu resursa, te ukupne učinke i utjecaje na okoliš, ljudsko zdravlje, gospodarstvo i društvo u cjelini.

U konkretnom slučaju, objekt za gospodarenje zaraznim medicinskim otpadom KBC-a Zagreb planira se izgraditi unutar lokacije bolničkog kompleksa Rebro. Zbog svojih infektivnih karakteristika, medicinski otpad se ne smije odlagati, upotrebljavati za drugu namjenu ili podvrgavati reciklaži. Kao alternativa spomenutom moguća je termička obrada otpada s iskorištavanjem topline (energetska oporaba). Nakon tehnološke obrade medicinskog otpada u spalionici, iz dimnjaka izvedenog uz sam objekt spalionice upušta se efluent koji se dalje pronosi strujanjem zraka. S obzirom na postavljeni imperativ o zaštiti ljudskog zdravlja, potrebno je na odgovarajući način provjeriti zadovoljenje postavljenih kriterija o maksimalnim dopuštenim koncentracijama onečišćujuće tvari u bliskoj i dalekoj zoni uokolo samog dimnjaka.

Problem kod izvedbe dimnjaka i upuštanja onečišćenja vezan je uz iznalaženje odgovarajuće lokacije i visine dimnjaka čime se omogućuje zadovoljavajući stupanj razrijeđenosti inicijalne koncentracije onečišćenja do potencijalnih receptora. Pri izboru lokacije dimnjaka potrebno je osobito paziti na to da okolni objekti ne uvjetuju polje strujanja zraka zbog čega dolazi do poniranja oblaka onečišćenja od vrha dimnjaka prema tlu (tzv. "downwashing" [21, 22]). Rezultati istraživanja prethodno navedenih autora pokazali su da dinamika poniranja oblaka onečišćenja od izvora (vrh dimnjaka) prema tlu ovisi o omjerima visine i dužine okolne zgrade, visini i položaju izvora u odnosu na okolnu zgradu te o meteorološkim uvjetima. Stoga su u ovom radu prikazani rezultati numeričke analize širenja oblaka onečišćenja u idealiziranom infrastrukturnom sustavu koji se sastoji od jedne "okolne" zgrade (visine 20 m i 30 m; duljine 20 m, 60 m i 90 m) i jedne zgrade za gospodarenje otpadom (visine 10 m i širine 25 m - tipska spalionica) s pripadnim dimnjakom. Međusobna udaljenost "okolne" zgrade i tipske spalionice je 30 m u smjeru djelovanja vjetra. Uz tipsku spalionicu postavljen je dimnjak visine 25 m (projektirano po načelu izbora visine dimnjaka od 2,5 puta visina procesne zgrade).

Na osnovi dobivenih rezultata numeričkih simulacija dane su i preporuke za izbor pozicije i visine dimnjaka čime se osigurava da ne dolazi do prekoračenja graničnih vrijednosti koncentracije NO₂ u zraku s obzirom na zaštitu zdravlja ljudi (prema Uredbi o razinama onečišćujućih tvari u zraku NN 77/20).

Potrebno je naglasiti kako zamisao da se problemi onečišćenja zraka uzorkovani emisijom plinova iz spalionice medicinskog otpada trebaju riješiti izgradnjom dovoljno visokih dimnjaka, smještenih na dovoljno velikoj udaljenosti objekta-zgrade od spalionice, pripadaju prošlosti, posebice danas kada smo svjesni brojnih i nesagledivih posljedica onečišćenja okoliša.



Slika 1. Karakteristična geometrijska obilježja idealiziranog infrastrukturnog sustava zgrada i dimnjaka koji se polaže u ispitnu prostornu domenu numeričkog modela

2. Materijali i metode

2.1. Idealizirana geometrija urbane sredine

Karakteristična geometrijska obilježja idealiziranog infrastrukturnog sustava zgrada i dimnjaka u vertikalnom presjeku (X-Z ravnina), koji se polaže u ispitnu prostornu domenu numeričkog modela, prikazani su na slici 1. U tablici 1. prikazane su kombinacije osnovnih geometrija koje su podvrgnute numeričkim simulacijama (a – visina "okolne" zgrade, b – dužina "okolne" zgrade, c – horizontalna udaljenost između kraja "okolne" zgrade i objekta tipizirane spalionice s dimnjakom). U Y-smjeru koristi se jednolika širina od 30 m za sve objekte, osim dimnjaka koji ima promjer 1m. Potrebno je napomenuti da u konkretnom slučaju planirane spalionice infektivnog medicinskog otpada u KBC-Rebro (slika 2.) dužina "okolne" zgrade u smjeru djelovanja vjetra iz SW smjera iznosi približno 120 m (oznaka b na slici 1.), te da je udaljenost od "okolne" zgrade do zgrade spalionice približno 60 m (oznaka c na slici 1.). Tipaska spalionica ima dužinu 25 m i visinu 10 m/5 m nad terenom. Dimnjak je visine 25 m nad terenom. Dimenzije spalionice i dimnjaka zadržavaju se konstantnim u svim simulacijama u kojima je objekt spalionice odvojen od "okolne"

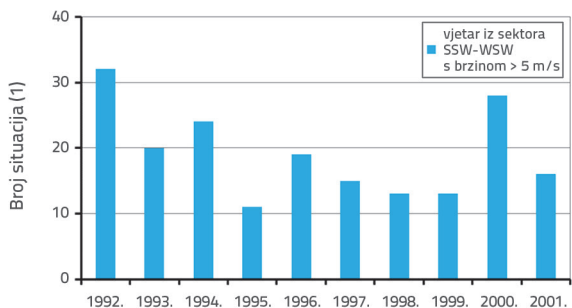


Slika 2. Prikaz karakterističnih dužina za KBC-Rebro u smjeru djelovanja vjetra iz SW smjera

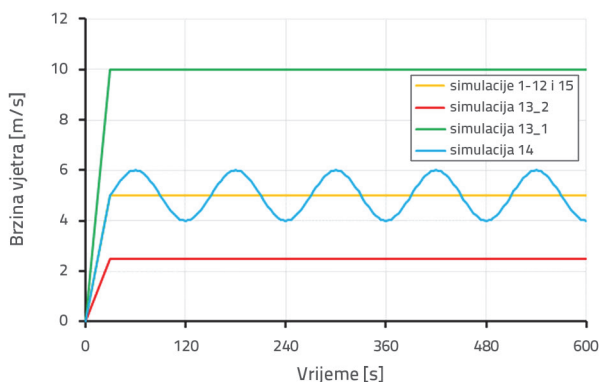
zgrade (simulacije 1, 2, 3, 4, tablica 1.). Receptori su pozicionirani na horizontalnoj udaljenosti 0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade (u smjeru djelovanja vjetra), na 2 m visine od horizontalnog terena.

2.2. Izbor reprezentativnog djelovanja vjetra

Reprezentativni intenzitet vjetra za provedbu numeričkih simulacija usvojen je na temelju dopuštenog broja prekoračenja (18) graničnih vrijednosti koncentracije NO_2 u zraku (od 0,0002 g/m^3) tijekom jedne kalendarske godine, prema Uredbi o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 77/20). Podaci o brzini i smjeru vjetra za lokaciju bolnice KBC-Rebro dobiveni su obradom rezultata iz atmosferskog numeričkog modela Aladin-Hr za razdoblje 1992.-2001. s prostornom rezolucijom 2 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata. Iz navedenog skupa podataka napravljeno je filtriranje vremenskih nizova brzine i smjera vjetra na način da se uključe samo vjetrovi u rasponu smjerova SSW ($202,5^\circ$) - WSW ($247,5^\circ$). Nakon toga je izračunana brzina vjetra koja se u analiziranom razdoblju 1992.-2001. pojavljuje prosječno 18 puta godišnje (5,3 m/s). Konačno je usvojena cjelobrojna vrijednost od 5 m/s, a broj situacija s prekoračenjem brzine vjetra od 5 m/s u rasponu smjera vjetra $202,5^\circ - 247,5^\circ$ po godinama za razdoblje 1992.-2001. dan je na slici 3. (prosječno 19 situacija godišnje). Kako bi se iskoristio potencijal numeričkog modela, dodatno je provedena i simulacija s nestacionarnom brzinom vjetra, na način da brzina varira oko srednje brzine od 5 m/s s amplitudom 1 m/s i periodom 120 s (slika 4.). Nadalje, kako bi se prepoznao utjecaj brzine vjetra na pronos onečišćenja, provedene su i dvije simulacije sa stacionarnom brzinom vjetra od 2,5 m/s (dvostruko manje od referentne vrijednosti 5 m/s) i 10 m/s (dvostruko veće od referentne vrijednosti 5 m/s).



Slika 3. Broj situacija s premašenjem brzine vjetra od 5 m/s u rasponu smjera vjetra 202,5° – 247,5° po godinama za razdoblje 1992.-2001. na temelju ekstrakcije podataka iz atmosferskog numeričkog modela Aladin-Hr s prostornom rezolucijom 2 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata za lokaciju KBC-Rebro Zagreb



Slika 4. Usvojene brzine vjetra za provedbu numeričkih simulacija

2.3. Podaci o efluentu

Pri provedbi svih numeričkih analiza (tablica 1.) korišteni su podaci o karakteristikama efluenta iz planirane spalionice infektivnog otpada KBC-Rebro [23]. Izlazna temperatura efluenta iz dimnjaka je 110 °C, a izlazni protok 2,55 m³/s. Inicijalna koncentracija onečišćenja na izlazu iz dimnjaka je 0,2 g/m³ NO₂. Granična vrijednosti koncentracije NO₂ u zraku s obzirom na zaštitu zdravlja ljudi prema Uredbi o razinama onečišćujućih tvari u zraku (NN 77/20) iznosi 0,0002 g/m³. Dakle, pravilnom izvedbom dimnjaka potrebno je osigurati razrjeđenje inicijalne koncentracije od minimalno 1000 puta do prvih receptora. Osim navedenog protoka upuštanja efluenta od 2,55 m³/s, u posljednjoj simulaciji primijenjena je dvostruko veća vrijednost (5,1 m³/s, simulacija 15 - tablica 1.). Unos efluenta počinje tek od 240 sekunde u svim simulacijama (nakon stacioniranja polja brzina).

Treba istaknuti da nisu samo NO_x neželjeni proizvodi termičkog spaljivanja. Spaljivanjem medicinskog otpada, osim NO_x-a, mogu nastati i druga onečišćenja, kao što su krute čestice, metali, kiseli plinovi, ugljikov monoksid, organski spojevi te ostali materijali koji mogu biti prisutni u medicinskom otpadu, kao što su patogeni, citotoksini i radioaktivni dijagnostički materijali. Ako se proces izgaranja ne vodi na zadovoljavajući način, proizvodi nepotpunog izgaranja mogu biti različiti, od

niskomolekularnih ugljikovodika (kao što su metan ili etan) do visokomolekularnih spojeva od kojih su posebno problematični poliklorirani dibenzo-p-dioksini i dibenzofurani.

2.4. Numerički model

Za provedbu numeričkih simulacija korišten je model Flow-3D (www.flow3d.com). Model je razvijen u Los Alamos National Laboratory tijekom 70-ih godina, te je do današnjih dana kontinuirano razvijan i nadograđivan u tvrtki Flow Science, Inc. Baziran je na metodi konačnih volumena i Eulerovom pristupu čime se rješava sustav jednačbi očuvanja mase, količine gibanja i energije. Primjenjuje se strukturirana proračunska mreža u Kartezijevom koordinatnom sustavu, a rubni uvjeti definiraju se na 6 obodnih ploha diskretizacijskog proračunskog bloka. Proračunski kod koristi tzv. "Volume of Fluid" (VOF) formulaciju za inkorporiranje nepropusnih granica u proračunsku mrežu i odgovarajući sustav jednačbi. 3D nepropusni objekti se tretiraju kao skup konačnih volumena s pripadnim površinama, a čime je podržana mogućnost rješavanja sustava diferencijalnih jednačbi na ortogonalnoj i strukturiranoj mreži. Proračun slobodne površine se provodi VOF tehnikom baziranom na volumnoj frakciji svake proračunske 3D ćelije.

Jednačba očuvanja mase (jednačba kontinuiteta, izraz (1) i jednačba očuvanja količine gibanja (Navier-Stokeova jednačba, izrazi (2), (3) i (4) u Karteziovom koordinatnom sustavu glase:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \quad (2)$$

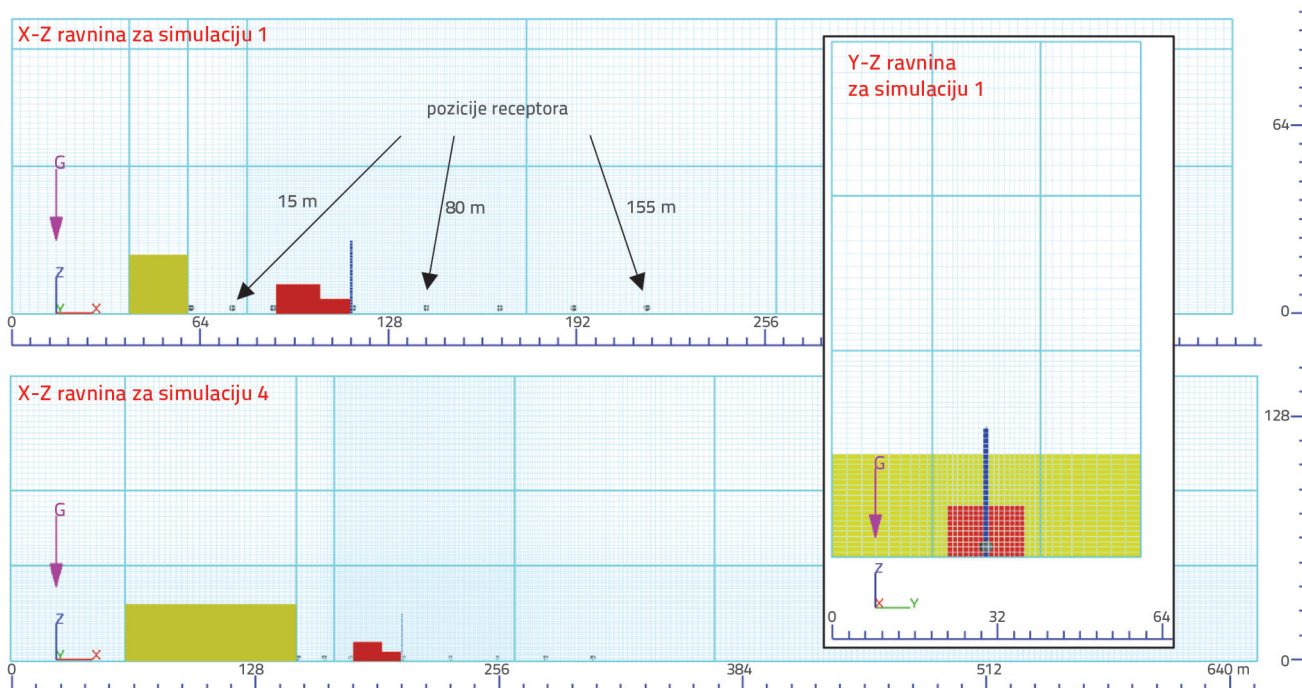
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

gdje su: u, v, z komponente vektora brzine u smjerovima x, y, z ; R_{DIF} član turbulentne difuzije; p tlak; R_{SOR} član izvora ili ponora; A_x, A_y, A_z protjecajni poprečni presjek u proračunskoj ćeliji; ρ gustoća tekućine (usvojeno 1 kg/m³); G_z gravitacijsko ubrzanje; f_x, f_y, f_z ubrzanje uslijed viskoznog djelovanja u smjerovima x, y, z na temelju divergencije tenzora viskoznog naprezanja σ ($(1/\rho)\nabla\sigma$); V_f volumna frakcija fluida u proračunskoj ćeliji izračunana na temelju izraza (5).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial (F A_x u)}{\partial x} + \frac{\partial (F A_y v)}{\partial y} + \frac{\partial (F A_z w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (5)$$

gdje je F vrijednost volumne frakcije s kojom se prezentira količina tekućine (kapljevine ili plina).



Slika 5. Diskretizacija prostorne domene numeričkog modela (strukturirana proračunska mreža) s konačnim volumenima varijabilnih dimenzija od 1 do 3 m u smjeru x, y i z (gore – proračunska mreža simulacije 1, dolje – proračunska mreža simulacije 4)

U provedenim numeričkim analizama onečišćenje je tretirano kao pasivni skalar (traser), što znači da nema utjecaja na polje strujanja i da nije podložan kemijskim transformacijama [24–27]. Jednadžba pronosa za onečišćujuću tvar istovjetna je jednadžbi (1), uz zamjenu oznaka za gustoću ρ simbolom za koncentraciju c .

Na slici 5. prikazana je i diskretizacija prostorne domene modela (strukturirana proračunska mreža) sa konačnim volumenima (čelijama) varijabilnih dimenzija od 1 do 3 m u smjeru X i Z (za geometriju simulacije 1 i 4, vidi tablicu 1.). U smjeru X model ima varijabilnu dužinu, od 415 m u simulaciji 1 do 655 m u simulaciji 4, a u smjeru Z visinu od 100 m u simulacijama s visinom "okolne" zgrade od 20 m, te 150 m u simulacijama s visinom "okolne" zgrade od 30 m (tablica 1.). Od ulaznog ruba do prve zgrade udaljenost iznosi 2a. Izborom ovakvih dimenzija modela osiguran je minimalan neželjeni utjecaj rubnih uvjeta na točnost proračunskih rezultata [28]. U smjeru Y ćelije imaju varijabilnu duljinu od 1 m (na poziciji dimnjaka) do 3 m. U proračunskom bloku uokolo dimnjaka sve proračunske ćelije imaju 1 m u sva tri smjera.

Na ulaznoj granici (Xmin) primjenjen je uvjet ulaznih brzina (slika 4.), a na izlaznoj Xmax granici primijenjen je "outflow" rubni uvjet. Za lateralne rubove (Ymin i Ymax) uvjet je simetrije. Za Zmin primjenjen je uvjet zida ("no-slip" boundary), a za Zmax uvjet simetrije. Inicijalna temperatura u modelskoj domeni je homogena i usvojena s vrijednosti 15 °C, a tlak je usvojen kao hidrostatički. Početni uvjeti brzina su zadani kao stanje mirovanja. Unošenje efluenta započinje 240 s nakon početka djelovanja vjetera. Ukupno trajanje svake simulacije je 600 s.

U provedbi simulacija korišten je RNG $k-\varepsilon$ model turbulencije [29]. Član tlaka se rješava implicitnom metodom, tzv. GMRES (Improved Generalised Minimal residual [30]) sa GCG algoritmom (Generalized Conjugate Gradient), a viskozna naprezanja i izmjena toplote eksplicitno. Konvektivni član količine gibanja tretiran je numeričkom formulacijom drugog reda točnosti. Postizanje numeričke stabilnosti osigurano je na temelju usvojenih ograničenja vremenskog koraka proračuna. Vremenski korak smanjuje se kada iteracije tlaka i/ili temperature premaše odgovarajuće nominalne vrijednosti koje ovise o opcijama iteracije, primjerice kada advekcija frakcije tekućine premaši količinu jednaku dvostrukom volumenu ćelije pomnoženom s faktorom stabilnosti 0,45 (ili 0,85 puta volumena ćelije ako je manji). U ovom slučaju rješenje ciklusa se ponavlja s vremenskim korakom skraćenim napola. Budući da je dinamička viskoznost različita od nule, primjenjuje se daljnja limitacija vremenskog koraka jer skalarne varijable ne smiju prostorno difuzivno propagirati više od jedne proračunske ćelije u jednom vremenskom koraku (usvojen je koeficijent smanjenja vremenskog koraka od 0.5). Prosječni proračunski vremenski korak u provedbi simulacija iznosi $1.5E-2$ s.

Verifikacija modela provedena je na način izložen u radu [31]. Primijenjeni su uvjeti simulacije 1 (tablica 1, reprezentativna veličina ćelije $h_2 = 1,54$ m; 687900 numeričkih ćelija) s daljnjom varijacijom prostorne diskretizacije, na način da se ona prvotno dvostruko prorijedi (reprezentativna veličina ćelije $h_3 = 3,07$ m; 85845 numeričkih ćelija), a nakon toga dvostruko progusti (reprezentativna veličina ćelije $h_2 = 0,77$ m;

Tablica 1. Provedene numeričke simulacije s osnovnim geometrijskim obilježjima visine "okolne" zgrade (a), dužine "okolne" zgrade (b), udaljenosti između kraja "okolne" zgrade i početka tipske spalionice (c), te duljine (L) i visine (H) proračunske mreže

| Simulacija | a [m] | b [m] | c [m] | L [m] | H [m] | Vjetar [m/s] | Q _{EFLUENT} [m ³ /s] | Dimnjak |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--|-------------------------------|
| 1 | 20 | 20 | 30 | 415 | 100 | 5 | 2,55 | spalionica desno (25 m) |
| 2 | 30 | 20 | 30 | 585 | 150 | 5 | 2,55 | spalionica desno (25 m) |
| 3 | 20 | 60 | 30 | 455 | 100 | 5 | 2,55 | spalionica desno (25 m) |
| 4 | 30 | 90 | 30 | 655 | 150 | 5 | 2,55 | spalionica desno (25 m) |
| 5 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 2,55 | spalionica desno (a+20=40 m) |
| 6 | 30 | 20 | 30 | 585 | 150 | 5 | 2,55 | spalionica desno (a+20=50 m) |
| 7 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 2,55 | okolna zgrada lijevo +10 |
| 8 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 2,55 | okolna zgrada desno +10 |
| 9 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 2,55 | okolna zgrada sredina +10 |
| 10 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 2,55 | okolna zgrada sredina +20 |
| 11 | 30 | 90 | 30 | 600 | 150 | 5 | 2,55 | okolna zgrada sredina +20 |
| 12 | 30 | 120 | 60 | 715 | 150 | 5 | 2,55 | spalionica desno (25 m) REBRO |
| 13_1 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 10 | 2,55 | spalionica desno (a+20=40 m) |
| 13_2 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 2.5 | 2,55 | spalionica desno (a+20=40 m) |
| 14 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | var 3-7 | 2,55 | spalionica desno (a+20=40 m) |
| 15 | 20 | 20 | 30 | 360 | 100 | 5 | 5,1 | spalionica desno (a+20=40 m) |

Tablica 2. Koncentracija efluenta na središnjoj strujnici perjanice onečišćenja izračunana prema metodologiji dostavljenoj u radovima [32, 33] i izračunanih korištenim numeričkim modelom Flow-3D na konfiguraciji simulacije 1 bez okolne zgrade, spalionice i dimnjaka

| Pozicija (1) | X [m] | Y [m] | [32, 33] [g/m ³] | FLOW-3D [g/m ³] | Apsolutna pogreška [g/m ³] | Relativna pogreška [%] |
|--------------|-------|-------|------------------------------|-----------------------------|--|------------------------|
| 1 | 25 | 25,7 | 0,0100 | 0,0098 | -0,0002 | 2,0 |
| 2 | 50 | 29,0 | 0,0026 | 0,0023 | -0,0003 | 11,5 |
| 3 | 75 | 31,8 | 0,0012 | 0,0009 | -0,0003 | 24,4 |
| 4 | 100 | 34,3 | 0,0007 | 0,0004 | -0,0003 | 42,4 |

5440869 numeričkih ćelija). Dakle, faktor prognošenja je $r = 2$. Za vrijednosti ϕ_k odabrane su izračunane vrijednosti u 600 sekundi simulacije na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade u smjeru djelovanja vjetra, na 2 m od terena, slika 5). Izračunane vrijednosti parametra prividnog reda p_i (engl. *apparent order*) iznose $[p_{0m}, p_{15m}, p_{30m}, p_{55m}, p_{80m}, p_{105m}, p_{130m}, p_{155m}] = (1.63, 3.12, 4.61, 0.46, 2.31, 0.03, 1.86, 2.25)$.

Ekstrapolirane vrijednosti iznose $[\phi_{EXT-0m}^{21}, \phi_{EXT-15m}^{21}, \phi_{EXT-30m}^{21}, \phi_{EXT-55m}^{21}, \phi_{EXT-80m}^{21}, \phi_{EXT-105m}^{21}, \phi_{EXT-130m}^{21}, \phi_{EXT-155m}^{21}] = (2.2E-4, 3.9E-4, 2.4E-4, 5.6E-4, 7.8E-4, 6.2E-4, 5.3E-4, 4.6E-4)$, te $[\phi_{EXT-0m}^{32}, \phi_{EXT-15m}^{32}, \phi_{EXT-30m}^{32}, \phi_{EXT-55m}^{32}, \phi_{EXT-80m}^{32}, \phi_{EXT-105m}^{32}, \phi_{EXT-130m}^{32}, \phi_{EXT-155m}^{32}] = (2.4E-4, 5.7E-4, 4.5E-4, 4.2E-4, 9.3E-4, 5.9E-4, 3.5E-4, 2.1E-4)$.

Slijedom navedenog, aproksimativne relativne pogreške iznose $[e_{a-0m}^{21}, e_{a-15m}^{21}, e_{a-30m}^{21}, e_{a-55m}^{21}, e_{a-80m}^{21}, e_{a-105m}^{21}, e_{a-130m}^{21}, e_{a-155m}^{21}] = (0.127, 0.077, 0.031, 0.1, 0.07, 0.049, 0.064, 0.086)$, a ekstrapolirane relativne pogreške $[e_{EXT-0m}^{21}, e_{EXT-15m}^{21}, e_{EXT-30m}^{21}, e_{EXT-55m}^{21}, e_{EXT-80m}^{21}, e_{EXT-105m}^{21}, e_{EXT-130m}^{21}, e_{EXT-155m}^{21}] = (0.114, 0.072, 0.033, 0.092, 0.066, 0.047, 0.061, 0.08)$.

Dobivene vrijednosti upućuju na konvergenciju rezultata s povećanjem gustoće proračunske mreže, te da se pouzdanost rezultata znakovito povećava prelaskom s rjeđe mreže (h_3) na onu koja je korištena u provedbi numeričkih simulacija iz tablice 1. (h_2). S druge strane, daljnjim dvostrukim prognošenjem mreže (sa h_2 na h_1) ostvaruje se relativno malo povećanje pouzdanosti rezultata, uz produljenje vremena provedbe simulacije za približno 16 puta. Najmanja relativna pogreška dobivena je na poziciji receptora uz lijevi rub spalionice (30 m od desnog ruba "okolne" zgrade), a najveća na poziciji receptora uz sami desni rub "okolne" zgrade. Validacija modela je provedena na način da se iz konfiguracije simulacije 1 izuzmu okolna zgrada, spalionica i dimnjak, te da se koristeći iste ulazne podatke za unos efluenta (visina 25 m od terena, maseni protok 2,55 m³/s, inicijalna koncentracija 0,2 g/m³ i temperatura 110 °C) i istu geometriju proračunske mreže dobiveni modelski rezultati koncentracije usporede s rezultatima primjene sustava jednadžbi Gaussovog disperzivnog modela širenja oblaka onečišćenja prema radovima [32, 33]. Odabrane su 4 pozicije uzorkovanja koncentracije (tablica 2.,

X-koordinata je udaljenost od pozicije unosa a Z koordinata vertikalna udaljenost od terena), koje se nalaze na središnjoj strujnici oblaka onečišćenja prema radovima [32, 33]. U tablici 2. prikazana je i usporedba izračunanih vrijednosti koncentracije po obje metodologije. Vrijednost srednje apsolutne pogreške modela iznosi $-0,00027 \text{ g/m}^3$, a srednje relativne pogreške 20,1 %, uz pretpostavku apsolutne točnosti rezultata dobivenih prema [32, 33]. Može se uočiti propagacija relativne pogreške numeričkog modela u smjeru širenja oblaka onečišćenja (povećanje X koordinate), primarno kao posljedica sporijeg odizanja oblaka onečišćenja u numeričkom modelu.

Osnovno ograničenje u provedenim modelskim simulacijama je primjena stacionarnih ulaznih rubnih uvjeta brzine i smjera vjeta (osim simulacije 14), s obzirom na to da strujanje zraka u prirodi ima izraženu varijabilnost brzine i smjera vjeta. Potencijalna posljedica toga modelskog pojednostavljenja je i prigušenje prostorne i vremenske varijabilnosti u koncentraciji efluenta.

3. Modelske rezultati

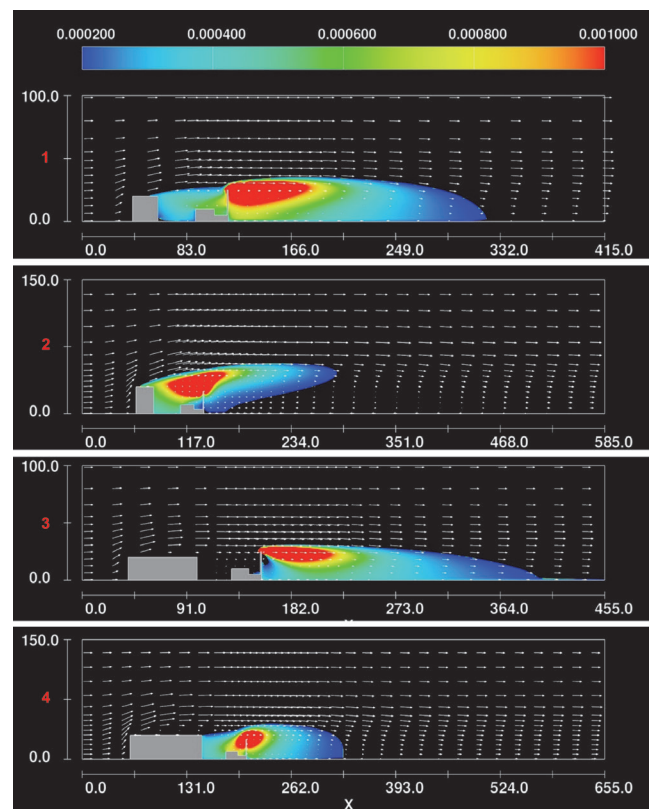
Rezultati provedenih simulacija prikazani su u obliku polja koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom od $0,0002 \text{ g/m}^3 \text{ NO}_2$ (oblak onečišćenja) i pripadnim poljem brzina (vektori) za zadnji proračunski korak simulacije od 600 s (slika 6., simulacije 1-4). Na slikama su radi preglednosti prikazani vektori brzine za svaku osmu proračunsku čeliju u smjeru X i svaku šestu proračunsku čeliju u smjeru Y. Na slici 7. prikazana je dinamika koncentracije onečišćenja na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade u smjeru djelovanja vjeta, na 2 m od terena) za cjelokupno simulacijsko razdoblje od 600 s za simulacije 1 do 4.

S prikazanih slika je razvidno da na svim pozicijama receptora dolazi do višestrukog prekoračenja dopuštene graniczne vrijednosti od $0,0002 \text{ g/m}^3$, te se zaključuje da izbor visine dimnjaka od 2,5 puta visina zgrade (spalionice) nije prihvatljivo rješenje ako su u neposrednoj okolini prisutne zgrade sličnih visina kao i dimnjak. Prepoznaju se tri mogućnosti: a) izvedba višega dimnjaka uz samu spalionicu (za 20 m iznad gornjeg ruba "okolne" zgrade, simulacije 5 i 6), b) udaljšavanje spalionice od "okolne" zgrade ili c) integriranje spalionice u "okolnu" zgradu s izvedbom dimnjaka na vrhu "okolne" zgrade, na sredini duljine "okolne" zgrade.

Polja strujanja na slici 6. mogu poslužiti u inicijalnoj procjeni za potrebno povećanje visine dimnjaka u okviru mogućnosti a). Shodno prikazanom, visinu dimnjaka je potrebno povećati na način da vrh dimnjaka bude najmanje 20 m iznad gornjeg ruba "okolne" zgrade. Stoga se umjesto visine dimnjaka od 25 m u simulaciji 1 dimnjak podiže za 15 m, odnosno do visine 40 m (simulacija 5, slike 8. i 9.), a umjesto visine dimnjaka od 25 m u simulaciji 2 dimnjak se podiže za 25 m, odnosno do visine 50 m (simulacija 6, slike 8. i 9.). Nadalje, polje strujanja na razinama

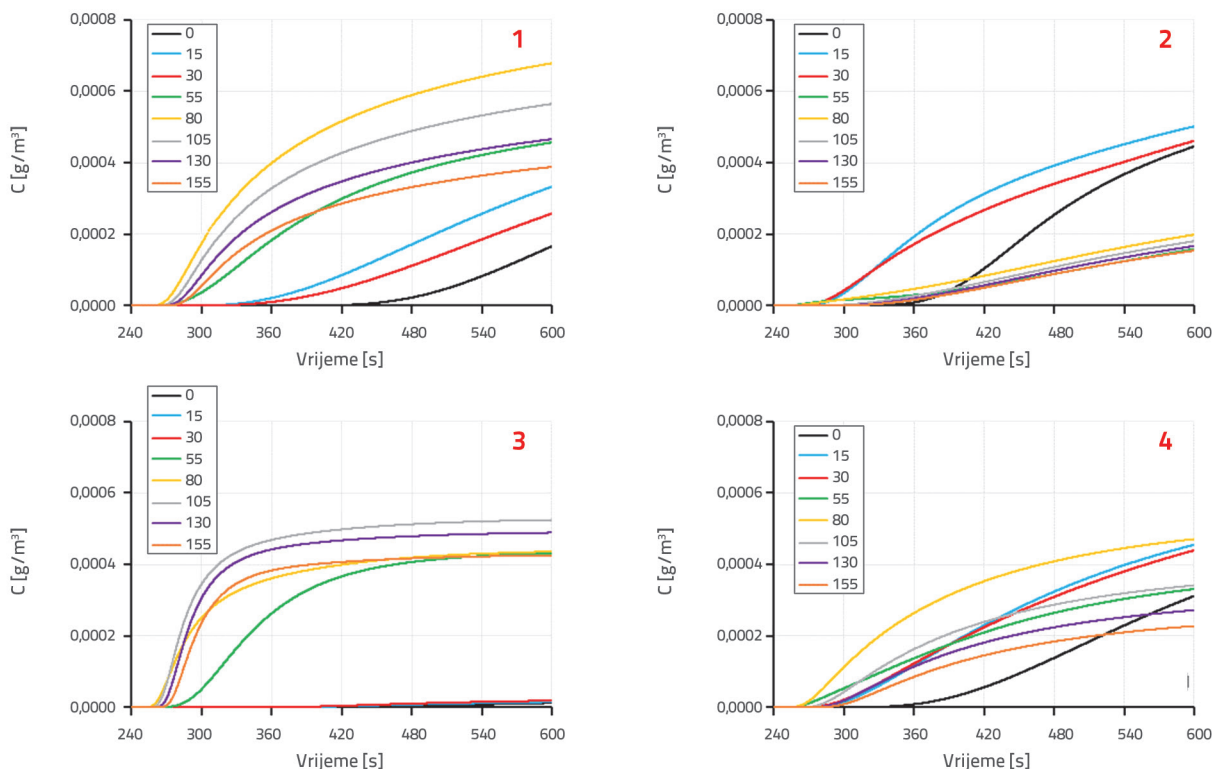
povećanih visina dimnjaka (40 m i 50 m) neznatno se mijenja sa omjerom duljine i visine okolne zgrade ($b/a = 1$ u simulacijama 1 i 2, $b/a = 3$ u simulacijama 3 i 4), pa se zaključuje iz rezultata simulacija 5 i 6 ($b/a = 1$) mogu proširiti i na situacije sa omjerom duljine i visine okolne zgrade $b/a = 3$.

Za komentar o mogućnosti b) također se može pozvati na prikazano polje strujanja sa slike 6. Kako bi se dimnjak premjestio izvan zone recirkulacije iza "okolne" zgrade (povratno strujanje) i izvan zone strujanja prema tlu, potrebno je njegovo pomicanje za minimalno 150 m, 350 m, 150 m i 350 m u situacijama opisanima sa simulacijama 1, 2, 3 i 4, redom. Stoga se zaključuje da mogućnost u realnim okolnostima uobičajenog stupnja izgrađenosti (urbanizacije) nema potencijal u rješavanju ovog problema.

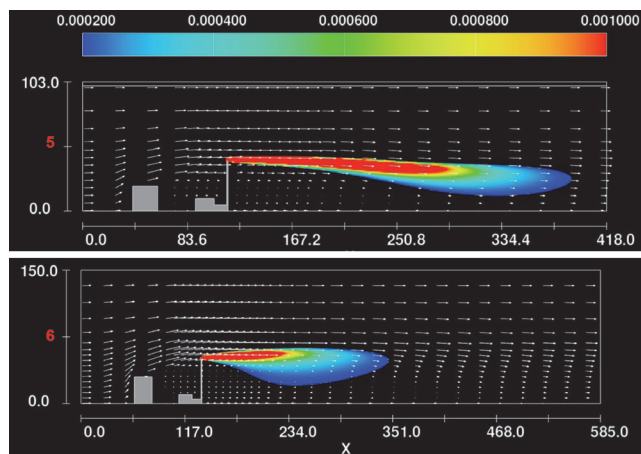


Slika 6. Polje koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom $0,0002 \text{ g/m}^3$ i pripadnim poljem brzina za simulacije 1, 2, 3 i 4

Treba upozoriti na to da zone recirkulacije iza zgrada u poljima strujanja sa slike 6. imaju veće duljine od onih koje su dobivene ispitivanjima na fizikalnom modelu opstrujavanja objekata u zračnom tunelu. Primjenom empirijskog izraza za proračun duljine zone recirkulacije iza jednog zasebnog pravokutnog objekta, dobivenog iz rezultata ispitivanja u zračnom tunelu [34], za iste geometrijske odnose visine, duljine i širine zgrade u ovome radu (tablica 1.) dobivaju se duljine zone recirkulacije od 63 m, 83 m, 46 m i 53 m, redosljedno prema geometrijskim obilježjima "okolne" zgrade u simulacijama 1, 2, 3 i 4.



Slika 7. Dinamika koncentracije onečišćenja (NO₂) na pozicijama receptora (0 m, 15m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade), na 2 m od terena (sim. 1-4)

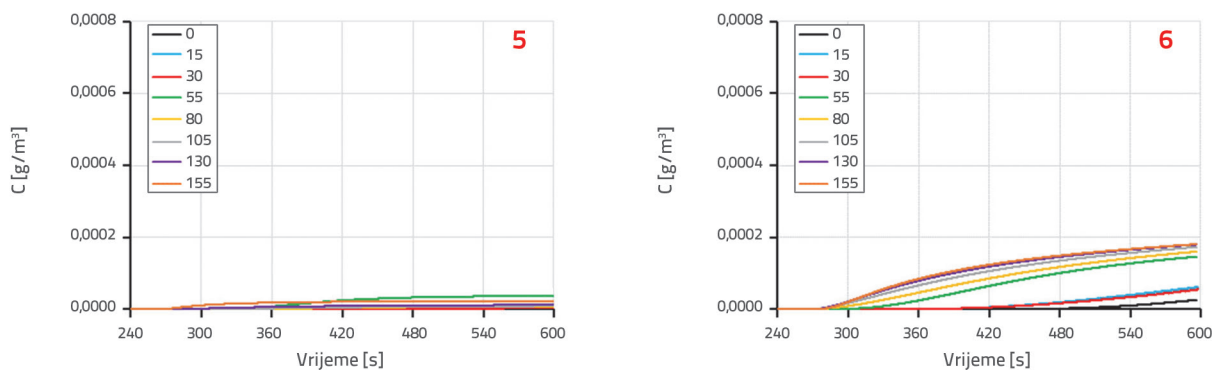


Slika 8. Polje koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom 0.0002 g/m³ i pripadnim poljem brzina za simulacije 5 i 6

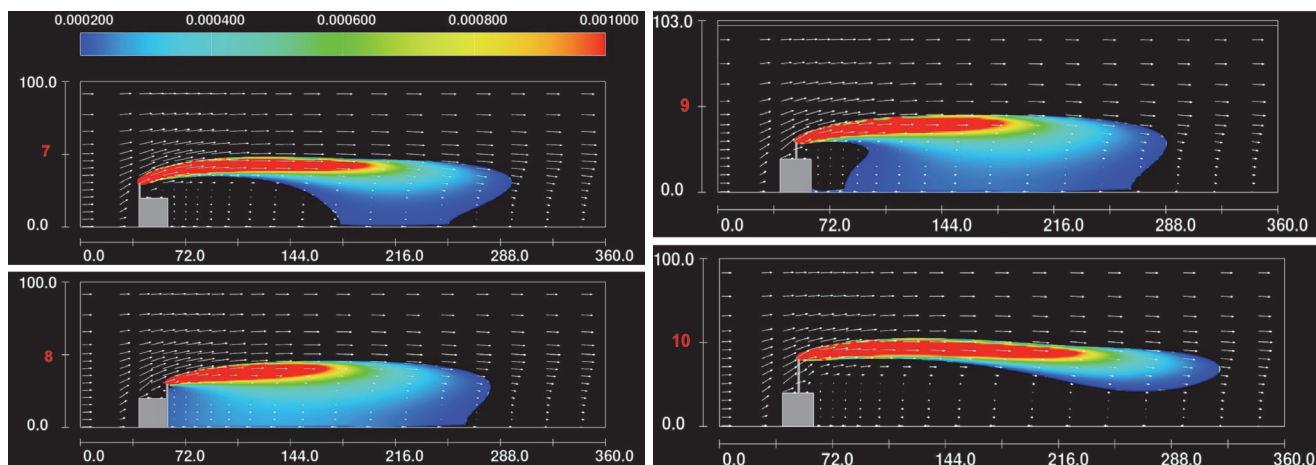
Za razmatranje potencijala mogućnosti c) napravljene su simulacije 7-11. U simulaciji 7 dimnjak je izveden s visinom 10 m iznad lijevog ruba "okolne" zgrade, u simulaciji 8 s visinom 10 m iznad desnog ruba "okolne" zgrade, a u simulaciji 9 s visinom 10 m u sredini "okolne zgrade (slika 10.). Na slici 11. prikazana je dinamika koncentracije onečišćenja na pozicijama receptora. Rezultati sa slika 10. i 11. pokazuju da bi rješenje s dimnjakom visine 10 m iznad lijevog ruba "okolne" zgrade (simulacija 7) zadovoljilo postavljeni kriterij graničnih koncentracija od 0,0002 g/m³. Treba obratiti pozornost na to da

djeluje li vjetar u suprotnom smjeru (NE – bura), onda rezultati simulacije 8 postaju relevantni umjesto rezultata simulacije 7, a čime je kriterij dopuštenih koncentracija onečišćenja ponovno prekoračen na analiziranim pozicijama receptora. Stoga je u simulaciji 9 dimnjak postavljen na sredini "okolne" zgrade, a rezultati provedene simulacije (slike 10. i 11.) pokazali su da na pozicijama receptora dolazi do prekoračenja dopuštenih koncentracija onečišćenja. Zbog toga je u simulaciji 10 dimnjak zadržan na sredini "okolne" zgrade, a visina mu je povećana na 20 m. Pripadni rezultati simulacije 10 pokazuju da je traženi kriterij graničnih koncentracija zadovoljen na svim pozicijama receptora. Nadalje, budući da slika strujanja iznad "okolne" zgrade ovisi o odnosu duljine i visine zgrade (b/a), provedena je simulacija 11 (b/a = 3), a rezultati provedene simulacije pokazuju da i u ovim uvjetima na analiziranim pozicijama receptora ne dolazi do prekoračenja graničnih koncentracija od 0,0002 g/m³ (slike 12. i 13.).

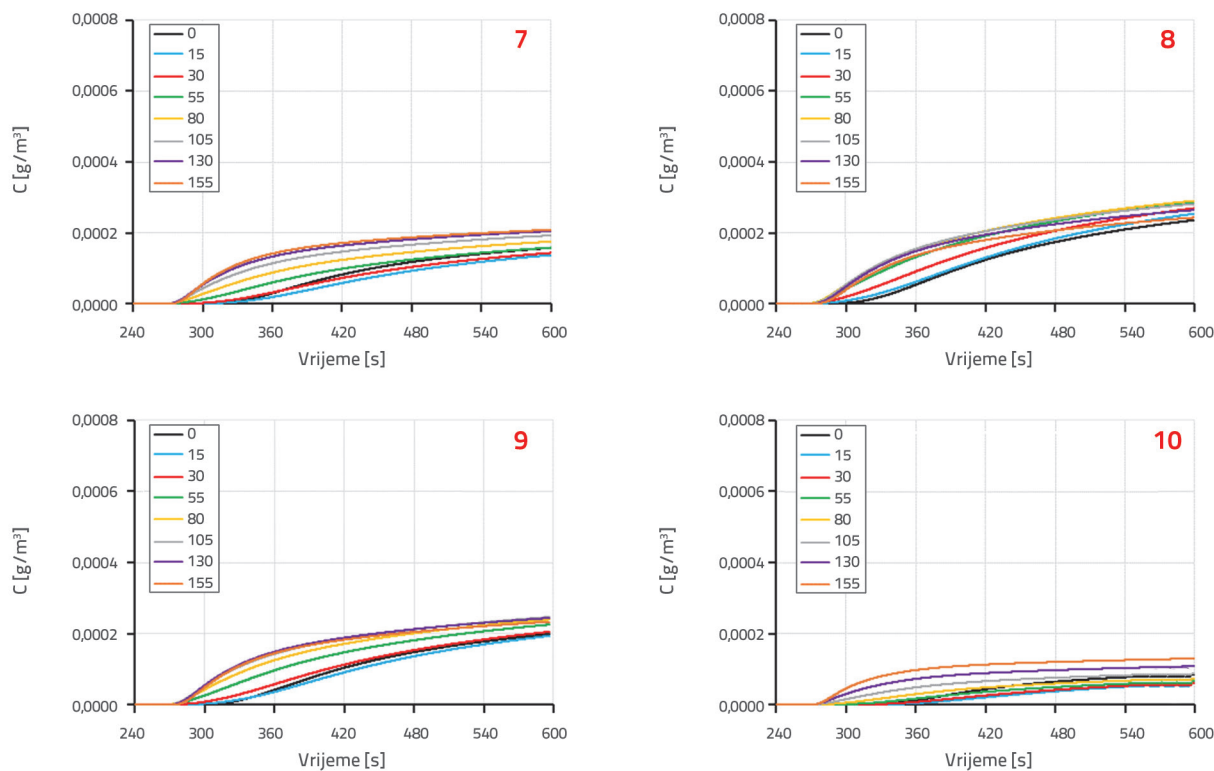
Simulacijom 12 analizirana je situacija s geometrijom koja aproksimira idejni projekt spalionice i dimnjaka u KBC-Rebro [23] (slika 2.). Rezultati simulacije prikazani su na slikama 12. i 13., a što jasno upućuje na nedostatnu visinu dimnjaka u projektnom rješenju. Prema rezultatima simulacija 5 i 6, visinu dimnjaka trebalo bi postaviti minimalno do 50 m iznad terena, odnosno 20 m iznad visine "okolne" (glavne) zgrade u KBC-Rebro. Rezultati dobiveni iz simulacija 13_1 pokazuju da povećanje brzine vjetra na 10 m/s rezultira suženjem i skraćenjem oblaka onečišćenja izraženog rubnom koncentracijom 0,0002 g/m³ u



Slika 9. Dinamika koncentracije onečišćenja (NO_2) na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade), na 2 m od terena (simulacije 5 i 6)

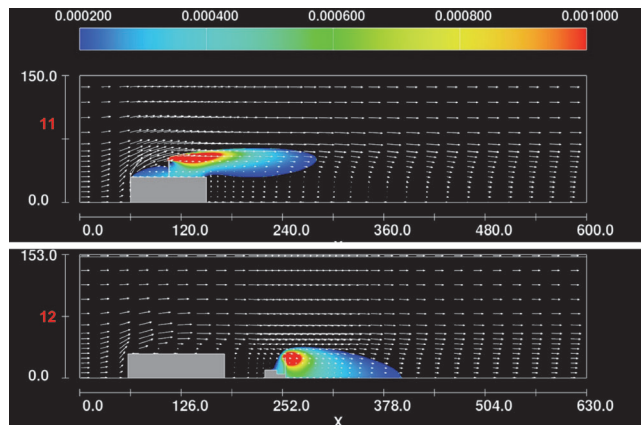


Slika 10. Polje koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom $0,0002 \text{ g/m}^3$ i pripadnim poljem brzina za simulacije 7, 8, 9, 10

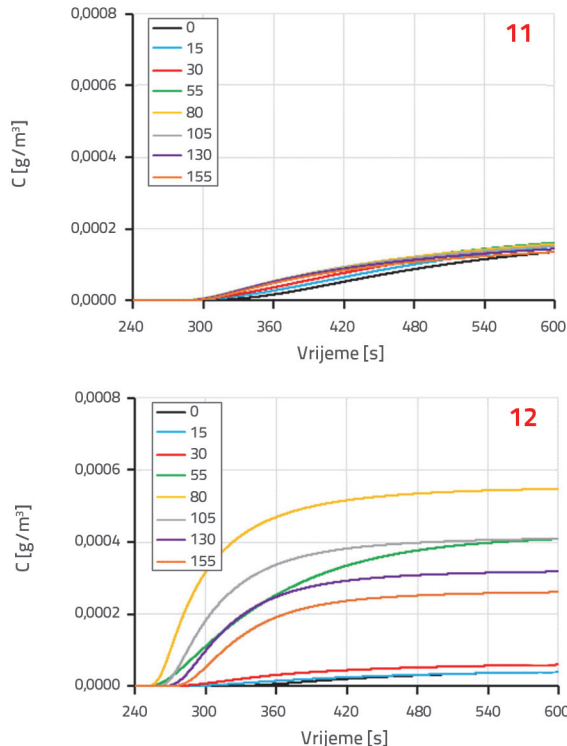


Slika 11. Dinamika koncentracije onečišćenja (NO_2) na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade), na 2 m od terena (simulacije 7-10)

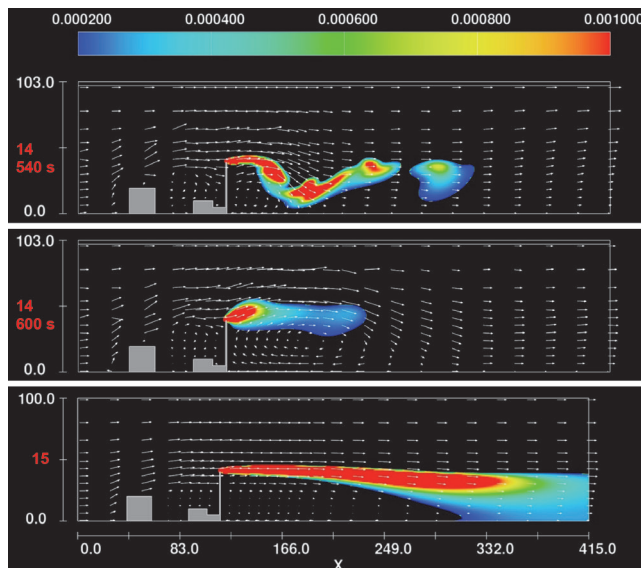
odnosu na oblak onečišćenja u simulaciji 5 s brzinom vjetera od 5 m/s. Osim toga, koncentracije na pozicijama receptora imaju bliske vrijednosti onima iz simulacije 5 (sve koncentracije manje od graničnih, rezultati nisu prikazani). S druge strane, smanjenje brzine vjetera na 2,5 m/s (simulacija 13_2) uzrokuje izraženije podizanje oblaka onečišćenja od vrha dimnjaka na samom mjestu upuštanja, a rubne linije oblaka onečišćenja su šire u odnosu na oblak onečišćenja u simulaciji 5 s brzinom vjetera od 5 m/s. Na pozicijama receptora koncentracije su onečišćenja vrlo bliske koncentracijama iz simulacije 5.



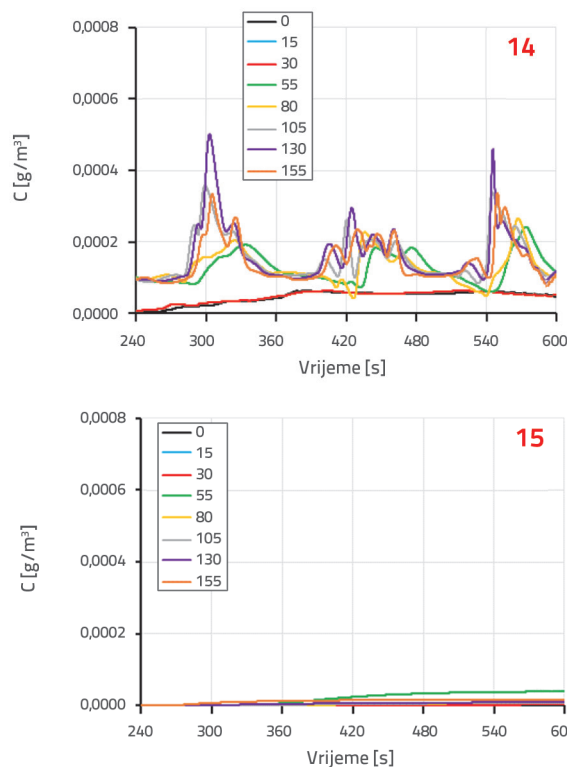
Slika 12. Polje koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom 0,0002 g/m³ i pripadnim poljem brzina za simulacije 11 i 12



Slika 13. Dinamika koncentracije onečišćenja (NO₂) na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m, 130 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade), na 2 m od terena (simulacije 11 i 12)



Slika 14. Polje koncentracije onečišćenja s rubnom koncentracijom 0,0002 g/m³ i pripadnim poljem brzina za simulacije 14 (u 540. sekundi i 600. sekundi simulacije) i simulaciju 15



Slika 15. Dinamika koncentracije onečišćenja (NO₂) na pozicijama receptora (0 m, 15 m, 30 m, 55 m, 80 m, 105 m i 155 m od desnog ruba "okolne" zgrade), na 2 m od terena (simulacije 14 i 15)

Simulacija 14 daje rezultate koji su posebno bitni u kontekstu sagledavanja utjecaja kratkoperiodične varijabilnosti brzine vjetera, kao realne karakteristike vjetera bure (NE smjer).

Rezultati prikazani na slikama 14. i 15. upućuju na oprez zbog značajnog povećanja koncentracije onečišćenja uokolo mjesta upuštanja (dimnjak) u odnosu na rezultate dobivene primjenom stacionarne brzine vjetra od 5 m/s u simulaciji 5.

Rezultati simulacije 15 (slike 14. i 15., povećani protok unosa efluenta za 100 %) pokazuju da na analiziranim pozicijama receptora još uvijek ne dolazi do prekoračenja graničnih koncentracija onečišćenja, no granične vrijednosti onečišćenja su prekoračene na većim udaljenostima od dimnjaka u smjeru djelovanja vjetra.

4. Zaključak

Provedene su numeričke simulacije širenja onečišćenja (NO_2) iz dimnjaka spalionice medicinskog otpada primjenom 3D numeričkog modela. U numeričkim analizama korišten je idealizirani infrastrukturni sustav koji se sastoji od jedne "okolne" zgrade, s varijacijom njene visine i duljine, te zgrade tipske spalionice s pripadnim dimnjakom (varijabilne visine). Također je analiziran i slučaj izvedbe dimnjaka na vrhu "okolne" zgrade. Podaci o upuštanju efluenta (onečišćenja) preuzeti su iz SUO za planiranu spalionicu medicinskog otpada na KBZ-Rebro (Zagreb). Promatrano je djelovanje vjetra u smjeru okomito na os zgrade, a podaci o brzini i smjeru vjetra usvojeni su na temelju obrade rezultata iz atmosferskog numeričkog modela Aladin-Hr za razdoblje 1992.-2001. Koncentracija (NO_2) je praćena na 2 m visine od horizontalnog terena.

Prepoznato je da geometrija "okolne" zgrade ispred spalionice uzrokuje pojavu tzv. "down-washing" i posljedično prekoračenje granične vrijednosti koncentracije NO_2 u zraku s obzirom na zaštitu zdravlja ljudi (prema Uredbi o razinama onečišćujućih

tvari u zraku, NN 77/20) na analiziranim pozicijama receptora. Rezultati provedenog istraživanja pokazali su da se u realnim okolišnim uvjetima visokog stupnja izgrađenosti visina dimnjaka uz spalionicu ne može odrediti samo po načelu $H_{\text{dimnjak}} = 2,5 \cdot H_{\text{spalionica}}$, te se preporučuje proračun s 3D numeričkim modelom u području bliske zone, s obuhvatom svih relevantnih okolnih infrastrukturnih elemenata (objekata). Konačno odluku o projektnoj visini dimnjaka moguće je donijeti upravo na temelju rezultata takvih predmetnih analiza (simulacija).

Budući da zone recirkulacije u poljima strujanja numeričkih simulacija imaju veće duljine od dobivenih mjerenjem na fizikalnim modelima zgrada u zračnom tunelu, u nastavku istraživanja planira se provedba numeričkih simulacija s primjenom drugih modela turbulencije (npr. "large eddy simulation").

Posebno je važno imati na umu da moderni uređaji za spaljivanje otpada, uključujući i one za spaljivanje medicinskog otpada, moraju raditi u strogo kontroliranim uvjetima rada (koji podrazumijevaju optimalanu količinu kisika/zraka, temperaturu, vrijeme zadržavanja i turbulenciju) te prisutnost pomoćnih uređaja za smanjenje neželjenih emisija iz postrojenja za spaljivanje otpada u okoliš. To obuhvaća vrećaste filtre koji se koriste za uklanjanje krutih čestica do ostalih uređaja koji najčešće uključuju različite izvedbe skrubera, elektrostatske taložnike (ESP) i druge uređaje. Principijelno, samo takav pristup može uistinu dovesti do učinkovite zaštite okoliša i smanjenje neželjenih emisija u okoliš.

Zahvala

Ovo istraživanje financirano je iz sredstava projekata Hrvatske zaklade za znanost (DOK-2020-01; DOK-2021-01).

LITERATURA

- [1] Kumar, P., Feiz, A.A., Ngae, P., Singh, S.K., Issartel, J.P.: CFD simulation of short-range plume dispersion from a point release in an urban like environment, *Atmospheric Environment*, 122 (2015), pp. 645–656, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.027>
- [2] Kumar, P., Singh, S.K., Ngae, P., Feiz, A.A., Turbelin, P.: Assessment of a CFD model for short-range plume dispersion: Applications to the Fusion Field Trial 2007 (FFT-07) diffusion experiment, *Atmospheric Research*, 197 (2017), pp. 84–93, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.025>
- [3] Mayer, H.: Air pollution in cities, *Atmospheric Environment*, 33 (1999) 24–25, pp. 4029–4037., [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2)
- [4] Bilinska, D., Skjøth, C.A., Werner, M., Kryza, M., Malkiewicz, M., Krynicka, J., Drzeniecka-Osiadacz, A.: Source regions of ragweed pollen arriving in south-western Poland and the influence of meteorological data on the HYSPLIT model results, *Aerobiologia*, 33 (2017) 3, pp. 315–326., <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9380-8>
- [5] Piroozmand, P., Mussetti, G., Allegrini, J., Mohammadi, M.H., Akrami, E., Carmeliet, J.: Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104059>
- [6] Temel, O., Bricteux, L., van Beeck, J.: Coupled WRF-OpenFOAM study of wind flow over complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 174 (2018), pp. 152–169, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.002>
- [7] Mahrt, L.: Surface wind direction variability, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50 (2011) 1, pp. 144–152, <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2560.1>
- [8] Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B. Peters, W.D., Brode, R.W.: AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION, Tech. Rep., 2004.

- [9] Shaughnessy P. T. O., Altmaier, R.: Use of AERMOD to determine a hydrogen sulfide emission factor for swine operations by inverse modeling, *Atmospheric Environment*, 2011, pp. 4617-4625, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.061>
- [10] Misra, A., Roorda, M.J., MacLean, H.L.: An integrated modelling approach to estimate urban traffic emissions, *Atmospheric Environment*, 73 (2013), pp. 81–91, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.013>
- [11] Said Baawain, M., Al-Mamun, M.A., Omidvarborna, H., Al-Jabri, A.: Assessment of Hydrogen Sulfide Emission from a Sewage Treatment Plant Using AERMOD, *Environmental Monitoring and Assessment* (2017.), pp. 1-11, <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5983-6>
- [12] Nakajima, K., Ooka, R., Kikumoto, H.: Evaluation of k-ε Reynolds stress modeling in an idealized urban canyon using LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175 (2018), pp. 213–228, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.034>
- [13] Zheng, M.H., Guo, Y.R., Ai, X.Q., Qin, T., Wang, Q., Xu, J.M.: Coupling GIS with CFD modeling to simulate urban pollutant dispersion, 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, *MACE 2010*, 08 (2010), pp. 1785–1788, <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536018>
- [14] Tominaga Y, Stathopoulos T.: Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES, *Building and Environment*, 45 (2010) 10, pp. 2231–2239, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.004>
- [15] Tominaga Y, Stathopoulos T.: CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques, *Atmospheric Environment*. 79 (2013), pp. 716–730, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.028>
- [16] Tominaga Y, Stathopoulos T.: Steady and unsteady RANS simulations of pollutant dispersion around isolated cubical buildings: Effect of large-scale fluctuations on the concentration field, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165 (2017), pp. 23–33, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.02.001>
- [17] Ricci, M., Patruno, L., Kalkman, I., de Miranda, S., Blocken, B.: Towards LES as a design tool: Wind loads assessment on a high-rise building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180 (2018), pp. 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.009>
- [18] Tominaga Y., Stathopoulos, T.: CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99 (2011) 4, pp. 340–348, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.005>
- [19] Tan, Z., Tan, M., Sui, X., Jiang, C., Song, H.: Impact of source shape on pollutant dispersion in a street canyon in different thermal stabilities, *Atmospheric Pollution Research*, 10 (2019) 6, pp. 1985–1993, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.005>
- [20] Perry, S.G., Heist, D.K., Brouwer, L.H., Monbureau, E.M., Brixey, L.A.: Characterization of pollutant dispersion near elongated buildings based on wind tunnel simulations, *Atmos. Environ.*, 142 (2016), pp. 286–295, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.052>
- [21] Snyder, W.H.: Stream line patterns around buildings deduced from wind-tunnel measurements, *International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD)*, London, Ontario, Canada, 2005.
- [22] Olesen, H.R., Berkowicz, R., Ketzler, M., Løfstrøm, P.: Validation of OML, AERMOD/PRIME and MISKAM Using the Thompson Wind-Tunnel Dataset for Simple Stack-Building Configurations, *Boundary-Layer Meteorol.*, 131 (2009), pp. 73–83, <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9355-9>
- [23] DVOKUT-ECRO d. o. o.: Studija o utjecaju zahvata na okoliš - Objekt za gospodarenje zaraznim medicinskim otpadom KBC-a Zagreb, 2022., 227 p.
- [24] Toja-Silva, F., Chen, J., Hachinger, S., Hase, F.: CFD simulation of CO₂ dispersion from urban thermal power plant: Analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169 (2017), pp. 177–193, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.015>
- [25] Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S., Bartzis, J.G.: Numerical investigation of the pollution dispersion in an urban street canyon, *Environmental Modelling and Software*, 21 (2006), pp. 525–531, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.08.012>
- [26] Toja-Silva, F., Pregel-Hoderlein, C., Chen, J.: On the urban geometry generalization for CFD simulation of gas dispersion from chimneys: Comparison with Gaussian plume model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177 (2018), pp. 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.003>
- [27] Goulart, E.V., Reis, N.C., Lavor, V.F., Castro, I.P., Santos, J.M., Xie, Z.T.: Local and non-local effects of building arrangements on pollutant fluxes within the urban canopy, *Building and Environment*, 147 (2019), pp. 23–34, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.023>
- [28] Tauer, A.: CFD Modeling of Aerial Dispersion of Pollutants in Urban Environments, Master's Thesis 658, 2021, 103 p. https://epublications.marquette.edu/theses_open/658 10.03.2023.
- [29] Yakhot, V., Smith, L.M. : The renormalization group, the ε-expansion and derivation of turbulence models, *J. Sci. Comput.*, 7 (1992), pp. 35–61. doi:10.1007/BF01060210
- [30] Saad, Y., Schultz, M.H: GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems, *SIAM Journal on Scientific and Statistical, Computing*, 7 (1986), pp. 856–869.
- [31] ASME: Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, *ASME. J. Fluids Eng.*, 130 (2008) 7:078001. doi:10.1115/1.2960953
- [32] Beychok, M.R.: *Fundamentals Of Stack Gas Dispersion* (4th ed.), 2005, author published. ISBN 0-9644588-0-2, 201 pp.
- [33] Briggs, G.A.: Discussion: chimney plumes in neutral and stable surroundings, *Atmos. Environ.*, 6 (1972), pp. 07–510.
- [34] Schulman, L.L, Strimaitis, D.G, Scire, J.S: Development and evaluation of the PRIME plume rise and building downwash model, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50 (2000) 3, pp. 378-390, <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464017>