



# Zeleni Akcioni Plan Kantona Sarajevo

Bosnia i Hercegovina

Studija o urbanim ventilacionim  
koridorima i uticaju visokih zgrada

Decembar 2019.

## Napomena

Ovaj dokument i njegov sadržaj pripremljeni su i namijenjeni isključivo kao informacija za Evropska banka za obnovu i razvoj (EBRD) i Kanton Sarajevo i za potrebe projekta: Zeleni akcioni plan Kantona Sarajevo koji se priprema po metodološkom okviru zelenih gradova EBRD-a. Projekat: Zeleni akcioni plan Kantona Sarajevo koji se priprema po metodološkom okviru zelenih gradova EBRD-a. Svi stavovi, mišljenja, pretpostavke, izjave i preporuke iskazani u ovom dokumentu pripadaju WS Atkins International Limited i ne odražavaju nužno službenu politiku ili stav Kantona Sarajevo. EBRD i Kanton Sarajevo ne prihvataju nikakvu odgovornost u pogledu bilo kakvih potraživanja od trećih strana direktno ili indirektno povezanih sa ulogom EBRD-a u odabiru i angažmanu ili praćenju rada WS Atkins International Limited, odnosno posljedicama korištenja i oslanjanja na usluge WS Atkins International Limited. Izradu ovog dokumenta je finansirala Vlada Japana uz provedbu putem EBRD-a.

WS Atkins International Limited ne prihvata odgovornost u odnosu na bilo koju stranu u pogledu ovog dokumenta, odnosno sadržaja istog, ili odgovornost koja je nastala iz istog ili je u vezi s njim.

Ovaj dokument ima 75 stranica, uključujući naslovnu stranicu.

### Historijat dokumenta

<i>Revidiran</i>	<i>Opis svrhe</i>	<i>Kreiran</i>	<i>Provjeren</i>	<i>Pregledan</i>	<i>Odobren</i>	<i>Datum</i>
1.1.	Nacrtr izvještaja	SMK, MuH	CGL	MH	SF	17.10.2019. godine
2.3.	Revidirani izvještaj	SMK, MuH	CGL, SMK	MH	SF	6.12.2019. godine

### Odobrenje korisnika

<i>Korisnik</i>	Evropska banka za obnovu i razvoj
<i>Projekat</i>	Zeleni akcioni plan Kantona Sarajevo – Studija o urbanim ventilacionim koridorima
<i>Broj zaduženja</i>	5183282
<i>Potpis korisnika / datum</i>	

# Sadržaj

## Poglavlje

## Strana

No table of contents entries found.

### Tabele

Tabela 3-1: Strategije kontrole i upravljanja planiranjem ventilacionih koridora u gradu Chengdu [7] 13

### Slike

Slika 3.1: Primjeri novih građevinskih objekata u Hong Kongu sa otvorom u sredini [6]	12
Slika 3.2: Lokacija urbanog zelenog pojasa i grafički prikaz vodnog sistema u gradu Guiyang [8]	14
Slika 3.3: Potencijalni urbani ventilacioni koridori zelenih područja (a) vodni sistem (b) i saobraćajna mreža u gradu Guiyang [8]	15
Slika 3.4: Nizvodno strujanje zraka duž ventilacione ose slobodno je od građevina na području Unterer Grund, Stuttgart-Vaihingen [10]	15
Slika 3.5: Najvažniji putevi strujanja zraka (šematski prikaz)	17
Slika 3.6 - Najvažniji putevi strujanja zraka (grafički prikaz na satelitskom snimku)	17
Slika 3.7: Različita visina zgrada u dijelu radi bolje cirkulacije zraka [5]	18
Slika 3.8: - Više blokova zgrada različite visine sa prikazom cirkulacije zraka [5]	18
Slika 3.9: Tipičan primjer promjenjive visine zgrada na jednoj lokaciji [11]	18
Slika 3.10: Šematski prikaz otvora na zgradi Hysan Palace [12]	19
Slika 3.11: Otvor u sredini zgrade i primjer razvoja Kai Tak [12]	19
Slika 3.12: - Grafički prikaz propusnosti strujanja zraka kroz otvor [12]	20
Slika 3.13: Strujanje vjetra oko pravougaone i cilindrične zgrade [13]	20
Slika 3.14: Pogled na Gherkin i model strujanja zraka oko ove zgrade [14]	21
Slika 3.15: Pravilan oblik podijuma za dobru cirkulaciju zraka [5]	21
Slika 3.16 - Neprimjeren oblik podijuma za dobru cirkulaciju zraka	21
Slika 3.17: Projekat planiranog tornja u Šangaju sa stepenastim podijumom [16]	22
Slika 3.18: Širina prostora oko zgrade [18]	22
Slika 3.19: Strujanje zraka između zgrada u kompleksu Kai Ching, Hong Kong, Kina [12]	23
Slika 3.20: Šematski prikaz povezivanja otvorenih prostora [5]	24
Slika 3.21: Širina kolnika i prostora oko zgrade i propusnost zgrade, putevi strujanja zraka, otvoreni prostori (povezanost ventilacije zraka) i zelenilo [19]	24
Slika 3.22: Šematski prikaz pravilne i nepravilne orijentacije ulice [5]	25
Slika 4.1: Zagađujuće tvari iznad grada Sarajeva kao posljedica temperaturne inverzije [23]	26
Slika 4.2: Broj dnevnih prekoračenja granične vrijednosti za PM10 (>50 µg/m <sup>3</sup> ) [24]	27
Slika 4.3: Broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti za SO <sub>2</sub> (>125µg/m <sup>3</sup> ) [24]	27
Slika 4.4: Broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti za NO <sub>2</sub> (>85 µg/m <sup>3</sup> ) [24]	28
Slika 4.5: Pregled srednjih dnevnih koncentracija PM <sub>10</sub> na mjernoj stanici Otoka u 2018.g. (ug/m <sup>3</sup> ) [24]	28
Slika 5.1: Regulacioni plan Gradski centar "Marijin Dvor" [46]	30
Slika 5.2: Novi objekti planirani u Regulacionom planu "Stup-Nukleus". [47]	31
Slika 5.3: Primjeri nebodera u naselju Hrasno [48]	31
Slika 5.4: Satelitski snimak naselja Dobrinja kao primjer dobre povezanosti otvorenih prostora [49]	32
Slika 5.5: Blokovi visokih zgrada u naselju Alipašino Polje [50]	32
Slika 5.6 - Blokovi visokih zgrada na Stupu [51]	32
Slika 5.7: Primjeri nekih zgrada u naselju Čengić Vila	33
Slika 5.8: Avaz Twist Tower [52]	33
Slika 5.9: Primjeri tipični ravnih zgrada u Kantonu Sarajevo	33
Slika 5.10: Bosmal City Centre	34

Slika 5.11: Prikaz rastojanja između prednjeg dijela zgrade i regulacione linije na primjeru zgrade Parlamenta BiH [53]	34
Slika 5.12: - Prikaz rastojanja na primjeru Alta Shopping Centra [54]	35
Slika 5.13: Urbani parkovi u Kantonu Sarajevo [55]	35
Slika 5.14: Zelena polja i površine u području Alipašino Mosta i Stupa [56]	36
Slika 9.1: Šematski prikaz dinamike strujanja oko jedne niske zgrade (Izvor: Od [43] izmjene [44])	54
Slika 9.2: Polje brzine strujanja u istočnom dijelu Sarajeva za referentnu brzinu 1,8m/S	55
Slika 9.3: Polje brzine strujanja na koridoru Miljacka i formiranje koridora 'Glavna cesta'	56
Slika 9.4: Polje brzine strujanja oko četiri velike zgrade na koridoru 'Glavna cesta'	56
Slika 9.5: Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na y=102 m (desno) trenutnog polja brzine za postojeći raspored zgrada	57
Slika 9.6: - Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na y=102 m (desno) trenutnog polja brzine za raspored zgrada utvrđen regulacionim planom	57
Slika 9.7: – Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na y=102 m (desno) trenutnog polja brzine za prilagođeni raspored zgrada	57
Slika 9.8: Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u postojećem rasporedu zgrada	58
Slika 9.9: - Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u rasporedu zgrada prema regulacionom planu	58
Slika 9.10: - Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u prilagođenom rasporedu zgrada	58
Slika 9.11: Iso površina trenutne koncentracije zagađujućih tvari za postojeći raspored zgrada	59
Slika 9.12: Iso površina trenutne koncentracije zagađujućih tvari za raspored zgrada prema regulacionom planu	59
Slika 9.13: Trenutno polje zagađujuće tvari u vertikalnoj ravni za postojeći raspored zgrada	59
Slika 9.14: Trenutno polje zagađujuće tvari u vertikalnoj ravni za raspored zgrada prema regulacionom planu	59
Slika 10.1: Primarni i sekundarni ventilacioni koridori	61
Slika 10.2: Zeleni koridor duž glavne saobraćajnice	62
Slika 10.3: Granice zelenog koridora Kozija ćuprija – Bentbaša	63
Figure A.1: Askervein Hill view (left) and topographic map with measurement lines (right). (adapted from [64])	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.2: Results showing $\Delta S$ along line A (upper) and line AA (lower).	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.3: Results showing the normalised turbulent kinetic energy $k^*$ along line A (upper), and line AA (lower)	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.4: Vertical profiles of the fractional speed-up ratio ( $\Delta S$ ) (right), and normalised turbulent kinetic energy $k/U_{10}^2$ (left) at the HT	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.5: Vertical profiles of the fractional speed-up ratio ( $\Delta S$ ) (right), and normalised turbulent kinetic energy $k/U_{10}^2$ (left) at the CP	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.6: Computational grid of the whole domain for Goettinger Strasse, top view	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.7: Google Maps screenshot of Goettinger Strasse from 2019 with contours of the buildings and simplified geometry used in this work	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.8: Streamlines along the centre of Goettinger Strasse showing complex flow pattern.	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure A.9: Current simulation results for the non-dimensional air pollution at the measuring	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Skraćenice

Skraćenice	Opis
BDP	bruto domaći proizvod
BiH	Bosna i Hercegovina
C	trenutne koncentracije zagađujuće tvari
CFD	računska dinamika fluida (eng. Computational Fluid Dynamics)
CO <sub>2</sub>	ugljendioksid
CO <sub>2e</sub>	ekvivalent ugljendioksida
CP	centralna tačka (eng. Centre point)
CŽZ	crveno, žuto, zeleno
EBRD	Evropska banka za obnovu i razvoj
ESE	istok-jugoistok
EU	Evropska unija
FBiH	Federacija Bosne i Hercegovine
g/(km <sup>2</sup> h)	grama po kvadratnom kilometru po satu
GBP	građevinska bruto površina
GIS	Geografski informacijski sistem
GUP	Generalni urbanistički plan
HT	Hilltop
k	turbulentna kinetička energija
K/km	Kelvina po kilometru
kg	kilogram
Ki	koeficijent iskoristivosti građevinske čestice
KM	konvertibilna marka, valuta BiH
km <sup>2</sup>	kvadratni kilometar
KS	Kanton Sarajevo
LES	Large Eddy Simulation
L <sub>R</sub>	dužina recirkulacijskog mjehurca
m	metar
m/s	metara po sekundi
MPI	Message Passing Interface
mt	megatona
MVTEO	Ministarstvo vanjske trgovine i ekonomskih odnosa BiH
MWh	megavat sat
MWt	megavat toplinske snage
NLÖ	Državna agencija za ekologiju Donje Saksonije
NO <sub>x</sub>	azotni oksidi
NW-SE	sjeverozapad-jugoistok
°C	stepeni celzijusa
OpenFOAM	Open source Field Operation and Manipulation
Pi	procenat izgrađenosti
PM	čestična tvar (eng. particulate matter)

PPGS	Prostorni plan Grada Sarajeva
PPKS	Prostorni plan Kantona Sarajevo
PSO	pritisak-stanje-odgovor
PZ	projektni zadatak
$Q_e/W$	Source strength per metre
RANS	Reynolds-Average Navier-Stokes
RS	referentna lokacija
SG	staklenički gas(ovi)
SMG	stručna grupa za modeliranje (eng. Specialist Modelling Group)
$SO_x$	sumporov oksid
SZO	Svjetska zdravstvena organizacija
T-flows	Turbulent flows
TOD	tranzicijski razvoj ( eng. Transit-oriented Development)
TRAPOS	optimizacija metode modeliranja zagađenja od saobraćaja na ulicama
TU Delft	Tehnički univerzitet Delft
UPGS	Urbanistički plan Grada Sarajeva
$U_{ref}$	izmjerena referentna brzina
W	zapad
$W_c$	širina bočnog vjetra
ZAP KS	Zeleni akcioni plan Kantona Sarajevo
$Z_o$	visina hrapavosti
$\mu g/m^3$	mikrogram po kubnom metru

## Izvršni sažetak

Ova Studija o urbanim ventilacionim koridorima i uticaju visokih zgrada pripremljena je u okviru projekta Zeleni akcioni plan Kantona Sarajevo. Najvažniji ciljevi ove studije su:

- Provođenje analize mogućeg uticaja na protok i kvalitet zraka u sarajevskoj kotlini formiranjem novih ventilacionih koridora za vjetar.
- Identifikacija područja/koridora na kojima bi trebalo ograničiti gradnju visokih zgrada kako bi se poboljšali protok i kvalitet zraka u cijeloj kotlini.

Studija o strujanju vjetra i nivou zagađenosti s tim u vezi provedena je u cijeloj sarajevskoj kotlini korištenjem računске dinamike fluida (CDF) pri čemu su za modeliranje terena i vremenskih uslova korišteni podaci iz GIS-a<sup>1</sup> i meteorološki podaci.

U studiji su identificirana dva glavna ventilaciona koridora koja su nazvana prema njihovim topografskim svojstvima: Miljacka i 'Glavna cesta'. Oba su orijentirana u pravcu istok-zapad. Zračni koridor Miljacka određen je riječnim tokom rijeke Miljacke. Proteže se iz pravca istoka sa mjesta na kojem rijeka Miljacka ulazi u grad (na Bentbaši) do zapadnog dijela grada gdje formira meandar (na lokaciji Halilovići). Koridor 'Glavna cesta' formiran je duž glavne saobraćajnice koja povezuje istočne i zapadne dijelove grada. Koridor se prostire od Marijin Dvora na istoku do lokacije Stupska Petlja na Zapadu. Intenzitet vjetra duž koridora također varira u smislu vremena i prostora, pod uticajem složene interakcije strujanja zraka i objekata u blizini koridora.

Pored ova dva glavna koridora, identificirano je nekoliko dodatnih zračnih koridora na lokalnom nivou. Ovi lokalni koridori su znatno kraći od glavnih koridora, ali mogu imati važnu ulogu u snabdijevanju grada svježim zrakom. To su koridor Južna longitudinala koji se poklapa sa cestom Južna longitudinala, koju određuju sljedeće ulice: Zagrebačka, Grbavička i Zvornička, Sjeverna longitudinala, Alipašina ulica (koja se nalazi unutar zelenog pojasa), ulice Ante Babića i Ive Andrića (u naselju Alipašino Polje).

Zaključak studije je da prisustvo visokih zgrada u blizini koridora umanjuje propusnost vjetra, što opet umanjuje dotok svježeg zraka u koridore. Pored toga, recirkulacijske zone u pozadini zgrada usporavaju strujanje zraka ukoliko pozadina zgrada zadire u koridore. Iz ovog razloga su predložene mjere usmjerene na zaštitu postojećih pravaca kojima se koridori snabdijevaju zrakom, kao i sprečavanje negativnog uticaja novih zgrada na strujanje zraka koridorima.

S ciljem zaštite ventilacionih zračnih koridora u Sarajevu, preporučuju se sljedeće mjere:

- Sprečavanje gradnje novih zgrada u zoni od 20m od obale rijeke Miljacke i ruba glavne saobraćajnice s obje strane koridora.
- Ograničavanje visine zgrada na 20m (P+6) u zoni od 200m s obje strane glavnih ventilacionih koridora.
- Maksimalni koeficijent izgrađenosti  $\leq 1$ .
- Primjena tehničkih smjernica za prostorno planiranje i projektovanje objekata s ciljem poboljšanja strujanja zraka.
- Sprečavanje izgradnje duž koridora Alipašina ulica-Skenderija u zoni od 20m na desnoj strani ceste. Sprečavanje gradnje na površinama parka na lijevoj strani ceste.
- Sprečavanje gradnje novih zgrada u zoni od 20m s obje strane Južnog koridora.
- Sprečavanje gradnje novih zgrada na površini od 30m s obje strana ventilacionih koridora Alipašino Polje 1 i Alipašino Polje 2.

Za unapređenje ventilacionih karakteristika Kantona Sarajevo i ublažavanje efekta toplotnih ostrva, zelene koridore treba formirati spajanjem i unapređenjem sljedećih zelenih površina:

- Kozija Čuprija – Bentbaša.

<sup>1</sup> Geografski informacioni sistem



- Na sjevernoj strani koridora 'Glavna cesta' od Velikog parka do Malog parka - Hastahana.
- Ozeljenjavanje dvorišta u ulicama Dolina, Fra Anđela Zvizdovića i Kralja Tvrtka.
- Ozeljenjavanje trga uz ulicu Fanca Lehara.
- Očuvanje i modernizacija postojećih parkovskih površina između ulica Kalemova i Kranjčevićeva.
- Ozeljenjavanje Kampusa univerziteta od ulice Halida Kajtaza i Hamdije Čemerlića.
- Revitalizacija i ozeljenjavanje trga ispred Željezničke stanice i zgrade BH Pošte.
- Očuvanje postojećih parkovskih površina i zelenih trgova u području povezanom ulicama Zmaja od Bosne i Kolodvorska s jedne strane i Ložionička i Hemdije Čemerlića s druge.



# 1. Uvod

Gradovi širom svijeta se suočavaju sa problemima urbane zagađenosti i lošeg kvaliteta zraka izazvanih ljudskim aktivnostima. Vrlo često konfiguracija terena i meteorološki/vremenski uslovi dodatno pogoršavaju situaciju. Sarajevo se već dugi niz godina suočava sa problemom lošeg kvaliteta zraka zbog veoma izraženog prisustva tri najvažnija uzročnika ovog stanja, a to su opsežne emisije zagađujućih tvari izazvane ljudskim aktivnostima (saobraćaj, zagrijavanje stambenog prostora i industrija), grad se nalazi u kotlini okružen brdima i planinama, i na kraju, česta je pojava epizoda temperaturne inverzije, naročito tokom zimskog perioda. Situacija se pogoršala u protekloj deceniji uslijed sve izraženijeg trenda urbanizacije i gradnje visokih zgrada uz glavne ventilacione pravce koje ometaju dotok svježeg zraka i umanjuju prirodnu ventilaciju. U ovoj situaciji je očuvanje zračnih koridora postalo najvažniji prioritet za gradske čelnike. Studija je usmjerena na identifikaciju glavnih pravaca kojima bi se svjež zrak mogao transportovati u grad u uslovima uobičajenog strujanja i intenziteta vjetera, te na ispitivanje uticaja prisustva visokih zgrada na ventilacione zračne koridore i nivo zagađenosti u gradu.

Shodno tome, najvažniji ciljevi ove studije su:

- Provođenje analize mogućeg uticaja na strujanje i kvalitet zraka kroz sarajevsku kotlinu formiranjem novih ventilacionih koridora; i
- Identifikacija područja/koridora na kojima bi trebalo ograničiti gradnju visokih objekata kako bi se poboljšalo strujanje i kvalitet zraka u cijeloj kotlini.

Studija strujanja vjetera i nivoa zagađenosti u cijeloj sarajevskoj kotlini provedena je korištenjem metode kompjuterske dinamike fluida (CFD) Provedeni proračuni su terenskog tipa, što znači da su proračun brzine strujanja zraka, temperature i koncentracije zagađujućih tvari provedeni istovremeno i interaktivno u trodimenzionalnom vremenski zavisnom prostoru na računarskim mrežama koje osiguravaju željenu rezoluciju vremena i prostora za prognoziranje vremenske evolucije disperzije zagađujućih tvari na cijelom domenu rješenja. Teren je modeliran korištenjem podataka iz GIS-a<sup>2</sup> dok su početni uvjeti i granični uvjeti definirani korištenjem meteoroloških podataka. Ulazne podatke osigurale su sljedeće institucije Kantona:

- Zavod za javno zdravstvo,
- Zavod za planiranje razvoja Kantona Sarajevo i
- Federalni hidrometeorološki zavod.

Provođenje Studije je trajalo šest mjeseci, od marta 2019. do septembra 2019. godine.

Ovaj dokument je strukturiran na osnovu Projektnog zadatka (PZ):

- 1. poglavlje: Uvod
- 2. poglavlje: Urbani ventilacioni koridori
- 3. poglavlje: Pregled najbolje prakse zaštite urbanih ventilacionih koridora
- 4. poglavlje: Historijat problema zagađenosti zraka u Kantonu Sarajevo
- 5. poglavlje: Osnovne informacije o trendovima urbanizacije u Kantonu Sarajevo
- 6. poglavlje: Metodologija utvrđivanja urbanih ventilacionih koridora
- 7. poglavlje: Iscrpni podaci o proračunima
- 8. poglavlje: Identifikacija postojećih zračnih koridora i njihove karakteristike
- 9. poglavlje: Uticaj visokih zgrada na zračne koridore i nivo zagađenosti
- 10. poglavlje: Zaključci i preporuke

U Dodatku 1 su podaci o dva standardna referentna slučaja u kojima je korištena metodologija CFD i u provedeni proračuni s ciljem ispitivanja tačnosti i pouzdanosti numeričkih metoda, modela turbulencije i CFD koda korištenih u ovoj studiji.

<sup>2</sup> Geografski informacioni sistem

## 2. Urbani ventilacioni koridori

### 2.1. Uvod

Trenutno, više od 50% ukupnog stanovništva živi u gradovima. Uz kontinuirano širenje urbanih prostora, dolazi do povećanja opterećenja grada, opada kvalitet urbane sredine, a zagađenost zraka postaje sve ozbiljniji problem. Gradovi širom svijeta se trenutno suočavaju sa problemom zagađenosti zraka, koja je uglavnom posljedica emisija iz industrije, saobraćaja i domaćinstava. Slaba cirkulacija zraka dodatno pojačava uticaj ovih emisija. Sve je veća zabrinutost u pogledu kvaliteta okoliša i osjećaja ugone u gradovima s obzirom na ubranu urbanizaciju i porast urbanog stanovništva širom svijeta, posebno kad je riječ o problemima toplinskog opterećenja i zagađenosti zraka u gradovima. Međutim, osjećaj nelagode se u dobro prozračenom gradu može smanjiti na minimum, budući da proces ventilacije smanjuje temperaturu u okruženju i poboljšava toplinsku ugodnost, te uklanja zagađujuće tvari i unapređuje kvalitet zraka u urbanoj sredini.

Za ubranu širenje turbulencije zagađivača i jačanje urbanog ekološkog kapaciteta važan je povoljan režim vjetera u urbanoj sredini. Iz ovog razloga je ideja o provođenju studije o urbanim ventilacionim koridorima (tj. zračnim tunelima, zračnim kanalima) radi rješavanja problema ventilacije vremenom sve više privlačila pažnju istraživača širom svijeta, koji vjeruju da mogu koristiti puteve strujanja vjetera u urbanom prostoru za unapređenje kvaliteta zraka i ublažavanje efekta toplinskog ostrava, te smanjenje zagađenosti zraka.

### 2.2. Pregled literature

Koncept 'urbanih ventilacionih koridora' (poznatih kao 'koridori vjetera' potekao je od njemačke riječi "Ventilationbahn" [1]. U Smjernicama koje su u Njemačkoj donesene na nivou države pod nazivom 'Meteorološke, klimatološke i mape zagađenosti sa okolišnim aspektom za gradove i regije (VDI 3787-Dio 1)' ovi koridori su nazvani 'ventilacione trake' i data je jasna i opširna definicija, a to je 'područje poželjnog opsežnog strujanja zraka blizu tla zahvaljujući pravcu, prirodni i širini površine. "Ventilacioni koridori su putevi za usmjeravanje zraka, također nazvani putovi za prozračivanje, namijenjeni su olakšavanju horizontalnih procesa izmjene zraka pomoću niske hrapavosti (bez visokih zgrada, samo vegetacija), pravolinijska ili blago zakrivljena sa relativno velikom širinom (ukoliko je moguće više od 50 m).."[2].

Najveći izazov za donosiocce odluka i rukovodiocce u organima uprave je efikasno poboljšanje kvaliteta zraka, smanjenje izmaglice i ublažavanje efekta toplinskih ostrva planiranjem urbanih ventilacionih puteva. Cilj je da se spriječi pogoršanje urbanog režima vjetera nekontroliranim širenjem urbanih područja [3].

Brojni dokumenti politika i mjera na nivou politika su pokazali da države i lokalni organi u gradovima stavljaju naglasak na zaštitu okoliša i ekološki oporavak uvođenjem klimatskih procjena urbanih sredina u prakse planiranja i projektovanja. Zahvaljujući tome, mnoge zemlje i gradovi širom svijeta aktivno rade na pripremi planova za urbane ventilacione koridore. Između ostalih, Njemačka koja je najranije počela provoditi istraživanja u ovoj oblasti, dok je Kina trenutno jedna od zemalja sa najvećim brojem gradova koji provode ovakva istraživanja. Regija Štutgarta je svoj prvi Klimatski atlas objavila 1992.g. Najnoviji Klimatski atlas iz 2008.g. kojim upravlja Odjeljenje za urbanu klimatologiju (Ured za zaštitu okoliša) obuhvata cijelu regiju Štutgarta i sadrži iscrpne podatke o koncentraciji zagađujućih tvari i protoku hladnog zraka [4]. Sektor za planiranje Vlade Hong Konga započeo je i proveo Sudiju o procjeni ventilacionih koridora u 2006. godini. Generalni urbanistički plan grada Chengdu obuhvatio je provedbu Studije o uspostavljanju urbanih ventilacionih koridora kao i usvajanje Strategija za planiranje i kontrolu ventilacionih koridora.

Metode i standardi istraživanja usmjerenog na određivanje ventilacionih koridora su različite kao i njihova realizacija, a rezultati su često nezadovoljavajući. Grupa istraživača iz Centra za urbanu meteorologiju Pekinške meteorološke službe i Kineskog univerziteta u Hong Kongu i projektanti iz Kineske akademije za urbanističko planiranje i projektovanje i Pekinške akademije za urbanističko planiranje i projektovanje izradili su Tehničke smjernice za urbane ventilacione koridore u kojim se preporučuje metodologija rada u tri koraka.

- 1. korak je usmjeren na pribavljanje naučnih saznanja o karakteristikama lokalne urbane klime i ocjeni moguće dinamike vjetra izgrađenih područja. Što se tiče samih zadataka, oni uključuju prikupljanje preporučenih podataka (evidencija o meteorološkim podacima za period od 30 godina, informacije o visina zgrada i tlocrtnom otisku zgrade) te analizu koja je usmjerena na četiri najvažnija aspekta, a to su karakteristike prirodnog režima vjetra, lokalnog režima vjetra u okruženju ciljanih gradova, prostorni raspored urbanih toplotnih ostrva i moguća dinamika vjetra u izgrađenim područjima u nivou kretanja pješaka.
- 2. korak je usmjeren na formiranje urbanih ventilacionih koridora i izradu odgovarajućih mjera kontrole. Ovaj korak se sastoji iz tri dijela: 1) načela razvoja urbanih ventilacionih koridora; 2) prijedlozi za razvoj urbanih ventilacionih koridora i 3) mjere upravljanja i kontrole urbanim ventilacionim koridorima.
- 3. korak je usmjeren na izradu preporuka za planiranje i projektovanje, koje bi trebale obuhvatiti četiri zadatka, uključujući pripremu planova funkcionalnih područja, pripremu planova kompenzacijskih područja, preporuke za plan rasporeda žarišnih područja, i izradu sistema upravljanja planovima zoniranja na osnovu ocjene klimatskog uticaja.

Gradovi Guiyang u Kini i Vroclav u Poljskoj također su proveli studije o uspostavljanju ventilacionih koridora, u kojima je utvrđeno kako se vodni sistemi, otvorene i zelene površine mogu koristiti za proširenje i unapređenje ventilacionih koridora. Neke mjere uključuju prilagođavanje arhitekture blokova zgrada radi boljeg strujanja zraka, kao i zabranu gradnje na nekim mjestima (javne zelene površine, doline, urbani parkovi i zelene površine duž rijeka) koja su izvor svježeg zraka. Rezultati studije provedene za Hong Kong pokazali su da parkovi, kao što su zelene površine, ne samo da smanjuju toplinsko opterećenje u urbanim područjima nego osiguravaju prostor za ventilaciju zraka.

Najvažniji faktori koji utiču na urbanu ventilaciju su vegetacija, arhitektonski raspored objekata, topografija i raspored cestovne infrastrukture. Na zelenim površinama ne gustina izgrađenosti niska, što doprinosi boljoj ventilaciji. Ove površine mogu doprinijeti relativno značajnim razlikama u temperaturi unutar grada i formirati regionalni vjetar i cirkulaciju zraka. Sastavni dio planiranja urbanih ventilacionih koridora je racionalna kontrola planiranja visine zgrada i gustine izgrađenosti, kao i oblika ulica unutar grada.

## 3. Pregled najbolje prakse u zaštiti urbanih ventilacionih koridora

U nekoliko gradova širom svijeta je problem zagađenosti zraka riješen realizacijom urbanih ventilacionih koridora. Na osnovu rezultata simulacija i modeliranja, u većini ovih gradova su se opredijelili na uvođenje mjera zaštite i formiranja koridora putem urbanističkog planiranja, projektovanja zagrada, povećanja zelenih površina i zaštite vodnih koridora. U ovom dijelu teksta su opisane neke od ovih studija.

### 3.1. Hong Kong

Sa populacijom od 7.061.200 stanovnika, Hong Kong je jedan od gradova sa najvećom gustinom naseljenosti u svijetu. Prostorno uređenje grada Hong Kong u 20. vijeku karakteriziraju intenzivna izgradnja visokih, zbijenih kompleksa zgrada koje se naslanjaju jedna na drugu. Zgrade naslonjene jedna na drugu prekinule su cirkulaciju zraka i blokirale pogled. Početkom 21. vijeka, zagađenost zraka u Hong Kongu je porasla do opasnih razmjera i počela uticati na zdravlje građana, što je primoralo investitore i gradske vlasti da traže rješenje. Odjel za razvoj je 2005.g. objavio izvještaj, Sudiju izvodljivosti o uspostavljanju sistema procjene ventilacije zraka [5]. Ovo je dovelo do izrade nekoliko smjernica o ventilaciji zraka za projekte izgradnje objekata koje finansira vlada. Sada se za odobravanje gradnje građevinskih objekata često postavlja uslov da se između pojedinih zgrada ostavi prazan prostor. Ukoliko nema dovoljno prostora za rastojanje između zgrada, u mnogim slučajevima se formira otvor u sredini zgrade.(vidi primjer na Slika 3.1).

**Slika 3.1: Primjeri novih građevinskih objekata u Hong Kongu sa otvorom u sredini [6]**



### 3.2. Grad Chengdu

Chengdu je grad koji se nalazi u centralnom dijelu Kine. Grad ima populaciju od oko 11.000.670 stanovnika, a površina grada je 12.390,25 km<sup>2</sup>. Ventilaciju na nižim visinama u gradu često ometaju jedinstvena topografija i prirodne klimatske karakteristike. U 2015.g. je o ovom gradu pokrenuta "Studija o uspostavljanju urbanih ventilacionih koridora i izradi strategija planiranja". Studija je također pomogla u izradi "Generalnog urbanističkog plana grada Chengdu (2016.-2035.)". U Planu je propisano da "plan grada treba biti usklađen sa režimom vjetra i strujanjem lokalnog vjetra". Urbani ventilacioni koridori su formirani putem ekoloških tampon zona, zelenih pojaseva, cesta, rijeka, parkova i zelenih površina. U Planu je identificirano šest glavnih i 26 sekundarnih urbanih ventilacionih koridora u centru grada i novim područjima razvoja istočno. Urbanistička rješenja i arhitektura zgrada će biti predmet strogih kontrola. Predložene strategije usmjerene na kontrolu i upravljanje urbanim ventilacionim koridorima u gradu Chengdu navedeni su u Tabela 3-1.

**Tabela 3-1: Strategije kontrole i upravljanja planiranjem ventilacionih koridora u gradu Chengdu [7]**

	Glavni ventilacioni koridori	Sekundarni ventilacioni koridori
<b>Sastav</b>	Otvoreni zeleni prostori koji se sastoje od zelenih površina klinastog oblika i zelenog pojasa.	Rijeke, zelene površine, parkovi, ceste, zelenilo na ivičnjacima i kompleksi niskih raspršenih zgrada u izgrađenim dijelovima grada.
<b>Širina</b>	500 m	≥ 50 m
<b>Dužina uobičajenog vjetra</b>	5000 m	≥ 1000 m
<b>Širina prepreka okomito strujanju zraka</b>	≤ 10% ukupne širine koridora	≤ 20% ukupne širine koridora
<b>Napomene o upravljanju i kontroli</b>	Stroge mjere u skladu sa granicama koridora, postepeno izmiještanje industrije koja zagađuju okoliš, stroga kontrola postotka izgrađenog zemljišta; više zelenila u izgrađenim područjima s ciljem daljnjeg poboljšanja ventilacionog kapaciteta koridora; stroga kontrola visine i gustine u novim područjima gradnje, ocjena uticaja na meteorološki režim, usvajanje rasporeda gradnje koji će pospješiti ventilaciju.	

Kombinacijom rezultata istraživanja o urbanim meteorološkim uslovima i općih načela koja se koriste u pogledu ventilacionih koridora, za uspostavljanje sistema ventilacionih koridora u gradu Chengdu [7] predložena su sljedeća načela:

- Usklađivanje sa pravcem uobičajenog vjetra. Istraživanja su pokazala da za maksimalan učinak ventilacije i strujanja zraka u urbanom području ugao između glavnog ventilacionog koridora i uobičajenog vjetra ne bi trebao biti veći od 30°.
- Kombinacija uspostavljanja ventilacionih koridora sa ekološkim planiranjem. Prilikom uspostavljanja urbanih ventilacionih koridora, moraju se uzeti u obzir prirodni sistemi hlađenja sa funkcijama raspršivanja ventilacije i toplote. Neki primjeri su zelene površine, prirodni pejzaž i vodna tijela. Istraživanja su pokazala da je temperatura u području većih zelenih površina grada za 1-2 °C niža nego u okruženju. Zelene površine također utiču na smanjenje temperature u susjednim područjima, tako što povećavaju brzinu vjetra u okruženju. Efekat hlađenja može se proširiti na područje od 3 km. Tako svjež zrak iz hladnih izvora koji su identificirani u predjelu grada Chengdu i ekološko planiranje mogu biti usmjereni prema urbanom području uzimajući u obzir karakteristike vjetra u gradu. Glavni urbani ventilacioni koridor u gradu Chengdu je povezan sa cirkularnom ekološkom zonom, po načelu urbanog ventilacionog koridora.
- Uzeti u obzir lokalne uslove i poštovati izvorne karakteristike grada. Gradsko jezgro grada Chengdu ima zgusnutu strukturu. Postoji nekoliko većih zelenih područja, vodnih tijela ili cesta u okvirima treće kružne ceste. Prilikom uspostavljanja sistema ventilacionog koridora, glavni ventilacioni koridor treba povezati sa sekundarnim ventilacionim koridorima nakon što se dosegne gradska jezgra. Na ovaj način se može prodrijeti do cjelokupnog urbanog područja.
- Obratiti posebnu pažnju na područja sa slabim vjetrom i visokim temperaturama. Treba uzeti u obzir iscrpne podatke o temperaturnim poljima i vjetru. Ventilacioni koridor treba prodrijeti u urbane dijelove sa nižim brzinama vjetra s ciljem unapređenja ventilacije na lokalnom nivou. Istovremeno toplija područja treba podijeliti u segmente kako bi se unaprijedile toplotne karakteristike na lokalnom nivou.
- Iskoristiti cirkulaciju na lokalnom nivou. Moguće je da u perifernim područjima uslijed toplotnih efekata postoji lokalna cirkulacija. Ove karakteristike polja vjetra mogu se iskoristiti za uspostavljanje ventilacionih koridora. Prema analizi i numeričkoj simulaciji meteoroloških podataka u gradu Chengdu, u području planine Longmen je prisutan planinski povjetarac koji duva iz pravca planina prema ravnici, što predstavlja važan izvor čistog zraka za ravna područja.



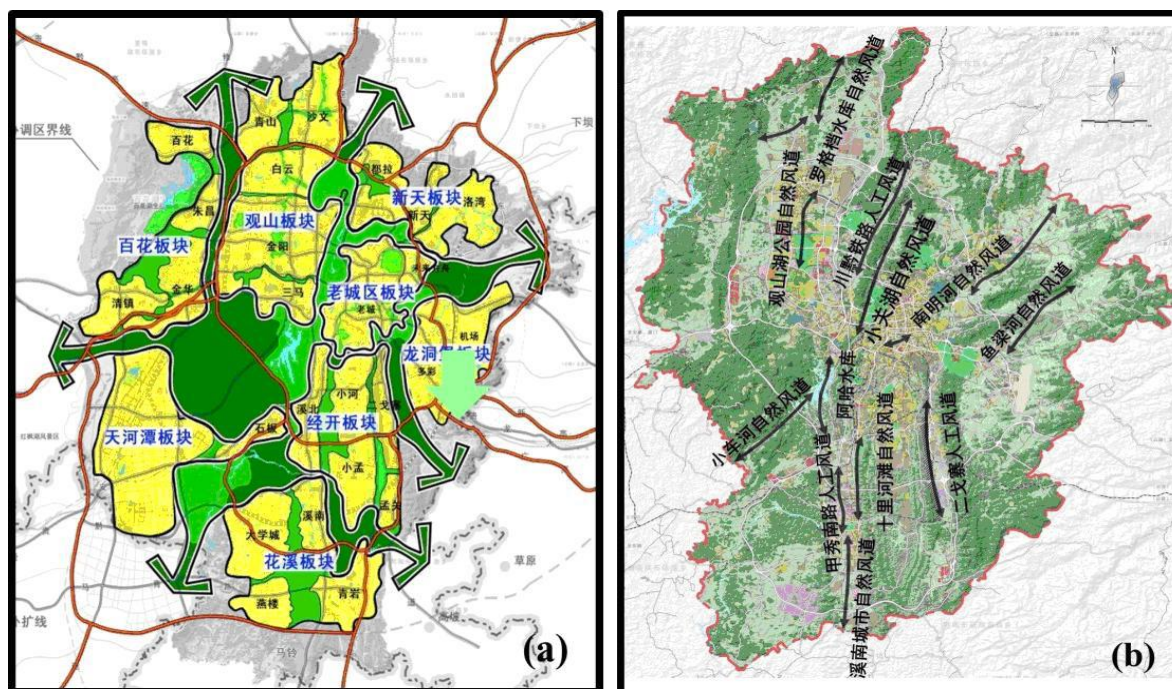
### 3.3. Guiyang

Guiyang je glavni grad provincije Guizhou u Kini. Površina grada je 8.034 km<sup>2</sup>, a broj stanovnika oko 4.696.800. Zimi prevladavaju istočni i sjeveroistočni vjetar, dok tokom ljeta prevladava južni vjetar. Brzina vjetra u gradu je veoma niska, sa prosječnom brzinom od 2,49 m/s na godišnjem nivou.

Plan ventilacionog koridora za Guiyang obuhvata tri najvažnije smjernice:

- Zaštiti periferiju: Guiyang ima nekoliko urbanih kružnih zaštitnih pojaseva i niz zelenih pojaseva, tako ove prirodne zelene prepreke treba u što većoj mjeri iskoristiti za izolaciju zagađenja i osiguranje svježeg zraka za grad (Slika 3.2 a).
- Uspostaviti kanal: Treba integrirati rijeke, rezervoare, močvarne parkove i doline kako bi se uspostavilo kontinuirano snabdijevanje zrakom, uključujući prirodne zračne kanale poput rijeke Shili i rezervoara Aha. U plan također treba uključiti glavne željezničke i cestovne puteve kao i umjetne tvorevine koje bi činile umjetni kanal za dotok zraka, kao što su umjetni zračni kanali ranžirni kolodvor Ergzhai i južna cesta Jiaxiu (Slika 3.2b).
- Kontrolirati gradnju: Treba provoditi strogu kontrolu gustine gradnje, dispozicije i visine građevina kako bi se urbani ventilacioni koridori održali na razumnom nivou.

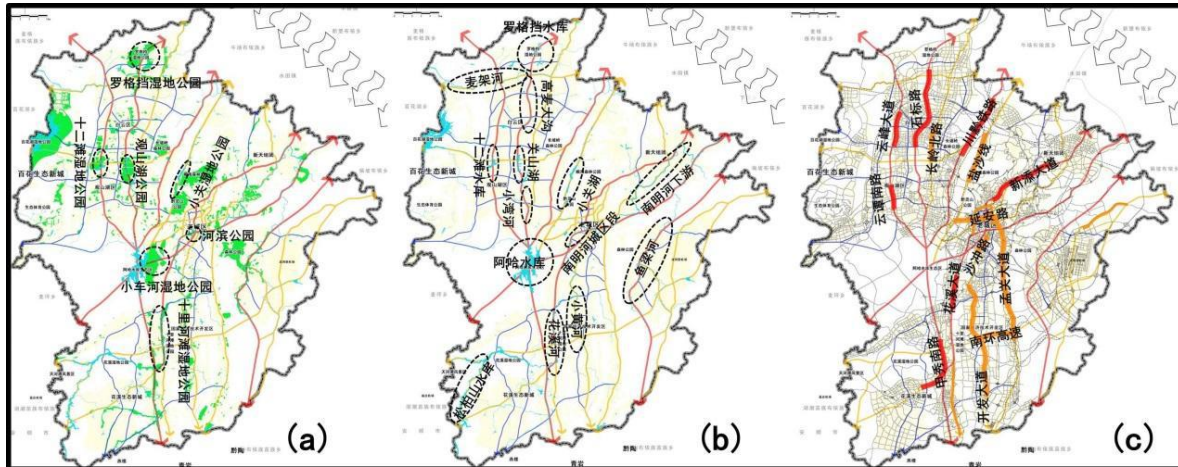
**Slika 3.2: Lokacija urbanog zelenog pojasa i grafički prikaz vodnog sistema u gradu Guiyang [8]**



Plan urbanih ventilacionih koridora grada Guiyang osmišljen je s ciljem:

1. povezivanja postojećih prirodnih zelenih površina i vodnih sistema koji unapređuju urbani hladni zrak i osiguravanju dotok svježeg i čistog zraka u grad.
2. standardizacija područja sa očiglednim problemima korištenja zelenih površina, vodnih sistema i cestovne mreže i korištenje istih za planiranje odgovarajućih ventilacionih koridora (Slika 3.3).
3. provedba racionalne kontrole gradnje u područjima potencijalnih ventilacionih koridora, s ciljem sprečavanja da pretjerano intenzivna gradnja blokira ventilacione koridore.

Slika 3.3: Potencijalni urbani ventilacioni koridori zelenih područja (a) vodni sistem (b) i saobraćajna mreža u gradu Guiyang [8]



### 3.4. Štuttgart

Štuttgart je glavni grad pokrajine Baden-Württemberg u Njemačkoj koji je smješten u strmoj dolini rijeke Neckar. Krajolik ovog grada odlikuju niske brzine vjetera i slaba cirkulacija zraka. Razvoj na padinama doline spriječio je kretanje zraka kroz grad što je pogoršalo kvalitet zraka i doprinijelo stvaranju efekta urbanih toplinskih ostrva. Za regiju Štuttgarta je izrađen Klimatski atlas u kojem je prikazana raspodjela temperature i strujanja hladnog zraka prema topografiji grada i korištenju zemljišta. Atlas sadrži mape koje pokazuju strujanje regionalnih vjetrova, protok hladnog zraka, koncentracije zagađenja zraka, i druge relevantne informacije koje su neophodne planerima koji planiraju mjere za optimizaciju urbane klime koje bi se mogle koristiti u pripremi novih projekata i projekata rekonstrukcije.

Više od 60% područja Štuttgarta su zelena područja, a više od 39% ukupne površine je zaštićeno, što je najviši procenat u Njemačkoj [9]. Doline vodnih tijela i livade osiguravaju prirodne zelene pojaseve koji istovremeno predstavljaju poželjne puteve za ventilaciju zraka. Ove doline u Štuttgartu obuhvataju sistem dolina Nesenbachtal, Feuerbacher Tal, Lindenbachtal i Rohrakker [10]. Održavanje ovih dolina slobodnim od građevinskih zahvata je dobro obrazložena politika, s obzirom da aspekti očuvanja pejzaža i prirode također doprinose jačanju argumenata vezanih za urbanu klimatologiju.

Slika 3.4: Nizvodno strujanje zraka duž ventilacione ose slobodno je od građevina na području Unterer Grund, Stuttgart-Vaihingen [10]





## 3.5. Pregled korištenih mjera u odabranim gradovima

Svi navedeni gradovi primijenili su sljedeći pristup:

- Priprema iscrpne klimatološke studije za dato područje
- Priprema studije o urbanim ventilacionim koridorima, identifikacija primarnog i sekundarnih koridora (dužina i širina)
- Primjena mjera urbanističkog planiranja usmjerena na zaštitu i razvoj koridora;
  - Stroga kontrola procenta građevinskog zemljišta;
  - Stroga kontrola visine i gustine gradnje u novim područjima razvoja
  - Opsežnije ozelenjavanje izgrađenih područja
  - Uspostavljanje zelenih koridora - spajanje postojećih parkova u koridor
- Usvajanje tehničkih smjernica za dispoziciju i oblik zgrada

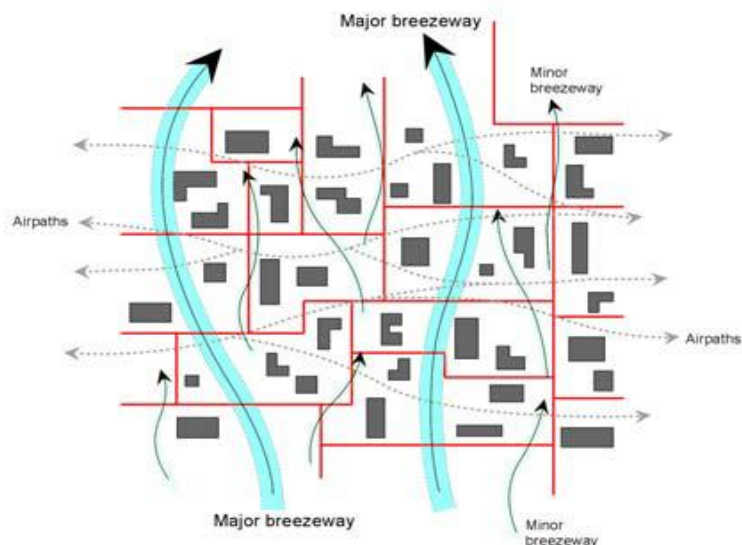
Kada je riječ o tehničkim smjernicama za dispoziciju i oblik zgrada, korisne informacije se mogu naći u smjernicama koje su pripremili kineski gradovi. U tehničkim smjernicama koje su pripremljene za kineske gradove predlažu se mjere kao što su:

- Put strujanja zraka
- Visina zgrada
- Propusnost zgrada
- Oblik gradnje uključujući omjer podijuma/osnove
- Širina pločnika i širina kolnika i prostora oko zgrade
- Dispozicija zgrade
- Povezivanje otvorenih prostora
- Orijentacija ulica

### Put strujanja zraka

Opće je pravilo da je u gusto izgrađenim urbanim područjima za bolji okoliš potrebno osigurati što bolju ventilaciju ulica. Opća propusnost gradskih četvrti mora se poboljšati u nivou tla. Ovo se radi kako bi uobičajeni vjetar, koji struji duž puteva strujanja zraka i glavnih cesta, mogao prodrijeti što dublje u dijelove grada. Puteve strujanja zraka treba osigurati kako bi se omogućilo efikasno kretanje zraka u urbano područje s ciljem uklanjanja toplote, gasova i čestičnih tvari i poboljšanja mikro klime urbanog okruženja. Ovo se može postići pravilnim povezivanjem slobodnih prostora, formiranjem otvorenih trgova na raskrsnicama cesta, održavanjem gradnje niskih objekata usklađenih sa strujanjem uobičajenog vjetra i proširenjem manjih cesta koje se priključuju na glavne ceste. Ovaj pristup također može doprinijeti očuvanju i usmjeravanju drugih prirodnih strujanja zraka uključujući kopnene i dolinske vjetrove u izgrađeno područje.

Slika 3.5: Najvažniji putevi strujanja zraka (šematski prikaz)



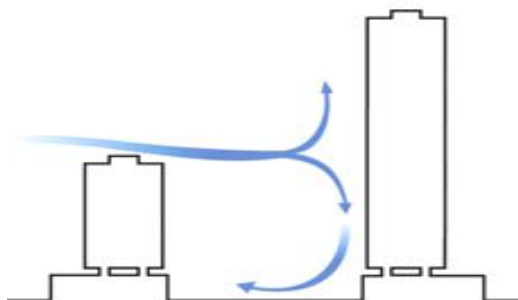
Slika 3.6 - Najvažniji putevi strujanja zraka (grafički prikaz na satelitskom snimku)



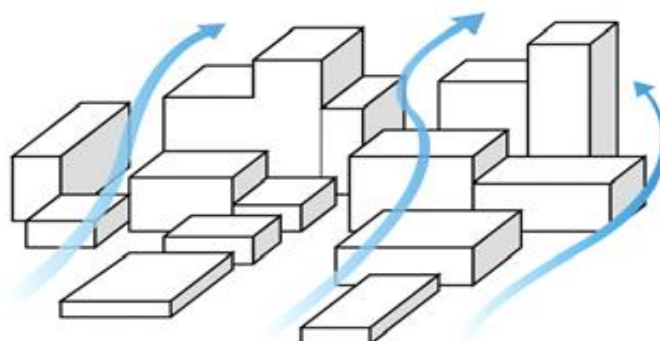
### Visina zgrada

Zgrade trebaju biti različite visine, s tim da se visina smanjuje u pravcu iz kojeg dolazi uobičajeni vjetar. Bolje je da zgrade budu različite visine nego da sve budu približno ili jednako visoke. Postupno povećanje visine zgrada u redovima stvara bolje uslove za strujanje vjetra na višim nivoima ukoliko je razlika između redova znatna. Stepovanje visine zgrada osmišljeno je kao mogući budući dizajn koji bi omogućio bolje strujanje vjetra [5]. Da bi ovo funkcioniralo, niže zgrade trebaju biti postavljene na strani nizvodno od vjetra, dok više zgrade trebaju biti u zavjetrini. Vjetar koji udara u više zgrade će pomjerati zrak prema dole, vidi Slika 3.7 i Slika 3.8:.

Slika 3.7: Različita visina zgrada na jednoj lokaciji radi bolje cirkulacije zraka [5]



Slika 3.8: - Više blokova zgrada različite visine sa prikazom cirkulacije zraka [5]



Koncept postupnog povećanja visine može pomoći da se optimalnije koristi potencijal i u samoj gradnji. Praktičan primjer postupnog povećanja visine zgrada prikazan je u Smjernicama za planiranje urbanog razvoja u Kai Taku (Hong Kong) [11]. Razlika u visini između prve i druge zgrade je 15 do 20 m, isto tako između druge i treće. Prostor između zgrada je proporcionalnih dimenzija i dispozicije kako bi bila omogućena cirkulacija zraka (Slika 3.9).

Slika 3.9: Tipičan primjer promjenjive visine zgrada na jednoj lokaciji [11]



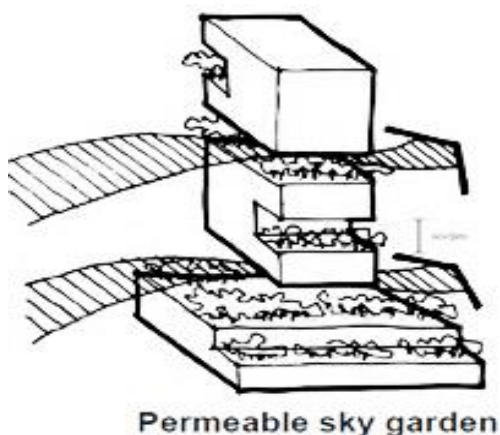
### Propusnost zgrada

Mnogo je važnije osigurati propusnost/otvore bliže nivou kretanja pješaka nego na višim nivoima. Korisno je stvoriti uslove za propusnost između stambenih blokova i pokušati oformiti prolaze u nivou tla radi bolje ventilacije za pješake. Ovim će se poboljšati kretanje zraka u nivou tla, a uz to efekat kanalsanja koji stvara praznina pospješuje učinkovitost ventilacija za stambene jedinice na nižim spratovima. Formiranje otvora na građevinama radi bolje propusnosti može se kombinirati sa odgovarajućim bočnim zidovima koji će doprinijeti različitosti pritiska na fasade zgrada i omogućiti

strujanje zraka kroz otvore zgrada. Širina otvora na zgradama ne bi trebala biti manja od 3m, tako da zrak neometano struji kroz njih.

Hysan Palace je zgrada sa 40 spratova u Hong Kongu, koja je dobila nekoliko nagrada, uključujući i nagradu za zelenu gradnju. Zgrada se navodi kao primjer dobre primjene otvora na građevinama. Dijagrami koji prikazuju pristup konceptu propusnosti u mjestu Hysan na Slika 3.10.

**Slika 3.10: Šematski prikaz otvora na zgradi Hysan Palace [12]**



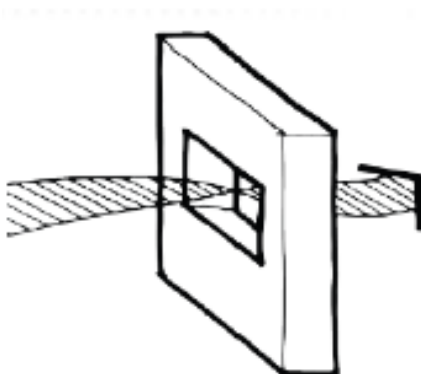
Postoji mnogo različitih vrsta procjepa/otvora na zgradama. Na primjer, jedna od mogućnosti je postavljanje većeg otvora na sredini zgrade. Zgrada Kai Tak je primjer gradnje sa karakterističnim visokim otvorom u sredini, kroz koji struji zrak (Slika 3.11 i

Slika 3.12:.)

**Slika 3.11: Otvor u sredini zgrade i primjer razvoja Kai Tak [12]**



Slika 3.12: - Grafički prikaz propusnosti strujanja zraka kroz otvor [12]

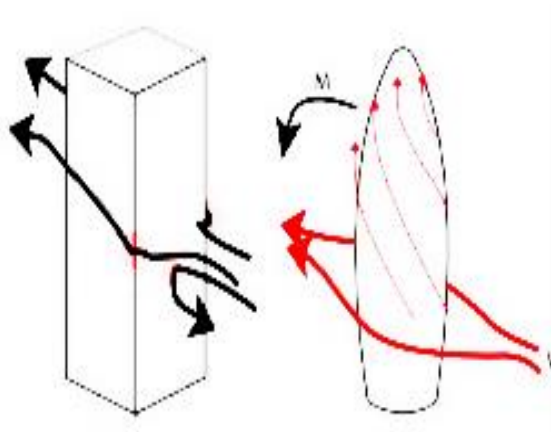


### Strujanje vjetra i oblik zgrade

Različiti aspekti oblika zgrade mogu pojačati i umanjiti efekte vjetra. Zaobljene zgrade pružaju manje otpora vjetru i poboljšavaju strujanje zraka, u odnosu na pravougaone sa ravnim površinama. Najveći problem sa visokim zgradama je činjenica da zračne struje koje se kreću oko njih izazivaju vrtloženje vjetra. Grupa stručnjaka za modeliranje (eng. Specialist Modelling Group - SMG) arhitektima savjetuje da koriste kompjuterske modele za simulaciju aerodinamičkih svojstava zgrade. Model je pokazao da zračnim strujama bolje odgovara cilindrični oblik nego četvorougao oblik, kao i da umanjuje vrtloženje vjetra budući da ne predstavlja prepreku strujanju zraka (

Slika 3.13).

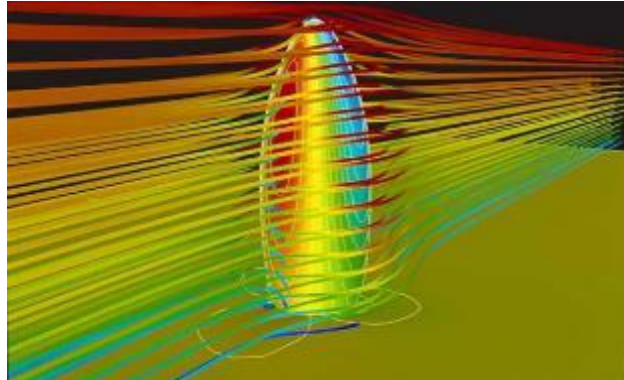
Slika 3.13: Strujanje vjetra oko pravougaone i cilindrične zgrade [13]



Zgrada u ulici 30 St. Mary Axe, poznatija kao Gherkin, je jedan od projekata u koji je bio uključen SMG i najbolji primjer kako je geometrijski oblik zgrade prilagođen režimu vjetra uz inovativnu arhitekturu. Ova zgrada se nalazi u Londonu i izgrađena je 2004.g. Cilindrični oblik cijele zgrade omogućava strujanje vjetra oko zgrade, protok zraka skreće oko obline i ne nailazi na direktne prepreke, što nije slučaj kod ravnih zgrada (Slika 3.14).



Slika 3.14: Pogled na Gherkin i model strujanja zraka oko ove zgrade [14]

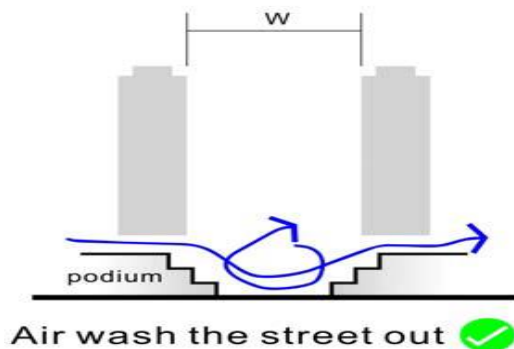


### Opseg podijuma

Podijum (ili osnova zgrade) je prva poveznica između visoke zgrade i okolnih ulica i javnih površina. Stoga ovaj dio zgrade ima najviše uticaja na interakciju pješaka sa zgradom i način na koji se zgrada uklapa u okruženje u nivou ulice [15]. Podijum sa velikim obuhvatom blokira vjetar i maksimalno smanjuje volumen zraka blizu nivoa kretanja pješaka. Za velike lokacije gradnje/rekonstrukcije, naročito u postojećim urbanim područjima, od ključnog je značaja povećati propusnost na nivou ulica osiguranjem ventilacionih koridora ili rastojanja između prednjeg dijela zgrade i regulacione linije paralelno sa uobičajenim vjetrom. Terasastu konstrukciju podijuma treba prilagoditi tako da usmjerava silazno strujanje zraka. Na ovaj način se može pospješiti strujanje zraka u nivou pješačke zone i raspršivanje zagađujućih tvari koje ispuštaju vozila (Slika 3.15 i

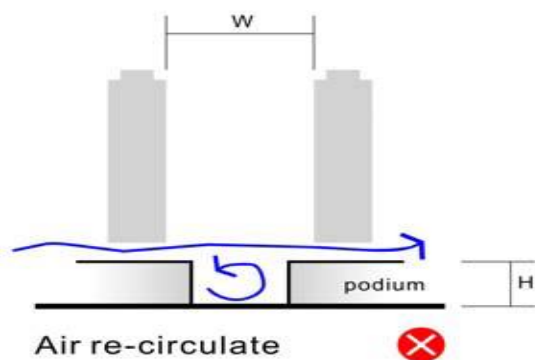
Slika 3.16).

Slika 3.15: Pravilan oblik podijuma za dobru cirkulaciju zraka [5]





Slika 3.16 - Neprimjeren oblik podijuma za dobru cirkulaciju zraka



U modernoj arhitekturi se veoma efikasno koristi stepenasti podijum. Toranj koji se trenutno gradi u centru grada Šangaja predstavlja primjer konstrukcije velikog tornja koji će imati stepenasti podijum sa tržnim centrom i raskošnim terasama otvorenim prema javnom prostoru, uz zelene površine koje se pružaju prema jugu i omogućavaju dobru ventilaciju (Slika 3.17).

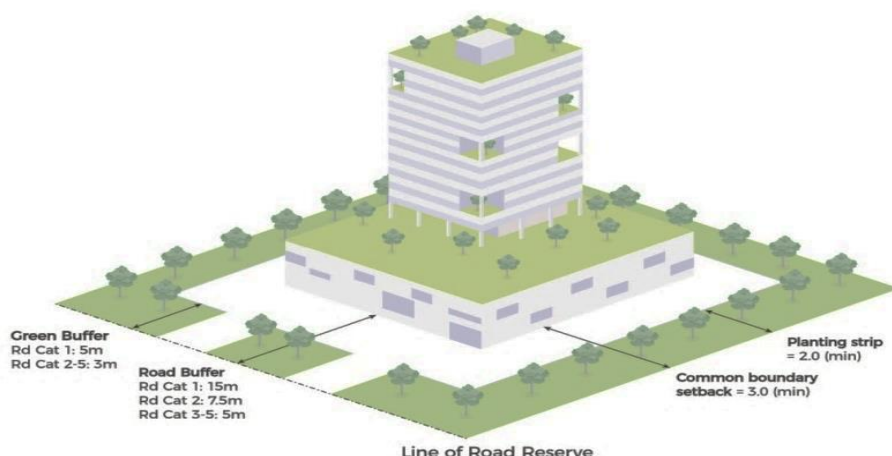
Slika 3.17: Projekat planiranog tornja u Šangaju sa stepenastim podijumom [16]



### Širina pločnika i širina kolnika i prostora oko zgrade

Pločnik treba biti odgovarajuće širine kako bi zadovoljio protok pješačkog saobraćaja i omogućio da se na preostalom dijelu postave komunalne instalacije i posade stabla, odnosno da se u uredi. U starijim urbanim područjima gdje su pločnici uži ili nedovoljno široki da bi zadovoljili sadašnje potrebe treba pokušati sa proširenjem istih odmicanjem prednjeg dijela zgrade ili smanjenjem površine prizemlja podijuma prilikom rekonstrukcije [17]. U područjima novogradnje za stvaranje visoko kvalitetnog okruženja za kretanje pješaka treba osigurati dobar plan i šire pločnike. Propisani prostor oko zgrade se može realizovati određivanjem zona zabrane gradnje, uredbama, građevinskim kodeksima koje donose lokalne vlasti. U zakonu o utvrđivanju zona se, na primjer, može propisati rastojanje od 3m, što znači da granica parcele na kojoj će se graditi mora biti udaljena od ceste najmanje 3m. Ako bismo uzeli primjer Mong Kok, preporučuje se da ovo rastojanje bude 3-5m sa obje strane tipične ulice. Ovo je praktičan iterativan pristup unapređenju urbane ventilacije zraka za cijeli dio grada na dugoročnom planu, ali bi mogućnost za usvajanje ovog pristupa bila veća prilikom rekonstrukcije koja bi obuhvatila veće zemljišne parcela, vidi Slika 3.18.

Slika 3.18: Širina kolnika i prostora oko zgrade [18]



U smislu integracije sa drugim aspektima održivog urbanističkog planiranja, očigledno je da veća udaljenost od regulacione linije može značajno promijeniti urbani oblik sa zonom razdvajanja između zgrada, produžavanjem puta za pješake, smanjenjem efikasnosti aktivnih pročelja i formiranjem ogromnih područja slabo iskorištenog javnog prostora. Često je za realizaciju urbane arhitekture prilagođene klimatskim izazovima, uključujući bolju urbanu ventilaciju bolje koristiti Smjernice za integrirano urbano projektovanje uz obuhvat većih područja i uključivanje integrirane zelene infrastrukture, nego same o podjeli urbanističkih površina prema njihovoj namjeni. Rastojanje između zgrada također može imati značajan uticaj na toplinsku ugodu na otvorenom prostoru u smislu zasjenjivanja ulice i otvorenog prostora i zasjenjivanja same zgrade. [32].

### Dispozicija zgrade

Pravilno pozicioniranje zgrade u odnosu na uobičajeno strujanje vjetra predstavlja efikasan pristup projektovanju koji doprinosi strujanju zraka. Između blokova zgrada treba ostaviti široke prazne prostore kako bi se maksimalno unaprijedila propusnost građevine te maksimalno umanjio uticaj iste na mogućnost susjednih građevina da koriste prednosti vjetra. Raspored blokova bi trebao biti smaknut tako da i blokovi koji su u pozadini mogu dobiti vjetar koji prodire kroz procjepe između blokova u prednjem redu koji formiraju puteve strujanja zraka za ventilaciju i uklanjanje zagađujućih tvari. Da bi se maksimalno povećala dostupnost vjetra pješacima, bilo bi poželjno da tornjevi dosežu do ruba podijuma okrenutog prema glavnoj pješačkoj zoni kako bi omogućili da silazno strujanje vjetra dopre do nivoa ulice. Stambeno-poslovni kompleks Kai Chang, Hong Kong, predstavlja primjer urbane gradnje koja omogućava strujanje zraka bez velikih prepreka. Između svake zgrade je ostavljen prolaz kroz koji može strujati zrak (Slika 3.19).

Slika 3.19: Strujanje zraka između zgrada u kompleksu Kai Ching, Hong Kong, Kina [12]

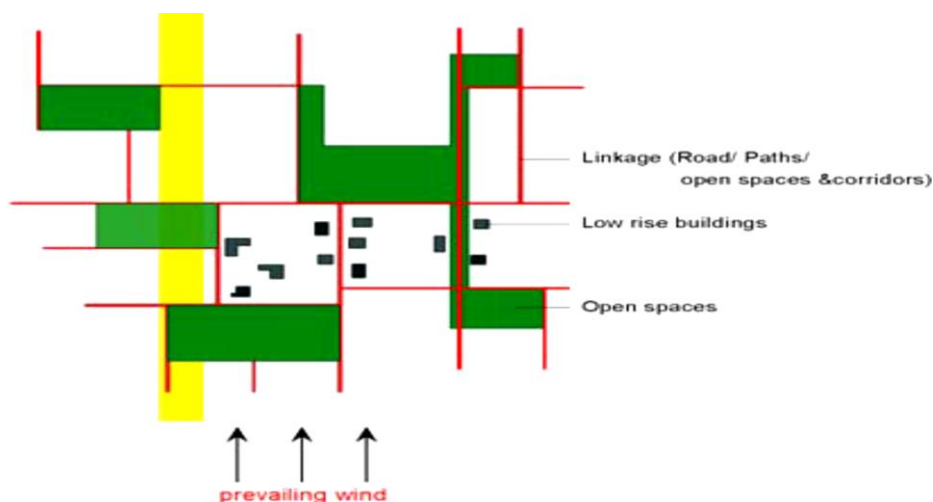


### Povezivanje otvorenih prostora

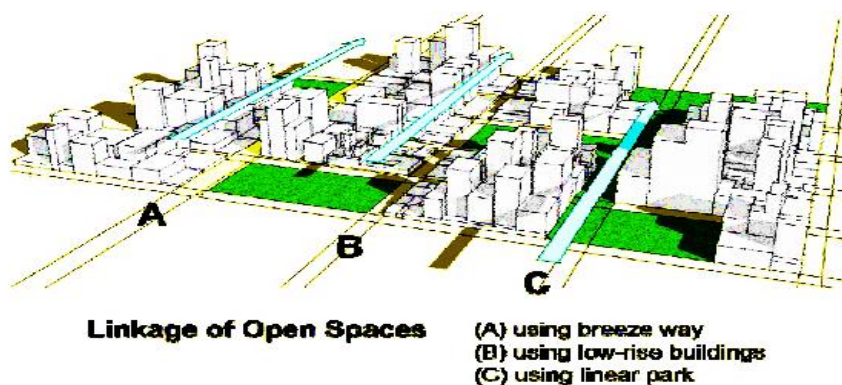
Otvoreni prostori su povezani linearnim, nerazvijenim (ili manje razvijenim) hodnicima koji sadrže prirodne karakteristike, staze ili otvorene prostore koji povezuju postojeće ili planirane površine otvorenog prostora. U nekim situacijama mogu povezivati više stambenih naselja. Otvorene prostore obično povezuju potoci, rječice, rijeke ili linearni pravac nekadašnjih infrastruktura, a mogu biti povezani na više različitih načina. Gdje je to moguće, otvoreni prostori se mogu povezati i poredati tako da formiraju puteve strujanja zraka ili ventilacione koridore. Građevine uz puteve strujanja zraka/ventilacione koridore trebaju biti niže. Otvoreni prostor i širina imaju jednaku važnost za urbane ventilacione koridore. (Slika 3.20)

Otvoreni prostori su često određeni veličinom, pozicioniranjem i dispozicijom građevine, tako da je važno da se urbanističkim rješenjem predvidi formiranje koridora. Prilikom planiranja otvorenog prostora treba voditi računa o glavnom ventilacionom koridoru i ostaviti značajnu površinu za otvoreni prostor, važne ceste, trgove i zeleni pojas. Procenat izgrađenog zemljišta ne treba biti veći od 20% a zgrade trebaju biti niže i trebaju biti raštrkane. Nacrt Mape sa preporukama za urbanističko planiranje sa klimatskim aspektom u Hong Kongu sadrži plan odgovarajućeg povezivanja slobodnih prostora. (Slika 3.21)

Slika 3.20: Šematski prikaz povezivanja otvorenih prostora [5]



**Slika 3.21: Širina kolnika i prostora oko zgrade i propusnost zgrade, putevi strujanja zraka, otvoreni prostori (povezanost ventilacije zraka) i zelenilo [19]**



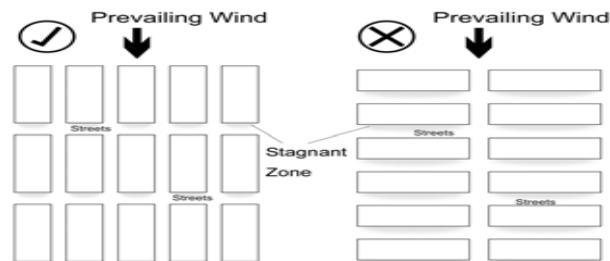
Dok su kriteriji za ventilaciju u zatvorenom prostoru dobro utvrđeni (standardi EPA i ASHREA) i već duže vrijeme se koriste u praksi, vanjska ventilacija još uvijek nije definirana u vidu međunarodno priznatog standarda. Međutim, u novije vrijeme se u gradovima ustalila praksa provođenja Procjene zračnih koridora (AVA), ka napr. u Hong Kongu Edvard Ng, 2006.) s ciljem boljeg razumijevanja strujanja vjetrova, njihove povezanosti sa nivoom zagađenosti, te s ciljem utvrđivanja kriterija izvedbe koji su nužni da bi se uzeo u obzir uticaj razvoja na režim vjetra. Studija AVA koristi se za pametnije urbano planiranje koje neće poremetiti režim vjetra ili povećati opasnost po zdravlje uslijed lošeg kvaliteta zraka. Budući da se morfologija i mikroklima gradova širom svijeta uveliko razlikuju, za svaki pojedinačni kontekst treba definirati jedinstvene kriterije izvedbe koji uzimaju u obzir uticaj razvoja na režim vjetra.

Višefunkcionalni pristup sa višestrukim prednostima zahtijeva usaglašenu integriranu strategiju na nivou urbanističkog planiranja prostora. Na ovaj način se podržava optimizacija različitih prednosti zelene infrastrukture: strujanje zraka / ventilacija / zagađenost zraka, biološka raznolikost, ublažavanje oticanja, kretanje biciklima/pješčenje, javni sadržaji (rekreacija, zabava, edukacija), ublažavanje buke, proizvodnja energije (izvor/skladište toplotne energije) [32].

## Orijentacija ulica

Odgovarajućom orijentacijom ulica moguće je osigurati prodiranje vjetra do samog jezgra grada. Ukoliko su ulice postavljene okomito ili približno okomito pravcu vjetra, a zgrade poredane duž ulice u dugim redovima, takav urbani raspored pruža najveći otpor urbanom vjetru. Niz glavnih ulica, široke avenije trebaju biti raspoređene maksimalno na 30° prema pravcu uobičajenog vjetra kako bi se postiglo maksimalno prodiranje uobičajenog vjetra kroz gradsku četvrt (Slika 3.22).

Slika 3.22: Šematski prikaz pravilne i nepravilne orijentacije ulice [5]





## 4. Historijat problema zagađenosti zraka u Kantonu Sarajevo

Kanton Sarajevo (KS) se suočava se problemom visoke zagađenosti zraka tokom zimskih mjeseci, kad analiza trendova bilježi dnevna prekoračenja graničnih vrijednosti zagađujućih tvari kao što su PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>. Prema godišnjim izvještajima o kvalitetu zraka [20], sve stanice za praćenje kvaliteta zraka bilježe značajan porast dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti PM<sub>10</sub> (>50 µg/m<sup>3</sup>) (granična vrijednost u FBiH i EU).

Izvori emisija u KS koji najviše utiču na kvalitet zraka su stambeni i saobraćajni sektori [21]. Samo 34% stambenog sektora u KS je priključeno na sistem daljinskog grijanja (sa prirodnim gasom kao primarnim energentom) dok preostali dio stambenih objekata ima centralne kotlovnice koje koriste različite primarne izvore energenata kao što su prirodni gas, električna energija, tečna i čvrsta goriva kao i individualna ložišta na gas, ugalj, drvo za loženje ili pelet, uključujući i ložišta na električnu energiju. Naselja na padinskim dijelovima Kantona, uglavnom privatne kuće, nisu priključena na mrežu daljinskog grijanja i jedan su od najvećih izvora zagađenja zraka [22]. Zbog prelaska na druge vrste energenata u stambenom sektoru KS (kao napr. korištenje uglja ili drveta za loženje umjesto prirodnog gasa zbog promjene cijena goriva), izvori zagađenja zraka nisu stabilni.

Pored toga, KS leži u kotlini okruženoj planinama zbog čega je je izložen dodatnom negativnom uticaju na kvalitet zraka uslijed pojava guste magle koja prelazi u smog kada se pomiješa sa zagađujućim tvarima na višim nivoima. U kombinaciji sa klimom koja je tipična za ovo podneblje, topografija koja ometa strujanje zraka, doprinosi klimatskoj pojavi poznatoj kao temperaturna inverzija. Prilikom pojave temperaturne inverzije zagađenje ostaje zarobljeno duži vremenski period u blizini tla (Slika 4.1) [23].

**Slika 4.1: Zagađujuće tvari iznad grada Sarajeva kao posljedica temperaturne inverzije [23]**



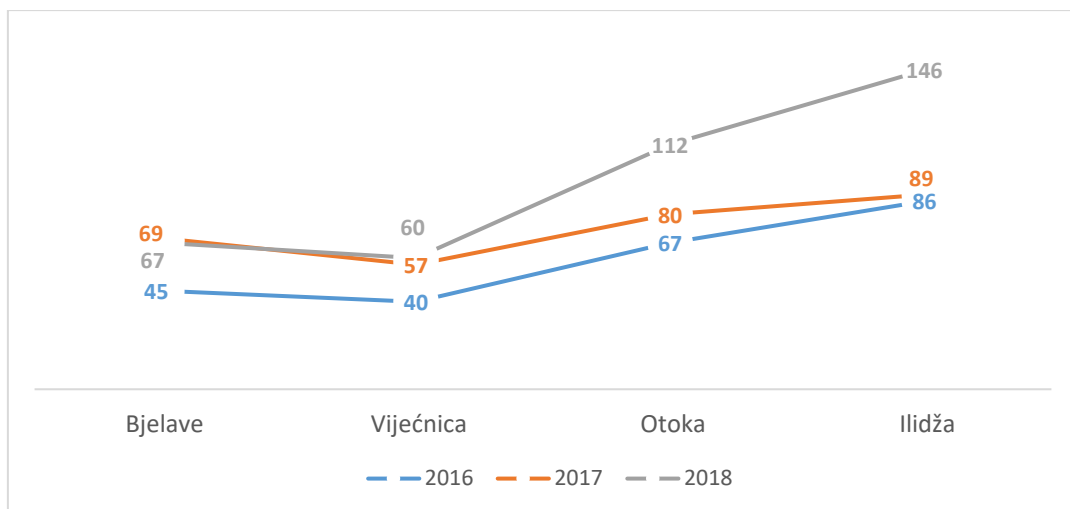
Praćenje kvaliteta zraka u Kantonu Sarajevo je u nadležnosti Federalnog hidrometeorološkog zavoda (čije se mjerne stanice nalaze na Bjelavama i Ivan Sedlu) i Zavoda za javno zdravstvo Kantona Sarajevo (mjerne stanice Otoka, Vijećnica i Ilijaš). Analiza prekoračenja graničnih vrijednosti u Kantonu Sarajevo provodila sa ne osnovu podataka iz godišnjeg izvještaja o kvalitetu zraka u Federaciji Bosne i Hercegovine za period 2016.-2018. Stanice za praćenja kvaliteta zraka koje su bile predmet analize su: Bjelave, Vijećnica, Otoka i Iliđa. Analiza također pokazuje broj dnevnih prekoračenja zagađivača PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>, koji prelaze vrijednosti utvrđene za zaštitu zdravlja

stanovništva u skladu sa entitetskim (FBiH) zakonom o kvalitetu zraka koje je u skladu sa standardima EU o kvalitetu zraka [45].

### Dnevna prekoračenja graničnih vrijednosti PM<sub>10</sub>

Većina stanica za praćenje kvaliteta zraka u KS bilježi godišnje prosječne koncentracije PM<sub>10</sub> koje su približne ili više od graničnih vrijednosti za kvalitet zraka. Tokom perioda 2016.-2018. najveći broj dnevnih prekoračenja (146) je zabilježen na mjernoj stanici Ilidža. Treba napomenuti da, prema entitetskom (FBiH) zakonu o kvalitetu zraka, ne bi trebalo doći do prekoračenja graničnih vrijednosti više od 35 dana godišnje, što je u potpunosti usklađeno sa standardima EU o kvalitetu zraka. Pored toga, stanica za praćenje kvaliteta zraka sa drugim po redu najvećim brojem prekoračenja granične vrijednosti PM<sub>10</sub> u 2018. je stanica na Otoci (112).

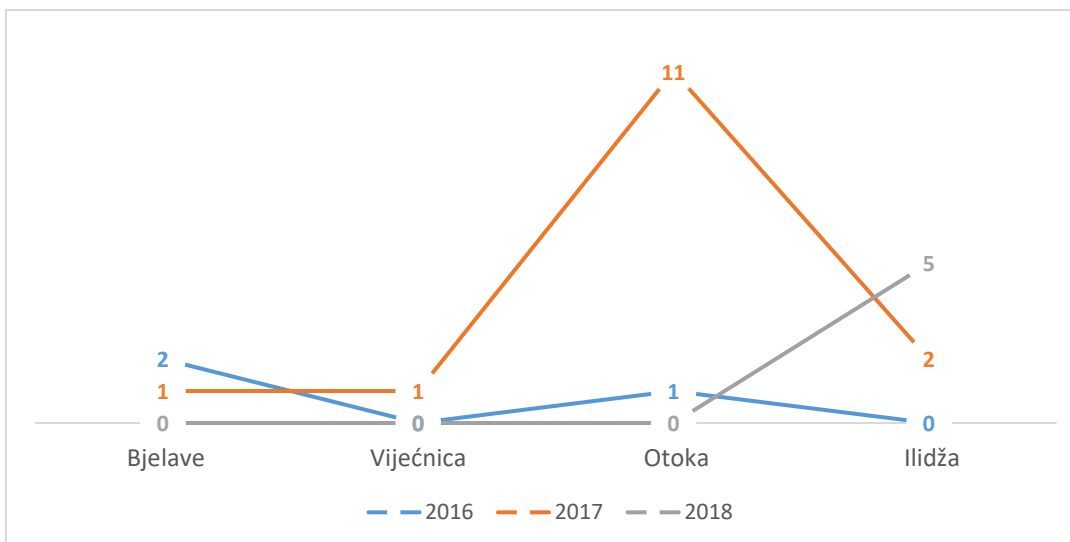
**Slika 4.2: Broj dnevnih prekoračenja granične vrijednosti za PM<sub>10</sub> (>50 µg/m<sup>3</sup>) [24]**



### Dnevna prekoračenja graničnih vrijednosti za SO<sub>2</sub>

U 2018.g. na stanicama za praćenja kvaliteta zraka Bjelave, Vijećnica i Otoka nisu zabilježena dnevna prekoračenja graničnih vrijednosti SO<sub>2</sub>, dok je najveći broj dnevnih prekoračenja (11) zabilježen na stanici Otoka u 2017.g. sa tendencijom pada (Slika 4.3).

**Slika 4.3: Broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti za SO<sub>2</sub> (>125µg/m<sup>3</sup>) [24]**

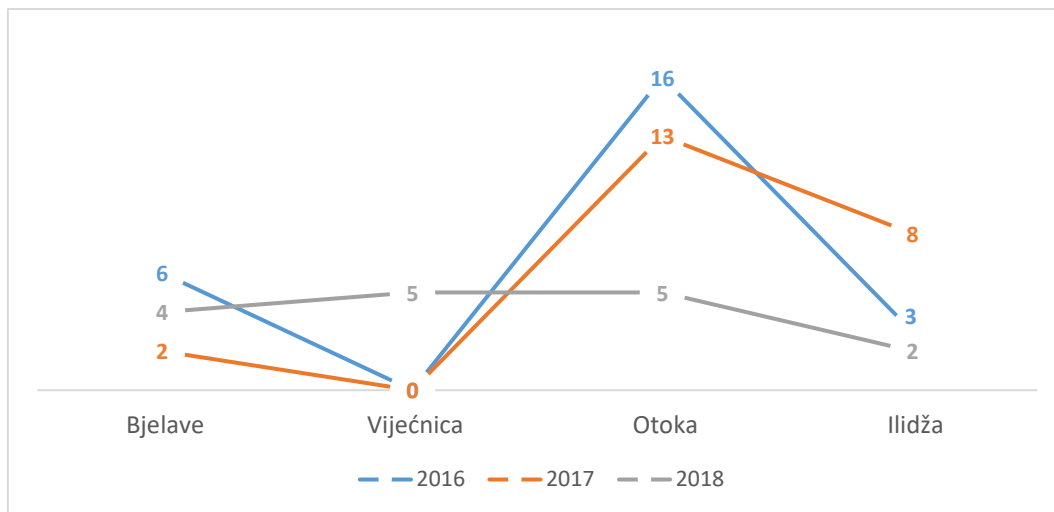




### Dnevna prekoračenja graničnih vrijednosti za NO<sub>2</sub>

Najveći broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti NO<sub>2</sub> (16) zabilježen je na stanici Otoka (u 2017.g.) nakon čega je zabilježena tendencija pada (Slika 4.4).

Slika 4.4: Broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti za NO<sub>2</sub> (>85 µg/m<sup>3</sup>) [24]



Prema rezultatima analize kvaliteta zraka u KS na stanici za praćenje kvaliteta zraka na Otoci je zabilježen najveći broj dnevnih prekoračenja graničnih vrijednosti PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>. Kada je riječ o prekoračenjima PM<sub>10</sub>, stanice (Otoka i Ilidža) koje pokazuju tendenciju rasta, postavljene su na lokacijama koje su među najprominentnijim u gradu sa dominantnim lokalnim saobraćajem i stambenim zgradama.

Prekoračenja vrijednosti u pogledu kvaliteta zraka u KS karakteristična su za zimski period (januar, februar, mart, oktobar, novembar i decembar) naročito u pogledu koncentracija PM<sub>10</sub>, a prema podacima iz godišnjeg izvještaja o kvalitetu zraka (Slika 4.5).

Slika 4.5: Pregled srednjih dnevnih koncentracija PM<sub>10</sub> na mornoj stanici Otoka u 2018.g. (ug/m<sup>3</sup>) [24]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
JANUAR		71	68	80				82	97	69	25	30	34	16	36	73	79	22	63					105	136				198	227	209
FEBRUAR		21	34	40	76	147	70	42	67	87	52	114												77	34	20	30	50	57		
MART	149	252	31	64	102	75	47	38	92	100			18	20	18	33	38	17	26	31	35	35	37	62	76	54	55	74	57	20	15
APRIL			32	66	71	26	37	49	49	40	66	88	56	59	78	104	75	35	42	36	35	33	36	35	48	50	39	45	25	41	
MAJ	43	40	38	19	34	25	35	32	35	41	37	31	17	19	10	7	13	18	24	25	25	23	27	26	35	36	29	32	28	30	32
JUNI	39	26	24	23	20				19	24	38	39	22	15	7	14	20	23	26	31	34	20	15	17	26	24	16	19	26	21	
JULI	16	28	42	44	32	34	21	21	24	25	27	40	33	31	31	34	16	30	32	33	32	27	22	24	27	34	26	27	30	31	33
AVGUST	37	40	39	36	26	34	39	40	42	43	52						25	36	42	36	38	35	27	23	25	19	13	26	38	34	40
SEPTEMBAR	36	35	28	21	20	33	26	24	29	28	29	36	39	36	40	28	27	35	38	43	49	46	36	28	16	19	39	43	45	22	
OKTOBAR	39	32	46	43	72	54	26	30	35	50	54	63	54	69	65	68	73	78	88	66	35	32	57	62	36	83	31	9	18	25	59
NOVEMBAR			81	115	142	98	99	86	110	114	97	124	145	118	76	38	19	30	47	71	69	65	56	122	138	56	44	23	20	40	
DECEMBAR	146	242	276	258	59	138	225	179	65	70	63	110	119	103	30	81	159	69	117	313	414	159	214	80	19	73	208	271	351	224	28

■	exceedance
□	without exceedance

## 5. Osnovne informacije o trendovima urbanizacije u KS

### 5.1. Historijat urbanističkog planiranja u KS

Urbanizacija u sadašnjem području Kantona Sarajevo i predratnog Grada Sarajeva, počela je usvajanjem Generalnog urbanističkog plana (GUP) tokom 1965. godine, nakon čega su usvojeni:

- Prostorni plan Grada Sarajeva za period 1986. – 2000./2015. (PPGS),
- Urbanistički plan Grada Sarajeva za period 1986. – 2015. (UPGS),
- Prostorni plan Kantona Sarajevo za period 2003. – 2023. (PPKS),
- Izmjene i dopune Prostornog plana Kantona Sarajeva za period 2003. – 2023.– faza "A",
- Izmjene i dopune Prostornog plana Kantona Sarajeva za period 2003. – 2023.–.faza "B"

U proteklih dvadeset ili više godina, urbanističko planiranje u KS uglavnom se odvijalo donošenjem izmjena i dopuna postojeće prostorno-planske dokumentacije razvoja, uglavnom PPKS-a i PPGS-a.

S obzirom na uzdužni oblik u pravcu zapad i sjever, u Sarajevu se još od davnih vremena gradnja uglavnom usmjerava u ova dva pravca.

Urbanističkim planom u urbanom dijelu Sarajeva je propisana maksimalna spratnost od četiri etaže i procenat izgrađenosti (Pi) od 26%. Procenat izgrađenosti (Pi) je proporcija površine objekta u odnosu na površinu parcele.

Generalnim urbanističkim planom uvedeno je načelo povećanja otvorenog prostora između stambenih zgrada ukoliko je broj spratova veći od prosječna četiri sprata. Ovo načelo je provedeno prilikom planiranja novih naselja. U Urbanističkom planu Grada Sarajeva za period 1986. – 2015. (UPGS), određen je maksimalni koeficijent iskoristivosti parcele  $^3 \leq 1$  f za urbano područje grada, a maksimalni prosjek spratnosti povećan na šest etaža. Koeficijent iskoristivosti građevinske čestice (Ki) je omjer građevinske (bruto) površine zgrade i površine čestice, pri čemu građevinska površina zgrade podrazumijeva ukupnu izgrađenu površinu svih prizemnih spratova zgrade. Načelo povećanja rastojanja između planiranih, uglavnom stambenih zgrada u planiranim naseljima, definiranih u GUP-u, ostalo je na snazi i u UPGS-u. Važno je napomenuti da su u GUP-u i UPGS-u naglašeni problem temperaturne inverzije u Sarajevu kao i problem nepovoljne geomorfologije kotline koji negativno utiču na prirodnu ventilaciju u gradu, o čemu treba voditi računa u planiranju budućih koncepata razvoja.

Projekcija prostornog planiranja za funkciju stanovanja i djelatnosti stambene gradnje u Prostornom planu Kantona Sarajevo za period 2003. – 2023. (PPKS) zasnovana je na opredjeljenju da se:

- unaprijedi kvalitet života
- što racionalnije iskoriste površine građevinskog zemljišta i očuvanje okoline
- unaprijede sistemi održavanja postojećeg stambenog fonda kroz unapređenje zakonske regulative
- izgradnja stanova usmjeri na zacrtane osnovne pravce razvoja u skladu sa prihvaćenom distribucijom očekivanog broja stanovnika 2023. godine
- potrebne površine građevinskog zemljišta utvrde na osnovu prostornih mogućnosti
- angažovanje novih površina zemljišta za potrebe stanovanja i stambene izgradnje svede na najmanju mjeru, odnosno važeća provedbena prostorno-planska dokumentacija revidira i

---

<sup>3</sup> Koeficijent iskoristivosti građevinske čestice (Ki) je omjer građevinske (bruto) površine zgrade i površine čestice, pri čemu građevinska površina zgrade podrazumijeva ukupnu izgrađenu površinu svih prizemnih spratova zgrade.

aktuelizira u skladu sa potrebama broja stanovnika pojedinih općina do 2023. godine. Grad Sarajevo i Kanton Sarajevo nemaju odobrene Urbanističke planove.

## 5.2. Aktuelne promjene u konceptu urbanističkog planiranja

U izmjenama i dopunama Prostornog plana Kantona Sarajevo za period 2003. – -2023. - faza "A", stambeno područje je povećano prenamjenom nekoliko industrijskih zona u kombinirane stambeno poslovne zone, koje su uglavnom izvedene kao stambena područja, ali bez prethodnog usvajanja izmjena i dopuna Urbanističkog plana Grada Sarajeva za period 1986. - 2015.

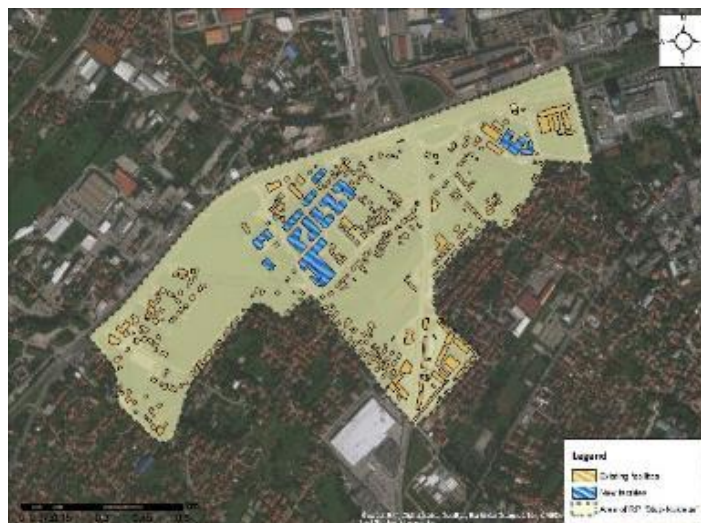
Neusvajanje gore navedenih izmjena i dopuna Urbanističkog plana bio je razlog što nisu donesene urbanističke i tehničke smjernice, kao što su smjernice o prosječnoj spratnosti, procentu izgrađenosti, koeficijentu iskoristivosti, broju stanovnika u planiranim stambeno-poslovnim zonama. Ovo je bilo naročito relevantno za razradu prostorno-planske dokumentacije za nekadašnja industrijska područja koja su prenamijenjena u poslovna i stambena područja. Analiza određenih regulacionih planova i njihove provedbe pokazuje konstantni trend povećanja spratnosti uglavnom za stambene objekte, kao i uočljivu promjenu drugih urbanističkih parametara i matrica kao što su procenat izgrađenosti (Pi) koeficijent iskoristivosti građevinske čestice (Ki). Na primjer u Regulacionom planu "Gradski centar - Marijin Dvor Centar" (2007) [46] je procenat izgrađenosti povećan sa 7.9% na 19.83%, a koeficijent iskoristivosti sa 0.4 na 0.95 [24]. Cifre u nastavku pokazuju postojeće izgrađene objekte u datom području, pri čemu su žutom bojom obilježeni objekti koji su izgrađeni tokom provedbe Regulacionog plana "Gradski centar - Marijin Dvor" dok su plavom bojom označeni objekti koji su nastali nakon usvajanja Regulacionog plana.

**Slika 5.1: Regulacioni plan Gradski centar "Marijin Dvor" [46]**



Drugi primjer urbanističkih promjena u Kantonu Sarajevo je područje Stupa. Procenat izgrađenosti u području Regulatornog plana "Stup-Nukleus" iznosi 13,43%, što je gotovo za 4% više nego 2010.g. Zgrade su većinom izgrađene na zelenim površinama, pri čemu se većinom radi o visokim građevinama sa veoma malim rastojanjem između pojedinih zgrada. Ukupna gustina je povećana uslijed nepostojanja regulacije.

Slika 5.2: Novi objekti planirani u Regulacionom planu "Stup-Nukleus". [47]



### 5.3. Građevinske prakse

U smislu dispozicije i oblika zgrada, Sarajevo ima nekoliko primjera veoma dobre građevinske prakse. U pogledu pozicioniranja zgrada u naselju Hrasno se nalazi nekoliko nebodera koji predstavljaju primjer dobrog rasporeda zgrada u pogledu urbane ventilacije (Slika 5.3). Četiri nebodera koji su poredani u mreži od dvije kolone i dva reda pri čemu je ostavljen veliki prostor između svakog od njih.

Slika 5.3: Primjeri nebodera u naselju Hrasno [48]



U Kantonu Sarajevo postoji nekoliko primjera veoma kvalitetnih mreža slobodnih prostora. Naselje Dobrinja karakteriziraju niže zgrade i nekoliko parkova koji se nalaze između kompleksa zgrada, kao i široke šetnice i sporedne ceste (Slika 5.4). Otvoreni prostori u Dobrinji (parkovi u konkretnom slučaju) povezani su prolazima između blokova zgrada i šetnicama. Zahvaljujući nižim zgradama i većem broju otvorenih prostora, brzina vjetra je veća nego u naseljima gdje gradnja zgrada i pozicioniranje otvorenih prostora nisu dobro osmišljeni.



**Slika 5.4: Satelitski snimak naselja Dobrinja kao primjer dobro povezanih otvorenih prostora [49]**



Nasuprot tome, naselje Alipašino Polje ima nekoliko parkova, ali zato i veliki broj visokih gusto raspoređenih zgrada (od kojih mnoge imaju više od 10 spratova). U Faza A naselja Alipašino Polje- i na Stupu su izgrađeni blokovi nebodera bez adekvatnih otvora ili prolaza između zgrada (Slika 5.5 i Slika 5.6). Posljedica toga je mnogo sporije strujanje vjetra u ovim područjima.

**Slika 5.5: Blokovi visokih zgrada u naselju Alipašino Polje [50]**



Izvor: uskinfo.ba

**Slika 5.6 - Blokovi visokih zgrada na Stupu [51]**



Izvor: sarajevo.co.ba

Sarajevo nema izrazitih primjera blokova sa zgradama različite visine. Tipični primjeri na koje bi se moglo primijeniti pravilo o gradnji zgrada različite visine nalaze se na području Čengić Vile i Otoke. (Slika 5.7) Ove zgrade su postavljene okomito u odnosu na uobičajeni istočni vjetar. Uslijed činjenice da nema promjene visine zgrada u ovim naseljima je onemogućeno strujanje zraka.

Slika 5.7: Primjeri nekih zgrada u naselju Čengić Vila



U Kantonu Sarajevo postoji samo nekoliko zgrada zaobljenog ili zakrivljenog oblika. Jedna od njih je Avaz Twist Tower. Zgrada je spiralnog oblika i vertikalni stubovi su pozicionirani kružno sa torzionom fasadom koja visi sa ispuštenih spratova [26]. Fasada ove zgrade je u obliku spirale koja se zavija 2,8 stepeni po spratu i ukupno rotira za 90 stepeni duž cijele visine. Avaz Twist Tower nema zaobljen oblike kao zgrada Gherkin, ali ipak ima nizak koeficijent otpora zraka. Međutim, većina zgrada u Kantonu Sarajevo su pravougaonog oblika, te predstavljaju prepreku strujanju zraka oko njih.

Slika 5.8: Avaz Twist Tower [52]



Slika 5.9: Primjeri tipičnih zgrada sa ravnim površinama u Kantonu Sarajevo



Kanton Sarajevo nema mnogo visokih zgrada sa izrazitim podijumom. Primjeri zgrada koje imaju podijum su SCC, Zgrada Parlamenta BiH i Bosmal City Centre (Slika 5.10). Sve ove zgrade imaju podijum sa konstrukcijom u obliku kocke, umjesto preporučenog terasastog oblika.

Kao prvo, bilo bi bolje da da je ostavljen prazan prostor koji bi omogućio strujanje zraka ove zgrade umjesto gradnje jednostavnog kvadratnog podijuma. Kao drugo, za efikasnije strujanje zraka bi bilo praktičnije izgraditi terasasti podijum.

**Slika 5.10: Bosmal City Centre**



U pogledu rastojanja između prednjeg dijela zgrada i regulacione linije, u Kantonu Sarajevo se mogu naći primjeri sa većim prostorom oko zgrade. Zgrada Parlamenta Bosne i Hercegovine (Slika 5.11) je prilično odmaknuta ceste što doprinosi boljoj cirkulaciji zraka. Alta šoping centar također je odmaknuta, ali u manjoj mjeri nego obližnja zgrada Parlamenta (Slika 5.12:). Sarajevo City Centre mogao je biti još jedan primjer zgrade koja je propisno odmaknuta od regulacione linije, ali je taj prostor ograničen parkingom, dok je s jedne strane zgrada veoma blizu ulice. Za urbanu ventilaciju bi bilo korisno da se poveća broj zgrada sa odgovarajućim prostorom + oko zgrade po uzoru na zgradu Parlamenta.

**Slika 5.11: Prikaz rastojanja između prednjeg dijela zgrade i regulacione linije na primjeru zgrade Parlamenta BiH [53]**





Slika 5.12: - Prikaz rastojanja na primjeru Alta Shopping Centra [54]



U Kantonu Sarajevo vangrađevnska područja uglavnom obuhvataju parkove sa zelenilom, sportske terene ili igrališta. Veliki park, koji se nalazi na ulici Maršala Tita je najveća zelena površina u centru grada. Park tokom ljetnih dana osigurava svjež zrak i hladovinu. Kanton Sarajevo ima veliki urbani park u Centru Safet Zajko, koji se nalazi u općini Novi Grad, duž rijeke Miljacke. Ovaj veliki park sadrži zelene površine, bazene, igrališta i sportske terene. Uz rekreacione sadržaje, ovaj park također održava zalihe svježeg zraka. Drugi primjeri urbanih parkova su Park svjetlosti, koji se nalazi u blizini Druge gimnazije i park Hastahana na lokaciji Marijin Dvora. Ovi prostori su veoma važni zbog efekta hlađenja koje pružaju parkovi u kontekstu zagađenja koje nastaje na okolnim cestama, zahvaljujući kojem formiraju male urbane ventilacione koridore u područjima u kojima su smješteni. Može se očekivati da će svaki veći otvoreni prostor, koji je udaljen od prometnih saobraćajnih arterija biti manje pogođen zagađenjem od saobraćaja (uslijed gradijenta lokalne disperzije) i pomoći širem strujanju zraka. Više vegetacije može pomoći apsorpciji nekih zagađujućih tvari. Tlo i vegetacija mogu pomoći u ublažavanju efekta toplinskih ostrva.

Slika 5.13: Urbani parkovi u Kantonu Sarajevo [55]



Vangrađevnska područja također obuhvataju nekoliko zelenih površina/neizgrađenih lokacija, kao što je naselje Alipašin Most, blizu zgrade Radiotelevizije Federacije Bosne i Hercegovine. Prostor koji se nalazi u Dobrinjskoj ulici na Stupu (Slika 5.14) predstavlja još jedan primjer ovakvih resursa. Ovi prostori su u blizini novih gradilišta i veoma je važno da se isti očuvaju kao vangrađevnska područja, budući da se nalaze na mjestima strujanja uobičajenog vjetrova. U novije vrijeme se u Kantonu Sarajevo broj gradilišta povećava, dok je broj zelenih površina u opadanju. Od suštinske je važnosti da se očuvaju postojeće zelene površine i da se na važnim područjima strujanja zraka/ventilacije, gdje god je to moguće, zabrani gradnja objekata. Bilo bi uputno da se poveća broj urbanih parkova kao što su

Centar Safet Zajko i park Hastahana zbog toga što su, uz to što zadovoljavaju potrebu za rekreacijom, korisni za smanjenje zagađenosti, zahvaljujući efektu hlađenja i strujanju svježeg zraka.

**Slika 5.14: Zelena polja i površine u području Alipašino Mosta i Stupa [56]**



Zagađenost zraka i toplotna ostrva predstavljaju najveće izazove za Kanton Sarajevo, te je rješavanje ovih problema od suštinske važnosti. Koeficijenti zagađenosti u izgrađenim područjima urbanog dijela Sarajeva u određenim zonama su porasli preko propisanih granica i stoga je važno da se ovi problemi riješe u najkraćem mogućem roku. Ovi problemi se mogu ublažiti istovremenom zaštitom i unapređenjem ventilacionih koridora. Za ovo je nužan angažman stručnjaka i aktera iz nadležnih organa radi cjelovitog pristupa sveobuhvatnim naporima u oblasti urbanističkog planiranja i projektovanja (ulica, parkova, zgrada i drugih urbanih sastavnica) što bi omogućilo bolju cirkulaciju zraka i smanjilo zagađenost zraka i istovremeno doprinijelo optimizaciji drugih prednosti, uključujući unapređenje biološke raznolikosti (putem povezivanja zelene infrastrukture), odvodnje, kretanja pješaka, izvora toplotne energije i sekvestracije ugljika. Daljnji urbani razvoj u Sarajevu mora uključivati dimenziju zaštite okoliša s ciljem postizanja održivosti u urbanističkom planiranju.

## 6. Metodologija za identifikaciju urbanih ventilacionih koridora

### 6.1. Fizički model

U studiji je korištena metoda Računarske dinamike fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) s nestacionarnim trodimenzionalnim modelom turbulencije vremenski osrednjenih Navier-Stokesovih jednažbi (eng. *Reynolds-Average Navier-Stokes* – RANS) [27]. Navier-Stokesove jednažbe koje definišu kretanje fluida u trodimenzionalnom prostoru su numerički riješene, što za rezultat ima 3D polja brzine i pritiska. Nestrukturirani CFD kôd baziran na metodi konačnih volumena „T-Flows“ [28], razvijen u TU Delft-u [33], korišten je za glavne proračune. Kôd se već duži niz godina koristi za računanje tokova fluida sa prenosom toplote u različitim konfiguracijama sa metodama Simulacija velikih vrtloga (eng. *Large Eddy Simulation* – LES), RANS, te hibridnih LES/RANS modela. Turbulencija je modelirana RANS k-eps- $\zeta$ -f modelom [34] koji je uspješno testiran na mnogim referentnim slučajevima i predstavlja standardni model u komercijalnim kodovima Računarske dinamike fluida (CFD) (AVL Fire).

### 6.2. Razmatrani scenariji

Razmatrana su dva scenarija: prvi u kojem je protok zraka u sarajevskoj dolini posljedica vjetra karakterističnog za razmatranu lokaciju i drugi scenarij u kojem je kretanje zraka uzrokovano samo silom uzgona nastalom uslijed temperaturnih razlika tla i okolnog zraka. Hrapavost terena modelirana je modelom poroznosti koji uzima u obzir karakteristike površine. Definisano je sedam zona terena (zona visokih zgrada, zona srednje visokih zgrada, zona niskih privatnih kuća, zona šuma, zona travnatih polja i parkova, zona rijeka i zona puteva) kojima su dodijeljene različite vrijednosti koeficijenta poroznosti, temperature i emisija zagađenja. Scenarij vjetrovitog dana uzima u obzir dva najčešća smjera vjetra i tri intenziteta vjetra, pretpostavljajući neutralnu stratifikaciju u atmosferi. Scenarij bez vjetra uzima u obzir zimski dan s izraženim potencijalnim temperaturnim inverzijama na 300m iznad tla i gradijentom od 4K/km u stabilnoj gornjoj atmosferi, gdje su protok zraka i transport zagađivača isključivo rezultat toplinskih efekata uzgona koji nastaju zagrijavanjem tla. Proračun bez vjetra je urađen kako bi se istražilo da li se isti zračni koridori identificirani u scenariju vjetrovitog dana pojavljuju i kada je strujanje zraka determinisano uzgonskom silom.

### 6.3. Proračunske domene

U studiji su korištena tri različita proračunska modela terena – mezo, lokalna i mikro skala. Domena mezo skale, prikazana na Slika 7.1, pokriva područje od 15 km x 13 km x 1,5 km i obuhvata cijelu sarajevsku dolinu, uključujući okolne planine. Proračuni na mezo skali su korišteni prvenstveno za identifikiranje zračnih koridora i sticanje šireg uvida u protok zraka kroz sarajevsku dolinu pod uvjetima karakterističnog vjetra. Zbog velike proračunske domene i ograničenih računarskih resursa, rezolucija mreže je takva da se zgrade i drugi dominantni objekti na terenu ne mogu direktno modelirati kao 3D objekti. Utjecaj ovih objekata je uzet u obzir kroz model poroznosti koji se obično koristi za predviđanje utjecaja prirodnih prepreka i prepreka koje su napravili ljudi na terenu, kao što su zgrade, drveće i sl.

Domena lokalne skale, prikazana na Slika 7.6, obuhvata urbani dio Sarajeva (zajedno sa Starim gradom) i prostire se na površini od 6 km x 1,8 km x 1 km. Manja veličina domene omogućava direktan prikaz visokih zgrada u modelu. Izračuni na modelu lokalne skale su korišteni za istraživanje utjecaja visokih zgrada na zračne koridore i nivo zagađenja.

Model mikro skale obuhvata naselje u Sarajevu s računskom rezolucijom mreže od 2-3 metra, prikazanom na Slika 7.9. Domena je korištena za procjenu utjecaja visine zgrada na nivo zagađenja, tj. za ispitivanje učinkovitosti eliminacije zagađenja zraka uslijed ulaznog vjetra, te korelacije istog sa urbanom formom naselja (raspored zgrada i stepen izgrađenosti naselja).



## 7. Detalji o proračunu

U Studiji su izvršeni sljedeći proračuni:

- Proračun na mezo skali za sarajevsku dolinu
- Proračun na lokalnoj skali za urbano područje Sarajeva
- Proračun na mikro skali za naselje Alipašin Most

Proračuni su izvršeni korištenjem open-source koda T-Flows, koji je razvijen na TU Delft-u i dostupan je putem GitHub platforme [28]. T-Flows je CFD kod baziran na metodi konačnih volumena gdje su diskretizirane Navier-Stokesove jednačbe s prijenosom topline i transportom koncentracije. Napisan je u Fortranu 90 i paraleliziran je korištenjem MPI protokola (eng. *Message Passing Interface* – MPI).

Proračuni rezultiraju vektorskim i skalarnim poljima iz kojih se mogu dobiti detalji o prostornoj i vremenskoj evoluciji protočnih i skalarnih polja nad gradom, u formatu koji se može otvoriti i dodatno istražiti pomoću većine CAD softvera komercijalnog i open-source tipa.

Proračuni zahtijevaju specifične informacije o stanju na granicama računске domene. Informacije o morfologiji terena i objekata rezolucije 20m, kao i podaci o dimenziji, položaju i orijentaciji dominantnih objekata dobiveni su iz GIS softvera sa inputima iz Zavoda za planiranje Kantona Sarajevo.

Za određivanje karakteristika vjetra (smjera i intenziteta) u proračunima, korišteni su prosječni intenzitet i smjer vjetra (ruža vjetrova) kao i godišnji i satni podaci o vjetru za 2016., 2017. i 2019. godinu na lokaciji Bjelave. Za scenarij bez vjetra su bili dostupni ograničeni podaci o temperaturi tla. Pretpostavili smo da je temperatura puteva, zgrada i kuća bila za jedan stepen Celzijusa viša od temperature zelenih polja i šumskih površina.

Proračun disperzije polutanata u zraku je urađen sa pretpostavkom da tokom transporta polutanata nema hemijskih reakcija polutanata kao i da polutanti ne utječu na dinamičko polje strujanja (tkz. pasivni skalar). Ova pretpostavka se može uspješno koristiti za većinu polutanata pristunih u zraku poput NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>5</sub> i PM<sub>10</sub>.

Sa ciljem provjere tačnosti i pouzdanosti usvojenih numeričkih metoda i modela turbulencije urađen je proračun za dva referentna slučaja, Gottingen Strasse, Hannover, Njemačka i brdo Askervein, Škotska, UK. Brdo Askervein je dobro dokumentovan referentni slučaj koji se često koristi kao testni slučaj za CFD metode za proračune vjetra na kompleksnim terenima. Terenska mjerenja za brdo Askervein u Škotskoj su izvršena u okviru projekta pod pokroviteljstvom Međunarodne agencije za energiju. Referentni slučaj Goettinger Strasse je slučaj koji se koristi za validaciju modeliranja transporta polutanata u zraku u urbanom okruženju. Mjerenja protoka i zagađenja u četverotračnoj cesti širokoj 25 metara koja se nalazi u gradu Hannover u Njemačkoj sproveda je Agencija za ekologiju Donje Saksonije (NLÖ). Detaljan opis oba referentna slučaja s referencama i rezultatima proračuna nalazi se u Dodatku 1 izvještaja.

Tokom studije su korištene ograničene informacije o lokalnoj klimi te je utvrđena potreba za preciznijim informacijama potrebnim za preciznije definisanje graničnih uvjeta kao što su:

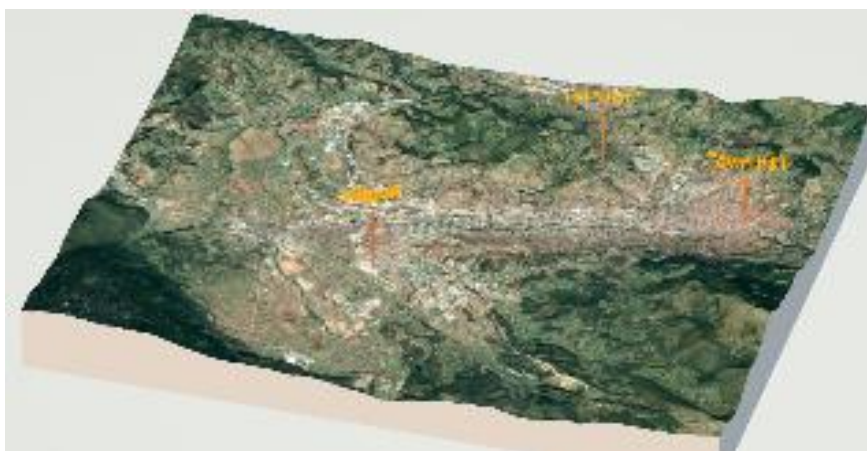
- Tipično trajanje vjetra (smjera i intenziteta) tokom različitih godišnjih doba
- Tipična temperatura zgrada, kuća, puteva i zelenih površina u različitim vremenskim uvjetima
- Karakteristike graničnog sloja atmosfere (visina, tačka inverzije, temperaturni gradijent u gornjem inverzijskom sloju itd.)
- Informacije o emisijama zagađivača zraka iz prizemnih izvora zbog grijanja u domaćinstvima i saobraćaja.

Preporučujemo izradu studije o mikroklimi koja će pružiti informacije o vremenskim obrascima u sarajevskoj dolini a koji bi se koristili u budućim proračunima strujanja zraka u sarajevskoj dolini.

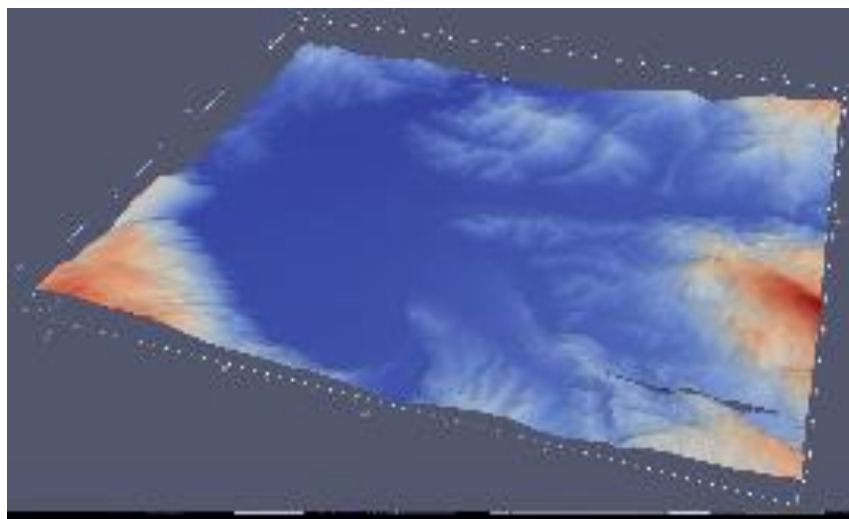
## 7.1. Proračuni na mezo skali

Proračuni na mezo skali su urađeni s ciljem identificiranja glavnih zračnih koridora kroz sarajevsku dolinu i analize korelacije između zračnih koridora i nivoa zagađenja u urbanim područjima Sarajeva. Proračunska domena, prikazana na Slika 7.1, obuhvata područje od 15 km x 13 km x 1,5 km. Domena uključuje sarajevsku dolinu zajedno s njenim okruženjem. Očekuje se da orografija terena značajno utječe na polje brzine zbog svog složenog i neravnog oblika. Domena je orijentisana na pravce istok-zapad i sjever-jug. Računska mreža se sastoji od skoro 8 miliona računskih ćelija s 440 x 500 x 36 ćelija u smjerovima x, y i z. Rezolucija mreže u urbanom području Sarajeva iznosi oko 30 metara. Visina tla varira od 490m nadmorske visine (najniža tačka) do 1580m (najviša tačka). Centri računskih ćelija na tlu su u prosjeku 4m iznad tla. Gornja granica nalazi se na 2500m nadmorske visine. Pretpostavljeno je da rijeke koje teku kroz područje proračuna, prikazane na Slika 7.4, teku brzinom od 1m/s.

**Slika 7.1: Satelitska slika modela terena [57]**



**Slika 7.2 – Površina proračunske domene s visinom terena prikazano bojama**

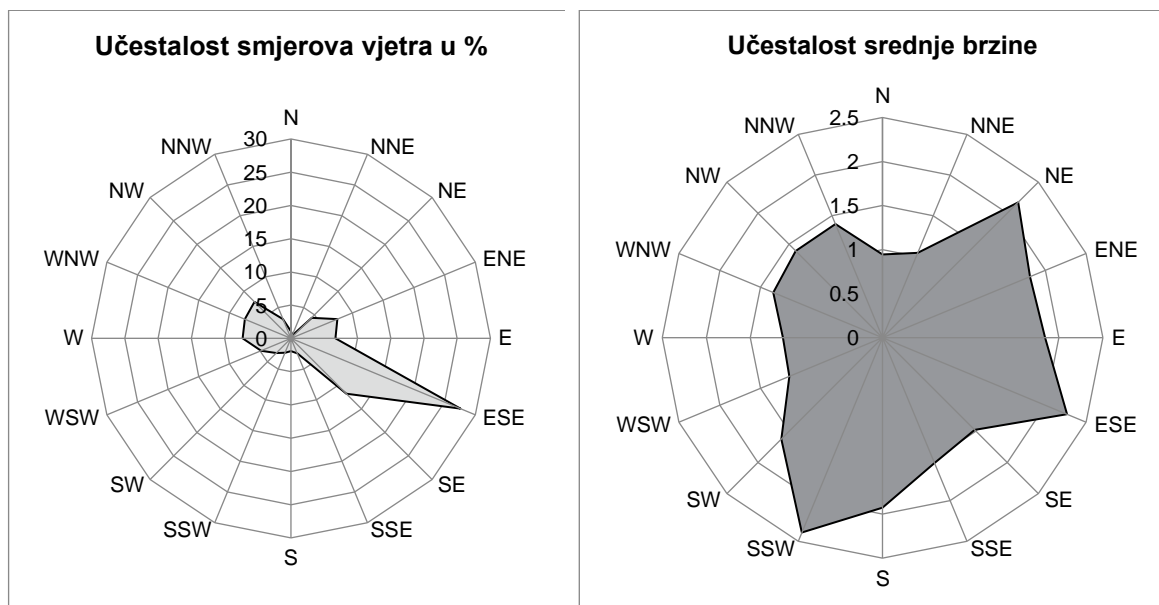


Proračuni na mezo skali su urađeni za dva najčešća smjera vjetra prema ruži vjetrova prikazanoj na Slika 7.3 (istočno-jugoistočni, 120° i zapadni, 270°) i tri vrijednosti referentnog intenziteta vjetra, 1m/s, 1,8m/s i 3m/s, kao i za scenarij bez vjetra u kojem je protok zraka uzrokovan samo silom uzgona. Pod referentnim intenzitetom vjetra se podrazumjeva intenzitet vjetra na 10 metara iznad tla u potpuno razvijenom tok preko ravne ploče i koeficijentom hrapavosti od 0,16m koji se nameće kao granični uvijet za domenu prekursora. Sljedeće pretpostavke su usvojene za scenarij s vjetrom:

- Vjetar puše stalnim intenzitetom i smjerom i to u trajanju od 10 sati za intenzitete vjetra od 1m/s i 1,8 m/s, i 3,5 sati za intenzitet vjetra od 3 m/s).

- Pretpostavlja se neutralno stratificirani atmosferski granični sloj za slučajeve sa definisanim vjetrom, tako da je sila uzgona zanemarena.
- Početno stanje pretpostavlja situaciju bez vjetra (brzina zraka svuda u domeni je jednaka nuli) i visoku koncentraciju zagađenja na tlu.

**Slika 7.3: Ruža vjetrova za Sarajevo u 2018. godini prema podacima Federalnog hidrometeorološkog zavoda**



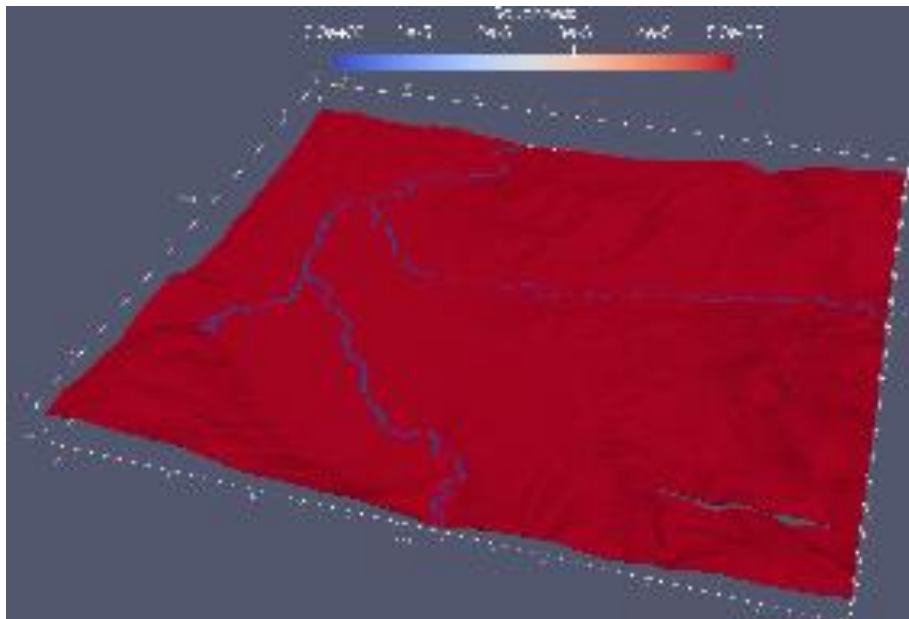
Za postavljanje graničnih uvijeta za ćelija na tlu su korištene standardne zidne funkcije koje uključuju hrapavost tla. Utjecaj prirodnih prepreka (šuma, rijeka, travnatih polja) i prepreka koje su napravili ljudi (građevina, kuća, mostova, cesta) na tlu je modeliran pomoću modela hrapavosti [35]. Glavnom parametru modela, odnosno visini hrapavosti (poznatom i kao aerodinamička hrapavost)  $Z_0$ , dodijeljene su različite vrijednosti za različite tipove terena slijedeći preporuke iz literature [36]. Definisali smo sedam tipova terena s odgovarajućim vrijednostima  $Z_0$  kako slijedi:

1. Rijeke,  $Z_0 = 0$ , glatki, pokretni zid brzine 1m/s
2. Zgrade visine 40m i više,  $Z_0 = 5m$
3. Zgrade visine 15m-40m,  $Z_0 = 3m$
4. Privatne kuće (visine do 15 m),  $Z_0 = 1.5m$
5. Zelene površine,  $Z_0 = 0.16m$
6. Šume,  $Z_0 = 2.3m$
7. Putevi,  $Z_0 = 0.5m$

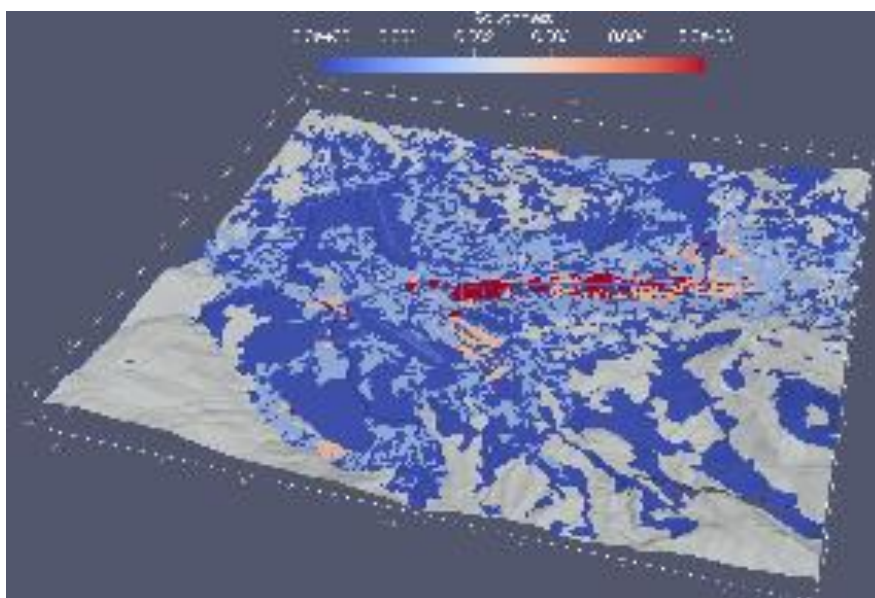
Zone hrapavosti su definisane uz pomoću softvera za Geografski informacioni sistem (GIS).  $Z_0$  vrijednosti su zatim interpolirane na računске ćelije na tlu, kao što je prikazano na Slika 7.5.



Slika 7.4: Rijeke uključene u računski model



Slika 7.5: Mapa hrapavosti preklapljena s površinom



Granični uvjet koji definiše ulaz vjetra u računsku domenu za istočno-jugoistočni smjer vjetra definisana je s posebnom pažnjom, jer je teren na kojem zrak ulazi u proračunsku domenu vrlo nepravilan i neravan. Kako bi se kreirali realistični uvjeti na ovoj granici, prethodno je izračunato strujanje zraka u prekursor domeni od 12km x 12km x 1,8km koja se nalazi 9km uzvodno od granice glavne domene na kojoj je definisan ulaz zraka. Domena prekursora se preklapa s glavnom domenom u dužini od 3 km. Profil brzine zraka za potpuno razvijeni tok preko ravne ploče je postavljen kao granični uslov za ulaz u prekursor domenu. Polja brzine i turbulencije izvučena iz rješenja prekursora su zatim korištena kao ulazni uvjet za proračune na mezo skali za slučaj istočno-jugoistočnog smjera vjetra. Ulazni granični uvjet za zapadni smjer vjetra definisan je pomoću profila brzine i turbulencije dobivenih iz prethodno izračunatog potpuno razvijenog toka preko ravne ploče. Na ostalim granicama domene, a koje nisu tlo, (lateralna, gornja i izlazna granica) je korišten granični uvjet koji pretpostavlja konstantan pritisak.

Scenarij bez vjetra izračunat je na osnovu pretpostavke da vjetar ne ulazi u proračunsku domenu. Referentna potencijalna temperatura je definisana sa gradijentom od 4K/km sa tačkom inverzije na

300m. Simulirali smo vremenski period u kojem se pretpostavlja konstantna temperatura tla. S obzirom da u momentu izrade studije nije bila dostupna detaljna prostorna raspodjela temperature tla, pretpostavili smo da zone s objektima imaju temperaturu od 1,74°C dok ostale zone (zelene površine i šume) imaju temperaturu jedan stepen niže, odnosno 0,74°C. Pretpostavljeno je da je temperatura rijeka 6°C.

Premda su pretpostavljeni granični uvjeti realni, potrebne su detaljnije informacije o glavnim karakteristikama vjetra na granicama računarskih domena kako bi se izračunali i drugi stvarni scenariji. Kao što je spomenuto u prethodnom odjeljku, bilo bi neophodno izraditi studiju o urbanoj mikroklimi u Sarajevu kako bi se došlo do takvih podataka. Takva studija bi identificirala glavne obrasce vjetra u Sarajevu, raspodjelu temperature na površinskom nivou, karakteristike inverzijske tačke i sloja miješanja u slučaju bez vjetra, otoke topline, kao i utjecaj Miljacke na lokalnu temperaturu i polja brzine. Gradovi provode takve studije kako bi predvidjeli utjecaje budućeg urbanog razvoja na zdravlje svojih građana, potražnju za energijom i saobraćajni sistem (vidjeti primjer [30]).

Pored polja brzine i turbulencije, izračunali smo i transport polutanata u zraku. S obzirom da su polutanti tretirani kao pasivni skalar, izračunata koncentracija može biti bilo koja uobičajeno mjerena komponenta zagađenja zraka, kao što su PM<sub>5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> itd. Odabrali smo PM<sub>10</sub> kao reprezentativnog zagađivača, budući da za PM<sub>10</sub> imamo najsveobuhvatnija mjerenja, na osnovu kojih smo definisali granične i početne uvjete. Pretpostavlja se da emisije PM<sub>10</sub> nastaju zbog saobraćaja i domaćinstava (grijanje). Emisije (g/s) su ugrubo procijenjene na osnovu dostupnih podataka u Kantonu Sarajevo, ali i na osnovu prethodnih studija koje su provedene u Kantonu Sarajevo. Emisije iz izvora koje su uzrokovane aktivnostima u domaćinstvima izražene su u g/km<sup>2</sup>h (grama po kvadratnom kilometru (km<sup>2</sup>) i po satu (h)), dok su emisije iz saobraćaja izražene u g/(km h). Izvori zagađenja su prilikom proračuna tretirani kao konstantni. Pretpostavlja se da ulazni vjetar ima nizak nivo zagađenja sa vrijednostima PM<sub>10</sub> od 5µg/m<sup>3</sup>. Maksimalna koncentracija PM<sub>10</sub> je 200µg/m<sup>3</sup> u nivou tla i smanjuje se sa udaljenošću od tla. Modelirali smo vertikalnu raspodjelu PM<sub>10</sub> na osnovu mjerenja pomoću dronova na Aerodromu Sarajevo tokom epizode visokog zagađenja u zimu 2018. godine koje je proveo docent dr. Adnan Mašić sa Mašinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu (privatna komunikacija).

Intenzitet zagađenja iz različitih kategorija izvora je procijenjen na temelju dostupnih podataka i preporuka iz literature [37], [38], [39]. Usvojene su sljedeće vrijednosti za izvore zagađenja:

- Saobraćaj - 10g/(km h)
- Izgaranje goriva (drvenog uglja i ogrjevnog drveta) u domaćinstvima – 0,01g/(km<sup>2</sup> h)
- Stambeni prostori grijani pomoću centralnih grijnih jedinica (prirodni gas) – 0,0001g/(km<sup>2</sup> h).

## 7.2. Proračuni na lokalnoj skali

Proračuni na lokalnoj skali su nadopuna proračunima na mezo skali budući da proračunska domena pokriva dio domene koji se koristi u proračunu na mezo skali. Pored manjeg proračunskog domena, glavna razlika u odnosu na proračune na mezo skali je 3D modeliranje najdominantnijih objekata na terenu. To nam omogućava da dobijemo više detalja o dinamici protoka zraka poput zona separacije i područja niskog intenziteta strujanja zraka. Kompleksna interakcija između strujanja zraka i objekata na tlu se ne modelira pomoću efekta hrapavosti, već se direktno računa preko definisanih graničnih uslova. Proračuni na lokalnoj skali su korišteni za određivanje karakteristika glavnih zračnih koridora, kao i za procjenu utjecaja visokih zgrada na intenzitet strujanja zraka duž zračnih koridora. Direktno modeliranje zgrada također omogućava identificiranje područja visokog zagađenja koja su uslovljena pojavom separacionih zona uzrokovanih visokim zgradama ili prirodnim preprekama.

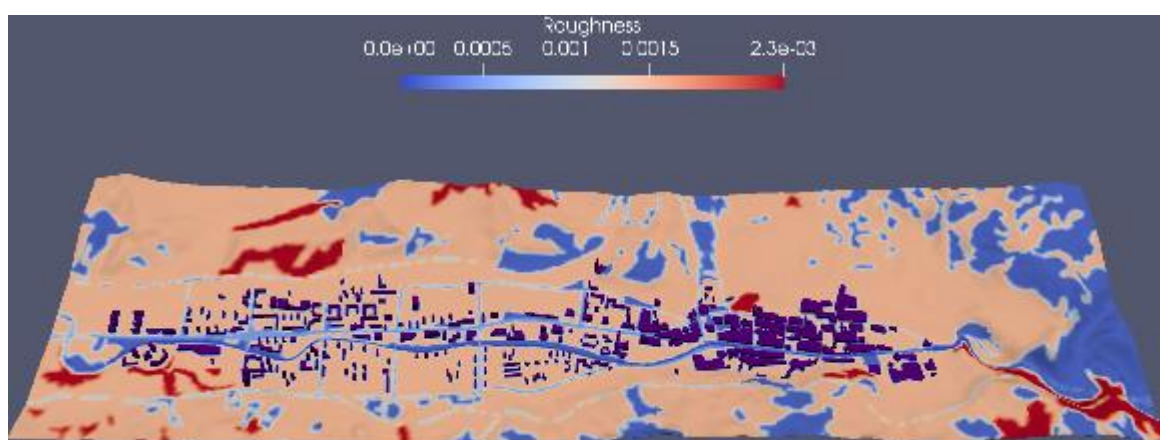
Proračuni na lokalnoj skali su vršeni za slučaj najčešćeg smjera vjetra (istočni-jugoistočni, 120°) i referentnu jačinu vjetra od 1,8 m/s.

Proračunska domena, prikazana na Slika 7.6, obuhvata područje veličine 6 km x 1,8 km x 1 km i uključuje većinu urbane zone grada Sarajeva (Stari grad i administrativni centar na Marijin Dvoru). Računska mreža se sastoji od skoro 6 miliona ćelija s 440 x 500 x 36 ćelija u smjerovima x, y i z. Rezolucija mreže u urbanom području Sarajeva iznosi oko 7 metara. Visina tla varira od 490m (najniže tačke) do 1580m (najviše tačke). Centri ćelija na tlu se nalaze oko 2,5 m. Pretpostavljeno je da rijeka Miljacka, koja teče kroz proračunsko područje, teče brzinom od 1 m/s.

Slika 7.6: Satelitska slika regije uključene u proračunsku domenu sa modeliranim objektima na terenu [58]



Slika 7.7: Modelirani objekti na terenu



Kao što je to bio slučaj u proračunima na mezo skali, za definisanje graničnih uslova na tlu se koristila zidna funkcija. Ista mapa hrapavosti se koristila kao i u slučaju proračuna na mezo skali, vidjeti Slika 7.7. Polje brine zraka na ulazu u domenu je definisano koristeći rezultate proračuna na mezo skali za slučaj istočno-jugoistočnog smjera vjeta. Bočne (južna i sjeverna), gornja i izlazna granica je tretirana kao granica sa konstantnim pritiskom.

Za razliku od proračuna na mezo skali, izvor zagađenja uzrokovanog saobraćajem nije konstantan u vremenu već je modeliran kao funkciju vremena. Podaci o saobraćaju su dobiveni iz izvještaja Direkcije za puteve Kantona Sarajevo za 2016. Izvještaj sadrži podatke o satnom broju vozila na nekoliko lokacija u gradu. Kao referentnu lokaciju smo odabrali lokaciju Marijin Dvora i na osnovu tih podataka napravili aproksimacijsku krivulju broja vozila u vremenu. Također smo pretpostavili da 77% svih vozila imaju dizelske motore na osnovu izvještaja koji je objavio BIHAMK [31]. Nivo zagađenja uzrokovanog sistemima grijanja u domaćinstvu je modeliran kao konstanta s obzirom da prikupljeni podaci pokazuju da postoji mala varijacija u intenzitetu izvora za razmatrano razdoblje dana (od 7 do 19 sati).

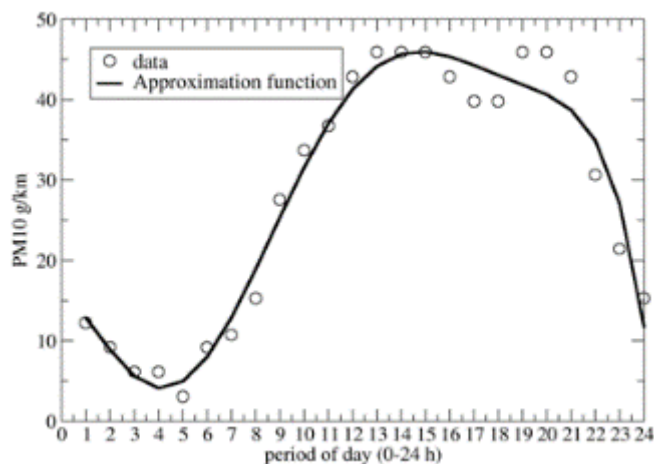
Usvojene su sljedeće vrijednosti za izvore zagađenja:

- Izgaranje goriva (drvenog uglja i ogrjevnog drveta) u domaćinstvima –  $0,01\text{g}/(\text{km}^2\text{ h})$
- Stambeni prostori grijani pomoću centralnih grijnih jedinica (prirodni gas) –  $0,0001\text{g}/(\text{km}^2\text{ h})$ .

Kao što je to bio slučaj u mezo skali, početna vrijednost  $\text{PM}_{10}$  na nivou tla ima maksimalnu koncentraciju od  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$  i smanjuje se povećanjem udaljenosti od tla.



Slika 7.8 Procjena intenziteta zagađivača PM<sub>10</sub> na osnovu gustoće saobraćaja na lokaciji Marijin Dvor



Izvor: Direkcija za puteve KS, 2016.

### 7.3. Proračuni na mikro skali

Proračuni na mikro skali su korišteni za analizu utjecaja visine objekata na polje strujanja zraka i nivo zagađenja. Kao studiju slučaja izabrali smo stambeni i poslovni kompleks Nova Otoka u središnjem dijelu Sarajeva. Nova Otoka je odabrana jer se sastoji od objekata različitih veličina i orijentacije, ali i zbog novog regulacionog plana kojim će se postojeće naselje značajno izmijeniti. Prema usvojenom regulacionom planu, planira se proširenje naselja Nova Otoka kako s aspekta visine postojećih zgrada, tako i izgradnje novih zgrada. Kao što je prikazano na Slika 7.9, postojeće zgrade u tom naselju imaju različite visine i oblike. Regulacioni plan predviđa izgradnju dodatnih etaža na nekim od postojećih zgrada, ali i izgradnju novih zgrada, tako da će se znatno povećati stepen izgrađenosti, kao što se može vidjeti na Slika 7.10. Za potrebe ove analize su dvoje arhitekata, dr. Dina Šamić i prof. dr. Sanela Klarić dizajnirale prilagođenu urbanu formu. Prilagođenu urbanu formu Nove Otoke, prikazanu na Slika 7.11, odlikuju zgrade male visine orijentisane u smjeru vjetra, s većim površinama slobodnog prostora između njih. Ovaj prilagođeni model dizajniran je s ciljem da se ispita mogućnost dodatnog smanjenja zagađenja zraka smanjenjem visine zgrada i stepena izgrađenosti.

Izračunali smo protok kroz naselje Nova Otoka za sljedeće tri urbane forme: postojeća urbana forma (Slika 7.9), urbana forma planirana regulacionim planom (Slika 7.10) i prilagođena urbana forma (Slika 7.11). Svi proračuni su izvršeni korištenjem nestacionarne RANS metode sa vremenom proračuna u trajanju od jednog sata. Proračuni na mikro skali su izvedeni pomoću CFD open-source kôda "Open source Field Operation and Manipulation" (OpenFOAM). Turbulencija je modelirana standardnim k-epsilonskim modelom [40]. Ovaj model je najčešće korišteni i validirani model turbulencije, koji ima širok raspon primjene.

Dimenzije proračunskih domena bile su 1000m, 560m i 365m u smjerovima x, y i z. Ukupan broj ćelija bio je 2.427.160, uz veću rezoluciju računarske mreže u oblastima u kojima se očekuju veliki gradijenti varijabli. Ćelije blizu tla bile su visine 1,6 m, što znači da su informacije o svim izračunatim varijablama bile dostupne na visini od 0,8 m od tla.

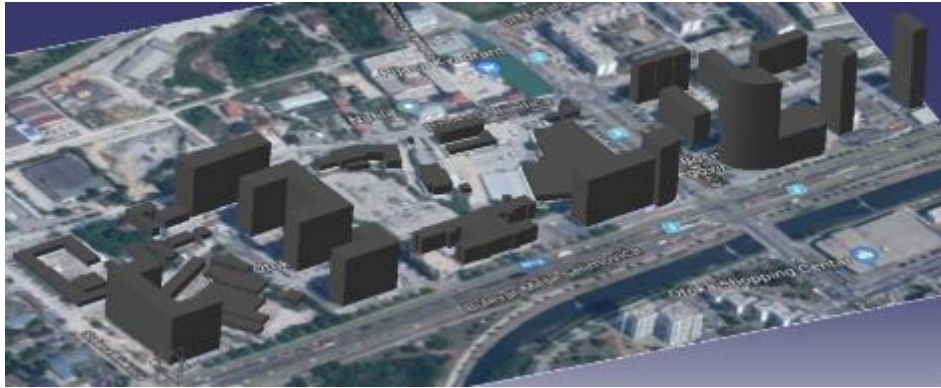
Za sva tri rasporeda su korišteni isti granični i početni uvjeti. Pretpostavljen je konstantan zapadni vjetar, referenciran prema izmjerenom najčešćem smjeru vjetra iz najbliže meteorološke stanice. Ulazni uvjeti su definisani kao potpuno razvijeni tok zraka sa brzinom od 1 m/s na visini od 25 metara od tla. Sila uzgona je zanemarena.

Granični uvjet na tlu je definisan preko zidnih funkcija. Na bočnim i gornjim granicama je korišteno simetrično granično stanje. Model hrapavosti nije korišten jer su prepreke na tlu modelirane kao 3D objekti.

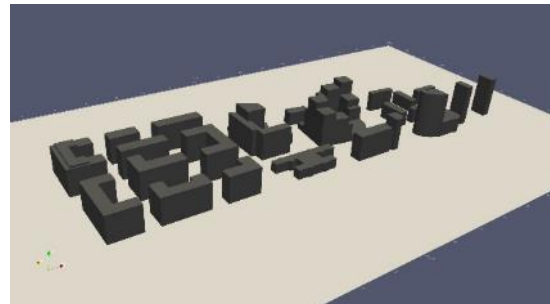
Početni uvjeti su pretpostavljali da je koncentracija polutanta 20µg/m<sup>3</sup>, homogeno raspoređena u cijelom domenu i bez vjetra. Polutant je tretiran kao pasivni skalar (bez hemijske reakcije) što znači

da može predstavljati prijenos bilo kojeg od najčešćih polutanata u zraku, poput čestica PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> ili plinova poput CO ili NO<sub>x</sub>. Pretpostavlja se da ulazni zrak ima četiri puta manju koncentraciju polutanta (5 µg/m<sup>3</sup>) od zraka definisanog početnim stanjem. Ravnomjerni nivoi zagađenja koji su korišteni možda nisu realni za urbano okruženje; međutim, omjer nivoa zagađenja zraka (definisan početnim stanjem) i dolaznog vjetra je ključna varijabla za ovu analizu.

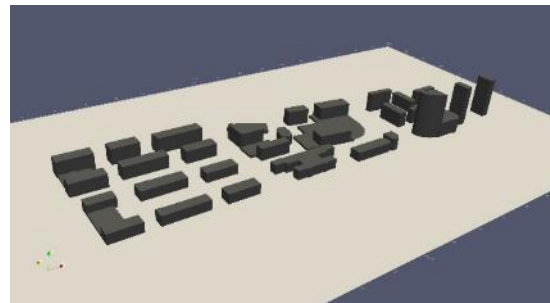
Slika 7.9: Postojeća urbana forma u naselju Nova Otoka [59]



Slika 7.10: Urbana forma planirana regulacionim planom u naselju Nova Otoka



Slika 7.11: Prilagođena urbana forma u naselju Nova Otoka



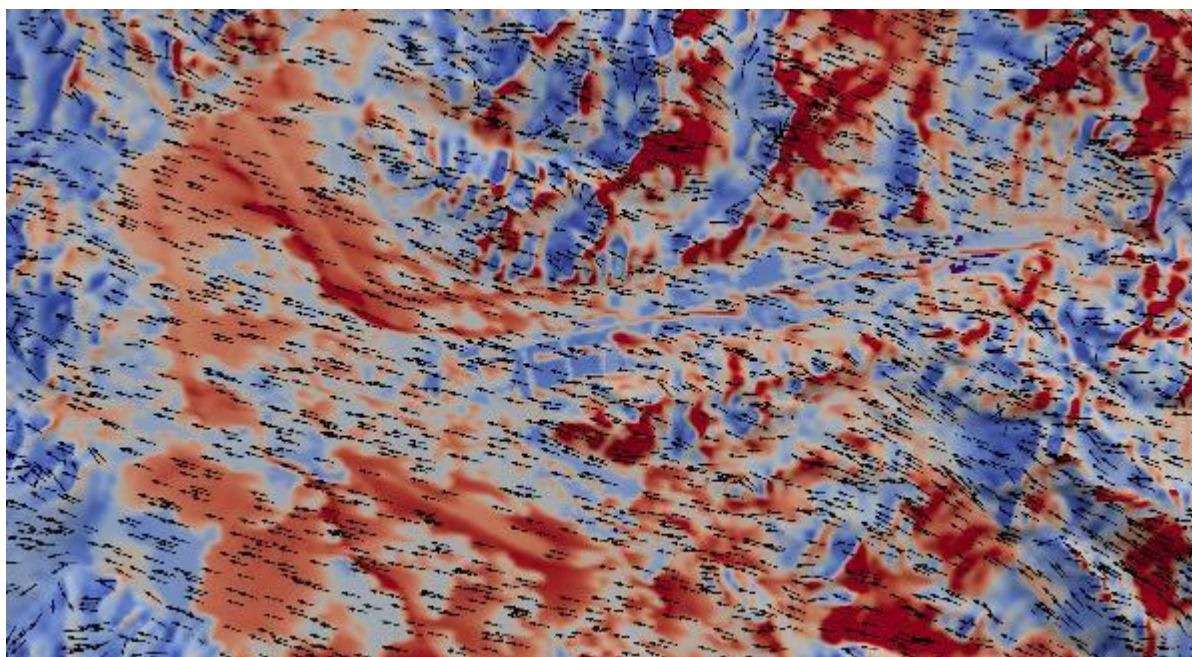


## 8. Identifikacija postojećih zračnih koridora i njihovih karakteristika

Zračni ventilacioni koridori su koridori pomoću kojih svjež zrak ulazi u urbana područja Sarajeva. Zračni koridori određeni su kako orografijom terena, tako i objektima na terenu (zgrade, mostovi, itd.) koji u određenim smjerovima blokiraju ili kanaliziraju strujanje zraka. Riječni kanjoni i kanali, kao i ulični kanjoni, često određuju lokaciju i oblik zračnih koridora u gradovima. Dobra ventilacija urbanih područja ovisi o postojanju zračnih koridora. Stoga, važno je identificirati područja zračnih ventilacionih koridora kako budući razvoj gradova ne bi imao negativan utjecaj na postojeće zračne koridore. Nadalje, pametno urbano planiranje može poboljšati postojeće zračne koridore i stvoriti nove. Zračne koridore karakteriše veća brzina zraka u odnosu na okolni zrak, pa se zračni koridori mogu identificirati analizom polja brzine.

Prvo ćemo analizirati rezultate proračuna na mezo skali kada puše istočno-jugoistočni (najčešći) vjetar. Na Slika 8.1 je prikazano polje brzine 4 metra iznad tla u domenu mezo skale za slučaj sa referentnom brzinom od 1,8 m/s. Složena orografija terena podrazumijeva kompleksnu raspodjelu brzina zraka blizu tla. Maksimalne vrijednosti u polju brzine pojavljuju se u područjima vrhova brda kao rezultat zakona o održanju mase, nakon čega zrak usporava i separira na nekoliko lokacija. Separacione zone uslovljavaju područja sa brzinama niskog intenziteta nizvodno od mjesta na kome tok prvobitno separira. Pored separacionih zona, područja sa niskim brzinama zraka se pojavljuju na mjestima sa visokim koeficijentom hrapavosti (područja klasificirana kao šume ili područja visokih zgrada).

**Slika 8.1: Intenzitet polja strujanja zraka za slučaj sa referentnom brzinom od 1,8m/s<sup>4</sup>**



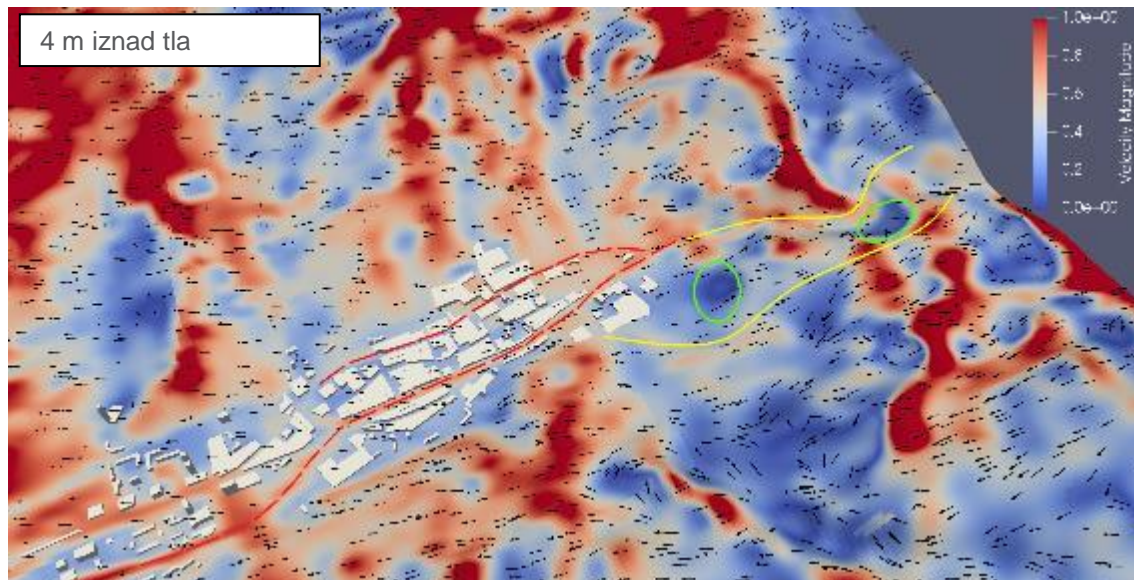
Na slikama 8.2 i 8.3 prikazana su polja brzine na površini četiri metra iznad zemlje za istočno-jugoistočni smjer vjetra i referentnog intenziteta vjetra od 1m/s i 3m/s. Separacione zone identificirane smjerom vektora označena su zelenom linijom, dok su žutom linijom označeni glavni pravci strujanja zraka prema urbanim dijelovima grada iz pravca planine Trebević i kanjona rijeke Miljacke na istoku. Dvije separacione zone su identificirane na obroncima brda Trebević. Dovod svježeg zraka u grad je usporen zbog pojave separacionih zona koje značajno smanjuju intenzitet strujanja zraka. Glavni

<sup>4</sup> Korištena je jedinstvena dužina vektora za bolju vizualizaciju smjera vjetra

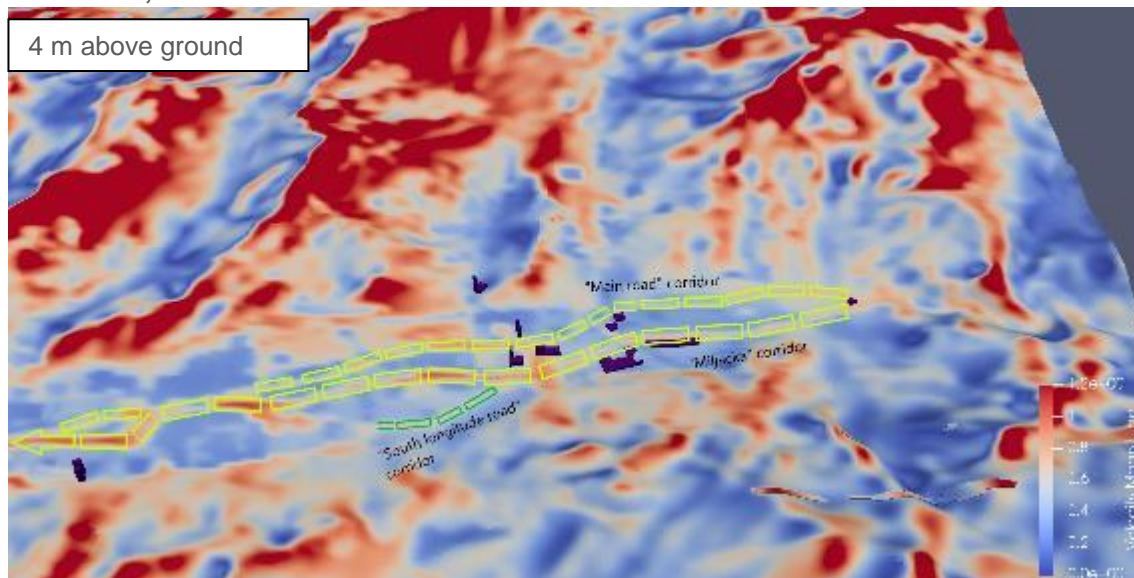


pravci strujanja zraka prema gradu sa istoka su isti za tri izračunate referentne brzine. Izuzev različitih vrijednosti intenziteta strujanja, lokacije zona visoke i niske vrijednosti intenziteta strujanja su slične za tri referentne brzine.

**Slika 8.2: Intenzitet polja strujanja zraka s korespondirajućim vektorima u slučaju referentne brzine od 1m/s**



**Slika 8.3: Intenzitet polja strujanja zraka s korespondirajućim vektorima u slučaju referentne brzine od 1,8m/s**

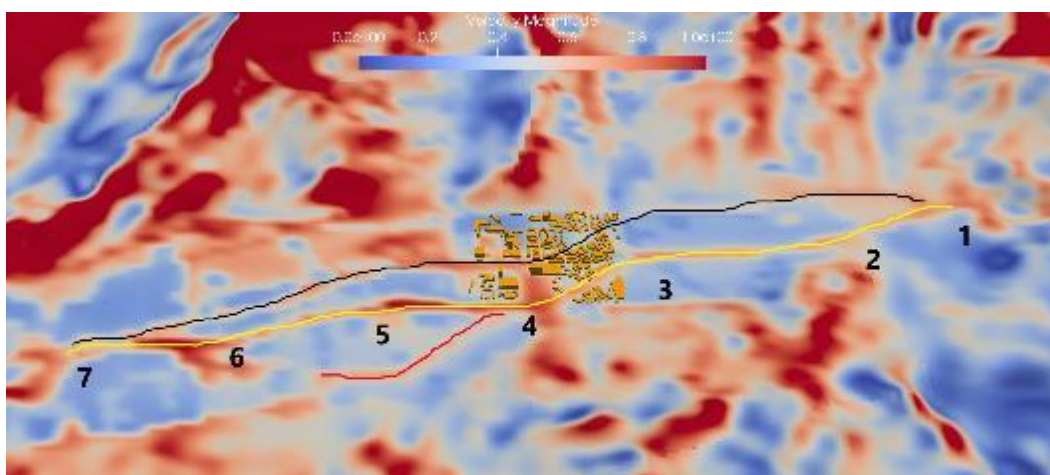


Rezultati proračuna na mezo skali ukazuju na postojanje dva glavna zračna ventilaciona koridora i nekoliko manjih koridora. Najveći zračni koridor, vidljiv u polju intenziteta brzine prikazanom na slici 8.2, formiran je duž korita rijeke Miljacke. Intenzitet strujanja zraka duž ovog koridora značajno je veći od intenziteta strujanja izvan područja koridora, te stoga značajno doprinosi ventilaciji zraka u urbanim dijelovima grada. Ovaj zračni koridor smo nazvali koridor Miljacka. Koridor Miljacka formira se na mjestu gdje rijeka Miljacka ulazi u grad. Glavni dovod zraka u ovaj zračni koridor dolazi iz pravca

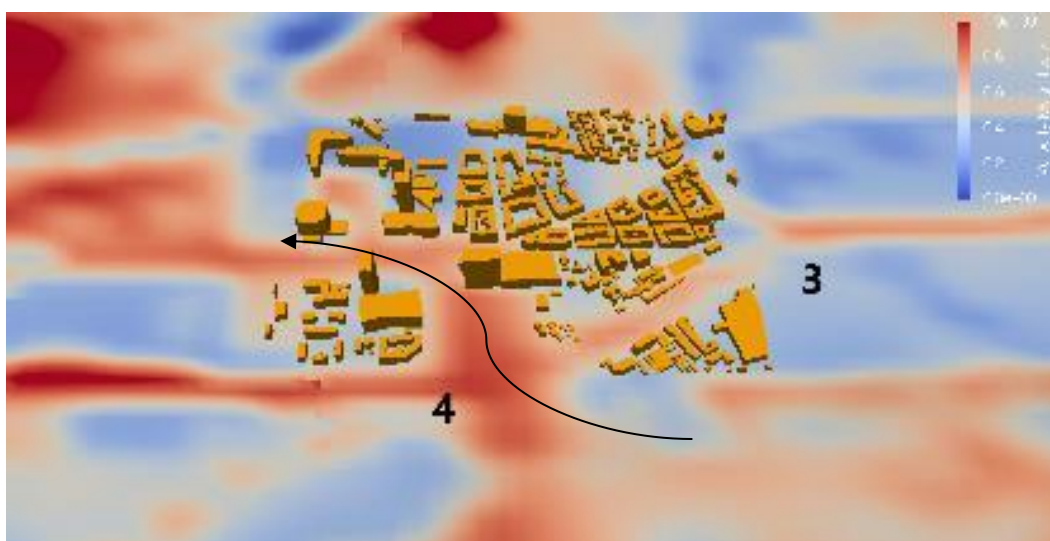
kanjona Miljacke uzvodno. Širina koridora Miljacka približno je jednaka kanalu rijeke. Intenzitet strujanja zraka duž koridora nije konstantan, već varira. Intenzitet brzine na zračnom koridoru na lokacijama označenim tačkama na slikama 8.2 i slici 8.3 za tri referentne brzine prikazani su na slici 8.4. Intenzitet brzine varira duž koridora. Minimalna brzina je oko 0,4m/s za referentnu brzinu od 1m/s dok je maksimalna brzina blizu 1,7 m/s za referentnu brzinu od 1,8 m/s.

Brojevima smo na slici 8.4 označili neke karakteristične lokacije duž koridora Miljacka. Na intenzitet protoka zraka duž koridora utječe orografija terena i blizina visokih zgrada. Na segment 1-2 koridora utječe područje male brzine uslovljeno prisustvom separacione zone na strani Trebevičkih brda odakle puše vjetar. Na tački 2 se protok duž koridora pojačava usljed dodatnog priliva zraka (označeno strelicom). Intenzitet brzine na segmentu 2-3 je više ili manje konstantan. Kako riječno korito mijenja smjer u tački 3, tako se i protok zraka usporava. Zračna struja duž koridora odvaja se na tački 3, gdje jedan ogranak nastavlja duž kanala Miljacka, a drugi se usmjerava glavnom cestom. Zanimljivo je primijetiti da se intenzitet brzine ne razlikuje mnogo za referentne brzine 1 m/s i 1,8 m/s na lokaciji 2 i 3. Blizina brda ovim lokacijama može biti uzrok tome.

**Slika 8.4: Zračni koridori vidljivi u polju intenziteta brzine iz proračuna na mezo skali za slučaj sa referentnom brzinom od 1,8 m/s.**



Crna linija – koridor Glavna saobraćajnica, Žuta linija – koridor Miljacka, Crvena linija – koridor Zagrebačka ulica

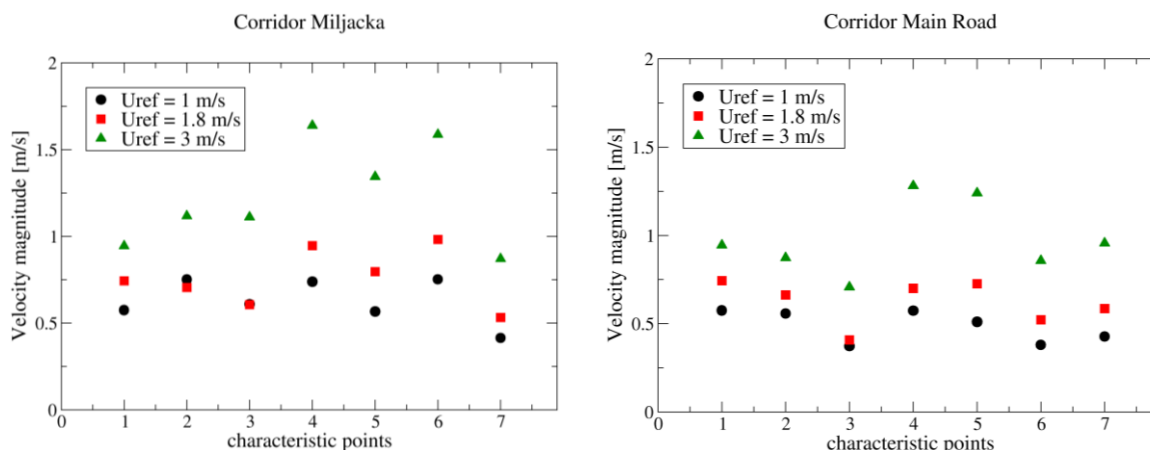




Minimalna vrijednost intenziteta strujanja zraka pojavljuje se u tački 3 gdje se koridor Miljacka razdvaja na dvije struje kao što je vidljivo na Slici 8.5. Intenzitet brzine vjetra se ne mijenja znatno duž koridora za slučaj referentne brzine od 1 m/s, dok su za slučajeve 1,8 i 3 m/s prisutne veće razlike u minimalnim i maksimalnim vrijednostima. Širina koridora u prosjeku iznosi oko 75 metara. Koridor je najuži na segmentu Dariva – Skenderija, sa širinom od 50-60 metara zbog neposredne blizine zgrada uz obalu rijeke. Koridor je najširi u naselju Dolac Malta sa širinom od 100-110 metara. Mjesto na kojem se koridor završava kada puše istočni vjetar prikazan je na Slici 8.4. Glavni koridor prestaje nakon što rijeka Miljacka uđe u Sarajevsko polje na zapadu. Sarajevsko polje je karakterizirano kao zeleno polje s malom vrijednošću visine hrapavosti (vidjeti sliku 8.3), što podrazumijeva veći intenzitet brzine blizu tla. Koridor se završava na lokaciji Halilovići.

Koridor Glavna saobraćajnica se formira uz glavnu cestu koja ide od istoka ka zapadu. Proračunski rezultati pokazuju niži intenzitet protoka zraka duž koridora Glavna saobraćajnica u odnosu na koridor Miljacka, kao što se može vidjeti na Slici 8.5. Intenzitet brzine strujanja zraka smanjuje se od tačke 1 do tačke 3 uz glavnu cestu, koja je omeđena visokim zgradama koje su gusto raspoređene u centru grada. Intenzitet brzine naglo se povećava u tački 4 koja odgovara lokaciji naselja Marijin Dvor. Ovdje se glavna cesta širi (ulica sa četiri trake) što je, zajedno sa dotokom zraka iz pravca Miljacke, glavni razlog povećanja brzine. Ovu lokaciju smatramo početkom koridora Glavna saobraćajnica. Na Slici 8.4b je prikazana povezanost koridora Miljacka sa koridorom Glavna saobraćajnica u naselju Marijin Dvor. Uzak prolaz kroz koji zrak struji od koridora Miljacka do koridora Glavna saobraćajnica čini se vitalnim za efikasan transport zraka kroz koridor Glavna saobraćajnica. Koridor je na Marijin Dvoru širok oko 50 metara i ostaje približno iste širine do svog završetka na Stupskoj petlji. Intenzitet protoka zraka kroz koridor Glavna saobraćajnica je niži od onog duž koridora Miljacka. Koridor Miljacka dobiva svjež zrak od vjetra koji uglavnom nije ometen visokim zgradama na području Vijećnice, što nije slučaj za koridor Glavna saobraćajnica. Osim toga, koridor je uži od koridora Miljacka sa većim brojem visokih zgrada na svojoj južnoj granici, što smanjuje protok zraka kroz koridor. Ovo su mogući razlozi za manje intenzivan protok zraka kroz koridor Glavna saobraćajnica.

**Slika 8.5: Raspodjela intenziteta brzine duž dva glavna koridora na lokacijama označenim tačkama za tri referentne brzine**

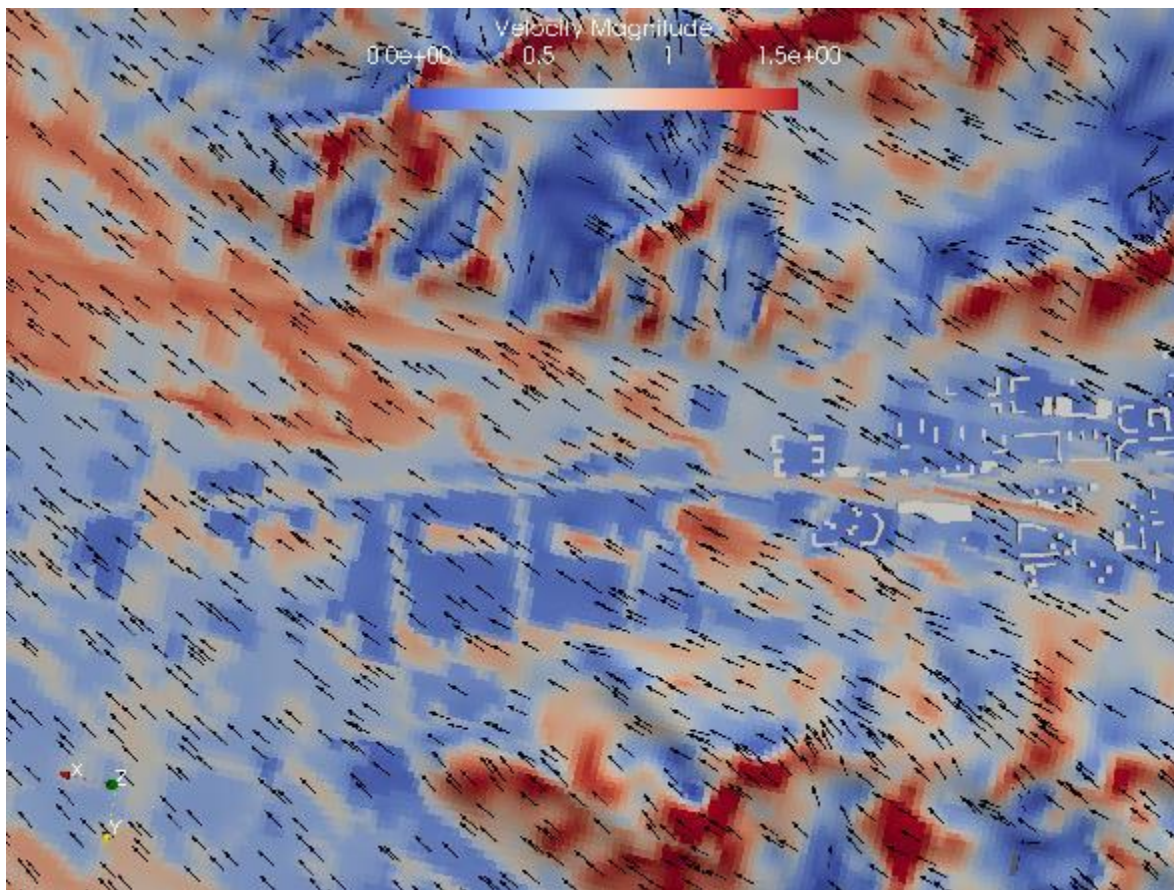


Pored dva glavna koridora, identificirali smo i nekoliko potencijalnih lokalnih koridora koji su općenito kraći i imaju manji kapacitet za transport zraka u odnosu na glavne koridore. Potencijalni lokalni zračni koridori su sljedeći:

- ceste južne i sjeverne longitudinalne koje su poznate pod nazivom „Južna longitudinalna“ i „Sjeverna longitudinalna“ (u daljem tekstu: JL i SL). Zračni koridor JL prikazan je na Slici 8.6 i prolazi kroz Zagrebačku, Grbavičku i Zvorničku ulicu. SL je manje izražena u polju brzine, ali zbog svoje veličine i orijentacije može predstavljati dodatni zračni koridor (istok - zapad);
- Očekuje se da Alipašina ulica, orijentisana u smjeru sjever-jug i povezana s regijom Zelenog pojasa, postane zračni koridor kada puše vjetar sa juga ili sjevera i

- Dvije ulice na Alipašinom Polju - ulica Ante Babića i ulica Ive Andrića, orijentisane u smjeru sjever-jug i prikazane na Slici 8.6.

**Slika 8.6: Završeci zračnih koridora u zapadnom dijelu grada, vidljivi u polju intenziteta brzine iz proračuna na mezo skali sa referentnom brzinom od 1,8 m/s.**



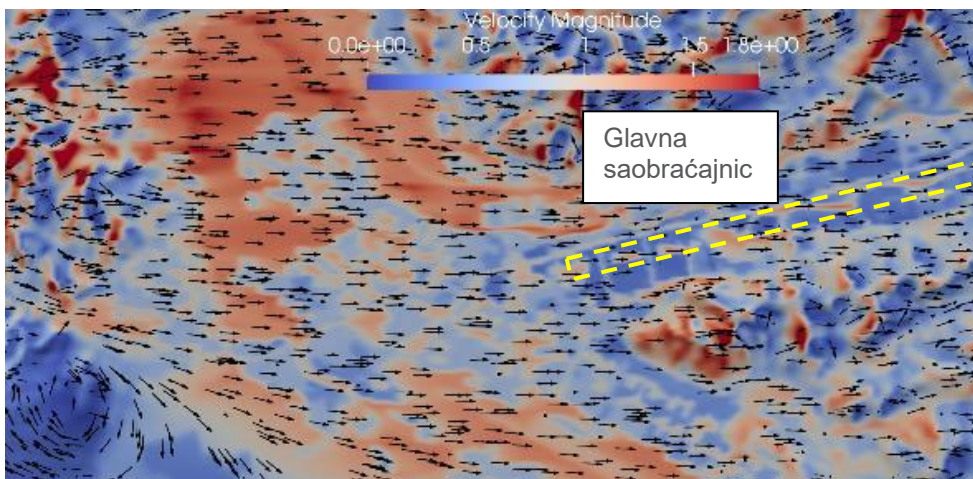
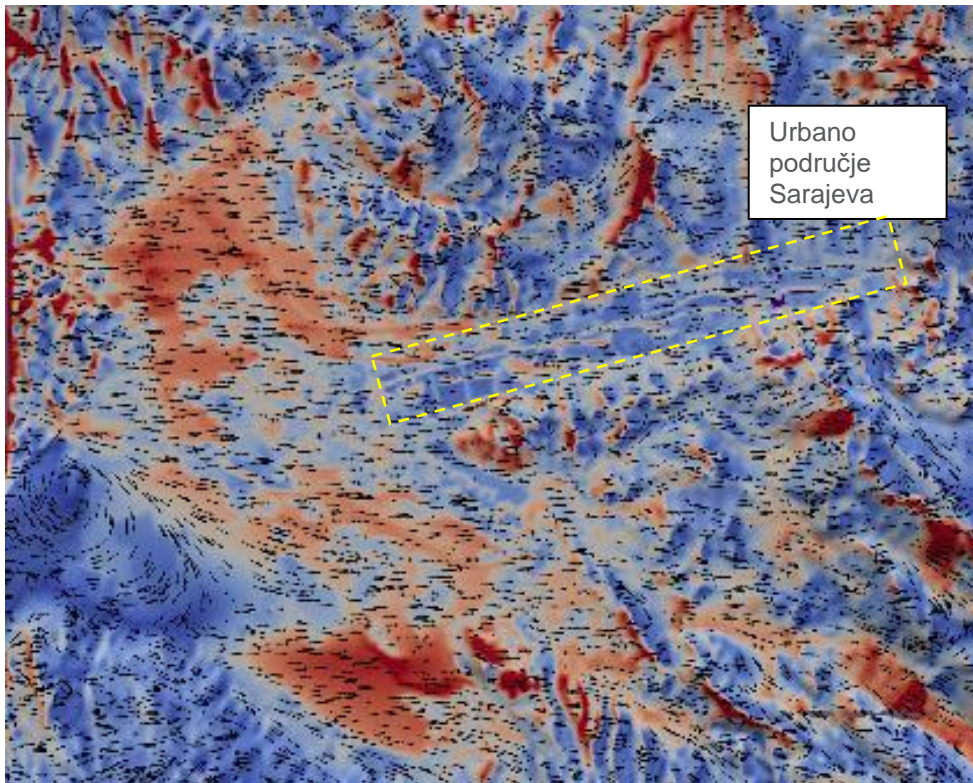
Na Slici 8.7 je prikazan intenzitet brzine vjetra koji puše sa zapada s referentnom brzinom od 1,8 m/s. Dva glavna zračna koridora, identificirana u polju brzine za vjetar koji dolazi s istoka, vidljiva su i u rezultatima dobivenim sa zapadnim vjetrom. Koridor Miljacka ima veći intenzitet brzine zraka od koridora Glavna saobraćajnica, kao što je to slučaj kada puše istočni vjetar. Koridor počinje približno na istoj lokaciji kao i na lokaciji gdje je završavao kada puše vjetar sa istoka. Zapadni vjetar uzrokuje masivnu recirkulacijsku zonu u podnožju planine Igman. Zbog toga se na Ilidži i u susjednim naseljima (Hrasnica) formira veliko područje niskog intenziteta brzine. To se negativno odražava na efikasnost dovoda svježeg zraka u ovo područje. Takav poseban obrazac strujanja zraka, određen orografijom terena, najvjerojatnije doprinosi visokom nivou zagađenja zabilježenom na području Ilidže. Ilidža je dio Kantona Sarajevo sa najvećim brojem dana u kojima se bilježe visoki nivoi zagađenja zraka.

Scenarij slučaja bez vjetra je analiziran sa ciljem da se utvrdi moguće postojanje zračnih koridora kada je strujanje zraka pod isključivim utjecajem sile uzgona. Na Slici 8.8 su prikazana polja trenutne brzine i temperature. Rezultati ukazuju na obrasce kretanja zraka tipične za strujanja koja su uzrokovana silom uzgona. Čelijski obrasci, vidljivi u polju trenutne brzine i temperature, predstavljaju



tipične otiske u brzinskim i temperaturnim poljima koji nastaju formiranjem termalnih perjanica usljed zagrijavanja s tla. Oblik i veličina ovih ćelija se s vremenom mijenjaju. Dinamika termalnih perjanica određuje intenzitet i smjer lokalnog kretanja zraka i transporta polutanta u zraku. Vektorsko polje, prikazano na Slici 8.8b, ukazuje da zračni koridori identificirani u rezultatima slučaja s vjetrom ne postoje u slučaju strujanja zraka bez dominantnog vjetra.

**Slika 8.7: Polje intenziteta brzine u slučaju referentne brzine od 1,8m/s i vjetra koji puše sa zapada**

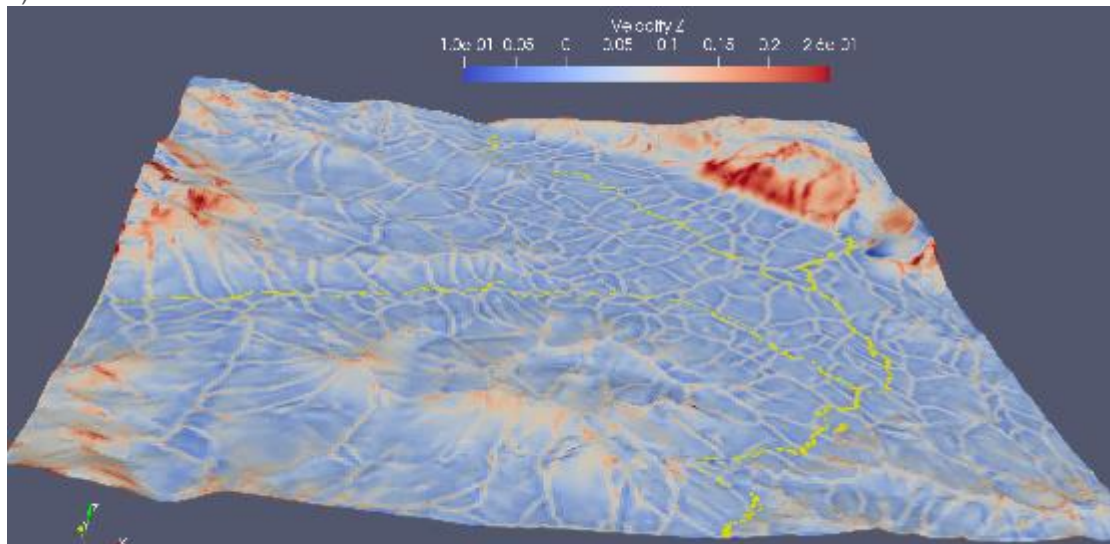




Na Slici 8.8c je prikazano polje strujanja zraka blizu tla. Kako je temperatura tla viša od temperature zraka, zrak zagrijan na tlu se podiže zbog manje gustoće. Tok zraka je organiziran u termalnim perjanicama. Koncentracija polutanta u sarajevskoj dolini u uvjetima bez vjetra i pri tački temperature inverzije na 300 m je prikazana na Slici 8.8c. Temperaturna inverzija je prirodna pojava pri kojoj sloj zraka u blizini tla ima nižu temperaturu od sloja zraka iznad. U normalnim uvjetima, temperatura zraka obično opada s visinom. Tačka temperature inverzije je tačka u kojoj temperatura počinje rasti na određenoj udaljenosti od tla. Niža tačka temperature inverzije, kako je ovdje simulirano, podrazumijeva uski sloj zraka u kojem je moguć određeni protok zraka. Takvo stanje dovodi do vrlo visoke koncentracije polutanata u zraku zbog ograničene mogućnosti zraka da transportira polutante i rasprši ih u atmosferi. Premda su stabilno stanje stratifikacije i njegove posljedice na nivo zagađenja od velike važnosti za razumijevanje problema zagađenja u Sarajevu, detaljnija analiza ovog slučaja je izvan opsega ove studije. Preporučujemo da ovaj slučaj bude obuhvaćen u budućoj studiji o zagađenju zraka u Sarajevu.

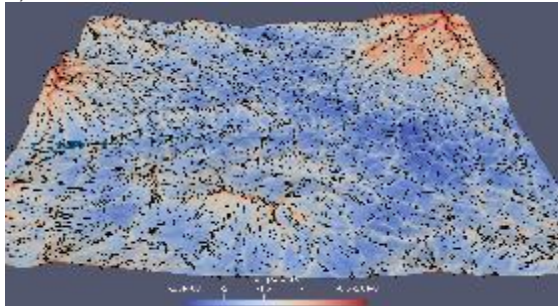
**Slika 8.8: Trenutno polje z-brzine (a), polje temperature s vektorima na tlu (b) i (c) polje z-brzine u vertikalnoj ravni presječeno kroz urbano područje za scenarij bez vjetra**

a)

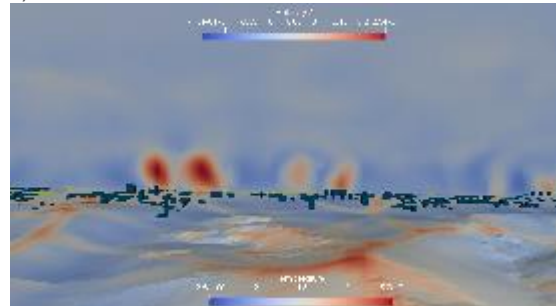


Žuta linija označava lokacije rijeka u proračunskoj domeni

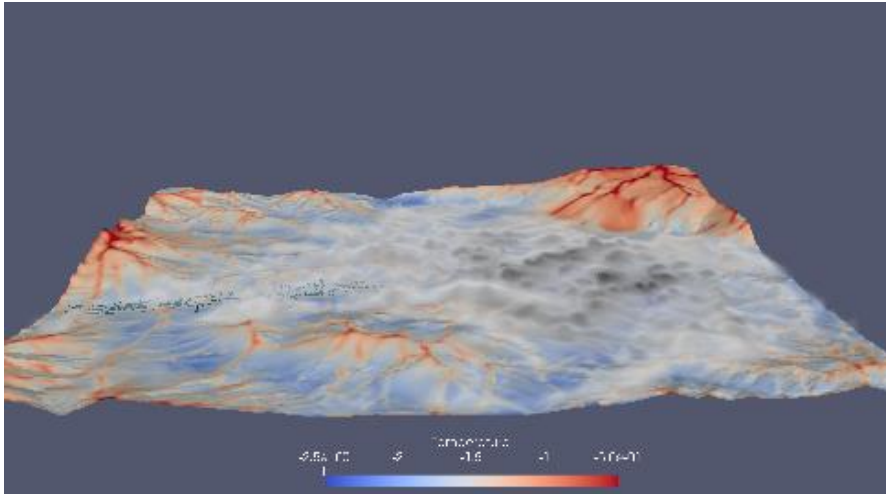
b)



c)



**Slika 8.9: Prikaz koncentracija zagađivača u sarajevskoj dolini**

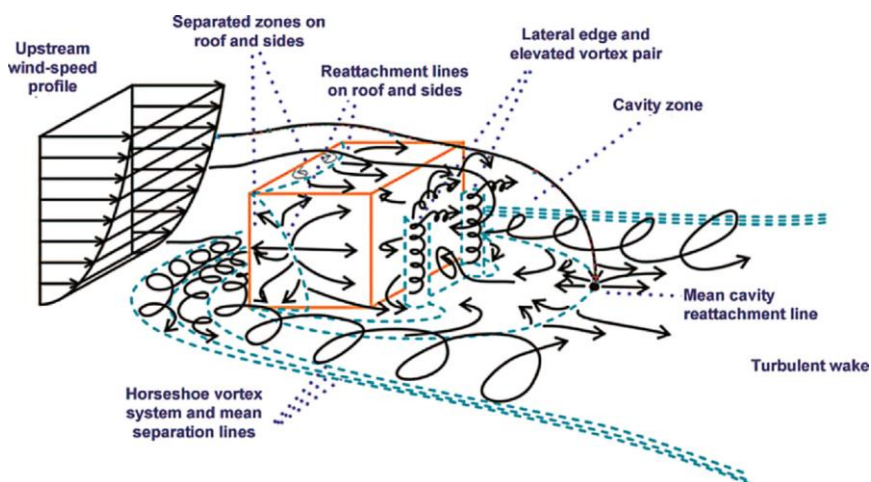


U cilju zaštite zračnih koridora u Sarajevu, preporučujemo da se zračni koridori identifikovani u ovoj studiji formalizuju i prepoznaju u odgovarajućim dokumentima. Područja koja se proglašavaju zračnim koridorima trebaju biti slobodna od gradnje visokih zgrada. Nadalje, preporučujemo da CFD analiza postane obavezna za sve buduće regulacione planove u Sarajevu. CFD analiza trebala bi potvrditi da budući objekti neće za rezultat imati značajne utjecaje na zračne koridore u pogledu opskrbe svježim zrakom. Pored toga, CFD analiza također bi trebala dokazati da novi objekti neće značajno povećati zagađenje u datom području. Kako bi se jasno definisali opseg i ciljevi CFD analize regulacionih planova, neophodno je da Kanton Sarajevo izradi vlastiti standard o urbanoj ventilaciji i utjecaju novih zgrada na nivo zagađenja.

## 9. Uticaj visokih zgrada na zračne koridore i nivo zagađenosti

Dispozicija zgrada u međusobnom odnosu može znatno uticati na zračne koridore. Zgrade mogu poboljšati ali i suzbiti ventilaciju zraka u urbanom okruženju, u zavisnosti od veličine, oblika i orijentacije zgrade u odnosu na pravac vjetra, poziciju susjednih zgrada i parametre kao što je Reynoldsov broj. Zbog nelinearne prirode turbulencije, teško je unaprijed odrediti kakav će uticaj imati različiti urbani oblici na prozračivanje. Fizika strujanja fluida oko pojedinačnih zgrada je bila predmetom brojnih studija i postoji visok nivo razumijevanja tog fenomena ([41] između ostalog), ali u prisustvu grupe zgrada se dinamika protoka može u potpunosti promijeniti uslijed složenog uzajamnog djelovanja strujanja fluida i čvrstih granica. Slika 9.1: prikazuje obrazac strujanja oko jedne izolirane zgrade. Najveći uticaj samostojeće zgrade na strujanje zraka jeste formiranje separacijskog mjehura iza zgrade (u zaleđini), čije veličina i oblik zavise od geometrije zgrade i parametara strujanja kao što je brzina dolaznog zraka. Posljedica prisustva zgrade je usporavanje strujanja nizvodno od zgrade što smanjuje prenos svježeg zraka. Područje visokog pritiska se formira ispred zgrade (takozvano područje stagnacije), dok se u zaleđini formira područje niskog pritiska. Model strujanja prikazan na Slika 9.1.: može se znatno razlikovati u slučaju strujanja oko grupe zgrada. Na primjer, skretanje nadole iza zgrade može biti značajno, što bi snažno pojačalo strujanje zraka i miješanje u zaleđini. Novije studije su potvrdile da visoke zgrade negativno utiču na prozračivanje i nivo zagađenosti ([42], [33], [30], između ostalog) [30] je pokazala da promjena visine jedne zgrade koja se nalazi u grupi zgrada može dovesti do porasta nivoa zagađenosti na datoj lokaciji, dok je u studiji o mikroklimi u Londonu, koju je proveo [42], zaključeno da visoke zgrade općenito umanjuju propusnost vjetra i smanjuju snagu vjetra u urbanim područjima uslijed efekta zaklona.

**Slika 9.1: Šematski prikaz dinamike toka strujanja oko samostojeće niske zgrade (Izvor: Od [43] izmjene [44])**



Glavni parametar koji određuje nivo učinka zgrade na strujanje zraka u okruženju je dužina ponovnog kontakta koja se obično podudara sa dužinom recirkulacijskog mjehura. Veličinu recirkulacijskog mjehura je teško unaprijed predvidjeti budući da na to utiču mnogi parametri kao što su brzina nadolazećeg vjetra, veličina i oblik zgrade i položaj iste u odnosu na susjedne zgrade. Međutim, empirijska korelacija se pokazala korisnom u aproksimaciji recirkulacijske dužine, barem u razmatranju pojedinačnih zgrada. [33] je predložio sljedeću korelaciju za recirkulacijsku dužinu:

$$L_R = \frac{AW_C}{1+BW_C/H} \quad (9.1.)$$

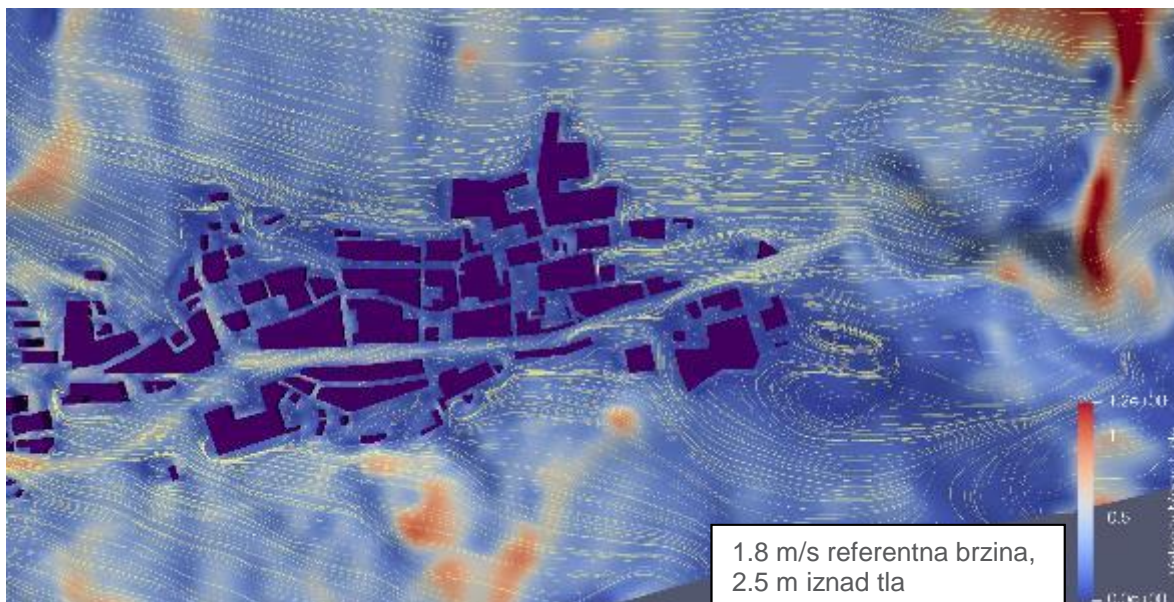


Pri čemu je  $H$ ,  $W_c$  i  $L$  visina, širina strujanja bočnog vjetera i dužina strujanja uzdužnog vjetera zgrade sa  $A = 1.8(L/H)^{-0.3}$  i  $B = 0.24$ . Ako je  $L/H < 0.3$  onda je  $A = 2.58$ , a ako je  $L/H > 3.0$  onda je  $A = 1.3$ .

Stiče se utisak da je dužina recirkulacije uobičajene zgrade o okvirima vrijednosti  $0.7H$  do  $3H$ . Ovo je važan parametar za odlučivanje o mjerama zaštite zračnih koridora.

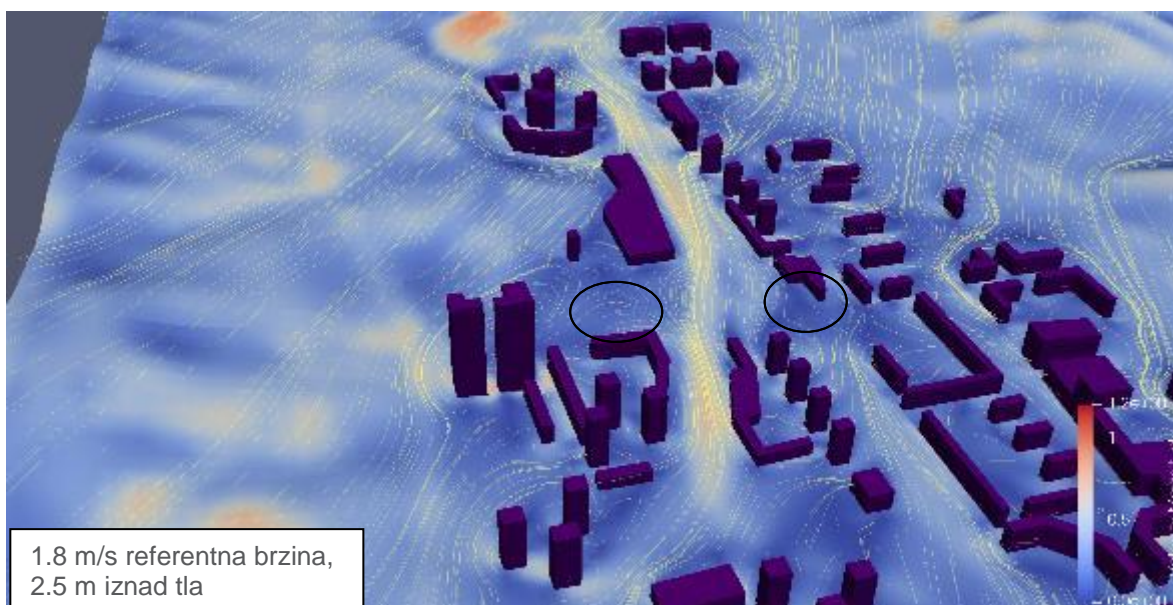
Posmatramo rezultate proračuna na lokalnoj skali s ciljem analize uticaja zgrada na dva najvažnija koridora. Slika 9.2 pokazuje polje intenziteta brzine sa prirodnim tokom strujanja zraka na lokaciji na kojoj počinje koridor Miljacka. Glavna cesta kojom se koridor snabdijeva zrakom prolazi uskim putem između Vijećnice (Nacionalna biblioteka) s lijeve i grupe objekata sa desne strane. Zrak se usmjerava kroz koridor dalje nizvodno prema zgradama uz rijeku Miljacku. Velika zona recirkulacije koja je identificirana rezultatima ispitivanja na mezo skali vidljiva je u prirodnom strujanju zraka na zavjetrinskoj strani planine Trebević. Snabdijevanje zrakom koridora Miljacka iz pravca planine Trebević usporavaju zona razdvajanja i zgrade koje predstavljaju prepreku nadolazećem vjetru. Međutim, između dvije zgrade je prisutan put strujanja zraka, obilježen strelicom na slici, koji dodatno snabdijeva koridor zrakom. Ova slika pokazuje slab vjetar koji struji uskim ulicama koje formiraju zgrade na centralnom dijelu slike. Koridor snabdijeva zrakom centralni dio grada putem sporednih ulica (označene strelicama).

**Slika 9.2: Polje intenziteta brzine strujanja u istočnom dijelu Sarajeva za referentnu brzinu 1,8m/S**

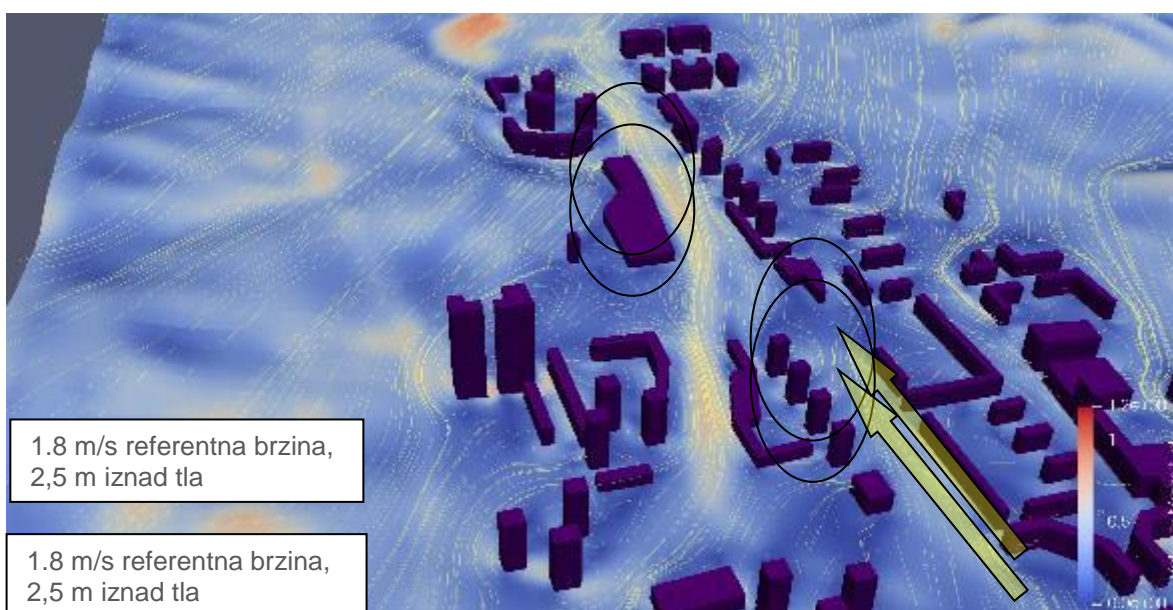


Slika 9.3 prikazuje dalji razvoj koridora Miljacka i formiranje koridora 'Glavna cesta' na Marijin Dvoru. Ovdje možemo vidjeti kako blizina zgrada utiče na strujanje zraka koridorima. Brzina strujanja duž koridora Miljacka se mijenja uglavnom zbog uticaja zgrada koje se nalaze uzvodno od vjetera. Visoke zgrade imaju mnogo veći uticaj na koridor 'Glavna cesta' zbog blizine ovih objekata lokaciji koridora. Prirodno strujanje zraka duž koridora 'Glavna cesta' pokazuje izuzetno nepravilan tok, uz prekide koje uzrokuju brojne recirkulacijske zone, što usporava strujanje zraka ovim koridorom. Prisustvo visokih zgrada uzvodno na koridorima umanjuje brzinu strujanja zraka koridorom 'Glavna cesta'. Ovo se može vidjeti na Slika 9.4 na lokaciji grupe od 4 visoke zgrade, koja je obilježena na slici, zbog čega nastaje zona niske brzine koja usporava transport zraka duž koridora 'Glavna cesta'. Dalje nizvodno niža zgrada, označena na slici, nema negativan učinak na zračni koridor budući da njena visina nije dovoljna za formiranje veće zone razdvajanja. Možemo zaključiti da rezultati istraživanja na lokalnoj skali bez sumnje potvrđuju da visoke zgrade imaju značajan uticaj na strujanje zraka koridorima. Rezultati pokazuju da ove zgrade, koje su visoke najmanje 30 metara i koje se nalaze na južnoj strani koridora, vjerovatno negativno utiču na strujanje zraka koridorom.

Slika 9.3: Polje intenziteta brzine strujanja na koridoru Miljacka i formiranje koridora 'Glavna saobraćajnica'



Slika 9.4: Polje brzine strujanja oko četiri velike zgrade na koridoru 'Glavna saobraćajnica'

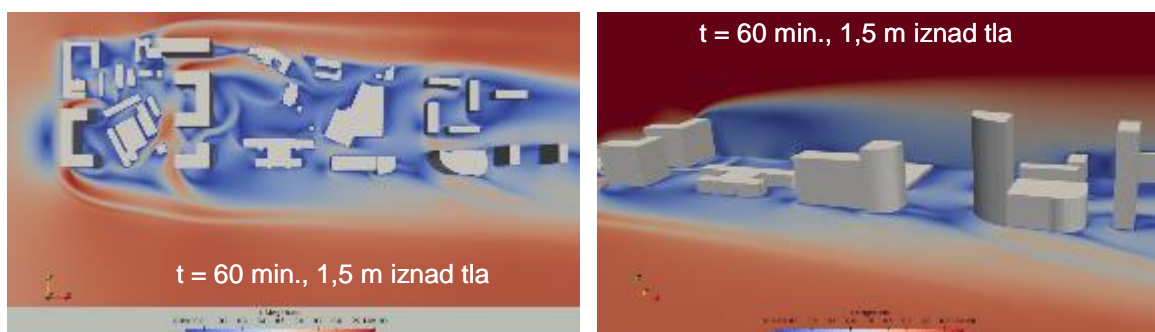


Istraživanje o uticaju visine zgrada na nivo zagađenosti provedeno je računskom simulacijom mikro lokacije na Alipašinom Mostu, tj. dijela naselja Nova Otoka u centralnom dijelu Sarajeva. Rezultati istraživanja su korišteni za ispitivanje efikasnosti čišćenja zagađenja nadolazećim vjetrom sa niskim stepenom zagađenosti i povezanost iste sa rasporedom zgrada. Razmatrana su tri domena istraživanja prikazana na Slika 9.5 do Slika 9.7: a) sadašnji raspored zgrada; b) raspored zgrada prema regulacionom planu; c) raspored predložen za potrebe ove studije. Regulacionim planom je predviđeno povećanje visine građevina i gustine izgrađenosti. Polazna pretpostavka su uslovi bez strujanja vjetra uz zagađenost zraka ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) koja je ravnomjerno raspoređena na cijelom domenu. U ovim istraživanjima se na razmatra izvor zagađenja.

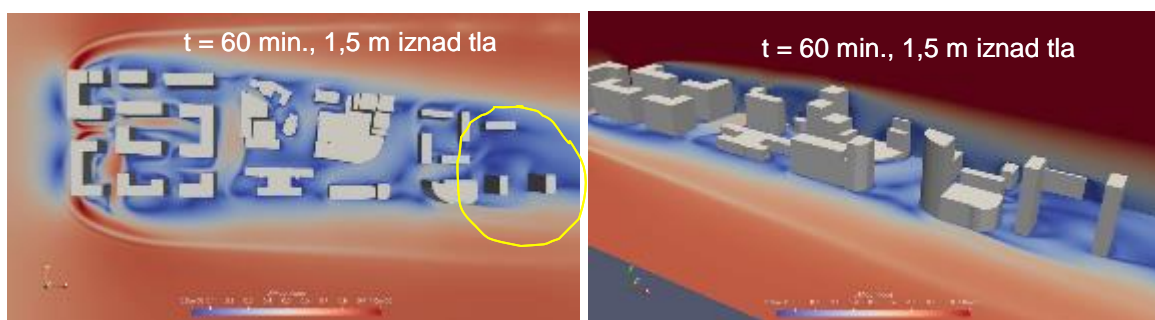


Slika 9.4-9.7 prikazuju trenutno polje brzine za tri modela koja se razmatraju sat vremena nakon što počne strujati vjetar. Organizacija protoka u ova tri slučaja je veoma različita, uslijed značajne razlike u dispoziciji objekata kao i različite visine. U zaleđini velikih objekata javljaju se opsežne zone razdvajanja, dok je strujanje zraka velike brzine prisutno u uskim prostorima između zgrada. Može se uočiti da je regija niske brzine koja se formira blizu granice ispusta izraženija u domenu visokih zgrada (vidi Slika 9.6.:) u poređenju sa druga dva domena. Brzina strujanja je nešto ravnomjernije raspoređena na predloženom rasporedu, koji je prikazan na Slika 9.7.:, sa manje izraženim razlikama između ekstremnih vrijednosti brzina.

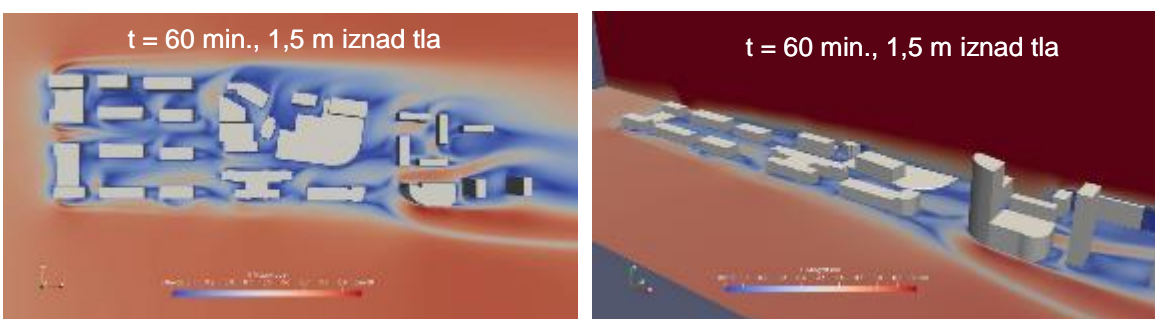
**Slika 9.5: Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na  $y=102$  m (desno) trenutnog polja brzine za postojeći raspored zgrada**



**Slika 9.6: - Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na  $y=102$  m (desno) trenutnog polja brzine za raspored zgrada utvrđen regulacionim planom**



**Slika 9.7: – Pogled odozgo (lijevo) i pogled sa strane sa presjekom ravni na  $y=102$  m (desno) trenutnog polja brzine za predloženi raspored zgrada**



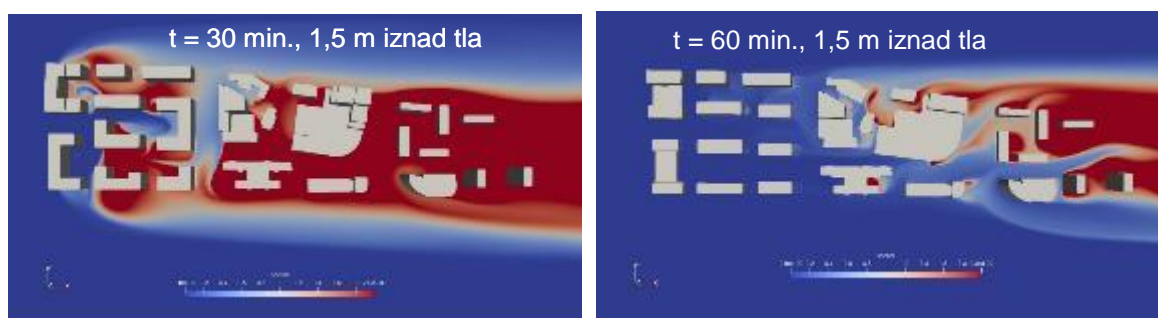
Na Slika 9.8 do Slika 9.10.: prikazano je polje zagađenosti u tri slučaja u dva vremenska razdoblja: nakon 30 i 60 minuta. Nadolazeći vjetar je manje efikasan u odstranjivanju zagađenosti zraka u rasporedu propisanom regulacionim planom, koji karakteriziraju gusto raspoređene visoke zgrade, u poređenju sa dvije druge situacije. Najbolji rezultat se postiže sa predloženim rasporedom, koji omogućava efikasno uklanjanje zagađujućih tvari u roku od sat vremena, dok se u području sa

visokim zgradama formiraju džepovi u kojima se visok nivo zagađenosti zadržava i nakon sat vremena. Cjelokupan uticaj promijenjenog polja brzine na nivo zagađenosti može se vidjeti na Slika 9.11. i Slika 9.12. Glavni razlog za manje efikasno uklanjanje zagađenosti za drugi domen je pojava snažnih recirkulacijskih zona u zaleđini visokih zgrada, kako je prikazano na Slika 9.13 i Slika 9.14. Recirkulacijske zone usporavaju strujanje zraka i zagađujuće tvari ostaju zarobljene u ovim zonama. Stiče se utisak da se zone sa visokim stepenom zagađenosti održavaju neko vrijeme. Ovi rezultati potvrdili su pretpostavku o negativnom uticaju visine zgrada na kvalitet zraka nizvodno od mjesta gdje se nalaze.

**Slika 9.8: Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u postojećem rasporedu zgrada**



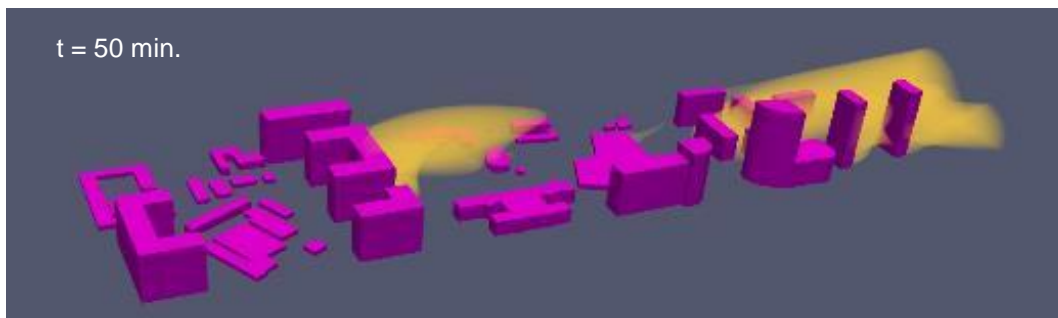
**Slika 9.9: - Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u rasporedu zgrada prema regulacionom planu**



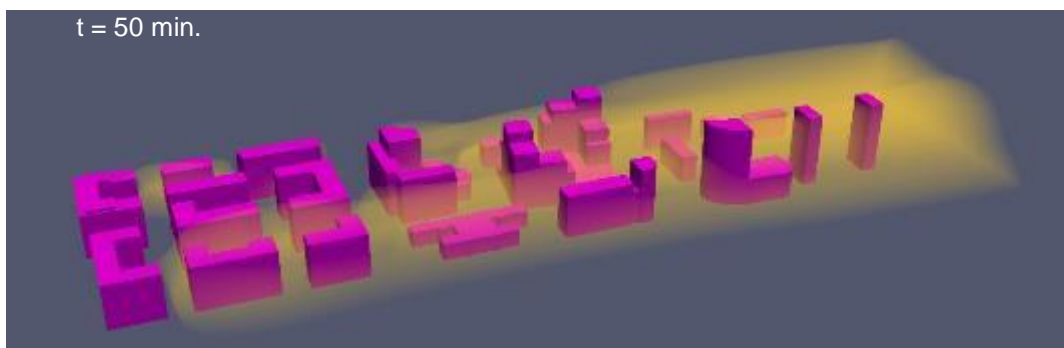
**Slika 9.10: - Trenutno polje zagađenja u dva vremenska razdoblja u predloženom rasporedu zgrada**



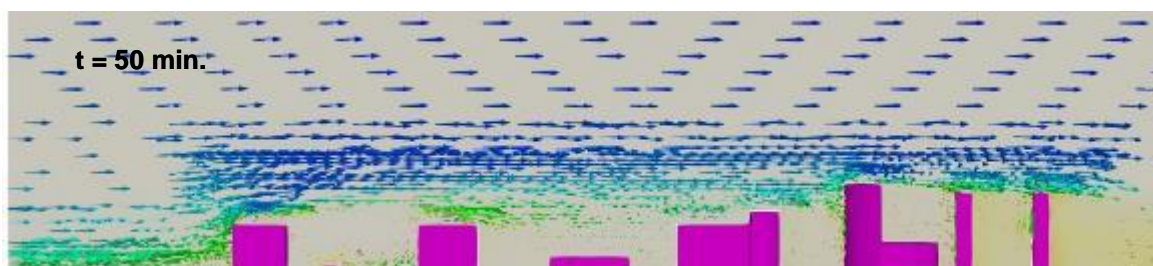
Slika 9.11: Iso površina trenutne koncentracije zagađujućih tvari za postojeći raspored zgrada



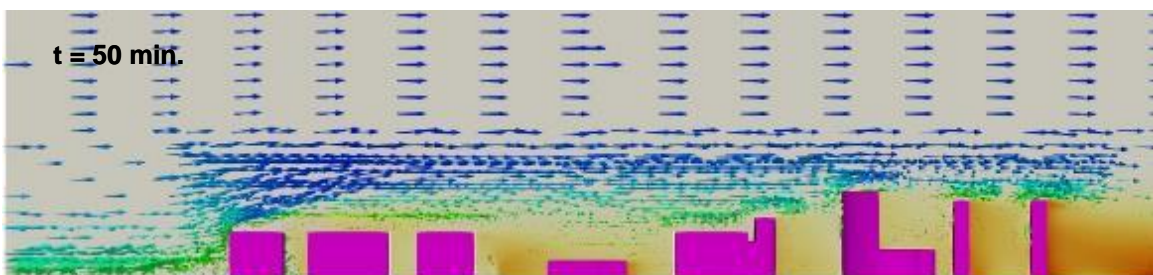
Slika 9.12: Iso površina trenutne koncentracije zagađujućih tvari za raspored zgrada prema regulacionom planu



Slika 9.13: Trenutno polje zagađujuće tvari u vertikalnoj ravni za postojeći raspored zgrada



Slika 9.14: Trenutno polje zagađujuće tvari u vertikalnoj ravni za raspored zgrada prema regulacionom planu



regulacionom planu

Potvrđeno je da visoke zgrade koje se nalaze duž koridora 'Glavna cesta' usporavaju strujanje zraka kroz koridor i smanjuju efikasnost prenosa svježeg zraka koji dolazi sa istoka. Intenzitet strujanja zraka duž glavnih zračnih koridora nije konstantan, nego se mijenja u zavisnosti od rasporeda zgrada u blizini koridora.



## 10. Zaključci i preporuke

Kompjuterskim simulacijama vjetra u sarajevskoj kotlini identificirana su dva glavna zračna koridora, koja su nazvana prema topografskim karakteristikama: koridor Miljacka i koridor 'Glavna cesta'. Oba zračna koridora okvirno su orijentirana u pravcu istok-zapad.

Zračni koridor Miljacka određen je riječnim tokom rijeke Miljacke. Proteže se sa istoka na mjestu gdje rijeka Miljacka ulazi u grad (lokacija Bentbaša) do mjesta gdje rijeka počinje vijugati u Sarajevskom polju na lokaciji Halilovići. Širina koridora varira uslijed različite blizine zgrada duž kanala. Maksimalna širina je 110 metara na lokaciji Dolac Malte a najmanja širina je izmjerena na segmentu kod Vijećnice i iznosi 60 metara. Intenzitet vjetra duž koridora također varira u smislu vremena i prostora, pod uticajem složene interakcije strujanja zraka i objekata u blizini koridora.

Zračni koridor 'Glavna cesta' formiran je duž glavne saobraćajnice koja povezuje istočne i zapadne dijelove grada. Koridor se prostire od Marijin Dvora na istoku do lokacije Stupska Petlja na Zapadu. Širina koridora sa nekih 50m je gotovo konstantna. Strujanje zraka je intenzivnije duž zračnog koridora Miljacka sa nekoliko mogućih objašnjenja, kao što je neometani dotok zraka u području Vijećnice, kao i time što je koridor Miljacka širi u odnosu na koridor 'Glavna cesta'.

Prisustvo visokih zgrada u blizini koridora umanjuje propusnost vjetra, što umanjuje dotok svježeg zraka u koridore. Pored toga, recirkulacijske zone u pozadini zgrada usporavaju strujanje zraka ukoliko poledina zgrada zadire u koridore. Iz ovog razloga je važno zaštititi postojeće pravce kojima se koridori snabdijevaju zrakom, kao i spriječiti negativan uticaj novih zgrada na strujanje zraka koridorima. Na osnovu empirijske formule za dužinu recirkulacije koju su predložili Hertwig i drugi [33] naša je procjena da zgrade visine do 20m ne bi negativno uticale na strujanje zraka koridorima. Shodno tome, predlažemo ograničavanje visine zgrada do 20m u cijelom pojasu širine od ~200m s obje strane glavnih zračnih koridora. Na ovaj način se osigurava da nove zgrade neće formirati recirkulacijske zone u trajanju koje bi bilo dovoljno da poremeti strujanje zraka koridorom.

Pored ova dva glavna koridora, identificirani su i dodatni lokalni zračni koridori. Ovi lokalni koridori su mnogo kraći od glavnih koridora, ali mogu imati važnu ulogu u snabdijevanju grada svježim zrakom. To su koridor Južna longitudinala (koji se poklapa sa cestom Južna longitudinala koji određuju sljedeće ulice: Zagrebačka, Grbavička i Zvornička), Sjeverna longitudinala, Alipašina ulica (koja se nalazi unutar zelenog pojasa), ulice Ante Babića i Ive Andrića (u naselju Alipašino Polje).

Koeficijenti izgrađenosti u područjima urbanog dijela Sarajeva u određenim zonama su porasli preko propisanih granica i stoga je važno da se ovi problemi riješe u najkraćem mogućem roku. Ovi problemi se mogu ublažiti istovremenom zaštitom i unapređenjem ventilacionih koridora. Ovo se može izvesti uključivanjem stručnjaka i aktera na nivou nadležnih organa s ciljem da se osmisli sveobuhvatan pristup opsežnom procesu urbanističkog planiranja i projektovanja (za ulice, parkove, zgrade i druga urbana područja), što će omogućiti bolju cirkulaciju zraka i smanjenje zagađenosti zraka. Budući urbani razvoj Sarajeva mora uključivati dimenziju zaštite okoliša s ciljem postizanja održivosti u urbanističkom planiranju.

Rezultati proračuna na mikro skali jasno ukazuju na važnost trodimenzionalnog modeliranja strujanja zraka i disperzije zagađujućih tvari u urbanom okruženju prije gradnje novih zgrada, uključujući visoke zgrade. Kako se može vidjeti iz rezultata, promjena položaja, orijentacije i visine zgrade može znatno doprinijeti kvalitetu zraka na datoj lokaciji. Iz ovog razloga je važno procijeniti učinak nove gradnje korištenjem složenog modeliranja (CDF ili aerodinamički tunel). Ovo bi doprinijelo stvaranju održivije i zdravije urbane sredine.

S ciljem zaštite ventilacionih zračnih koridora u Sarajevu, preporučuju se sljedeće mjere: U kantonu Sarajevo su identificirani primarni i sekundarni ventilacioni koridori (vidi Slika 10.1), a to su:

### a) Primarni ventilacioni koridori

- Koridor Miljacka, koje je određen pravcem rijeke Miljacke. Proteže se sa istoka gdje rijeka Miljacka ulazi u grad (Bentbaša) do toka rijeke Miljacke u Halilovićima.

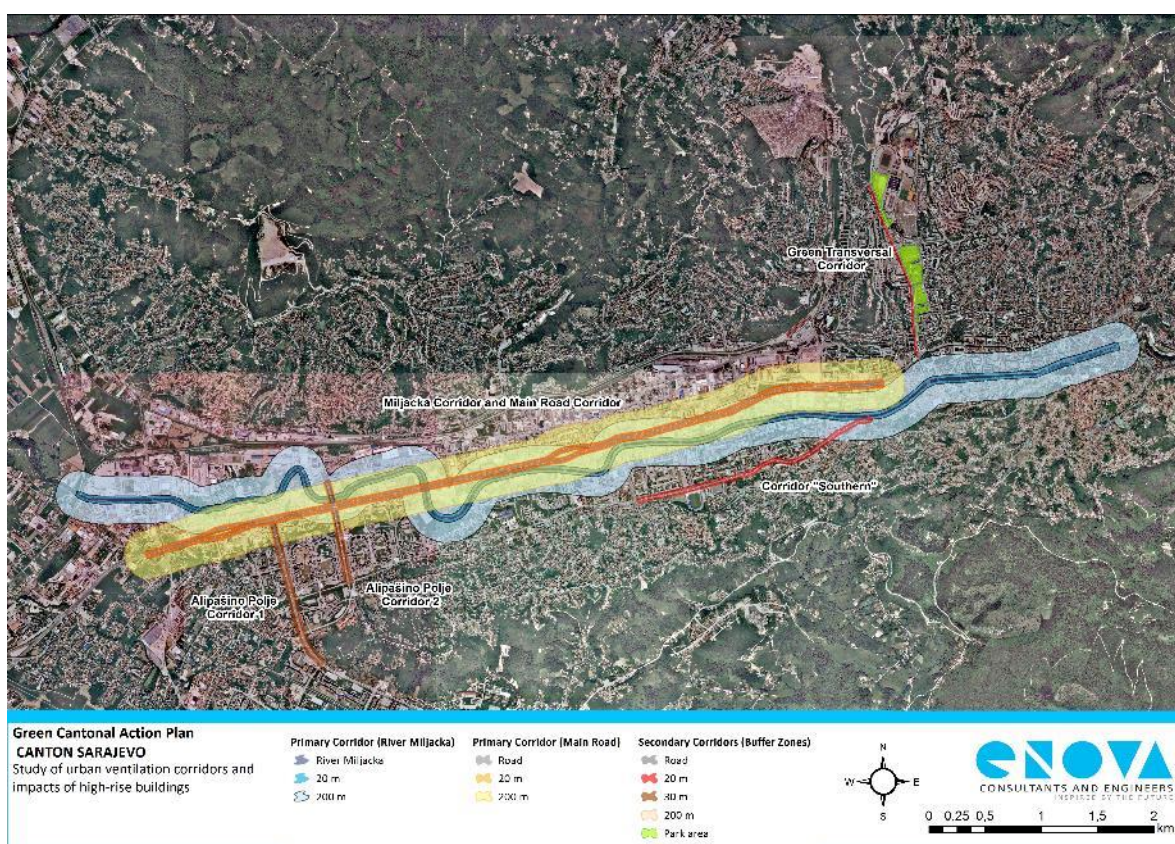


- Koridor 'Glavna cesta' formiran je uz glavnu saobraćajnicu koja povezuje istočne i zapadne dijelove grada. Koridor se prostire od Marijin Dvora na istoku do lokacije Stupska Petlja na zapadu.

#### b) Sekundarni ventilacioni koridori

- Koridor "Južna longitudinalna" se poklapa sa "Južnom longitudinalom" ili je određen sljedećim ulicama: Zagrebačka, Grbavička i Zvonička,
- Koridor Zelena transverzala proteže se uz ulicu Alipašina od Koševa i Zetre do Skenderije.
- Koridor Alipašino Polje 1 proteže se duž ulice Ante Babića na Alipašinom Polju
- Koridor Alipašino Polje 2 proteže se duž ulice Ive Andrića na Alipašinom Polju

**Slika 10.1: Primarni i sekundarni ventilacioni koridori**



#### Zaštitne mjere za primarne koridore obuhvataju:

- Sprečavanje gradnje novih zgrada u zoni od 20m od obale rijeke Miljacke i ruba glavne saobraćajnice, s obje strane koridora.
- Ograničavanje visine zgrada na 20 metara (P+ 6) u zoni od 200m s obje strane glavnih ventilacionih koridora
- Koeficijent maksimalne površine  $\leq 1$ .
- Primjena tehničkih smjernica za prostorno planiranje i projektovanje objekata s ciljem poboljšanja strujanja zraka

#### Zaštitne mjere za sekundarne koridore obuhvataju:

- Sprečavanje gradnje duž koridora Alipašina ulica-Skenderija u zoni od 20m na desnoj strani ceste. Sprečavanje gradnje na površinama parka na lijevoj strani ceste.

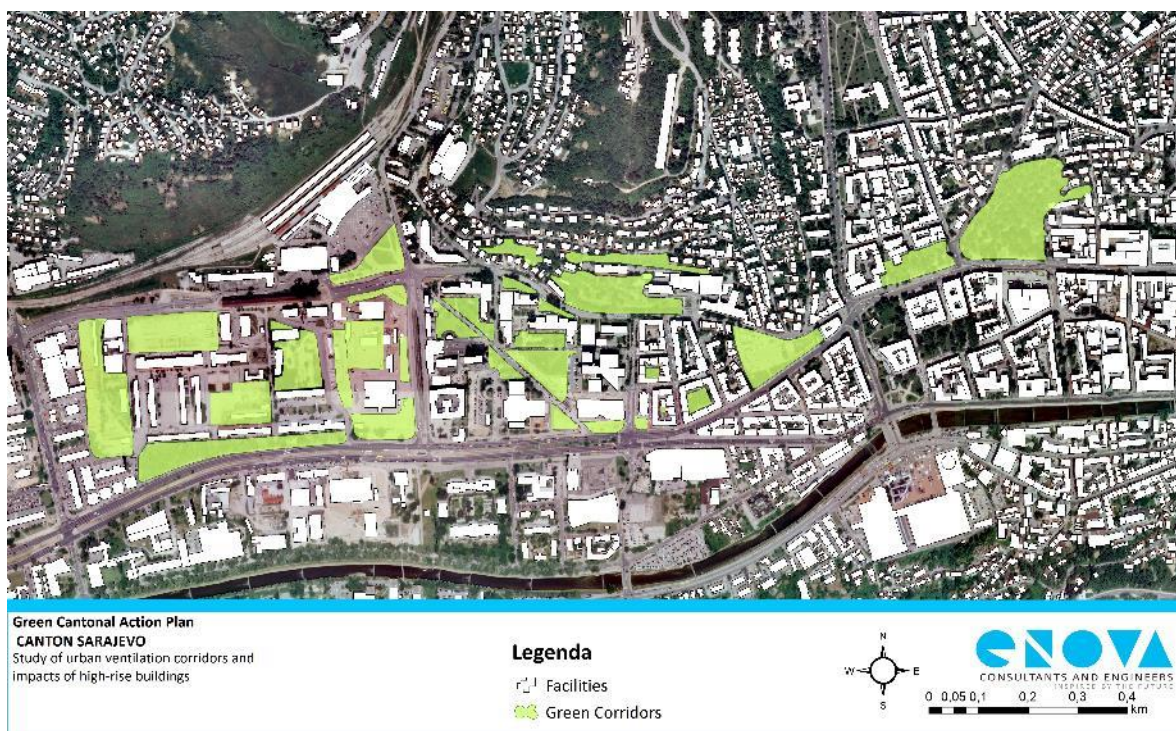


- Sprečavanje gradnje novih objekata u pojasu od 20m s obje strane Južnog koridora ili Južne longitudinalne koja povezuje ulice Zagrebačka, Grbavička i Zvornička,
- Sprečavanje gradnje novih zgrada na površini od 30m s obje strana ventilacionih koridora Alipašino Polje 2 , i Alipašino Polje 2.

Za unapređenje ventilacionih karakteristika Kantona Sarajevo i ublažavanje efekta toplotnih ostrva, zelene koridore treba formirati spajanjem i proširenjem sljedećih zelenih površina (vidi Slika 10.2 i Slika 10.3).

- Kozija Ćuprija – Bentbaša
- Sjeverna strana koridora 'Glavna cesta'
  - od Velikog parka do Malog parka -Hastahana;
  - ozeljenjavanjem gradskih dvorišta od ulica Dolina
  - Fra Anđela Zvizdovića i Kralja Tvrtka;
  - ozeljenjavanjem trgova uz ulicu Fanca Lehara;
  - očuvanjem i modernizacijom postojećih parkovskih površina između ulica Kalemova i Kranjčevićeva;
  - ozeljenjavanjem Kampusa univerziteta od Ulice Halida Kajtaza i Hamdije Čemerlića;
  - revitalizacijom i ozeljenjavanjem trga ispred Željezničke stanice i zgrade BH Pošte;
  - očuvanjem postojećih parkovskih površina i zelenih trgova u području povezanom ulicama Zmaja od Bosne i Kolodvorska s jedne strane i Ložionička i Hemdije Čemerlića s druge.

**Slika 10.2: Zeleni koridor duž glavne saobraćajnice**



Slika 10.3: Granice zelenog koridora Kozija ćuprija – Bentbaša



Ove mjere će biti primijenjene prilikom donošenja nove prostorno-planske dokumentacije kao i za donošenje izmjena i dopuna postojeće.

Prilikom izrade regulatornih planova za područja koja se nalaze unutar zone ventilacionih koridora, bit će potrebno provesti stratešku procjenu uticaja na okoliš, uključujući analizu strujanja zraka zasnovanu na numeričkim simulacijama.

Bit će izrađene urbane klimatske mape za Kanton Sarajevo uz prikupljanje i analizu relevantnih podataka u pogledu meteorološke slike, topografije i urbanizma. Zračni ventilacioni koridori za uobičajeni pravac vjetra trebaju biti određeni urbanom klimatskom mapom te utvrđene mjere zaštite.

Bit će izrađene Tehničke smjernice o rasporedu i obliku zgrada, uključujući smjernice zasnovane na analizi CDF, a koristit će se i za ocjenu i odobravanje novih regulacionih planova.



# 11. Referentna literatura

- [1] Kress, R., 1979. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die Raumliche planung. Dortmund, Germany.
- [2] VDI, 1997. VDI-guideline 3787, Part 1, Environmental Meteorology-climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions. Beuth Verlag, Berlin.
- [3] Gao Y, Zhao J, 2018. Environmental Approach to the Path of Urban Ventilation Path Planning in China from the Perspective of Climate Change and Multi-Dimensional Control. Ecology 27(106): 1235.-1245.
- [4] [https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?climate\\_in\\_stuttgart](https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?climate_in_stuttgart)
- [5] Feasibility Study for Establishment of Air Ventilation Assessment System, Department of Architecture Chinese University of Hong Kong, 2005
- [6] <https://edition.cnn.com/style/article/hong-kong-skyscrapers-with-holes/index.html>
- [7] Chao Ren, Ruozi Yang, Chen Cheng, Pei Xing, Yuan Shi, 2018. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan – The implementation in Chinese cities
- [8] Yugang Guan, Hong Chen, Xuefan Zhou, Study of urban ventilation corridor planning method based on a case study of Guiyang, China
- [9] <http://wwf.panda.org/?204461/Stuttgart-green-corridors>
- [10] Stuttgart: combating the heat island effect and poor air quality with green ventilation corridors (2014)
- [11] Kai Tak Development, Urban Design Guidelines and Manual for the Runway Precinct, 2016
- [12] Fostering Building and Neighbourhood Green Development/Hong Kong Green Building Council, 2018
- [13] Norman Foster, 2015. Structures Seminar: The Gherkin, London
- [14] <https://plus.maths.org/content/perfect-buildings-maths-modern-architecture>
- [15] Urban Design Guidance for the Site Planning and Design of Tall Buildings in Milton
- [16] <https://www.designboom.com/architecture/andrew-bromberg-aedas-gemdale-changshou-road-shanghai-china-11-08-2016/>
- [17] Hong Kong Planning Standards and Guidelines Chapter 11: Urban Design Guidelines
- [18] <https://www.ura.gov.sg/Corporate/Guidelines/Development-Control/Non-Residential/Commercial/Building-Setback>
- [19] Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment Feasibility study, 2011
- [20] Annual report on air quality in the Federation of Bosnia and Herzegovina, Federal Hydro-meteorological Institute BiH, March 2018
- [21] Air quality categorization for Sarajevo Canton for 2013, Ministry of Spatial Planning, Construction and Environmental Protection of Sarajevo Canton, 2015
- [22] Feasibility Study on the expanding and improving of the district heating system in the Sarajevo Canton, UNDP, 2019
- [23] Temperature inversion measurements in Sarajevo valley using unmanned aerial vehicles, Mašić, A., Musemić, R., Džaferović-Mašić E., Proceedings of the 27th International DAAAM Symposium, 2016
- [24] Annual report on air quality in the Federation of Bosnia and Herzegovina", Federal Hydro-meteorological Institute BiH, 2018, 2017 and 2016
- [25] Land use Plan of the City of Sarajevo for the period of 1986.-2015,



- [26] Veer, F., Louter, C. (2008) Challenging Glass: FreddVeer, ChristianLouter (2008), Conference on Architectural and Structural Applications, page 537
- [27] Hanjalić, K. and Launder, B. (2011) Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure by Cambridge University Press, United Kingdom
- [28] <https://github.com/DelNov/T-Flows>
- [29] <https://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/trapos/main.htm>
- [30] Shahrestani, M., Yao, R., Luo, Z., Turkbeyler, E., Davies, H. (2015) A field study of urban microclimates in London, Renewable Energy, Elsevier, vol. 73(C), pages 3-9.
- [31] <https://bihamk.ba/bs/vijesti/informacija-o-registrovanim-motornim-vozilima-u-bih-u-periodu-januarsijecanjdecembarprosinac-2018/409>
- [32] Eco-Low Carbon Urban Planning Methodology, Atkins, China Society for Urban Studies, 2014. <https://www.atkinsglobal.com/en-GB/group/sectors-and-services/services/future-proofing-cities/china>
- [33] Hertwig, D., Gough, H., Grimmond, C., Barlow, J. Kent, C., Lin, W., Robins, A., Hayden, P. (2019). Wake Characteristics of Tall Buildings in a Realistic Urban Canopy. Boundary-Layer Meteorology. 172. 239-270. 10.1007/s10546-019-00450-7.
- [34] Hanjalic, K., Popovac, M., Hadžiabdić, M. (2004). A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD. International Journal of Heat and Fluid Flow. 25. 1047-1051. 10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.005.
- [35] Balogh, M. A. Parente, C. Benocci, (2012) RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced  $k-\epsilon$  model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Volumes 104–106*, May–July 2012, Pages 360-368
- [36] Hansen, F. (1993) Surface Roughness Length, *US Army Research Laboratory*, AD-A274 550
- [37] Belalcazar, L., Fuhrer, O., Ho, M., Zarate, E., Clappier, A. (2009). Estimation of road traffic emission factors from a long term tracer study, *Atmospheric Environment* 43 (36), 5830-5837
- [38] Peitzmeier, C., Loschke, C., Wiedenhause, H., Klemm, O. (2017) Real-world vehicle emissions as measured by in situ analysis of exhaust plumes, *Environmental Science and Pollution Research*, volume 24, number 29, pages 23279–23289
- [39] Srimuruganandam, B., Shiva Nagendra, S.M. (2010). Analysis and interpretation of particulate matter-PM10, PM2.5 and PM1 emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway. *Atmospheric Pollution Research*. 1. 184-194. 10.5094/APR.2010.024.
- [40] Launder, B., Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 103. 456-460.
- [41] Castro, I., Robins, A. (1977). The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *Journal of Fluid Mechanics*. 79. 307 - 335. 10.1017/S0022112077000172.
- [42] Aristodemou, E., Boganegra, L., Mottet, L., Pavlidis, D., Constantinou, A., Pain, C., Robins, A., Apsimon, H. (2017). How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*. 233. 782-796. 10.1016/j.envpol.2017.10.041.
- [43] Hosker R.P.: 1985, Flow around isolated structures and building clusters: A review, *ASHRAE Trans.* 91, 1671–1692.
- [44] Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., Hensen, J. (2011). Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: An overview. *Journal of Building Performance Simulation*. 4. 157-184. 10.1080/19401493.2010.513740.
- [45] Direktiva EU o kvalitetu zraka 2008/50/EC, 2008.g.
- [46] Izvor slike: Regulacioni plan “Gradski centar - Marijin Dvor”, 2007.g.
- [47] Izvor slike: Enova overlaid on Google Maps, 2019

[48] Izvor slike: avaz.ba

[49] Izvor slike: Google Maps, 2019.

[50] Izvor slike: uskinfo.ba

[51] Izvor slike: sarajevo.co.ba

[52] Izvor slike: Unitic.d.o.o

[53] Izvor slike: bigportal.ba

[54] Izvor slike: zosradio.ba

[55] Izvor slike: Enova, 2019

[56] Izvor slike: Enova overlaid on Google Maps, 2019.

[57] Izvor slike: Enova, incorporating satellite image from Google Maps, 2019.

[58] Izvor slike: Enova overlaid on Google Maps, 2019.

[59] Izvor slike: Enova overlaid on Google Maps, 2019.

# Dodatak 1: Spisak autora

## **Autori:**

Prof. dr. Muhamed Hadžiabdić

Prof. Dr. Sanda Midžić-Kurtagić

Samra Arnaut, diplomirani inženjer mašinstva

Tarik Begić, diplomirani inženjer mašinstva

Fejsal Ćorović, diplomirani inženjer mašinstva

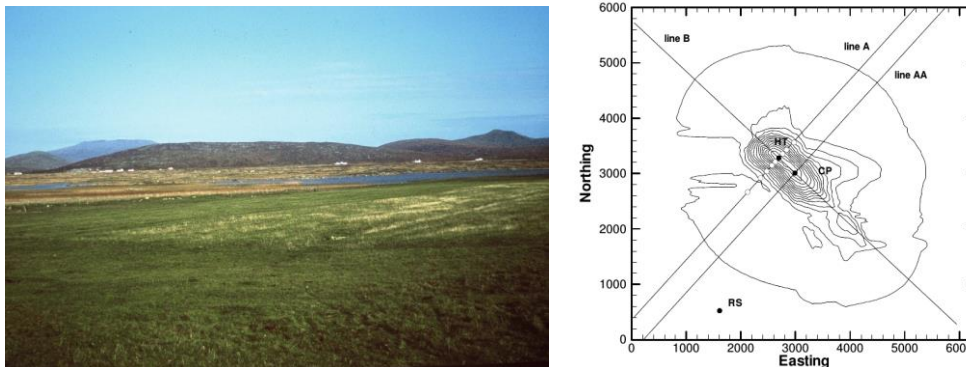
## Dodatak 2: Referentni primjeri

Izvršili smo proračune za dva standardna referentna slučaja u CFD-u kako bismo ispitali tačnost i pouzdanost numeričkih metoda, modela turbulencije i CFD koda koji su korišteni u studiji. Rezultati za oba referentna slučaja su u skladu s mjerenjima i s proračunskim rezultatima koje su u prošlosti objavile druge istraživačke grupe.

### Studija slučaja 1: Referentni slučaj Askervein brdo

Askervein brdo je dobro dokumentovani referentni slučaj koji se često koristi za testiranje CFD kodova i modela turbulencije za tokove u atmosferskom graničnom sloju. Brdo se nalazi na zapadnoj obali ostrva South Uist na Vanjskim Hebridima Škotske. Gotovo je eliptičnog oblika, s malom osi od 1km i velikom osi od 2km, orijentisane duž sjeverozapadnog i jugoistočnog smjera (vidjeti sliku A.1). Visina Askervein brda je 116m u odnosu na nivo okolnog tla (i 126m od nivoa mora); brdo je okruženo ravnicom u smjeru suprotnom od smjera u kojem puše vjetar i s relativno većim brežuljcima u smjeru odakle puše vjetar. Brdo ima umjeren nagib, površina brda prekrivena je travom i ravnim stijenama. Aerodinamička hrapavost je  $Z_0 \approx 0,03m$  konstantno, na osnovu mjerenja na terenu [64]; međutim, poznato je da se vrijednost hrapavosti smanjuje oko vrha brda na 0,01m.

**Slika A.1: Pogled na Askervein brdo (lijevo) i topografska karta s mjernim linijama (desno). (adaptirano iz [64])**



U ovoj studiji, usvojena je veličina domene od 4200m x 4200m x 1000m duž x, y i z smjera centriranjem na vrhu brda. Broj mrežnih ćelija je 180, 180 i 36 u x, y i z smjeru. Većina mrežnih ćelija je grupirana oko brda ( $\Delta x = 24m$ ,  $\Delta y = 24m$ ,  $\Delta z_{min} = 1m$ ). Prvi sloj ćelija nalazi se na 1 m iznad tla, a veličina ćelije se širi u z smjeru s faktorom ekspanzije od 1,2. Konačna mreža sadrži 1,2 miliona heksaedarskih ćelija. Smjer dolaznog vjetra je 210 stepeni u odnosu na sjevernu stranu. Smjer vjetra je tokom mjerenja ostao konstantan. Ulaz je fiksiran na zapadnoj strani proračunske domene, a izlaz na istočnoj strani. Na bočnoj strani domene je korišten granični uvjet sa konstantnim pritiskom, a na gornjoj se strani koristi granični uvjet simetrije. Zid je modeliran kao hrapavi zid s konstantnom visinom hrapavosti 0,03m.

Taylor i Teunissen (1983.) su predstavili mjerenja na nedimenzionalan način: srednje vrijednosti brzine date su u obliku frakcijskog omjera brzine ( $\Delta S$ ):

$$\Delta S(x, y, \Delta z) = \frac{U(x, y, \Delta z) - U_0(\Delta z)}{U_0(\Delta z)} \quad (11.1)$$

gdje je  $\Delta z$  visina iznad tla, a  $U_0(\Delta z)$  je vrijednost nesmetana strujna brzina na ulazu u domenu. Turbulentna kinetička energija  $k$  je:



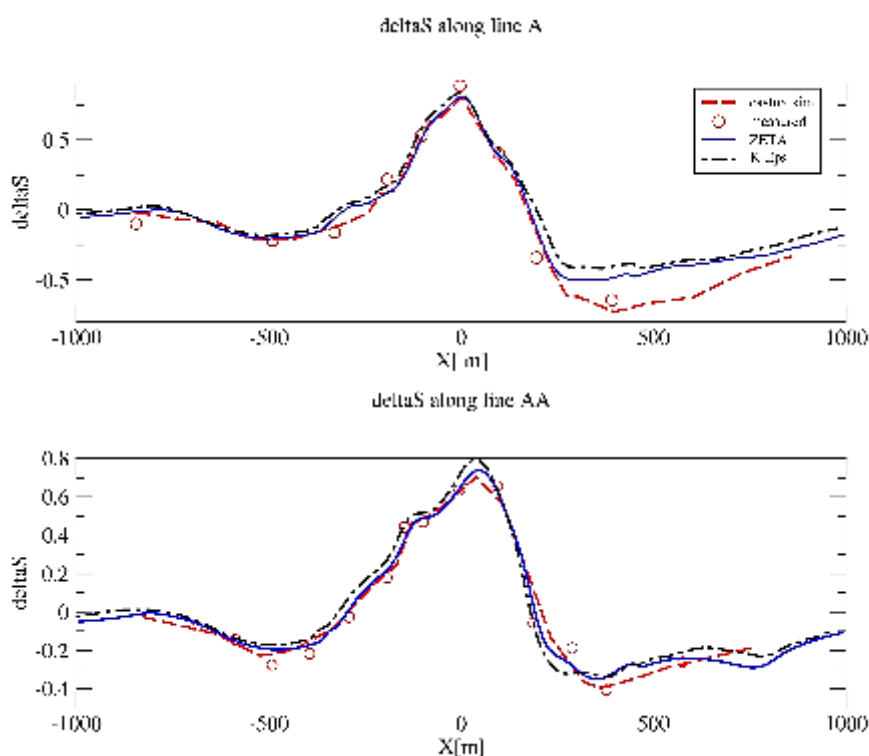
$$k^*(x, y, \Delta z) = \frac{k(x, y, \Delta z)}{U_{10}^2} \quad (11.2)$$

gdje je  $U_{10}$  srednja strujna brzina na 10 m iznad nivoa tla **na RS**.

Brzina dolaznog vjetra je 8,9 m/s, dolazni kut je  $210^\circ$ , a pretpostavlja se da je konstantan.

Na slici A.2 prikazana je uporedba frakcijskog omjera brzine duž linije A i linije AA na 10 m iznad nivoa tla. Rezultati duž linije AA su u skladu s eksperimentalnim rezultatima Taylora i Teunissena, kao i proračunskim rezultatima Castroa i saradnika [61].

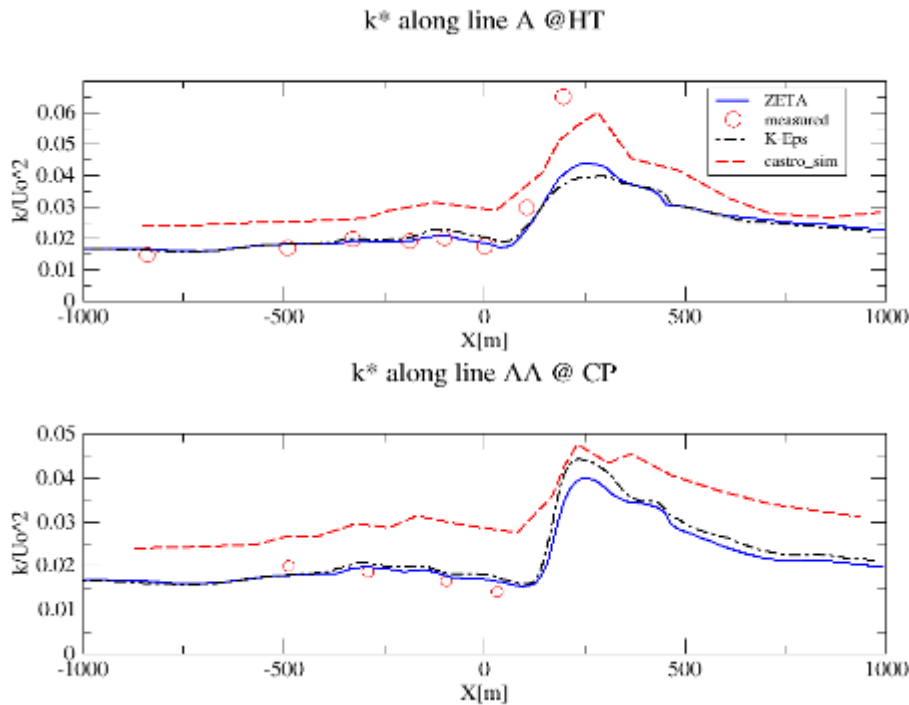
**Slika A.2:** Rezultati koji prikazuju  $\Delta S$  duž linije A (gornja) i linija AA (donja)



Treba napomenuti da  $x = 0$  na gornjoj slici odgovara vrhu brda i donjoj centralnoj tački.

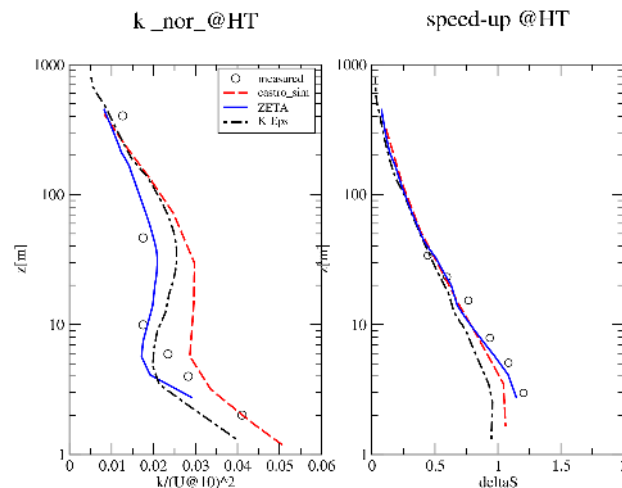
Rezultirajuće vrijednosti  $k^*$  (normalizirane turbulentne kinetičke energije s referentnom brzinom od 10 m agl. **na RS**) duž linije AA i linije A prikazane su na slici A.3. Ovi rezultati su u skladu s eksperimentalnim vrijednostima i na liniji A i na liniji AA.

Slika A.3: Rezultati koji prikazuju normaliziranu turbulentnu kinetičku energiju  $k^*$  duž linije A (gornja) i linije AA (donja)

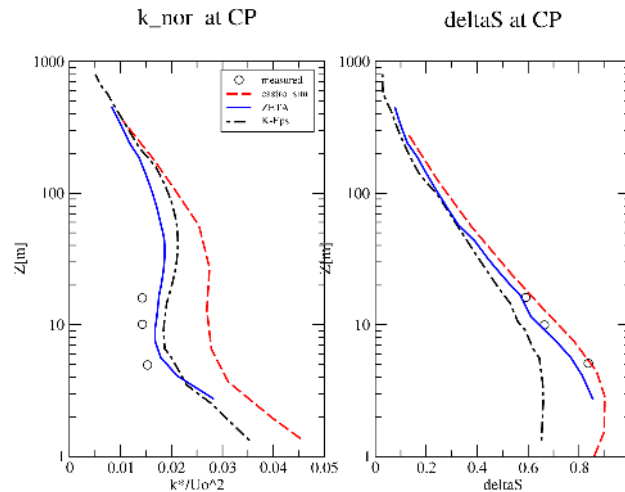


Na slikama A.4 i A.5 je prikazana uporedba vertikalnih profila frakcijskog ubrzanja i normalizirane turbulentne kinetičke energije na vrhu brda i centralnoj tački s dostupnim podacima mjerenja. Rezultati su općenito u skladu s mjerenjima.  $\zeta$ -f model je dao nešto bolje rezultate od  $k$ - $\epsilon$  modela koje su objavili Castro i sar. [61].  $K^*$  se povećavao kako se smanjivala udaljenost od tla, što je posebno vidljivo na vrhu brda.

Slika A.4: Vertikalni profili frakcijskog omjera brzine ( $\Delta S$ ) (desno) i normalizirana turbulentna kinetička energija  $k/U_{10}^2$  (lijevo) na vrhu brda



Slika A.5: Vertikalni profili frakcijskog omjera brzine ( $\Delta S$ ) (desno) i normalizirana turbulentna kinetička energija  $k/U_{10}^2$  (lijevo) na centralnoj tački



## Reference

- [60] Castro, F.A., 1997. Numerical Methods for the Simulation of Atmospheric Flows over Complex Terrain.
- [61] Castro, F.A., Palma, J.M.L.M., Lopes, A.S., 2003. Simulation of the askervein flow. Part 1: Reynolds averaged navier-stokes equations (k-epsilon turbulence model). *Boundary-Layer Meteorol.* 107, 501–530. <https://doi.org/10.1023/A:1022818327584>
- [62] Raithby, G.D., Stubley, G.D., Taylor, P. a., 1987. The Askervein hill project: A finite control volume prediction of three-dimensional flows over the hill. *Boundary-Layer Meteorol.* 39, 247–267. <https://doi.org/10.1007/BF00116121>
- [63] Silva Lopes, A., Palma, J.M.L.M., Castro, F.A., 2007. Simulation of the Askervein flow. Part 2: Large-eddy simulations. *Boundary-Layer Meteorol.* 125, 85–108. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9195-4>
- [64] Taylor, P. a., Teunissen, H.W., 1983. Askervein Hill Project Report - 1983.pdf.



## Studija slučaja 2: Referentni slučaj Goettinger case

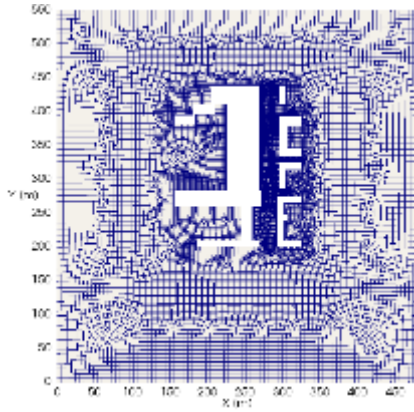
Goettinger Strasse je standardni referentni slučaj u CFD-u za tokove u urbanim sredinama, naročito za predviđanje disperzije polutanata u gradskom okruženju. Goettinger Strasse je ulica sa četiri trake, široka 25 metara, sa saobraćajnim opterećenjem od oko 30 000 vozila dnevno i udjelom kamiona od 16% [66], a koja se nalazi u gradu Hannoveru u Njemačkoj. Agencija za ekologiju Donje Saksonije (NLO) upravlja monitoring stanicom za evidentiranje nivoa koncentracije polutanata uzrokovanih saobraćajem. Monitoring stanica je postavljena na visini od 1,5 m, na pješačkom pločniku, blizu ruba ceste. Pored toga, meteorološka mjerenja se bilježe i na anemometru koji je postavljen na vrhu meteorološkog jarbola (10m) na krovu najviše zgrade (30m) iz kojeg se dobijaju informacije o brzini slobodne strujne brzine. Položaj i dimenzije zgrada su navedene u opisu slučaja koje je dostavila istraživačka grupa pod nazivom Optimizacija metoda modeliranja saobraćajnog zagađenja na ulicama (TRAPOS) u okviru Programa obuka i mobilnost istraživača [65].

Proračuni su izvršeni za sjeverni smjer vjetra u odnosu na mrežu, što znači da je glavni tok paralelan s ulicom. Glavni izvor zagađenja u Goettinger Strasse je gust promet u ovom uskoj ulici s četiri trake, po dvije u svakom smjeru. Za simulaciju emisije zagađivača, uvedena su dva linijska izvora dužine 180m. Naglasak je stavljen na određenu vrstu zagađivača, odnosno PM<sub>10</sub> čestice, a to su vrlo sitne čestice koje ne utječu na protok zraka i ne prolaze kroz bilo kakvu hemijsku reakciju. Stoga se u simulaciji zagađivači tretiraju kao pasivni skalar. Rezultati simulacije predstavljani su u nedimenzionalnom obliku, kako slijedi:

$$C^* = \frac{C \cdot U_{ref} \cdot H}{Q_e / W}$$

gdje je  $C$  trenutna koncentracija zagađenja,  $U_{ref} = 10 \frac{m}{s}$  je referentna brzina izmjerena na visini od 100 m,  $H = 20$  m je prosječna visina objekata u ulici, a  $\frac{Q_e}{W}$  je izvorna snaga po metru, pri čemu se udaljenost uzima kao širina linijskih izvora zagađenja  $W = 11,8$  m.

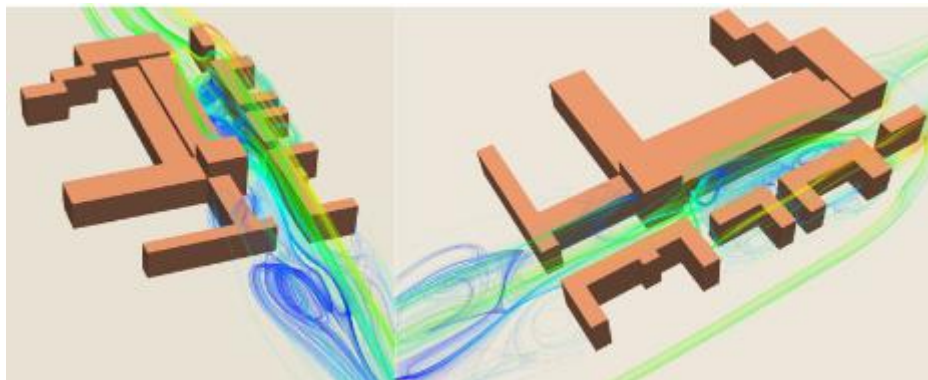
Slika A.6: Proračunska mreža za cijelu domenu za Goettinger Strasse, pogled odozgo



Slika A.7: Google Maps snimka Goettinger Strasse iz 2019., s konturama zgrada i simplificiranom geometrijom korištenom u ovoj analizi

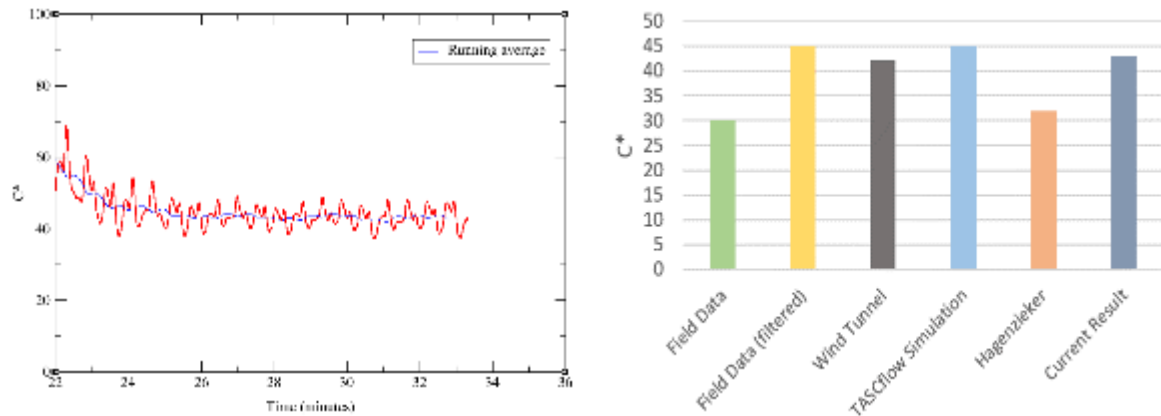


Slika A.8: Strujne linije duž centra Goettinger Strasse koji pokazuju kompleksan obrazac protoka



Rezultat ove simulacije za nivo koncentracije polutanta na lokaciji na kojoj se nalazi mjerna stanica a nakon što je koncentracija dostigao statističko postojano stanje, a u uporedbi s mjernim i proračunskim podacima drugih autora, prikazani su na slici A.9. Oscilacije  $C^*$  u vremenu potvrđuje složeni obrazac toka i njegovu nestabilnost. Simulacija je urađena za 50.000 vremenskih koraka, pri veličini vremenskog koraka od 0,04 s, što odgovara približno 33 minute u stvarnom vremenu.

Slika A.9: Rezultati simulacije nedimenzionalnog zagađenja zraka na mjernoj stanici



## Reference

[65] Louka, Petroula & Ketzel, Matthias & Sahm, P. & GUILLOTEAU, E. & Moussiopoulos, Nicolas & SINI, J.-F. (2001). CFD intercomparison exercise within TRAPOS European Research Network.

[66] Meschini, D. & Busini, V. & Ratingen, S.W. & Rota, R.. (2014). Modeling of pollutant dispersion in street canyon by means of CFD. PSAM 2014 - Probabilistic Safety Assessment and Management.



Mark Hewlett / Catalina Gallego-Lopez

**Atkins Limited**

SW1E 5BYNova North

11 Bressenden Place

Westminster

London

SW1E 5BY

Tel: +44(0) 20 7121 2000, Faks:

Faks: +44(0) 20 7121 2111, Fax:

Prof. Dr. Muhamed Hadžiabdić,

**Enova d.o.o**

Podgaj 14, 71000 Sarajevo

Bosna i Hercegovina

NACRT