

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

RIHARD KUČERA

**EKSPERIMENTALNI MODEL PRIRODNE VENTILACIJE
ZGRADE**

ZAGREB, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za aerodinamiku okoliša i konstrukcija Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Hrvoja Kozmara, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

Popis kratica

AGS	Atmosferski Granični Sloj
RAGS	Ruralni Atmosferski Granični Sloj
HWA	engl. <i>Hot-Wire Anemometer</i> , hrv. anemometar užarene žice
CTA	engl. <i>Constant Temperature Anemometry</i> , hrv. anemometrija konstantnom temperaturom
NDIR	engl. <i>Non-Dispersive Infrared</i> , hrv. nedisperzivni infracrveni (plinski analizator)

Sadržaj

Sadržaj

Popis slika

Popis oznaka

1.	Uvod.....	1
2.	Osnove.....	2
2.1.	Strujanje zraka u atmosferi.....	2
2.2.	Aerodinamika zgrada.....	7
3.	Eksperimentalne postavke.....	10
3.1.	Zračni tuneli.....	10
3.2.	Metode mjerenja.....	18
3.3.	Mjerna oprema.....	20
3.4.	Modeli zgrada i parametri ispitivanja.....	23
4.	Rezultati i diskusija.....	36
5.	Zaključak.....	44
	Zahvale.....	46
	Popis literature.....	47
	Sažetak.....	51
	Summary.....	52

Popis slika

2.1	Ekmanova spirala, prema Langensteiner [1].....	2
2.2	Struktura AGS-a, prema Garratt [3].....	3
2.3	Brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja izmjerene na različitim visinama od tla u Stigsnaes, Danska, prema Dyrbye i Hansen [5].....	4
2.4	Profili AGS-a iznad različitih tipova terena, prema Pernpeintner [7].....	5
2.5	Spektar kinetičke energije turbulencije, prema Garratt [3].....	6
2.6	Vizualizacija opstrujavanja zraka oko kocki različitih dimenzija, prema Martinuzzi i Tropea [9].....	8
3.1	Fotografija ispitne sekcije podzvučnog aerodinamičkog zračnog tunela, prema [21].....	10
3.2	Shematski prikaz podzvučnog zračnog tunela na Institutu za mehaniku fluida i prijenos topline, Tehničko sveučilište u Grazu, Austrija, prema [21].....	10
3.3	Fotografija zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled s boka.....	12
3.4	Fotografija zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled odozgo.....	13
3.5	Fotografija unutrašnjosti zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled iz ispitne sekcije.....	14
3.6	Fotografija početka ispitne sekcije s odgovarajućim generatorima vrtloga.....	15
3.7	Fotografija unutrašnjosti zračnog tunela za generiranje AGS-a s generatorima vrtloga smještenim iza fotografa.....	16
3.8	a) Tehnički crtež cjelokupne testne sekcije zračnog tunela za generiranje AGS-a, b) tehnički crtež vertikalne rešetke i nazubljene barijere, c) tehnički crtež detalja cijevne rešetke, d) položaj ravnina mjerenja u poprečnom smjeru, prema Golubić [22] i Miše [23].....	17
3.9	Shematski prikaz užarene žice 55P61, prema [24].....	18
3.10	Fotografija CTA kalibracijskog postava u podzvučnom zračnom tunelu.....	20
3.11	Fotografija eksperimentalnog postava u zračnom tunelu s generiranjem AGS-a.....	22
3.12	a) Tehnički crtež glavne (ispitivane) zgrade, prema Miše [23], b) fotografija ispitivane zgrade s trajno zatvorenim prozorom, c) fotografija ispitivane zgrade slikano iz smjera nastrujavanja zraka.....	23
3.13	Fotografije unutrašnjosti ispitivanog modela zgrade: a) prozori zatvoreni, b) prozori otvoreni.....	24
3.14	Fotografija pneumatskog sustava za upravljanje otvaranja/zatvaranja prozora.....	24
3.15	Različite visine modela tornja na istoj poziciji i pri istom kutu nastrujavanja zraka, a) model tornja visine 200 mm, b) model tornja visine 400 mm, c) model tornja visine 600 mm.....	25
3.16	Fotografija svih analiziranih pozicija modela zgrada.....	26
3.17	Pregled svih analiziranih pozicija modela zgrada na rotirajućoj kružnoj ploči ispitne sekcije zračnog tunela.....	27
3.18	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 1 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade.....	28
3.19	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 2 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade.....	29

3.20	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 4 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade.....	30
3.21	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 6 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade.....	31
3.22	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 7 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade.....	32
3.23	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 1 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade.....	33
3.24	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 2 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade.....	34
3.25	Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 4 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade.....	35
4.1	a) Usporedba profila osrednjenih brzina; b) profili osrednjenih brzina u različitim ravninama; z prikazan u modelskom mjerilu; referentna brzina $u_{\text{ref}} = \bar{u}(z_{\text{ref}} = 500 \text{ mm}) = 7,3015 \text{ m/s}$; $\alpha = 0,15$; $\kappa = 0,4$	36
4.2	Intenzitet turbulencije u smjeru glavnog strujanja.....	37
4.3	Integralna duljinska mjera turbulencije u smjeru glavnog strujanja.....	37
4.4	Spektralna raspodjela turbulentnih pulzacija brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja na prototipnoj visini $z = 25 \text{ m}$	37
4.5	Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 1.....	38
4.6	Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 2.....	39
4.7	Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 4.....	40
4.8	Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 6.....	41
4.9	Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 7.....	42

Popis oznaka

a	Duljina brida glavnog (ispitivanog) modela zgrade, m
A	Površina, m ²
x, y, z	Koordinate u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru, m
C	Koncentracija plina, %
h	Visina modela zgrade, m
I_u, I_v, I_w	Intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru, -
k_w	Valni broj vrtloga, 1/m
$L_{u,x}, L_{u,y}, L_{u,z}$	Integralna duljinska mjera turbulencije u x, y i z smjeru, m
p	Tlak, Pa
$R_{u,x}$	Koeficijent korelacije, -
$S_u(f)$	Spektralna gustoća energije turbulentnih pulzacija u x smjeru, m ² s ⁻²
t	Vrijeme, s
T	Vrijeme uzorkovanja podataka, s
u, v, w	Apsolutne vrijednosti brzine strujanja zraka u x, y i z smjeru, m/s
u', v', w'	Pulzirajuće vrijednosti brzine strujanja zraka u x, y i z smjeru, m/s
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Osrednjene vrijednosti brzine strujanja zraka u x, y i z smjeru, m/s
u_τ	Brzina trenja, m/s
u_δ	Brzina strujanja u x smjeru na gornjem rubu graničnog sloja, m/s
V	Volumen, m ³
\dot{V}	Volumenski protok, m ³ /s
z_0	Aerodinamička duljina hrapavosti površine, m
α	Eksponent zakona potencije, -
β	Kut nastrujavanja zraka, °
δ	Debljina graničnog sloja, m
δ^*	Debljina istisnuća, m
κ	Von Kármánova konstanta, -
ρ	Gustoća zraka, kg/m ³
σ_u	Standardna devijacija brzine strujanja zraka u x smjeru, m/s
τ	Smično naprezanje, N/m ²
μ	Dinamička viskoznost zraka, Pa·s
ν	Kinematička viskoznost zraka, m ² /s

<i>ACH</i>	Broj izmjena zraka, 1/h
<i>Re</i>	Reynoldsov broj
<i>Je</i>	Jensenov broj

1. Uvod

Klimatske promjene i problem otpada posljedice su razvoja industrijskih društava. Od početka 3. tisućljeća čovječanstvo je postalo svjesno kako se daljnji razvoj ne smije odvijati na štetu okoliša te se mora posvetiti principima održivosti. Prirodna ventilacija, po svojoj naravi, predstavlja dobar primjer prakse održivog razvoja, jer predstavlja postupak izmjene zraka u građevinskim objektima bez korištenja mehaničkih sustava, odnosno sukladno principu prirodne konvekcije. Oblik i dimenzije zgrada i građevinskih objekata direktno utječu na značajke strujanja u blizini ispitivanih zgrada, a posljedično i na intenzitet izmjene zraka unutar zgrada. Jedna od tipičnih zadataka aerodinamike okoliša i konstrukcija je određivanje opterećenja (statičkih i dinamičkih) uslijed opstrujavanja zgrada i drugih konstrukcija izloženih strujanjima u Zemljinj atmosferi. Aerodinamika okoliša i konstrukcija se uglavnom oslanja na eksperimentalne metode mehanike fluida, zbog ograničenja računalne dinamike fluida i mjerenja u prirodi. Eksperimenti se uobičajeno provode na modelima građevinskih objekata u zračnim tunelima. Za proučavanje aerodinamike zgrada je eksperimente potrebno provoditi u zračnim tunelima koji su posebno projektirani za potrebe modeliranja atmosferskog graničnog sloja (AGS), kako bi se uvjeti iz prirode točno modelirali u laboratoriju. Pri odabiru mjerila u modelskim ispitivanjima, potrebno je zadovoljiti dva oprečna zahtjeva. Kako bi se postigla što preciznija slika strujanja oko zgrade, potrebno je koristiti modele većih dimenzija. S druge strane je potrebno voditi računa da kritična vrijednost začepljenosti ispitne sekcije zračnog tunela nije veća od dopuštene vrijednosti, jer u tom slučaju može doći do pojave netočnih značajki strujanja zbog lokalnog pada tlaka uslijed ubrzanja zraka u prostoru između stijenki ispitne sekcije i modela zgrade.

Zadatak ovog rada jest razvoj eksperimentalnog modela prirodne ventilacije zgrade. Ispitivani model zgrade je smješten u blizini modela druge zgrade, koji visinom znatno odstupa od visine modela ispitivane zgrade. Eksperimenti su provedeni u zračnim tunelima na Institutu za mehaniku fluida i prijenos topline pri Tehničkom sveučilištu u Grazu u Austriji za različite kuteve nastrojavanja modela ispitivane zgrade, pozicije drugog (višeg) modela zgrade, načine provjetravanja.

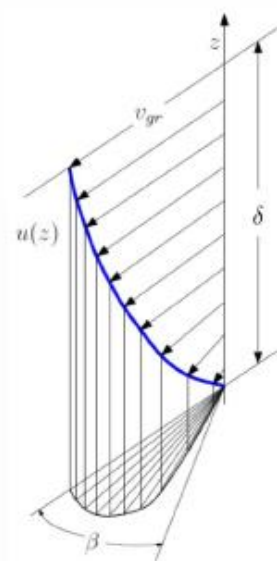
U Poglavlju 2 su dane teorijske osnove atmosferskih strujanja i aerodinamike zgrada. Poglavlje 3 daje pregled eksperimentalnih postavki. U Poglavlju 4 su predstavljeni rezultati provedenih eksperimenata. Zaključak rada je dan u Poglavlju 5.

2. Osnove

2.1. Strujanje zraka u atmosferi

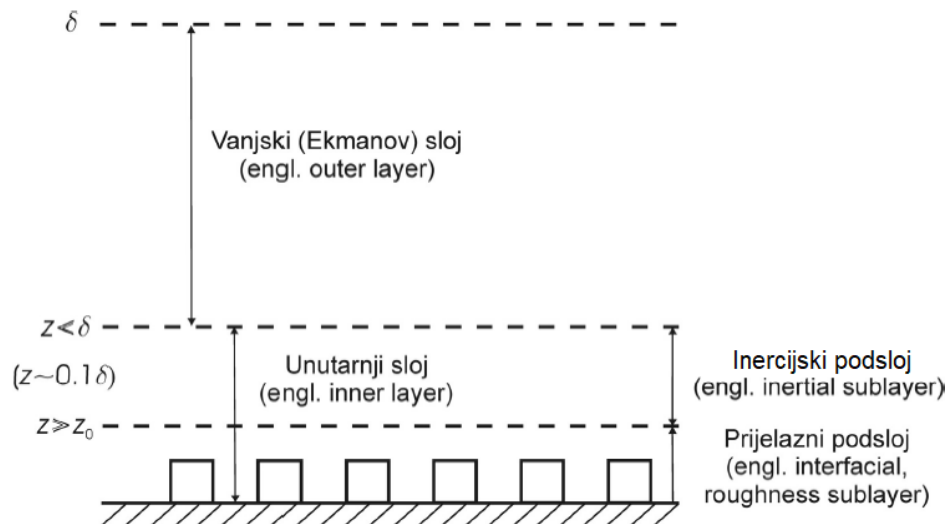
Toplina koja putem radijacije Sunca zrači Zemljinu površinu je glavni uzročnik atmosferskog gibanja zraka, odnosno vjetra. Naime, Sunce neravnomjerno zagrijava površinu Zemlje što dovodi do temperaturnih razlika na globalnoj razini, a ovo zagrijavanje uzrokuje neravnomjernu raspodjelu tlaka u Zemljinoj atmosferi. Gradijent tlaka uzrokuje strujanje zraka, a to gibanje zraka uzrokuje značajne promjene atmosferskog tlaka, stoga se te dvije pojave promatraju istovremeno.

Na strujanje zraka dominantno utječu sile u horizontalnom i vertikalnom smjeru, promatrano relativno u odnosu na Zemljinu površinu. Vertikalna uzgonska sila je izravna posljedica temperaturne stratifikacije atmosfere. Rezultantno gibanje u horizontalnom smjeru je određeno doprinosom sile tlaka, viskoznih sila i Coriolisove sile uslijed Zemljine rotacije. Na strujanje zraka u nižim dijelovima atmosfere najviše utječe (viskozna) sila trenja koja se javlja međudjelovanjem Zemljine površine i strujanja zraka. Ovaj atmosferski sloj se naziva AGS. Iznad AGS-a viskozne sile nemaju značajnu ulogu, tj. dominantne su tlačne sile i Coriolisova sila. Slijedom promjena odnosa sila na različitim visinama, vjetar mijenja smjer od površine tla do gornje granice AGS-a. Ova pojava rezultira profilom brzine u AGS-u, tzv. Ekmanova spirala, slika 2.1.



Slika 2.1: Ekmanova spirala, prema Langensteiner [1].

AGS je dio troposfere u izravnoj interakciji sa Zemljinom površinom. Prema Counihan [2], prosječna debljina AGS-a iznosi 600 m. ABL se može okarakterizirati vanjskim (tzv. Ekmanovim) i unutarnjim slojem, slika 2.2.



Slika 2.2: Struktura AGS-a, prema Garratt [3].

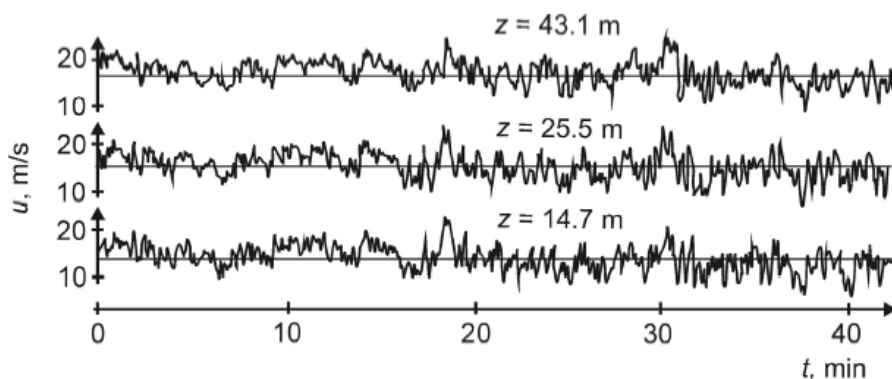
Unutarnji sloj se sastoji od prijelaznog i inercijskog podsloja. Prijelazni podsloj se proteže od tla do približno visine okolnih zgrada, a ukupna visina unutarnjeg sloja iznosi ~100 m. U unutarnjem sloju je dominantan utjecaj značajki podloge, dok se utjecaj Zemljine rotacije može zanemariti, dok je kod Ekmanovog sloja obrnuti slučaj. Zbog utjecaja viskoznosti, osrednjena vrijednost brzine na razini tla je nula i raste do svoje maksimalne vrijednosti na gornjoj granici AGS-a, a istodobno vrijednosti parametara koji karakteriziraju turbulentnu strukturu AGS-a imaju svoj maksimum u blizini Zemljine površine te im se vrijednosti smanjuju s povećanjem visine od tla.

Strujanje zraka u atmosferi je izrazito turbulentno i nestacionarno, pri čemu su relevantne fizikalne veličine obilježene slučajnim pulzacijama u širokom spektru frekvencija (vremenski gledano) i u širokom spektru valnih duljina (prostorno gledano) [4], slika 2.3. Inženjersko rješenje u ovakvom slučaju je korištenje Reynoldsove dekompozicije, koja je matematička operacija vremenskog osrednjavanja. Na taj se način za svaku fizikalnu veličinu u turbulentnom strujanju dobiva osrednjena vrijednost i amplituda odstupanja od te osrednjene vrijednosti, npr. za brzinu strujanja u svim smjerovima vrijedi

$$\begin{aligned}
 u &= \bar{u} + u', \\
 v &= \bar{v} + v', \\
 w &= \bar{w} + w',
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

pri čemu za srednju vrijednost brzine u uzdužnom smjeru vrijedi

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t - \tau) d\tau.
 \tag{2.2}$$



Slika 2.3: Brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja izmjerene na različitim visinama od tla u Stigsnaes, Danska, prema Dyrbye i Hansen [5].

Strujanje zraka u AGS-u je trodimenzijsko, no mjerenja su pokazala kako je brzina u uzdužnome smjeru (smjer glavnog strujanja) znatno veća od brzina u poprečnom i vertikalnom smjeru, stoga se one mogu zanemariti prilikom analize eksperimentalnih rezultata. Profil osrednjene vrijednosti brzine u smjeru glavnog strujanja unutar AGS-a se definira zakonom potencije

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left(\frac{z - d}{z_{\text{ref}} - d} \right)^\alpha = \left(\frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_{\text{ref}}} \right)^\alpha
 \tag{2.3}$$

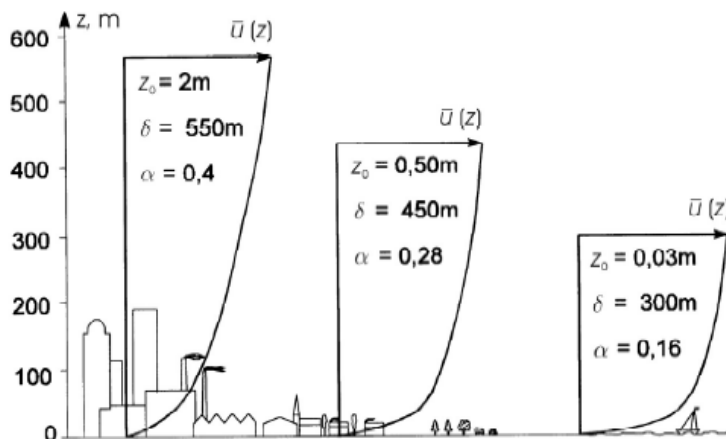
koji vrijedi kroz čitavu debljinu AGS-a.

U blizini tla (do visine ~100 m), profil osrednjene vrijednosti brzine se može aproksimirati logaritamskim zakonom

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)
 \tag{2.4}$$

pri čemu von Kármánova konstanta iznosi $\kappa = 0,4$, a brzina trenja je $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$.

Profil osrednjenih vrijednosti brzine ovisi o geodetskoj visini te podnoj hrapavosti. Hrapavost je karakterizirana aerodinamičkom duljinom hrapavosti z_0 , koja je određena visinom, oblikom, gustoćom i raspodjelom elemenata podne hrapavosti. Povećanjem hrapavosti površine, odnosno povećanjem visine zgrada i drugih objekata, gradijent brzine se smanjuje, slika 2.4. Daljnji detalji o karakteristikama terena dostupni su u ESDU [6].



Slika 2.4: Profili AGS-a iznad različitih tipova terena, prema Pernpeintner [7].

Parametri koji karakteriziraju turbulentnu strukturu AGS-a su intenzitet turbulencije, integralna duljinska mjera turbulencije, turbulentno (Reynoldsovo) smično naprezanje, spektar kinetičke energije turbulentnih pulzacija brzine strujanja zraka.

Intenzitet turbulencije predstavlja mjeru pulzacija brzine na određenoj visini od tla,

$$I_u(z) = \frac{u'(z)}{u_{\text{ref}}}, I_v(z) = \frac{v'(z)}{u_{\text{ref}}}, I_w(z) = \frac{w'(z)}{u_{\text{ref}}}. \quad (2.5)$$

Integralna duljinska mjera turbulencije predstavlja osrednjenu veličinu turbulentnih vrtloga na određenoj visini od tla. Najznačajnija komponenta je $L_{u,x}$ koja opisuje osrednjenu veličinu vrtloga u uzdužnom smjeru, prema Sockelu [8],

$$L_{u,x} = \int_0^{\infty} R_{u,x}(\Delta x) d\Delta x \quad (2.6)$$

pri čemu je tzv. korelacijski faktor

$$R_{u,x}(\Delta x) = \frac{\overline{u_1'(t) \cdot u_2'(t)}}{\sqrt{\overline{u_1'^2}} \cdot \sqrt{\overline{u_2'^2}}} \quad (2.7)$$

Uz primjenu Taylorove hipoteze zamrznute turbulencije, integralne mjere turbulencije određuju se uz korištenje vremenskih korelacija te jednačbe 2.6 i 2.7 prelaze u oblik

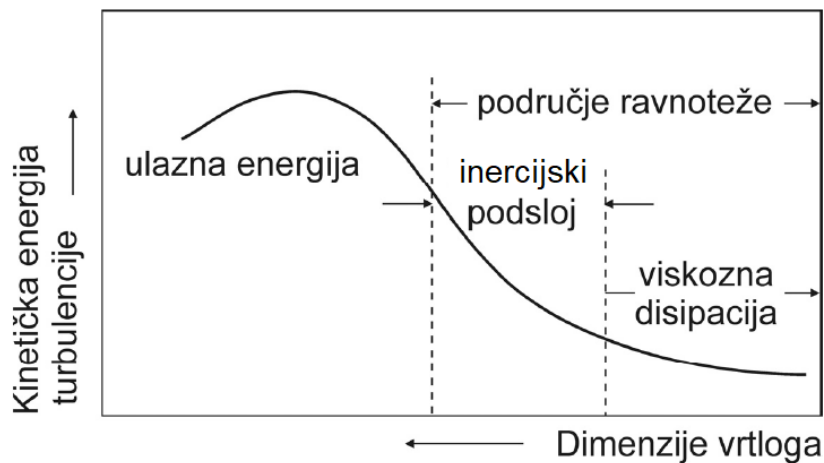
$$R_{u,x}(\Delta x) = \frac{\overline{u_1'(t) \cdot u_1'(t - \Delta t)}}{\overline{u_1'^2}} = R_{u,x}(\Delta t) \quad (2.8)$$

$$L_{u,x} = \int_0^{\infty} R_{u,x}(\Delta t) d\Delta t \quad (2.9)$$

Spektar kinetičke energije turbulentnih pulzacija brzine strujanja zraka predstavlja ukupnu kinetičku energiju turbulentnih vrtloga različitih veličina, slika 2.5. U inženjerskoj praksi, najrelevantniji spektar je onaj u smjeru glavnog strujanja

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f) df \quad (2.10)$$

pri čemu je $S_u(f)$ spektralna gustoća energije turbulentnih pulzacija strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja pri frekvenciji f .



Slika 2.5: Spektar kinetičke energije turbulencije, prema Garratt [3].

U srednjem dijelu spektra, slika 2.5, inercijske sile imaju dominantnu ulogu. U tom području moguće je primijeniti model Kolmogorova

$$S_u(f) \approx k_w^{-5/3} \quad (2.11)$$

gdje k_w predstavlja valni broj turbulentnih vrtloga.

Sila trenja, koja nastaje pri međudjelovanju vjetra i Zemljine površine, se u gornje dijelove AGS-a prenosi putem smičnih naprezanja. Smična naprezanja predstavljaju zbroj viskoznih i turbulentnih naprezanja,

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \quad (2.12)$$

U aerodinamici okoliša i konstrukcija se bitnim smatraju samo turbulentna naprezanja. U praktičnim primjenama, korelacije $u'v'$ i $v'w'$ se mogu zanemariti.

2.2. Aerodinamika zgrada

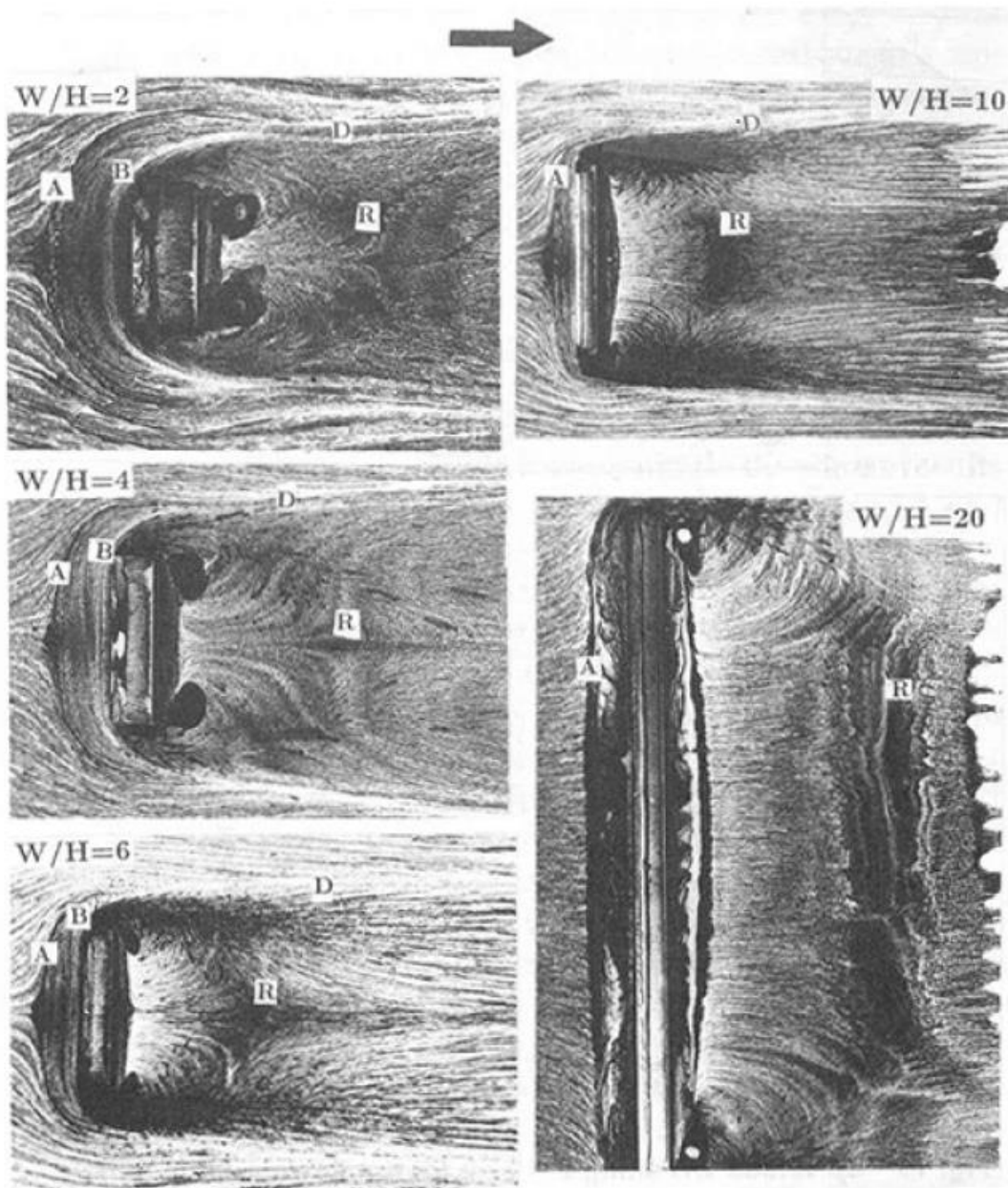
Zgrade se generalno smatraju tupim tijelima (engl. *bluff bodies*). Najjednostavnija inačica tupog tijela, koja se koristi u modelskim ispitivanjima i zadovoljava kriterije geometrijske sličnosti, jest kocka. Za razliku od aerodinamički oblikovanih tijela, tupa tijela poput kocki imaju široki vrtložni trag te je kod njih izuzetno izražen otpor oblika, slika 2.6. Osim toga, opstrujavanje kocke karakterizira izuzetno složen sustav vrtloga u neizravnoj okolini kocke. Razumijevanje potpune trodimenzijske prirode ovih značajki od velike je važnosti za identificiranje parametara koji utječu na prirodnu ventilaciju zgrada. Temeljna istraživanja optjecanja kocke su proveli Martinuzzi i Tropea [9], Kozmar [10], Cheung i Liu [11], Tominaga i Blocken [12] te Kuznetsov i ostali [13].

Prirodna ventilacija u širem smislu podrazumijeva prostrujavanje zraka kroz otvore zgrade, uključujući prozore, vrata i pukotine. Razlika tlaka potrebna za prirodnu ventilaciju je uvjetovana atmosferskim uvjetima, no kako nema potrebe za radom mehaničkih uređaja, ekološki i ekonomski je prirodna ventilacija zgrada izuzetno prihvatljiva. Intenzitet izmjene zraka je uvjetovan temperaturnom razlikom unutrašnjosti prostorije i okoliša, strujanjem zraka u blizini građevinskog objekta ili spregnutim djelovanjem tih dviju pojava. Razlikuju se dva osnovna tipa prirodne ventilacije: a) uslijed djelovanja vjetra (engl. *wind-driven*) zbog razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog prostora, b) uslijed djelovanja uzgonske sile (engl. *buoyancy-driven* ili *stack*) zbog temperaturne razlike između unutrašnjosti prostorije i okoliša. Parametar koji se koristi za kvantitativan prikaz intenziteta prirodne ventilacije se naziva broj izmjena zraka (engl. *air change rate* - ACH). ACH predstavlja količinu zraka izmijenjenu u prostoriji zgrade tijekom jednog sunčanog sata. Prema Langensteineru

[1], ACH je definiran kao omjer ukupnog volumnog protoka zraka tijekom jednog sata i volumena prostorije

$$ACH = \frac{\dot{V}}{V_R} \quad (2.13)$$

pri čemu V_R predstavlja volumen prostorije.



Slika 2.6: Vizualizacija opstrujavanja zraka oko kocki različitih dimenzija, prema Martinuzzi i Tropea [9]

Prema Kozmaru [14] sljedeći uvjeti trebaju biti ispunjeni za postizanje sličnosti strujanja između modela i prototipa kod ispitivanja aerodinamike tupih tijela koja predstavljaju građevinske objekte:

- a) Kritični Reynoldsov broj prema Plate [15];

$$Re_R = \frac{u_\tau z_0}{\nu} > 5. \quad (2.14)$$

- b) Eksponent zakona potencije;

$$\alpha_m = \alpha_p. \quad (2.15)$$

- c) Jensenov broj prema Cook [16];

$$Je = \frac{z_{0m}}{\delta_m} = \frac{z_{0p}}{\delta_p}. \quad (2.16)$$

- d) Gradijent tlaka duž ispitne sekcije prema WTG [17];

$$\frac{\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta}{\frac{\rho}{2} \cdot \bar{u}_\delta^2} \leq 0.05 \quad (2.17)$$

- e) Kritična vrijednost začepljenosti ispitne sekcije zračnog tunela prema Wolf-Heinrich [18];

$$\frac{A_M}{A_K} \leq 0.05 \quad (2.18)$$

pri čemu je A_M projicirana površina modela u smjeru strujanja, A_K je površina poprečnog presjeka ispitne sekcije zračnog tunela. Utjecaj Reynoldsovog broja može se zanemariti jer modeli zgrade imaju oštre rubove, a odvajanje strujanja se uvijek događa na oštrim bridovima [19]. Kako je strujanje turbulentno, Re ima zanemariv učinak i na ponovno nalijeganje strujanja, što je uvjetovano turbulencijom i hrapavosti površine modela [20].

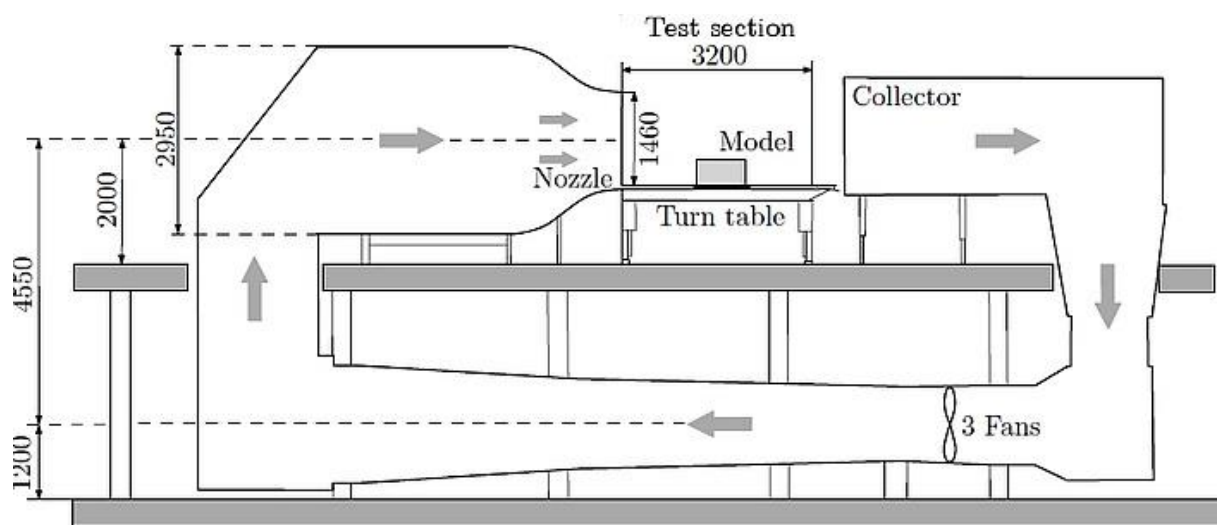
3. Eksperimentalne postavke

3.1. Zračni tuneli

Podzvučni aerodinamički zračni tunel göttingenskog tipa sa zatvorenim sustavom rada se koristi za automobilsku i sportsku aerodinamiku, temeljna istraživanja jednostavnih geometrijskih oblika i druge opće primjene, slika 3.1.



Slika 3.1: Fotografija ispitne sekcije podzvučnog aerodinamičkog zračnog tunela, prema [21]



Slika 3.2: Shematski prikaz podzvučnog zračnog tunela na Institutu za mehaniku fluida i prijenos topline, Tehničko sveučilište u Grazu, Austrija, prema [21]

Duljina aerodinamičkog tunela je 16 m, visina 7,7 m, širina 6 m. Ispitna sekcija je modularna te se može koristiti u otvorenom i zatvorenom sustavu rada. Recirkulacija zraka je izvedena pomoću tri identična aksijalna ventilatora smještena u tri zasebna kanala. Konstrukcija tunela je kompozitne prirode, koja se sastoji od čeličnih profila i drvenih zidova s pažljivo zaglađenim površinama. Četiri sita i odgovarajuća sapnica pridonose poboljšanju jednolikosti strujanja i smanjenju intenziteta turbulencije. Maksimalna brzina strujanja zraka u zračnom tunelu iznosi 45 m/s.

Zračni tunel za generiranje AGS-a je göttingenskog tipa sa zatvorenim sustavom rada i zatvorenom ispitnom sekcijom. Princip konstrukcije je isti kao i za aerodinamički tunel. Dvije su glavne razlike između ova dva korištena zračna tunela, tj. zračni tunel za generiranje AGS-a je manjeg volumena, zauzima samo laboratorijski prostor i ima samo dva recirkulacijska kanala s dva jednaka aksijalna ventilatora, slike 3.3 i 3.4. Maksimalna brzina strujanja zraka na ulazu u ispitnu sekciju je ~40 m/s. Ispitna sekcija je duga 8,6 m i ima zatvorene zidove, dok je strop podesiv po visini što omogućuje kompenzaciju gradijenta tlaka duž sekcije.



Slika 3.3: Fotografija zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled s boka

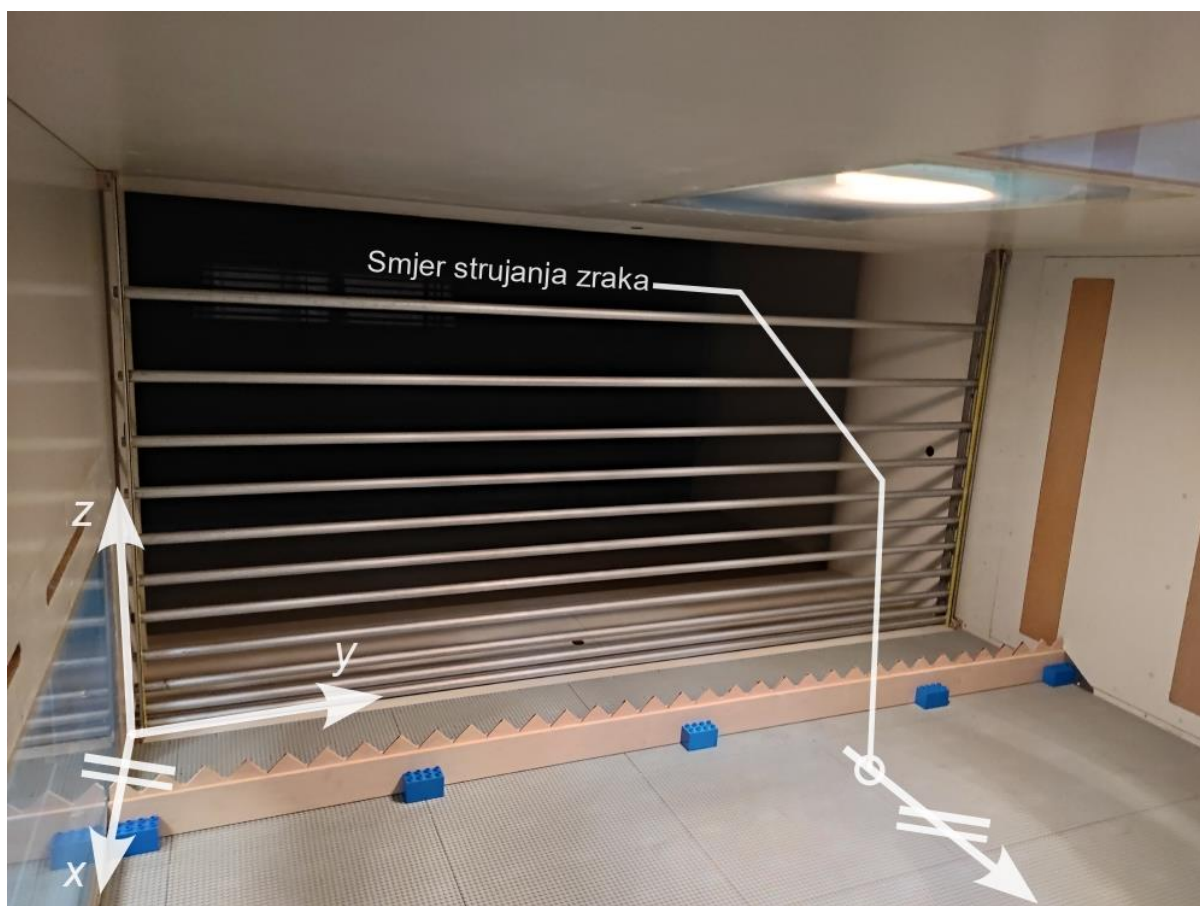


Slika 3.4: Fotografija zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled odozgo

Za simulaciju donjeg dijela AGS-a su korišteni odgovarajući generatori vrtloga i elementi podne hrapavosti. Generator vrtloga je izveden kao vertikalna rešetka sastavljena od cilindričnih šipki te postavljena na ulazu u ispitnu sekciju tunela. Nazubljena barijera je postavljena nizvodno od šipki te služi kao dodatni generator turbulencije. Odgovarajuća visina i gustoća elemenata podne hrapavosti (Lego ili Duplo kocke) omogućavaju simulaciju AGS-a. Na udaljenosti $3-4\delta$ nizvodno od generatora vrtloga, model AGS-a je u potpunosti razvijen i uravnotežen. Dodatni detalji ispitne sekcije su prikazani slikama 3.5, 3.6, 3.7 i 3.8.



Slika 3.5: Fotografija unutrašnjosti zračnog tunela za generiranje AGS-a, pogled iz ispitne sekcije

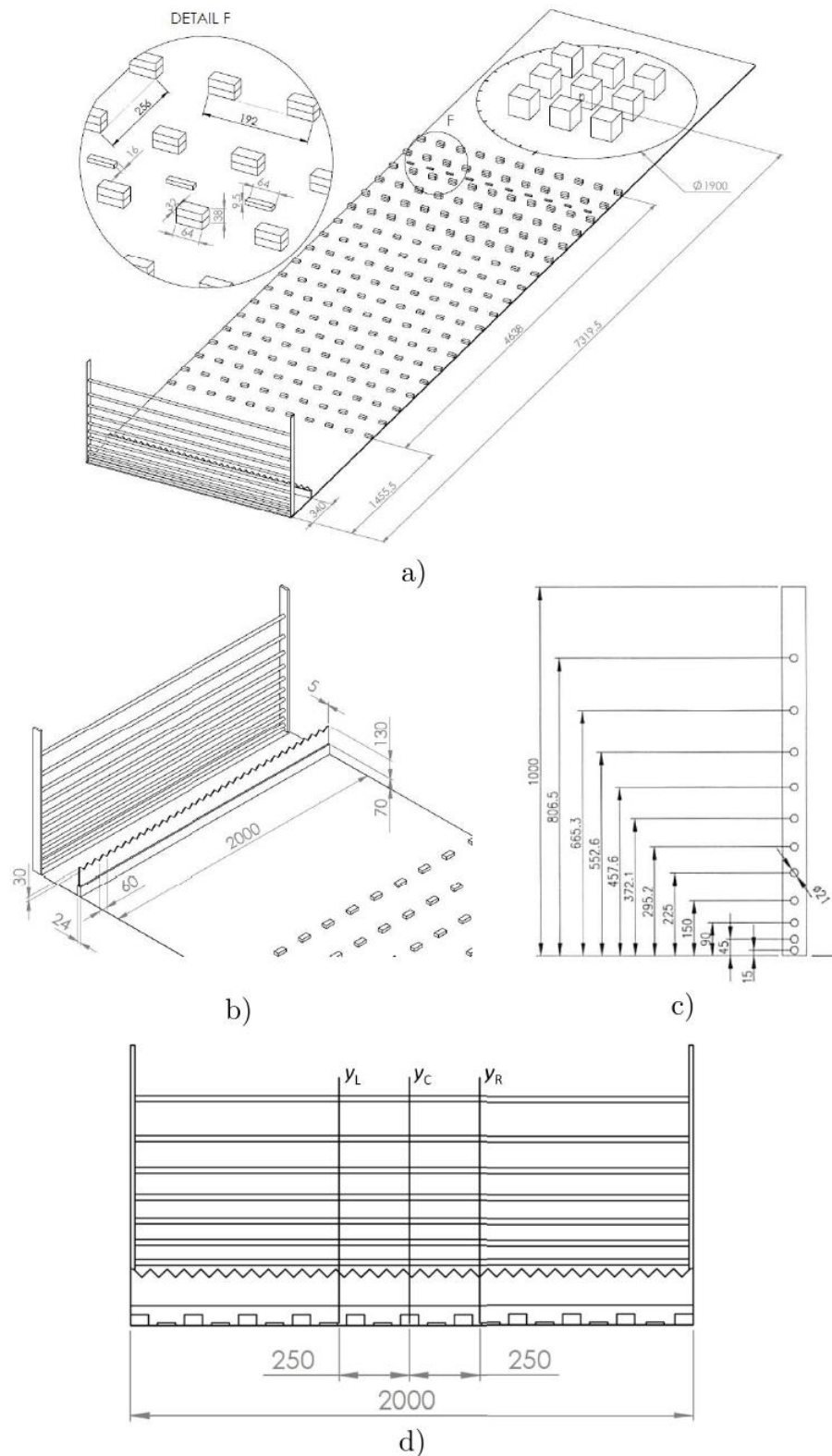


Slika 3.6: Fotografija početka ispitne sekcije s odgovarajućim generatorima vrtloga

U razini podloge zračnog tunela 7,32 m nizvodno od ulaza u ispitnu sekciju se nalazi središte rotirajuće kružne ploče koja služi za smještanje modela građevinskih objekata i simulaciju nasmrujanja zraka iz različitih kuteva.



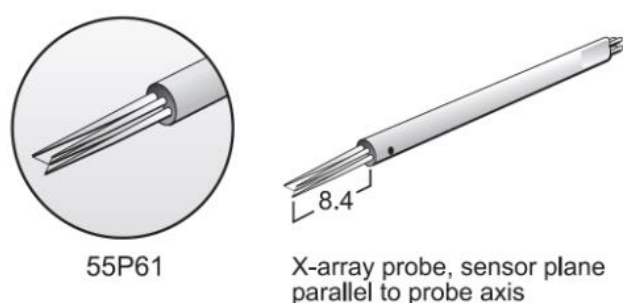
Slika 3.7: Fotografija unutrašnjosti zračnog tunela za generiranje AGS-a s generatorima vrtloga smještenim iza fotografa



Slika 3.8: a) Tehnički crtež cjelokupne testne sekcije zračnog tunela za generiranje AGS-a, b) tehnički crtež vertikalne rešetke i nazubljene barijere, c) tehnički crtež detalja cijevne rešetke, d) položaj ravnina mjerenja u poprečnom smjeru, prema Golubić [22] i Miše [23].

3.2. Metode mjerenja

Mjerenja brzine i turbulencije strujanja zraka su provedena metodom užarene žice uz pomoć anemometra konstantne temperature (eng. Constant Temperature Anemometry, CTA). Dvostrukom užarenom žicom Dantec Dynamics 55P61 je mjerena brzina u točki u dva smjera, a rezultat je niz podataka koji se statistički obrađuje u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, slika 3.9.



Slika 3.9: Shematski prikaz užarene žice 55P61, prema [24]

Prolaskom električne struje kroz užarenu žicu se oslobađa toplina, koja se zatim konvekcijom prenosi na struju zraka. Užarena žica je spojena na mjerni lanac, koji na temelju toplinske ravnoteže između užarene žice te brzine grijanja/hlađenja određuje brzinu strujanja zraka.

ACH se mjeri pomoću metode praćenja koncentracije plina primjenom nedisperzivnog infracrvenog (engl. *Non-Dispersive Infrared*, NDIR) plinskog analizatora LumaSence Technologies INNOVA 1316A-2, [25]. Zbog svojih povoljnih svojstava je ugljični dioksid CO₂ odabran kao radni plin. NDIR osjetnik određuje koncentraciju plina na temelju međudjelovanja infracrvenog svjetla i molekule plina.

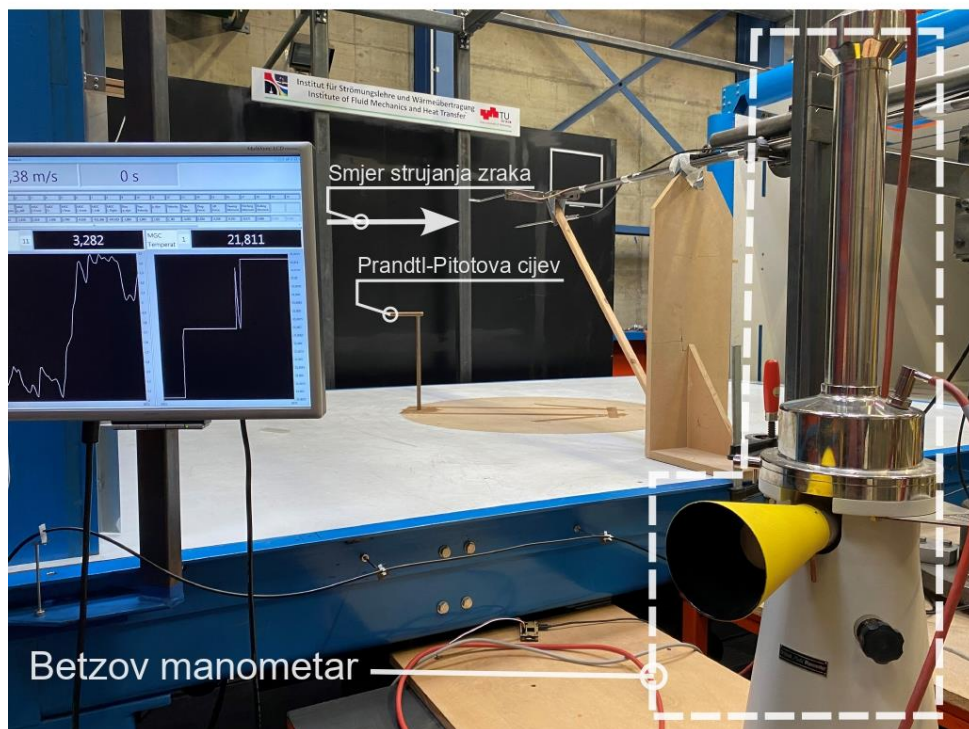
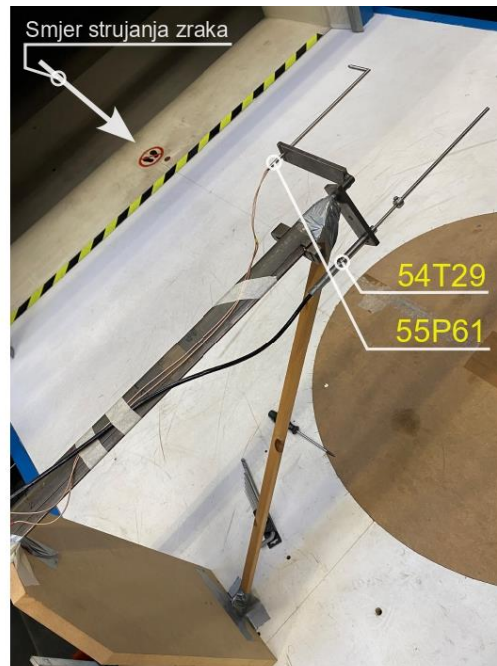
Postupak mjerenja počinje upuhivanjem CO₂ u glavni (ispitivani) model zgrade. Nakon što zrak i CO₂ stvore homogenu smjesu, bilježi se početna koncentracija plina. Otvaranjem prozora ispitivanog modela zgrade, vanjska struja zraka se miješa s plinom u modelu zgrade. Nakon zatvaranja prozora i stvaranja homogene smjese se utvrđuje konačna koncentracija plina. Na temelju izmjerenih koncentracija, ACH se računa prema relaciji [1]

$$\text{ACH} = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \quad (3.1)$$

pri čemu je Δt vrijeme tijekom kojega je prozor bio otvoren, $\Delta C(t)$ početna koncentracija CO₂, a $\Delta C(t + \Delta t)$ je konačna koncentracija CO₂.

3.3. Mjerna oprema

Kako bi se osigurala točnost CTA mjerenja, provedena je kalibracija u podzvučnom zračnom tunelu, slika 3.10.



Slika 3.10: Fotografija CTA kalibracijskog postava u podzvučnom zračnom tunelu

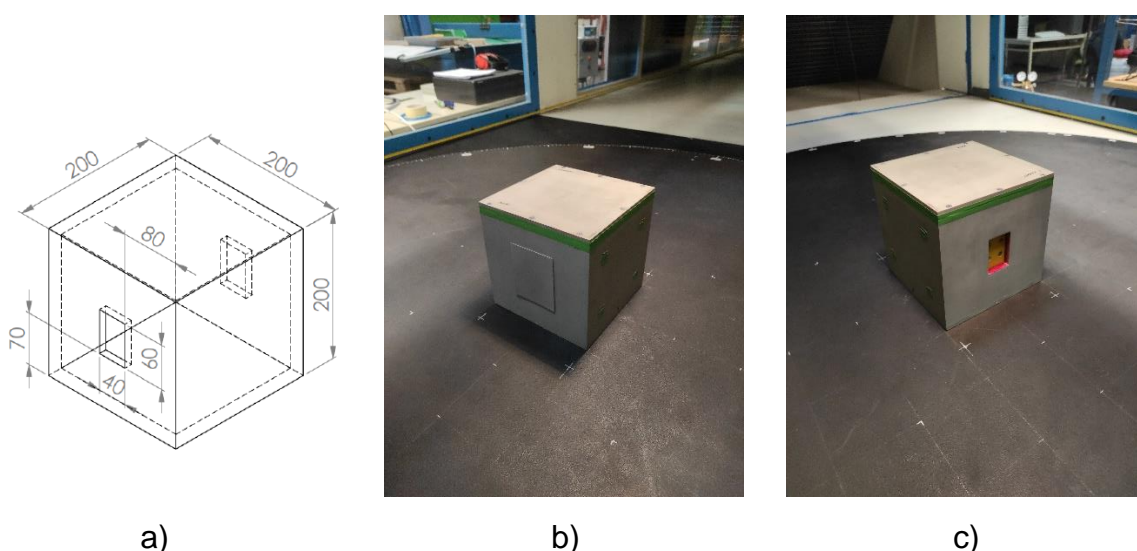
Prvo je provedena kalibracija referentnog osjetnika brzine, koji je nakon kalibracije ugrađen u otvor stijenke zračnog tunela s generiranjem AGS-a i korišten za kontrolu brzine struje zraka tijekom provedbe eksperimenata. Referentni osjetnik je jednostruka užarena žica 54T29. Kalibracija mjerenja brzine je provedena korištenjem Prandtl-Pitotove cijevi spojene na Betzov manometar i temperaturnog osjetnika postavljenog u struju zraka na ulazu u ispitnu sekciju. Isti postupak je ponovljen i za dvostruku užarenu žicu 55P61 koja se koristila za određivanje značajki modela AGS-a. 55P61 je instaliran u prihvat smješten na kraju noseće konzole, koji je spojen na linearni aktuator (engl. *traverse*) koji omogućuje vertikalni pomak osjetnika, slika 3.11.



Slika 3.11: Fotografija eksperimentalnog postava u zračnom tunelu s generiranjem AGS-a

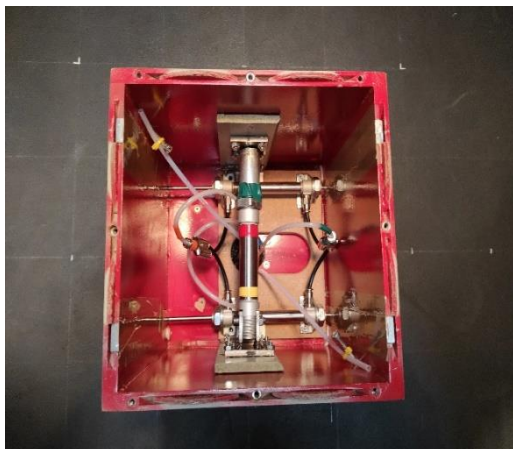
3.4. Modeli zgrada i parametri ispitivanja

Glavni model zgrade, slika 3.12, u kojem se mjeri prirodna ventilacija, je postavljen na središte rotirajuće kružne ploče. Glavni model je oblika kocke s duljinom brida 200 mm. Model visoke zgrade se nalazi u neposrednoj blizini modela glavne zgrade na udaljenosti jednakoj duljini brida modela glavne zgrade. Model visoke zgrade nije opremljen mjernom opremom, a može biti smješten na jednoj od predviđenih pozicija na kružnoj ploči, slika 3.16.

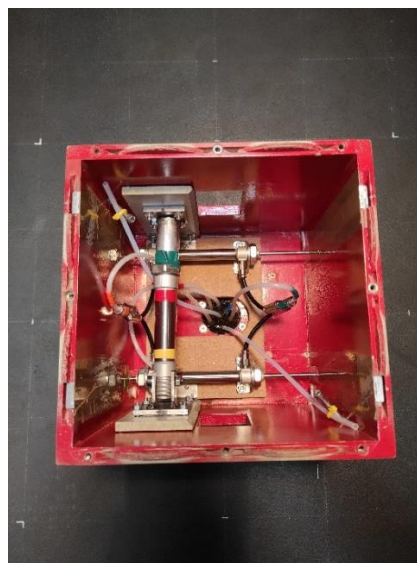


Slika 3.12: a) Tehnički crtež glavne (ispitivane) zgrade, prema Miše [23], b) fotografija ispitivane zgrade s trajno zatvorenim prozorom, c) fotografija ispitivane zgrade slikano iz smjera nastrojavanja zraka

Provedena je analiza dva načina prirodne ventilacije ispitivanog modela zgrade, i to a) jednostrana sa samo jednim otvorenim prozorom, i b) poprečna s dva istovremeno otvorena prozora. Kako bi se postigla jednostrana ventilacija (i spriječilo neželjeno istjecanje CO₂), jedan prozor je trajno zatvoren plastičnim poklopcem, slika 3.12. Otvaranje i zatvaranje prozora je izvedeno korištenjem linijskih pneumatskih aktuatora. Dva pneumatska cilindra služe za pritezanje/otpuštanje prozora, a druga dva cilindra za otvaranje/zatvaranje. Osim opisanih pneumatskih aktuatora, slika 3.13 prikazuje cijev za dovod CO₂, cijev za opskrbu cilindara stlačenim zrakom, i cijev analizatora plina.



a)



b)

Slika 3.13: Fotografije unutrašnjosti ispitivanog modela zgrade: a) prozori zatvoreni, b) prozori otvoreni

Pneumatski cilindri su pokretani ventilima s poluautomatskim sustavom upravljanja, slika 3.14.



Slika 3.14: Fotografija pneumatskog sustava za upravljanje otvaranja/zatvaranja prozora

Aktiviranjem prvog ventila se prozori trenutno zatvaraju, dok se pritiskom na drugi ventil cilindri pomiču u konačni položaj i prozori se otvaraju. U tom trenutku se

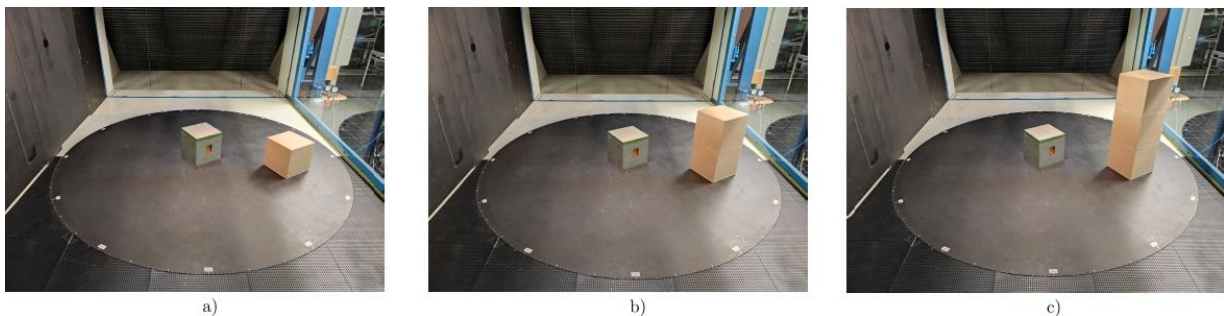
aktivira automatski sustav koji drži prozore otvorene 3 s, a zatim automatski vraća cilindre u početni položaj i zateže prozore unutar 1 s.

Glavni zadatak ovog eksperimentalnog istraživanja je određivanje utjecaja visoke zgrade na prirodnu ventilaciju niže zgrade smještene u neposrednoj blizini. Tijekom ispitivanja je modeliran ruralni atmosferski granični sloj (RAGS) karakterističan za ruralni tip terena s nekoliko zgrada ili drugih građevinskih objekata. Brzina zraka u slobodnoj, neporemećenoj struji tijekom eksperimenata je 7 m/s i stalno je praćena pomoću T29 osjetnika kako bi se osigurala dobra ponovljivost eksperimentalnih podataka.

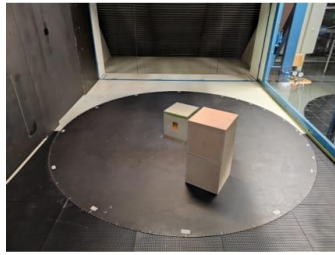
Detaljno su istraženi sljedeći parametri:

- Utjecaj kuta nastrujavanja zraka (ukupno 12 kuteva);
- Dva načina prirodne ventilacije glavne zgrade (jednostrana i poprečna);
- Tri različite visine visoke zgrade (tornja);
- Pozicija tornja u odnosu na ispitivanu zgradu.

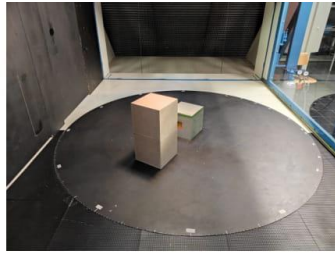
Slika 3.15 prikazuje različite visine modela zgrada. Ispitan je utjecaj modela tornja visine 200 mm, 400 mm i 600 mm.



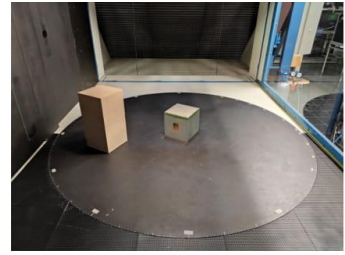
Slika 3.15: Različite visine modela tornja na istoj poziciji i pri istom kutu nastrujavanja zraka, a) model tornja visine 200 mm, b) model tornja visine 400 mm, c) model tornja visine 600 mm



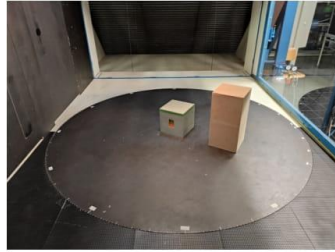
Pozicija 1



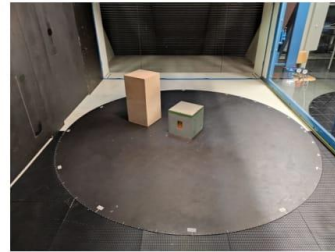
Pozicija 2



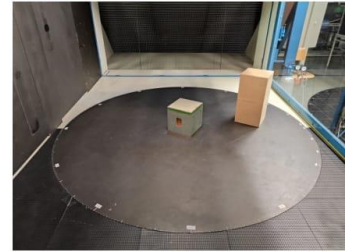
Pozicija 3



Pozicija 4



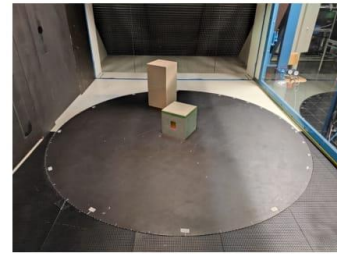
Pozicija 5



Pozicija 6



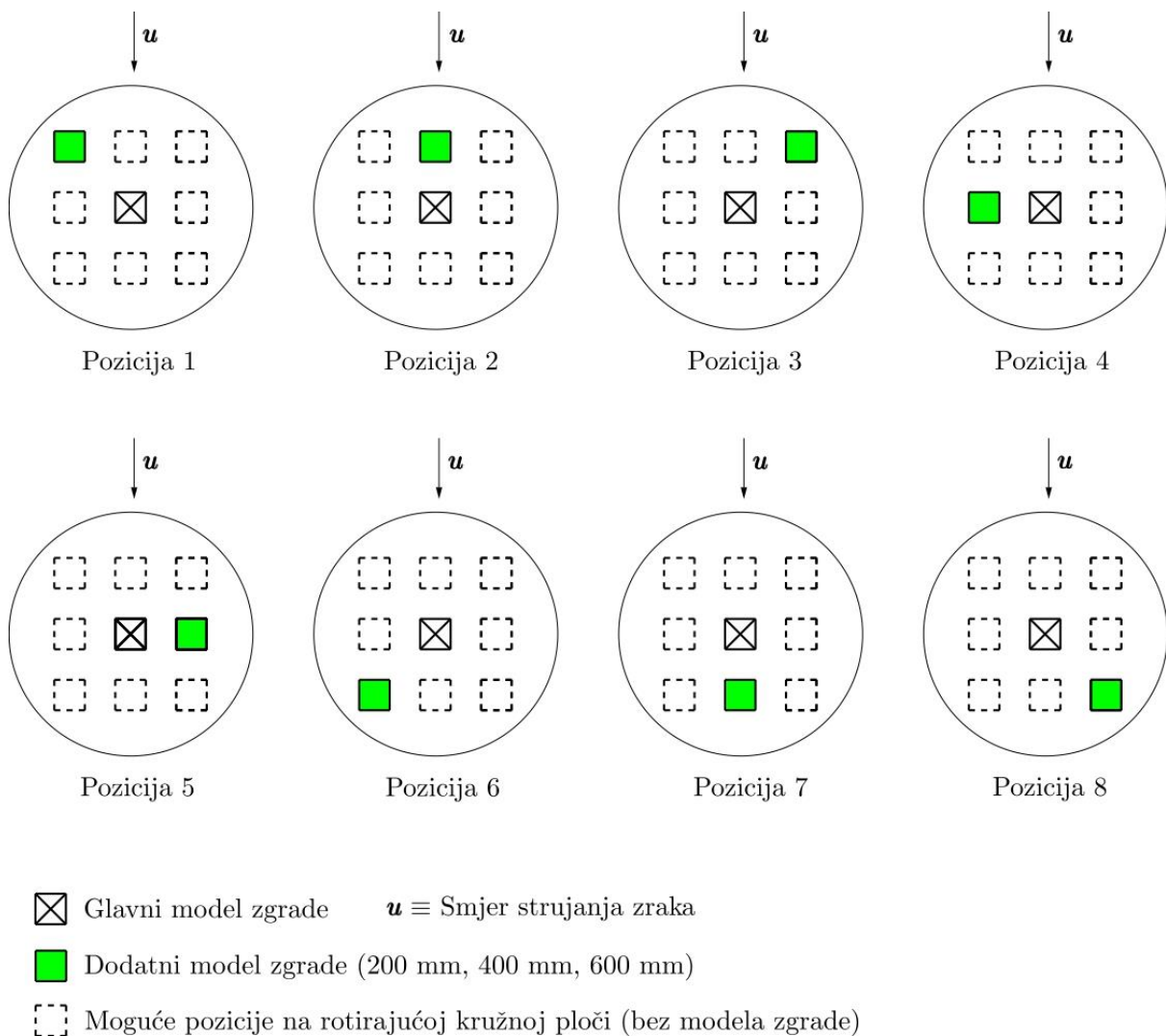
Pozicija 7



Pozicija 8

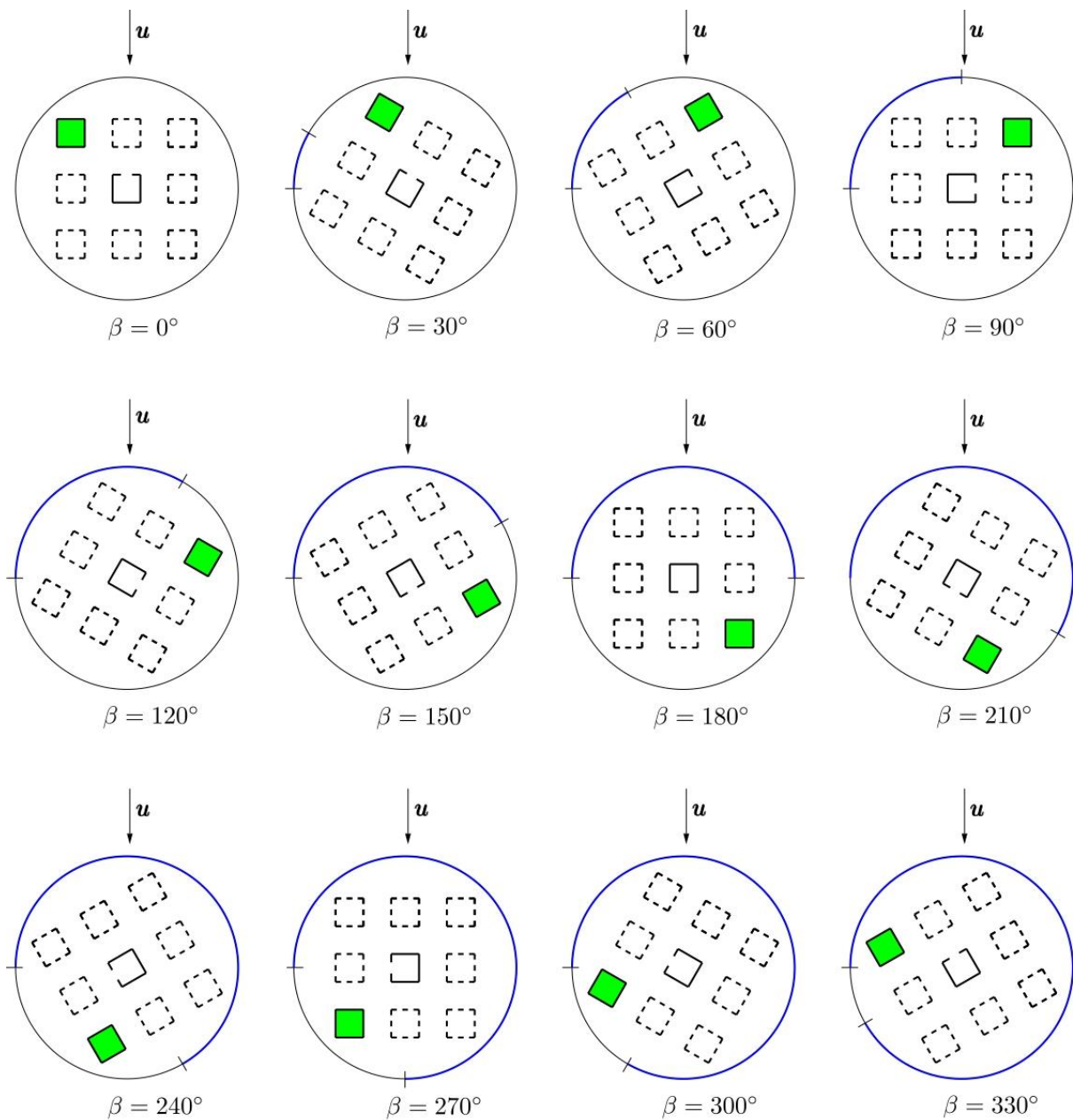
Slika 3.16: Fotografija svih analiziranih pozicija modela zgrada

Skice svih analiziranih pozicija modela tornja na kružnoj ploči su prikazane na Slici 3.17.



Slika 3.17: Pregled svih analiziranih pozicija modela zgrada na rotirajućoj kružnoj ploči ispitne sekcije zračnog tunela.

Koristeći uvjete simetrije je moguće smanjiti potreban broj eksperimenata. Tijekom ispitivanja uvjeta simetrije slučajevne jednostrane i poprečne ventilacije je potrebno razmatrati odvojeno. Model tornja na Poziciji 1 s modelom glavne zgrade u jednostranoj ventilaciji je prikazan na Slici 3.18. Pozicija 3 je simetričan Poziciji 1 (simetrija oko središnje ravnine) s obzirom na cjelokupno polje strujanja, slika 3.17.

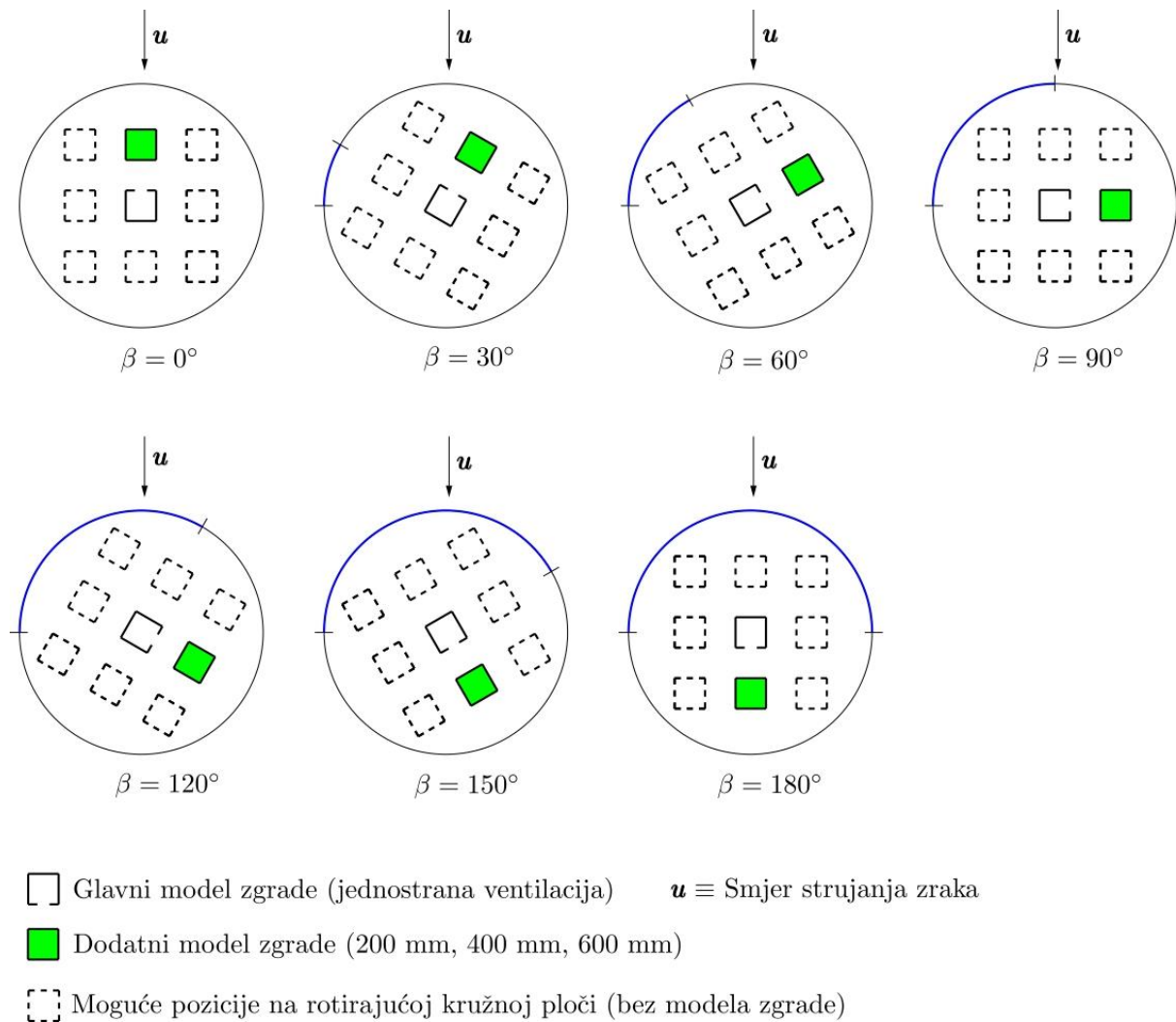


- Glavni model zgrade (jednostrana ventilacija) $u \equiv$ Smjer strujanja zraka
- Dodatni model zgrade (200 mm, 400 mm, 600 mm)
- Moguće pozicije na rotirajućoj kružnoj ploči (bez modela zgrade)

Slika 3.18: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 1 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade

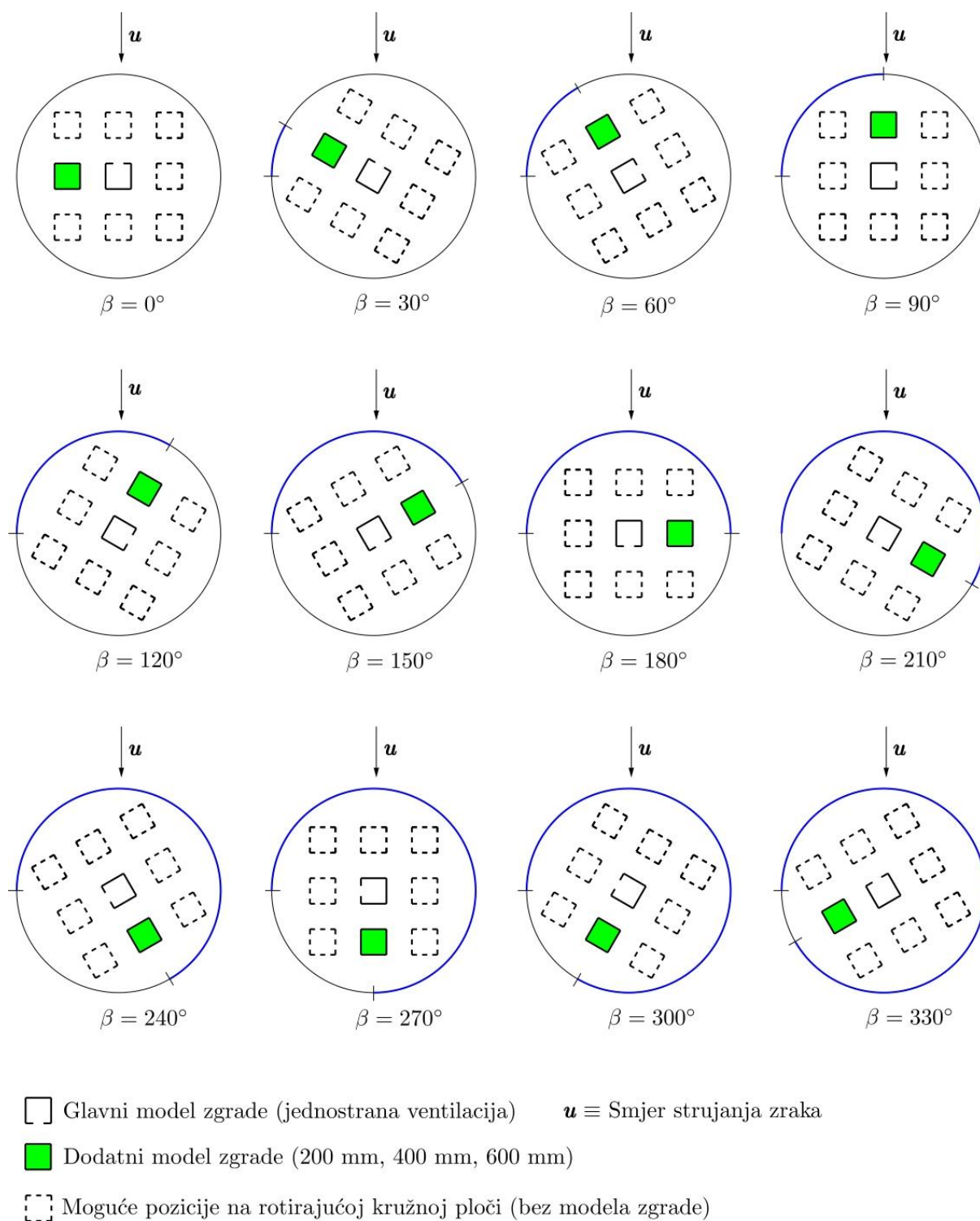
Kako daljnji uvjeti simetrije ne postoje, svih 12 kuteva nastrujavanja zraka je uzeto u obzir.

Za model tornja na Poziciji 2 i jednostranu ventilaciju, eksperimenti su provedeni za raspon kuteva $0^\circ < \beta < 180^\circ$, slika 3.19.



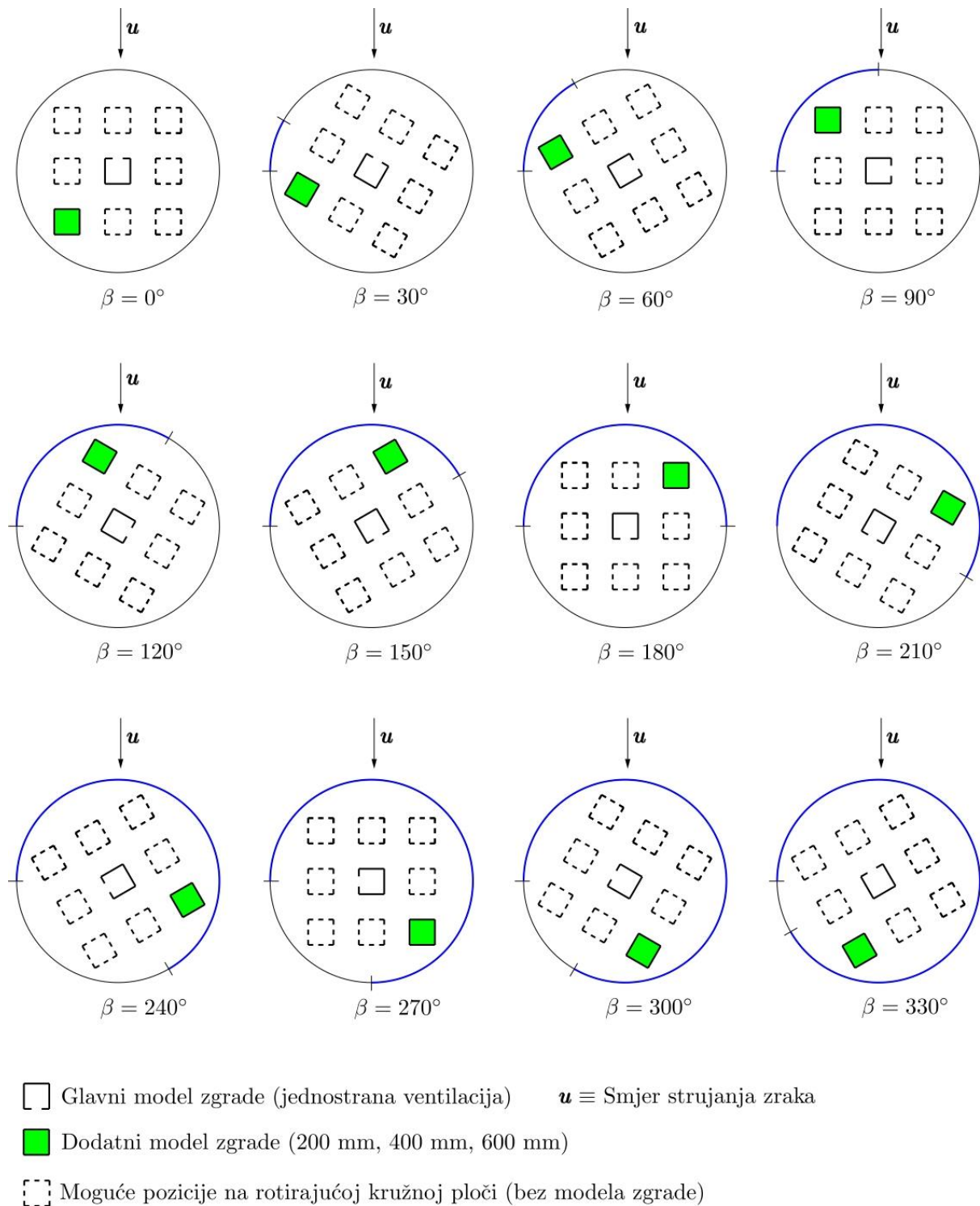
Slika 3.19: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 2 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade

Model tornja na Poziciji 4 uz jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade je simetričan Poziciji 5, slika 3.20.



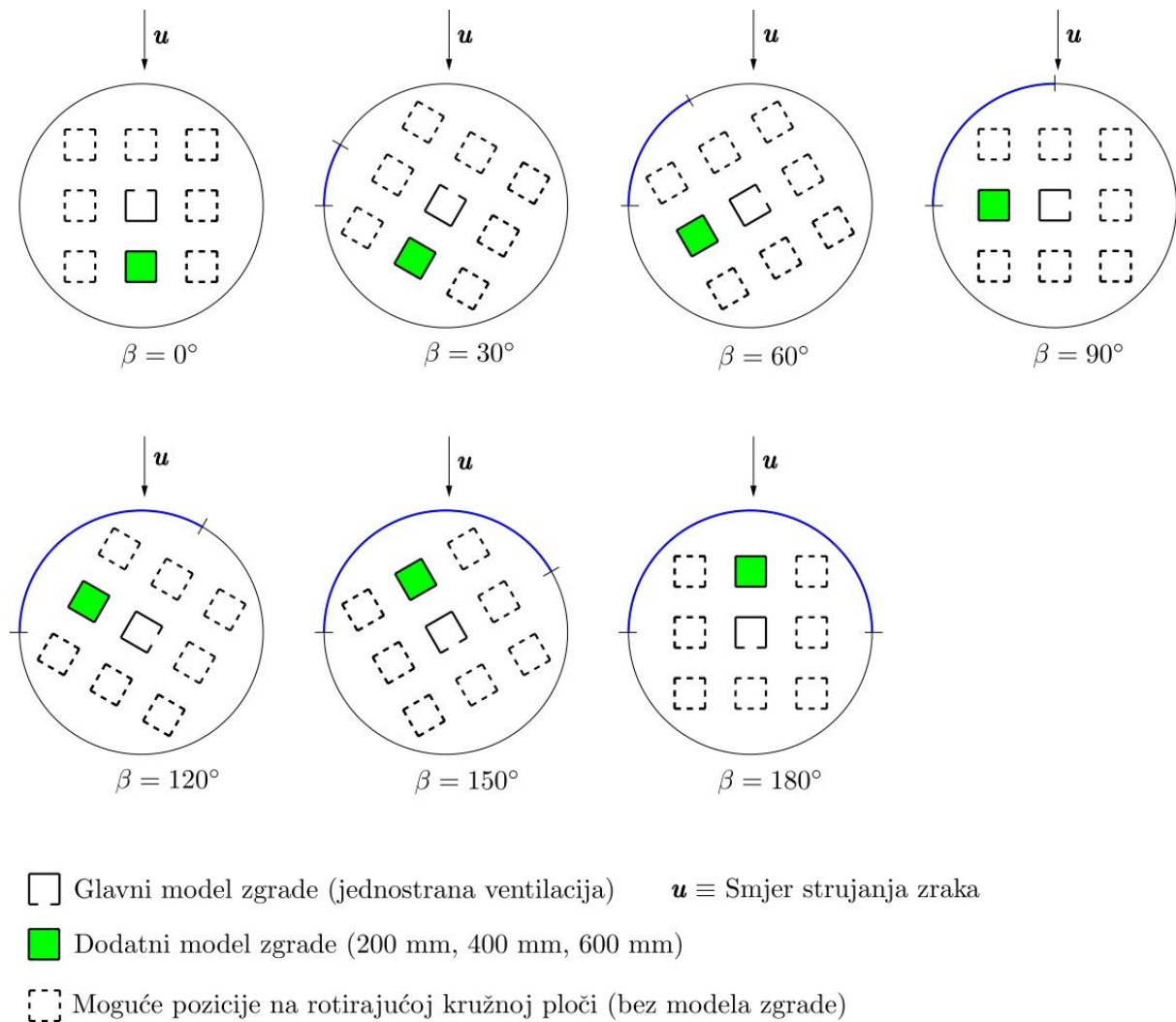
Slika 3.20: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 4 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade

Model tornja na Poziciji 6 uz jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade prikazan je na Slici 3.21. Ova konfiguracija simetrična je s obzirom na Poziciju 8.



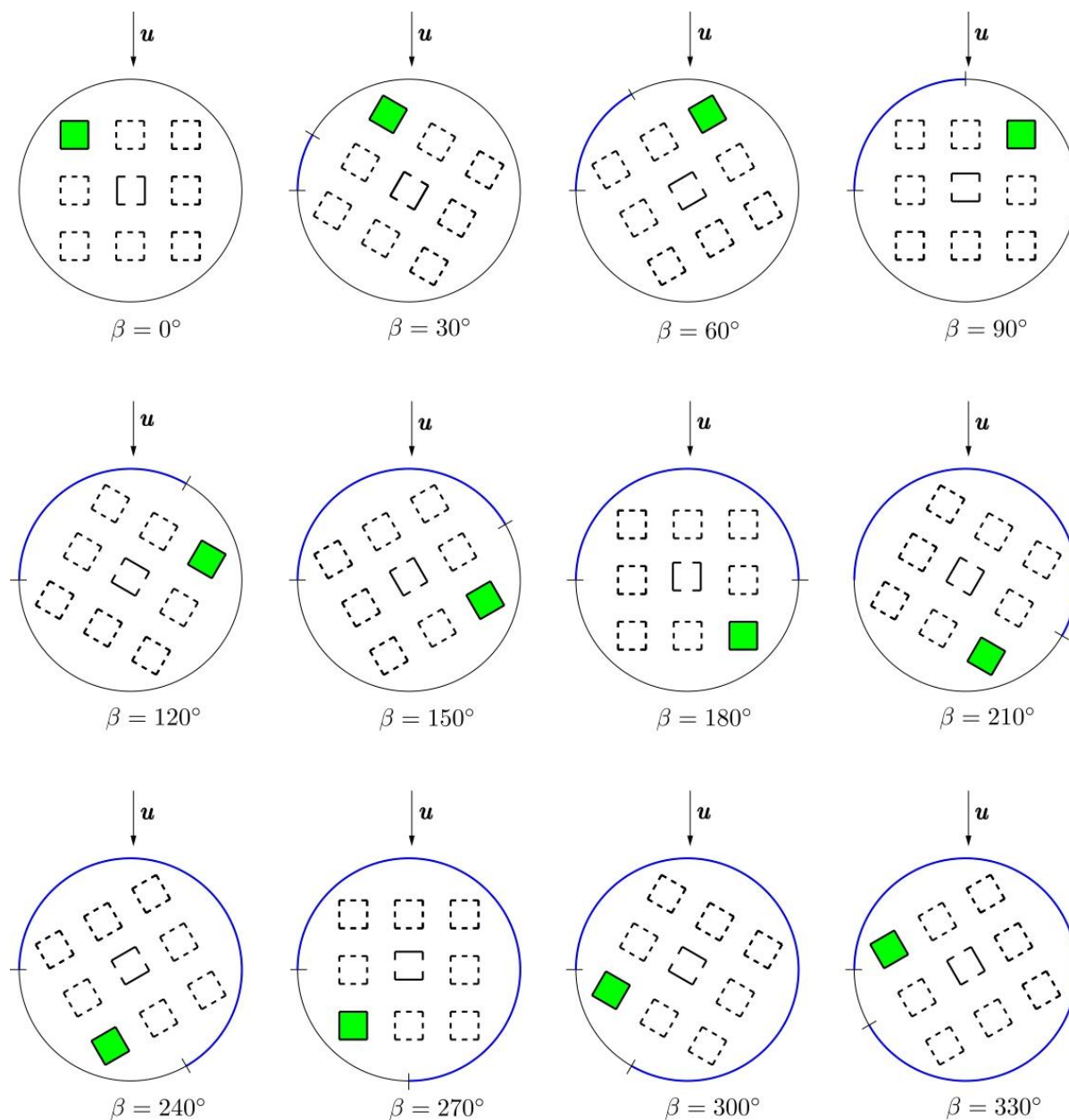
Slika 3.21: Kutovi nasmrujanja zraka za model tornja na Poziciji 6 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade

Ekspерименте за Poziciju 7 je bilo potrebno provesti za raspon kuteva nastrujavanja zraka $0^\circ < \beta < 180^\circ$, slika 3.22.



Slika 3.22: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 7 i jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade

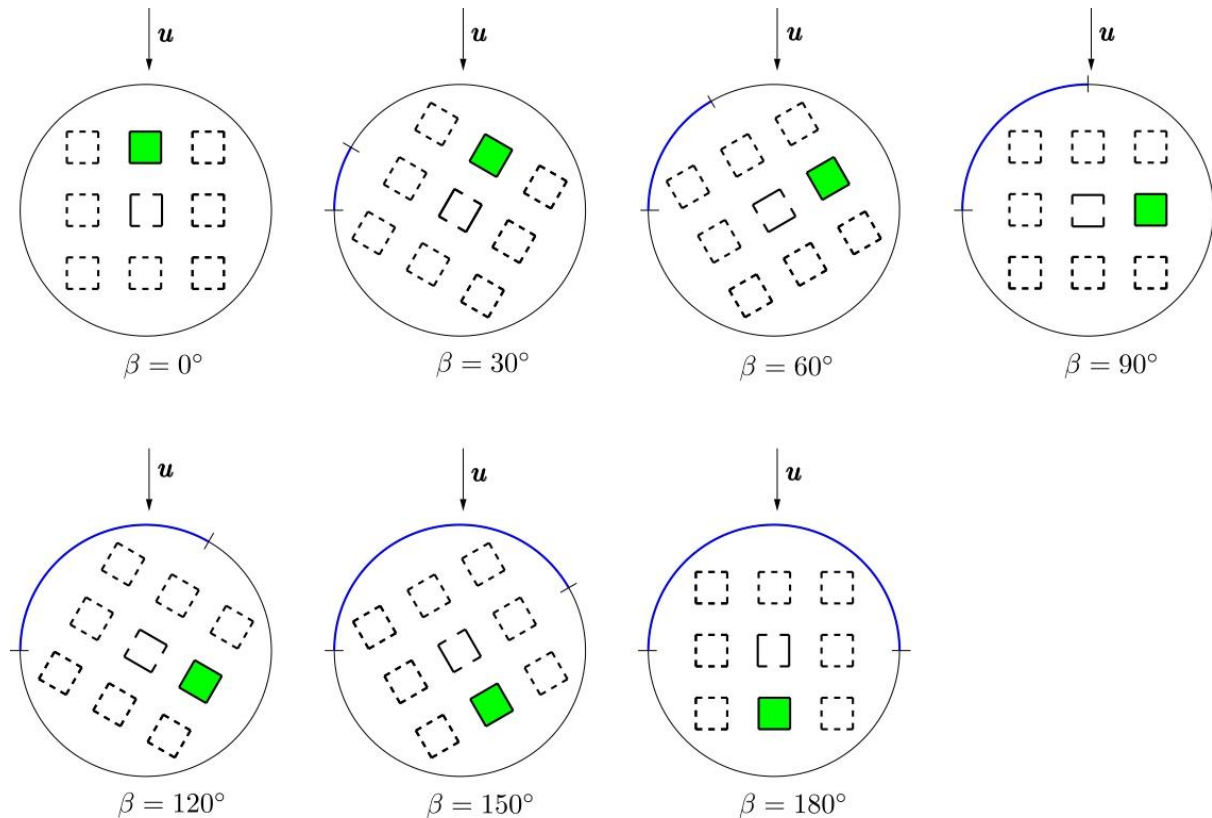
Za poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade je bilo potrebno provesti eksperimente za samo tri pozicije. Pozicija 1, slika 3.23, je simetričan s obzirom na Pozicije 3, 6 i 8, tj. nužna su mjerenja na samo jednoj od ovih pozicija.



- [] Glavni model zgrade (poprečna ventilacija) $u \equiv$ Smjer strujanja zraka
- Dodatni model zgrade (200 mm, 400 mm, 600 mm)
- Moguće pozicije na rotirajućoj kružnoj ploči (bez modela zgrade)

Slika 3.23: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 1 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade

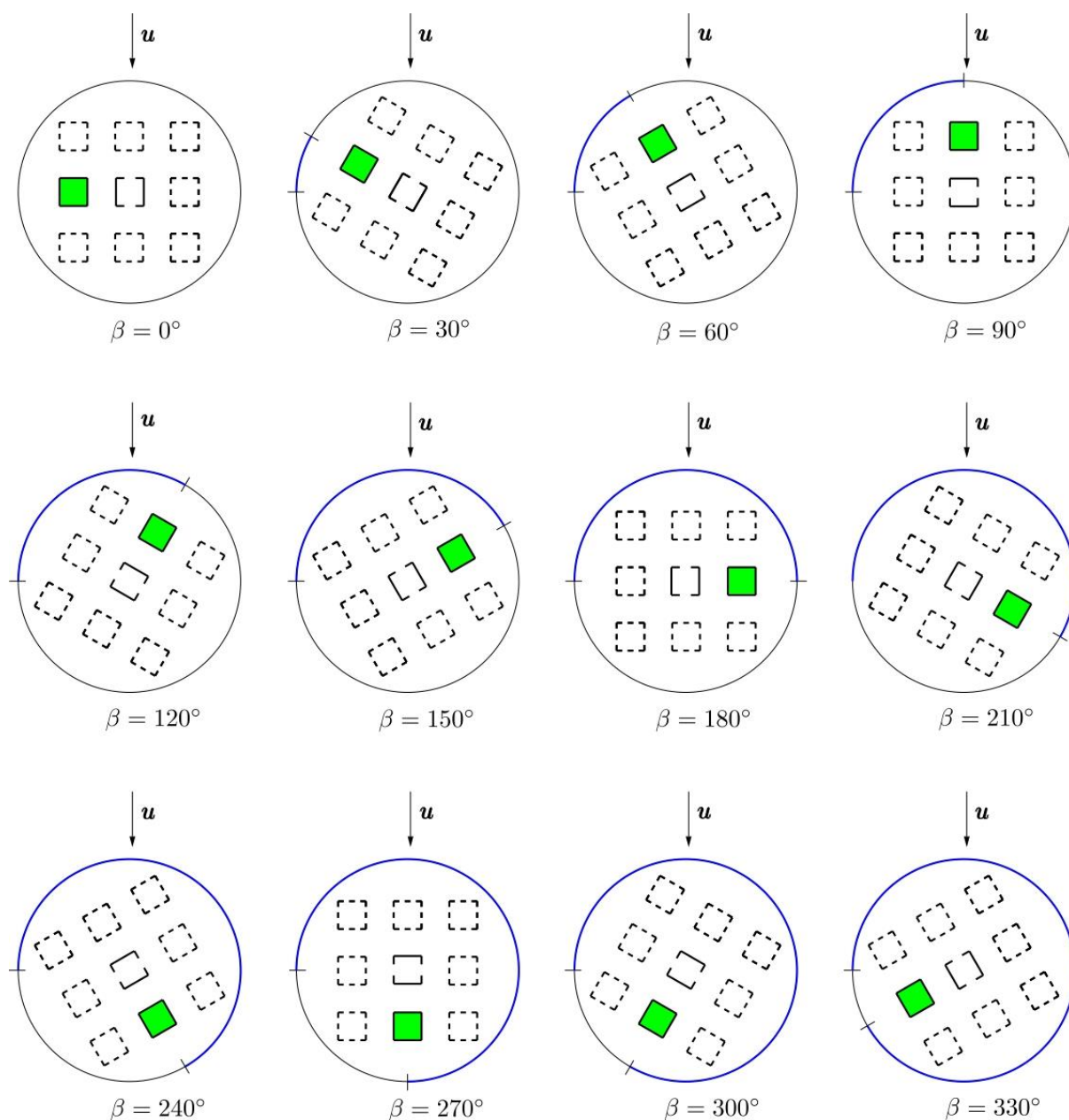
Kada se razmatra glavni model zgrade u poprečnoj ventilaciji, s modelom tornja na Poziciji 2 (slika 3.24), simetrija postoji s obzirom na Poziciju 7. U skladu s time su eksperimenti provedeni za $0^\circ < \beta < 180^\circ$.



- [] Glavni model zgrade (poprečna ventilacija) $u \equiv$ Smjer strujanja zraka
- Dodatni model zgrade (200 mm, 400 mm, 600 mm)
- [] Moguće pozicije na rotirajućoj kružnoj ploči (bez modela zgrade)

Slika 3.24: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 2 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade

Za poprečnu ventilaciju, Pozicija 4 (slika 3.25) je simetrična u odnosu na Poziciju 5.

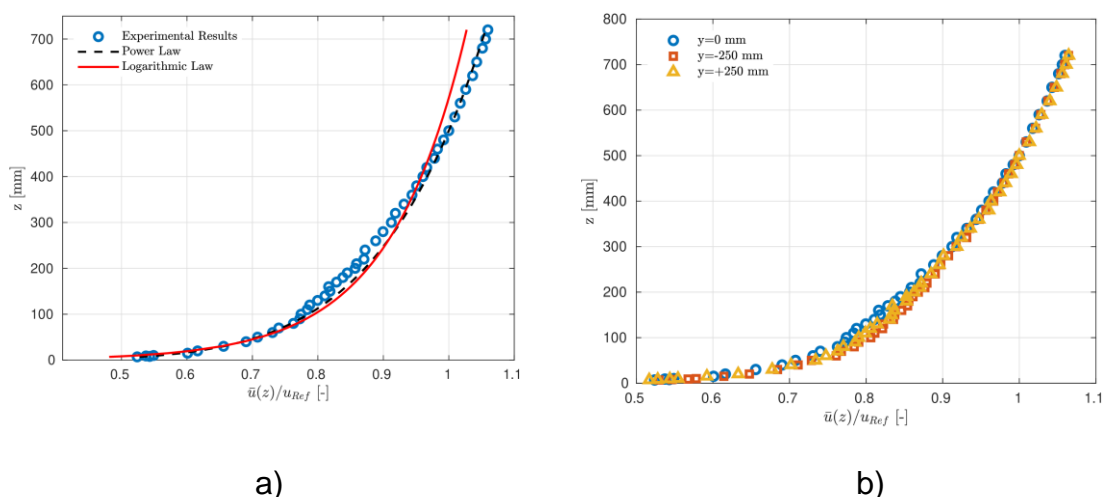


- [] Glavni model zgrade (poprečna ventilacija) $u \equiv$ Smjer strujanja zraka
- Dodatni model zgrade (200 mm, 400 mm, 600 mm)
- Moguće pozicije na rotirajućoj kružnoj ploči (bez modela zgrade)

Slika 3.25: Kutovi nastrujavanja zraka za model tornja na Poziciji 4 i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade

4. Rezultati i diskusija

Vertikalna raspodjela osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja unutar simuliranog RAGS-a je uspoređena sa zakonom potencije i logaritamskim zakonom, slika 4.1.



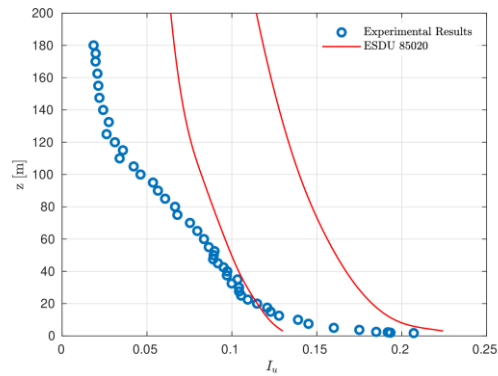
Slika 4.1: a) Usporedba profila osrednjenih brzina; b) profili osrednjenih brzina u različitim ravninama; z prikazan u modelskom mjerilu; referentna brzina

$$u_{ref} = \bar{u}(z_{ref} = 500 \text{ mm}) = 7,3015 \text{ m/s}; \alpha = 0,15; \kappa = 0,4$$

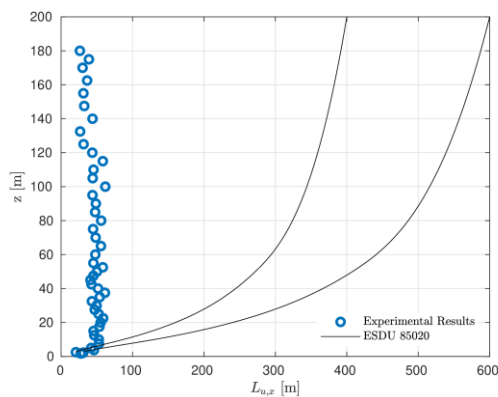
Eksperimentalni rezultati ukazuju na vrlo dobru podudarnost s odgovarajućim referentnim slučajevima. Na temelju podataka mjerenja je izračunat eksponent zakona potencije $\alpha = 0,15$, koji sukladno Choi [26] potvrđuje uspješnu simulaciju RAGS-a. Rezultati potvrđuju jednolikost zraka u poprečnom smjeru u modelu AGS-a. Eksperimentalno određene vrijednosti parametara koji karakteriziraju turbulentnu strukturu modeliranog AGS-a su prikazane slikama 4.2, 4.3 i 4.4. Odstupanje izmjerenih parametara turbulencije s obzirom na međunarodni standard ESDU 85020 [6] postoji zbog nemogućnosti modeliranja AGS-a u potpunosti. Dobro podudaranje postoji između izmjerenih spektara i von Kármánovog modela [27] za cijeli frekvencijski raspon. Model Kolmogorova [28] potvrđuje točnost simulacije u inercijskom podsloju spektra. Za potrebe validacije ACH mjerenja su ponovljena mjerenja iz Miše [23], gdje su eksperimentalno izmjerene ACH vrijednosti samostojeće zgrade bez okolnih modela zgrada. Podaci se jako dobro podudaraju te su potvrđeni svi ranije utvrđeni trendovi. U okviru ovog rada, rezultati dani u Miše [23] su korišteni

kao referentni kako bi se istražio utjecaj modela tornja na prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade. Koristeći uvjete simetrije je moguće definirati minimalni broj pozicija (Pozicije 1, 2, 4, 6 i 7) potrebnih za provedbu analize.

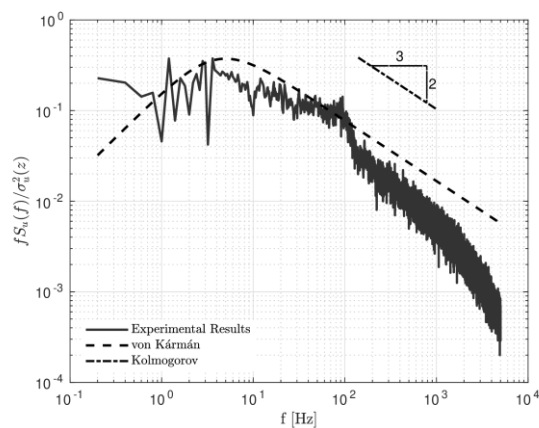
Eksperimentalni ACH rezultati za navedene pozicije su prikazani slikama od 4.5 do 4.9.



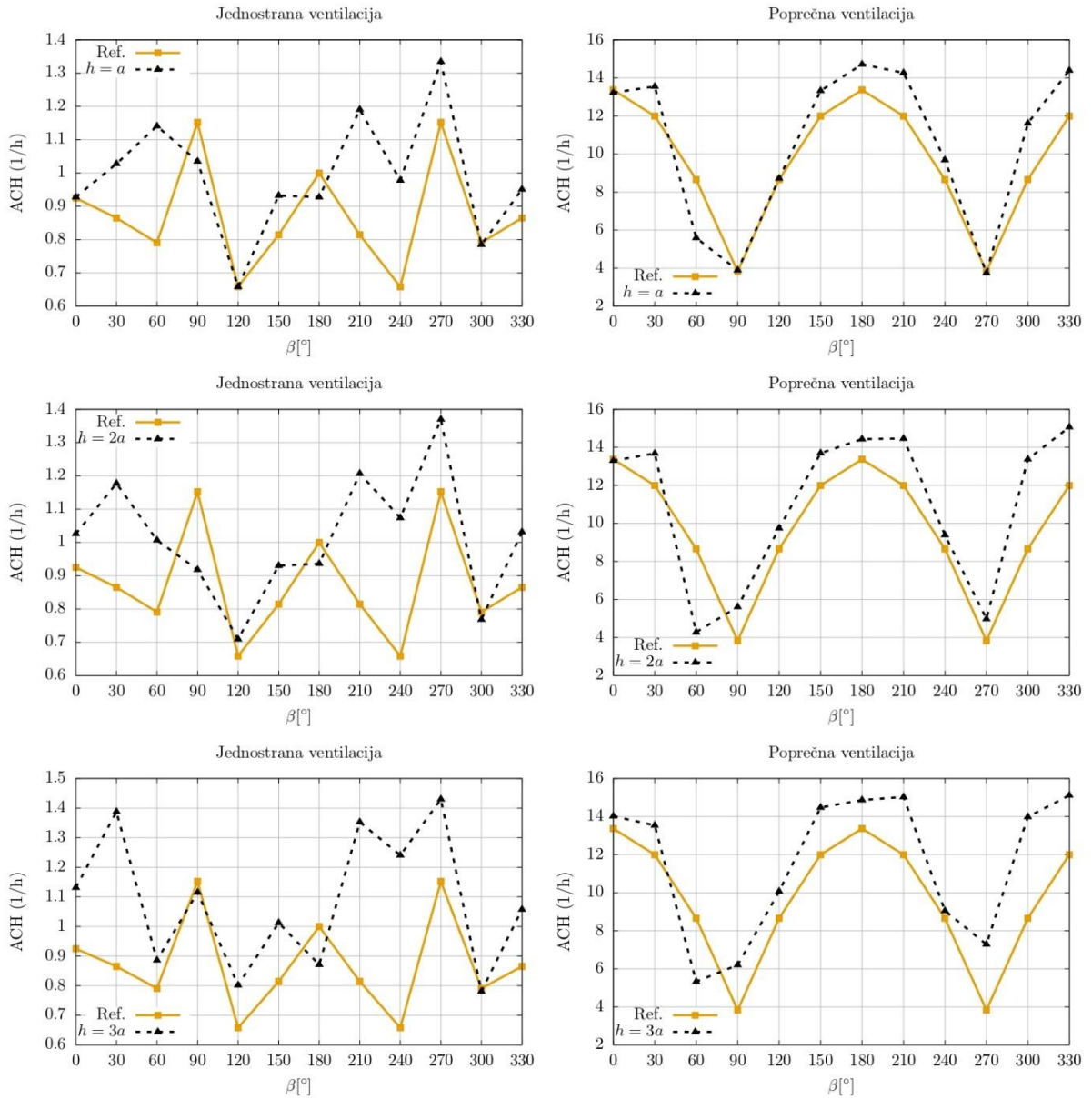
Slika 4.2: Intenzitet turbulencije u smjeru glavnog strujanja



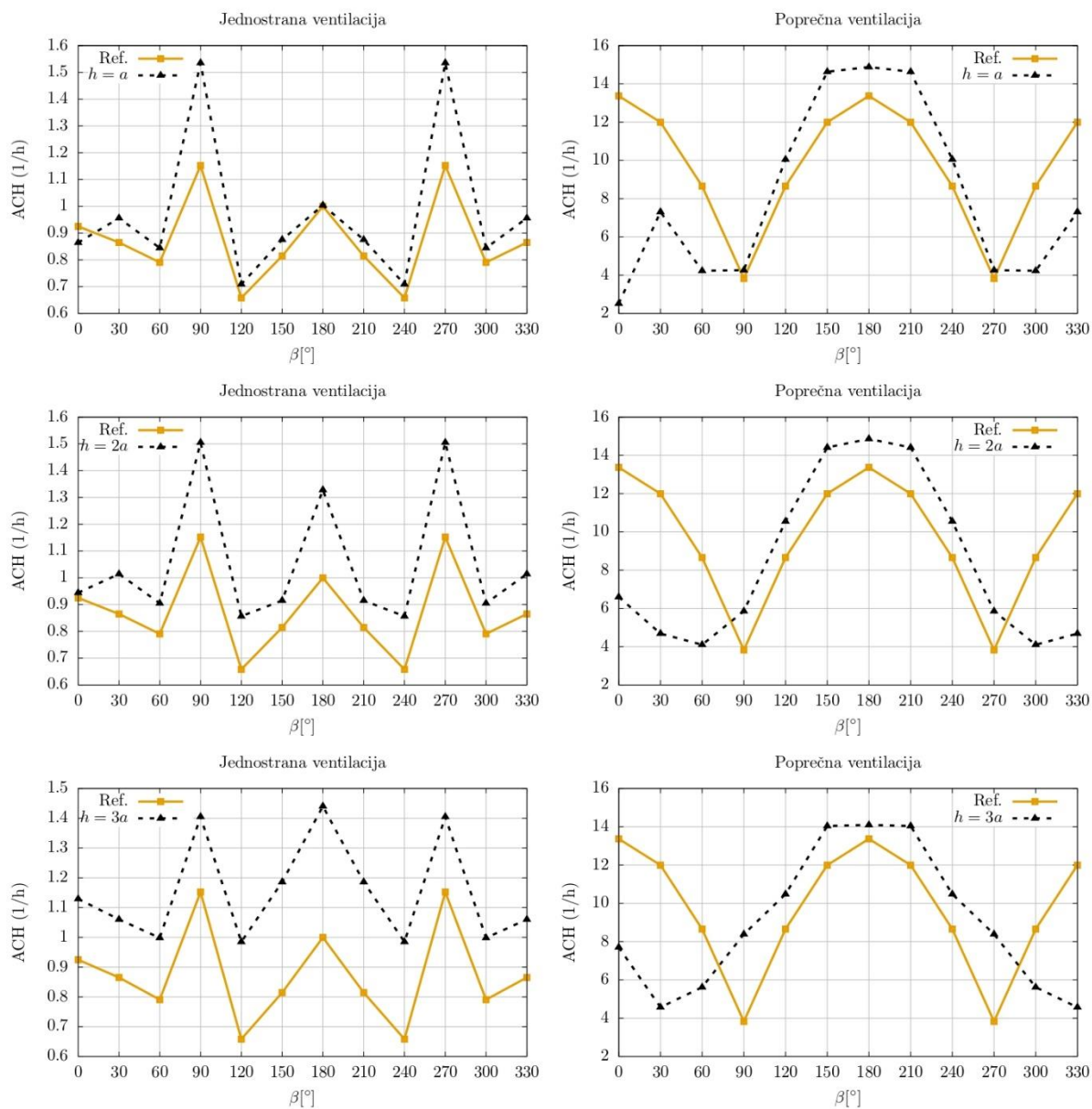
Slika 4.3: Integralna duljinska mjera turbulencije u smjeru glavnog strujanja



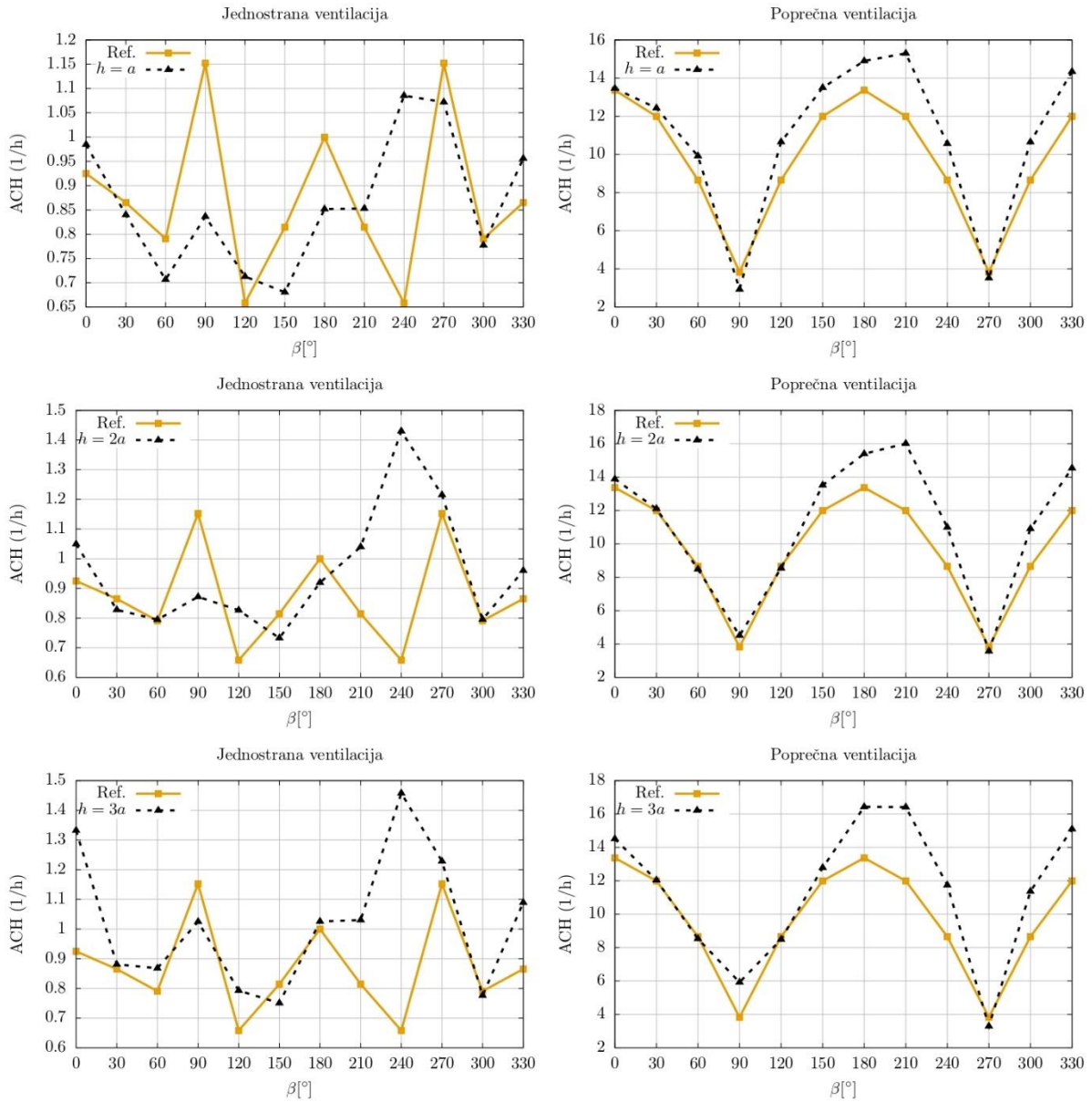
Slika 4.4: Spektralna raspodjela turbulentnih pulzacija brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja na prototipnoj visini $z = 25$ m.



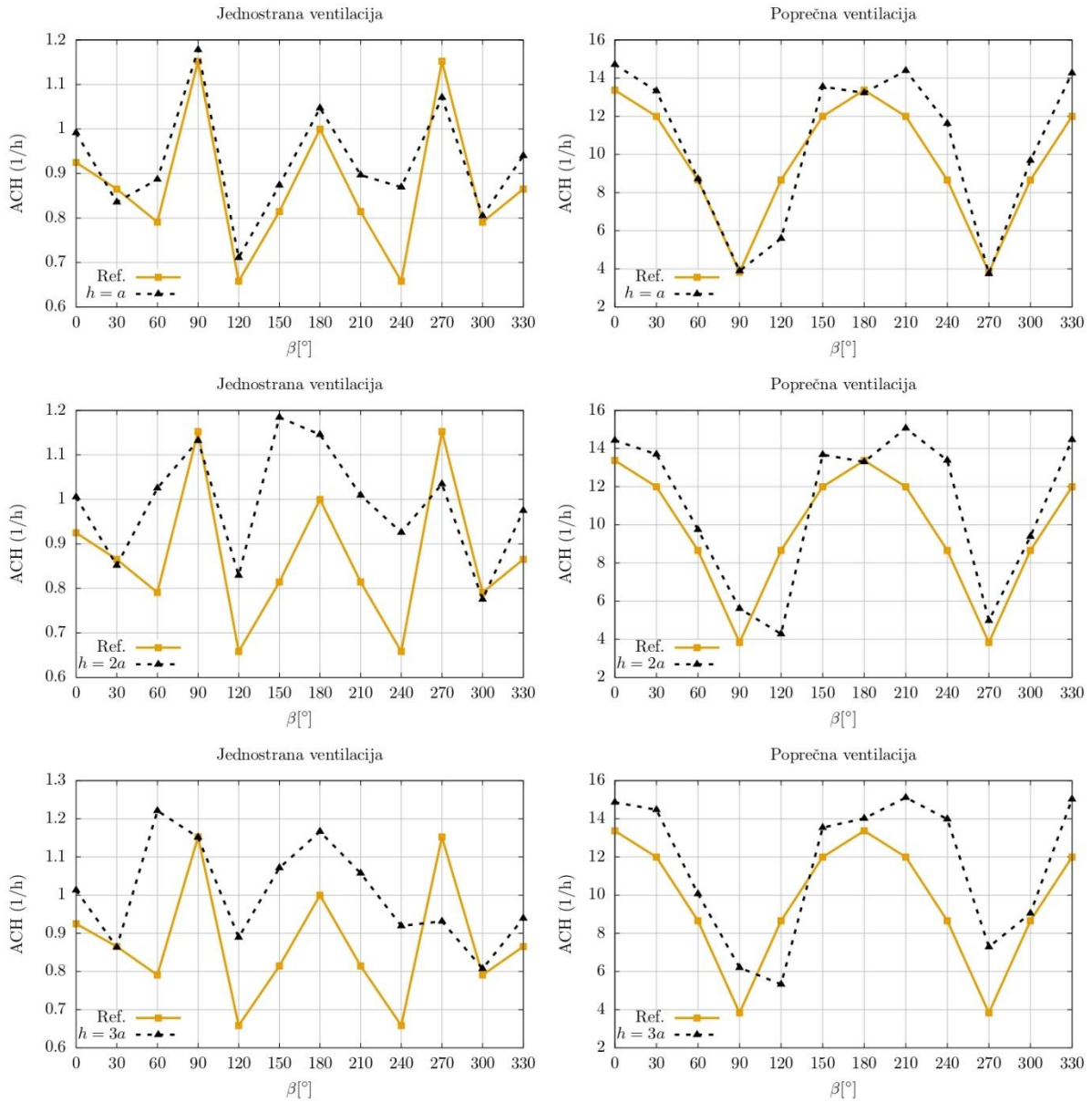
Slika 4.5: Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 1



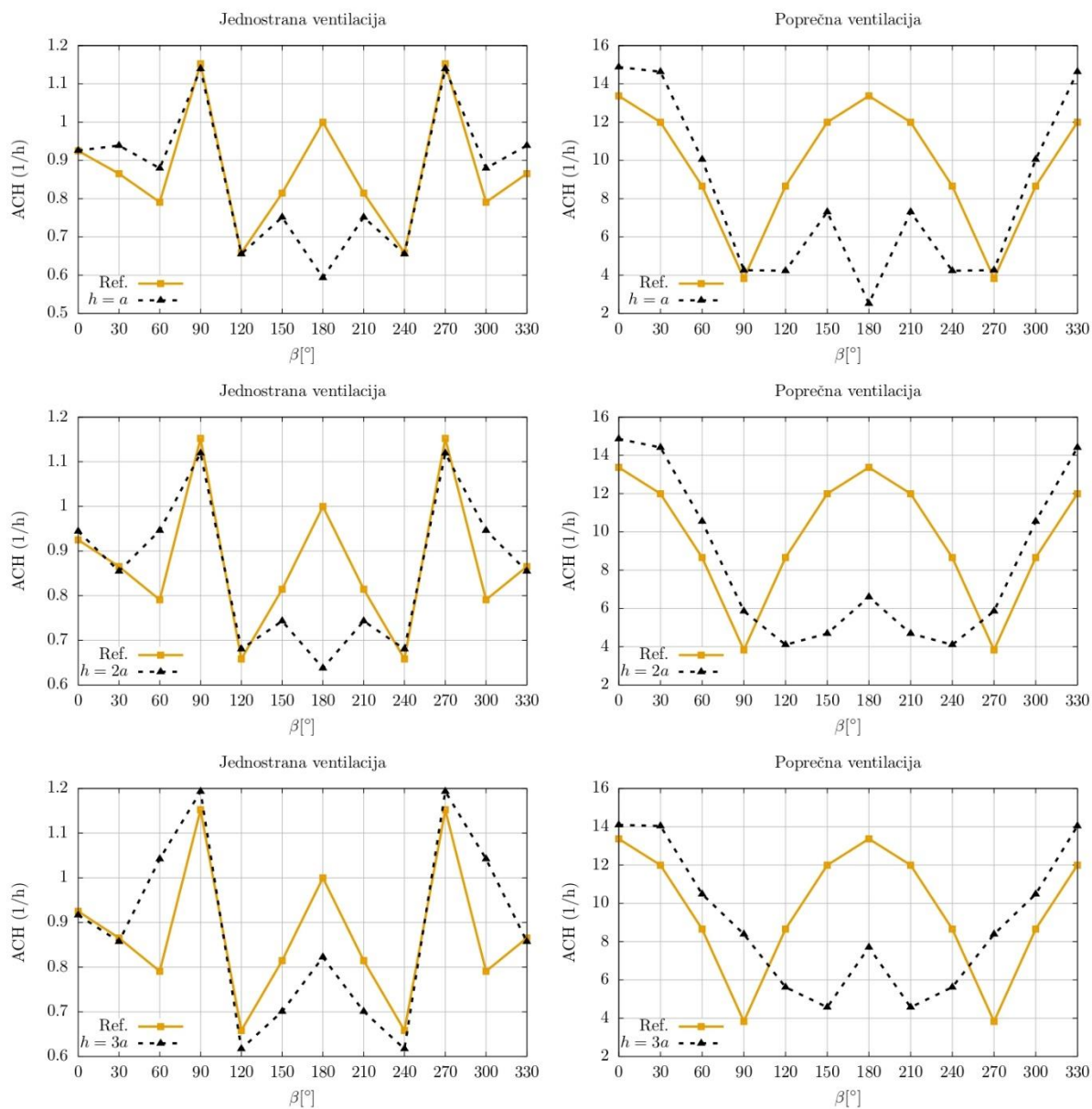
Slika 4.6: Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 2



Slika 4.7: Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 4



Slika 4.8: Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 6



Slika 4.9: Eksperimentalni ACH rezultati za model tornja na Poziciji 7

Prikazani rezultati jasno ukazuju na značajan utjecaj četiri ispitivana parametra na prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade, pri čemu su ispitivani parametri kut nastrujavanja zraka, jednostrana i poprečna ventilacija glavne zgrade, različite visine modela tornja i pozicija tornja u odnosu na glavnu zgradu.

Model tornja na Poziciji 1 u neposrednoj blizini glavne zgrade općenito ima povoljan učinak na jednostranu i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade. U slučaju poprečne ventilacije modela glavne zgrade je jedino kod $\beta = 60^\circ$ zabilježen pad ACH zbog prisutnosti modela tornja, tj. ACH je pri $\beta = 60^\circ$ manji kada je visoka zgrada prisutna u okolini glavne zgrade u odnosu na samostojeći model glavne zgrade. Ista pojava je zabilježena kod jednostrane ventilacije za $\beta = 90^\circ$ i $\beta = 180^\circ$. Maksimalni ACH za jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade je zabilježen za smjer strujanja zraka paralelan s ravninom prozora modela glavne zgrade, tj. pri $\beta = 270^\circ$. Kod poprečne ventilacije modela glavne zgrade se s povećanjem visine dodatnog modela zgrade (tornja), maksimalna vrijednost ACH postiže pri $\beta = 210^\circ$.

Za Poziciju 2 se ACH povećava zbog prisutnosti modela tornja, i to za sve rezultate jednostrane ventilacije modela glavne zgrade. Kod poprečne ventilacije modela glavne zgrade je povećanje ACH zabilježeno za $90^\circ < \beta < 270^\circ$.

Kod modela tornja smještenog na Poziciji 4 uz poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade se mogu razlučiti dva područja zabilježenih ACH vrijednosti. U prvom području kuteva nastrujavanja zraka $0^\circ < \beta \leq 90^\circ$ je zabilježen približno konstantan ACH pri povećanju visine modela dodatne zgrade (tornja). Za $90^\circ < \beta \leq 330^\circ$ je zabilježeno povećanje ACH pri povećanju visine dodatnog modela zgrade (tornja), uz napomenu da je ACH kod $\beta = 270^\circ$ približno konstantne vrijednosti. Kod jednostrane ventilacije modela glavne zgrade je najznačajnije povećanje ACH zabilježeno u području kuteva nastrujavanja $210^\circ < \beta < 270^\circ$.

Model visoke zgrade (tornja) na Poziciji 6 uz jednostranu ventilaciju modela glavne zgrade uzrokuje pri $\beta = 270^\circ$ smanjenje ACH kod povećanja visine dodatnog modela zgrade (tornja). Ista pojava je zabilježena kod poprečne ventilacije modela glavne zgrade pri $\beta = 120^\circ$.

Smanjenje ACH kod Pozicije 7 se za poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade očituje za kuteve nastrujavanja zraka $90^\circ \leq \beta \leq 270^\circ$. Ista pojava prilikom jednostrane ventilacije modela glavne zgrade obuhvaća nešto manji raspon kuteva nastrujavanja zraka, tj. $120^\circ \leq \beta \leq 240^\circ$.

5. Zaključak

Eksperimentalna modelska istraživanja su provedena u zračnim tunelima Tehničkog sveučilišta u Grazu, Austrija s ciljem određivanja utjecaja visoke zgrade (tornja) na prirodnu ventilaciju niže zgrade smještene u neposrednoj blizini.

Prirodna ventilacija je istražena na modelu glavne zgrade oblika kocke. Korištena su još dodatna tri modela zgrade u kojima se nije određivala prirodna ventilacija, već su ti modeli u različitim eksperimentima zaklanjali model glavne zgrade od nastrujavanja zraka. Modeli zgrada su izloženi turbulentnom graničnom sloju koji predstavlja model atmosferskog graničnog sloja iznad ruralnog terena.

Detaljno je istražen utjecaj kuta nastrujavanja zraka, jednostrane i poprečne ventilacije modela zgrade, visine dodatnog modela zgrade, položaja modela glavne zgrade u odnosu na dodatni model zgrade.

Mjerenja su provedena uz korištenje anemometra konstantne temperature i dvostruke užarene žice za mjerenje brzine turbulentnog strujanja zraka, Prandtl-Pitotove cijevi za mjerenje referentne osrednjene brzine, infracrvenog plinskog analizatora za određivanje koncentracije plina u modelu glavne zgrade.

Postignuti eksperimentalni rezultati jasno opisuju utjecaj ispitivanih parametara na prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade i ukazuju na sljedeće važne činjenice:

- Uspješno je modeliran atmosferski granični sloj strujanja zraka iznad ruralnog terena uz pojave prethodno zabilježene u sličnim simulacijama, tj, izraženo opadanje intenziteta turbulencije i integralnih duljinskih skala turbulencije s povećanjem visine od podloge.
- Prirodna ventilacija je bitno izraženija kod poprečne nego kod jednostrane ventilacije modela glavne zgrade. Zabilježen je utjecaj zavjetrinskog područja modela visoke zgrade (tornja) na ventilaciju modela glavne zgrade. Ova pojava je posebno izražena kod poprečne ventilacije kada je dodatni model zgrade smješten neposredno uzvodno od modela glavne zgrade, u kojem slučaju je zabilježeno smanjenje prirodne ventilacije modela glavne zgrade.
- Složene značajke turbulentnog strujanja uvjetovanog odvajanjem turbulentnog graničnog sloja od modela zgrada općenito uzrokuju izraženiju prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade, pri čemu je visina dodatnog

modela zgrade (tornja) proporcionalna broju izmjena zraka u modelu glavne zgrade.

- U većini eksperimenta je broj izmjena zraka u modelu glavne zgrade maksimalan kada je smjer strujanja zraka paralelan ravnini prozora modela glavne zgrade.
- Najpovoljniji utjecaj dodatnog modela zgrade (tornja) na prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade je zabilježen za Poziciju 2.
- Broj izmjena zraka modela glavne zgrade za Poziciju 7 najmanje odstupa od rezultata zabilježenih na samostojećem modelu zgrade.

Zahvale

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Hrvoju Kozmaru na stručnom vodstvu, strpljenju i pruženoj pomoći.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Günтеру Brennu, voditelju Instituta za mehaniku fluida i prijenos topline pri Tehničkom sveučilištu u Grazu u Austriji, koji mi je omogućio provedbu eksperimenata u laboratorijima Instituta.

Dr. sc. Walteru Meileu i doc. dr. sc. Christophu Irrenfriedu zahvaljujem na potpori pri provedbi eksperimenata i korisnim savjetima tijekom analize podataka.

Veliko hvala doktorandima Dinu Zrniću, mag. ing. aeroing. i Davidu Baumgartneru, dipl. ing. na potpori tijekom boravka u Grazu.

Također bih želio iskreno zahvaliti Christianu Bratschitzu, Josefu Holzmannu i Andreasu Zoislu koji su izradili eksperimentalne modele potrebne za provedbu ovih istraživanja.

Agenciji za mobilnost i programe EU zahvaljujem na financiranju mog istraživačkog boravka u Austriji.

Popis literature

- [1] Langensteiner, B.: *Transport processes in ventilated buildings*. PhD thesis, Technische Universität Graz, 2014.
- [2] Counihan, J.: *Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972*. Atmospheric Environment, Vol. 9, P. 871-905, 1975.
- [3] Garratt, J.R.: *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 1992.
- [4] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I.: *Mehanika fluida II – Predavanja*. Sveučilište u Zagrebu, FSB, 2017
- [5] Hansen, S., Dyrbye, C.: *Wind loads on structures*. John Wiley & Sons, 1997.
- [6] ESDU: *Characteristics of atmospheric turbulence near the ground - Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere)*. Engineering Sciences Data Unit 85020, 1985.
- [7] Pernpeintner, A.: *Predavanja iz kolegija Aerodynamik der Bauwerke*. Lehrstuhl für Fluidmechanik, Fakultät für Maschinenwesen, TU-München, 1998.
- [8] Sockel, H.: *Aerodynamik der Bauwerke*. Vieweg Sohn, 1984.
- [9] Martinuzzi, R., Tropea, C.: *The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow*. Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, P. 85-92, 1993.

- [10] Kozmar, H.: *Flow, turbulence and surface pressure on a wall-mounted cube in turbulent boundary layers*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 210, 2021.
- [11] Liu, C.H., Cheung, J.O.P.: *CFD simulations of natural ventilation behavior in highrise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings*. Energy and Buildings, Vol. 43, P. 1149-1158, 2011.
- [12] Blocken, B., Tominaga, Y.: *Wind tunnel experiments on cross-ventilation of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions*. Building and Environment, Vol. 92, P. 452-461, 2015.
- [13] Kuznetsov, S., Butova, A., Pospíšil, S.: *Inuence of placement and height of highrise buildings on wind pressure distribution and natural ventilation of low- and mediumrise buildings*. International Journal of Ventilation, Vol. 15, P. 253-266., 2016.
- [14] Kozmar, H.: *Utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja*. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2005.
- [15] Plate, E.J.: *Engineering meteorology*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [16] Cook, N.J.: *Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer*. Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 2, P. 311-321, 1977/1978.

- [17] WTG: *Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik*. Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V., 1994.
- [18] Wolf-Heinrich, H.: *Aerodynamik der stumpfen Körper*. Vieweg & Sohn, 2002.
- [19] Anderson, J.D.: *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Education, 2017.
- [20] Lawson, T.: *Building Aerodynamics*. Imperial College Press, 2001.
- [21] Web-stranica TU Graz. <https://www.tugraz.at/en/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/singleview/article/aerodynamics-on-the-test-rig/>. Pristupljeno 15/06/2022.
- [22] Golubić, D.: *Experimental model of building natural ventilation in urban environment*. MSc thesis, University of Zagreb, 2018.
- [23] Miše, D.: *Effects of wind characteristics on natural ventilation of buildings*. BSc thesis, University of Zagreb, 2019.
- [24] Web-stranica Dantec Dynamics. www.dantecdynamics.com/product/miniature-x-wire-probe-straight. Pristupljeno 16/06/2022.
- [25] LumaSense Technologies. *INNOVA -1316A-2 Multi Gas Monitor*. Instructional Manual, 2011.
- [26] Choi, E.C.C.: *Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles*. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2009
- [27] Von Kármán, T.: *Progress in the Statistical Theory of Turbulence*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 34, S. 530-539, 1948

[28] Kolmogorov, A. N.: *Lokalnaja struktura turbulentnosti v neschtschimaemoi schidkosti pri otschen bolschich tschislach Reynoldsa*. Dokl. AN SSSR, Vol. 30, S. 299-303, 1941.

Sažetak

Autor: Rihard Kučera

Naslov rada: Eksperimentalni model prirodne ventilacije zgrade

Prirodna ventilacija je inženjerski pristup bitan za uštedu energije i zaštitu okoliša u modernom građevinarstvu i arhitekturi. Ona predstavlja postupak izmjene zraka u građevinskim objektima bez primjene mehaničkih sustava, tj. sukladno principima prirodne konvekcije. U sklopu rada je provedeno 690 modelskih eksperimenata prirodne ventilacije zgrade. Eksperimenti su provedeni u dva zračna tunela na Tehničkom sveučilištu u Grazu, Austrija. Jedan zračni tunel je aeronautičkog tipa, dok je drugi zračni tunel namijenjen ispitivanjima u području aerodinamike okoliša i konstrukcija. Prirodna ventilacija je istražena na modelu glavne zgrade oblika kocke. Korištena su još dodatna tri modela zgrade u kojima se nije određivala prirodna ventilacija, već su ti modeli u različitim eksperimentima zaklanjali model glavne zgrade od nastrujavanja zraka. Modeli zgrada su izloženi turbulentnom graničnom sloju koji odgovara uvjetima strujanja zraka u donjim slojevima atmosfere. Detaljno je istražen utjecaj a) kuta nastrujavanja zraka, b) jednostrane i poprečne ventilacije modela zgrade, c) visine dodatnog modela zgrade, d) položaja modela glavne zgrade u odnosu na dodatni model zgrade. Mjerenja su provedena uz korištenje anemometra konstantne temperature i dvostruke užarene žice za mjerenje brzine turbulentnog strujanja zraka, Prandtl-Pitotove cijevi za mjerenje referentne osrednjene brzine, infracrvenog plinskog analizatora ugljičnog dioksida za određivanje koncentracije plina u modelu glavne zgrade. Postignuti eksperimentalni rezultati jasno opisuju utjecaj četiri ispitivana parametra na prirodnu ventilaciju modela glavne zgrade i ukazuju na činjenicu da model tornja smješten u neposrednoj blizini modela glavne zgrade može imati povoljan učinak na jednostranu i poprečnu ventilaciju modela glavne zgrade.

Ključne riječi: zgrada, prirodna ventilacija, eksperimentalni model

Summary

Author: Rihard Kučera

Title: Experimental model of natural building ventilation

Natural ventilation is an engineering approach essential for energy saving and environmental protection in contemporary civil engineering and architecture. The procedure is based on the principle of natural convection, i.e. of air exchange in buildings without the use of mechanical systems. Within the scope of this research, 690 experiments regarding natural ventilation of small-scale building models were conducted. The experiments were performed in two wind tunnels at the Graz University of Technology, Austria. There is a low-speed aerodynamic wind tunnel and also a boundary layer wind tunnel. The main building model, where the natural ventilation was measured, was a cube. Three additional building models were used to shelter the main building model from the oncoming airflow. Building models were subjected to a turbulent boundary layer typical for the airflow in the lower atmosphere. The influence of a) flow incidence angle, b) single-sided and cross-ventilation of the main building model, c) height of the additional building model, d) position of the main building model relative to the additional building model was investigated in detail. The turbulent characteristics of the airflow were determined using Constant Temperature Anemometry (CTA) with an X-wire probe, Prandtl-Pitot tube was used to measure the reference airflow velocity and a non-dispersive infrared (NDIR) gas analyzer was used to determine gas concentration in the main building model. The experimental results clearly exhibit the effect of the four examined parameters on the natural ventilation of the main building model and indicate the fact that the tower model located in close proximity to the main building model may have a favorable effect on natural building ventilation of the main building model.

Keywords: building, natural ventilation, experimental model