



UNIVERZITET U NIŠU  
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET



**Danijela Z. Đurić Mijović**

**ARHITEKTONSKO-KONSTRUKCIJSKI DIZAJN  
FASADNIH SISTEMA  
OD ČELIKA I ALUMINIJUMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2016.

---



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE



**Danijela Z. Đurić Mijović**

**ARCHITECTONIC – STRUCTURAL  
DESIGN OF STEEL AND ALUMINIUM  
FAÇADE SYSTEMS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2016

---

**Članovi komisije:**

**redovni profesor, dr Veliborka Bogdanović,**

Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

**vanredni profesor, dr Todor Vacev,**

Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

**vanredni profesor, dr Dragan Kostić,**

Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

**docent, dr Miomir Vasov,**

Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu

**docent, dr Saša Stošić,**

Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane doktorske disertacije:

---

## Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Milisav Damnjanović, red.prof. Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet
Naslov:	Arhitektonsko-konstruktivski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma
Rezime:	<p>Savremene fasade predstavljaju lake, najčešće transparentne membrane čije je projektovanje i izvođenje složen i zahtevan zadatak. Predmet istraživanja ove disertacije jesu zid zavese i njihovo kompleksno sagledavanje u realnim uslovima. Vetar kao dominantno opterećenje sagledan je sa aspekta dinamike i izvršeno je njegovo modeliranje primenom numeričke dinamike fluida. Uzeta je u obzir i hrapavost terena modeliranjem atmosferskog graničnog sloja. Kreiran je model zgrade odnosa dimenzija <math>b:d:h \approx 1:1:2.5</math> i analiziran je kroz četiri grupe modela. Grupe modela A, B, C i D odnosno gde vetar deluje pod uglom od <math>0^{\circ}</math>, <math>15^{\circ}</math>, <math>30^{\circ}</math> i <math>45^{\circ}</math>, redom. Primenjena su dva turbulentna modela, <i>RNG k-<math>\epsilon</math></i> i <i>SST k-<math>\omega</math></i>. Dobijeni rezultati prikazani su preko bezdimenzionalnih koeficijenata pritisaka i upoređeni sa aktuelnim standardima i rezultatima eksperimentalnih istraživanja. Date su konkretne preporuke za kreiranje modela izolovane zgrade za analizu dejstva vetra u <i>CFD</i>-u, zavisno od odabranog turbulentnog modela. Drugi deo istraživanja obuhvatio je analizu nosećih elemenata zida zavese, izrađenih od čelika S235 i aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6, a na osnovu rezultata prethodno sprovedene analize dejstva vetra. Posebna pažnja posvećena je stabilnosti ovih elemenata kroz analizu otpornosti na bočno-torziono izvijanje.</p>
Naučna oblast:	Građevinarstvo
Naučna disciplina:	Projektovanje konstrukcija arhitektonskih objekata
Ključne reči:	Zid zavese, vetar, turbulentni modeli, RNG k- $\epsilon$ model, SST k- $\omega$ model, koeficijenti pritiska, numerička simulacija, numerička analiza
UDK:	692.23:624.042.41(043.3)
CERIF klasifikacija:	T 220
Тип лиценце Креативне заједнице:	<b>CC BY-NC-ND</b>



## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral  
Supervisor:

D.Sc. Milisav Damnjanović, Prof.  
University of Niš, faculty of Civil engineering and Architecture

Title:

Architectonic-structural design of steel and aluminium façade systems

Abstract:

Contemporary facades represent lightweight, most frequently transparent membranes whose design and construction is a complex and demanding task. The research subject of this dissertation are curtain walls and their complex analysis in actual conditions. Wind, as a dominant load, was considered as dynamic, and it was modeled with the aid of numerical fluid dynamics. Regarding the variation of wind velocity with the height, the roughness of terrain was taken into consideration by modeling the atmospheric boundary layer. A building model was created, with the  $b:d:h \approx 1:1:2.5$  dimensional ratio. This building was analyzed through four groups of models. Model A, B, C and D group comprised wind action at the angle of  $0^0$ ,  $15^0$ ,  $30^0$  and  $45^0$ , respectively. Two turbulent models were used, *RNG k-ε* and *SST k-ω*. The obtained results were presented through dimensionless coefficients of pressure and compared with the standing standards and results of experimental research. Recommendations for creation of a model in *CFD* were made, depending on the chosen turbulent model. The second part of research included analysis of the bearing elements of the curtain wall, made of S235 steel and AW 6063.T5 and AW 6082.T6 aluminium alloys, based on the results of the previously conducted wind action analysis. A special attention was paid to the stability of these elements through the analysis of lateral torsional buckling strength.

Scientific Field:

Civil engineering

Scientific  
Discipline:

Design of Architectonic Building Constructions

Key Words:

curtain wall, wind, turbulence models, *RNG k-ε* model, *SST k-ω* model, pressure coefficients, numerical simulation, numerical analysis

UDC:

692.23:624.042.41(043.3)

CERIF  
Classification:

T 220

Creative  
Commons  
License Type:

**CC BY-NC-ND**

## OBELEŽAVANJE:

A – površina

b – širina zgrade

$c_{dir}$  – koeficijent pravca

$C_p$  - bezdimenzionalni koeficijent pritiska

$C_{pe}$  - koeficijent spoljašnjeg pritiska

$C_{pe,10}$  – globalni koeficijent pritiska

$C_{pe,1}$  – lokalni koeficijent pritiska

$C_{pi}$  – koeficijent unutrašnjeg pritiska

$c_o(z)$  – koeficijent topografije

$c_{season}$  – koeficijent sezonskog delovanja

$c_\mu$  – konstanta standardnog k-ε modela

d – dužina zgrade

$E_{Al}$  – moduo elastičnosti aluminijuma

$E_\sigma$  – moduo elastičnosti čelika

$f_{01}$  – konvencionalna granica proporcionalnosti

$f_{02}$  – usvojena vrednost konvencionalne granice razvlačenja za aluminijum

$f_{max}$  – maksimalni ugib

$f_u$  – zatezna čvrstoća

$f_y$  – granica razvlačenja

g – udarni koeficijent

$G_z$  – dinamički koeficijent

h, H – visina zgrade

$H_{sp}$  – spratna visina

$I_z$  – intenzitet turbulencije vazduha

k - kinetička energija turbulencije

$k_t$  – faktor vremena osrednjavanja osnovne brzine vetra

$k_T$  – faktor povratnog perioda

$K_z^2$  – faktor ekspozicije

l – dužina elementa

P – pritisak

p – statički pritisak

$S_z$  – faktor topografije  
 $q_{m,T,10}$  – osnovni pritisak vetra  
 $q_{m,T,z}$  – osrednjeni aerodinamički pritisak vetra  
 $q_w$  – pritisak vetra  
 $q_p$  – udarni pritisak vetra  
 $t$  – tačka topljenja  
 $U^*$  – brzina u smičućem sloju  
 $u_i, u_j$  – komponente brzine strujanja vazduha  
 $U_{ref}$  – referentna brzina vetra  
 $v$  – brzina kretanja vazduha  
 $v_m(z)$  – osrednjena brzina vetra u posmatranoj tački u prostoru  
 $v_{m,T,10}$  – projektna osnovna brzina vetra  
 $v_{m,50,10}$  – osnovna brzina vetra  
 $v_f(z,t)$  – fluktuirajući deo brzine vetra  
 $v_0$  – brzina slobodnog, ravnomernog vazdušnog toka  
 $w_e$  – pritisak vetra na spoljašnje površine  
 $w_i$  – pritisak vetra na unutrašnje površine  
 $x_i, x_j$  – prostorne koordinate pravouglog koordinatnog sistema  
 $z_G$  – gradijentna visina  
 $z_0$  – dužina hrapavosti terena  
 $\delta_{ij}$  – Kronekerov delta operator  
 $\varepsilon$  – dilatacija  
 $sav \sigma_{doz}$  – dozvoljeni naponi na savijanje stakla  
 $\gamma$  – specifična težina  
 $\alpha$  – koeficijent toplotnog širenja  
 $\kappa$  – von Karmanova konstanta  
 $\rho$  – gustina vazduha  
 $\nu$  – kinematska viskoznost  
 $\nu_t$  – turbulentna (dinamička) viskoznost  
 $\omega$  – specifična disipacija

## Sadržaj

1	Uvod.....	1
1.1	Struktura rada .....	4
2	Istorijski razvoj lakih fasadnih sistema .....	6
3	Zid zavesa.....	11
3.1	Materijali od kojih se izrađuju zid zavesa .....	12
3.1.1	Staklo .....	12
3.1.2	Aluminijum .....	14
3.1.3	Čelik.....	17
3.2	Konstrukcija zid zavesa.....	18
3.3	Podela zid zavesa.....	20
3.4	Aktuelni standardi .....	23
3.5	Problemi kod fasada tipa zid zavesa.....	25
3.6	Dopuštena pomeranja .....	30
4	Dejstvo vetra na zgrade .....	31
4.1	Priroda vetra .....	32
4.2	Oštećenja fasada usled dejstva vetra .....	42
4.3	Aktuelni standardi i propisi .....	47
4.3.1	SRPS U.C7.110-113 .....	47
4.3.2	SRPS EN 1991-1-4: 2012 .....	52
4.3.3	Nemački propisi VDI 3783 .....	60
5	Numeričko rešavanje razmatranog problema.....	61

5.1	Teorijske osnove.....	62
5.1.1	<i>Reynolds</i> -ove osrednjene <i>Navier-Stokes</i> -ove (RANS) jednačine .....	64
5.1.2	<i>Reynolds</i> -ovi naponi.....	64
5.2	Kratka istorija modela turbulencije .....	65
5.3	Modeli turbulentnog strujanja .....	66
5.3.1	Standardni $k-\epsilon$ model .....	68
5.3.2	RNG $k-\epsilon$ model .....	69
5.3.3	Standardni (Wilcox-ov) $k-\omega$ model .....	71
5.3.4	SST ( <i>Shear Stress Transport</i> ) model .....	72
5.4	Formiranje modela i parametri za numeričku analizu.....	73
5.4.1	Proračunski domen.....	74
5.4.2	Mreža konačnih zapremina .....	78
5.4.3	Turbulentni model.....	83
5.4.4	Granice domena .....	84
5.5	Konvergencija i monitoring konvergencije.....	90
5.6	Prikaz rezultata analize.....	92
5.6.1	Rezultati za grupu modela A – zgrada pod uglom od $0^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra	92
5.6.2	Rezultati za grupu modela B – zgrada pod uglom od $15^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra..	
5.6.3	Rezultati za grupu modela C – zgrada pod uglom od $30^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra..	
5.6.4	Rezultati za grupu modela D – zgrada pod uglom od $45^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra..	
6	Analiza rezultata numeričkog modeliranja i zaključci.....	132
6.1	Analiza rezultata i poredjenje sa aktuelnim standardima.....	132

6.2	Zaključci .....	137
6.3	Analiza rezultata i poredjenje sa rezultatima dostupnih eksperimenata i literaturom.....	137
7	Numeričko modeliranje zid zavese .....	150
7.1	Statički sistemi elemenata zid zavese.....	150
7.2	Numeričko modeliranje zid zavese od čelika i aluminijuma.....	151
7.3	Bočno-torziono izvijanje .....	158
7.4	Proračun otpornosti nosećih elemenata zid zavese na bočno-torziono izvijanje .....	165
8	Zaključci.....	177
9	Literatura .....	184
	Spisak slika: .....	191
	Spisak tabela: .....	195
	BIOGRAFIJA AUTORA.....	197

# 1 Uvod

*“Curtain walls have been around for over a century; however they still present a challenge for building designers, curtain wall manufacturers and installers.”*

*“Iako prisutne duže od jednog veka zid zavese i dalje predstavljaju izazov za projektante, inženjere, proizvođače i izvođače.”*

*Karol Kazmierczak, 2010.*

Fasade zgrada predstavljaju omotač čijom realizacijom se ostvaruje njegova primarna funkcija zaštite korisnika od atmosferskih uticaja. Savremene fasade pored brojnih funkcionalnih zahteva često moraju da ispune i visoke estetske kriterijume, te mogu presudno uticati na ukupan utisak o objektu. Zid zavese predstavlja fasadnu konstrukciju koja se može definisati kao laka, obodna konstrukcija sastavljena od industrijski proizvedenih elemenata, najčešće stakla i metala, a koja preuzima sve funkcije spoljašnjeg zida, izuzev noseće. Ispred noseće konstrukcije objekta formira se jedinstvena, uglavnom transparentna fasadna membrana koja se brzo gradi i ne zauzima koristan prostor objekta. Zid zavese predstavljaju sintezu estetskih i tehničko-tehnoloških rešenja a kao materijal za izradu nosećih elemenata, stubića i prečki koriste se čelik, aluminijum i drvo, dok se za elemente ispune mogu koristiti razne vrste stakala i kamena ali i razne vrste panela, gde praktično nema ograničenja u estetskim i arhitektonskim rešenjima.

Činjenica je da savremene fasade nikada ranije nisu bile ovako kompleksne. Ponekad je njihova osnovna funkcija da zaštite korisnike, na neki način stavljena u drugi plan, dok samo oblikovanje, da bi

se dobila što atraktivnija i izazovnija fasada za posmatrača, dolaze u prvi plan. Obzirom na svoju kompleksnu funkciju, fasade i fasadne konstrukcije podležu mnogobrojnim kriterijumima zbog čega su predmet stalnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja.

Konstrukcija zida zavese, za razliku od glavne noseće konstrukcije koja prima sva opterećenja objekta, mora da apsorbuje, prenese ali i da izdrži opterećenja koja deluju na nju, kroz pažljivo projektovane vertikalne i horizontalne noseće elemente fasade. U najvećem broju slučajeva problemi koji se javljaju na fasadama ovog tipa su direktna posledica neadekvatnog projektovanja, izvođenja i nekompatibilnosti sa nosećom konstrukcijom objekta. Dominantno opterećenje za fasade tipa zid zavesa jeste opterećenje od vetra. Vetar spada u stohastična i kompleksna opterećenja i predmet je brojnih istraživanja. Značaj ovih istraživanja leži velikim delom u činjenici da dolazi do razvoja novih klimatskih modela usled globalnog zagrevanja, tzv. "efekta staklene bašte" ali i razvoja svesti o mogućim posledicama klimatskih promena. Ove promene između ostalog, ogledaće se i u pojavi izuzetno jakih vetrova u oblastima za koje to do sada nije bilo uobičajeno.

Predmet naučnog istraživanja u okviru ove doktorske disertacije jeste analiza lakih fasadnih konstrukcija, tipa zid zavesa, sagledanih na kompleksniji način, uzimajući u obzir savremenu analizu dejstva vetra na proračun nosećih elemenata fasade. Arhitektonsko-konstrukcijsko oblikovanje, za šta je u svetu uobičajen izraz "dizajn", jeste ciljno područje naučnog istraživanja, uz naglasak da se pod dizajnom ne podrazumeva samo arhitektonsko oblikovanje fasadnih konstrukcija, već i njihov proračun. Cilj rada je da fasade tipa zid zavesa budu sigurnije, da budu sagledane kompleksnije, a samim tim i realnije, sa stanovišta kako statičkog tako i dinamičkog opterećenja obzirom da one i jesu izložene kompleksnom opterećenju, a samim tim i naprezanju.

Prvi deo istraživanja u okviru ove disertacije posvećen je simuliranju dejstva vetra na fasade visokih zgrada putem numeričke dinamike fluida. U poslednje dve do tri decenije došlo je do naglog napretka i usavršavanja programskih paketa iz ove oblasti. Obzirom da su eksperimenti u aerodinamičkim tunelima izuzetno skupi i nisu lako dostupni, korišćenje softvera je dobilo na značaju i nalazi široku primenu, kako u inženjerskoj praksi tako i u naučnim istraživanjima. U okviru ovog dela istraživanja korišćen je programski paket ANSYS Workbench 15.0 (CFX) baziran na Metodi konačnih zapremina (MKZ). Formirane su i analizirane četiri grupe modela (A, B, C i D). Predmet analize jeste izolovana zgrada sa odnosom dimenzija  $b:d:h \approx 1:1:2.5$  na koju vetar deluje pod uglom od  $0^\circ$  (modeli grupe A),  $15^\circ$  (B),  $30^\circ$  (C) i  $45^\circ$  (D), redom. Takođe, u cilju što vernijeg prikazivanja dejstva vetra na visoke zgrade uzet je u obzir i uticaj terena na profil brzine vetra. Posebna pažnja posvećena je odabiru turbulentnih modela čijom primenom bi se dobili pouzdaniji rezultati. Dobijeni pritisci usled dejstva vetra prikazani su preko bezdimenzionalnih koeficijenata pritisaka i prikazani su grafički za sve četiri



fasadne ravni i krov objekta, i to za sve grupe modela. Verifikacija dobijenih rezultata izvršena poređenjem sa važećim standardima i rezultatima dostupnih eksperimentalnih istraživanja poznatih laboratorija kao i rezultatima prikazanim u literaturi.

Pored prijema sila vetra i njihovog prenošenja na glavnu noseću konstrukciju zgrade, fasada je izložena pomeranjima i deformacijama glavne noseće konstrukcije i njenih elemenata i mora biti projektovana tako, da u svemu prati glavni noseći sistem zgrade. Ovo ponekad nije lako ostvariti obzirom na materijale koji se pojavljuju na fasadi zgrade, njihov broj, raznorodnost i karakteristike. Dakle, čest problem fasada tipa zid zavesa jeste nekompatibilnost sa glavnom nosećom konstrukcijom objekta. Čak i kada je zid zavesa dobro projektovana mora se na adekvatan način izvršiti integracija sa glavnim nosećim sistemom zgrade. Takođe, interakcija ova dva sistema koji objedinjuju različite materijale a u svemu moraju da prate jedan drugog, je značajno zanemarena u fazi projektovanja. O analizi opterećenja, njihovom prenošenju putem veza sa fasadne konstrukcije na glavnu, relativnim pomeranjima kao i koordinaciji pomeranja glavnog nosećeg sistema i fasadne obloge mora se voditi računa u najranijim fazama projektovanja. Jedino na taj način rezultat je fasada koja će pored atraktivnosti zadovoljiti i brojne druge funkcije koje su joj poverene. Kada zid zavesa ne može da prati, odnosno izdrži pomeranja kojima je izložena glavna noseća konstrukcija objekta, dolazi do narušavanja integriteta fasade. Oštećenja mogu biti različita i različitog stepena, od oštećenja čisto estetske prirode, preko pucanja stakla, do loma nosećih elemenata fasade i njihovih veza.

Osnovna, polazna hipoteza koju treba potvrditi ovim istraživanjem jeste da ima mesta usavršavanju fasadnih konstrukcija i njihovih sistema, kako u smislu projektovanja, tako i izrade. Takođe se pretpostavlja, da ima mesta za usavršavanje u smislu njihove racionalnosti, a bez ugrožavanja stabilnosti.

Drugi deo istraživanja u okviru ovog rada bavi se analizom nosećih elemenata zid zavesa, stubića i prečki, i urađen je u programskom paketu SOFiSTiK 2014 baziranom na Metodi konačnih elemenata (MKE). Upoređeni su elementi zid zavesa izrađeni od aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6 i čelika S235, i njihovo ponašanje uzimajući u obzir specifičnost razlika između ovih materijala. Analizirani su stubići dvostruko-simetričnih i mono-simetričnih poprečnih preseka a sama analiza obuhvatila je proračun po teoriji I i II reda, kao i uticaj početnih imperfekcija i redukcije krutosti materijala na dimenzionisanje ovih elemenata. Obzirom da se radi o presecima kod kojih je visina znatno veća od širine nožice, posebna pažnja je posvećena stabilnosti nosećih elemenata zid zavesa. Oblast stabilnosti kod čelika i aluminijuma konstantno predstavlja predmet istraživanja, a treba istaći da je ovaj problem kompleksniji kod aluminijumskih legura nego kod čelika. Posebno je

obrađena osetljivost ovih elemenata na bočno-torziono izvijanje i date su preporuke za izbor oblika poprečnog preseka.

U okviru ovog istraživanja korišćene su metode analize, klasifikacije, komparacije, numeričkog modeliranja i numeričke analize.

## 1.1 Struktura rada

U **Poglavlju 1** ukratko je opisana tema istraživanja obavljenog u okviru doktorske disertacije, naglašena je aktuelnost problema koji se ovde istražuje i navode postavljeni ciljevi. Data je i struktura rada kroz kratak opis svakog od ukupno devet poglavlja.

U **Poglavlju 2** dat je pregled istorijskog razvoja lakih fasadnih sistema sa posebnim osvrtom na nastanak i razvoj zid zavesa.

U **Poglavlju 3** definisani su fasadni sistemi tipa zid zavesa, navedeni materijali od kojih se one izrađuju i njihove osnovne karakteristike. Potom je data podela zid zavesa i aktuelni standardi iz ove oblasti. Na kraju poglavlja navedeni su i analizirani problemi koji se javljaju kod ovih fasadnih sistema.

U **Poglavlju 4** objašnjena je sam fenomen vetra kao prirodne pojave i njegovo dejstvo na zgrade sa posebnim osvrtom na visoke zgrade. Prikazana su oštećenja fasada tipa zid zavesa usled dejstva vetrova a potom su navedeni aktuelni standardi iz ove oblasti.

**Poglavlje 5** se bavi numeričkim rešavanjem razmatranog problema. Na početku poglavlja date su i komentarisane *Reynolds*-ove osrednjene *Navier-Stokes*-ove (*RANS*) jednačine i *Reynolds*-ovi naponi. Data je kratka istorija modela turbulencije a potom su detaljno prikazani modeli turbulentnog strujanja korišćeni u okviru ovog rada: standardni *k-ε* model, *RNG k-ε* model, Standardni (*Wilcox*-ov) *k-ω* model i *SST (Shear Stress Transport)* model. Potom su prikazani i objašnjeni kreirani modeli koji su bili predmet numeričke analize kao i svi parametri analize. Numeričko modeliranje zadatog problema izvršeno je korišćenjem softverskog paketa ANSYS Workbench 15.0 (CFX). Na kraju poglavlja prikazani su dobijeni rezultati za sve četiri grupe modela (A, B, C i D) odnosno za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$ .

U **Poglavlju 6** data je analiza dobijenih rezultata prikazanih u prethodnom poglavlju i njihovo poređenje sa aktuelnim standardima i dostupnim eksperimentima. Na kraju poglavlja dati su izvedeni zaključci.

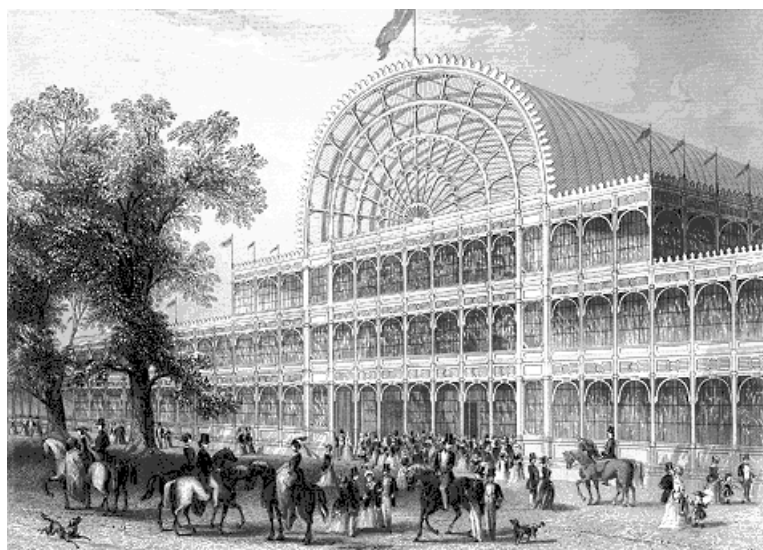
U **Poglavlju 7** izvršeno je modeliranje zid zavese u programskom paketu SOFiSTiK 2014 i analiza njenih elemenata po teoriji I i II reda. Analizirani su modeli od aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6 i od čelika S235.

U **Poglavlju 8** data je analiza dobijenih rezultata prikazanih u Poglavlju 7. Potom su dati izvedeni zaključci i navedeni pravci daljih istraživanja.

U **Poglavlju 9** dat je pregled korišćene literature, standardai kataloga.

## 2 Istorijski razvoj lakih fasadnih sistema

Prelaskom sa masivnog na skeletni konstruktivni sistem čiji su noseći elementi bili izrađeni prvo od čelika (početkom 19. veka), a potom i od betona (druga polovina 19. veka), otvara se mogućnost zamene masivnog fasadnog zida lakom transparentnom fasadom. Fasada kod skeletnih sistema biva oslobođena funkcije nošenja a fasadni zid postaje fasadni prozor. Razvoj lakih fasadnih sistema počinje i teče paralelno sa razvojem skeletnog sistema.



*Slika 2.1. Kristalna palata, London 1851*

[https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Crystal\\_Palace#/media/File:Crystal\\_Palace.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Crystal_Palace#/media/File:Crystal_Palace.PNG)

U velikom broju odrednica u literaturi kao preteča zid zavesama u obliku kakvom ih danas poznajemo stoji objekat koji je projektovao Džozef Pakston 1851. godine za Veliku izložbu dostignuća

i industrije svih nacija u Londonu. Ova izložbena hala popularno nazvana Kristalnom palatom (slika 2.1) nosila je epitete najveće, najsvetlije i najprozračnije građevine svih vremena. Ovaj grandiozni objekat dužine 555.3 metara, širine 122.4 i visine 33 metara bio je kompletno izgrađen od gvožđa i stakla i za njegovu gradnju upotrebjeno je 93000 m<sup>2</sup> stakla koje je ugrađeno u zidove, kupole i svodove ovog objekta. Ono što ovaj objekat još ističe jeste činjenica da je sledeće godine demontiran i preseljen u južni London gde je, nažalost, izgoreo u požaru 1936. godine.



*Slika 2.2. Bauhaus i preteča zid zavesa (Mislin 2009)*

*Slika 2.3. Boley Clothing Company, Kansas City (Allana 2012)*

Teško je utvrditi ko je tačno prvi osmislio ovaj tip fasada i na kom je objektu prvo izvedena zid zavesa. Razlog uglavnom leži u velikoj popularnosti stakla na fasadama objekata širom sveta i mnoštvu različitih sistema koji postoje a spadaju u grupu zid zavesa.

Smatra se (Mislin 2009) da je prvu zid zavesu projektovao nemački arhitekta Valter Gropijus (Walter Gropius 1883-1969) inače predavač u čuvenoj nemačkoj umetničkoj školi, Bauhaus. Kada se ova škola selila iz Vajmara (Weimar) u Desau (Dessau) 1926. godine, Gropijus je osmislio i projektovao nov kampus jednostavnog, funkcionalnog i modernog dizajna. Njegov najvažniji doprinos dobio je naziv “zid zavesa” a predstavljao je spoljašnji zid od stakla (slika 2.2).

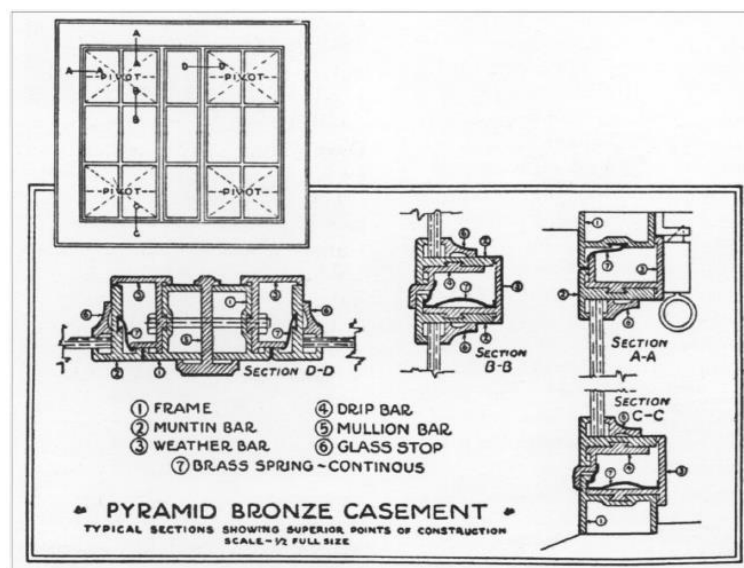
Međutim, za prvu zid zavesu na tlu Sjedinjenih Američkih Država (Allana 2012) može se naći podatak da je projektovao arhitekta Luis Kurtis (Louis S. Curtiss) i da je fasada montirana 1909. godine u Kansas Sitiju na zgradi Bouli Kloting kompanije (Boley Clothing Company) (slika 2.3). Ova zgrada

je još uvek u upotrebi a nalazi se na listi Nacionalnog registra važnih istorijskih mesta SAD. Devet godina kasnije, 1918. godine u San Francisku, montirana je zid



Slika 2.4. Lever House, New York City, 1952  
([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

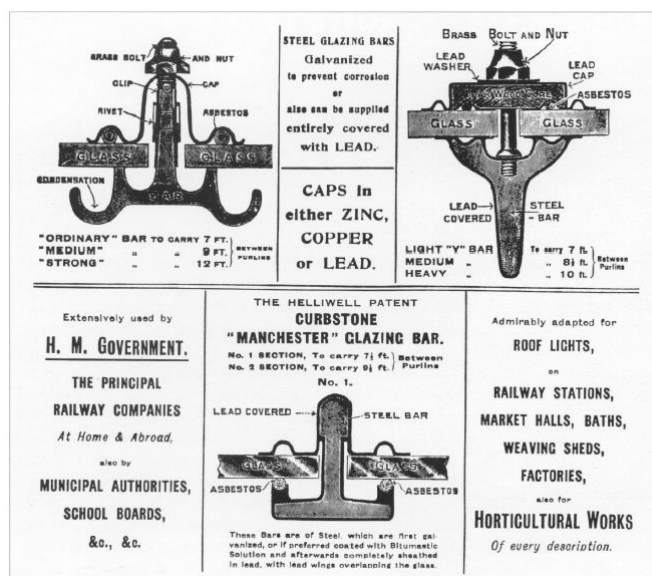
zavesa sa čeličnim stubićima, na zgradi *Hallidie*. I ova zgrada se i danas koristi i predstavlja sedište Američkog arhitektonskog instituta. U Njujorku, međutim, prva zid zavesa montirana je tek 1952. godine na zgradi *Lever House* (slika 2.4). U to vreme predstavljala je veliku novinu, a noseći stubići bili su izrađeni od čelika.



Slika 2.5. Katalog kompanije McCoy Bronze iz 1922. godine (Yeomans 2014)



Na slici 2.5 prikazan je deo reklamnog kataloga kompanije *McCoy Bronze* a na slici 2.6 različiti načini pričvršćivanja i zaptivanja stakla koje je u ponudi imala kompanija *Helliwell Patent Glazing* 1928. godine.



Slika 2.6. Katalog kompanije *Helliwell Patent Glazing* iz 1928. godine (Yeomans 2014)

U svakom slučaju, kada su se jednom pojavile i unele svetlo u unutrašnjost objekata zid zavese nisu prestale da provociraju i izazivaju projektante, arhitekte, inženjere i proizvođače. I danas je teško zamisliti zgrade bez transparentne, lake opne nazvane zid zavese. One dominiraju arhitektonskim pejzažima od istoka do zapada.

Razvoj savremenih zid zavesa, kakve danas poznajemo možemo podeliti u tri generacije koje odlikuju sledeće karakteristike:

- **I generacija** (rane sedamdesete godine dvadesetog veka):
  - Jednostavnog dizajna;
  - Proizvedene na lokalnom tržištu od lokalnih proizvođača;
  - Štapni sistem sa vidnim horizontalnim i vertikalnim podelama;
  - Aluminijski noseći profili;
  - Montaža na objektu;
  
- **II generacija** (1980 - 1990):
  - Zaštićeni sistemi, dizajn prema preporukama proizvođača, standardni modeli;
  - Štapni sistemi sa vidnim horizontalnim i vertikalnim podelama, retko blok sistemi;
  - Aluminijski profili, prefabrikovani u jedinice koje se montiraju na objektu;

➤ **III generacija** (posle 1990. godine):

- Uglavnom zaštićeni ili specijalno dizajnirani sistemi za posebne namene;
- Uglavnom blok sistemi za veće objekte i štapni za manje;
- Konstrukcija od aluminijumskih profila ili nerđajućeg čelika;
- Velike površine stakla;
- Specijalni pribori i delovi za zaptivanje i montažu;
- Prefabrikovane jedinice montiraju se na objektu;

Dugogodišnja težnja arhitekata da projektovane fasade od stakla imaju što manje netransparentne površine, odnosno da stakleni delovi budu što veći, a da se mesta oslanjanja svedu na najmanju moguću meru, polako ali sigurno se bližila realizaciji. Nakon klasičnih zid zavesa pojavile su se polustrukturalne fasade a nešto kasnije, šezdesetih godina prošlog veka, i strukturalne kod kojih je metalna noseća konstrukcija smeštena kompletno iza stakla. Sledeći korak bio je prelazak sa linijskog oslanjanja stakla, prisutnog kod sva tri do tada korišćena tipa zid zavesa (klasične, polustrukturalne i strukturalne), na tačkasti sistem oslanjanja u cilju potpunog oslobađanja fasadne opne metalnih nosećih elemenata. Prva ovakva fasada, sa tačkastim sistemom nošenja stakla, urađena je na muzeju *Wilhem* u Duizburgu 1964. godine gde su ugrađeni stakleni paneli visine 4 metra (Čikić 2007).

Staklo na fasadama zgrada predstavlja neprekidnu inspiraciju arhitektama i izazov inženjerima i proizvođačima a kao takvo ono je predmet stalnih istraživanja i unapređenja kako u tehnološkom tako i u konstruktivnom smislu.



## 3 Zid zavese

*A wall is only good as its weakest component.  
Fasadni zid je dobar onoliko koliko i njegov najslabiji element.  
Kazmierzak, 2010.*

Zid zavese spadaju u grupu lakih fasadnih sistema a sam naziv nastaje od engleskog naziva “curtain wall”. Nastaju sublimacijom svih zaštitnih funkcija zgrade u jednu laku, tanku opnu, propusnu samo za svetlost. Ova opna je mnogo puta tanja od odgovarajućih nosećih zidova i uključuje niz individualnih komponenti odgovornih za ispunjavanje svih funkcija fasade. Svaka fasada pa i zid zavesa treba da obezbedi zaštitu korisnika i materijalnih dobara unutar objekta od spoljašnjih uticaja. Lak spoljašnji omotač, oslobođen noseće uloge koju su imali masivni obodni zidovi ima funkciju da zaštiti unutrašnjost od:

- vlage, kiše, snega i grada,
- vetra,
- zemljotresa,
- pregrevanja i hlađenja,
- buke i vibracija,
- atmosferskog zagađenja,
- požara i dima,
- udara i
- delova nošenih vetrom (*wind-borne debris*).

U nastavku biće ukratko prikazani materijali od kojih se najčešće izrađuju zid zavese, njihova konstrukcija, statički sistemi i opterećenja, biće reči o podeli zid zavesa kao i o aktuelnim standardima iz ove oblasti. Konačno, na kraju poglavlja navedeni su problemi karakteristični za ove fasade.

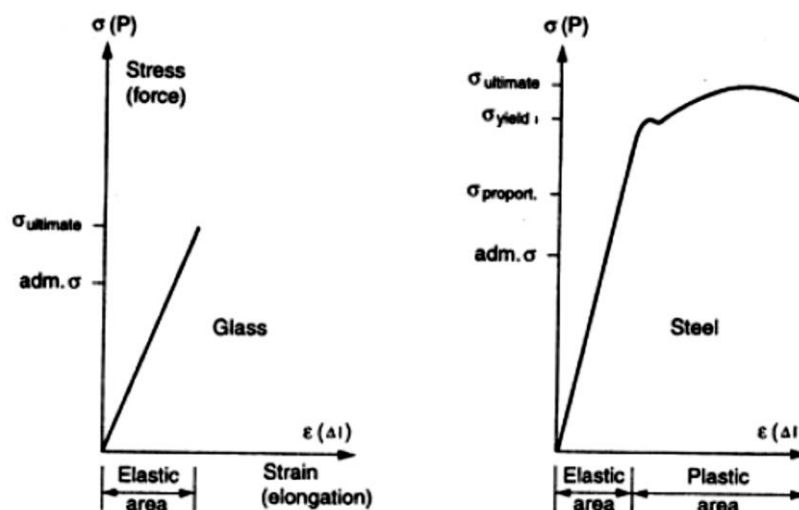
### 3.1 Materijali od kojih se izrađuju zid zavese

Zid zavese se izrađuju po tehnologijama koje se svakog dana usavršavaju, kako od materijala koji su dugo prisutni u građevinarstvu, pa sve do najmodernijih i najnovijih materijala na tržištu. One predstavljaju skup raznorodnih materijala koji povezani u celinu formiraju smeje, atraktivne omotače oko visokih zgrada, komercijalnih ali i rezidencijalnih objekata.

Materijali koji se mogu naći na savremenim fasadama mogu biti vrlo različiti pa se najčešće kao materijal podkonstrukcije koristi čelik, aluminijum, drvo i staklo, dok se za oblogu odnosno ispunu koristi staklo, limovi, razne vrste kamena ali i sintetički i kompozitni materijali.

#### 3.1.1 Staklo

Materijal bez koga ne možemo da zamislimo objekte, a koji mu pored svetla, obezbeđuje ventilaciju ali i omogućava raznovrsnost formi jeste staklo. Smatra se da je staklo pronađeno pre više od 4000 godina. Kroz istoriju ono se usavršavalo tako da danas postoji veliki broj vrsta stakala zavisno od njihove namene.



Slika 3.1.  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrami za staklo i čelik (Sedlacek i dr. 1995)

Za razliku od čelika i aluminijuma sa kojima se u kombinaciji najčešće sreće na zid zavesama, staklo predstavlja krt materijal koji se lomi bez prethodnog predznaka (slika 3.1).

Razlog za ovakvo ponašanje jeste što staklo nema jasno određenu granicu tečenja kao drugi elastični materijali, pa samim tim nema pojave plastifikacije koja bi najavila lom.

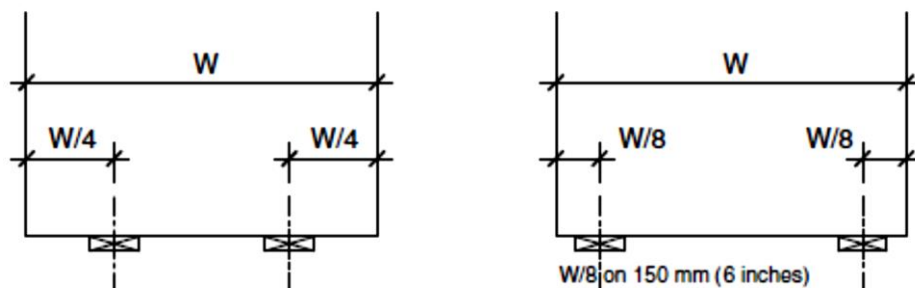
Ovo naizgled može predstavljati veliki problem za korišćenje stakla na fasadama objekata, međutim danas postoji velika paleta tipova stakala sa usavršenim određenim karakteristikama. Vrste stakala koja najčešće srećemo kao deo zid zavesa su (Savić i dr. 2013): vučeno, termički ojačano, kaljeno, višeslojno staklo, armirano staklo, nisko emisiona stakla kao i stakla specijalnih karakteristika.

Mehaničke i fizičke karakteristike stakla date su u tabeli 3.4 u poglavlju 3.1.3 uporedo sa karakteristikama čelika i aluminijuma. U tabeli 3.1 dati su dozvoljeni naponi na savijanje pri kratkotrajnom i dugotrajnom opterećenju za staklenu ploču izradenu od vučenog, termički ojačanog i kaljenog stakla.

Tabela 3.1. Dozvoljeni naponi na savijanje za vučeno, termički ojačano i kaljeno staklo

$sav\sigma_{doz}$ [MPa]	Pri kratkotrajnom opterećenju		Pri dugotrajnom opterećenju	
	U središnjoj zoni	Na ivicama	U središnjoj zoni	Na ivicama
<b>Vučeno staklo</b>	20	18	12	9
<b>Termički ojačano</b>	40	27	24	16
<b>Kaljeno staklo</b>	75	50	50	35

Dozvoljeni ugib stakla razlikuje se u standardima. Po Britanskim standardima maksimalni ugib bilo koje ivice staklenog panela treba da bude manji od 1/125 raspona ivice za jednostruko staklo i  $f_{max} = \min(1/175, 19\text{mm})$  za dvostruko staklo. Ovo se odnosi na staklo oslonjeno na sve četiri ivice. Po Australijskom standardu maksimalni ugib stakla oslonjenog na dve ivice je 1/60 raspona.



Slika 3.2. Položaj oslonaca za staklo (Glass and metal curtain walls – Best practice guide 2004)

Skoro sve preporuke za staklo u okviru zid zavesa imaju isti pristup kada je u pitanju oslanjanje stakla. Granične vrednosti položaja oslonaca date su na slici 3.2.

### 3.1.2 Aluminijum

Obzirom da je aluminijum u svom čistom obliku nepogodan za primenu u građevinarstvu, vrši se njegovo legiranje drugim metalima. Na taj način dobija se čitava paleta legura od kojih neke nalaze primenu u građevinarstvu bilo kao elementi noseće ili elementi sekundarne konstrukcije. Za izradu zid zavesa koriste se legure serije 6000 (Al-Si-Mg) dobijene procesom ekstrudiranja odnosno istiskivanja i to su najčešće: AW 6060, AW 6061, AW 6063 i AW 6082. Ovi profili se veštački stare pa pored već navedene oznake koja označava hemijski sastav nose i oznaku T5 ili T6. Obzirom da je aluminijum metal koji brzo reaguje sa kiseonikom iz vazduha, na površini se obrazuje jak oksidni sloj koji sprečava dalju oksidaciju. Ovo je razlog zašto se aluminijum smatra materijalom otpornim na koroziju u normalnim uslovima. Međutim kod profila za fasade i pored ove otpornosti na koroziju podrazumeva se površinska zaštita profila i to najčešće postupkom anodizacije. U tabeli 3.2 data su svojstva ekstrudiranih profila izrađenih od legura karakterističnih za izradu elemenata zid zavesa.

Aluminijum i čelik, iako donekle slični imaju i značajne razlike a jedna od najznačajnijih jeste u odnosu modula elastičnosti koji stoji u odnosu 3:1 u korist čelika:

$$\frac{E_{\check{c}}}{E_{Al}} = \frac{21000[kN/cm^2]}{7000[kN/cm^2]} = 3 \quad (3.1)$$

Iz ovog razloga elementi i konstrukcije izrađeni od aluminijumskih legura su znatno osetljiviji na pojavu lokalne i globalne nestabilnosti od čeličnih elemenata, a same deformacije mogu biti znatne, pa se ovoj oblasti posvećuje posebna pažnja.

Mehanička svojstva aluminijumskih legura zavise od hemijskog sastava legure i njenog stanja (vidi tabelu 3.2). Takođe, aluminijumske legure za razliku od čelika nemaju jasno izraženu granicu razvlačenja. Zato se za granicu razvlačenja usvaja konvencionalna vrednost  $f_{02}$ , odnosno vrednost koja odgovara plastičnoj dilataciji od 0,2%. U tabeli 3.2 ova granica je označena sa  $f_0$  odnosno važi da je  $f_0=f_{02}$ . Obzirom na gore navedeno, radni dijagram  $\sigma$ - $\varepsilon$  se često formira uz pomoć poznate i u literaturi široko prihvaćene tzv. Ramberg-Osgudove (*Ramberg-Osgood*) formule date jednačinom 3.2. Ova formula koristi se za materijale koji nemaju jasno izraženu granicu razvlačenja i može se primeniti i kod aluminijumskih legura za noseće konstrukcije. Ovo rešenje prihvaćeno je i u mnogim standardima, kako nacionalnim tako i internacionalnim.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{f_0} \right)^n \quad (3.2)$$

$$n = \frac{\ln 2}{\ln \left( \frac{f_0}{f_{01}} \right)} \quad (3.3)$$

Tabela 3.2. Tabela aluminijumskih legura i njihove karakteristike (EN 1999-1-1:2007)

Alloy EN- AW	Product form	Temper	Thick- ness $t$ mm 1) 3)	$f_o$ 1)	$f_u$ 1)	$A$ 5) 2)	$f_{o,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	$n_p$ 7)
				N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$			
6060	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14
	ET,EP,ER/B	T6	$t \leq 15$	<b>140</b>	<b>170</b>	8	60	100	0,43	0,59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16
	EP,ET,ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16
EP	$3 < t \leq 25$		150	195	8	0,43			0,56	A	18	
6061	EP,ET,ER/B,DT	T4	$t < 25$	110	<b>180</b>	<b>50</b>	95	150	0,86	0,83	B	8
	EP,ET,ER/B,DT	T6	$t \leq 20$	240	<b>260</b>	<b>8</b>	115	175	0,48	0,67	A	55
6063	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0,46	0,57	B	16
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0,55	0,63	B	13
	EP,ET,ER/B	T6	$t \leq 25$	<b>160</b>	<b>195</b>	<b>8</b>	65	110	0,41	0,56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0,34	0,50	A	31
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	<b>8</b>	75	130	0,38	0,53	A	22
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0,42	0,58	A	21
DT	$t \leq 20$		195	230	10	0,38			0,57	A	28	
6082	EP,ET,ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	B	8
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	B	28
	EP/O,EP/H ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			$5 < t \leq 20$	240	310	10			0,52	0,60	A	17

Tabela 3.2. Nastavak tabele 3.2 (EN 1999-1-1:2007)

Key:	EP	- Extruded profiles	EP/O	- Extruded open profiles
	EP/H	- Extruded hollow profiles	ET	- Extruded tube
	ER/B	- Extruded rod and bar	DT	- Drawn tube

1): Where values are quoted in **bold** greater thicknesses and/or higher mechanical properties may be permitted in some forms see ENs and prENs listed in 1.2.1.3. In this case the  $R_{p0,2}$  and  $R_m$  values can be taken as  $f_o$  and  $f_u$ . If using such higher values the corresponding HAZ-factors  $\rho$  have to be calculated acc. to expression (6.13) and (6.14) with the same values for  $f_{o,haz}$  and  $f_{u,haz}$ .

2): Where minimum elongation values are given in **bold**, higher minimum values may be given for some forms or thicknesses.

3): According to EN 755-2: following rule applies: "If a profile cross-section is comprised of different thicknesses which fall in more than one set of specified mechanically property values, the lowest specified value should be considered as valid for the whole profile cross-section." Exception is possible and the highest value given may be used provided the manufacturer can support the value by an appropriate quality assurance certificate.

4) The HAZ-values are valid for MIG welding and thickness up to 15mm. For TIG welding strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A) up to 6 mm the same values apply, but for TIG welding precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and thickness up to 6 mm the HAZ values have to be multiplied by a factor 0,8 and so the  $\rho$ -factors. For higher thickness – unless other data are available – the HAZ values and  $\rho$ -factors have to be further reduced by a factor 0,8 for the precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) alloys and by a factor 0,9 for strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A). These reductions do not apply in temper O.

5)  $A = A_{5,65} \sqrt{A_o}$

6) BC = buckling class, see 6.1.4.4, 6.1.5 and 6.3.1.

7)  $n$ -value in Ramberg-Osgood expression for plastic analysis. It applies only in connection with the listed  $f_o$ -value (= minimum standardized value).

8) If it is intended to use extruded or extruded and drawn semi-products in EN AW-5454 or EN AW-5754 in tempers O/H111 and F/H112 or H14/H24/H34 according to EN 755-2 or EN 754-2, the corresponding values of table 3.2.a may be applied for design with following changes:

- For EN AW-5454 temper O/H111 (includes F/H112) replace the values for  $f_u$  and  $f_{u,haz}$  by 200 N/mm<sup>2</sup>.
- For EN AW-5754 temper O/H111 (includes F/H112) replace the values for  $f_u$  and  $f_{u,haz}$  by 180 N/mm<sup>2</sup> (thickness of bars < 150 mm).
- For EN AW-5754 temper H14/H24/H34 replace the values for  $f_o$  by 180 N/mm<sup>2</sup> and for  $\rho_{o,haz}$  by 0,56.

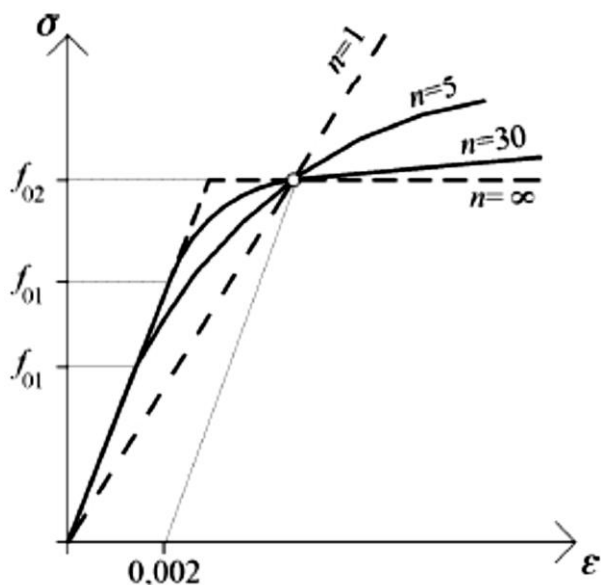
U jednačini 3.3 je sa  $f_{o1}$  označena konvencionalna granica proporcionalnosti. Parametar  $n$  takođe je dat standardom EN 1999-1-1 i prikazan je u tabeli 3.2. Na slici 3.3 prikazan je Ramberg-Osgudov model  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama.

Ono što izdvaja i predstavlja prednost aluminijumskih legura dobijenih istiskivanjem jeste mogućnost dobijanja velike palete proizvoljnih poprečnih preseka. Na ovaj način mogu se dobiti elementi zid zavese, stubići i prečke minimalne težine, a pritom sa maksimalnom efikasnošću za odgovarajući položaj na fasadi.

Legura AW 6063 je veoma čest izbor za izradu nosećih elemenata zid zavese. Za nju je karakteristično da ima dobre mehaničke karakteristike, a takođe se dobro ponaša pri procesu ekstrudiranja pa je na ovaj način omogućeno dobijanje profila komplikovanih otvorenih poprečnih preseka ali i tankozidnih cevastih preseka. Ona se dobro ponaša pri procesu anodizacije, poliranja, bojenja i drugim hemijskim procesima kojima se izlaže. Takođe spada u legure sa odličnom otpornošću na koroziju u normalnim atmosferskim uslovima. Za primenu na fasadama najčešće se koriste legure termičke obrade (stanja) T5 i T6 a odabir zavisi od



zahtevanih mehaničkih karakteristika. T5 se češće koristi za izradu zatvorenih, a T6 za izradu otvorenih poprečnih preseka.



Slika 3.3. Ramberg-Osgudov model  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama.

Za razliku od legure AW 6063, legura AW 6061 se koristi kada se zaheva veća nosivost elemenata na fasadi. Često se koristi za izradu elemenata za vezu i pričvršćivanje fasade. Izrada profila ekstrudiranjem je ograničenih mogućnosti i profili su manje komplikovanih preseka. Dobro prihvata završne obrade i postojana je na koroziju u normalnim uslovima. Za primenu na fasadama koristi se termička obrada T6.

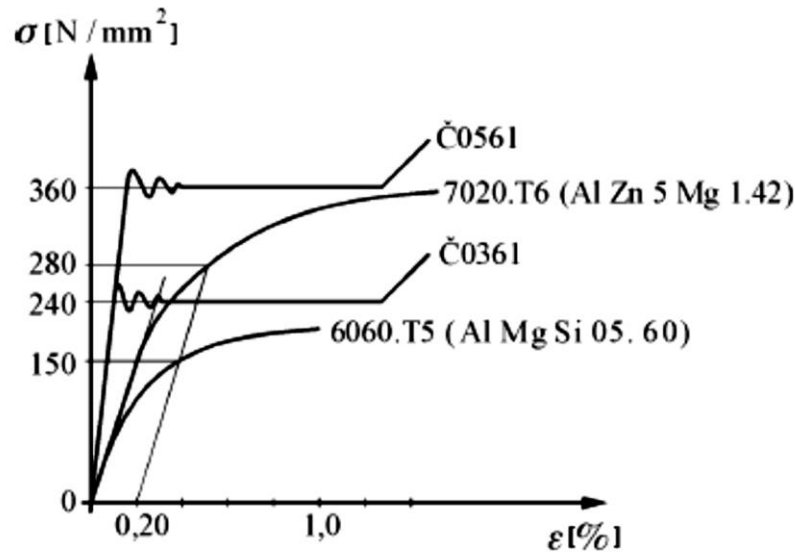
### 3.1.3 Čelik

Noseći elementi zid zavesa, stubići i prečke mogu biti izrađeni i od čelika. Za ovu namenu koriste se čelik S235, S275 i S355. U tabeli 3.3 date su zatezna čvrstoća i granica razvlačenja za sve tri

Tabela 3.3. Zatezna čvrstoća i granica razvlačenja za različite vrste čelika

Vrsta čelika EN (SRPS)	Debljina elementa, t [mm]	
	t ≤ 40mm	
	f <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>u</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
S 235 (Č0361)	235	360
S 275 (Č0451)	275	430
S 355 (Č0561)	355	510

vrste čelika, a na slici 3.4 dat je uporedni  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram za čelik S235 i S355 i dve aluminijumske legure AW 6060.T5 i AW 7020.T6.



Slika 3.4. Uporedni  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram za aluminijumske legure i čelik

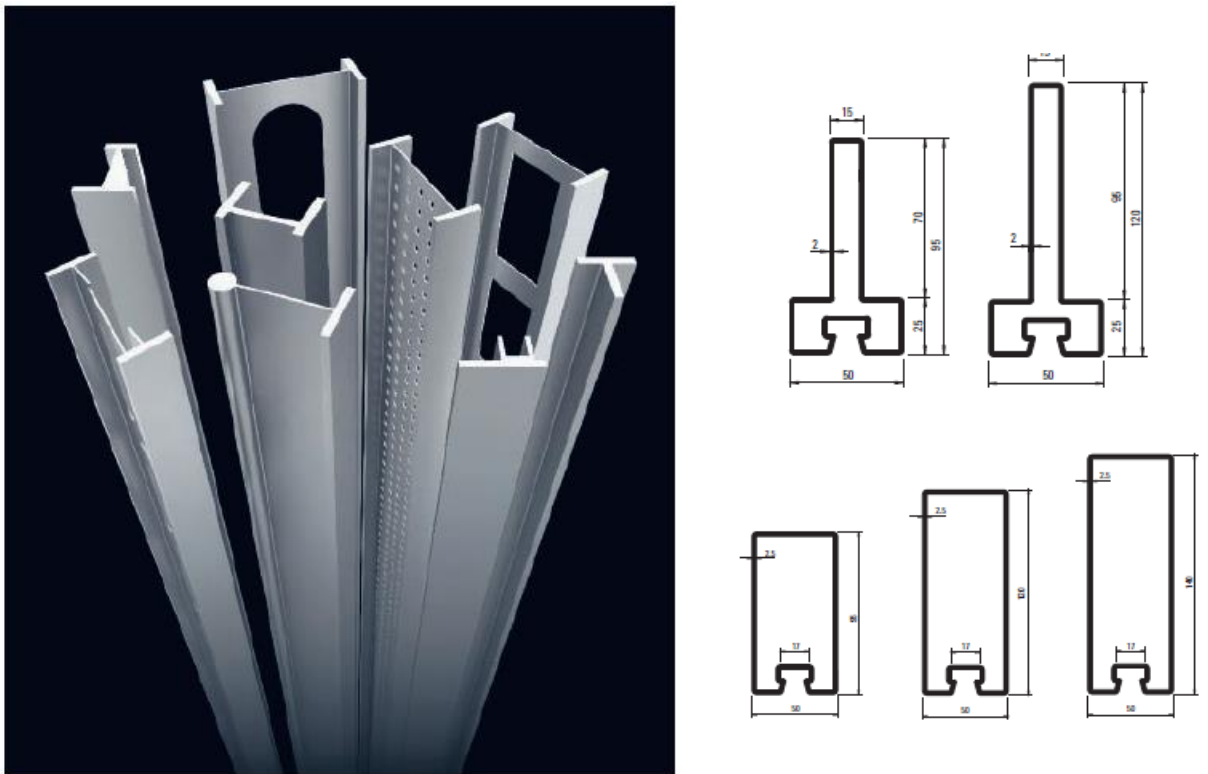
Tabela 3.4. Uporedne karakteristike materijala koji se najčešće pojavljuju na zid zavesama

		Čelik	Aluminijum	Staklo
Specifična težina, $\gamma$	[kg/m <sup>3</sup> ]	7850	2700	2500
Koeficijent toplotnog širenja, $\alpha$	[1/°C]	12*10 <sup>-6</sup>	23*10 <sup>-6</sup>	8.5*10 <sup>-6</sup>
Moduo elastičnosti, E	[MPa]	210.000	70000	72000
Tačka topljenja, t	[°C]	~1500	550-660	1500

### 3.2 Konstrukcija zid zavesa

Sama konstrukcija zid zavesa se sastoji od vertikalnih nosećih elemenata, stubića i horizontalnih elemenata, prečki. Stubići i prečke, postavljeni na odgovarajuća rastojanja formiraju okvire u koje se ugrađuju elementi ispune, uglavnom od stakla ali mogu biti i od kamena, aluminijuma, bakra, kompozitnih materijala, itd. Noseći elementni zid zavesa, stubići i prečke mogu biti izrađeni od aluminijuma, čelika ali i drveta i stakla. Poprečni preseći stubića i prečki mogu biti različiti ali najčešće su to cevasti, dvostruko ili monosimetrični I preseći, T preseći itd. Takođe ovi elementi mogu biti puni ali i olakšani. Neki od njih su prikazani na slici 3.5. Veze između elemenata ali i veze za samu noseću konstrukciju moraju biti takve da omoguće pomeranje usled dejstva spoljašnjih sila a pre svega vetra, da





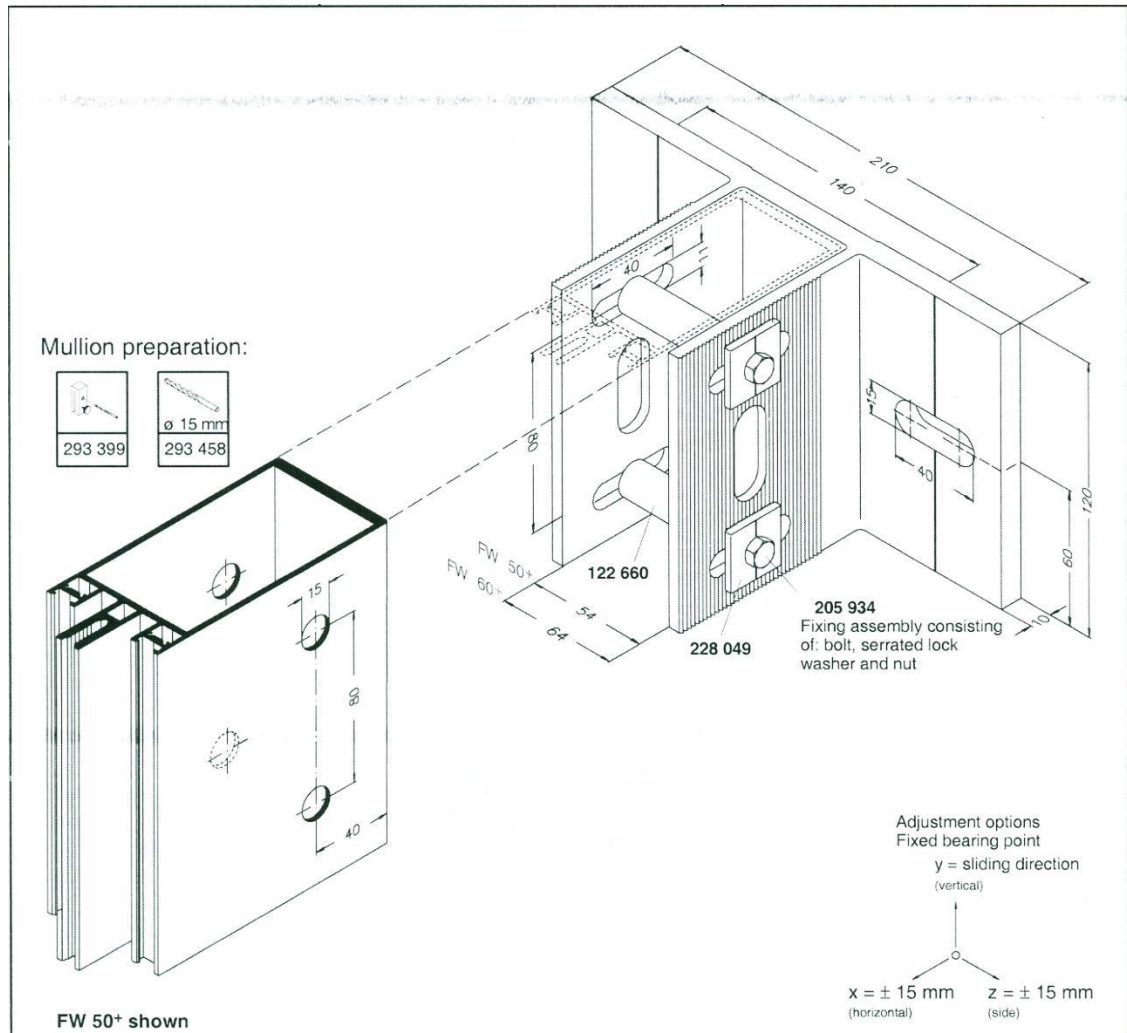
Slika 3.5. Raznolikost čeličnih profila koji se koriste u konstrukciji zid zavesa (Schuco-Jansen katalog)

omogućuje dilatacije usled dejstva temperature i gravitacije, na primer usled sleganja temelja. Projektovanju veza posvećuje se posebna pažnja.

Karakteristična opterećenja za ovaj tip konstrukcija, pored sopstvene težine jesu vetar, sneg, led, temperatura i zemljotres. U nekim slučajevima zavisno od statičkog sistema i oblika fasade treba uzeti u obzir i opterećenje koje bi se javilo kod održavanja konstrukcije. Vetar predstavlja dominantno opterećenje kod lakih fasadnih konstrukcija. Ono što je važno i o čemu treba voditi računa jeste dejstvo vetra na uglovima objekata ali i na delovima fasada blizu krova. Tu se, obzirom na stvaranje vrtloga javlja jako sišuće dejstvo vetra a koeficijenti pritiska su višestruko veći nego na centralnim delovima površina opterećenih vetrom. Posebnu pažnju treba obratiti i na dejstvo temperature obzirom da je podkonstrukcija često izrađena od aluminijuma, a njegov koeficijent termičkog širenja (vidi tabelu 3.1) je tri puta veći nego kod čelika i dilatacije koje nastaju u elementima nisu male. Ovaj problem se obično rešava adekvatnim izborom statičkog sistema odnosno primenom odgovarajućih kliznih veza (slika 3.6).

“Naročitu pažnju potrebno je obratiti statičkom tretmanu fasadnih stijena, jer su razlike između stvarnog ponašanja i onog predviđenog u statičkom računu znatno veće nego u području ostalih konstrukcija” (Androić 1988). Kod ovog tipa konstrukcija proračun se znatno pojednostavljuje što za posledicu ima sigurne ali neekonomične profile. Znajući da su mnogi materijali koji se pojavljuju na

zid zavesama skupi, na izbor statičkog sistema i način proračuna treba obratiti posebnu pažnju. Stubići u statičkom smislu mogu biti proste grede ili kontinualni nosači na dva polja i njihova dužina najčešće ne prelazi 8 m. Položaj pokretnih oslonaca može biti različit, pa stubići mogu biti zategnuti ili pritisnuti. Prečke su uglavnom proste grede.

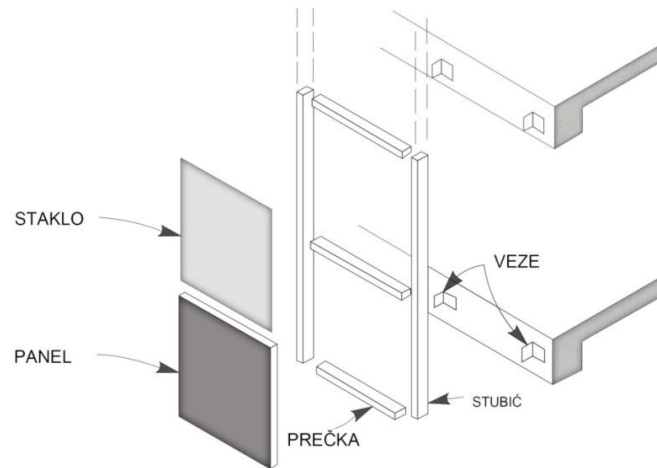


Slika 3.6. Karakteristična veza stubića za međuspratnu konstrukciju (Schueco katalog)

### 3.3 Podela zid zavesa

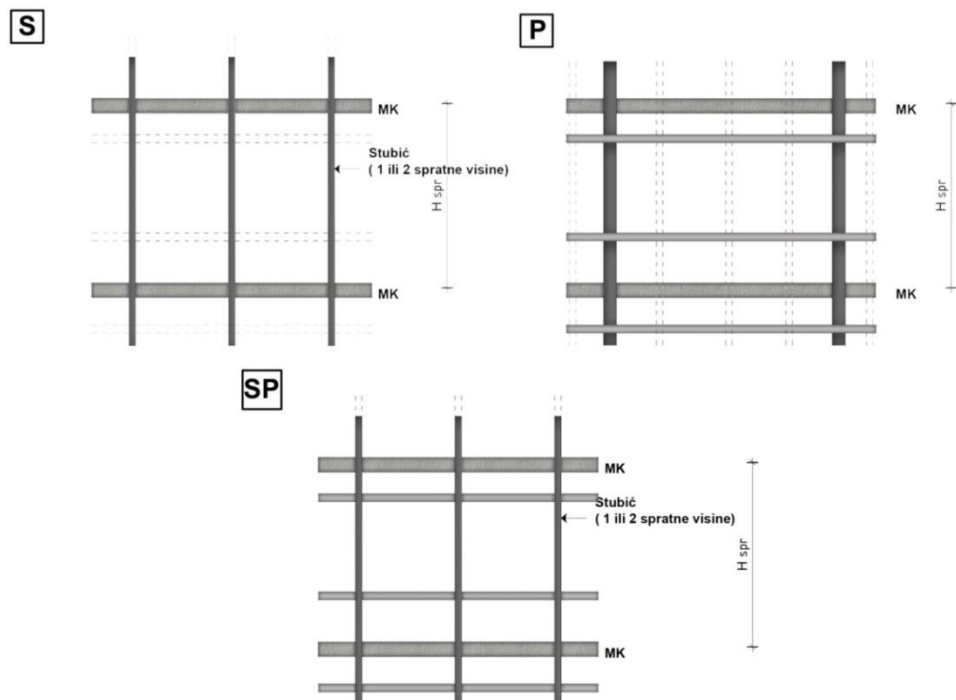
Još jedan od izazova koji prati fasade tipa zid zavese jeste i to da izmiču strogoj klasifikaciji, a razlog ovome leži u činjenici da one obuhvataju čitav spektar materijala koji spajanjem u jednu celinu i formiranjem fasadnog omotača pružaju mogućnost realizacije najrazličitijih arhitektonskih formi. Zid zavese postale su sinonim za laku, sekundarnu konstrukciju čija obloga je najčešće izrađena od lakih materijala.

Klasifikacija zid zavesa se može izvršiti prema konstruktivnom sklopu, načinu montaže, funkciji, materijalima od kojih je izrađena podkonstrukcija, prema tipu stubića, vrsti stakla itd. (Žegarac 1995, Vitomir 2006, Kazmierczak 2010).



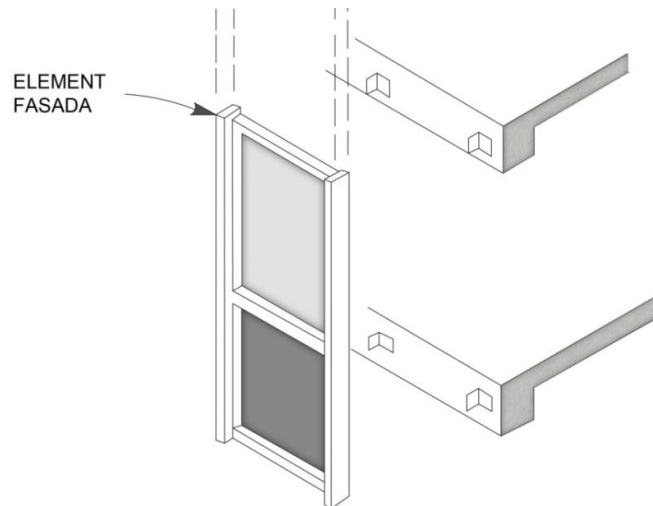
Slika 3.7. Štapasti sistem zid zavesa

Prema **konstruktivnom sklopu** zid zavesa se dele na dve grupe. Prvu grupu čine **štapaste** ili **okvirne** (*stick curtain wall*) zid zavesa kod kojih se stubići (*mullion*) i prečke (*transom*) montiraju posebno (slika 3.7). Razlikujemo tri podtipa ovog sistema a to su štapni sistem sa nosećim stubićem (tip “S”), štapni sistem sa nosećom prečkom (tip “P”) i sistem sa



Slika 3.8. Panelni sistem zid zavesa (element fasada)

sa nosećim stubićem i prečkom (tip “SP”) i grafički su prikazani na slici 3.8. Drugu grupu čine **element fasade** (*unitized*) koje se često mogu naći i pod nazivom **pločaste, panelne** ili **blok** fasade. Element fasade predstavljaju sisteme koji se sastoje od ploča spratne visine, a uobičajene širine od 80 do 180 cm. Rade se u radionicama sa odgovarajućom podkonstrukcijom (slika 3.9). Kombinacijom štapastog i panelnog sistema nastaje **mešovit** konstruktivni sistem i on predstavlja treću grupu ovih fasada.



Slika 3.9. Panelni sistem zid zavese (element fasada)

Prema **načinu montaže** dele se na zid zavese iz **pojediначnih delova** (slojeva) i iz **gotovih panela**.

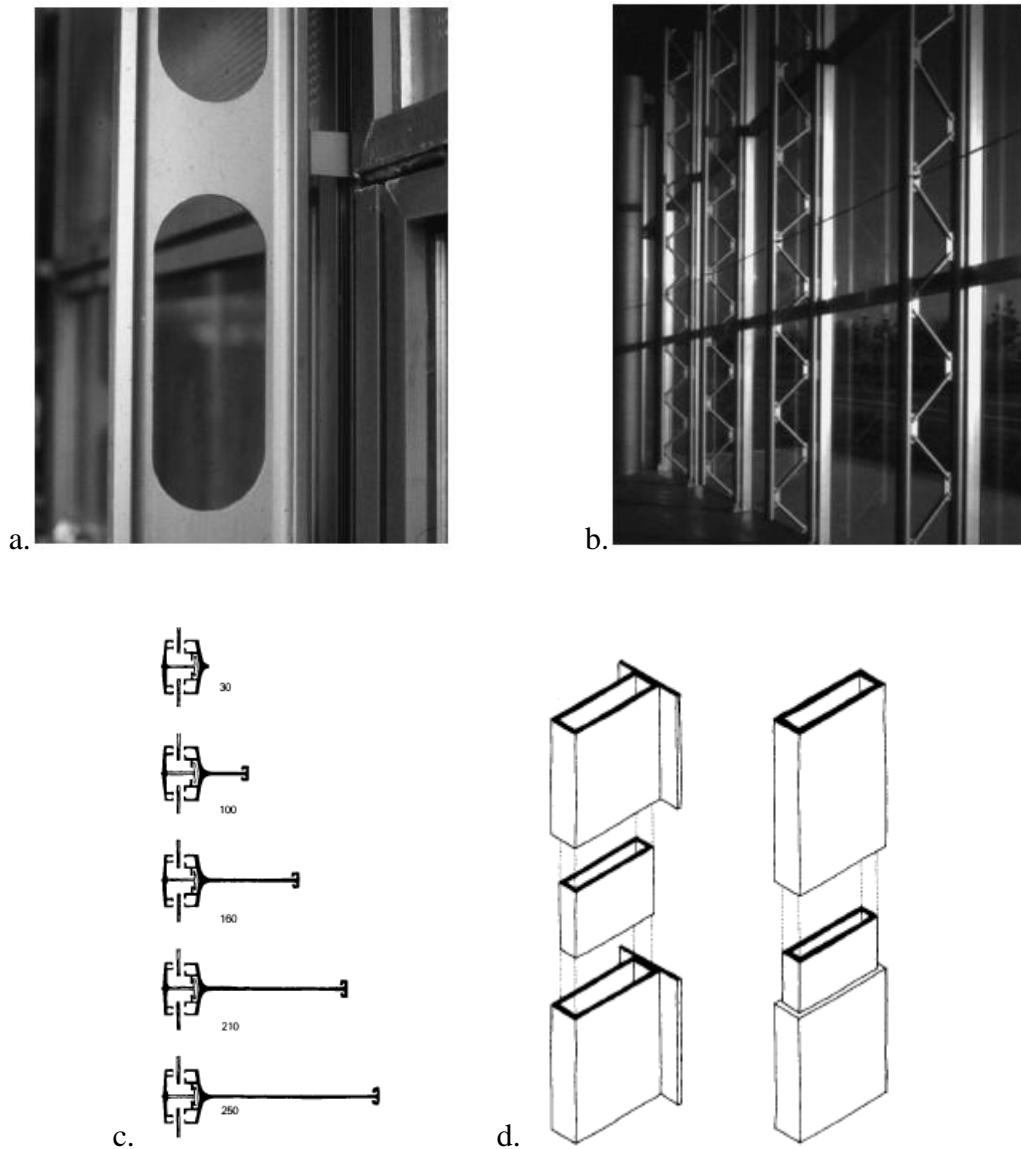
Prema **broju slojeva fasade** dele se na **jednostruke, dvostruke** i **višeslojne**.

Prema **načinu povezivanja stakla**: **klasične** (*standard*), **polustrukturalne** (*semi-structural*), **strukturalne** (*structural*), **tačkasto nošene** (*spider*).

Prema **funkciji** dele se na **otporne na požar** (*fire-rated*), **akustične**, **otporne na udare** (*blast-resistant*) itd.

Prema **materijalu** od kojih su izrađeni stubići, a to može biti **čelik, aluminijum, drvo, staklo**.

Prema **tipu stubića** (*mullion*) dele se na zid zavese sa stubićima (slika 3.10) koji mogu biti: **cevasti profili, dvostruko-simetrični** i **mono-simetrični I profili, rešetke, kablovi, noseći elementi od stakla**, itd.



Slika 3.10. Primeri različitih stubića: olakšani (a), rešetkasti (b), monosimetrični I-presek (c) i cevasti (d) (Brookes 2008)

Prema materijalu za završnu oblogu koji je najčešće **staklo**, ali može biti i **kamen**, **limovi** (aluminijumski, čelični, bakarni), **kompozitni proizvodi** itd.

Postoji i podela prema **tipu stakla** koje se koristi na fasadi a može se koristiti **vučeno**, **termički ojačano**, **kaljeno**, **višeslojno**, **armirano**, **nisko emisiono**, kao i **stakla specijalnih karakteristika**, itd.

### 3.4 Aktuelni standardi

Do pre dvadesetak godina tehnička regulativa vezana za lake fasadne sisteme skoro da nije ni postojala, iako su te konstrukcije uveliko našle primenu na visokim zgradama i komercijalnim objektima. U poslednjih 10 do 20 godina regulativa je dopunjena i unapređena, međutim i dalje postoje nedorečenosti i manjkavosti. Osnovni razlog jeste specifičnost same problematike.

Trenutno važeći standardi koji pokrivaju oblast lakih fasadnih konstrukcija tipa zid zavesa jesu:

*EN 12152 Curtain walling. Air permeability – Performance requirements and classification*

*EN 12153 Curtain walling. Air permeability – Test method*

*EN 12154 Curtain walling. Watertightness – Performance requirements and classification*

*EN 12155 Curtain walling. Watertightness – Laboratory test under static pressure*

*EN 12179 Curtain walling. Resistance to wind load – Test method*

*EN12600 Glass in building. Pendulum test – Impact test method and classification for flat glass*

*EN 13116 Curtain walling. Resistance to wind load – Performance requirements*

*prEN 13119 Curtain walling. Terminology*

*EN 13830 Curtain walling. Product standard.*

*prEN 14019 Curtain walling. Impact resistance – Performance requirements*

*EN 13501 – 1 Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire test*

*EN 13501 – 2 Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire test, excluding ventilation services*

*prEN 13947 Thermal performances of curtain walling – Calculation of thermal transmittance – Simplified method*

*EN ISO 140-3 Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements (ISO 140-3:1995)*

*EN ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:1996).*

### 3.5 Problemi kod fasada tipa zid zavesa

Najčešća oštećenja i problemi (Kazmierczak 2010) koji se javljaju kod fasada tipa zid zavesa jesu:

- kondenzacija i magljenje usled neadekvatno rešenog provođenja toplote,
- blesak odnosno odsjaj usled neadekvatne kontrole svetla,
- prevelika buka usled neadekvatne zaštite od buke,
- propuštanje vode usled neadekvatne zaptivenosti,
- lom stakla usled neadekvatnog izbora, male otpornosti na udar, kao rezultat nesinhronizovanog pomeranja nosećeg sistema objekta i fasadne konstrukcije, itd,
- pad delova fasade usled neadekvatnih veza ili usled oštećenja delova fasade,
- korozija usled neadekvatne zaštite, itd.

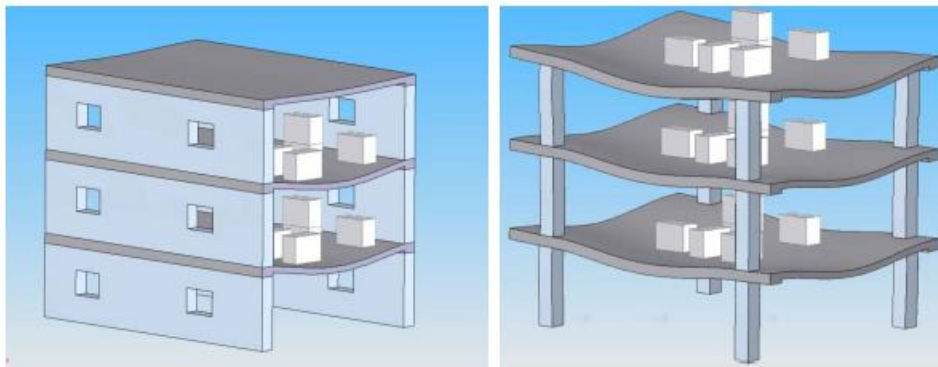
Međutim, pored ovako egzaktno datih problema lako uočljivih korisnicima i stručnjacima treba obratiti pažnju i na određene aspekte date u nastavku a koji su pre svega vezani za uzroke nastanka prethodno navedenih oštećenja, za samo projektovanje i izvođenje zid zavesa kao i interakciju glavne noseće i fasadne konstrukcije. Posledica primene fasada zid zavesa na određenim tipovima objekata jeste i činjenica da je samo jedan deo stručne zajednice upoznat kako sa njihovim projektovanjem i izvođenjem, tako i sa problemima koji prate lake fasadne sisteme tipa zid zavesa.

U najvećem broju slučajeva problemi koji se javljaju na fasadama ovog tipa su direktna posledica neadekvatnog projektovanja, njihovog izvođenja i nekompatibilnosti sa nosećom konstrukcijom objekta. Iako zid zaveses nemaju ulogu kao glavna noseća konstrukcija koja prima sva opterećenja, one imaju zadatak da prime sva opterećenja koja deluju na nju i prenesu ih putem veza na glavnu noseću konstrukciju zgrade. Vetar predstavlja dominantno opterećenje za fasade tipa zid zaveses. Ako zid zaveses nije projektovana na adekvatan način i ako dođe do njenog oštećenja, dolazi do narušavanja fasadne opne i ulazak vetra sa kišom, snegom, ledom ali i letećim delovima krhotina (*flying debris*) u objekat. Na ovaj način dolazi do oštećenja ili pak kompletnog uništavanja unutrašnjosti objekta. Cena koštanja oštećene fasade ali i unutrašnjosti objekta uvećana je i nemogućnošću korišćenja objekta ili dela objekta na određeno vreme. Prvi znaci oštećenja zid zaveses usled dejstva jakih vetrova jesu pre svega oštećenja elemenata za zaptivanje, potom se pojavljuju pukotine u samoj oblozi uz koje može doći do izvlačenja spojnih sredstava koja vezuju zid zaveses za noseće elemente konstrukcije, a konačno može nastupiti rušenje delova fasadnog omotača. Dakle, jedan od osnovnih problema zid zaveses jeste njeno neadekvatno projektovanje za opterećenje vetrom.



Pored savladavanja sila vetra i njihovog prenošenja na glavnu noseću konstrukciju zgrade fasada je izložena pomeranjima i deformacijama glavne noseće konstrukcije i njenih elemenata. Iz ovog razloga fasada mora biti tako projektovana da može da izdrži i pomeranja i deformacije glavne noseće konstrukcije zgrade. Ovo ponekad nije lako ostvariti obzirom na materijale koji se pojavljuju na fasadi zgrade, njihov broj, raznorodnost i karakteristike. Dakle, čest problem fasada tipa zid zavesa jeste nekompatibilnost sa glavnom nosećom konstrukcijom objekta. Čak i kada je zid zavesa dobro projektovana, mora se na adekvatan način izvršiti integracija sa glavnim nosećim sistemom zgrade.

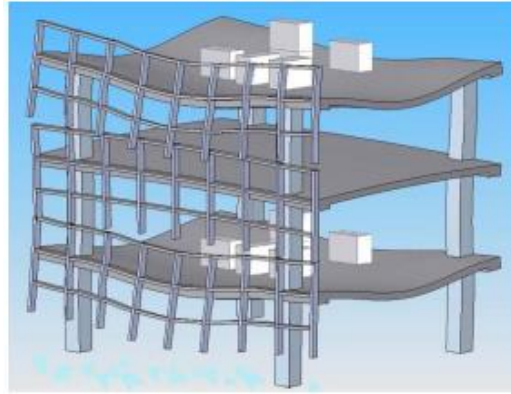
Noseća konstrukcija zid zavesa najčešće je izrađena od čelika, aluminijuma ili drveta, a elementi ispune mogu biti od stakla, metala, raznih vrsta kamena, itd. Formirajući fasadni omotač konstrukcija zid zavesa se vezuje za glavnu noseću konstrukciju objekta koja može biti od čelika, betona ili drveta. Interakcija ova dva sistema koji objedinjuju različite materijale a u svemu moraju da prate jedan drugog, je u dosadašnjoj praksi bila značajno zanemarena u fazi projektovanja. O analizi opterećenja, njihovom prenošenju putem veza sa fasadne konstrukcije na glavnu, relativnim pomeranjima, kao i koordinaciji pomeranja glavnog nosećeg sistema i fasadne obloge mora se voditi računa u najranijim fazama projektovanja. Jedino na taj način rezultat je fasada koja će pored atraktivnosti zadovoljiti i brojne druge funkcije koje su joj poverene. U suprotnom, nažalost, može doći do oštećenja omotača, od toga da on postaje propustan za vodu i vazduh do potpunog otkazivanja (loma) nekog dela fasade. Neka od oštećenja prikazana su u poglavlju 4.2.



Slika 3.11. Masivni i skeletni konstruktivni sistem (Kazmierczak 2010)

U trenutku kada su masivni sistemi zamenjeni skeletnim a masivni fasadni zidovi više nisu bili neophodni, otvorila se mogućnost formiranja transparentne, lake fasade a samim tim i niz novih, arhitektonskih mogućnosti vezanih za novu generaciju omotača objekata. Pojava duktilnih, skeletnih ramova dovela je do povećanja pomeranja (ugiba) same konstrukcije i njenih delova u odnosu na, do tada, poznate masivne sisteme (slika 3.11).

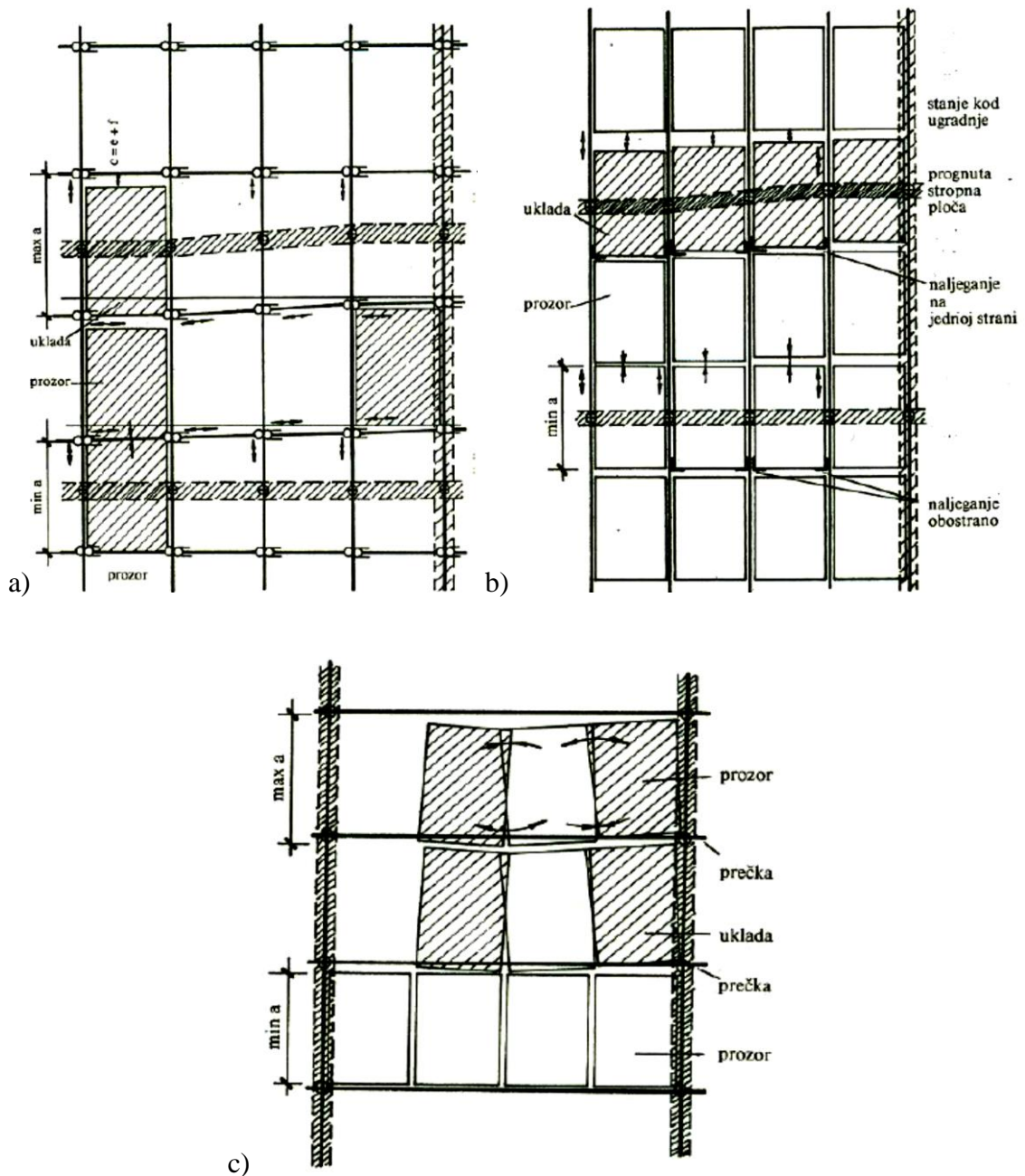




*Slika 3.12. Ponašanje zid zavese usled deformacije glavne noseće konstrukcije (Kazmierczak 2010)*

Pomeranja karakteristična za zid zavese možemo ovde svrstati u tri grupe i to: vertikalna pomeranja, bočna u ravni fasadnog zida i bočna upravna na fasadni zid. Kod savremenih objekata kod kojih je došlo do povećanja raspona između nosećih elemenata za posledicu imamo znatno povećanje ugiba koje fasadna konstrukcija treba da bude u mogućnosti da savlada. Maksimalne vrednosti dopuštenih ugiba u funkciji raspona, date su u brojnim propisima, a preporučene vrednosti su slične.

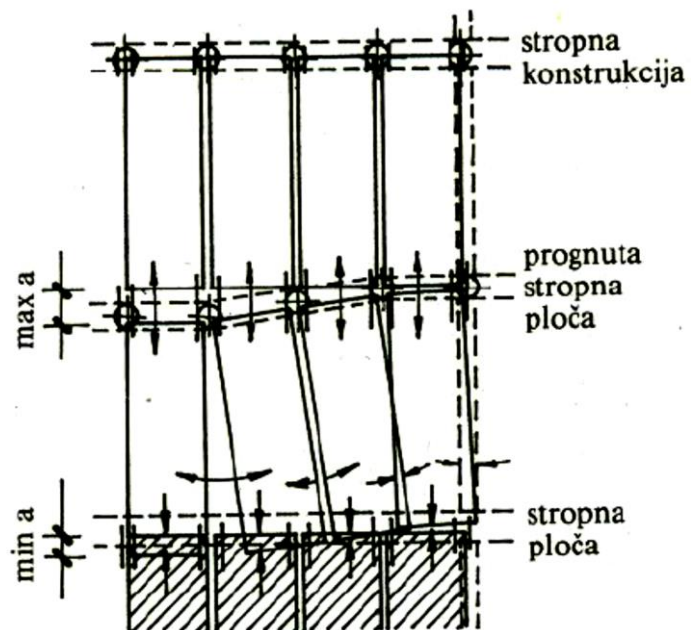
Kada zid zavesa ne može da prati odnosno izdrži pomeranja kojima je izložena glavna noseća konstrukcija objekta (slika 3.12) dolazi do narušavanja integriteta fasade. Oštećenja mogu biti različita i različitog stepena, od oštećenja čisto estetske prirode preko pucanja stakla do loma nosećih elemenata fasade i njihovih veza. Usled bočnih pomeranja koja nastaju kao posledica dejstva horizontalnih sila često dolazi do sudara panela ispunje posebno na uglovima objekta i njihovog oštećenja, loma uglova samih panela ispunje, naprsnuća ali i totalnog kolapsa (slike 3.13 i 3.14). Treba naglasiti da je kod zid zavesa česta ispunja staklo koje spada u krte materijale, koji ne mogu izdržati tako velike ugibe kao glavna noseća konstrukcija, i kod kojih nema najave loma. Posebno su na ova pomeranja osetljivi uglovi objekta gde se spaja samo staklo bez nosećeg profila. Iz ovih razloga, ako pomeranja primarnog nosećeg sistema objekta nisu usklađena sa pomeranjima koje može da izdrži zid zavesa dolazi do oštećenja. Zato bi trebalo da u fazi projektovanja kada su poznata pomeranja glavnog nosećeg sistema objekta, sledeći korak bude analiza pomeranja zid zavesa usled svih uticaja kojima je ona izložena. Adekvatne veze su ključ za savladavanje pomeranja kojima je izložena zgrada kao i za integritet (celovitost) celokupnog objekta.



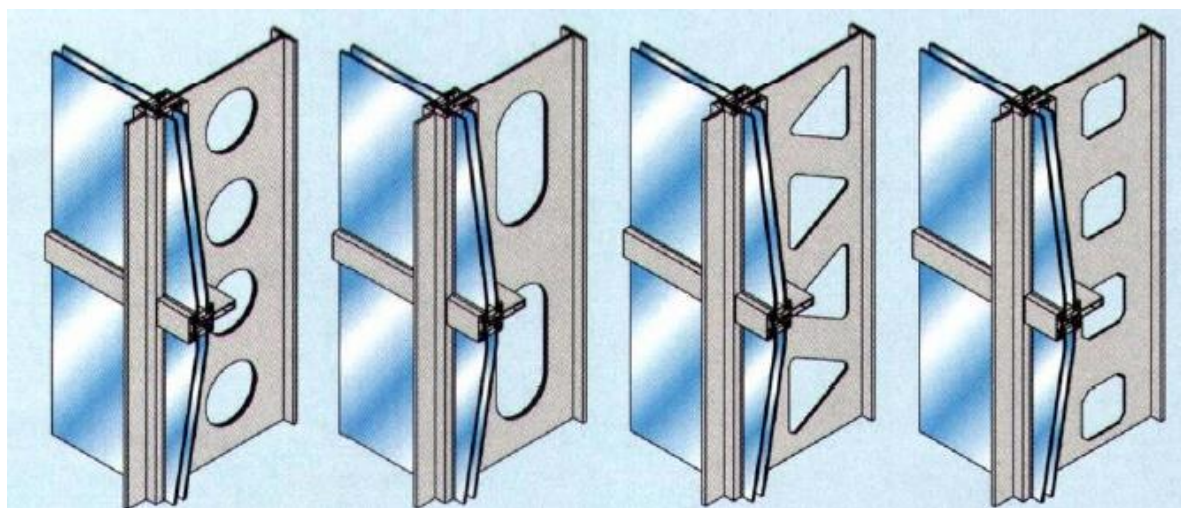
Slika 3.13. Uticaj ugiba međuspratne konstrukcije kod zid zavese tipa SP (a), tipa S (b), tipa P (c) (Radac 1988)

Već je naglašeno da noseći elementi zid zavese, stubići i prečke predstavljaju veoma raznorodnu grupu kada se govori o obliku poprečnog preseka. Kod svih oblika poprečnih preseka može doći do lokalnog izvijanja nekog dela preseka. Međutim, grupu karakterističnih poprečnih preseka za ovaj tip fasada čine dvostruko-simetrični i mono-simetrični I poprečni preseci. Oni mogu biti kako puni tako i oslabljeni, sa otvorima na rebu različitog oblika (kružni, elipsasti, kvadratni, trougaoni...) i neki od njih prikazani su na slici 3.15. Kod ovih preseka, kada se javljaju kao elementi zid zavesa, visina preseka je često znatno veća od širine nožice. Obzirom da je opterećenje jednako podeljeno i u pravcu rebra, pored lokalnog savijanja delova preseka i mogućeg izvijanja ako je element izložen pritisku, treba voditi računa i o potencijalnoj pojavi bočno-torzionog izvijanja stubića. Najveći rizik za pojavu

bočno-torzionog izvijanja javlja se kod greda sa malom torzionom krutošću i malom krutošću na savijanje oko slabije ose preseka (vidi slike 3.5, 3.10 i 3.15).



Slika 3.14. Uticaj ugiba međuspratne konstrukcije kod element fasada (Radas 1988)



Slika 3.15. Klasična zid zavesa sa stubićima od čeličnih I profila

### 3.6 Dopuštena pomeranja

Maksimalni ugib prečki se razlikuje zavisno od propisa ili preporuka i u nastavku će biti prikazani neki od njih:

- po kanadskim preporukama (*Glass and metal curtain walls – Best practice guide 2004*):

- maksimalni ugib upravno na ravan fasade:

$$f_{max} = \min \left\{ \frac{l}{175}; 19 \text{ mm} \right\} \quad (3.4)$$

- maksimalni ugib u ravni fasade:

$$f_{max} = \min \left\{ 3 \text{ mm}; \frac{1}{4} \text{ rastojanja od stakla do profila} \right\} \quad (3.5)$$

- po preporukama proizvođača “Schueco”:

- maksimalni ugib upravno na ravan fasade:

$$f_{max} = \min \left\{ \frac{l}{200}; 15 \text{ mm} \right\} \quad (3.6)$$

- maksimalni ugib u ravni fasade:

$$f_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ mm} \\ \frac{l}{500} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

Maksimalna vrednost ugiba staklenog panela (*International Building Code 2006*):

$$f_{max} = \frac{L}{50} \quad (3.8)$$

gde je L kraća strana staklenog panela.

Maksimalno relativno pomeranje između susednih spratova različito je definisano u različitim propisima ali se najčešće preporučuje da ono ne bude veće od

$$f_{max} = \frac{H_{sp}}{500} \quad (3.9)$$

## 4 Dejstvo vetra na zgrade

*“Tokom mnogih vekova u prošlosti gledalo se na uticaj vetra na konstrukcije kao na dejstvo natprirodnog božanstva.”*

*Peter Sachs, 1986.*

Proučavanje dejstva vetra na konstrukcije pa samim tim i zgrade spada u multidisciplinarnu oblast koja objedinjuje poznavanje više oblasti i to pre svega mehanike fluida (*fluid mechanics*), dinamike konstrukcija (*structural dynamics*), aeroelastičnosti (*aeroelasticity*), statistike (*statistics*) ali i meteorologije (*meteorology*), testiranje u tunelima za vetar (*wind tunnel testing*), proračunske ili numeričke dinamike fluida (*computational fluid dynamics, CFD*).

Standardom SRPS U.C7.110 vetar je bio definisan:

- u meteorološkom smislu kao horizontalno ili približno horizontalno vazdušno strujanje;
- u smislu mehanike fluida kao turbulentno vazdušno strujanje;
- kao opterećenje i to dinamičko opterećenje slučajnog karaktera;
- u matematičkom smislu kao stacionaran, slučajan proces;

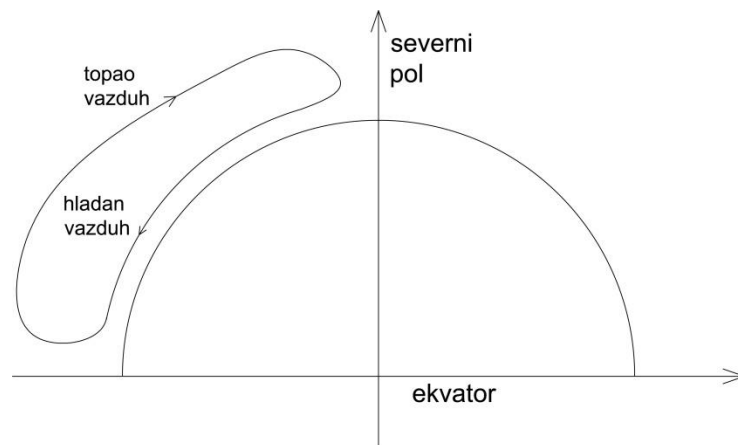
Razvojem savremenih materijala koji primenu nalaze u građevinarstvu pojavile su se konstrukcije izuzetnih visina, lakše, fleksibilnije a pri tom sa nižim prigušenjem. Ovakve konstrukcije

su znatno osetljivije na dejstvo vetra što je rezultovalo potrebom za preciznijom procenom efekata dejstva vetra na zgrade.

#### **4.1 Priroda vetra**

Sa stanovišta građevinskih inženjera, proučavanje dešavanja u atmosferi koja su od značaja za objekte i njihove korisnike, vrše se u troposferi koja predstavlja najniži i najgušći deo Zemljine atmosfere. Ona je različite debljine i na našim geografskim širinama njena debljina iznosi od 9 do 11 kilometara.

Osnovni uzrok nastajanja vetra jesu temperaturne razlike susednih vazdušnih masa koje dovode do razlike u pritiscima istih vazdušnih masa. Glavni izvor zagrevanja vazduha u atmosferi jeste Sunce dok Mesec, zvezde i Zemljino jezgro imaju neznatan uticaj. Količina toplote koja će stići do zemljine površine zavisi od mnogo faktora: propustljivosti vazduha, njegove provodljivosti toplote, atmosferskog zračenja, visine Sunca iznad horizonta, refleksije, itd. Temperatura vazduha u određenoj tački troposfere zavisi od tokova zagrevanja i hlađenja velikih vodenih površina (mora i okeana) i velikih kopnenih površina. Ovi pak tokovi uslovljeni su geografskom širinom, nadmorskom visinom, osobinama i bojom zemljišta i brojnim drugim faktorima.

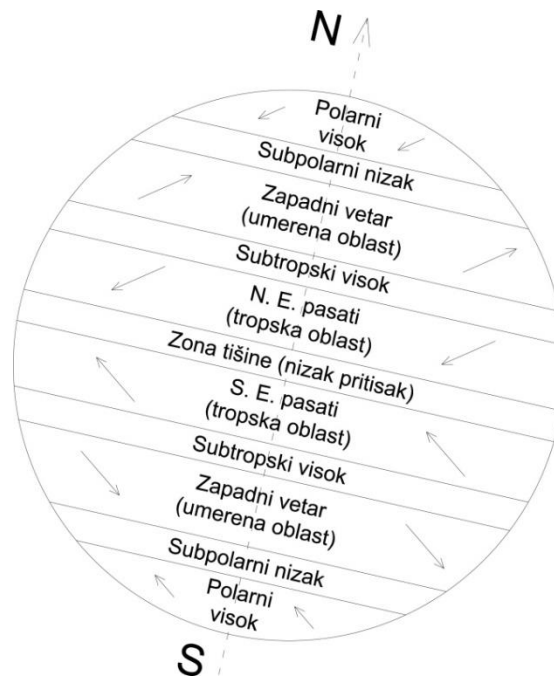


*Slika 4.1. Pojednostavljen model cirkulacije u atmosferi.*

Vazдушna strujanja zavisno od površine koju zauzimaju mogu se definisati kao opšta i lokalna cirkulacija vazduha u atmosferi. U opštu cirkulaciju spadaju stalni vetrovi koji su rezultat konstantnog (stalnog, trajnog) strujanja vazduha usled značajne razlike u temperaturi između vazduha na ekvatoru i polovima (slika 4.1). U stalne vetrove spadaju pasati i antipasati, zapadni kao i polarni vetrovi. Lokalna cirkulacija vazduha u atmosferi jeste posledica naizmeničnog zagrevanja i hlađenja većih vodenih i kopnenih površina i na ovaj način nastaju tzv. periodični vetrovi. Za njih je karakteristično da periodično menjaju smer strujanja. Zavisno od trajanja perioda dele se na dnevne (dolinski i gorski



vetar, vetar s kopna i vetar s mora) i godišnje (monsuni). Na slici 4.2 data je opšta slika vetrova i pritisaka. Oko ekvatora je oblast bez ili sa vrlo malo vetrova i često se još naziva zonom tišine. Slabi i promenljivi vetrovi takođe su karakteristični za subtropske pojaseve gde vlada visok vazdušni pritisak. Između zone tišine sa niskim vazdušnim pritiskom i subtropskih pojaseva sa visokim vazdušnim pritiskom nalaze se oblasti pasatskih vetrova koji imaju stalni karakter a brzine su im male ili srednje. Za subpolarnu oblast niskog vazdušnog pritiska i oblast zapadnih vetrova karakteristične su česte promene vremena usled susreta toplih i hladnih vazdušnih struja.

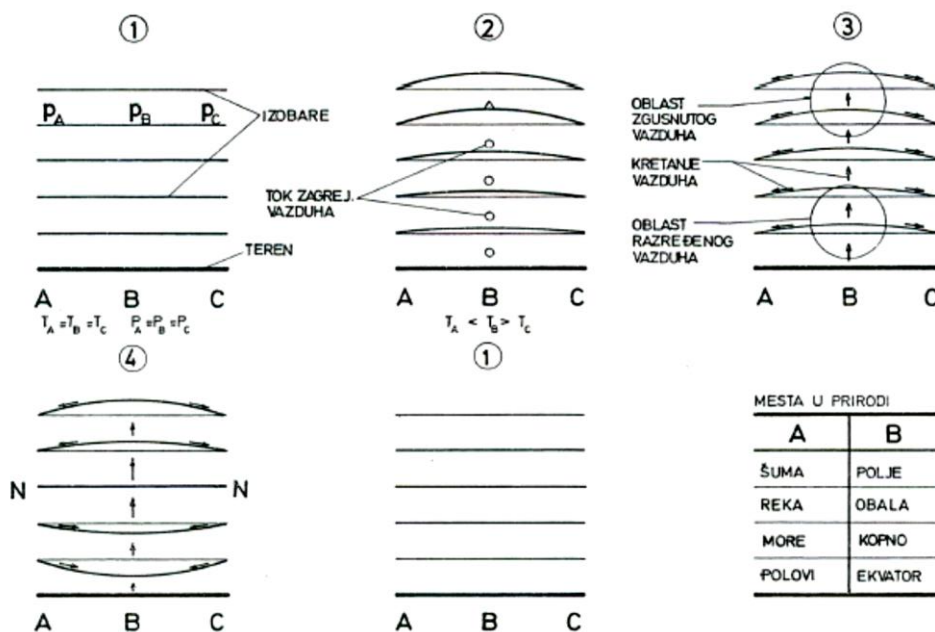


*Slika 4.2. Opšta raspodela pritisaka i vetrova na površini Zemlje.*

Kao što je već rečeno osnovni uzrok nastanka vetra jeste razlika vazdušnih pritisaka usled razlike temperatura susednih vazdušnih masa. Na promenu vazdušnog pritiska utiče još i geografska širina i godišnje doba. Polja pritisaka se u literaturi najčešće predstavljaju izobarama – horizontalnim, krivim linijama koje spajaju tačke istih pritisaka. Na slici 4.3 (Milosavljević, 1983) i u narednom tekstu prikazani su osnovni stadijumi nastanka i formiranja vazdušnih strujanja.

Posmatramo tri tačke na zemljinoj površini A, B i C. U prvoj (1) fazi izobare su horizontalne usled ujednačenih temperatura u sve tri posmatrane tačke i kažemo da vlada stanje ravnoteže. U fazi 2 dolazi do intenzivnijeg zagrevanja mesta B što dovodi do širenja zagrejanog vazduha i to u vertikalnom pravcu. Ovo za posledicu ima izdizanje izobarskih površi iznad B i “slivanje” vazdušnih masa prema A i C (faza 3) usled zgušnjavanja vazduha iznad tačke B. “Slivanjem” vazdušnih masa iznad A i C povećava se pritisak iznad njih a usled konstantnog zagrevanja iznad B uspostavlja se vertikalno, uzlazno vazdušno strujanje. Vazdušni pritisak se iznad tačke B sada smanjuje zbog stalnog razređivanja

i uspostavljaju se i konkavni oblici izobarskih površi (faza 4) uz dalje slivanje prema A i C. Između konveksnih i konkavnih izobarskih površina nalazi se “neutralni sloj” N-N, ravna i horizontalna površina. Proces se nastavlja do konačnog izjednačavanja vazdušnih pritisaka na svim visinama. Trajanje ciklusa 1-2-3-4-1 može biti kako kratkotrajan proces tako i stalan zavisno od dotoka toplote u B. Na slici 4.3 horizontalne i približno horizontalne vazdušne struje predstavljaju vetar, vertikalne se nazivaju i konvektivnim a zajedno čine kružni tok tzv. termičku turbulenciju.



Slika 4.3. Šematski prikaz formiranja vetra u atmosferskom graničnom sloju (Milosavljević, 1983).

Od velikog značaja prilikom proučavanja strujanja u atmosferi jeste i beleženje brzine vetra i njegovog pravca. Uređaji kojima se brzina vetra meri nazivaju se anemometri a beleži se anemografima. Ovi uređaji su se kroz vreme razvijali i usavršavali. Merenjem i beleženjem podataka nastale su i skale za izražavanje brzine vetra. Jedna od najpoznatijih jeste Boforova (*Beaufort*) skala. U tabeli 4.1 prikazana je Boforova skala sa brzinama vetra na 10 metara iznad površine terena. Date su osrednjene vrednosti sa vremenom osrednjavanja  $t = 1 \text{ min}$  i  $t = 1 \text{ h}$  koje je dao *Siedenburg* (Siedenburg 1974). U tabeli je takođe dat i aerodinamički pritisak vetra pri vremenu osrednjavanja od 1 h. U tabeli 4.2 date su paralelno tri skale za brzine vetra, prethodno opisana Boforova (*Beaufort*) skala, potom Safir–Simpsonova (*Saffir-Simpson*) i skala *Fujita*, radi lakšeg poređenja.

Treba dodati i da pri proučavanju vetra posebnu pažnju treba posvetiti terenu, odnosno reljefu. Hrapavost površine tla utiče na strujanje vazduha neposredno iznad terena usled trenja koje se javlja. Brzina vazduha na samoj površini tla jednaka je nuli a sile trenja su maksimalne.



Tabela 4.1. Brzine vetra po Boforovoj skali merene na 10 metara iznad površine terena (Bojović, 1993)

Jačina vetra po Boforu	Karakteristike pri duvanju vetra	Dejstvo vetra na izvesnim predmetima na kopnu, i jezerima u unutrašnjosti	Brzina vetra pri osrednjavanju od <sup>1)</sup> t=		Osrednjeni aerodinamički pritisak vetra pri <sup>2)</sup> t=1h
			1 min	1h	
			m/s		kN/m <sup>2</sup>
0	Tišina (kalma)	Potpuno tiho, dim se diže uspravno	(0,0) 0,0-0,3	0,0-0,2	0
1	Vetrić	Pravac vetra se primećuje po kretanju dima ali ne i po vetrokazu	(0,9) 0,3-1,5	(0,7) 0,2-1,2	0
2	Vrlo slab vetar	Oseća se na licu, lišće šušti, okreće laku zastavu, pomera običan vetrokaz, zatalasa površinu stajaće vode	(2,4) 1,5-3,3	(1,9) 1,2-2,6	0
3	Slab vetar	Lišće i grančice u neprekidnom kretanju, razvija zastavu, stvara manje talase na stajaćoj vodi...	(4,4) 3,3-5,4	(3,5) 2,6-4,3	0,01
4	Umeren vetar	Podiže prašinu i parčice hartije sa zemlje, pokreće grane i grančice, stvara izrazite talase na stajaćoj vodi...	(6,7) 5,4-7,9	(5,3) 4,3-6,2	0,02
5	Umereno jak vetar	Manje lisnato drveće počinje da se klati, pokreće zastave, baca talase na stajaćim vodama...	(9,3) 7,9-10,7	(7,3) 6,2-8,4	0,03
6	Jak vetar	Pokreće velike grane, telegrafske žice zuje, čuju se šumovi...	(12,3) 10,7-13,8	(9,9) 8,4-10,9	0,06
7	Vrlo jak vetar	Ljujaju se cela stabla, kretanje u smeru nasuprot vetru je otežano, na stajaćim vodama baca velike zapenušane talase...	(15,5) 13,8-17,1	(12,2) 10,9-13,5	0,09
8	Olujni vetar	Lome se grane na drveću, znatno otežava hod na slobodnom prostoru...	(18,9) 17,1-20,7	(14,9) 13,5-16,3	0,14
9	Oluja	Prouzrokuje manje kvarove na kućama, ruše se dimnjaci i padaju crepovi...	(22,6) 20,7-24,4	(17,8) 16,3-19,2	0,19
10	Jaka oluja	Lomi drveće ili ga čupa sa korenem, pričinjava znatne štete na zgradama...	(26,4) 24,4-28,4	(20,8) 19,2-22,4	0,26
11	Oluja slična orkanu	Prouzrokuje velika oštećenja, ruši krovove zgrada...	(30,5) 28,4-32,6	(24,1) 22,4-25,7	0,36
12	Orkan	Ima uništavajuće dejstvo...	(34,8) 32,6-36,9	(27,4) 25,7-29,1	0,46

1) Vrednosti brzina u zagradi su srednje vrednosti za odgovarajući opseg i preporučene rezolucijom Međunarodnog meteorološkog komiteta iz 1946.

2) Za srednje brzine u pojedinim opsezima skale Bofora

Kako sile trenja opadaju sa visinom tako brzina vetra raste. Niži slojevi vazduha utiču na usporavanje slojeva iznad sve do visine gde se više ne oseća uticaj trenja, odnosno gde su sile usporavanja vetra jednake nuli. Ova visina naziva se gradijentnom visinom, a brzina vetra na toj visini gradijentnom brzinom vetra. Iznad gradijentne visine hrapavost terena ne utiče na promenu brzine vetra. Kada će brzina vetra dostići gradijentnu vrednost zavisi od hrapavosti podloge i očigledno je da kod hrapavijih terena dolazi kasnije do dostizanja ove vrednosti.

Tabela 4.2. Boforova, Safir-Simpsonova i skala Fujita – opis vetra, srednja brzina vetra na 10 m visine, odgovarajući pritisak vetra (Stathopoulos i Baniotopoulos 2007).

Windstorm : Scales and Effects										
Bft	Descriptive term	Beaufort Scale				Saffir-Simpson Hurricane Scale				
		Mean wind speed at 10 m above surface			Wind pressure	SS	Descriptive term	Mean wind speed		
		m/s	Km/h	knots	Kg/m <sup>2</sup>			m/s	Km/h	knots
0	Calm	0-0.2	0-1	0-1	0	1	Weak	32.7-42.6	118-153	64-82
1	Light air	0.3-1.5	1-5	1-3	0-0.1	2	Moderate	42.7-49.5	154-177	83-96
2	Light breeze	1.6-3.3	6-11	4-6	2.0-0.6	3	Strong	49.6-58.5	178-209	97-113
3	Gentle breeze	3.4-5.4	12-19	7-10	0.7-1.8	4	Very strong	58.6-69.4	210-249	114-134
4	Moderate breeze	5.5-7.9	20-28	11-15	1.9-3.9	5	Devastating	≥ 69.5	≥ 250	≥ 135
5	Fresh breeze	8.0-10.7	29-38	16-21	4.0-7.2	Fujita Tornado Scale				
6	Strong breeze	10.8-13.8	39-49	22-27	7.3-11.9	F	Descriptive term	m/s	Km/h	Knots
7	Near gale	13.9-17.1	50-61	28-33	12.0-18.3	0	Weak	17.2-32.6	62-117	34-63
8	Gale	17.2-20.7	62-74	34-40	18.4-26.8	1	Moderate	32.7-50.1	118-180	64-97
9	Strong gale	20.8-24.4	75-88	41-47	26.9-37.3	2	Strong	50.2-70.2	181-253	98-136
10	Storm	24.5-28.4	89-102	48-55	37.4-50.5	3	Devastating	70.3-92.1	254-332	137-179
11	Violent storm	28.5-32.6	103-117	56-63	50.6-66.5	4	Annihilating	92.2-116.2	333-418	180-226
12	Hurricane	> 32.7	> 118	> 64	> 66.6	5	Disaster	116.3-136.9	419-493	227-266

Dakle, gradijentna visina je veća što je teren hrapaviji. U tabeli 4.3 dati su parametri hrapavosti terena,  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $z_0$  i odgovarajuće vrednosti gradijentnih visina,  $z_G$  po standardu SRPS U.C7.110 (SRPS U.C7.110, 1992). Nešto preciznija klasifikacija hrapavosti terena po Davenportu (Davenport i dr. 2000) prikazana je u tabeli 4.4 gde su pored  $z_0$  i  $\alpha$  date i gradijentne visine,  $z_G$  koje su date u Pravilniku koji je donelo Američko udruženje građevinskih inženjera, ASCE (ASCE 1999). Dakle, obzirom da se brzina vetra menja po visini usled uticaja hrapavosti terena, slaganjem intenziteta vektora brzina od tla do željene visine formira se tzv. **profil vetra** koji se najčešće u literaturi obeležava sa  $v(z)$ . Na slici 4.4 prikazani su različiti profili vetra za karakteristične terene kao što su velike vodene površine, tlo sa niskim rastinjem, predeo sa niskim objektima i veliki gradski centri sa čestim, visokim objektima. Sloj vazduha od tla do visine gde hrapavost terena ima uticaja na brzinu kretanja vazduha, tj. do gradijentne visine, naziva se **atmosferskim graničnim slojem** (AGS).

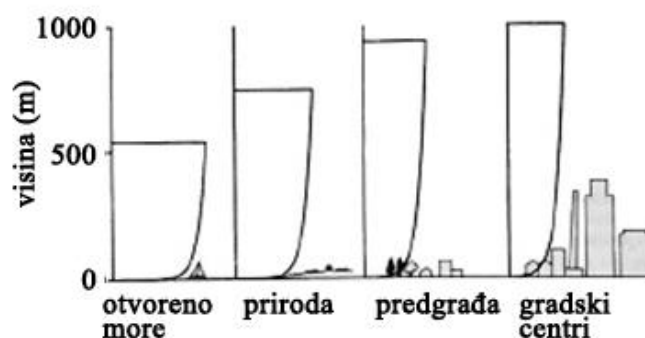
Tabela 4.3 – Pregled faktora hrapavosti terena i gradijentnih visina (preuzeta iz SRPS U.C7.110)

	Klasa hrapavosti terena		Parametri hrapavosti terena				Gradijentna visina
	Opis	Oznaka	a	B	$\alpha$	$z_0$	$z_G$
		-	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	Velike vodene mirne i uzburkane površine (mora, jezera)	A	0,021	1,4	0,11	0,003	180
2	Otvoreni, ravni tereni sa retkim pojedinačnim preprekama	B	0,030	1,0	0,14	0,03	320
3	Šumoviti tereni, industrijske zone, urbani kompleksi, gradovi	C	0,041	0,5	0,22	0,3	440

Tabela 4.4 – Klasifikacija hrapavosti terena i odgovarajuće gradijentne visine (Davenport, 2000)

Red. broj	Klasa hrapavosti	$z_0$	$\alpha$	G
		[m]	[-]	[m]
1.	Otvoreno more (sea)	0.0002	0.09	213
2.	Glatke, ravne površine (smooth)	0.005	0.125	213
3.	OC	0.03	0.15	274
4.	Ravni, otvoreni tereni (roughly open)	0.1	0.2	274
5.	Predgrada (suburban, rough)	0.25	0.25	366
6.	Vrlo hrapavi tereni (very rough)	0.5	0.3	366
7.	Urbani tereni (urban, closed)	1	0.33	366

Vazduh koji prilikom kretanja nailazi na prepreke, prirodne kao elemente reljefa ili pak one koje je stvorio čovek kao što su zgrade, menja svoju brzinu i dolazi do stvaranja vrtloga. Ovi vrtlozi se transportuju na velike daljine i pri tom dolazi do njihovog superponiranja sa osrednjenim strujanjem vazduha ali i sa drugim vrtlozima. Na ovaj način dolazimo do definicije vetra kao turbulentnog kretanja vazduha, odnosno na definiciju vetra karakterističnu za mehaniku fluida.

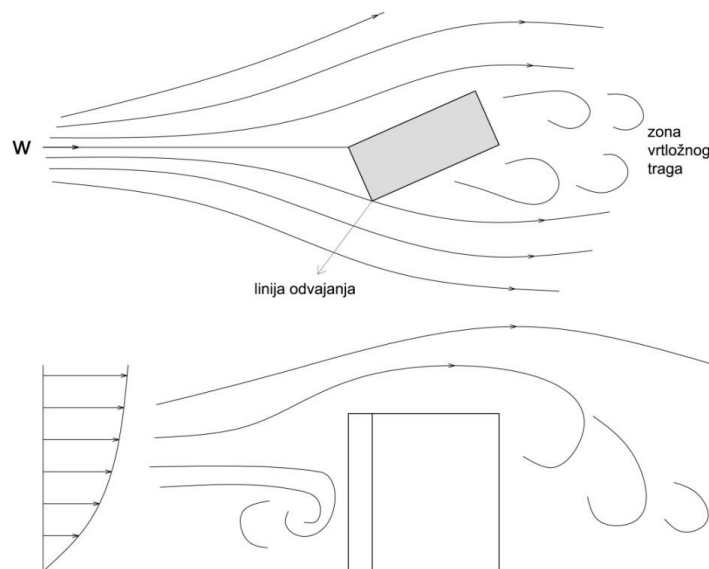


Slika 4.4. Različiti profili vetra zavisno od tipa i hrapavosti terena

Kod ravnomernog strujanja vazduha čija je brzina  $v$  a pritisak koji pri tom nastaje  $P$ , važi Bernulijeva jednačina čiji je izraz za horizontalna strujanja dat jednačinom (4.1):

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{const.} \quad (4.1)$$

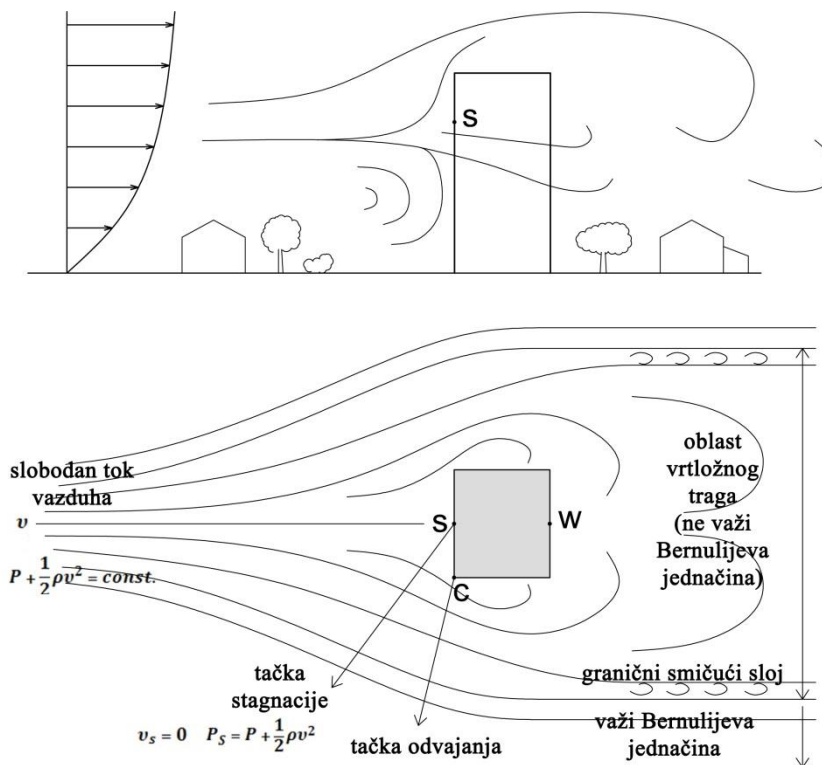
gde je  $\rho$  predstavljena gustina vazduha a ceo drugi član jednačine (4.1) naziva se dinamičkim (zaustavnim) pritiskom. Ova jednačina važi za idealne uslove odnosno za neviskoznan, ravnomeran tok bez turbulencija, pa se ne može primeniti na strujanje vazduha oko zgrade. Kada ravnomerni vazdušni tok naiđe na prepreku kao što je zgrada dolazi do odvajanja toka usled dodira sa preprekom i usled oštih ivica prepreke odnosno zgrade. Na slici 4.5 prikazano je tipično strujanje vetra oko visoke, izolovane zgrade, u osnovi i preseku, u atmosferskom graničnom sloju.



Slika 4.5. Strujanje vetra oko visoke zgrade, osnova i bočni izgled

Obzirom na hrapavost terena brzina vetra raste sa povećanjem visine. Usled dodira sa preprekom odnosno direktno napadnutom fasadom objekta dolazi do odvajanja toka tako da jedan deo struji nadole, prema tlu niz navetrenu (prednju) fasadu. Ispred zgrade u dnu se formira vrtlog sa velikim brzinama. Drugi deo strujnog toka kreće se vertikalno ka krovu zgrade a tačka gde dolazi do odvajanja naziva se tačkom stagnacije (tačka S) i obično se nalazi na visini od 0.7 do 0.8 H, gde je H visina zgrade (slika 4.6). Osim ovog odvajanja toka u vertikalnoj ravni dolazi do odvajanja i u horizontalnoj ravni odnosno kada vazdušni tok naiđe na uglove zgrade (tačka C) formira se spoljašnji tok gde nema viskoznosti pa samim tim u tom delu toka važi Bernulijeva jednačina i unutrašnji tok koji se često naziva i oblast vrtložnog traga (*wake region*). Između spoljašnjeg i unutrašnjeg toka nalazi se uzana zona jake (izražene) vrtložnosti i naziva se smičućim slojem (*shear layer*). U oblasti vrtložnog traga

usled postojanja vrtloga i njihovog kako pojedinačnog tako i uzajamno superponiranog delovanja, ne važi Bernulijeva jednačina. Grafički prikaz prethodno opisanog ponašanja vetra nailaskom na prepreku dato je na slici 4.6 i slici 4.7. Da bi strujanje vazduha odnosno vetar posle nailaska na prepreku ponovo prešao u ravnomerno strujanje potrebno je da pređe određenu putanju.



Slika 4.6. Strujanje vetra oko visoke zgrade- tačka stagnacije, tačka odvajanja, oblast vrtložnog traga

Često se umesto pritiska koristi bezdimenzionalni koeficijent pritiska,  $C_p$  koji je nezavistan od brzina vazdušnog strujanja i dat jednačinom (4.2):

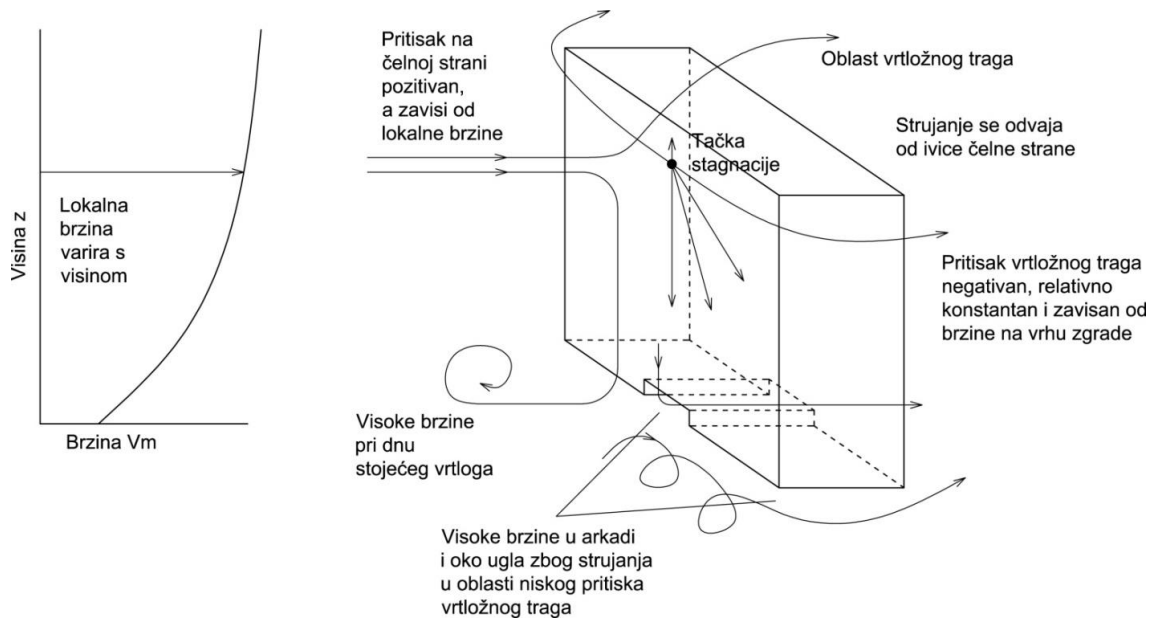
$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad [-] \quad (4.2)$$

gde je:

$\Delta P$  – pritisak nastao usled dejstva vetra i može biti ispod ili iznad atmosferskog pritiska.

Jednačinu (4.2) takođe možemo napisati u obliku:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} = \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right] \quad [-] \quad (4.3)$$

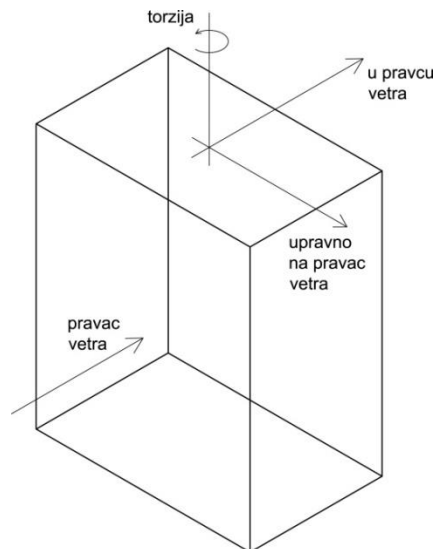


Slika 4.7. Efekti strujanja vetra oko visoke zgrade sa arkadom.

Iz jednačine (4.3) možemo zaključiti da koeficijent pritiska,  $C_p$  može dostići maksimalnu vrednost +1,0 u tački stagnacije,  $S$  gde je  $v_s=0$ . Dakle, pozitivne vrednosti koeficijenta pritiska dobijaju se na strani zgrade koja je direktno izložena vetru. Koeficijent pritiska,  $C_p$  pak ima vrednost 0 na delu slobodnog vazdušnog toka gde je  $v=v_0$ , a  $v_0$  predstavlja brzinu slobodnog, ravnomernog vazdušnog toka. Negativne vrednosti koeficijenta  $C_p$  dobijaju se kada je  $v>v_0$  i karakteristične su za zadnju i bočne strane objekta, ali i krov. Iako u oblasti vrtložnog traga iza objekta ne važi Bernulijeva jednačina iz prethodno navedenih razloga, koeficijenti pritiska se takođe mogu izraziti u bezdimenzionalnom obliku:

$$C_p = \frac{P_w - P_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad [-] \quad (4.4)$$

Iz prethodnog se može zaključiti da je veliki broj faktora koji utiču na nastanak vetra i da on predstavlja kompleksno opterećenje. Usled nailaska na prepreke dolazi do remećenja ravnomernog toka strujanja vazduha, odvajanja toka, formiranja vrtloga i vrtložnog traga iza prepreke. Kao rezultat ovakvog ponašanja vetra noseći sistem zgrade može biti izložen značajnom aerodinamičkom opterećenju, a sam fasadni omotač je izložen jakim lokalnim fluktuirajućim silama. Usled sveukupnog dejstva ovih sila zgrada se može kretati u dva ortogonalna pravca, u pravcu vetra (*along wind*) i upravno na pravac dejstva vetra (*cross-wind*) ali i biti izložena torzionom modu kao što je prikazano na slici 4.8. Amplitude ovih oscilacija zavise od prirode aerodinamičkih sila i dinamičkih karakteristika zgrade.



Slika 4.8. Ponašanje zgrade usled dejstva vetra

Pregledom literature, brojnih radova gde su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja i standarda, mogu se uočiti neke zajedničke karakteristike raspodele pritisaka na fasade objekta usled dejstva vetra u atmosferskom graničnom sloju:

- pritisci na navetrenoj strani odnosno fasadi direktno izloženoj vetru su pozitivni i opadaju rapidno prema bočnim stranama i krovu;
- na navetrenoj strani pritisci opadaju kako se ide prema dnu fasade (odnosno kako brzina opada u atmosferskom graničnom sloju);
- brzina blizu tla u dnu navetrene fasade može biti znatna i ne treba je zanemarivati;
- pritisci na zavetrenoj fasadi su negativni i njihova apsolutna vrednost opada prema dnu fasade;
- pritisci na bočnim stranama i krovu su uglavnom negativni sa izraženim lokalizovanim sišućim dejstvom (uglovi, nadstrešnice...);
- razlika pritisaka između navetrene i zavetrene fasade i to u njihovom dnu može izazvati horizontalni tok kroz prolaze, arkade ili na uglovima zgrade koje je teško kontrolisati, posebno kod izrazito visokih zgrada.



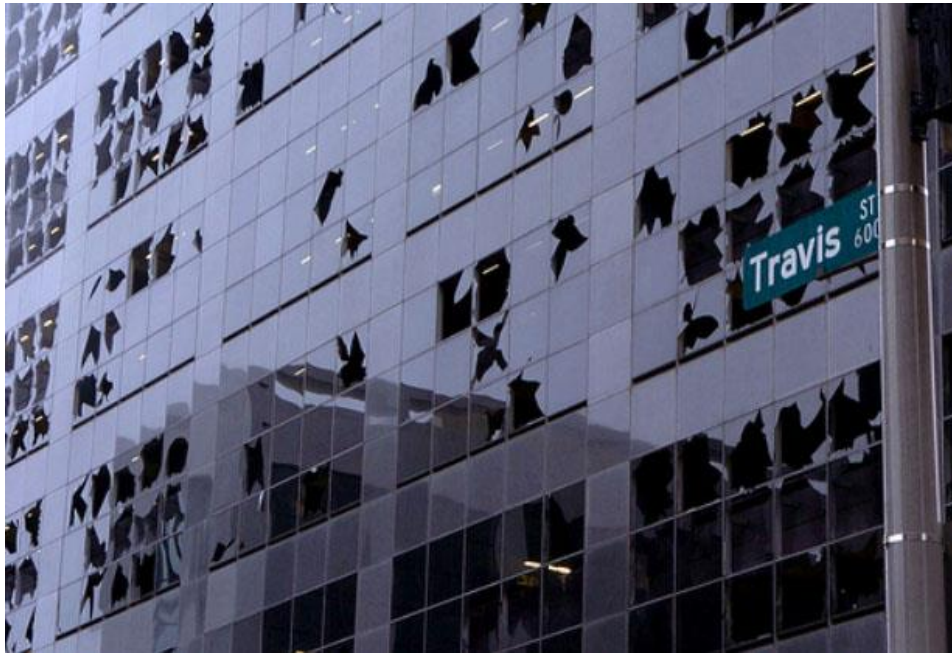
## 4.2 Oštećenja fasada usled dejstva vetra



*Slika 4.9. Oštećena fasada tipa zid zavese tokom tornada, Atlanta 2000 (Beers 2011)  
<https://buildingenvelope.files.wordpress.com/2011/05/tornado.jpg>*

Iako se glavnoj nosećoj konstrukciji posvećuje mnogo pažnje prilikom projektovanja ne smeju biti zanemarene ili olako shvaćene ni tzv. sekundarne konstrukcije i njihovi elementi. U grupu sekundarnih konstrukcija spadaju i fasadne konstrukcije, njihovi elementi i elementi za vezu sa glavnom nosećom konstrukcijom. Fasadni omotač i krovna obloga ne smeju biti zanemareni u sveukupnom ponašanju zgrada usled dejstva vetra. Fasade savremenih objekata izrađene su od raznorodnih materijala koji uklopljeni u jednu celinu i povezani sa glavnom nosećom konstrukcijom objekta treba da izdrže sva predviđena opterećenja i prenesu ih na noseću konstrukciju. Otkazivanje makar jednog elementa na fasadi usled dejstva vetra, bilo da je to element obloge ili pak element koji služi za pričvršćivanje, odnosno vezu sa nosećom konstrukcijom vodi nizu daljih oštećenja. Materijalne štete usled oštećenja bilo kog dela fasade idu do enormno velikih suma obzirom da fasada prezentuje jedan objekat i predstavlja prvi susret posmatrača ili korisnika sa njim, ona je ta koja treba da impresionira. To je razlog što se na fasadama često nalaze skupi materijali a samim tim i svaka popravka, zamena ili bilo kakva intervencija nikada nije jeftina. Ono što je još važnije kada dođe do oštećenja fasade jesu potencijalne povrede ljudi koji se nalaze u blizini objekta i ljudi unutar njega. Ne treba naglašavati da povrede mogu biti i fatalne obzirom da se na fasadama nalaze materijali kao što su staklo, kamen i oštri čelični ili aluminijumski elementi.





*Slika 4.10. Oštećenje staklene fasade tokom uragana Ike, Houston 2006 (Beers 2011)*  
<https://buildingenvelope.files.wordpress.com/2011/05/ike.jpg>

Usled dejstva jakih vetrova najčešće oštećenje na fasadama jeste lom stakla (slike 4.9 do 4.12). Kada je fasadna opna jednom oštećena to može voditi nizu daljih oštećenja i eventualnih povreda. Kada vetar uđe unutar objekta dolazi do naglog povećanja unutrašnjeg pritiska (*overpressurization*) i dodatnog opterećenja elemenata fasadne konstrukcije (slika 4.13). Na ovaj način omogućen je i ulazak vode u objekat što vodi dodatnom povećanju štete. Važno je pomenuti da velika opasnost pretili od elemenata već oštećene fasade koje vetar nosi (*flying debris*) a koji sada postaju opasni kako za objekat tako i za ljude unutar njega ili prolaznike (slika 4.12).



*Slika 4.11. Oštećenja fasade tokom uragana Wilma, Miami 2005 (Beers 2011)*  
<https://buildingenvelope.files.wordpress.com/2011/05/wilma.jpg>

Na slici 4.13 prikazano je razorno dejstvo uragana Katarina koji se dogodio 2005. godine. Na slici 4.13 (a) prikazano je totalno oštećenje severne fasade hotela *Hyatt Regency* u Nju Orleansu. Razorena fasada pored potpuno uništenih staklenih elemenata ispune, ima znatna oštećenja i na metalnim elementima ispune u parapetnom delu fasade (slika 4.13 (b)). Istovremeno severo-istočna fasada ostala je potpuno neoštećena.



Slika 4.12. Oštećenje fasade Bank One Tower, Teksas (Smith 2000)  
<http://www.aawe.org/gallery/display.php?i=68&p=&c=>



Slika 4.13. (a) Oštećenje severne fasade hotela *Hyatt Regency*; (b) oštećenje elemenata ispune  
Uragan Katarina, New Orleanse, 2005

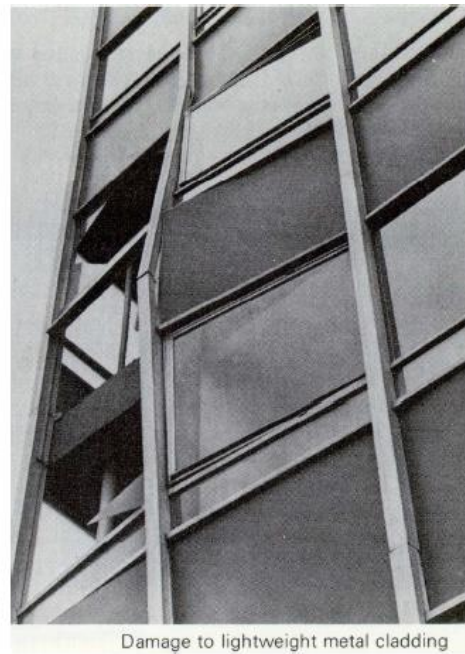
[https://www.google.rs/search?q=hyatt+regency+new+orleans+hurricane+katrina&espv=2&biw=1600&bih=713&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiftlLe0p\\_KAhWLWxOKHZIzBrQQ\\_AUIBigB&dpr=1#imgsrc=ugW0cJ-KuAYo-M%3A](https://www.google.rs/search?q=hyatt+regency+new+orleans+hurricane+katrina&espv=2&biw=1600&bih=713&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiftlLe0p_KAhWLWxOKHZIzBrQQ_AUIBigB&dpr=1#imgsrc=ugW0cJ-KuAYo-M%3A)



Međutim, nije nepoznato ni otkazivanje noseće konstrukcije fasade kao što je to bio slučaj na Glavnoj železničkoj stanici u Berlinu tokom jake oluje Kiril 2007. godine. Tada je došlo do pada čelične grede teške 2 tone koja je bila sastavni deo konstrukcije a nalazila se ispred fasadne ravni (slika 4.14). Najčešća oštećenja kod fasada tipa zid zavesa usled dejstva vetra jeste lom stakla ali vitki čelični i aluminijumski elementi, stubići i prečke su takođe povremeno izloženi znatnim oštećenjima. Kod ovih elemenata može doći do izvijanja čak u nekim slučajevima i bočno-torzionog izvijanja kao što se vidi na slici 4.15 i slici 4.16.



Slika 4.14. Oštećenje noseće konstrukcije fasadnog zida glavne železničke stanice, Berlin  
<http://www.spiegel.de/fotostrecke/photo-gallery-berlin-s-train-station-damaged-in-storm-fotostrecke-18720.html>



Slika 4.15 Oštećenje fasadnih zidova (Hoffer 2008)



Slika 4.16. Laminirano staklo (laminated glass) izloženo dejstvu jakog vetra ostaje u ramu ali dolazi do deformacije vertikalna i horizontalna

[https://www.google.rs/search?q=Mr.+Alessandro+Abate+curtain+wall+photo&espv=2&biw=1600&bih=767&tbm=isch&imgil=SlsL6FtfKSEyzM%253A%253BRNEdGlfnLmYhSM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fglobalwrap.com%25252Fhistory%25252F&source=iu&pf=m&fir=SlsL6FtfKSEyzM%253A%252CRNEdGlfnLmYhSM%252C\\_&usg=\\_0kjhYYe22wYS2SMpPMPBdiEySt0%3D&ved=0ahUKEwjy\\_Og36HKAhXMvBoKHZVBA8OyjcIRw&ei=5p2TVvL4F8z5apWDifgN#tbn=isch&q=Mr.+Alessandro+Abate+curtain+wall+&imgrc=10TearobSpwMqM%3A](https://www.google.rs/search?q=Mr.+Alessandro+Abate+curtain+wall+photo&espv=2&biw=1600&bih=767&tbm=isch&imgil=SlsL6FtfKSEyzM%253A%253BRNEdGlfnLmYhSM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fglobalwrap.com%25252Fhistory%25252F&source=iu&pf=m&fir=SlsL6FtfKSEyzM%253A%252CRNEdGlfnLmYhSM%252C_&usg=_0kjhYYe22wYS2SMpPMPBdiEySt0%3D&ved=0ahUKEwjy_Og36HKAhXMvBoKHZVBA8OyjcIRw&ei=5p2TVvL4F8z5apWDifgN#tbn=isch&q=Mr.+Alessandro+Abate+curtain+wall+&imgrc=10TearobSpwMqM%3A)



Slika 4.17. Oštećenje fasadnog zida (Kazmierczak 2010)

### 4.3 Aktuelni standardi i propisi

Srpski standardi SRPS U.C7.110-112 koji su važeći od 1992. godine (identični standardima JUS U.C7.110-112 iz 1991. godine) napravili su značajan pomak u proračunu zgrada usled dejstva vetra u odnosu na dotadašnje propise, Privremene tehničke propise za opterećenje zgrada (1948), Tehničke propise o dejstvu vetra na noseće čelične konstrukcije (1964) i Pravilnik o tehničkim normativima za opterećenja nosećih građevinskih konstrukcija (1988). Od tada pa do danas ovi standardi su svakodnevica naše inženjerske prakse iako su u početku delovali složeno i komplikovano. Devedesetih godina 20. veka počinje usaglašavanje evropske regulative za projektovanje, proračun i izvođenje građevinskih konstrukcija i formiranje zajedničkih evropskih standarda poznatim pod nazivom Evrokodovi. Koncept Evrokodova nezavisno od konstrukcionog materijala sastojao se od zajedničkog dela i nacionalnih aneksa koji za zadatak imaju uvođenje specifičnosti podneblja, iskustva prethodne prakse, itd. Institut za standardizaciju Srbije novembra meseca 2012. godine prihvata Evrokod 1 – deo 4, EN 1991-1-4: 2012 Dejstva na konstrukcije, deo 1-4: Dejstva vetra (u svemu isti kao EN 1991-1-4: 2005) kao nacionalni standard sa oznakom SRPS EN 1991-1-4: 2012. Ovaj standard zamenjuje dosadašnje standarde SRPS U.C7.110-113 (u svemu isti kao JUS U.C7.110-113). Međutim u svakodnevnoj inženjerskoj praksi i dalje je u svakodnevnoj upotrebi primena standarda SRPS U.C7.110-113. Razloga sigurno ima više a jedan od važnijih jeste da nije donešen nacionalni aneks vezan za ovaj standard ali i nezavršena procedura koja bi primenu ovog standarda učinila obavezujućom.

Iz gore navedenih razloga u nastavku će kratko biti prikazani delovi oba standarda, i SRPS U.C7.110-113 i EN 1991-1-4: 2012, a koji su važni za ovo istraživanje.

#### 4.3.1 SRPS U.C7.110-113

Kao predmet standarda SRPS U.C7.110 i njegovo područje primene navodi se da se njime “utvrđuju osnovni principi proračuna opterećenja vetrom **građevinskih konstrukcija**, njihovih **konstrukcionih delova** i **elemenata konstrukcije**”. Opterećenje vetrom predstavljeno je kao “sadejstvo aerodinamičkog pritiska vetra, koeficijenta sile ili pritiska i izložene površine konstrukcije” (SRPS U.C7.110). Standard SRPS U.C7.112 se odnosi samo na opterećenje vetrom zgrada, a kao predmet standarda i područje primene navodi se “utvrđivanje načina proračuna opterećenja vetrom, odnosno pritiska vetra, za **zgrade u celini**, njihove **pojedine konstrukcione delove** i **delove obloga**” (SRPS U.C7.112).

U okviru ovih standarda brzina vetra (jednačina 4.5) u ma kojoj tački u prostoru u ma kom trenutku vremena data je kao zbir dve komponente:

$$v(z, t) = v_m(z) + v_f(z, t) \quad [m/s] \quad (4.5)$$

gde je:

$v_m(z)$  – osrednjena brzina vetra u posmatranoj tački u prostoru, na visini  $z$  iznad terena, u intervalu osrednjavanja  $t$  i sa određenom verovatnoćom pojave, tzv. povratnim periodom – jednom u  $T$  godina;

$v_f(z, t)$  – fluktuirajući deo brzine vetra koji se određuje statističkim analizama strujanja vazduha u atmosferi.

Opterećenje vetrom zgrada je standardom SRPS U.C7.112 definisano na sledeći način:

$$w = q_w A_s \quad [kN] \quad (4.6)$$

gde je :

$q_w$  - pritisak vetra;

$A_s$  - efektivna površina odnosno projekcija površine zgrade izložene vetru na vertikalnu ravan upravnu na pravac dejstva vetra.

Pritisak vetra na zgrade definisan je posebno za proračun glavnih nosećih elemenata zgrade (krovnih nosača, stubova, ramova i spregova) jednačinom 4.7, a pritisak vetra za proračun elemenata obloge gde spadaju zidovi, sendvič paneli i sl, ali i elementi koji ih nose, kao rožnjače, fasadni stubovi i grede, definisani su jednačinama 4.8, 4.9 i 4.10.

$$q_{w,pe} = q_{m,T,z} G_z C_{pe} \quad [kN/m^2] \quad (4.7)$$

$$q_{w,p} = q_{m,T,z} G_z C_p \quad [kN/m^2] \quad (4.8)$$

$$q_{w,pl} = q_{m,T,z} G_z C_{pl} \quad [kN/m^2] \quad (4.9)$$

$$C_p = C_{pe} - C_{pi} \quad [-] \quad (4.10)$$

U prethodnim jednačinama je:

$q_{m,T,z}$  – osrednjeni aerodinamički pritisak vetra dat jednačinom 4.11;

$G_z$  – dinamički koeficijent;

$C_{pe}$ ,  $C_{pi}$ ,  $C_{pl}$  – koeficijenti spolašnjeg ( $e$ ), unutrašnjeg ( $i$ ) i lokalnog pritiska ( $l$ ) definisanih u okviru standarda SRPS U.C7.112.

Osrednjeni aerodinamički pritisak vetra,  $q_{m,T,z}$  definisan je standardom SRPS U.C7.110 i predstavljen jednačinom (4.11). Isti je za sve zgrade nezavisno od oblika, njene veličine ili krutosti.

$$q_{m,T,z} = q_{m,T,10} K_z^2 S_z^2 \quad [kN/m^2] \quad (4.11)$$

$$q_{m,T,10} = \frac{1}{2} \rho v_{m,T,10}^2 10^{-3} \quad [kN/m^2] \quad (4.12)$$

$$v_{m,T,10} = k_t k_T v_{m,50,10} \quad [m/s] \quad (4.13)$$

U prethodnim jednačinama su:

$K_z^2$  – faktor ekspozicije predstavlja promenu osrednjene brzine vetra  $v_m$  sa visinom  $z$  iznad terena u metrima a zavisi od hrapavosti terena;

$S_z$  – faktor topografije;

$q_{m,T,10}$  – osnovni pritisak vetra dat jednačinom 4.12;

$\rho$  – gustina vazduha ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ );

$v_{m,T,10}$  – projektna osnovna brzina vetra data jednačinom 4.13;

$k_t$  – faktor vremena osrednjavanja osnovne brzine vetra;

$k_T$  – faktor povratnog perioda koji uvodi značaj i vek trajanja objekta;

$v_{m,50,10}$  – osnovna brzina vetra (osrednjena, povratni period  $T=50$  godina, na 10 m od površine terena);

Dinamički koeficijent,  $G_z$  objedinjuje uticaje udara vetra i potencijalnog rezonantnog odgovora konstrukcije (Bojović 1993). Dakle u ovom koeficijentu je sažeto dejstvo **kratkotrajnih, slučajnih udara vetra** na konstrukciju ili neki njen deo, **fluktuirajuće vazdušne pritiske** nastale usled formiranja vrtloga oko konstrukcije i **fluktuirajuće, inercijalne sile** indukovane kretanjem same konstrukcije usled dejstva vetra.

Ono što je važno napomenuti jeste da proračun opterećenja vetrom zavisi od krutosti zgrade i da se na osnovu nje zgrade mogu svrstati u **male krute zgrade, niske krute, velike krute ili vitke zgrade**. Tek potom se može pristupiti proračunu koji se razlikuje zavisno od tipa



zgrade. Postupci kojima se sprovodi proračun opterećenja vetrom za svaku od ovih grupa kao i postupci, objašnjenja, tabele, itd, mogu se naći u standardima SRPS U.C7.110-112.

Kao posledica gore navedenog i određivanje dinamičkog koeficijenta,  $G_z$  različito je za male krute, velike krute i vitke zgrade.

Za **velike krute zgrade** ovaj koeficijent određuje se jednačinom 4.14:

$$G_z = 1 + 2gI_zB \quad (4.14)$$

gde je:

$g$  – udarni koeficijent,

$g = 4,0$  za obloge i sekundarnu konstrukciju a

$g = 3,0$  za glavnu noseću konstrukciju;

$I_z$  – intenzitet turbulencije vazduha;

$B$  – faktor prostorne korelacije;

$(R/B)^2$  – pokazatelj mogućeg rezonantnog odgovora.

Za **vitke zgrade** udarni koeficijent,  $g$ , određuje se na sledeći način:

$$g = \sqrt{2(\ln vt)} + \frac{0,577}{\sqrt{2(\ln vt)}} \quad [-] \quad (4.15)$$

$$vt = \frac{n_1 t \left(\frac{R}{B}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{B}\right)^2}} \quad [-] \quad (4.16)$$

gde  $t$  predstavlja interval osrednjavanja i iznosi 3600 s a sa  $n_1$  [Hz] je obeležena frekvencija slobodnih neprigušenih oscilacija konstrukcije u prvom tonu.

**Koeficijent pritiska**  $C_p$  (jednačina 4.17) predstavlja odnos izmerenog aerodinamičkog pritiska vetra i osrednjenog aerodinamičkog pritiska, posle osrednjavanja po vremenu i prostoru. Koeficijent pritiska je bezdimenzionalna veličina data jednačinom:

$$C_p = \frac{q_g}{q_m} \quad [-] \quad (4.17)$$



U nastavku će biti prikazana tabela 4.5 iz istog standarda kojom su definisani parametri hrapavosti terena:

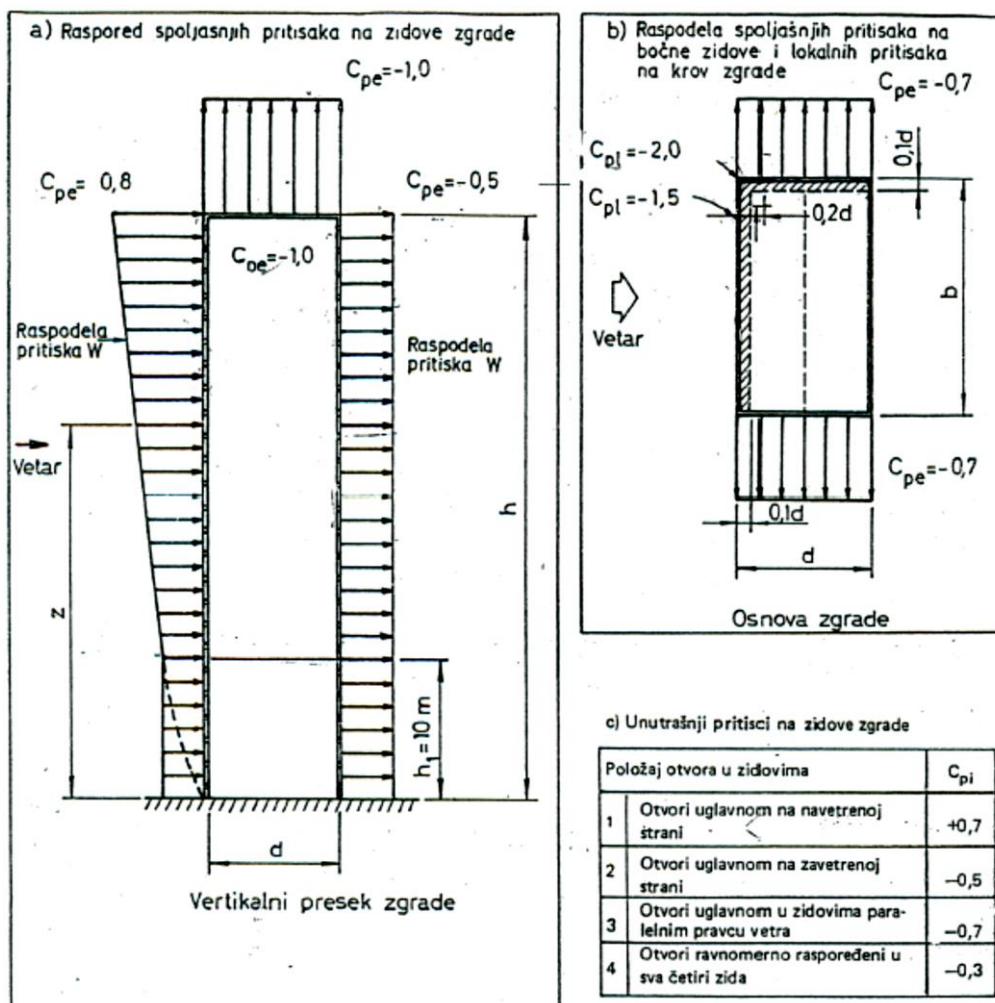
Tabela 4.5. – Pregled faktora hrapavosti terena i gradijentnih visina (preuzeta iz SRPS U.C7.110)

	Klasa hrapavosti terena		Parametri hrapavosti terena				Gradijentna visina
	Opis	Oznaka	a	b	$\alpha$	$z_0$	$z_G$
		-	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	Velike vodene mirne i uzburkane površine (mora, jezera)	A	0,021	1,4	0,11	0,003	180
2	Otvoreni, ravni tereni sa retkim pojedinačnim preprekama	B	0,030	1,0	0,14	0,03	320
3	Šumoviti tereni, industrijske zone, urbani kompleksi, gradovi	C	0,041	0,5	0,22	0,3	440

U tabeli 4.5 se koriste oznake koje imaju sledeće značenje:

**a, b,  $\alpha$**  – parametri klase hrapavosti terena;

**$z_G$**  – gradijentna visina predstavlja visinu iznad koje osrednjena brzina vetra,  $v_{m,T,z}$  ima konstantnu vrednost i označava se sa  $v_{m,T,zG}$ .



Slika 4.18. Rasporeda koeficijenta pritisaka  $C_{pe}$ ,  $C_{pi}$  i  $C_{pl}$  kod zgrada  $h/b > 2$  i ravnim krovom (SRPS U.C7.112, 1992)

U nastavku, a u cilju poređenja rezultata istraživanja ove doktorske disertacije, iz standarda SRPS U.C7.112 prenete su slike (slike 4.18 i 4.19) na kojima su predstavljeni koeficijenti pritisa za zgrade koje po dimenzijama odgovaraju analiziranim zgradama u okviru ovog istraživanja.

Krovovi na dve vode 0 + 15								
Koefficient spoljašnjeg pritiska $C_{p,e}$ za $h:b:l = 2,5:1:1$								
$\beta$	A	B	C	D	E	F	G	H
0°	+0,9	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
15°	+0,8	-0,5	-0,9	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7
45°	+0,5	-0,5	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7	-0,7	-0,5
45°	Za presak „m“ $C_{p,l} = -1,0$ ; „n“ $C_{p,l} = -0,8$							
Koefficient unutrašnjeg pritiska $C_{p,i}$ za $\beta =$					0°	15°	45°	
Otvori raspoređeni ravnomerno					$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	
Otvori pretežno na strani A					+0,8	+0,7	+0,4	
Otvori pretežno na strani B					-0,5	-0,5	-0,4	
Otvori pretežno na strani C					-0,6	-0,8	+0,4	

Slika 7 – Zatvorena visoka kvadratna zgrada

Slika 4.19. Raspodela koeficijenata pritisa za zatvorenu visoku kvadratnu zgradu  $h:b:l=2.5:1:1$  (SRPS U.C7.112, 1992; Scanlan i Simiu 1996)

#### 4.3.2 SRPS EN 1991-1-4: 2012

SRPS EN 1991-1-4: 2012 (u svemu isti kao EN 1991-1-4: 2005) je važeći evropski standard koji se bavi dejstvom vetra na konstrukcije. U opštim odredbama ovog standarda se na samom početku navodi “U EN 1991-1-4:2005 prikazana su uputstva za određivanje dejstava prirodnog vetra, koja treba da budu korišćena u proračunu konstrukcija zgrada i drugih građevinskih objekata, za svaku od razmatranih opterećenih površina. To uključuje konstrukciju u celini, delove konstrukcije ili elemente povezane sa konstrukcijom, na primer, komponente, elemente obloge i njihove elemente za pričvršćivanje, sigurnosne i zvučne barijere.” (EN 1991-1-4:2005). Standard se primenjuje kako za zgrade tako i za druge građevinske objekte visine do 200 metara. U delu 1.5 se navodi da “kao dopuna proračunima, za dobijanje informacija o opterećenju i odgovoru konstrukcije, mogu se koristiti rezultati ispitivanja vetra u aerotunelu i dokazane i/ili tačno vrednovane numeričke metode, uz korišćenje odgovarajućih modela konstrukcije i prirodnog vetra”.

U nastavku će biti prenete definicije, pojmovi, oznake i parametri iz ovog standarda koji su od važnosti za ovo istraživanje.

**Fundamentalna osnovna brzina vetra,  $v_{b,0}$**  predstavlja “desetominutnu srednju brzinu vetra, sa godišnjom verovatnoćom da bude prekoračena od 0.02, nezavisnu od pravca vetra, na visini od 10 m, iznad ravničarskog otvorenog zemljanog terena” (EN 1991-1-4:2005). Ova brzina vetra nije zavisna od doba godine ali uzima u obzir uticaje nadmorske visine ako se to zahteva. Meri se na otvorenom terenu sa niskom vegetacijom i pojedinačnim preprekama čije međusobno rastojanje je najmanje 20 visina prepreke. **Osnovna brzina vetra,  $v_b$**  predstavlja modifikovanu fundamentalnu osnovnu brzinu vetra kako bi se u obzir uzeli pravac dejstva vetra, ali i sezonsko delovanje ako se to zahteva. Određuje se primenom sledećeg izraza:

$$v_b = c_{dir}c_{season}v_{b,0} \quad (4.18)$$

gde su:

$v_b$  – osnovna brzina vetra, definisana kao funkcija pravca vetra i doba godine, na 10 metara iznad tla II kategorije terena;

$v_{b,0}$  - fundamentalna vrednost osnovne brzine vetra;

$c_{dir}$  – koeficijent pravca;

$c_{season}$  – koeficijent sezonskog delovanja.

**Srednja brzina vetra,  $v_m(z)$**  na visini  $z$  iznad terena predstavlja modifikovanu osnovnu brzinu vetra kako bi se u proračun uneo kako uticaj hrapavosti tako i uticaj topografije terena. Ova brzina određena je izrazom:

$$v_m(z) = c_r(z)c_o(z)v_b \quad (4.19)$$

gde su:

$c_r(z)$  – koeficijent hrapavosti;

$c_o(z)$  – koeficijent topografije.

**Hrapavost terena** se u proračun uvodi preko koeficijenta hrapavosti,  $c_r(z)$ . Ovaj koeficijent se uzima u obzir zbog promene srednje brzine vetra na mestu gde se nalazi objekat a do koje dolazi usled visine iznad nivoa tla ( $z$ ) i uticaja hrapavosti terena ispred konstrukcije na

koju deluje vetar (navetreni deo terena). Postupak za određivanje koeficijenta hrapavosti na visini  $z$  bazira se na logaritamskom profilu brzine vetra i dat je jednačinom (4.20):

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{za} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.20)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{za} \quad z \leq z_{min}$$

U prethodnim jednačinama je:

$z_0$  – dužina hrapavosti;

$k_r$  – koeficijent terena koji zavisi od dužine hrapavosti a sračunava se na sledeći način:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad \text{za} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.21)$$

U jednačini (4.21) su:

$z_{min}$  – minimalna visina (vidi tabelu 4.6);

$z_{max} = 200$  m;

$z_{0,II} = 0.05$  m (teren II kategorije, tabela 4.6).

Preporučene vrednosti za  $z_0$  i  $z_{min}$  a koje zavise od kategorije terena, date su u tabeli 4.6 i to za pet karakterističnih kategorija terena.

Tabela 4.6. Kategorije i parametri terena (preuzeto iz EN 1991-1-4:2005)

Kategorija terena		$z_0$ m	$z_{min}$ m
0	More ili obalno područje izloženo otvorenom moru	0,003	1
I	Jezera ili ravničarska i horizontalna površina sa zanemarljivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II	Površina sa niskom vegetacijom, kao što je trava i izolovanim preprekama (drveće, zgrade), koje su udaljene za najmanje 20 visina prepreke	0,05	2
III	Površina sa redovnom pokrivenošću vegetacijom ili zgradama, ili, pak, izolovanim preprekama koje su udaljene za najviše 20 visina prepreke (kao što su sela, prigradski tereni, neprekidna šuma)	0,3	5
IV	Površina, na kojoj je najmanje 15% površine prekriveno zgradama, čija prosečna visina prelazi 15 m	1,0	10

Detaljnije o uticaju terena pri dejstvu vetra na zgrade može se naći u informativnom Aneksu A ovog standarda.

Dejstvo vetra na spoljašnje i unutrašnje površine objekta jeste fluktuirajuće u toku vremena. Ono može biti kako pritiskujuće tako i sišuće a dejstvo ovih sila je uvek upravno na izloženu površinu. “Dejstvo vetra prikazuje se preko uprošćenog skupa pritisaka ili sila, čiji je uticaj ekvivalentan ekstremnim uticajima turbulentnog vetra” (EN 1991-1-4:2005). Takođe, dejstva vetra su ovim standardom klasifikovana kao “promenljiva nepokretna dejstva” i predstavljaju karakteristične vrednosti koje se određuju iz osnovnih vrednosti brzine ili pritiska vetra. Godišnja verovatnoća prekoračenja ovih karakteričnih vrednosti je 0.02 što je ekvivalentno srednjem godišnjem povratnom periodu od 50 godina.

**Pritisak vetra** na spoljašnje površine,  $w_e$  i pritisak vetra koji deluje na unutrašnje površine,  $w_i$  u okviru ovog standarda, određuju se iz jednačina (4.22) i (4.23):

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe} \quad (4.22)$$

$$w_i = q_p(z_i)c_{pi} \quad (4.23)$$

gde su:

$q_p(z_e), q_p(z_i)$  – udarni pritisak vetra na referentnoj visini  $z_e$  odnosno  $z_i$  dat je jednačinom (4.24);

$z_e, z_i$  – referentna visina za spoljašnji odnosno unutrašnji pritisak;

$c_{pe}$  – koeficijent spoljašnjeg pritiska;

$c_{pi}$  – koeficijent unutrašnjeg pritiska;

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z)q_b \quad (4.24)$$

gde su:

$I_v(z)$  – intenzitet turbulencije na visini  $z$ ;

$\rho$  – gustina vazduha. Preporučena vrednost je  $1,25 \text{ kg/m}^3$  ako nije drugačije precizirano Nacionalnim aneksom;

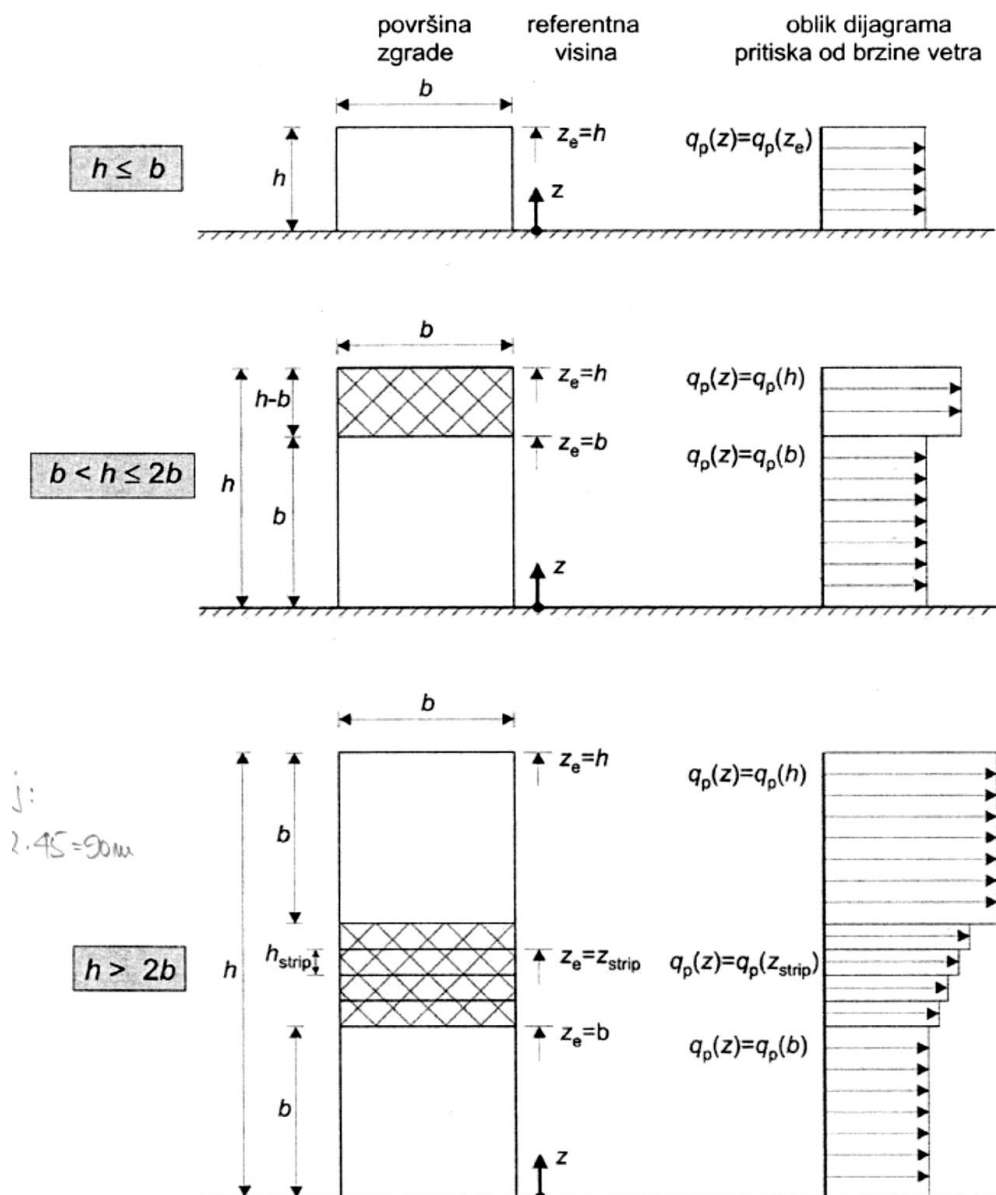
$c_e(z)$  – koeficijent izloženosti dat izrazom (4.25);

$q_b$  – osnovni pritisak vetra dat izrazom (4.26);

$$c_e(z) = \frac{q_b(z)}{q_b} \quad (4.25)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (4.26)$$

Referentna visina,  $z_e$  i odgovarajući **dijagram pritiska vetra** u okviru ovog standarda zavisi su od odnosa  $h/b$ , gde je  $h$  visina zgrade a  $b$  njena širina upravna na pravac dejstva vetra. Razlikuju se tri slučaja koja su prikazana na slici 4.20:



Slika 4.20. Referentna visina  $z_e$  u zavisnosti od dimenzija  $h$  i  $b$ , kao i odgovarajući dijagram pritiska vetra



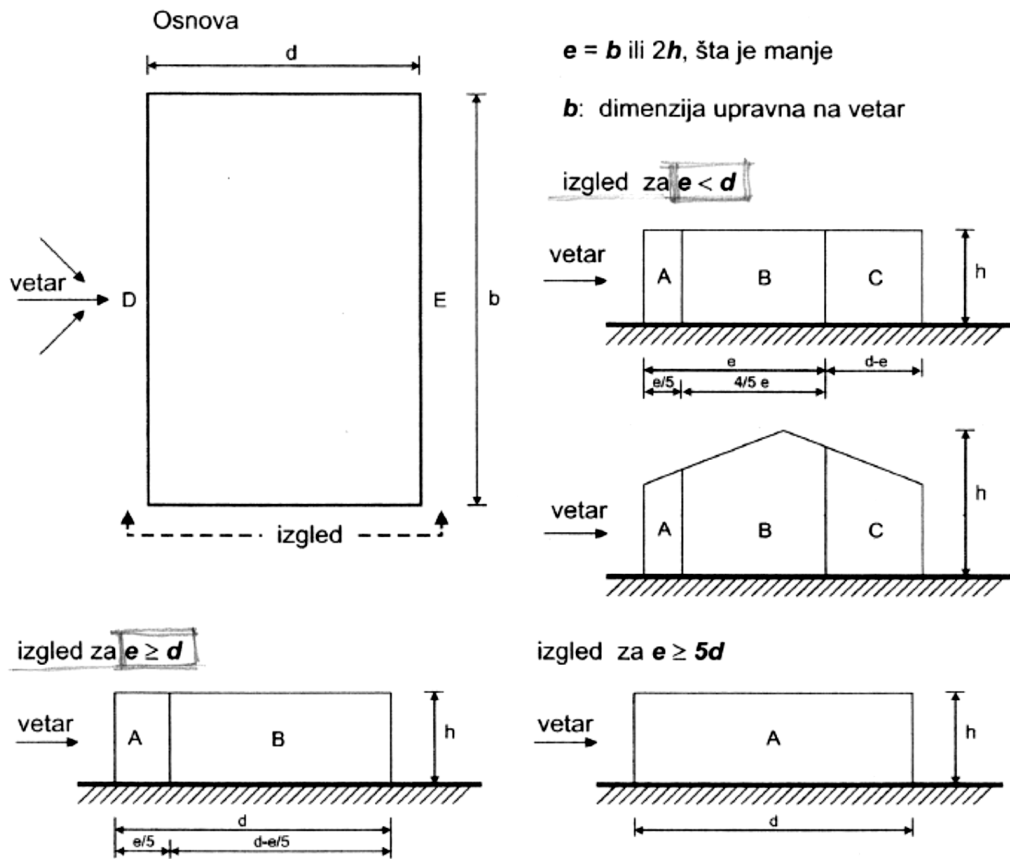
1. Zgrada gde je  $h < b$  razmatra se kao jedan deo;
2. Zgrada gde je  $b < h < 2b$  može se razmatrati kao da se sastoji iz dva dela gde se donji deo prostire od tla do visine jednake širini  $b$  i gornjeg dela, koji čini preostali deo visine objekta;
3. Zgrada gde je  $h > 2b$  može se razmatrati kao da se sastoji iz više delova gde se donji deo prostire od tla do visine jednake širini  $b$ , gornjeg dela koji se prostire od vrha zgrade naniže a čija visina je jednaka širini  $b$ . Srednji deo koji se nalazi između donjeg i gornjeg dela može se sastojati iz više horizontalnih traka.

**Koeficijenti pritiska** za zgrade, spoljašnji ili unutrašnji, predstavljaju uticaj vetra na spoljašnje odnosno unutrašnje površine zgrade. U ovom standardu koeficijenti spoljašnjeg pritiska se dele na globalne i lokalne koeficijente zavisno od površine  $A$  opterećene vetrom. **Globalni koeficijenti pritiska**,  $c_{pe,10}$  se odnose na površine zgrade opterećene vetrom koje su veće od  $10 \text{ m}^2$  i obično se koriste za proračun glavne noseće konstrukcije zgrada. **Lokalni koeficijenti pritiska**,  $c_{pe,1}$  odnose se na površine koje su manje od  $1 \text{ m}^2$  i relevantne su za proračun malih elemenata i elemenata za pričvršćivanje. U ove elemente spadaju i elementi obloga kako fasadnih tako i krovnih i njihovi elementi za pričvršćivanje. Globalni i lokalni koeficijenti spoljašnjeg pritiska za vertikalne zidove zgrada pravougaone osnove dati su u tabeli 4.7 a zone A, B, C, D i E definisane su na slici 4.21.

Tabela 4.8. Preporučene vrednosti koeficijenta spoljašnjeg pritiska, za vertikalne zidove zgrada pravougaone osnove (tabela preuzeta iz EN 1991-1-4:2005).

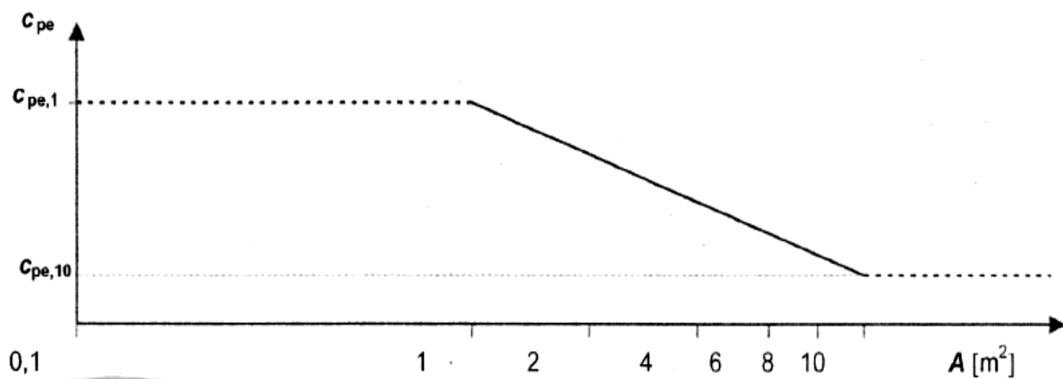
Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Preporučene vrednosti koeficijenata  $c_{pe,10}$  i  $c_{pe,1}$  date u tabeli 4.8 zavise od odnosa  $h/d$  gde je  $d$  obeležena širina zgrade pravougaone osnove paralelno pravcu delovanja vetra. Za međuvrednosti odnosa  $h/d$  preporučuje se upotreba linearne interpolacije.



Slika 4.21. Zone A, B, C, D i E za vertikalne zidove zgrada pravougaone osnove (EN 1991-1-4:2005).

Obzirom da su u tabeli 4.8 date vrednosti koeficijenta pritiska za površine veće od  $10 \text{ m}^2$ ,  $c_{pe,10}$  i vrednosti koeficijenta pritiska za površine manje ili jednake  $1 \text{ m}^2$ ,  $c_{pe,1}$  za površine između ovih vrednosti  $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$  dat je dijagram preporučenog postupka za određivanje spoljašnjeg koeficijenta pritiska  $c_{pe}$  na slici 4.22.



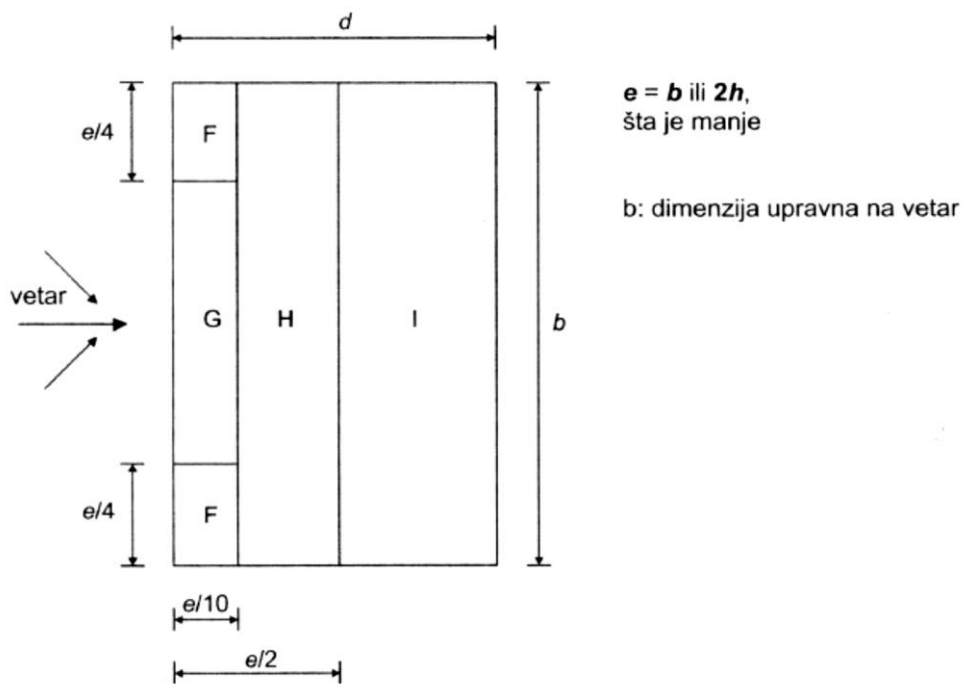
Slika 4.22. Preporučeni postupak za određivanje koeficijenta spoljašnjeg pritiska  $c_{pe}$  za zgrade sa opterećenom površinom  $A$  između  $1 \text{ m}^2$  i  $10 \text{ m}^2$  (EN 1991-1-4:2005)



Dijagram na slici 4.22 je baziran na sledećoj jednakosti:

$$\text{za } 1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2 \quad \rightarrow \quad c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A$$

Evropskim standardom EN 1991-1-4:2005 ravni krovovi definisani su kao krovovi sa nagibima od  $-5^\circ$  do  $+5^\circ$  i podeljeni su na zone kao na slici 4.23. Za referentnu visinu uzima se visina objekta  $h$  a vrednosti koeficijenata pritiska za svaku zonu na ravnom krovu prikazane su u tabeli 4.9.



Slika 4.23. Ravan krov podeljen na zone po EN 1991-1-4:2005.

Tabela 4.9. Koeficijenti spoljašnjeg pritiska za ravne krovove (deo tabele iz EN 1991-1-4:2005)

Tip krova	Zona							
	F		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
<b>oštroivične strehe</b>	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2

U tabelama 4.8 i 4.9 date vrednosti koeficijenata  $c_{pe,10}$  i  $c_{pe,1}$  “treba da budu korišćene za ortogonalni vetar, pravaca  $0^0$ ,  $90^0$ ,  $180^0$ . Ove vrednosti predstavljaju najnepovoljnije vrednosti, dobijene u području pravca vetra  $\theta = \pm 45^0$ , sa bilo koje strane relevantnog ortogonalnog pravca” (SRPS EN 1991-1-4:2012).

### 4.3.3 Nemački propisi VDI 3783

Radi poređenja data je i tablica u kojoj su dati parametri hrapavosti terena iz nemačkih propisa (VDI 3783, 2000) koje izdaje Asocijacija nemačkih inženjera. U ovoj tabeli mogu se naći parametri hrapavosti  $z_0$  i  $\alpha$ .

Tabela 4.10. Parametri hrapavosti terena

Table 2. Roughness lengths, profile exponents, and zero plane displacements

Roughness class	slightly rough	moderately rough	rough	very rough
Type of terrain	ice, snow, water surface	grassland, farmland	park, suburban area	forest, inner-city area
$z_0$ in m	$10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$ bis $10^{-1}$	0.1 bis 0.5	0.5 to 2
$\alpha$	0.08 bis 0.12	0.12 bis 0.18	0.18 to 0.24	0.24 to 0.40
$d_0$ in m	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0.75 \cdot h$	$\approx 0.75 \cdot h$

$h$  is the mean height of vegetation and buildings, in m

## 5 Numeričko rešavanje razmatranog problema

Proračunska ili numerička dinamika fluida (*Computational fluid dynamics, CFD*) predstavlja savremenu numeričku tehniku gde se jednačine koje opisuju strujanje fluida, rešavaju uz pomoć savremenih računara i softvera. Nešto novija grana CFD-a jeste i CWE (*Computational Wind Engineering*) - numerički inženjering koji se bavi proučavanjem strujanja vetra i njegovim dejstvom na ljude i objekte. Ove discipline su relativno mlade a njihov nagli razvoj u poslednje dve ili tri decenije omogućen je usavršavanjem računarske tehnike. U okviru ovog dela istraživanja korišćen je softverski paket ANSYS Workbench 15.0 (CFX). Metod na kome se bazira ovaj softver jeste Metod konačnih zapremina. Ovom metodom, domen odnosno deo prostora u kome se analizira strujanje vazduha deli se na tzv. kontrolne zapremine. Potom se jednačine koje opisuju problem diskretizuju i rešavaju iterativno za svaku pojedinačnu kontrolnu zapreminu. Kao rezultat, aproksimativna vrednost svake promenljive može se odrediti u proizvoljnoj tački domena koji se razmatra (Stamenković 2013). Na ovaj način dobija se potpuna slika strujanja, u ovom slučaju strujanja vazduha oko zgrade.

Sam proces numeričke simulacije podrazumeva niz adekvatno sprovedenih postupaka. Pre svega, skupom jednačina definiše se fizički model toka. Potom treba odrediti veličinu domena u kome se odvija analiza. Domen treba diskretizovati mrežom konačnih zapremina a potom usvojiti odgovarajuće numeričke aproksimacije. Jedan od poslednjih koraka jeste i definisanje kriterijuma koji će omogućiti završetak iterativnog postupka obzirom da su jednačine u dinamici fluida nelinearne, a samim tim i dobijanje traženih rešenja. Dobijena rešenja treba analizirati i neki od koraka mogu se ponoviti ako je to potrebno, uz odgovarajuće izmene.

Na ovaj način opisan je dosta uopšteno niz postupaka koje podrazumeva numerička simulacija a koja za krajnji cilj ima dobijanje rešenja za izabrane parametre od interesa. Međutim, ono o čemu treba voditi računa prilikom numeričkih simulacija i što neretko dovodi do nepouzdanih rezultata jeste veliki broj različitih parametara koji opisuju strujanje fluida ili pak sam numerički postupak, a koje bira sam korisnik. Baš iz ovih razloga za neke od koraka urađene su preliminarne analize koje su za cilj imale to da eliminišu uticaj polaznih parametara na krajnja rešenja. Detaljnije o svakom koraku analize dato je u poglavljima 5.4.1 do 5.4.5.

## 5.1 Teorijske osnove

Pri proučavanju vetra i njegovih dejstava proučava se vazdušno strujanje u atmosferskom graničnom sloju (*Atmospheric boundary layer, ABL*) i to strujanje spada u turbulentna. Turbulencija je “po prirodi nestacionarni, nelinearni, nepovratni, stohastički trodimenzijski fenomen, i kao takav “otporan” na egzaktan matematički tretman” (Stevanović 2008). Numeričko rešavanje bilo kog problema mehanike fluida zahteva rešavanje opštih jednačina kretanja viskozno fluida odnosno jednačine kontinuiteta i *Navier-Stokes*-ovih jednačina. Ove jednačine čine skup nelinearnih diferencijalnih jednačina sa odgovarajućim graničnim uslovima. Jednačina kontinuiteta (5.1) i opšti oblik *Navier-Stokes*-ovih jednačina (5.2) kojima se opisuju turbulentna kretanja, imaju oblik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2)$$

Efekti dejstva vetra na konstrukcije su od interesa uglavnom u situacijama kada su brzine vetra velike, pa je tada uobičajeno da se toplotni efekti zanemaruju (*Simiu i Scanlan 1996*). Takođe, uticaj Koriolisove sile u najnižem delu atmosferskog graničnog sloja, gde jesu objekti kojima se bavimo, zanemaruje se jer vodi samo minornim promenama po visini glavnog pravca dejstva vetra (*Holmes 2001*). Tada atmosferski granični sloj može biti opisan gore pomenutim jednačinama konzervacije za masu i momenat sa konstantnim karakteristikama fluida: gustinom  $\rho$  i dinamičkom viskoznošću  $\nu$ , pa dolazi do pojednostavljenja i jednačine (5.1) i (5.2) sada imaju oblik:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.4)$$

U jednačinama (5.1) do (5.4) korišćene su sledeće oznake:

$u_j$  - komponente brzine strujanja vazduha [m/s],

$x_i$  – prostorne koordinate pravouglog koordinatnog sistema,

$$P = \frac{p}{\rho} \quad (5.5)$$

gde je:

$p$  - statički pritisak [Pa],

$\rho$  - gustina vazduha [kg/m<sup>3</sup>],

$\nu$  – kinematska viskoznost [m<sup>2</sup>/s],

$$\nu = \frac{\nu_t}{\rho} \quad (5.6)$$

$\nu_t$  - turbulentna (dinamička) viskoznost [kg\*s<sup>-1</sup>\*m<sup>-1</sup>].

Jednačina kontinuiteta (jednačina održanja materije) (5.3) i momentna jednačina (*Navier-Stokes-ove jednačine*) (5.4) zajedno sa početnim i graničnim uslovima smatraju se dovoljnim da opišu turbulentne tokove. Direktnom numeričkom simulacijom (*Direct Numerical Simulation, DNS*) još uvek nije moguće rešiti kompleksne probleme u ovoj oblasti iako se poslednjih godina radi intenzivno na tome. Danas se pri rešavanju ovih problema najčešće koriste *Reynolds-ove osrednjene Navier-Stokes-ove jednačine (Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS)* i u novije vreme simulacija velikih vrtloga (*Large Eddy Simulation, LES*). Simulacija velikih vrtloga spada u metode na čijem se usavršavanju aktivno radi i od kojih se očekuje da unaprede rezultate istraživanja u ovoj oblasti.

### 5.1.1 Reynolds-ove osrednjene Navier-Stokes-ove (RANS) jednačine

Za proračun turbulentnih tokova prilikom proučavanja dejstva vetra na konstrukcije, najširu praktičnu primenu našle su vremenski osrednjene Navier-Stokes-ove jednačine. Ovo osrednjavanje predložio je *Osborn Reynolds* pa se danas ove jednačine u literaturi često nalaze i pod nazivom *Reynolds-ove osrednjene Navier-Stokes-ove jednačine (Reynolds averaged Navier-Stokes equations)*.

### 5.1.2 Reynolds-ovi naponi

Trenutna brzina u bilo kojoj tački može se predstaviti zbirom komponente srednje brzine (u nastavku teksta označenu nadvučeno) i fluktuirajuće komponente (u nastavku teksta označenu sa ') (5.7):

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (5.7)$$

Brzinu predstavljenu jednačinom (5.7) zamenićemo u jednačinama (5.3) i (5.4) i izvršiti osrednjavanje po vremenu. Obzirom da su veličina i pravac turbulentnih fluktuacija slučajne, njihovo osrednjavanje po vremenu biće jednako nuli. To znači da će fluktuirajuće komponente za linearne članove u jednačinama (5.3) i (5.4) biti jednake nuli. Konvekcioni član u momentnoj jednačini (5.4),  $\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}$  predstavlja proizvod dve brzine i samim tim je nelinearan. Kada proces osrednjavanja primenimo na ovaj član dobićemo sledeće:

$$\begin{aligned} \overline{u_i u_j} &= \overline{(\bar{u}_i + u_i')(\bar{u}_j + u_j')} \\ \overline{u_i u_j} &= \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u_j'} + \overline{u_i' \bar{u}_j} + \overline{u_i' u_j'} \\ \overline{u_i u_j} &= \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{u_i' u_j'} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u_i' u_j'} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Posle procesa osrednjavanja jednačine (5.3) i (5.4) dobijaju sledeću formu:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \underbrace{\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}}_{\text{dodatni član}} \quad (5.10)$$

$$\tau_{ij}^{turb} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (5.11)$$

Dodatni član koji se posle osrednjavanja pojavljuje u jednačini (5.10) predstavlja tenzor *Reynolds*-ovih ili turbulentnih napona predstavljen jednačinom (5.11) i predstavlja interakciju fluktuirajućeg dela sa glavnim delom toka. Ovo za posledicu ima “uvođenje dodatnih aproksimativnih relacija kojima se nove nepoznate definišu u funkciji raspoloživih veličina. Sistem diferencijalnih i algebarskih relacija kojima se postiže zatvaranje usrednjenih jednačina konzervacije, naziva se popularno **model turbulencije** i omogućava da se aproksimativno matematički simuliraju usrednjeni efekti složenih turbulentnih interakcija u procesima transporta materije, količine kretanja i toplote” (Stevanović 2008).

Danas postoji veliki broj različitih turbulentnih modela a ovde će biti prikazani samo oni koji su korišćeni prilikom numeričkih simulacija u okviru ove disertacije, posle kratkog istorijskog pregleda razvoja modela turbulencije.

## 5.2 Kratka istorija modela turbulencije

Iako je poslednjih nekoliko decenija učinjen značajan napredak pri numeričkom rešavanju jednačina koje opisuju turbulentne tokove, početak celokupnog koncepta vremenski osrednjenih *Navier-Stokes*-ovih jednačina predložio je 1895. godine *Osborn Reynolds*. Predloženi koncept je vremenom dobijao na značaju. Međutim, do pojave savremenih računara modeliranje turbulencija nije moglo dobiti na značaju jer nije postojala mogućnost za rešavanje osnovnih osrednjenih jednačina konzervacije u opštem parcijalnom diferencijalnom obliku. Krajem 19. veka *Boussinesq* je predložio koncept turbulentne viskoznosti (*eddy viscosity*) koji je bio dobro prihvaćen od istraživača dinamike fluida pa se često ovaj koncept danas naziva i *Boussinesq*-ova aproksimacija. Značajan doprinos razvoju ove oblasti pre pojave računara, dao je još i *Prandtl* 1904. godine kada je pretpostavio postojanje tzv. “graničnog sloja” i kada je objavio rezultate istraživanja o turbulentnim tokovima gde je turbulentna viskoznost bila izražena preko dužine mešanja. Ova hipoteza dužine mešanja smatra se prvim pokušajem modeliranja turbulentnog ponašanja. *Prandtl* je predložio model gde turbulentna viskoznost zavisi od kinetičke energije turbulentnih fluktuacija,  $k$ . Ovo se smatra početkom jedno-

jednačinskih modela turbulencije. Ovaj koncept je učinio modeliranje turbulencija realnijim iako u okviru njega nije bilo moguće odrediti dužinu turbulencije (*turbulenth length*) i iz ovog razloga se smatrao “nekompletnim”. Pod tzv. “kompletnim” modelom bi se podrazumevao model gde ne bi bilo potrebno nikakvo prethodno poznavanje karakteristika toka osim graničnih i početnih uslova da bi se dobilo rešenje. Prvi ovakav model predložio je *Kolmogorov* 1942. godine uvodeći još jedan parametar, i to meru disipacije energije turbulencije u prostoru i vremenu (*specific dissipation rate*),  $\omega$  i odgovarajuću jednačinu. Parametar  $\omega$  se još naziva i specifična disipacija i u nastavku teksta koristiće se ovaj termin. Ovo se smatra nastankom dvojednačinskih modela kojima će se u narednom periodu baviti veliki broj istraživača, ali pečat će ostaviti svojim obimnim istraživanjem *Launder* i *Spalding* koji se smatraju tvorcima  $k-\varepsilon$  modela. Model  $k-\varepsilon$  spada u često i rado korišćene modele turbulencije uprkos svojim nedostacima. Više o ovom modelu dato je u poglavlju 5.3.1.

Autori koji su, takođe, dali doprinos razvoju ove oblasti jesu i *Chou* (1945) i *Rotta* (1951), i *Davidov* (1951 i 1961), no prekretnicu u razvoju modela turbulencije i metoda proračuna čini naučni skup održan na Univerzitetu *Stanford*, 1968. godine. Nakon ovog skupa dolazi do popularizacije ove oblasti a samim tim i do razvoja složenijih modela turbulencije koje sada zajedno sa novim numeričkim metodama omogućavaju proračun turbulentnih tokova.

Do ovakve ekspanzije istraživanja u ovoj oblasti ne bi došlo da nije bilo razvoja savremene računarske tehnike a to za posledicu ima i razvoj novih tehnika kao što su Simulacija velikih vrtloga i Direktne numeričke simulacije.

### 5.3 Modeli turbulentnog strujanja

Modeli turbulencije čine širok spektar od dvojednačinskih do naponsko-transportnih modela, uz pretpostavku homogene i izotropne turbulencije. Najčešće primenjivani modeli u *CWE* pri istraživanjima vezanim za dejstvo vetra na konstrukcije, jesu dvojednačinski modeli i oni podrazumevaju rešavanje još dve dodatne transportne jednačine da bi se odredio *Reynolds*-ov tenzor napona. *Reynolds*-ovi naponi imaju linearnu zavisnost sa kinetičkom energijom turbulencije,  $k$  (5.12) i gradijentima srednje brzine (5.13).

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'_i u'_i}) \quad (5.12)$$



$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.13)$$

gde je:

$k$  - kinetička energija turbulencije,

$\delta_{ij}$  – Kronekerov delta operator:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & j \neq i \end{cases} \quad (5.14)$$

$\nu_t$  - turbulentna kinematska viskoznost.

Jednačina (5.13) je još poznata i kao *Boussinesq*-ova hipoteza čijom primenom se modeliranje svodi na određivanje kinetičke energije turbulencije,  $k$  i turbulentne kinematske viskoznosti,  $\nu_t$  koja je u funkciji lokalne turbulencije. Pojava člana koji predstavlja turbulentnu viskoznost,  $\nu_t$  omogućila je zatvaranje sistema jednačina kojima je definisano turbulentno strujanje fluida.

Bilo je puno predloga kako treba da bude definisana turbulentna kinematska viskoznost počevši od konstantne vrednosti do predloga *Kolmogorov*-a i *Prandtl*-a (*Kolmogorov* 1942, *Prandtl* 1945) da ona bude izražena direktno preko kinetičke energije turbulencije,  $k$  i karakteristične razmere turbulencije,  $l$ .

$$\nu_t = C_\mu l \sqrt{k} \quad (5.15)$$

Ono što je ovaj predlog učinilo značajnim jeste činjenica da je  $\nu_t$  sada zavisilo samo od karakteristika turbulentnog dela strujanja fluida. Dvojednačinski modeli turbulencije polaze od pretpostavke da se karakteristična razmera turbulencije,  $l$ , određuje iz sopstvene diferencijalne jednačine. Posle raznih predloga (*Stevanović* 2015) pokazalo se da je najpogodnije odrediti ovaj parametar, preko brzine disipacije turbulentne kinetičke energije,  $\varepsilon$ , obzirom na njen energetski karakter (5.16):

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (5.16)$$

Tako da sada izraz za turbulentnu kinematsku viskoznost dobija sledeću formu:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.17)$$

gde je  $C_\mu$  empirijska konstanta turbulentnog modela.

U nastavku će biti predstavljeni dvojednačinski modeli turbulencije i to oni koji su korišćeni u numeričkim simulacijama u okviru disertacije, a to su: **standardni k-ε**, **RNG k-ε**, **standardni k-ω** i **SST** turbulentni model.

### 5.3.1 Standardni k-ε model

Standardni  $k$ - $\varepsilon$  model (*Launder i Spalding 1972*) predstavlja široko i rado korišćen model turbulencije kako za istraživanja tako i u pri rešavanju inženjerskih problema. Iako ovaj turbulentni model nije direktno korišćen za analize u okviru ove doktorske disertacije, opisan je ovde jer predstavlja osnovu korišćenih *RNG k-ε* i standardnog  $k$ - $\omega$  modela. Standardni  $k$ - $\varepsilon$  model je jednostavan poluempirijski model gde uz jednačine konzervacije treba rešavati samo još dve diferencijalne jednačine. Obe su skalarnog karaktera, i jednačina za turbulentnu kinetičku energiju ( $k$ ), i jednačina za brzinu njene disipacije ( $\varepsilon$ ), pa se zato još nazivaju i transportnim jednačinama i kod ovog turbulentnog modela imaju sledeći oblik:

$$\frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \bar{S}^2 - \varepsilon \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \nu_t \bar{S}^2 \frac{\varepsilon}{K} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (5.19)$$

$$\bar{S} = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5.20)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.21)$$

U jednačinama (5.17), (5.18) i (5.19) pojavljuje se niz empirijski određenih konstanti čije su se vrednosti menjale tokom vremena ali poslednjih godina imaju sledeće vrednosti pri izvođenju numeričkih simulacija dejstva vetra na konstrukcije:

$$(\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu) = (1.0; 1.3; 1.44; 1.92; 0.09) \quad (5.22)$$

dok jednačina (5.23) predstavlja *von Karman*-ovu konstantu i njena vrednost za standardni  $k$ - $\varepsilon$  model iznosi:

$$\kappa_{RNG} = \sqrt{(C_{\varepsilon 2RNG} - C_{\varepsilon 1RNG})\sigma_{\varepsilon RNG} \sqrt{C_{\mu RNG}}} = 0.433 \quad (5.23)$$

Prednosti standardnog  $k$ - $\varepsilon$  modela su pre svega njegova stabilnost i niska cena koja je posledica brzine proračuna. Važno je takođe napomenuti da se ovaj model bazira na pretpostavci da je čitav tok turbulentan pa se često pominju i njegova ograničenja. Pri analizama dejstva vetra na konstrukcije pokazao se nedovoljno tačnim. Naime, raspodela pritisaka na objekte je dosta gruba a razlog tome jeste predimensionisana kinetička energija turbulencije,  $k$ . Ovaj fenomen poznat je još i kao anomalija tačke stagnacije (*stagnation point anomaly*) a kao rezultat ima prevelike pritiske na strani direktno izloženoj vetru pa je sprečeno odvajanje na uglovima objekta na toj fasadnoj ravni.

Uprkos činjenici da je kod standardnog  $k$ - $\varepsilon$  modela detektovan niz nedostataka kod primene u *CWE*, ipak treba naglasiti da ovaj model čini osnovu modernih dwojednačinskih turbulentnih modela. Da bi se prevazišli gore navedeni nedostaci standardnog  $k$ - $\varepsilon$  modela predloženo je nekoliko modifikacija.

### 5.3.2 RNG $k$ - $\varepsilon$ model

Ovaj turbulentni model predstavlja varijantu  $k$ - $\varepsilon$  modela izvedenu iz *Navier-Stokes*-ovih jednačina koristeći matematičku metodu pod nazivom “renormalizacija (RNG) grupa” i odatle potiče i sam naziv. Model su osmislili i razvijali *Yakhot* i *Orszag* a detaljne informacije o modelu se mogu naći u radu (*Yakhot* i *Orszag* 1992). Ovaj model razlikuje se od standardnog  $k$ -

$\varepsilon$  modela u vrednostima konstanti i dodatnim članovima i funkcijama u transportnim jednačinama za  $k$  i  $\varepsilon$ . Konstanta  $C_{\varepsilon 1}$  sada postaje promenljiva koja zavisi od odnosa produkcijskog dela turbulentne kinetičke energije i njene disipacije, tako da važi:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1.42 - \frac{\eta(1 - (\eta/4,38))}{1 + \beta_{RNG}\eta^3} \quad (5.24)$$

gde je

$$\eta = \sqrt{P_k / \rho C_{\mu RNG} \varepsilon} \quad (5.25)$$

Sa produkcijskim delom turbulentne kinetičke energije:

$$P_k = \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (5.26)$$

Konstante modela su korigovane i imaju sledeće vrednosti:

$$(C_{\mu RNG}, \beta_{RNG}, C_{\varepsilon 2RNG}, \sigma_{kRNG}, \sigma_{\varepsilon RNG}) = (0.0845, 0.012, 1.68, 0.7179, 0.7179) \quad (5.27)$$

Obzirom da je produkcija turbulentne kinetičke energije u horizontalnim homogenim turbulentnim površinskim slojevima (*horizontal homogenous turbulent surface layers, HHTSL*) (Richards & Hoxey 1993.) jednaka njenoj disipaciji, onda sledi da je

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 0.92 \quad (5.28)$$

Stoga se konstante modela malo menjaju, što se odražava i na vrednost *von Karman*-ove konstante,  $\kappa$  koja kod *RNG k-ε* modela ima vrednost:

$$\kappa_{RNG} = \sqrt{(C_{\varepsilon 2RNG} - C_{\varepsilon 1RNG}) \sigma_{\varepsilon RNG} \sqrt{C_{\mu RNG}}} = 0.41 \quad (5.29)$$

Primenom *RNG k-ε* modela, predviđanje pritisaka usled dejstva vetra je znatno poboljšano u odnosu na standardni *k-ε* model a brzine vetra su takođe prihvatljive i dobro se slažu sa eksperimentalno dobijenim vrednostima. Ovo su potvrdili između ostalih i drugi (Mochida i dr.

2002, Wright i Easom 2003). Iz ovih razloga RNG  $k-\varepsilon$  model se smatra najopštijim dvojednačinskim turbulentnim modelom kod analiza dejstva vetra na konstrukcije primenom numeričkih tehnika.

### 5.3.3 Standardni (Wilcox-ov) $k-\omega$ model

Kao i standardni  $k-\varepsilon$  tako i standardni  $k-\omega$  (Wilcox 1993) model je poluempirijski i baziran je na transportnim jednačinama za specifičnu turbulentnu kinetičku energiju,  $k$ , i specifičnu disipaciju,  $\omega$ , koji se takođe može predstaviti i kao odnos  $\varepsilon$  i  $k$ .

$$w = \frac{\varepsilon}{k\beta'} \quad (5.30)$$

Konstanta  $\beta'$  je ekvivalentna konstanti  $C_\mu$  i takođe ima vrednost 0.09 kao i kod  $k-\varepsilon$  modela, a jednačine konzervacije imaju oblik:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta' \rho k w + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{kw}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \alpha \frac{w}{k} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{u_i}{\partial x_j} - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_w} \right) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) \quad (5.32)$$

gde je  $\nu_t$  definisano na sledeći način preko specifične disipacije:

$$\nu_t = \rho \frac{k}{w} \quad (5.33)$$

Uz date vrednosti konstanti  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\sigma_{kw}$  i  $\sigma_w$  von Karman-ova konstanta ima sledeći oblik i vrednost:

$$\alpha = 5/9; \quad \beta = 0.075; \quad \sigma_{kw} = 2; \quad \sigma_w = 2; \quad (5.34)$$

$$\kappa_{k-w} = \sqrt{\frac{(\beta - \alpha\beta')\sigma_w}{\sqrt{\beta'}}} = 0.408 \quad (5.35)$$

Dok je profil specifične disipacije:

$$w = \frac{u_*}{\sqrt{\beta' \kappa_{k-w} z}} \quad (5.36)$$

### 5.3.4 SST (*Shear Stress Transport*) model

SST  $k-\omega$  model predstavlja varijantu standardnog  $k-\omega$  modela. Modifikacija se sastoji u definisanju turbulentne viskoznosti. U nastavku data je formulacija SST modela i odgovarajuće jednačine, a detaljno se o ovom modelu može naći u literaturi (*Menter 1994, Menter 2003*).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i' k)}{\partial x_i} = \bar{P}_k - \beta' \rho k w + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i' w)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\nu + \sigma_w \nu_t) \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{w2} \frac{1}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i} \quad (5.38)$$

gde je mešovita funkcija  $F_1$  definisana na sledeći način:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta' w y}, \frac{500 \nu}{w y^2} \right), \frac{4 \rho \sigma_{w2} k}{CD_{kw} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (5.39)$$

$$CD_{kw} = \max \left( \rho \sigma_{w2} \frac{1}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (5.40)$$

U jednačini (5.39)  $CD_{kw}$  je definisano jednačinom (5.40) a  $y$  je rastojanje do najbližeg zida.  $F_1$  je jednako nuli za  $k-\varepsilon$  model a ima vrednost 1 za  $k-\omega$  model (*Menter 2003*).

Turbulentna viskoznost je definisana kao:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 w, S F_2)} \quad (5.41)$$

gde  $S$  predstavlja invarijantnu meru brzine deformacije, a  $F_2$  drugu mešovitu funkciju definisanu jednačinom (5.42) (*Menter 2003*):

$$F_1 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta'wy}, \frac{500\nu}{wy^2} \right) \right]^2 \right] \quad (5.42)$$

Sve konstante se dobijaju mešanjem odgovarajućih konstanti  $k-\varepsilon$  i  $k-\omega$  modela primenom jed. (5.43) i njihove vrednosti date su u (5.44) i (5.45):

$$\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F) \quad (5.43)$$

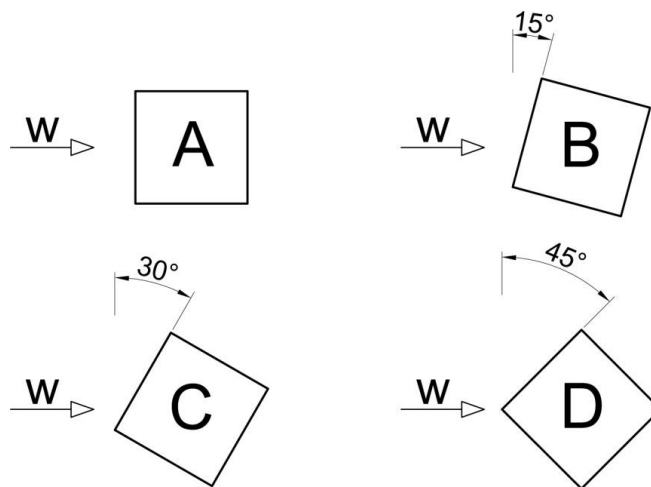
$$(\beta', \beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2) = \left( 0.09; \frac{3}{40}; 0.0828; \frac{5}{9}; 0.44 \right) \quad (5.44)$$

$$(\sigma_{k1}, \sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}, \sigma_{\omega2}) = (0.85; 1; 0.5; 0.856) \quad (5.45)$$

Skorašnja istraživanja pokazala su da SST verzija  $k-\omega$  modela pokazuje značajna poboljšanja u odnosu na standardni model (Franke 2004).

#### 5.4 Formiranje modela i parametri za numeričku analizu

Sprovedena analiza u okviru ove doktorske disertacije obuhvatila je 4 položaja zgrade u odnosu na pravac delovanja vetra i na taj način su formirane 4 grupe modela (grupa A, grupa B, grupa C i grupa D). U okviru sve četiri grupe analizirana je zgrada istih dimenzija  $b \times d \times h = 45 \times 40 \times 100$  m koja je bila predmet ranijih istraživanja.



Slika 5.1. Položaj osnova zgrada u odnosu na pravac delovanja vetra (grupe modela: A, B, C i D)



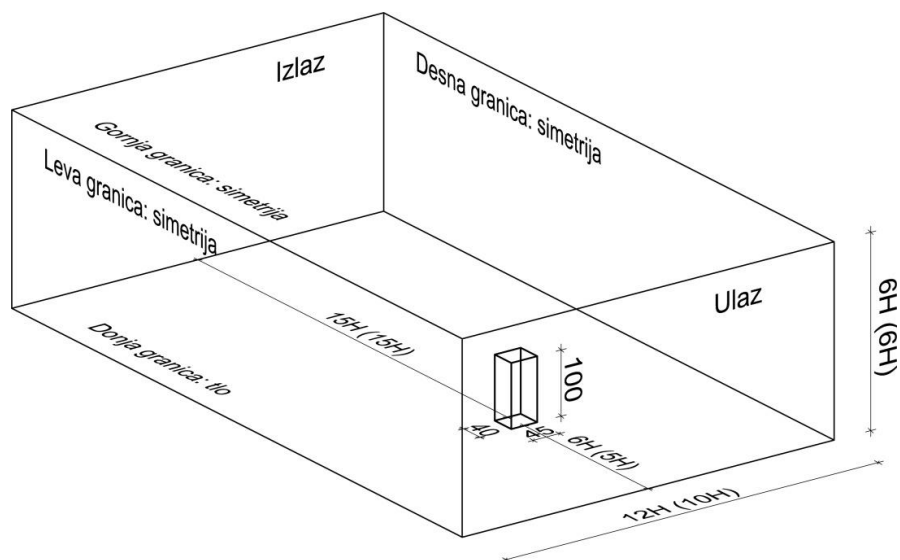
Grupa A obuhvatila je modele gde je pravac delovanja vetra upravan na jednu od fasadnih ravni. Grupa B obuhvatila je modele gde vetar deluje na najbližu fasadnu ravan pod uglom od  $15^\circ$ , dok su grupe C i D obuhvatile modele kod kojih vetar deluje pod uglom od  $30^\circ$  odnosno  $45^\circ$  (Slika 5.1).

Treba naglasiti da je analizirana izolovana zgrada odnosno da u domenu nema drugih objekata. Sve navedene grupe sadrže isti broj modela dok se ulazni parametri analize razlikuju jedino tamo gde je to bilo neophodno, odnosno gde analiza na drugi način nije bila moguća. Najčešće su menjane dimenzije domena i to tako da su one povećavane.

### 5.4.1 Proračunski domen

Proračunski domen predstavlja deo prostora u kome se nalazi objekat od interesa za istraživanje i u kome se odvija simulacija. Postoje različite preporuke o dimenzijama proračunskog domena (*computational domain*) u koji je smeštena zgrada koja je predmet analize i one zavise pre svega od samog predmeta analize, rezultata koji se analizom zahtevaju, vrste terena i onoga što se na njemu treba predstaviti (izolovani objekat ili grupa objekata, topografija terena...), ali i od graničnih uslova koji će biti zadati. Neke od preporuka za usvajanje dimenzija proračunskog domena, koje se primenjuju prilikom CFD analiza izolovane zgrade u domenu, su sledeće:

- Minimalne dimenzije rastojanja (Slika 5.2): od ulaza u domen do zgrade (*upstream region*) je  $5H$ , od zgrade do izlaza iz domena (*downstream, wake region*)  $15H$ , od zgrade do bočnih granica domena  $5H$  kao i od krova objekta do gornje granice domena  $5H$  (Hall 1997), gde je  $H$  visina posmatranog objekta;



Slika 5.2. Preporučene dimenzije domena i položaj objekta u njemu: po Franke-u i Hall-u (u zagradi)

- Dimenzije koje se često koriste prilikom eksperimentalnih istraživanja u tunelima za vetar je da se granice domena nalaze najmanje na rastojanju  $6H$  od objekta koji je predmet analize a poželjno je da to rastojanje bude  $10H$  (Franke i dr. 2004);
- Korisnici CFD-a uglavnom dimenzije domena određuju na osnovu činjenice da blokada (*blockage ratio*) ne treba da pređe 3%, gde se pod blokadom podrazumeva odnos projektovane površine zgrade upravno na pravac delovanja vetra i površine ulaza u domen (Beatke i dr. 1990, VDI 2005). Kod ovakvog pristupa položaj zgrade u domenu je određen rastojanjem od ulaza u domen i rastojanjem od gornje granice domena (*top boundary*) koje su  $5-6 H$ , a bočne granice se onda sračunaju u odnosu na blokadu. Kod ovakvog pristupa domeni su znatno užji;
- Rastojanja  $6H$  od zgrade do ulaza i bočnih granica,  $5H$  od krova do gornje granice i  $15H$  od zgrade do izlaza iz domena (Franke 2007).

Primenom bilo kog od gore navedenih pristupa domeni u kojima se odvija analiza dejstva vetra na jedan ili grupu objekta mogu biti i po nekoliko kilometara široki i dugački. Dužina domena iza zgrade je primetno veća od dužine od ulaza do zgrade i neophodna je da bi se ponovo formirao ravnomerni tok strujanja vazduha posle prepreke, u ovom slučaju zgrade. Od krova zgrade do gornje granice domena rastojanje treba da bude dovoljno da se spreči pojava veštački izazvanog ubrzanja u ovom regionu što bi se odrazilo na vrednosti rezultata. Ovako veliki domeni su neophodni da bi se izbegao uticaj granica domena na rezultate simulacija pa proizilazi da treba birati što je moguće veće domene. Međutim, sa druge strane u ovako velikim domenima treba napraviti dovoljno kvalitetnu mrežu konačnih zapremina od koje direktno zavise i rezultati analiza, a prevelik broj elemenata mreže dovodi do znatnog produženja trajanja analiza, dok u nekim slučajevima analize nisu ni moguće.

Iz svih gore navedenih razloga urađena je preliminarna analiza kojom su utvrđene dimenzije domena za ovo istraživanje tako da granice nemaju uticaja na rezultate od interesa, da je moguće formirati kvalitetnu mrežu a da vreme trajanja analize ne bude predugo.

Tabela 5.1 Koeficijenti pritisaka,  $C_p$  za sve fasadne ravni kada je rastojanje zgrade od ulaza u domen 5H

$C_p$ [-]		Grupa modela A ( $0^\circ$ ): 5 H od ulaza u domen ( <i>Inlet</i> ) do zgrade						
		$0^\circ$ RNG<k- $\omega$						
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Veličina elem. mreže		F5-B5	F4-B4	F3-B3	F2.2-B2.2	F1.7-B1.7	F1.25-B1.25	F1-B1
Navetrena fasada	max	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03
	min	-0.21	-0.24	-0.29	-0.39	-0.42	-0.46	-0.50
Levi zid	max	0.02	-0.01	-0.04	-0.11	-0.16	-0.21	-0.24
	min	-0.74	-0.73	-0.75	-0.75	-0.76	-0.76	-0.76
Zavetrena fasada	max	-0.16	-0.16	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.18
	min	-0.33	-0.34	-0.36	-0.39	-0.41	-0.43	-0.44
Desni zid	max	0.02	-0.02	-0.03	-0.09	-0.16	-0.21	-0.24
	min	-0.74	-0.74	-0.75	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76
Krov	max	0.02	0.01	-0.03	-0.09	-0.14	-0.19	-0.22
	min	-0.91	-0.92	-0.89	-0.89	-0.89	-0.88	-0.88

Tabela 5.2. Koef. pritisaka,  $C_p$  za sve fasadne ravni kada je rastojanje zgrade od ulaza u domen 10H

$C_p$ [-]		Grupa modela A ( $0^\circ$ ): 10 H od ulaza u domen do zgrade					
		$0^\circ$ RNG<k- $\omega$					
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Broj elemenata mreže		$120 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$210 \cdot 10^3$	$430 \cdot 10^3$	$850 \cdot 10^3$	$2050 \cdot 10^3$
Veličina elem. mreže		F5-B5	F4-B4	F3-B3	F2.2-B2.2	F1.7-B1.7	F1.25-B1.25
Navetrena fasada	max	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01
	min	-0.22	-0.24	-0.29	-0.39	-0.42	-0.47
Levi zid	max	0.02	-0.01	-0.04	-0.12	-0.16	-0.21
	min	-0.74	-0.74	-0.75	-0.75	-0.76	-0.76
Zavetrena fasada	max	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17
	min	-0.34	-0.35	-0.36	-0.39	-0.42	-0.43
Desni zid	max	0.02	-0.02	-0.04	-0.10	-0.16	-0.21
	min	-0.74	-0.74	-0.75	-0.76	-0.76	-0.76
Krov	max	0.01	0.00	-0.03	-0.09	-0.14	-0.19
	min	-0.92	-0.92	-0.89	-0.89	-0.88	-0.88

Prvo je analiziran uticaj položaja zgrade u odnosu na ulaz (*Inlet*) u domen. U preporukama (Franke 2004, Hall 1997, Beatke 1990) ali i na osnovu brojnih eksperimentalnih istraživanja, zgrada koja je predmet analize treba da bude na rastojanju od od 5-10H od ulaza u domen, gde je  $H$  visina zgrade koja je predmet analize. Iz ovog razloga urađene su analize za zgradu koja je od ulaza u domen udaljena 5H a potom i 10H. Rezultati koeficijenta pritisaka

dati su u tabelama 5.1 i 5.2, a upoređene vrednosti u tabeli 5.3. U ovim tabelama sa F je označena veličina površinskih elemenata na fasadama zgrade u metrima, a sa B veličina zapreminskih elemenata mreže u najmanjem poddomenu.

Tabela 5.3. Poređenje koeficijenta pritiska na svim fasadnim ravnima za položaj zgrade 5H i 10H od ulaza

$C_p$ [%]		$C_p$ (Ulaz: 5H) Vs $C_p$ (Ulaz: 10H)					
		F5 (5H) Vs F5 (10H)	F4 (5H) Vs F4 (10H)	F3 (5H) Vs F3 (10H)	F2.2 (5H) Vs F2.2 (10H)	F1.7 (5H) Vs F1.7 (10H)	F1.3 (5H) Vs F1.3 (10H)
		<b>Navetrena fasada</b>	<b>max</b>	1.67	1.66	1.60	1.51
	<b>min</b>	-2.77	0.20	-1.15	-1.32	-1.19	-1.13
<b>Levi zid</b>	<b>max</b>	21.86	-23.72	-9.71	-3.55	-1.75	-1.02
	<b>min</b>	0.08	-0.13	0.03	-0.21	-0.07	-0.07
<b>Zavetrena fasada</b>	<b>max</b>	-3.11	-2.90	-1.02	-0.04	0.37	0.48
	<b>min</b>	-1.42	-1.13	-1.11	-0.96	-0.91	-0.81
<b>Desni zid</b>	<b>max</b>	14.12	-10.46	-11.35	-3.80	-1.74	-1.02
	<b>min</b>	-0.18	-0.02	-0.01	-0.15	-0.08	-0.08
<b>Krov</b>	<b>max</b>	29.48	44.15	-7.56	-2.33	-1.01	-0.65
	<b>min</b>	-0.39	-0.13	0.03	-0.09	0.10	0.10

Iz tabele 5.3 se vidi da su razlike u koeficijentima pritiska,  $C_p$  male za slučaj kada je položaj ulaza u domen na rastojanju 5H i 10H. Razlike iznose 2-3% osim za maksimalni koeficijent pritiska,  $C_p$  na levom i desnom zidu ali su tu u pitanju male vrednosti  $C_p$  (reda veličine  $10^{-2}$ ) i zato je neslaganje 10-20%. Već kod modela gde je veličina elemenata mreže na fasadama objekta 2.2 m razlike ne prelaze 4%, a kod veličine elemenata na fasadi 1.7 m ne prelaze 2%. Što je mreža gušća to su i razlike manje. Stoga je zaključeno da je dovoljno da zgrada bude udaljena od ulaza u domen 5H, što je za dalju analizu i usvojeno jer je na taj način smanjen ukupan broj elemenata mreže, a samim tim smanjeno je i vreme proračuna dok se na kvalitetu rezultata nije izgubilo.

Tabela 5.4. Aktuelne preporuke za dimenzije domena

Dimenzije domena	Aktuelne preporuke za usvajanje dimenzija domena			
	Hall (1997)	Na osnovu eksperimentalnih istraživanja	Beatke i dr. (1990) Blokada: max 3%	Franke (2004)
<b>B [m]</b>	$2*5h = 1000$	$(6\div 10)h = 600\div 1000$	Sračuna se u odnosu na blokadu i poznate granice	$2*6h = 1200$
<b>L<sub>1</sub> [m]</b>	$5h = 500$	$(6\div 10)h = 600\div 1000$	$5h = 500$	$6h = 600$
<b>L<sub>2</sub> [m]</b>	$15h = 1500$	$(6\div 10)h = 600\div 1000$	$15h = 1500$	$15h = 1500$
<b>L=L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub> [m]</b>	$20h = 2000$	$2*(6\div 10)h = 1200\div 2000$	$20h = 2000$	$21h = 2100$
<b>H [m]</b>	$6h = 600$	$(6\div 10)h = 600\div 1000$	$6h = 600$	$6h = 600$

U sledećoj fazi analizirana je dužina domena iza zgrade i usvojena je znatno veća dužina od preporučenih ali je to posledica izabranog turbulentnog modela (*RNG k-ε*) o kome će kasnije biti reči. Sa preporučenom dužinom iza zgrade nije bilo moguće uraditi analizu pa je ona povećavana sve dok nisu dobijena rešenja uz zadovoljavajuću konvergenciju.

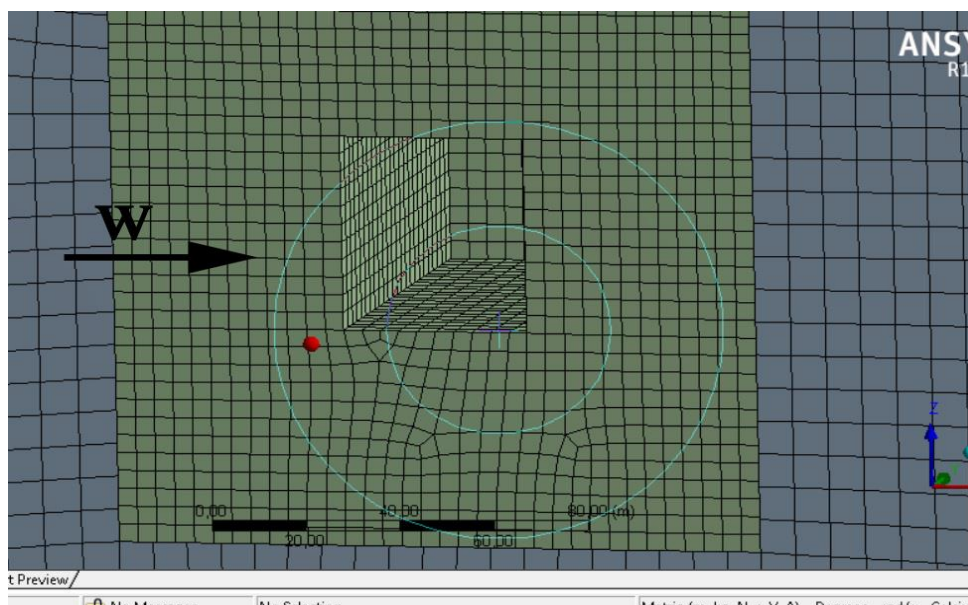
U tabeli 5.4 date su dimenzije domena po prethodno navedenim preporukama i iskustvima eksperimentalnih istraživanja, dok su u tabeli 5.5 date dimenzije domena, za sve položaje zgrada, usvojene za dalja istraživanja.

Tabela 5.5. Usvojene dimenzije domena za sve grupe modela

Dimenzije domena	Položaj zgrade u odnosu na pravac delovanja vetra			
	0°	15°	30°	45°
<b>B [m]</b>	1000	1000	1000	1500
<b>L<sub>1</sub> [m]</b>	500	600	500	1000
<b>L<sub>2</sub> [m]</b>	2500	2400	2500	2500
<b>L=L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub> [m]</b>	3000	3000	3000	3500
<b>H [m]</b>	600	600	600	600

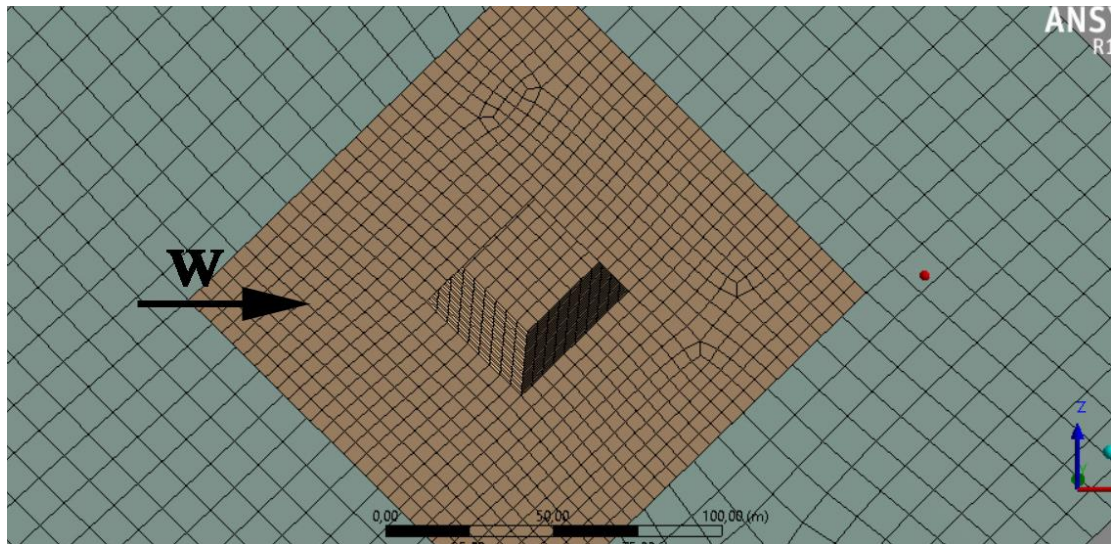
#### 5.4.2 Mreža konačnih zapremina

Modeliranju same mreže konačnih zapremina posvećena je velika pažnja jer je ovo važan aspekt za numeričku analizu i od kvaliteta mreže u mnogome i zavisi kvalitet odnosno pouzdanost rezultata. Modeliranju mreže za svaku od pomenute 4 grupe modela se pristupilo posebno jer je jedan od zahteva koje je trebalo ispuniti da se dobila kvalitetna mreža jeste i to da linije mreže budu upravne na fasadne ravni objekta kao što je prikazano na slikama 5.3 i 5.4.



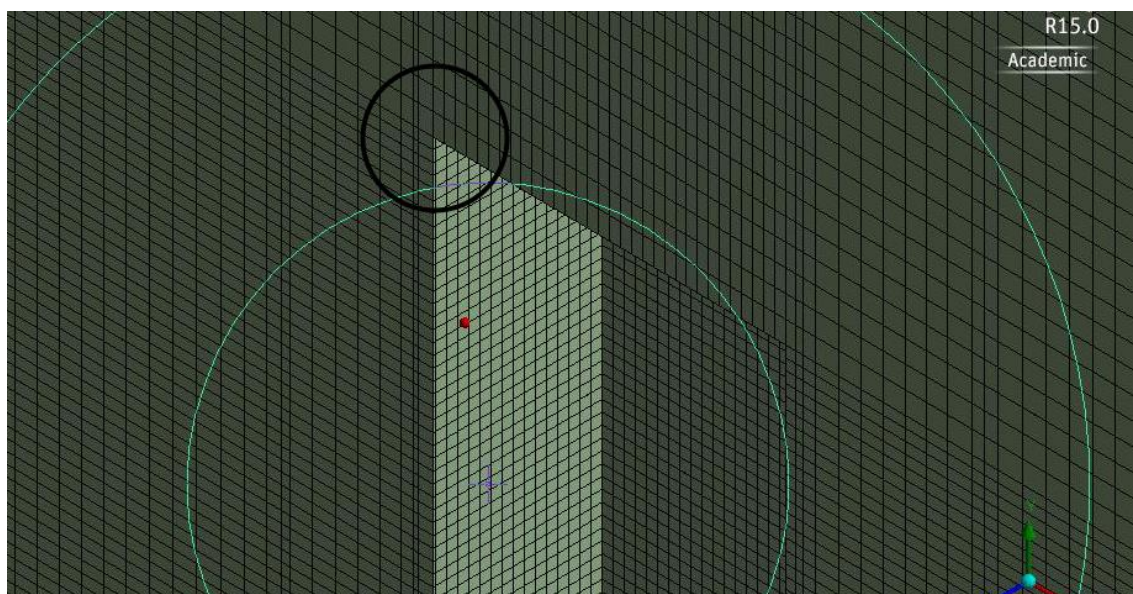
Slika 5.3. Linije mreže upravne na fasadne ravni kod zgrade pod uglom od 0° (90°) na pravac delovanja vetra





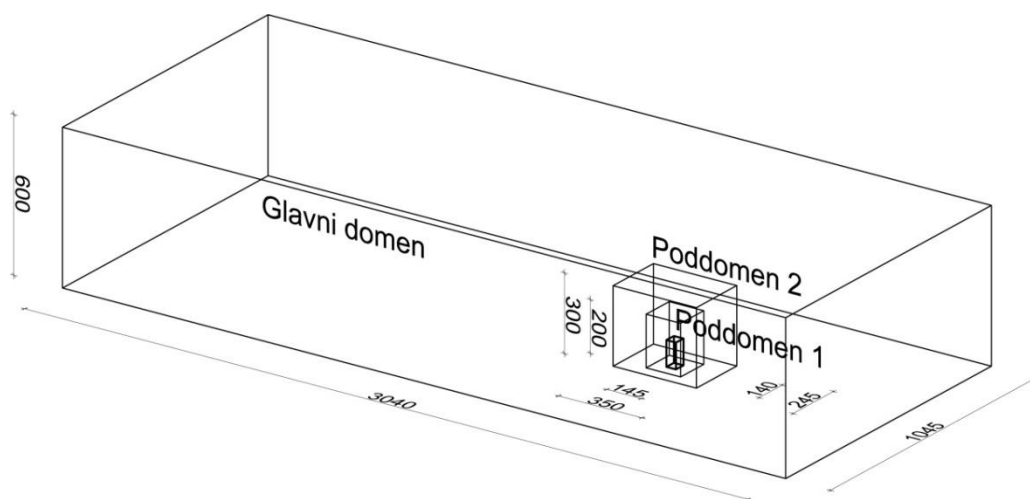
Slika 5.4. Linije mreže upravne na fasadne ravni kod zgrade pod uglom od  $45^{\circ}$  na pravac delovanja vetra

Idealna mreža kod ovog tipa analiza bi bila ona gde su sve ćelije mreže iste (*equidistant mesh*) u okviru celog proračunskog domena. Međutim, zbog veličine domena za analizu i zahteva da u regionu od interesa bude dovoljno gusta (fina) mreža, teško je ispuniti ovaj zahtev jer bi broj elemenata mreže bio prevelik a analize bi trajale predugo ako bi uopšte bile moguće sa tako velikim brojem elemenata. Iz ovih razloga je mreža progušćena lokalno oko zgrade i to tako što su zadavane veličine elemenata mreže na fasadama i krovu objekta. Kod ovog pristupa primećeno je da prilikom automatskog generisanja mreže ona jeste dobra u okolini osnove objekta kao i po visini ali su ćelije mreže iznad krova objekta bile izuzetno izdužene sa odnosom stranica  $\sim 1:4$  i više, pa samim tim ni rezultati nisu bili zadovoljavajući (Slika 5.5).



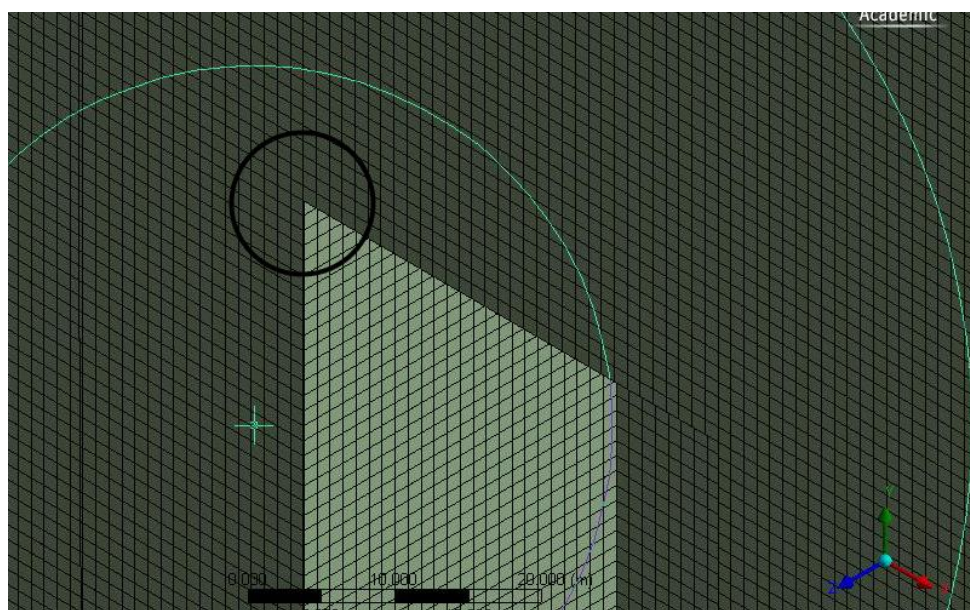
Slika 5.5. Prikaz mreže iznad krova objekta kod automatskog formiranja mreže

Ovaj problem je prevaziđen tako što su formirana dva poddomena (subdomena) oko objekta (slika 5.6). Poddomen 1 i 2 predstavljaju delove glavnog, proračunskog domena. Zgrada koja je bila predmet analize nalazi se u najmanjem, poddomenu 1. U okviru formiranih poddomena formirana je mreža koja je imala elemente jednakih dimenzija, tzv. “equidistant mesh”. Na taj način je ostvaren kompromis da su ćelije mreže iste oko objekta od interesa a da nema prevelikog



Slika 5.6. Dimenzije glavnog proračunskog domena i poddomena 1 i 2[m] za grupu modela A

broja elemenata tako da su analize bile moguće iako je i sada vreme trajanja analiza za modele sa najsitnijim mrežama bilo i po 16-24 h. Takođe je na ovaj način prevaziđen problem izduženih elemenata iznad krova objekta (Slika 5.7). Veličina poddomena je različita kod različitih grupa modela i njihove veličine prikazane su u tabeli 5.6.



Slika 5.7. Mreža na uglu krova posle formiranja poddomena.

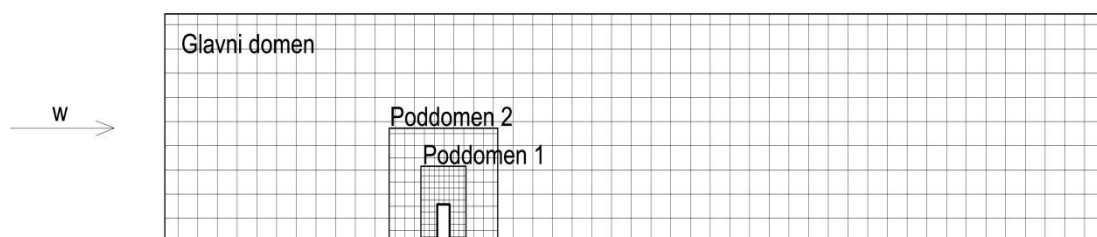


Tabela 5.6. Veličine glavnog i poddomena kod grupa modela A ( $0^\circ$ ), B ( $15^\circ$ ), C ( $30^\circ$ ) i D ( $45^\circ$ ).

Primenjeni model turbulencije		RNG			SST
Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$
Glavni domen	B [m]	1045	1045	1045	1500
	L [m]	3040	3040	3040	3500
	H [m]	600	600	600	600
Poddomen 1	B <sub>1</sub> [m]	145	145	145	445
	L <sub>1</sub> [m]	140	140	140	440
	H <sub>1</sub> [m]	200	150	150	150
Poddomen 2	B <sub>2</sub> [m]	245	345	345	395
	L <sub>2</sub> [m]	350	340	340	390
	H <sub>2</sub> [m]	300	250	250	250

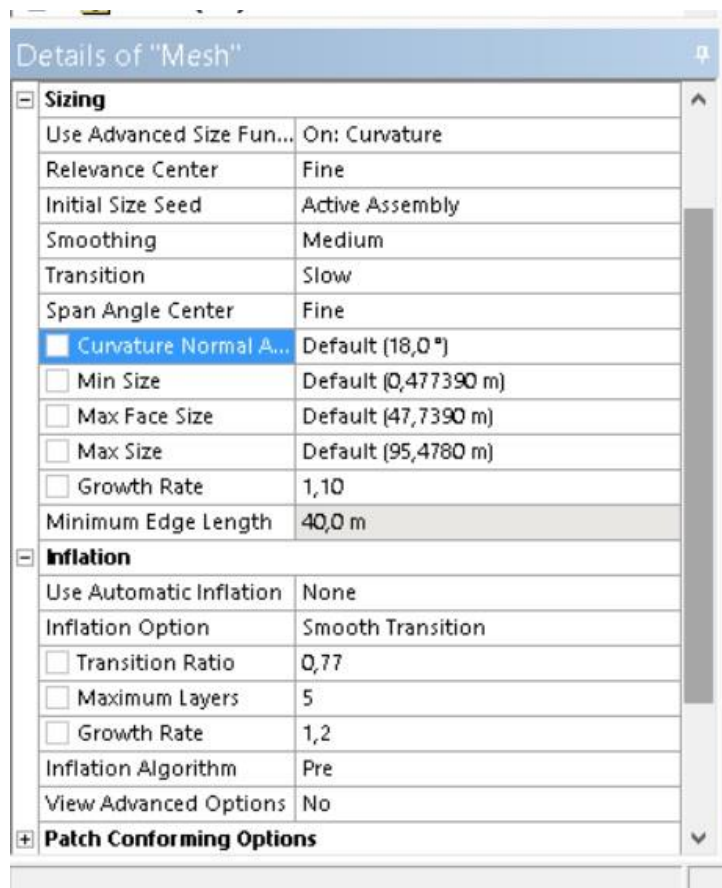
Da bi se predstavilo strujanje vazduha oko objekta sa zadovoljavajućom tačnošću najvažnije je da se adekvatno predstavi odvajanje vazdušnog toka blizu ivica objekta odnosno uglova zgrade i krova. Zato je u ovim regionima, u blizini uglova objekta i krova neophodno formirati kvalitetnu mrežu (*fine grid*) pa se u preporukama nailazi na podatak da je neophodno minimum 10 elemenata mreže na jednoj fasadnoj ravni (Mochida i dr. 2002) da bi se dovoljno dobro moglo predstaviti odvajanje vazdušnog toka kod gornjih uglova zgrade. Ovo potvrđuju i rezultati COST C14 akcije (Franke 2004) kojom su date preporuke za primenu CFD-a u istraživanjima dejstva vetra na zgrade. U ovim preporukama dimenzije elementa na fasadi ne treba da budu veće od 1/10 širine zgrade.

Što se tiče oblika ćelije mreže izabran je heksaedar jer unosi manju grešku odsecanja (*truncation error*) i pokazuje bolju konvergenciju.



Slika 5.8. Vertikalni presek kroz domen. Različita gustina mreže duž domena

Za svaku od 4 grupe modela primenjen je isti pristup vezan za kvalitet mreže. Obzirom da su predmet interesovanja ovog istraživanja pritisci i koeficijenti pritisaka na samoj zgradi, konačna mreža je mnogo veće gustine od gore preporučenih. Urađene su analize i dobijeni rezultati za niz uzastopnih mreža gde je odnos veličine ćelija dve uzastopne mreže bio 1,3:1 (odnosi se na stranicu ćelije) (Freziger i Perić 2002).



Slika 5.9. Zadati parametri koji opisuju kvalitet mreže (preprocessing - mesh set-up parameters)

Veličina elemenata inicijalne mreže koja je zadana je 5 m na svim fasadama i krovu objekta ali i celom prvom poddomenu, a potom su elementi mreže smanjivani i urađeni su modeli sa veličinom elemenata 4 m, 3 m, 2.25 m, 1.7 m, 1.3 m, 1 m i 0.8 m na fasadama i krovu objekta. Na ovaj način ukupan broj elemenata je porastao ali je ovo, takođe, doprinelo i kvalitetu analize i pouzdanijim rezultatima.

Tabela 5.7. Broj elemenata mreže za različite grupe modela

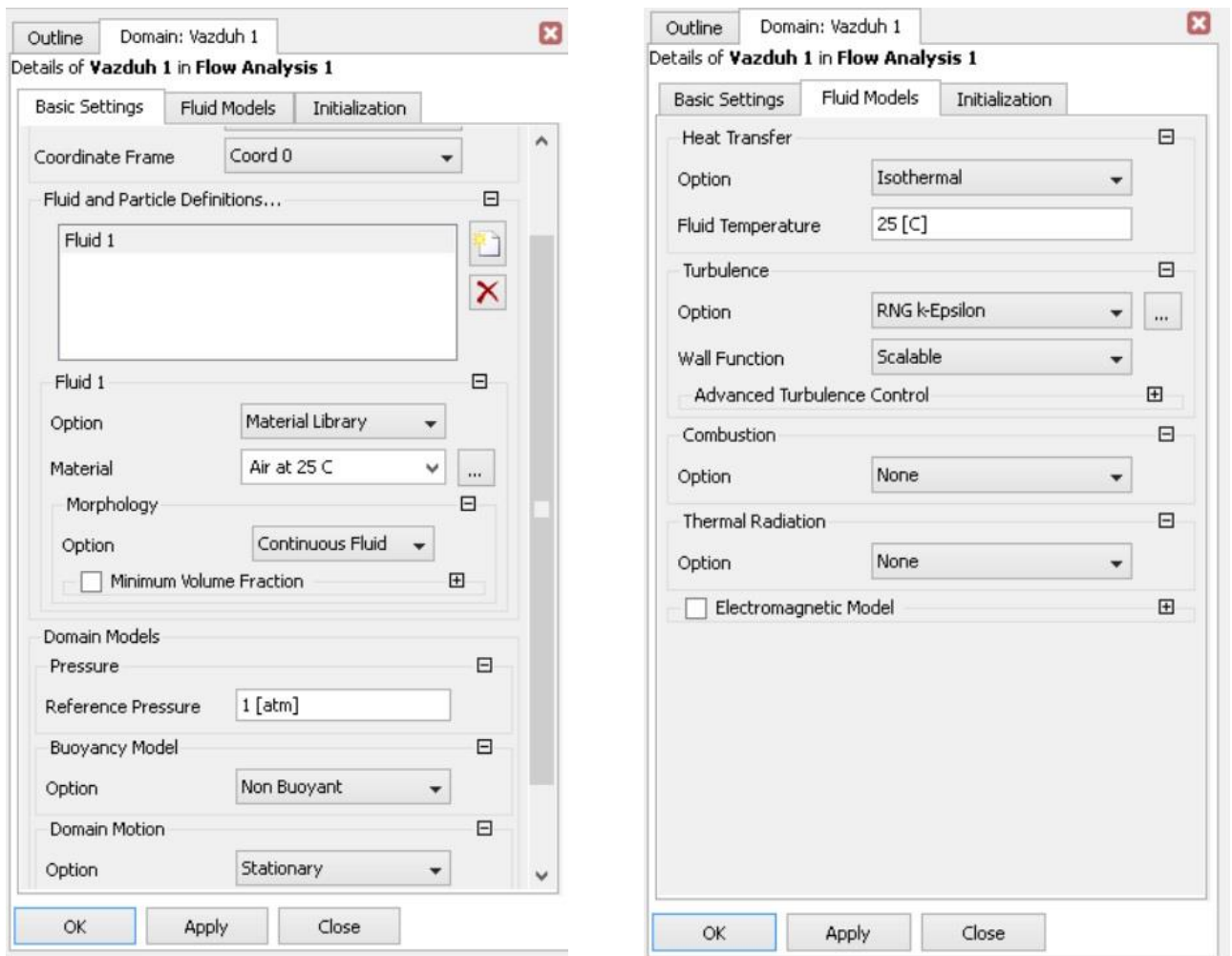
Veličina elementa mreže u regionu od interesa	Položaj zgrade u odnosu na pravac delovanja vetra			
	0°	15°	30°	45°
	Broj elemenata mreže			
<b>5 m</b>	~120.000	~450.000	~75.000	~90.000
<b>4 m</b>	~130.000	~530.000	~90.000	~140.000
<b>3 m</b>	~210.000	~650.000	~150.000	~170.000
<b>2.2 m</b>	~430.000	~810.000	~320.000	~270.000
<b>1.7 m</b>	~850.000	~1.100.000	~610.000	~540.000
<b>1.3 m</b>	~2.000.000	~1.900.000	~1.350.000	-
<b>1 m</b>	~ 4.000.000	~3.400.000	~2.900.000	-
<b>0.75 m</b>	-	~7.300.000	~5.600.000	-

Za sve generisane mreže, parametri važni za kvalitet mreže su isti i neki od njih su prikazani na slici 5.9.

U tabeli 5.7 dat je pregled ukupnog broja elemenata mreže kod svih grupa modela (A, B, C i D) i to za sve gustine mreža.

### **5.4.3 Turbulentni model**

Pregled modela turbulencije koji su korišćeni u okviru ove doktorske disertacije dati su u poglavljima od 5.3.1 do 5.3.4. Prilikom odluke koji od modela turbulencije odabrati i primeniti da bi se dobili pritisci odnosno koeficijenti pritisaka usled dejstva vetra na fasadne i krovnu ravan objekta pregledom literature i novijih istraživanja odabran je *RNG k- $\epsilon$*  model. Razlog za odabir ovog turbulentnog modela jeste da je u više istraživanja potvrđeno da se njegovom primenom dobijaju najprihvatljivije vrednosti pritisaka na objekat (*Stathopoulos* i *Baniotopoulos* 2007, *Unhale* 2004). Međutim, iako na izgled jednostavne geometrije domena i analiziranog objekta, u njemu analiza *RNG k- $\epsilon$*  modelom nije uspešno realizovana iako su sve aktuelne preporuke ispoštovane. Ipak, autor je insistirao na primeni ovog modela obzirom da su predmet istraživanja ove faze doktorske disertacije bili pritisci usled dejstva vetra. Rešenje je nađeno tako što je dužina domena znatno uvećana u odnosu na preporučene (tabele 5.4 i 5.5), posebno deo iza objekta od interesa dok su analize urađene primenom prvo *k- $\omega$*  turbulentnog modela a pritisci dobijeni na taj način poslužili su kao inicijalne vrednosti za dalju analizu koja je podrazumevala sada primenu *RNG k- $\epsilon$*  modela. Tako da su za svaku mrežu (5; 4; 3; 2.25; 1.7; 1.3; 1 i 0.75 m) sprovedene po dve analize: prva primenom *k- $\omega$*  i potom na osnovu nje analiza *RNG k- $\epsilon$*  turbulentnim modelom. Na ovaj način su urađene analize i dobijeni rezultati za prve tri grupe modela A (0°), B (15°) i C (30°). Međutim, za grupu modela D odnosno za zgradu koja je pod uglom od 45° u odnosu na pravac dejstva vetra ovo nije bilo moguće. Zato je kod ove grupe modela primenjen *SST k- $\omega$*  model koji se pokazao stabilan prilikom analiza i dao zadovoljavajuće rezultate analiza i oni su prikazani u 5.6.4.



Slika 5.10. Neki od zadatih parametara u CFX-Pre

#### 5.4.4 Granice domena

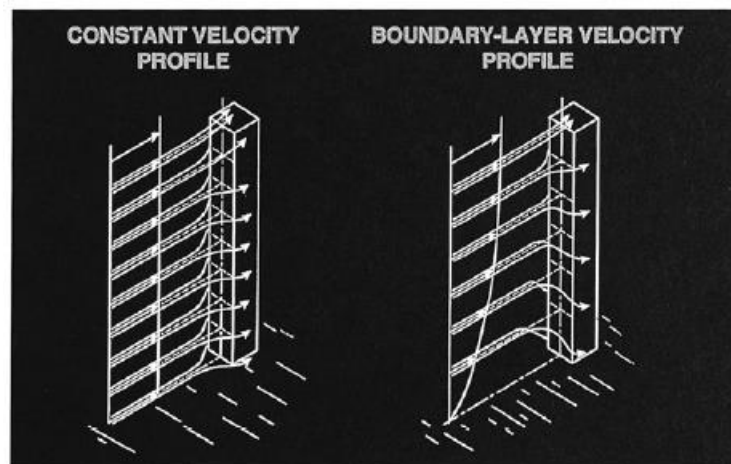
Pored dimenzija domena vrlo je važno da na adekvatan način budu zadate i granice domena jer na taj način se predstavlja uticaj okruženja na domen. Kako način definisanja granica domena može uticati i na rezultate, vrlo je važno da budu odabrane i definisane na pravi način.

U nastavku su opisani granični uslovi usvojeni u analizama sprovedenim u okviru ovog istraživanja.

##### 5.4.4.1 Granični uslovi na ulazu u domen (*Inlet boundary*)

Na ulazu (*Inlet*) u domen treba zadati željeni profil vetra i na početku istraživanja bila je zadata konstantna brzina vetra po visini domena. U kasnijim fazama istraživanja modeliran je i

atmosferski granični sloj, AGS (*atmospheric boundary layer, ABL*) jer se smatra da je uticaj terena važan i da će imati uticaja na rezultate istraživanja (slike 5.11 i 5.13).



Slika 5.11. Profili brzine vetra: (a) konstantan i (b) atmosferski granični sloj (Crosbie i dr. 1998)

Pored adekvatno zadatih graničnih uslova na ulazu u domen vrlo je važno da oni moraju biti u skladu sa izabranim turbulentnim modelom, hrapavošću terena, veličinom domena kao i graničnim uslovima na ostalim granicama domena.

Prilikom modeliranja atmosferskog graničnog sloja za profil srednje brzine vetra  $U_{prof}$  (jednačina 5.41) korišćena je logaritamska jednačina profila terena ispred objekta od interesa uzimajući u obzir hrapavost terena preko dužine hrapavosti  $z_0$ . Kinetička energija turbulencije  $k_{prof}$  (*turbulent kinetic energy*) data je jednačinom 5.42 a njena brzina disipacije  $e_{prof}$  (*turbulent dissipation rate*) jednačinom 5.43. Ove jednačine za definisanje profila vetra predložili su Richards i Hoxey (Richards i dr. 1993.; Blocken i dr. 2007.) za standardni  $k-\varepsilon$  model uz pretpostavke da je tok strujanja vazduha jednodimenzionalan sa konstantnim naponima smicanja, bez viskoznosti i bez normalne komponente brzine.

$$U_{prof} = \frac{U^*}{\kappa} * \ln((z + z_0) / z_0) \quad (6.41)$$

$$k_{prof} = \frac{U^{*2}}{\sqrt{c_\mu}} \quad (6.42)$$

$$e_{prof} = \frac{U^{*3}}{\kappa * (z + z_0)} \quad (6.43)$$

$$U^* = \frac{U_{ref} * \kappa}{\ln((z_{ref} + z_0) / z_0)} \quad (6.44)$$

U prethodnim jednačinama je:

$z$  - koordinata visine,

$U^*$  - brzina u smičućem sloju (*ABL friction velocity*) (jed. 6.44),

$\kappa$  - *von Karman*-ova konstanta ( $\kappa = \sim 0,40 \div 0,42$ ),

$c_\mu$  - konstanta standardnog  $k-\varepsilon$  modela.

Vrednosti konstanti koje se javljaju u prethodnim jednačinama zavise od odabranog modela turbulencije.

Pri odabiru referentne brzine vetra na ulazu u domen, izabrana je brzina koja može dovesti do oštećenja na fasadama. Njena vrednost je:

$$U_{ref} = 50 \text{ m/s}$$

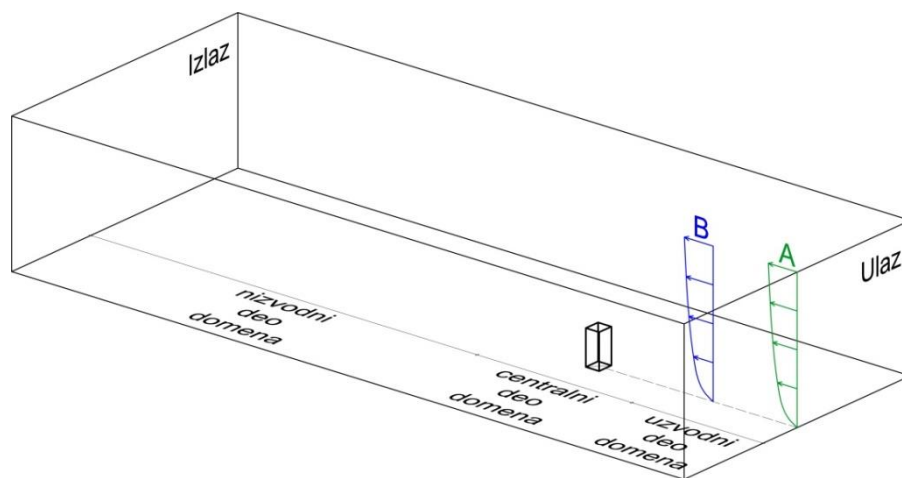
a zadata je na visini:

$$z_{ref} = 75 \text{ m.}$$

Hrapavost tla je zadata preko dužine hrapavosti  $z_0$  (*hydrodynamic roughness length*):

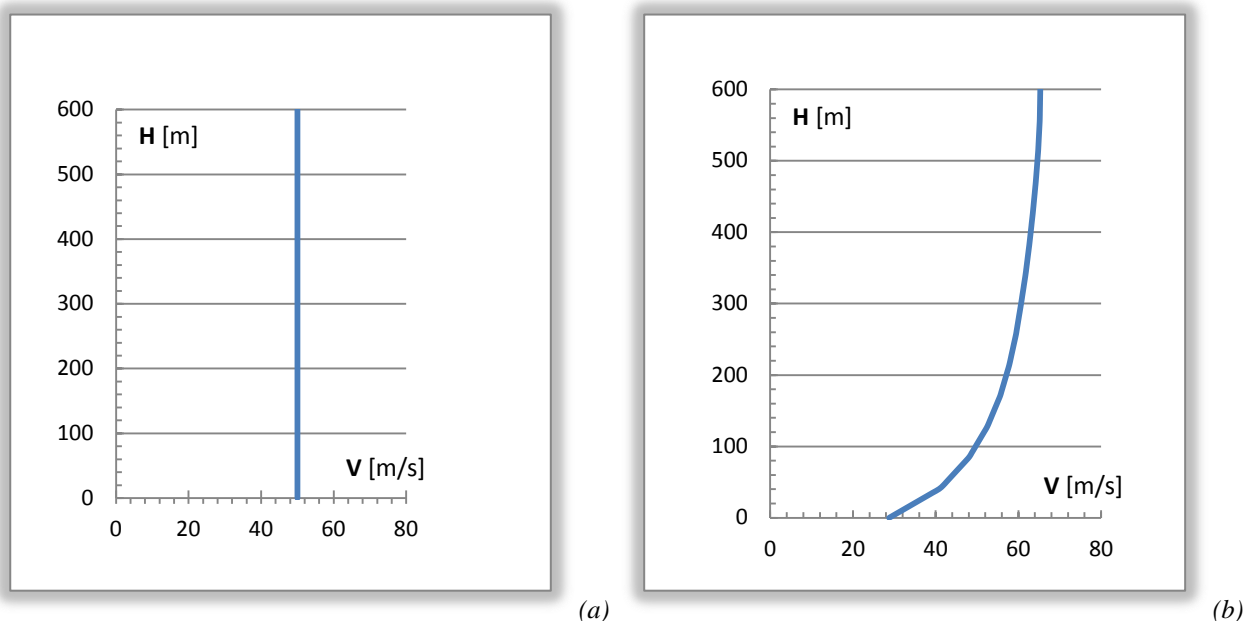
$$z_0 = 0.1 \text{ m}$$

koja mora biti identično zadata kao kod definisanja donje granice domena.



Slika 5.12. Uzvodni, centralni i nizvodni deo domena (A – ulazni profil vetra, B – profil vetra koji deluje na objekat)

Na slici 5.12 je prikazan uzvodni (*upstream*), centralni (*central*) i nizvodni (*downstream*) deo proračunskog domena.



Slika 5.13. Profili brzine vetra na 400m od ulaza u domen: a) konstantna brzina po visini domena i b) brzina sa uticajem atmosferskog graničnog sloja

#### 5.4.4.2 Donja granica domena - tlo (Ground)

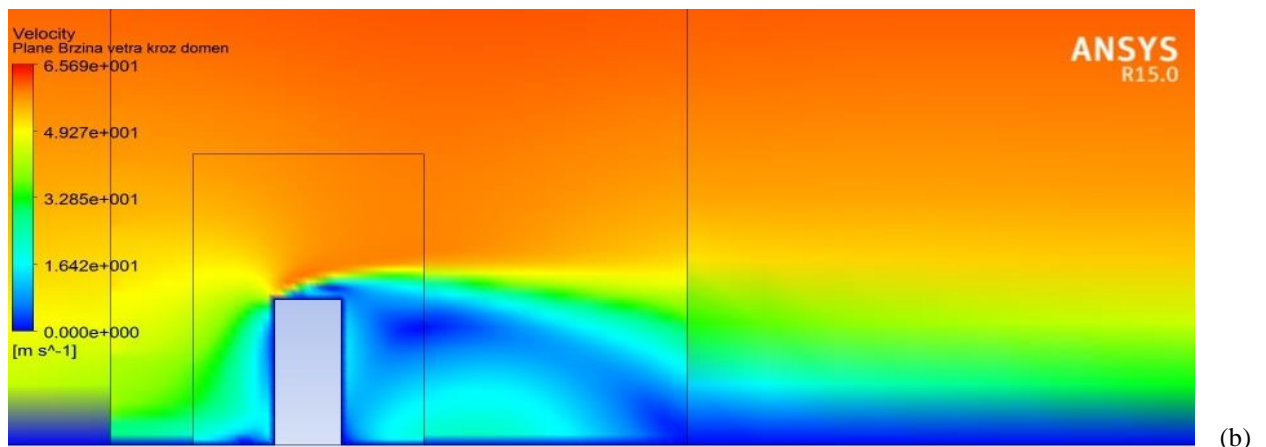
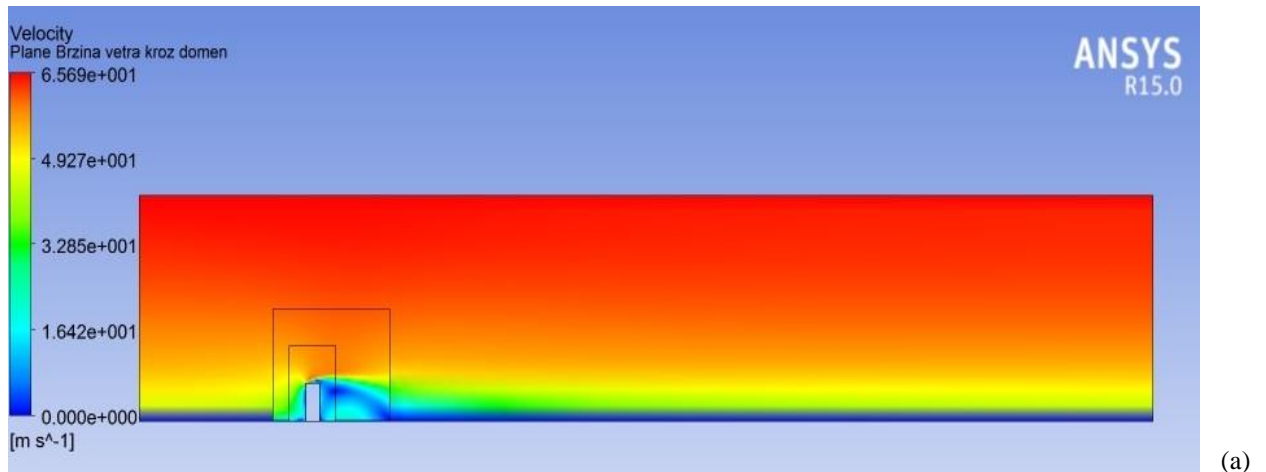
Donja granica domena predstavlja tlo i treba da predstavi uticaj terena na strujanje vazduha u domenu. U komercijalnim CFD softverima se hrapavost površina odnosno zidova zadaje pomoću parametara dužine hrapavosti  $z_0$  (*hydrodynamic roughness length*) ili  $k_s$  (*sandgrain roughness*) gde ova dva parametra imaju međusobnu zavisnost datu relacijom (Richards & Hoxey, 1993)

$$k_s = 28.1 * z_0 \quad (6.45)$$

U sprovedenoj analizi zadata je dužina hrapavosti,  $z_0 = 0.1$  m, koja odgovara drugoj kategoriji terena po standardu SRPS.U.C7.110, SRPS.U.C7.111, SRPS.U.C7.112 i EN 1991-1-4:2005.

Na slici 5.14 prikazan je dobijeni profil brzine vetra kroz domen uz uticaj zadate hrapavosti terena.

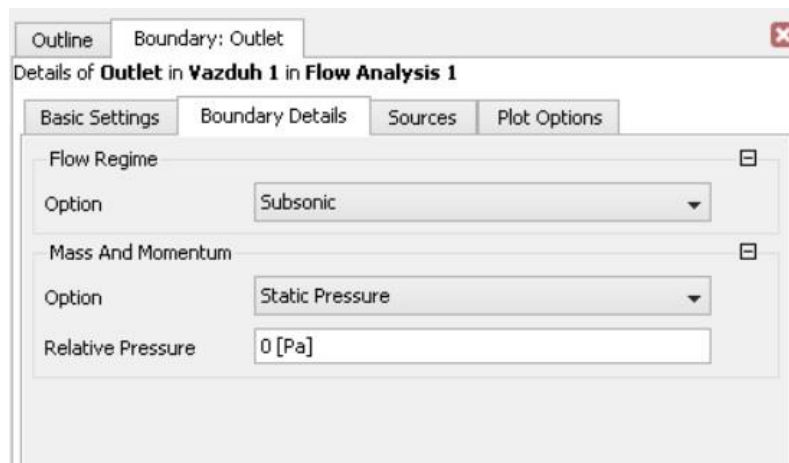




Slika 5.14. Profil brzine vetra: vertikalni presek kroz ceo domen (a);  
vertikalni presek kroz deo domena (b) kod grupe modela A

#### 5.4.4.3 Izlaz iz domena (Outlet)

Izlaz iz domena je granica iza objekta gde vazduh napušta domen i zadata je kao *Outlet*. Ova granica mora biti dovoljno daleko od zone od interesa da ne bi uticala na rezultate odnosno da bi strujni tok ponovo bio ravnoman. Na izlazu iz domena uobicajeno je da gradijenti svih promenljivih budu nula. Primer podešavanja parametara na izlazu iz domena dat je na slici 5.15.



Slika 5.15. Deo zadavanja izlazne granice domena (Outlet).

#### 5.4.4.4 Gornja i bočne granice domena (Top and Lateral boundaries)

Bočne granice domena (*Lateral boundaries*) su usvojene kao simetrične (*Symmetry*). Ovako zadate bočne granice ustvari omogućavaju predstavljanje prostora van ovih granica na isti način kao u samom proračunskom domenu. Ovo je, inače, čest slučaj kada je pravac delovanja vetra paralelan ovim granicama.

Tabela 5.8. Razlika koeficijenata pritiska kada je gornja granica zadata kao Inlet i Simetrija

$C_p$ [%]		$C_p$ (Top boundary: Inlet) Vs (Top Boundary: Symmetry)			Zaključak:
		F5 (Inlet) Vs F5 (Symmetry)	F4 (Inlet) Vs F4 (Symmetry)	F3 (Inlet) Vs F3 (Symmetry)	
Navetrena fasada	max	0.01	0.01	0.01	Za tri upoređene mreže 5, 4 i 3m nema razlike u rezultatima $C_p$ [-] kada je gornja granica: Inlet i Symmetry. Razlika je manja od 1%
	min	-0.03	-0.03	-0.02	
Levi zidl	max	0.28	-0.67	-0.16	
	min	0.00	0.00	0.00	
Zavetrena fasada	max	-0.03	-0.03	-0.03	
	min	-0.03	-0.01	-0.01	
Desni zid	max	0.30	-0.33	-0.18	
	min	0.00	0.00	0.00	
Krov	max	-0.20	0.79	-0.19	
	min	0.00	0.00	0.00	

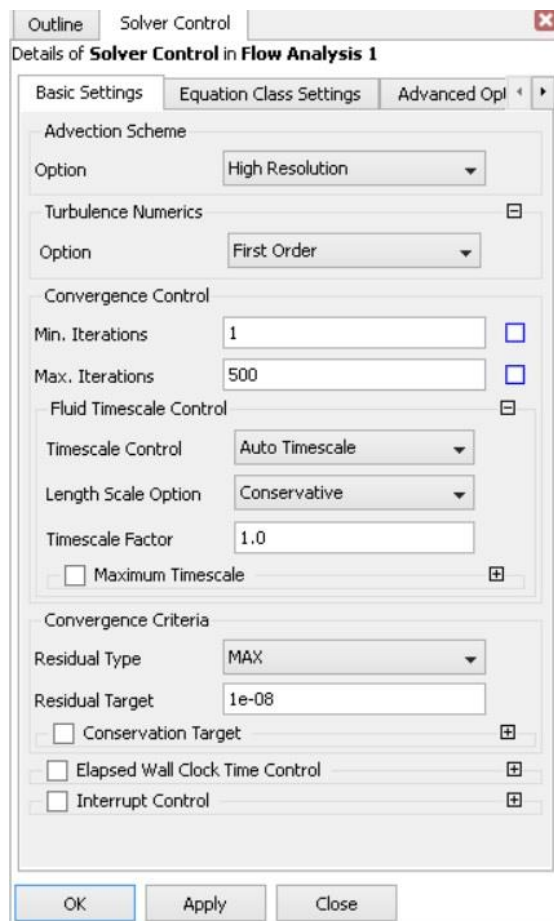
Kod zadavanja gornje granice (*Top boundary*) domena takođe se često koristi opcija simetrija međutim, postoji stav jednog dela istraživača (*Richard & Hoxey, 1993.*) da ova granica treba da bude zadata kao ulaz u domen (*Inlet*) sa profilom vetra kao na ulazu. Iz tog razloga urađena je još jedna preliminarna analiza gde su upoređeni rezultati koeficijenata pritiska za slučaj kada je gornja granica kao ulaz u domen i kao simetrična. Ta analiza

pokazala je da za ovako izolovanu zgradu gde je gornja granica dovoljno daleko od zone od interesa, nema razlike u traženim

vrednostima koeficijenata pritiska na fasadama i krovu objekta, u slučaju kada je gornja granica zadata kao ulaz u domen i kao simetrična granica, odnosno razlike su zanemarljive i iznose manje od 1%.

U okviru ovog istraživanja gornja granica domena je usvajana kao ulaz u domen, a zidovi i krov zgrade su zadati kao glatki (*smooth wall*).

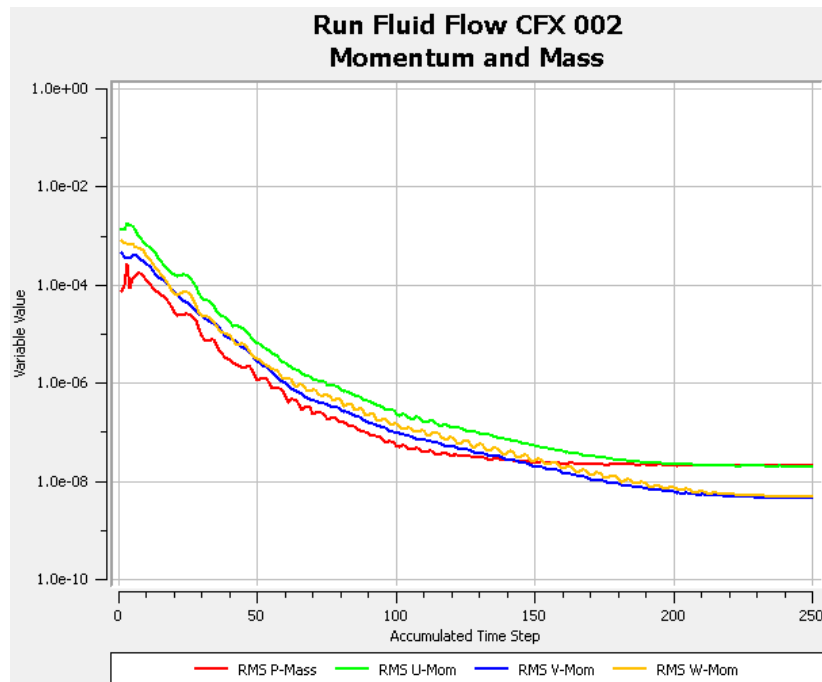
## 5.5 Konvergencija i monitoring konvergencije



Slika 5.16. Neki od zadatih parametara pri definisanju konvergencije

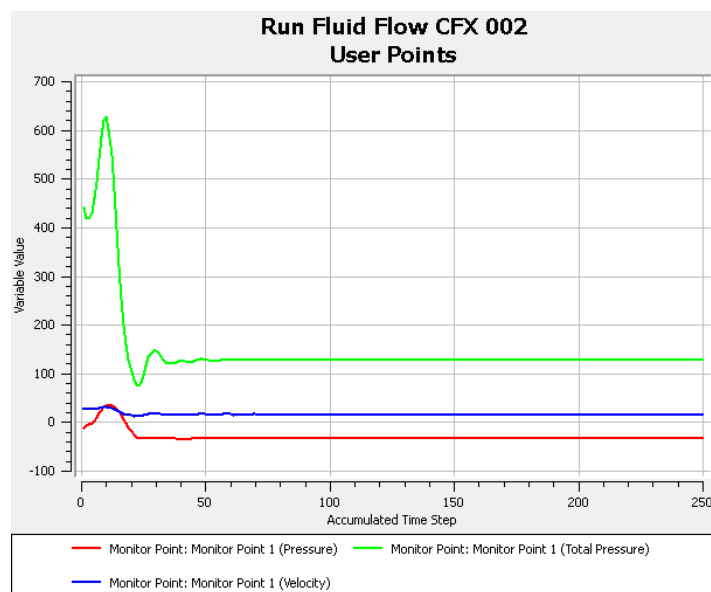
Tokom numeričkih simulacija vrlo je važan proces monitoringa (*monitoring*) odnosno praćenja same konvergencije rešenja. Da bi rezultate numeričkih simulacija smatrali relevantnim a dobijene rezultate dovoljno tačnim morala su da budu ispunjena dva kriterijuma. Prvi, da konvergencija bude zadovoljavajuće tačnosti, u ovom slučaju najmanje  $10^{-4}$ . Ovaj uslov je kod

svih grupa modela bio ispunjen a tačnost je bila čak i veća, čak  $10^{-6}$  za srednje kvadratno odstupanje (RMS) i  $10^{-4}$  za maksimalno kvadratno odstupanje (MAX).



Slika 5.17. Parametri i proces konvergencije rešenja – Primer konvergencije za zgradu grupe A ( $0^\circ$ ), mreža 1,7m

Drugi kriterijum je podrazumevao postavljanje dve do tri tačke za praćenje (*Monitor points*) iza objekta i u njima su praćene vrednosti parametara od interesa a to su pritisak i brzina strujanja (slika 5.18). Tačke za praćenje parametara od interesa postavljene su iza objekta koji je predmet analize jer se tu i očekuju najveće promene i oscilacije izabranih parametara.



Slika 5.18. Primer monitor tačke za zgradu grupe A ( $0^\circ$ ), mreža 1,7m

Kada su vrednosti praćenih parametara stabilizovane tokom niza uzastopnih iteracija (slika 5.18) a pri tom je ispunjen i prvi uslov da je postignuta odgovarajuća tačnost (slika 5.17), rezultati analize su smatrani zadovoljavajućim.

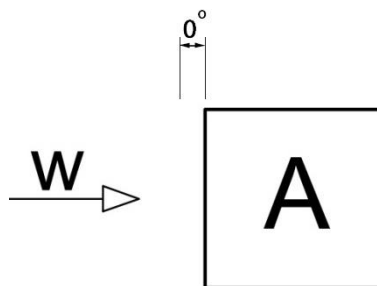
## 5.6 Prikaz rezultata analize

Rezultati dobijeni numeričkim simulacijama prikazani su posebno za svaku grupu modela u nastavku i to, rezultati za grupu modela A ( $0^\circ$ ), B ( $15^\circ$ ), C ( $30^\circ$ ) i D ( $45^\circ$ ) u poglavljima 5.6.1 do 5.6.4, respektivno.

Pri formiranju modela svih grupa uzete su u obzir aktuelne preporuke COST C14 akcije (Franke 2004) da po strani posmatranog objekta treba imati minimum 10 ćelija mreže dok nešto novija istraživanja Arhitektonskog instituta u Japanu (AIJ) (Tominaga 2008) preporučuju gušću mrežu od bar 10 ćelija ( $1/10$  strane objekta) po ivici strane objekta. Na osnovu ovih preporuka za najkrupniju mrežu na fasadi usvojena je ćelija mreže ivice 5 m ili  $1/8$  strane objekta a potom je mreža usitnjavana i to sa faktorom 1.3 do mreže ivice 1 metar a kod nekih modela čak i sitnija.

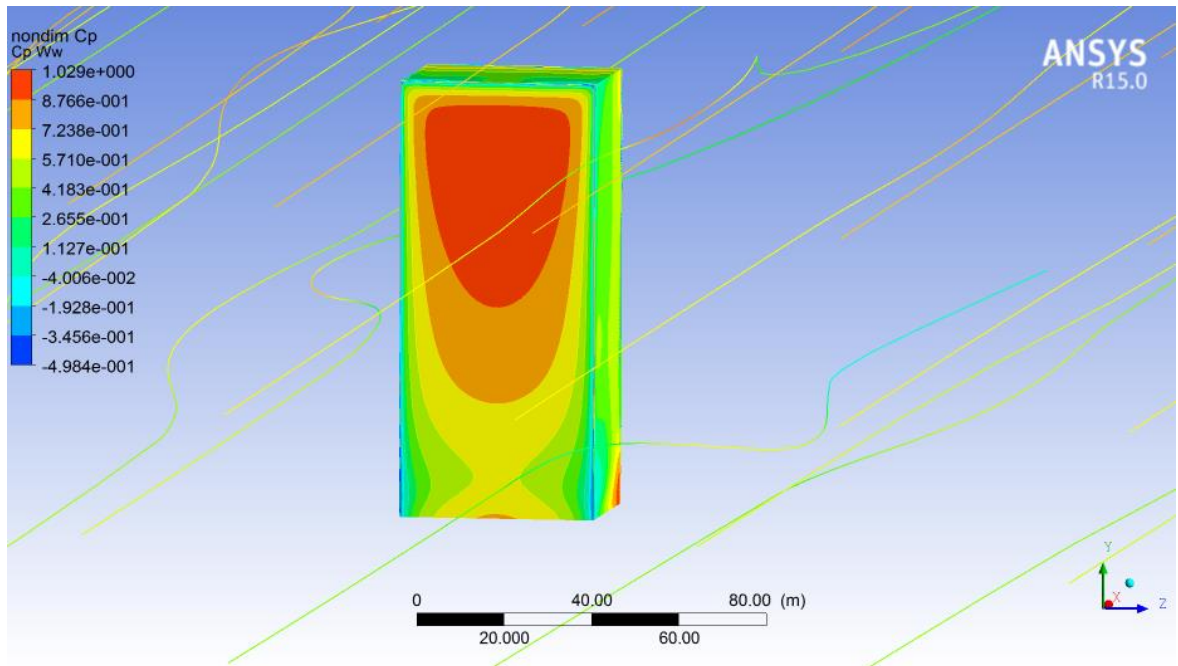
Za svaku grupu modela biće prikazan samo deo rezultata i to na sledeći način. Prvo su grafički prikazane dobijene vrednosti koeficijenta pritiska,  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za mrežu veličine 4 m koja odgovara strožijim AIJ preporukama. Potom je data tabela sa numeričkim vrednostima maksimalnih i minimalnih koeficijenta  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže. Dobijene i prikazane vrednosti koeficijenta pritiska upoređene su u narednoj tabeli gde su odstupanja rezultata dve susedne mreže data u procentima. Zatim su grafički prikazane vrednosti  $C_p$  za mrežu koja je dala najkvalitetnije rezultate. Konačno, koeficijenti pritiska su prikazani grafički po središnjoj liniji navetrene fasade, krova i zavetrene fasade (slika 5.23).

### 5.6.1 Rezultati za grupu modela A – zgrada pod uglom od $0^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra

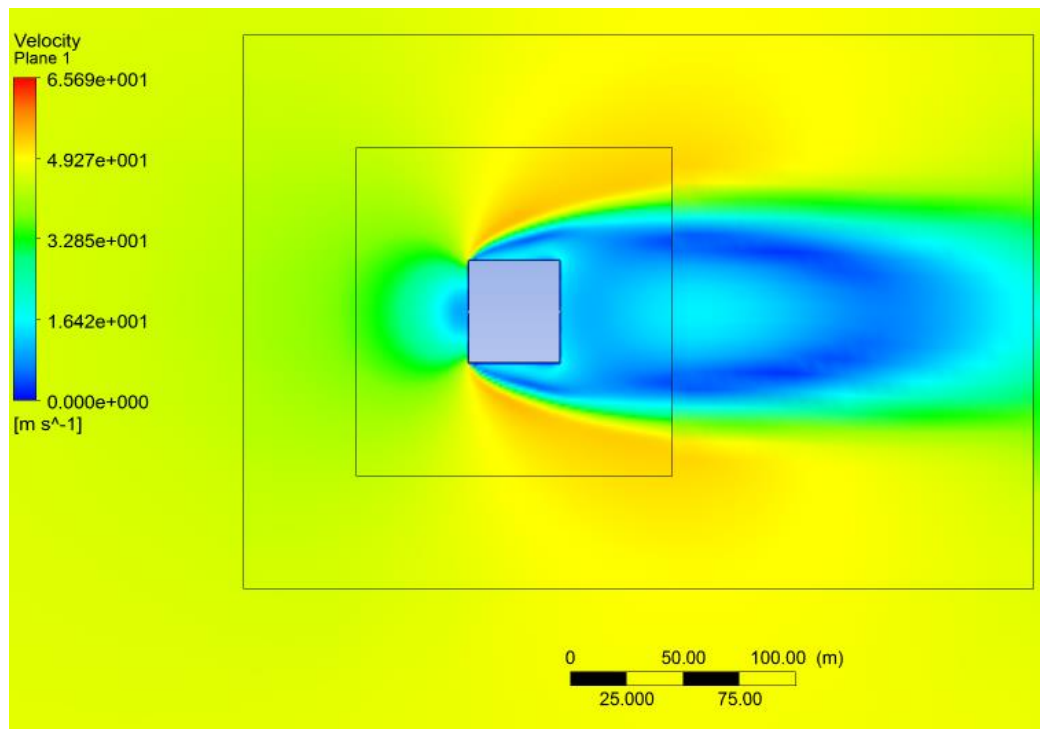


Slika 5.19. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra za grupu modela A

Numeričke simulacije dejstva vetra za grupu modela A, odnosno izolovanu zgradu čija je navetrena fasada paralelna ulazu u proračunski domen (slika 5.19), urađene su za niz usvojenih mreža opisanih prethodno. Na slici 5.20 (a) prikazan je 3D model sa dobijenim koeficijentima pritiska,  $C_p$ , i strujnim linijama, dok je na slici 5.20 (b) prikazana ravan paralelna tlu na visini od 50 m i raspodela brzine vetra oko zgrade u toj ravni.



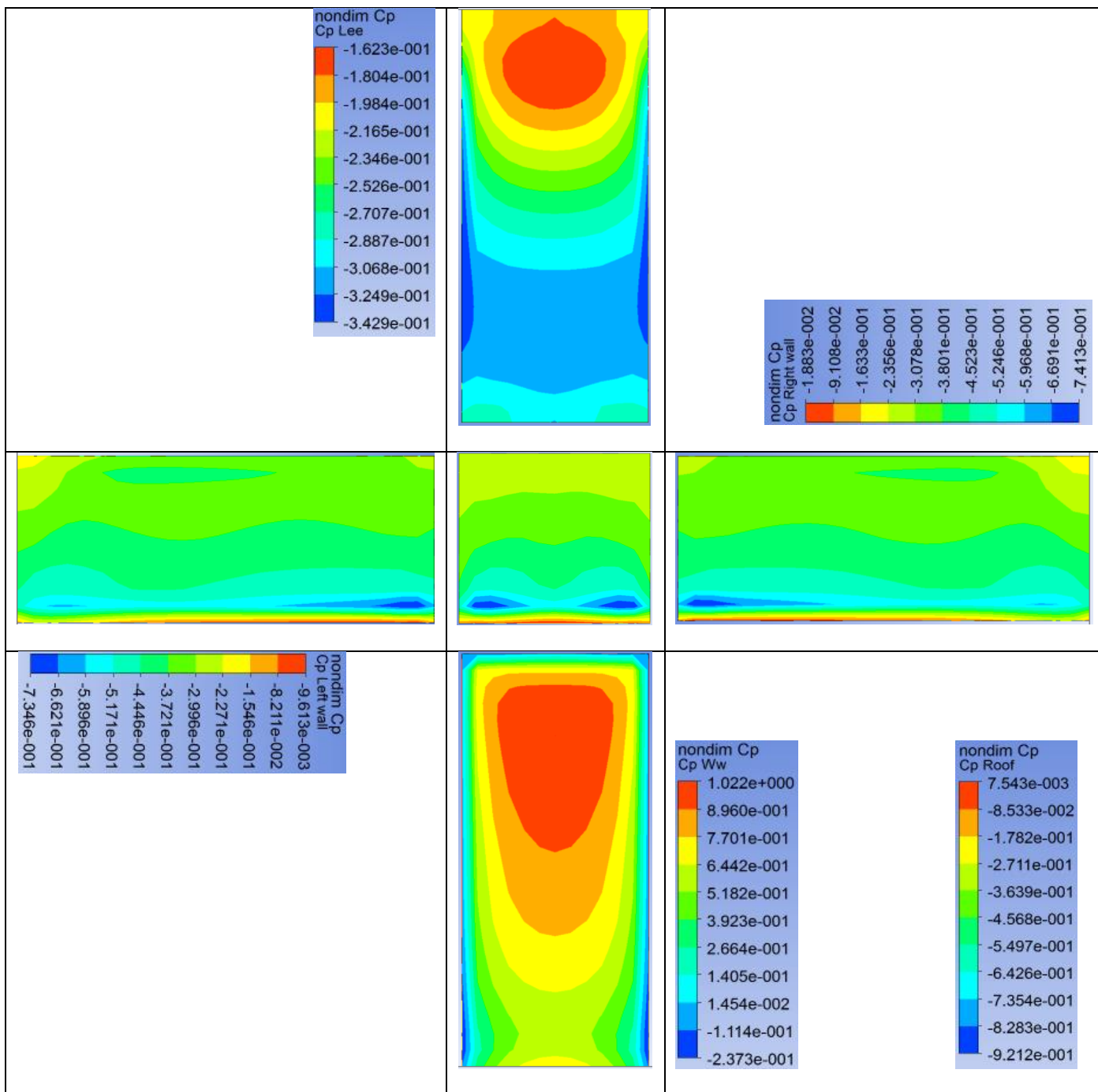
Slika 5.20(a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela A



Slika 5.20(b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela A

### 5.6.1.1 RNG $k-\varepsilon$ turbulentni model

Na slici 5.21 prikazane su dobijene vrednosti koeficijenta pritiska,  $C_p$ , za mrežu veličine 4 m u zoni od interesa, odnosno na fasadama objekta i u najmanjem formiranom poddomenu primenom RNG  $k-\varepsilon$  turbulentnog modela. Izabrana je ova mreža jer odgovara strožijim preporukama Arhitektonskog instituta u Japanu.



Slika 5.21. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 4m (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

Legenda: Ww – navetrena fasada, Lee – zavetrena fasada, Left wall – levi zid, Right wall – desni zid, Roof – krov.



Važno je napomenuti da su urađene analize za niz mreža i to za sledeće veličine ćelije: 5, 4, 3, 2.2, 1.7, 1.25 i 1 m. Obzirom da bi grafički prikaz rezultata za sve analizirane mreže zauzeo mnogo mesta pored prethodno prikazane mreže, rezultati maksimalnih i minimalnih vrednosti  $C_p$  za svaku fasadnu ravan i krov prikazani su u tabeli 5.9. Grafički rezultati za ostale mreže dati su u digitalnom obliku.

Tabela 5.9. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenta pritiska  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela A (RNG k- $\epsilon$  turbulentni model).

$C_p$ [-]		RNG k- $\epsilon$ turbulentni model						
		F5-B5 [m]	F4-B4 [m]	F3-B3 [m]	F2.2-B2.2 [m]	F1.7-B1.7 [m]	F1.25-B1.25 [m]	F1-B1 [m]
Broj elemenata mreže		120*10 <sup>3</sup>	130*10 <sup>3</sup>	210*10 <sup>3</sup>	430*10 <sup>3</sup>	850*10 <sup>3</sup>	2050*10 <sup>3</sup>	4000*10 <sup>3</sup>
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Navetrena fasada	max	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03
	min	-0.21	-0.24	-0.29	-0.39	-0.42	-0.46	-0.50
Levi zid	max	0.02	-0.01	-0.04	-0.11	-0.16	-0.21	-0.24
	min	-0.74	-0.73	-0.75	-0.75	-0.76	-0.76	-0.76
Zavetrena fasada	max	-0.16	-0.16	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.18
	min	-0.33	-0.34	-0.36	-0.39	-0.41	-0.43	-0.44
Desni zid	max	0.02	-0.02	-0.03	-0.09	-0.16	-0.21	-0.24
	min	-0.74	-0.74	-0.75	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76
Krov	max	0.02	0.01	-0.03	-0.09	-0.14	-0.19	-0.22
	min	-0.91	-0.92	-0.89	-0.89	-0.89	-0.88	-0.88

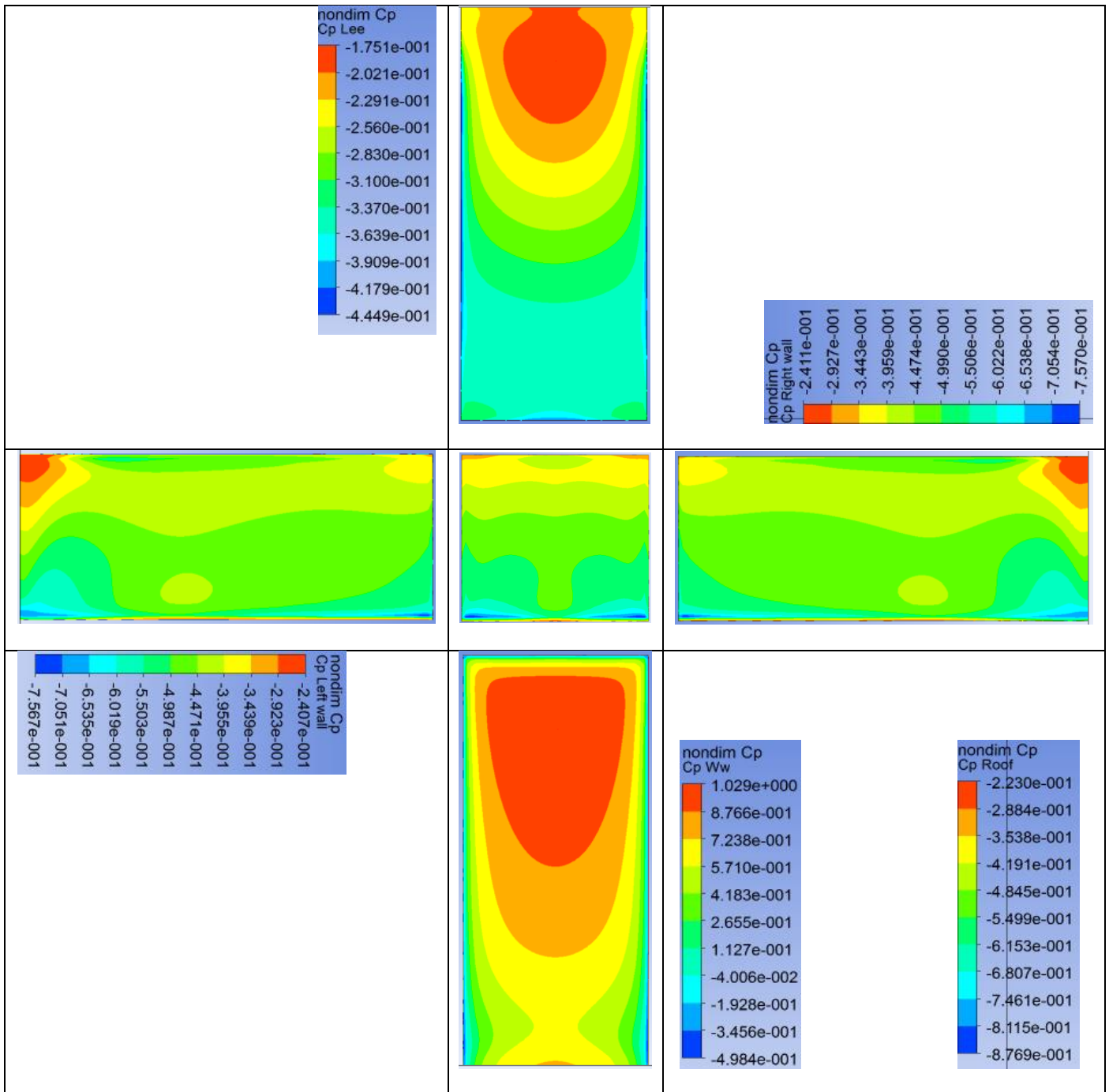
Dobijeni rezultati maksimalnih i minimalnih vrednosti koeficijenta pritiska za sve fasadne ravni i krov objekta, su upoređeni i to uvek za dve susedne mreže, i prikazani u tabeli 5.10.

Tabela 5.10. Odstupanja [%] koeficijenta pritiska  $C_p$  za uzastopne analizirane mreže

$C_p$ [%]		(A) Vs (B) F5 Vs F4	(B) Vs (C) F4 Vs F3	(C) Vs (D) F3 Vs F2.2	(D) Vs (E) F2.2 Vs F1.7	(E) Vs (F) F1.7 Vs F1.25	(F) Vs (G) F1.25 Vs F1
Navetrena fasada	max	-0.17	-0.09	-0.24	-0.13	-0.21	-0.06
	min	-10.97	-18.51	-24.43	-7.20	-10.52	-6.88
Levi zid	max	-336.14	-73.42	-67.60	-28.02	-27.09	-11.66
	min	0.37	-1.65	0.26	-1.55	0.14	-0.13
Zavetrena fasada	max	0.85	-2.51	-2.00	-1.37	-0.87	-0.77
	min	-2.79	-4.84	-7.05	-6.10	-4.15	-3.17
Desni zid	max	-209.99	-42.58	-64.41	-40.76	-26.83	-11.84
	min	-0.36	-0.95	-0.99	-0.23	0.21	-0.13
Krov	max	109.48	-124.57	-65.61	-36.22	-25.87	-15.34
	min	-0.69	3.30	0.65	0.02	1.13	-0.11

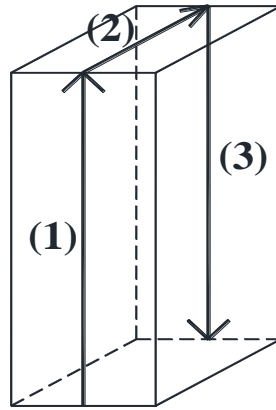
Analizom rezultata prikazanih na slikama 5.20(b) i 5.21 i u tabelama 5.9 i 5.10 zaključeno je da:

- vrtložni trag iza objekta je simetričan;
- na svim fasadnim ravnima izuzev navetrene (*windward wall*), dejstvo vetra za sve analizirane mreže jeste sišuće. Ovo ne važi jedino za mrežu veličine 5 m, koja je krupnija od preporučenih;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.24);
- na krovu je dominantno sišuće dejstvo vetra;
- na navetrenoj fasadi dominantno je pritiskujuće dejstvo vetra. Međutim, u uzanim zonama prema bočnim zidovima i prema krovnoj ravni javlja se sišuće dejstvo vetra. Širina ovih zona uglavnom je oko 0.5 m ( $B/80$ , gde je  $B$  – širina fasade), dok je maksimalna širina  $\sim 2$  m ( $\sim B/20$ ) i javlja se u donjoj petini navetrene fasade, uz bočne zidove;
- maksimalne vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritisaka,  $C_p$  [-] na navetrenoj strani su izuzetno stabilne pri promeni veličine mreže;
- uočeno je da se kod mreža krupnijih od AIJ preporuka, pa i mreže formirane po AIJ preporukama na krovnoj ravni, pored sišućeg dejstva vetra, u uzanoj zoni prema navetrenoj strani, može se uočiti i pritiskujuće dejstvo vetra. Kod sitnijih mreža cela krovna ravan je izložena samo sišućem dejstvu vetra.
- najstabilnije vrednosti koeficijenata pritisaka između svih susednih mreža jesu na zavetrenoj (*leeward*) fasadi;
- najveća odstupanja maksimalnih koeficijenata pritiska između dve susedne mreže jeste na levom i desnom zidu (čak  $\sim 300\%$ ), ali su vrednosti  $C_p$  reda veličine  $10^{-2}$  tako da ovo nije bilo od velikog značaja;
- najbolje ukupno slaganje za sve fasadne zidove i krov jeste kod mreža veličine elemenata 1.25 i 1 m, pa se one smatraju najkvalitetnijim a rezultati najpouzdanijim u ovoj analizi (slika 5.22).

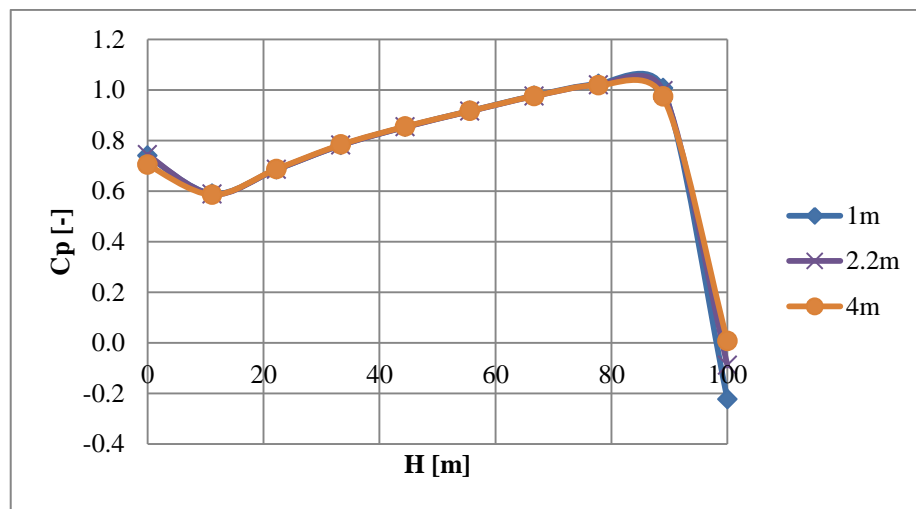


Slika 5.22. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 1m (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).

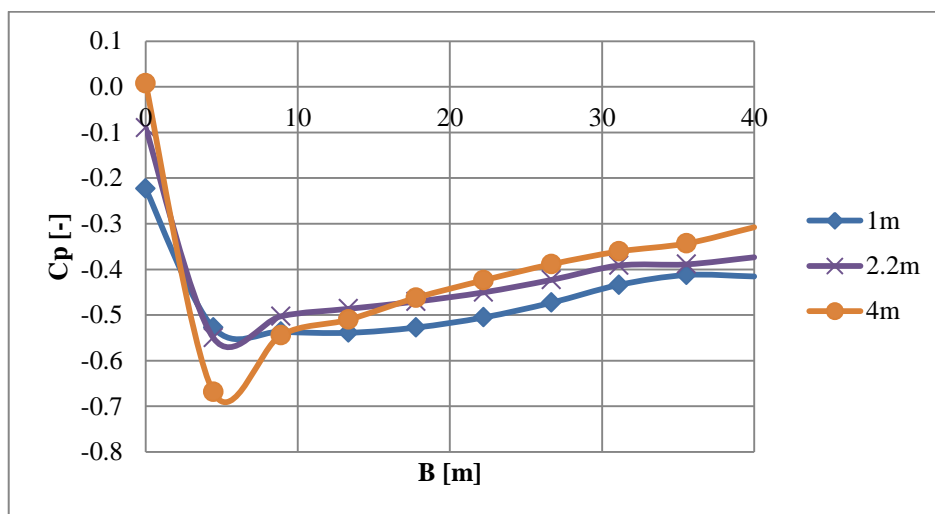
Na slikama 5.24, 5.25 i 5.26 prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritiska,  $C_p$  po središnjoj liniji navetrene fasade, krova i zavetrene fasade (slika 5.23), respektivno za izabrane mreže 1, 2.2 i 4 m, zbog preglednosti. Podaci za sve analizirane mreže dati su na priloženom disku i numerički i grafički.



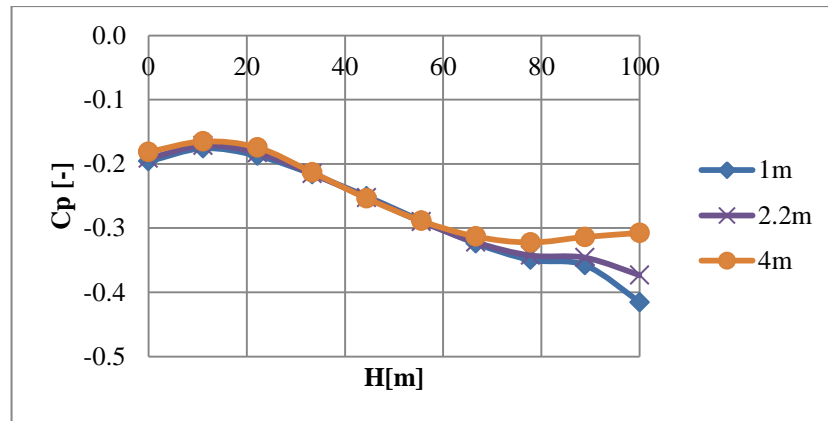
Slika 5.23. Središnja linija navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3)



Slika 5.24. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m



Slika 5.25. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu za mreže 1, 2.2 i 4m



Slika 5.26. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

### 5.6.1.2 SST turbulentni model

Na slikama 5.21 i 5.22 i tabelama 5.9 i 5.10 prikazani su rezultati dobijeni primenom RNG  $k-\varepsilon$  turbulentnog modela. Analize sa istim ulaznim parametrima ali primenom SST turbulentnog modela urađene su a dobijeni koeficijenti pritiska,  $C_p$  [-] i njihova odstupanja za susedne analizirane mreže prikazani su u tabelama 5.11 i 5.12. Posle tabelarnog prikaza rezultata na slici 5.27 grafički su prikazani koeficijenti pritiska za najsitniju analiziranu mrežu a nakon toga prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritiska,  $C_p$  po srednjoj liniji navetrene fasade, krova i zavetrene fasade (slika 5.28, 5.29 i 5.30), respektivno za izabrane mreže 1, 2.2 i 4 m, zbog preglednosti. Podaci za sve analizirane mreže dati su u digitalnom obliku, i numerički i grafički.

Tabela 5.11. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritiska  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela A (SST turbulentni model)

$C_p$ [-]		SST turbulentni model						
		F5-B5	F4-B4	F3-B3	F2.2-B2.2	F1.7-B1.7	F1.25-B1.25	F1-B1
Broj elemenata mreže		120*10 <sup>3</sup>	130*10 <sup>3</sup>	210*10 <sup>3</sup>	430*10 <sup>3</sup>	850*10 <sup>3</sup>	2050*10 <sup>3</sup>	4000*10 <sup>3</sup>
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Navetrena Fasada	max	0.93	0.94	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
	min	-0.23	-0.24	-0.30	-0.40	-0.41	-0.45	-0.47
Levi zid	max	-0.12	-0.14	-0.16	-0.24	-0.25	-0.28	-0.29
	min	-1.00	-0.96	-0.91	-0.89	-0.83	-0.79	-0.75
Zavetrena Fasada	max	-0.19	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18
	min	-0.36	-0.37	-0.38	-0.39	-0.41	-0.44	-0.45
Desni zid	max	-0.11	-0.15	-0.16	-0.20	-0.25	-0.28	-0.29
	min	-0.97	-0.98	-0.91	-0.86	-0.83	-0.79	-0.75
Krov	max	-0.14	-0.15	-0.17	-0.21	-0.24	-0.26	-0.28
	min	-1.07	-1.07	-1.01	-0.96	-0.91	-0.86	-0.83

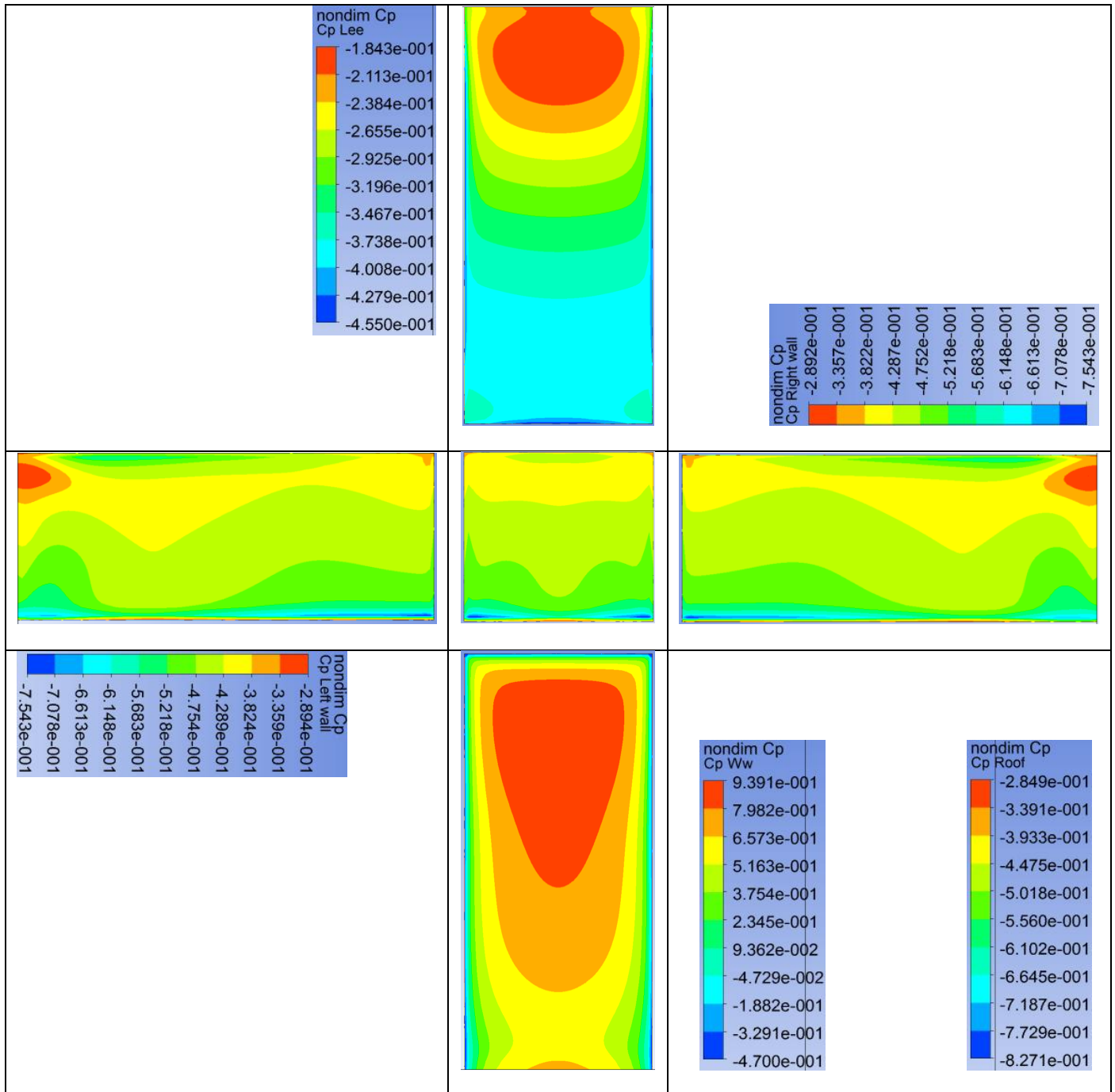
Tabela 5.12. Odstupanja [%] koeficijentata pritiska  $C_p$  za susedne mreže

$C_p$ [%]		(A) Vs (B)	(B) Vs ©	(C)Vs (D)	(D) Vs (E)	(E) Vs (F)	(F) Vs (G)
		F5 Vs F4	F4 Vs F3	F3 Vs 2.2	F2.2 Vs F1.7	F1.7 Vs F1.25	F1.25 Vs F1
Navetrena fasada	max	-0.19	0.12	-0.09	-0.10	-0.20	-0.05
	min	-5.48	-19.94	-24.31	-2.99	-7.30	-5.10
Levi zid	max	-10.61	-15.18	-30.83	-5.61	-10.45	-3.87
	min	3.48	5.28	2.18	8.20	5.27	4.16
Zavetrena fasada	max	0.63	0.16	0.82	0.19	-0.03	0.02
	min	-2.31	-3.55	-3.28	-4.91	-5.08	-3.94
Desni zid	max	-29.70	-4.55	-21.65	-18.29	-10.35	-3.84
	min	-1.00	6.95	5.65	4.56	5.09	4.17
Krov	max	-6.08	-12.73	-17.99	-13.39	-9.98	-7.37
	min	0.33	6.21	4.76	5.25	5.80	4.27

Analizom rezultata dobijenih primenom SST turbulentnog modela, za zgradu postavljenu pod uglom od  $0^0$  u odnosu na ulaznu ravan domena, zaključeno je sledeće:

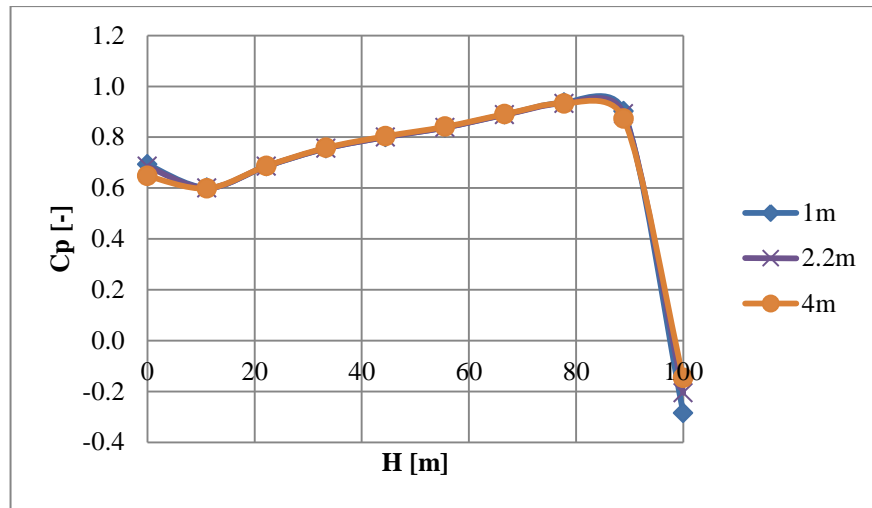
- na svim fasadnim ravnima i krovu analiziranog objekta, osim direktno navetrene fasade, javlja se isključivo sišuće dejstvo vetra za sve analizirane mreže;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.28);
- na direktno navetrenoj fasadi pored pritiskujućeg dejstva vetra, u uzanim zonama prema bočnim zidovima i krovu objekta javlja se i sišuće dejstvo vetra. Ove zone širine su od 0.5 do 1 m ( $\sim B/80$  do  $\sim B/40$ ) u gornjoj polovini zgrade, a pri dnu objekta nešto veće širine, od 1 do 1.5 m ( $\sim B/60$  do  $\sim B/40$ ). Prema krovu objekta širina zone gde se javlja sišuće dejstvo vetra je oko 0.5 m ( $\sim B/80$ ).
- vrednosti maksimalnog bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  na navetrenoj strani objekta pokazale su se izuzetno stabilnim za sve analizirane mreže. Odstupanja su ispod 0.2%;
- vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenta pritiska,  $C_p$  na zavetrenoj fasadi takođe pokazuju izuzetnu stabilnost za sve analizirane mreže;
- primenom SST turbulentnog modela vrednosti  $C_p$  [-] na krovu objekta su mnogo stabilnije i manja su odstupanja između susednih mreža (maksimum 18%) dok su odstupanja kod RNG  $k-\varepsilon$  modela bila i do 125%;

- najbolje slaganje je između mreža sa veličinom elementa 1.25 i 1 m (manje od 5%) pa se one smatraju u ovoj analizi i najkvalitetnijim, a rezultati najpouzdanijim (slika 5.27).

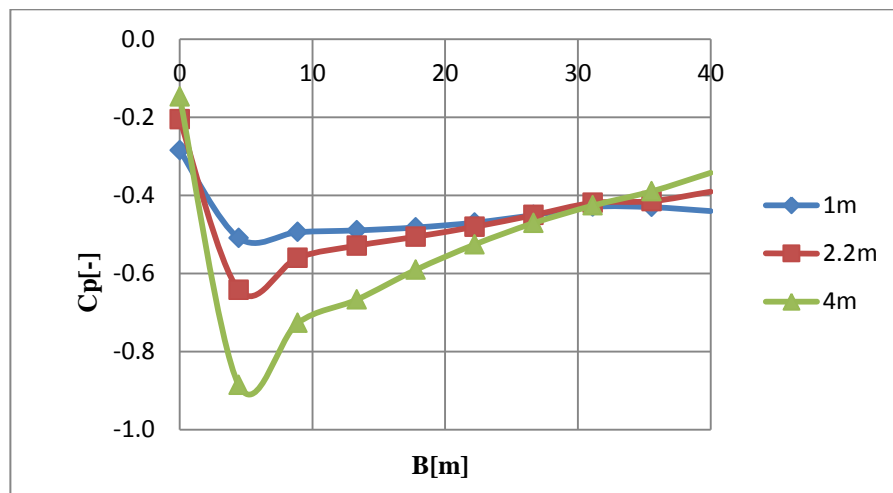


Slika 5.27. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 1 m (SST turbulentni model).

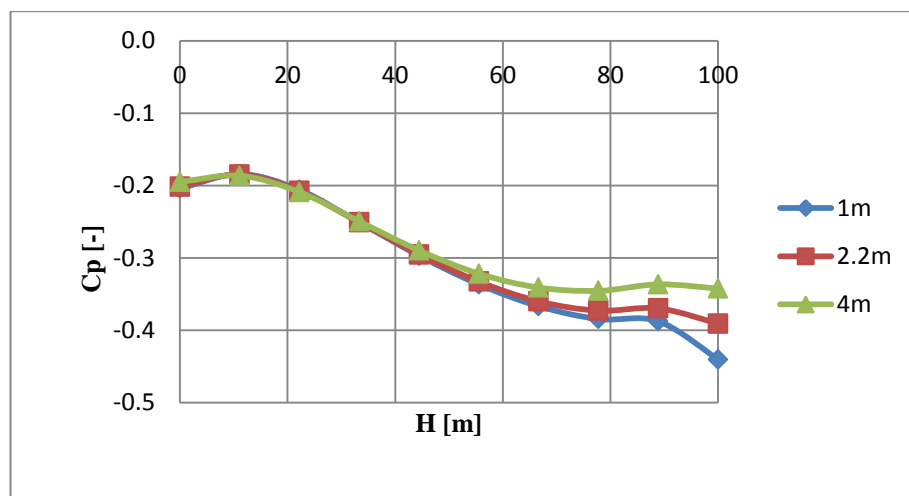




Slika 5.28. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



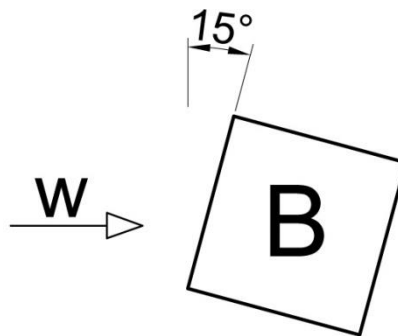
Slika 5.29. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m



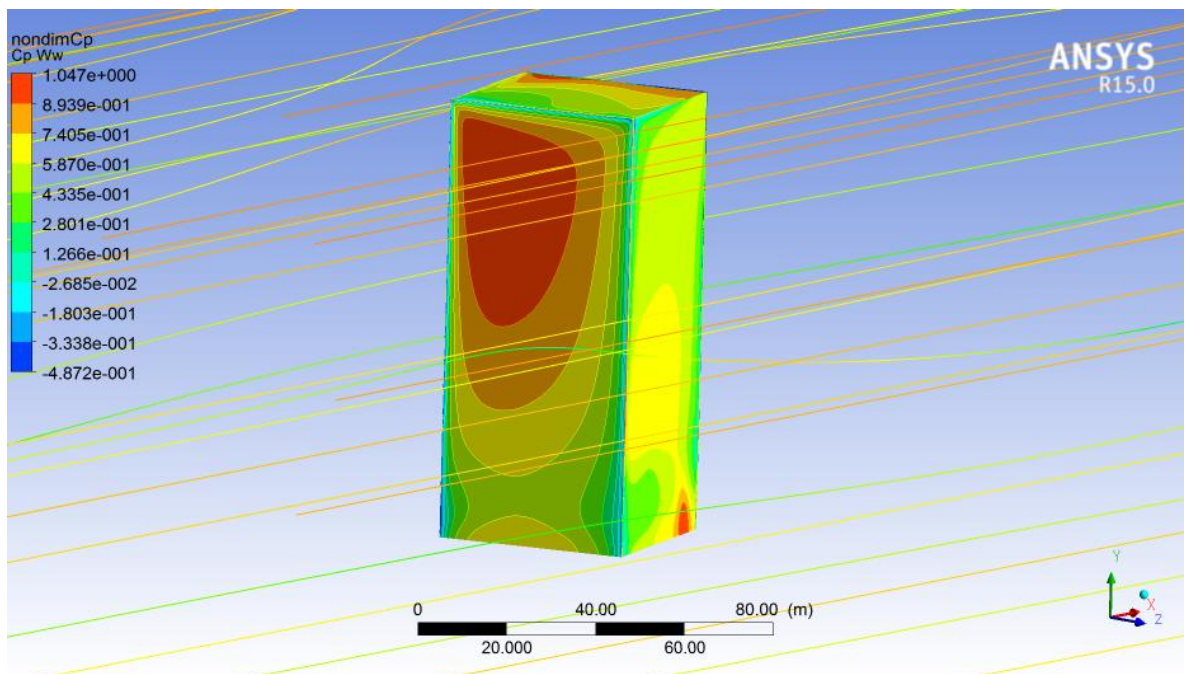
Slika 6.30. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m

### 5.6.2 Rezultati za grupu modela B – zgrada pod uglom od $15^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra

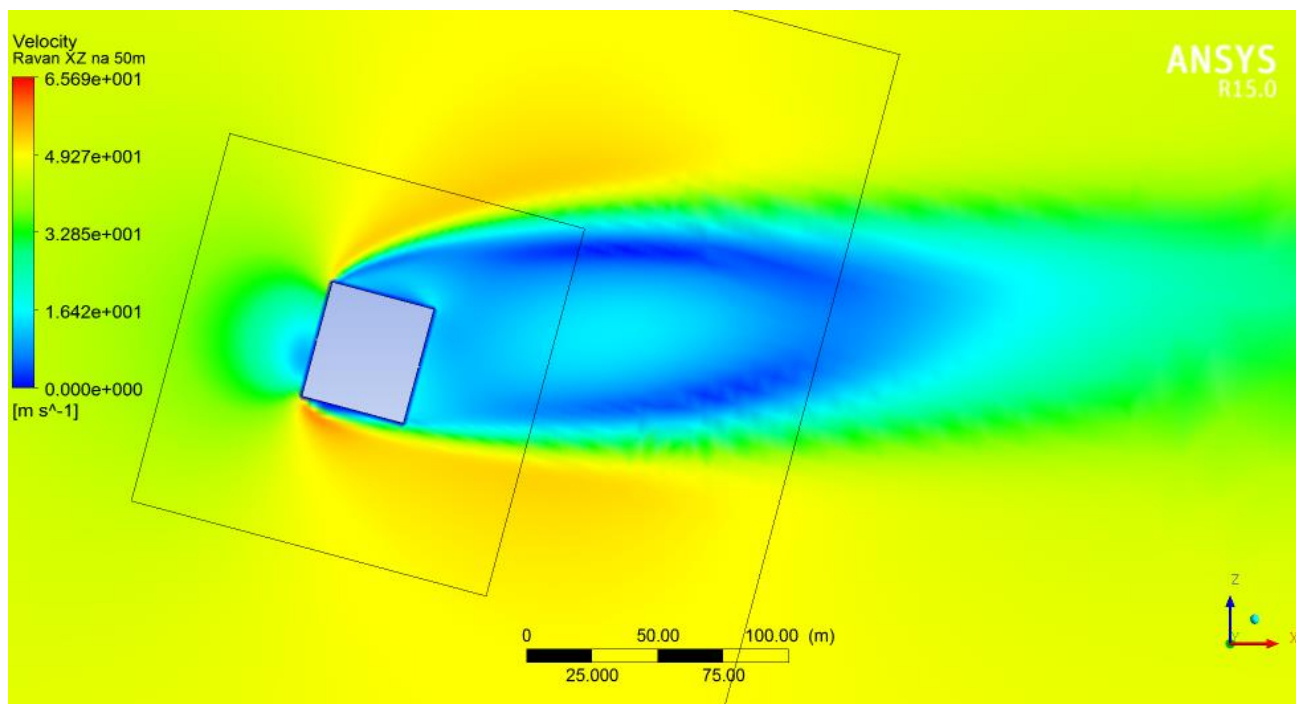
Grupa modela B podrazumevala je izolovanu zgradu u domenu čija navetrena fasada sa ulaznom ravni domena formira ugao od  $15^\circ$ , slika 5.31. Na slici 5.32 (a) prikazan je deo proračunskog domena sa 3D modelom i dobijenim koeficijentima pritiska,  $C_p$ , i strujnim linijama, dok je na slici 5.32 (b) prikazana ravan paralelna tlu na visini 50 m i raspodela brzine vetra oko zgrade u toj ravni.



Slika 5.31. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela B.



Slika 5.32 (a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela B

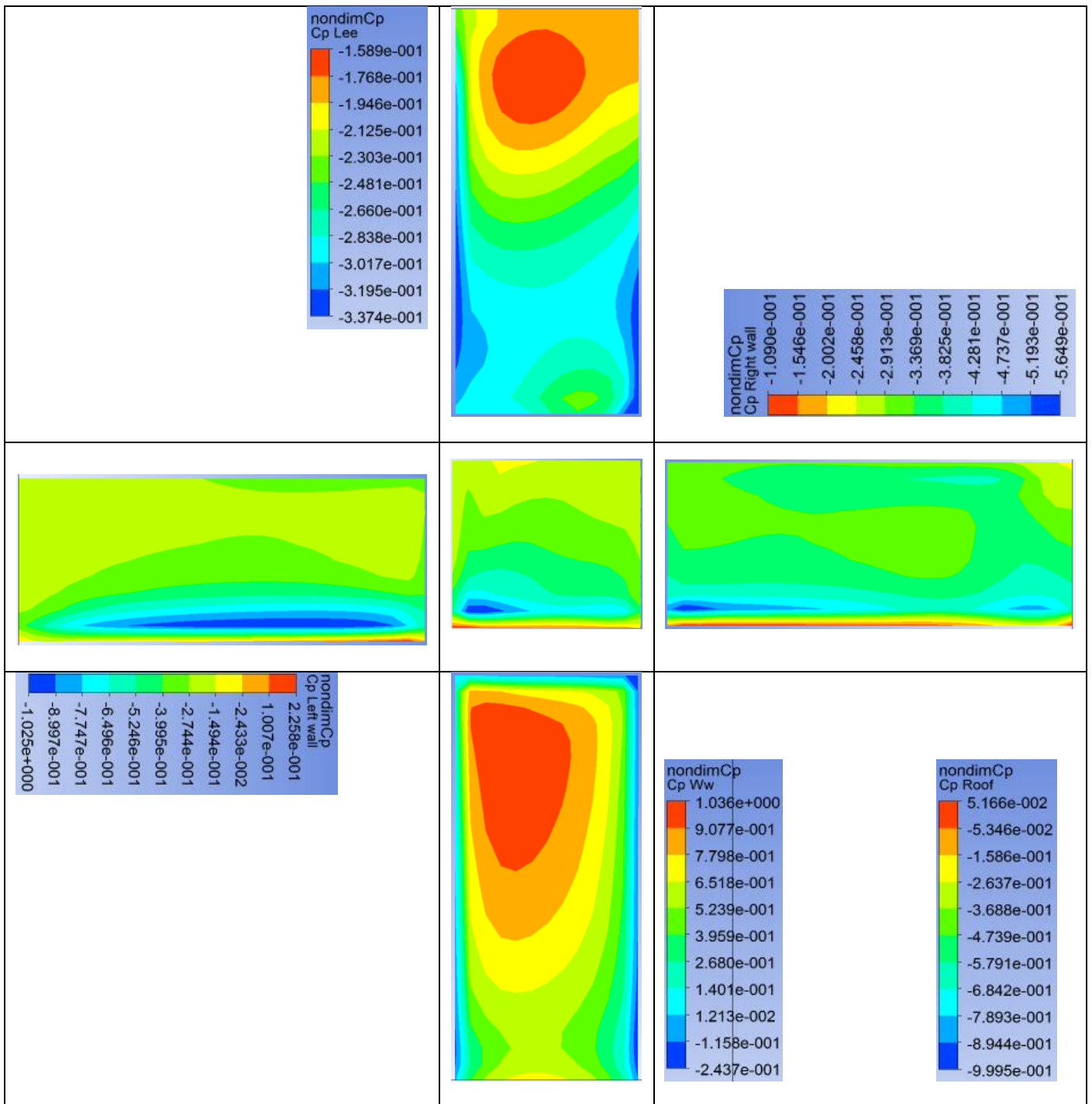


Slika 5.32 (b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela B

### 5.6.2.1 RNG $k-\varepsilon$ turbulentni model

Na slici 5.33 prikazane su dobijene vrednosti koeficijenta pritiska,  $C_p$  za mrežu veličine 4 m u zoni od interesa (ova mreža uzeta je kao referentna), odnosno na fasadama objekta i u najmanjem formiranom poddomenu primenom *RNG  $k-\varepsilon$*  turbulentnog modela. Analize su kao i kod grupe modela A sprovedene za niz mreža i to za sledeće veličine ćelije: 5, 4, 3, 2.2, 1.7, 1.25 i 1 m.

Obzirom da bi grafički prikaz rezultata za sve analizirane mreže zauzeo mnogo mesta pored prethodno prikazane mreže, rezultati maksimalnih i minimalnih vrednosti bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  za svaku fasadnu ravan i krov prikazani su u tabeli 5.13, a upoređeni u tabeli 5.14. Grafički rezultati za ostale mreže dati su u digitalnom obliku.



Slika 5.33. Koficijenti pritiska,  $C_p$ , za grupu modela B i veličinu mreže 4 m (RNG k- $\epsilon$  turbulentni model)

Tabela 5.13. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijena pritiska  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela B (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

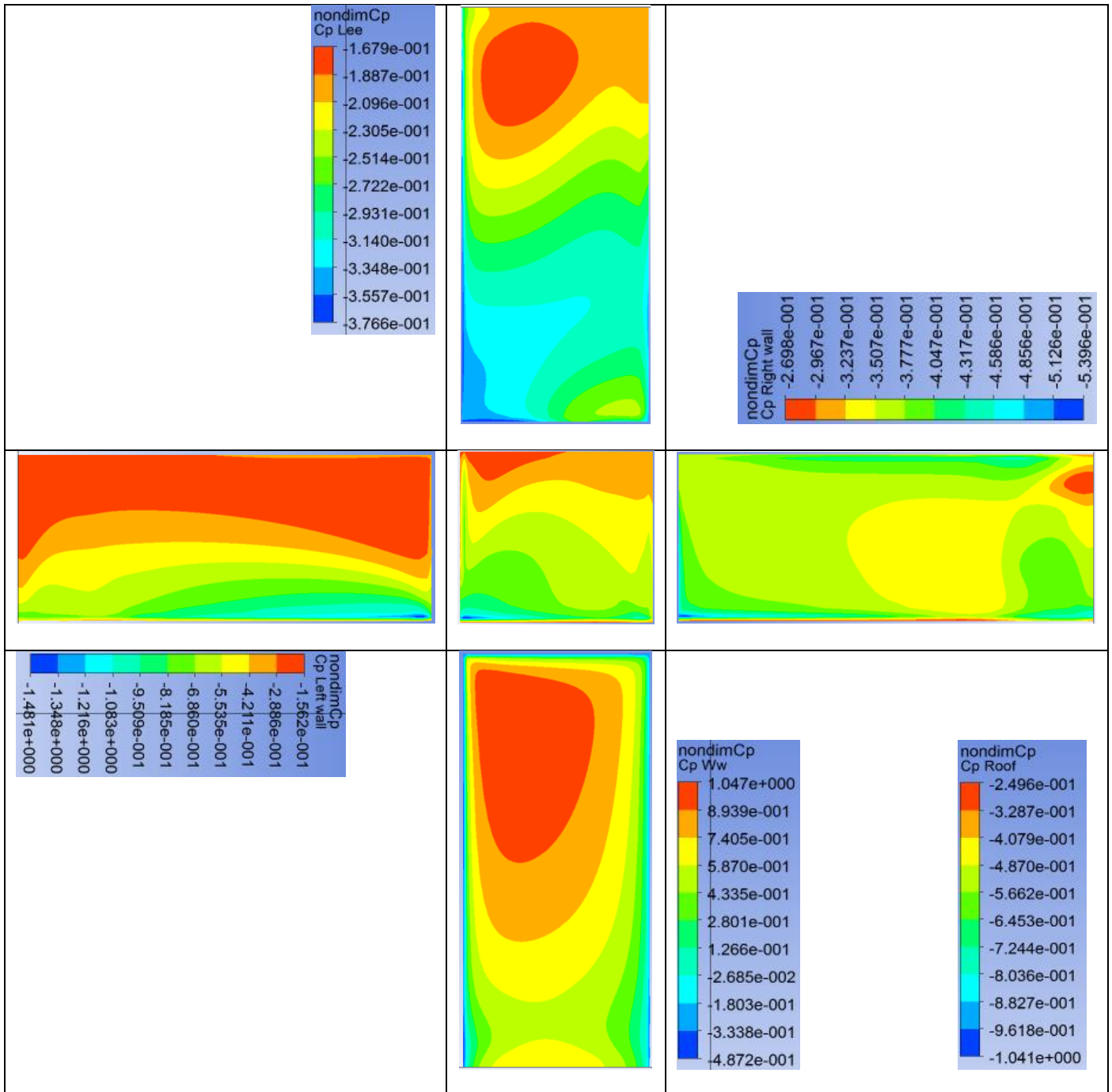
$C_p$ [-]		RNG $k-\varepsilon$ turbulentni model							
		F5-B5 [m]	F4-B4 [m]	F3-B3 [m]	F2.2-B2.2 [m]	F1.7-B1.7 [m]	F1.25-B1.25 [m]	F1-B1 [m]	F0.75-B0.75 [m]
Broj elemenata mreže		$450 \cdot 10^3$	$530 \cdot 10^3$	$650 \cdot 10^3$	$810 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^6$	$3.4 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^6$
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
Navetrena fasada	max	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05
	min	-0.22	-0.24	-0.26	-0.31	-0.38	-0.43	-0.49	-0.54
Levi zid	max	0.26	0.23	0.16	0.02	-0.08	-0.16	-0.16	-0.15
	min	-1.01	-1.02	-1.17	-1.38	-1.37	-1.42	-1.48	-1.54
Zavetrena fasada	max	-0.15	-0.16	-0.16	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17
	min	-0.34	-0.34	-0.34	-0.35	-0.36	-0.37	-0.38	-0.39
Desni zid	max	-0.09	-0.11	-0.13	-0.16	-0.21	-0.24	-0.27	-0.27
	min	-0.58	-0.56	-0.56	-0.55	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54
Krov	max	0.07	-0.05	0.00	-0.09	-0.15	-0.21	-0.25	-0.25
	min	-1.01	-1.00	-1.00	-1.00	-1.02	-1.03	-1.04	-1.04

Tabela 5.14. Odstupanja [%] koeficijena pritiska  $C_p$  za susedne mreže

$C_p$ [%]		(A) Vs (B) F5 Vs F4	(B) Vs (C) F4 Vs F3	(C) Vs (D) F3 Vs F2.2	(D) Vs (E) F2.2 Vs F1.7	(E) Vs (F) F1.7 Vs F1.25	(F) Vs (G) F1.25 Vs F1	(F) Vs (G) F1 Vs F0.75
Navetrena fasada	max	0.23	-0.33	-0.03	-0.36	-0.19	-0.48	0.00
	min	-8.45	-7.86	-13.54	-18.84	-12.93	-11.09	-9.81
Levi zid	max	14.49	44.94	816.35	-120.73	-48.75	2.56	1.30
	min	-1.05	-12.72	-14.67	0.59	-3.76	-4.02	-3.83
Zavetrena fasada	max	-2.52	-2.65	-1.07	-1.49	-0.36	0.18	0.30
	min	1.39	-1.82	-1.64	-2.34	-2.23	-3.74	-1.96
Desni zid	max	-20.18	-13.92	-22.55	-22.15	-13.04	-10.22	-0.37
	min	2.00	0.06	1.83	1.76	0.68	0.39	-0.19
Krov	max	-225.81	1087.73	-94.94	-41.38	-31.09	-14.67	1.01
	min	1.05	0.25	-0.30	-1.96	-1.32	-0.62	-0.38

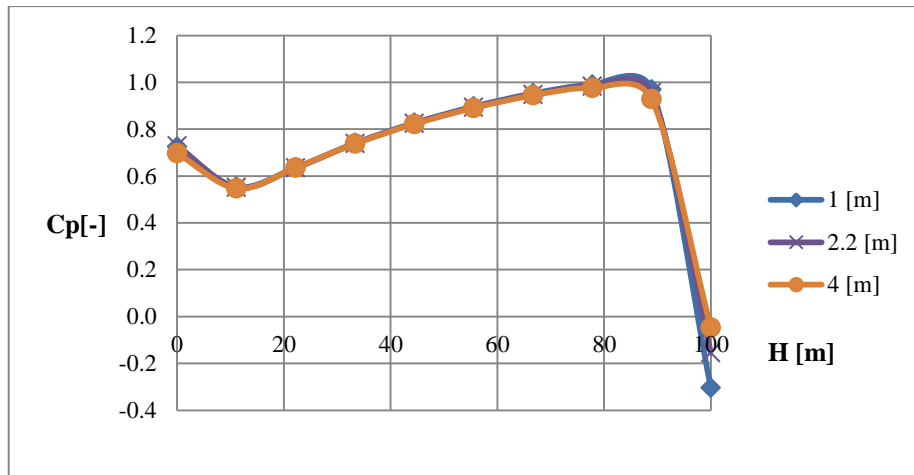
Analizom rezultata prikazanih u tabelama 5.13 i 5.14 zaključeno je da:

- krov i svi fasadni zidovi osim navetrene fasade, u celosti su izloženi sišućem dejstvu vetra za mrežu veličine elementa 1.7 m i sitnije mreže. Za mreže krupnije od 1.7 m na levom fasadnom zidu javlja se i pritiskujuće dejstvo vetra, u jednoj uzanoj zoni uz navetrenu fasadu širine 0.2 do 0.3 m;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.35);
- navetrena fasada izložena je pritiskujućem dejstvu vetra osim u vrlo uzanim zonama prema bočnim zidovima i krovu, i to u širini oko 0.5 m ( $\sim B/80$ ), a maksimalno  $\sim 2$  m ( $\sim B/20$ ) u dnu fasade na visini od 3 do 4 m od površine tla;
- maksimalne vrednosti  $C_p$  [-] na navetrenoj strani su izuzetno stabilne pri promeni veličine mreže;
- uočeno je da se kod mreža krupnijih od AIJ preporuka pa i mreže formirane po AIJ preporukama, na krovnoj ravni pored sišućeg dejstva vetra u uzanoj zoni prema navetrenoj strani, može uočiti i pritiskujuće dejstvo vetra. Kod sitnijih mreža cela krovna ravan je izložena sišućem dejstvu vetra;
- vrednosti koeficijenata pritisaka između svih susednih mreža na zavetrenoj fasadi su izuzetno stabilni, bez većih odstupanja;
- najbolje ukupno slaganje za sve fasadne zidove i krov jeste kod mreža veličine elementa 1.3, 1 i 0.75 m pa se one smatraju u ovoj analizi i najkvalitetnijim a rezultati najpouzdanijim (slika 5.34).

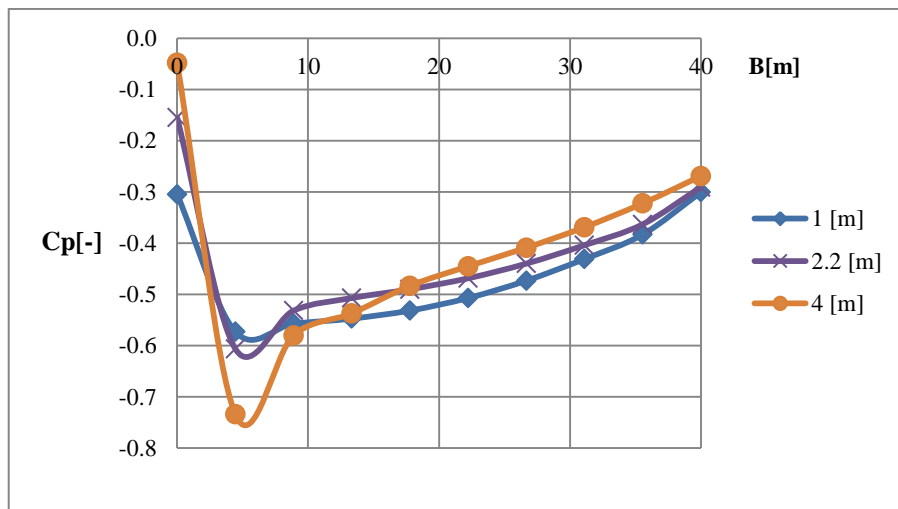


Slika 5.34. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela B i veličinu mreže 1m (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).

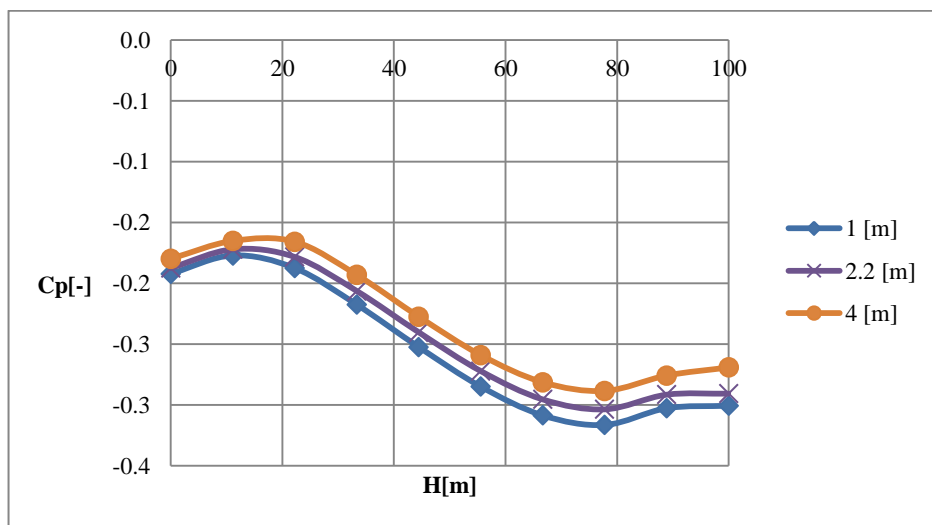




Slika 5.35 Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.36. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.37. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m

### 5.6.2.2 SST turbulentni model

Isti model analiziran je i primenom SST turbulentnog modela a dobijene vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritisaka,  $C_p$  [-] za sve analizirane mreže prikazani su u tabeli 5.15 a potom upoređeni u tabeli 5.16. Grafički prikaz rezultata dat je na slici 5.38 za mrežu veličine 1.3 metara. Na slikama 5.39, 5.40 i 5.41 dati su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka po srednjoj liniji navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3).

Tabela 5.15. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela B (SST turbulentni model)

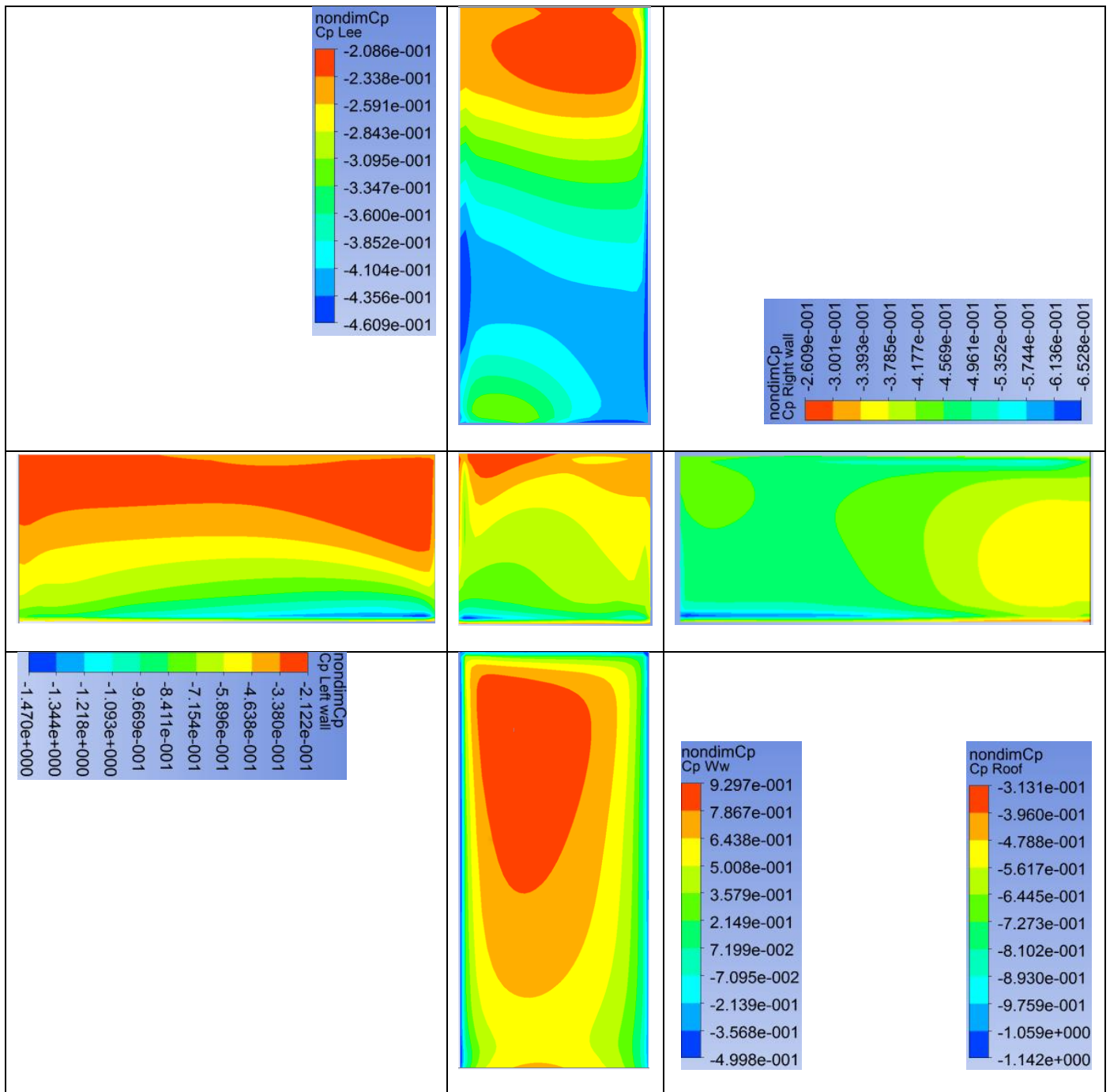
$C_p$ [-]		SST turbulentni model					
		F5-B5	F4-B4	F3-B3	F2.2-B2.2	F1.7-B1.7	F1.3-B1.3
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Navetrena fasada	max	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	min	-0.30	-0.32	-0.34	-0.38	-0.43	-0.50
Levi zid	max	0.16	0.12	0.04	-0.11	-0.21	-0.21
	min	-1.12	-1.15	-1.31	-1.48	-1.43	-1.47
Zavetrena fasada	max	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21
	min	-0.47	-0.46	-0.47	-0.46	-0.46	-0.46
Desni zid	max	-0.15	-0.16	-0.17	-0.20	-0.23	-0.26
	min	-0.77	-0.76	-0.74	-0.71	-0.67	-0.65
Krov	max	-0.06	-0.08	-0.15	-0.24	-0.29	-0.31
	min	-1.29	-1.27	-1.24	-1.19	-1.16	-1.14

Tabela 5.16. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže

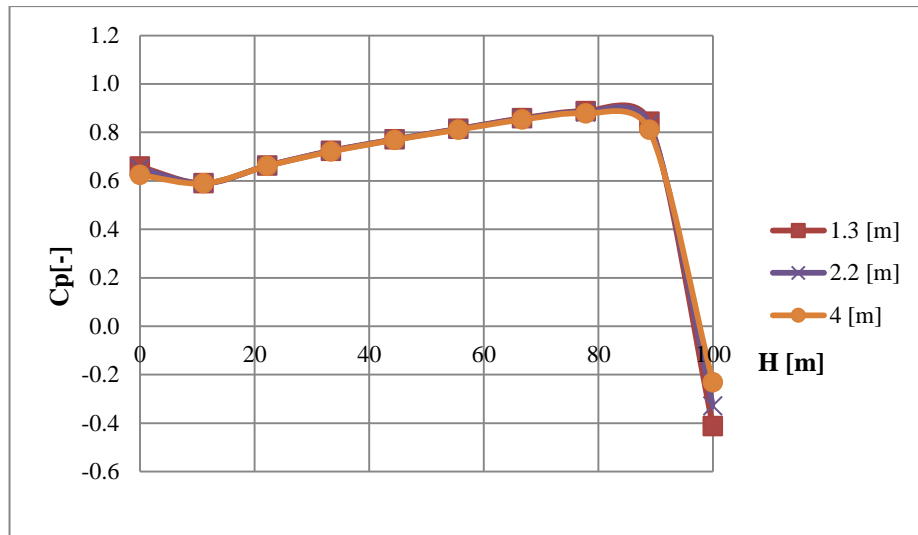
$C_p$ [%]		(A) Vs (B) F5 Vs F4	(B) Vs © F4 Vs F3	(C) Vs (D) F3 Vs F2.2	(D) Vs (E) F2.2 Vs F1.7	(E) Vs (F) F1.7 Vs F 1.3
Navetrena fasada	max	-0.11	0.21	-0.01	-0.05	-0.03
	min	58.41	-7.06	-10.76	-11.63	-13.87
Levi zid	max	28.32	215.46	-135.07	-47.36	-1.03
	min	-1.91	-12.82	-11.24	3.24	-2.39
Zavetrena fasada	max	-0.08	-1.06	-0.65	-0.01	-0.09
	min	1.23	-1.53	1.37	0.34	0.26
Desni zid	max	-7.95	-3.85	-17.13	-13.34	-10.73
	min	1.78	2.49	4.48	4.62	3.36
Krov	max	-22.93	-46.27	-36.05	-17.98	-8.48
	min	1.25	2.95	4.16	2.67	1.33

Analizom dobijenih rezultata primenom *SST* turbulentnog modela za zgradu postavljenu pod uglom od  $15^\circ$  u odnosu na ulaznu ravan domena, koji su delimično prikazani u tabelama 5.15 i 5.16, zaključeno je sledeće:

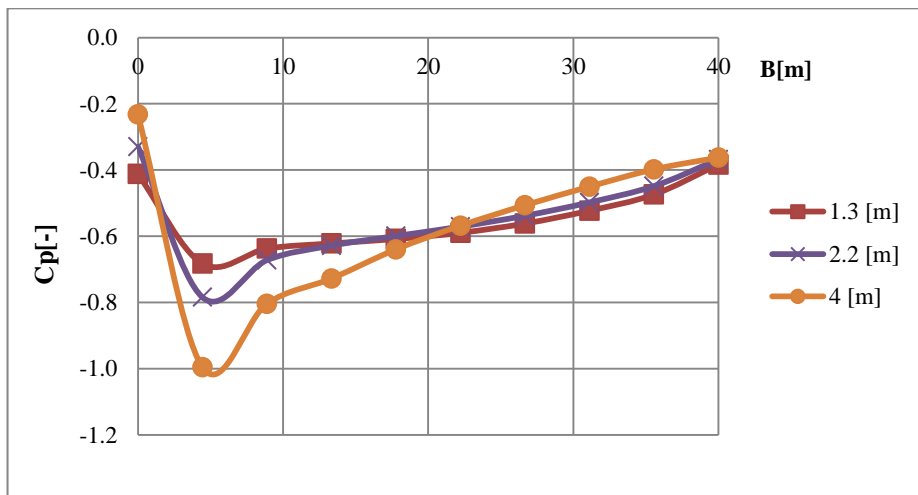
- na direktno navetrenoj fasadi pored pritiskujućeg dejstva vetra u uzanim zonama prema bočnim zidovima i krovu objekta javlja se i sišuće dejstvo vetra. Širina zone gde se javlja sišuće dejstvo vetra jeste oko 1 m ( $\sim B/40$ ) prema bočnim zidovima, a nešto je manja prema krovu i iznosi  $\sim 0.5$  ( $\sim B/80$ ) m.
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.39);
- na levom fasadnom zidu dejstvo vetra zavisi i od veličine mreže. Kod mreža veličine elementa 5, 4 i 3 m deo fasade je pritisnut, a deo izložen sišućem dejstvu vetra. Pritiskujuće dejstvo vetra javlja se uzanoj zoni prema navetrenoj strani u širini oko 0.5 m i to ne celom visinom već samo u gornje  $\frac{3}{4}$  visine zgrade. Ostali deo leve fasade izložen je sišućem dejstvu vetra. Kod modela sa mrežom čiji su elementi veličine 2.2, 1.7 i 1.3 m ceo levi fasadni zid je izložen sišućem dejstvu vetra;
- na zavetrenoj fasadi objekta, desnom zidu i krovu dejstvo vetra je isključivo sišuće za sve analizirane mreže;
- vrednosti maksimalnog  $C_p$  [-] na navetrenoj strani objekta pokazale su se izuzetno stabilnim za sve analizirane mreže. Odstupanja su ispod 0.2%;
- vrednosti koeficijenata pritisaka između svih susednih mreža (osim za najkrupniju mrežu) na zavetrenoj fasadi su izuzetno stabilne bez mnogo odstupanja (maksimalno odstupanje 1.5%)
- primenom *SST* turbulentnog modela vrednosti  $C_p$  [-] na krovu objekta su mnogo stabilnije i manja su odstupanja između susednih mreža (maksimum 18%), dok su odstupanja kod *RNG*  $k-\varepsilon$  modela velika;
- najbolje slaganje je između mreža sa veličinom elementa 1.7 i 1.3 m (manje od 5%) pa se one smatraju u ovoj analizi i najkvalitetnijim a rezultati najpouzdanijim (slika 5.38).



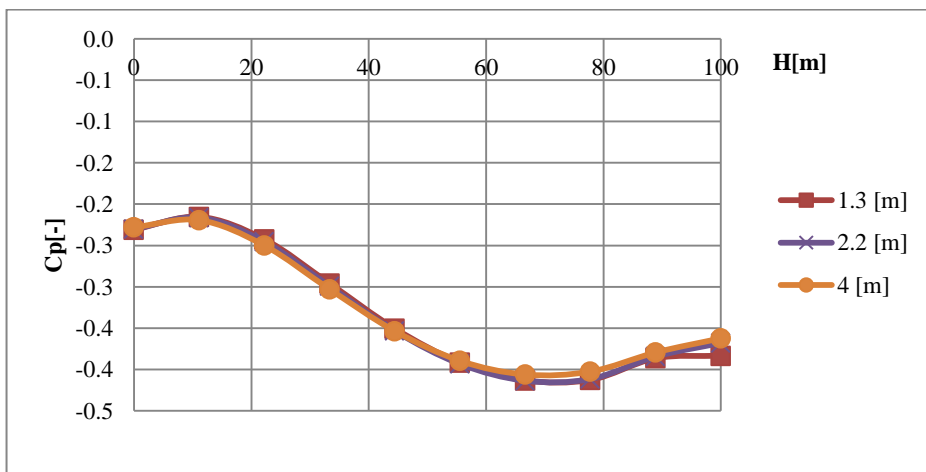
Slika 5.38. Koeficijenti pritisa,  $C_p$  za grupu modela B i veličinu mreže 1,3 m (SST turbulentni model).



Slika 5.39. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



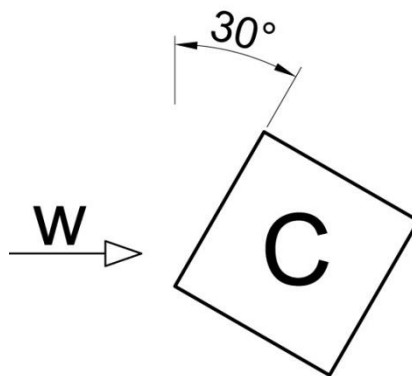
Slika 5.40. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m



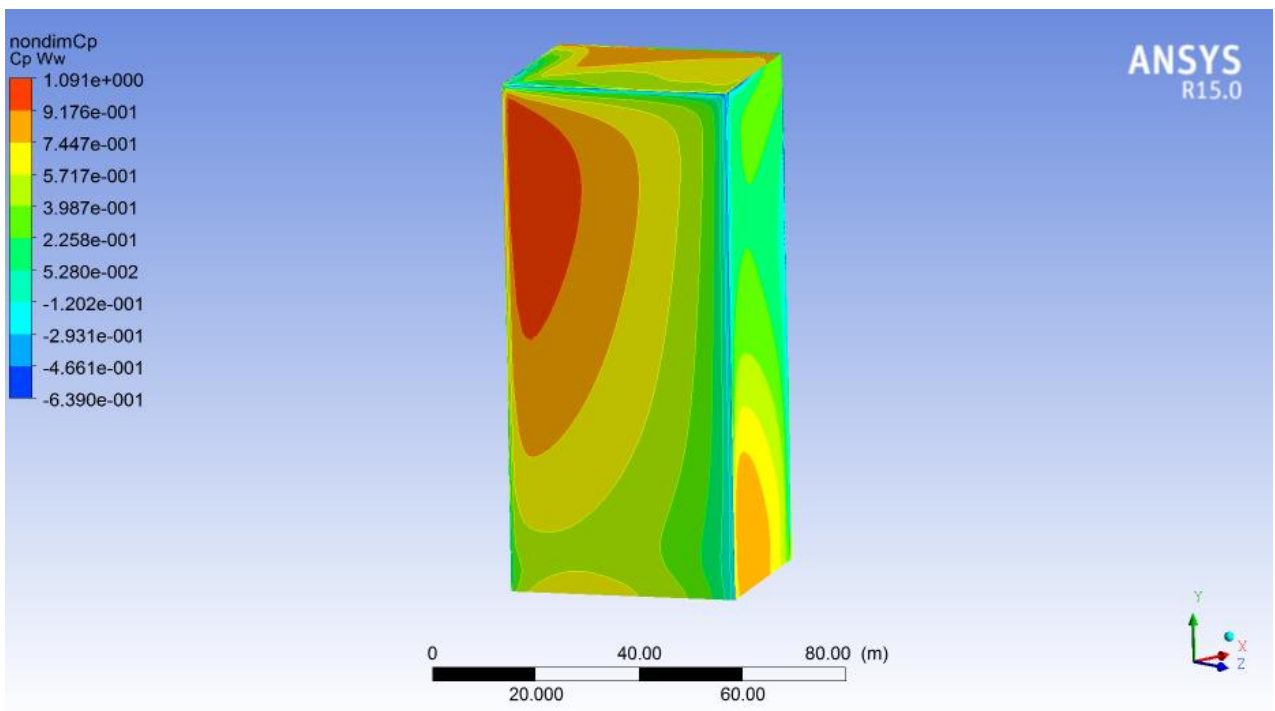
Slika 5.41. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj strani objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m

### 5.6.3 Rezultati za grupu modela C – zgrada pod uglom od $30^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra

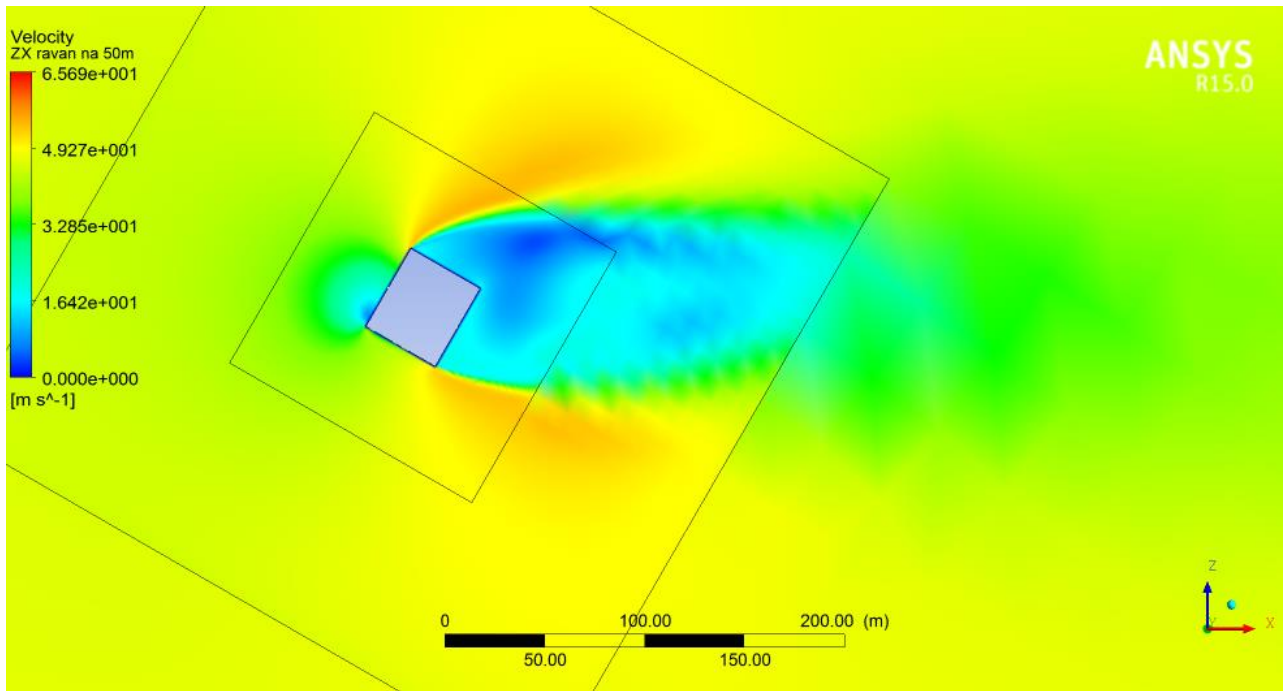
Grupa modela C podrazumevala je izolovanu zgradu u domenu čija navetrena fasada sa ulaznom ravni domena formira ugao od  $30^\circ$  (slika 5.42). Na slici 5.43 (a) prikazan je deo proračunskog domena sa 3D modelom zgrade i dobijenim bezdimenzionalnim koeficijentima pritiska,  $C_p$  dok je na slici 5.43 (b) prikazana ravan paralelna tlu na visini 50 m i raspodela brzine vetra oko zgrade u toj ravni.



Slika 5.42. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela C



Slika 5.43 (a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela C (zgrada pod uglom od  $30^\circ$ )



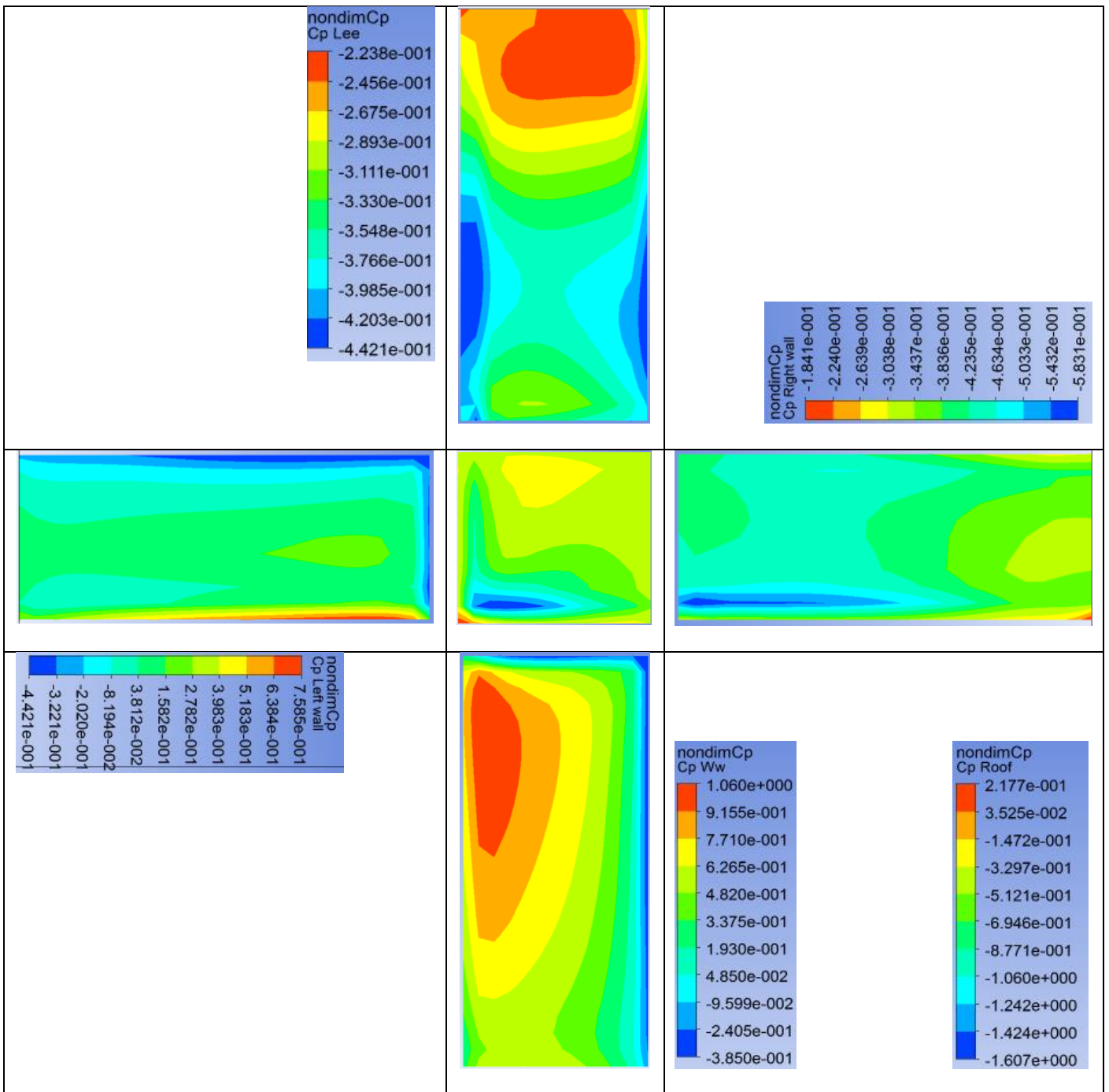
Slika 5.43 (b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela C

### 5.6.3.1 RNG $k-\varepsilon$ turbulentni model

Na slici 5.44 prikazane su dobijene vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritiska,  $C_p$  za mrežu veličine 4 m u zoni od interesa (ova mreža uzeta je kao referentna), odnosno na fasadama objekta i u najmanjem formiranom poddomenu primenom *RNG  $k-\varepsilon$*  turbulentnog modela. Analize su kao i kod prethodnih grupa modela, A i B sprovedene za niz mreža i to za sledeće veličine ćelije: 5, 4, 3, 2.2, 1.7, 1.3, 1 i 0.8 m.

Obzirom da bi grafički prikaz rezultata za sve analizirane mreže zauzeo mnogo mesta pored prethodno prikazane mreže, rezultati maksimalnih i minimalnih vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritiska,  $C_p$  za svaku fasadnu ravan i krov prikazani su u tabeli 5.17, a upoređeni u tabeli 5.18. Grafički rezultati za ostale mreže dati su u digitalnom obliku.





Slika 5.44. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 4 m (RNG k- $\epsilon$  turbulentni model)

Tabela 5.17. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijena pritiska  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela C

$C_p$ [-]		RNG k- $\epsilon$ turbulentni model							
		F5-B5 [m]	F4-B4 [m]	F3-B3 [m]	F2.2-B2.2 [m]	F1.7-B1.7 [m]	F1.3-B1.3 [m]	F1-B1 [m]	F0.8-B0.8 [m]
Broj elemenata mreže		75.000	90.000	150.000	320.000	610.000	$1.35 \cdot 10^6$	$2.9 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^6$
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
Navetren a fasada	max	1.07	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.08	1.09
	min	-0.34	-0.38	-0.45	-0.53	-0.58	-0.6	-0.64	-0.64
Levi zid	max	0.77	0.76	0.75	0.71	0.68	0.62	0.56	0.5
	min	-0.45	-0.44	-0.47	-0.68	-0.63	-0.72	-0.82	-0.88
Zavetren a fasada	max	-0.22	-0.22	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23
	min	-0.45	-0.44	-0.46	-0.46	-0.46	-0.47	-0.48	-0.48
Desni zid	max	-0.16	-0.18	-0.20	-0.24	-0.27	-0.29	-0.31	-0.32
	min	-0.60	-0.58	-0.58	-0.57	-0.57	-0.56	-0.56	-0.58
Krov	max	0.24	0.22	0.17	0.09	0.02	-0.01	-0.07	-0.12
	min	-1.55	-1.61	-1.72	-1.82	-1.87	-1.89	-1.89	-1.81

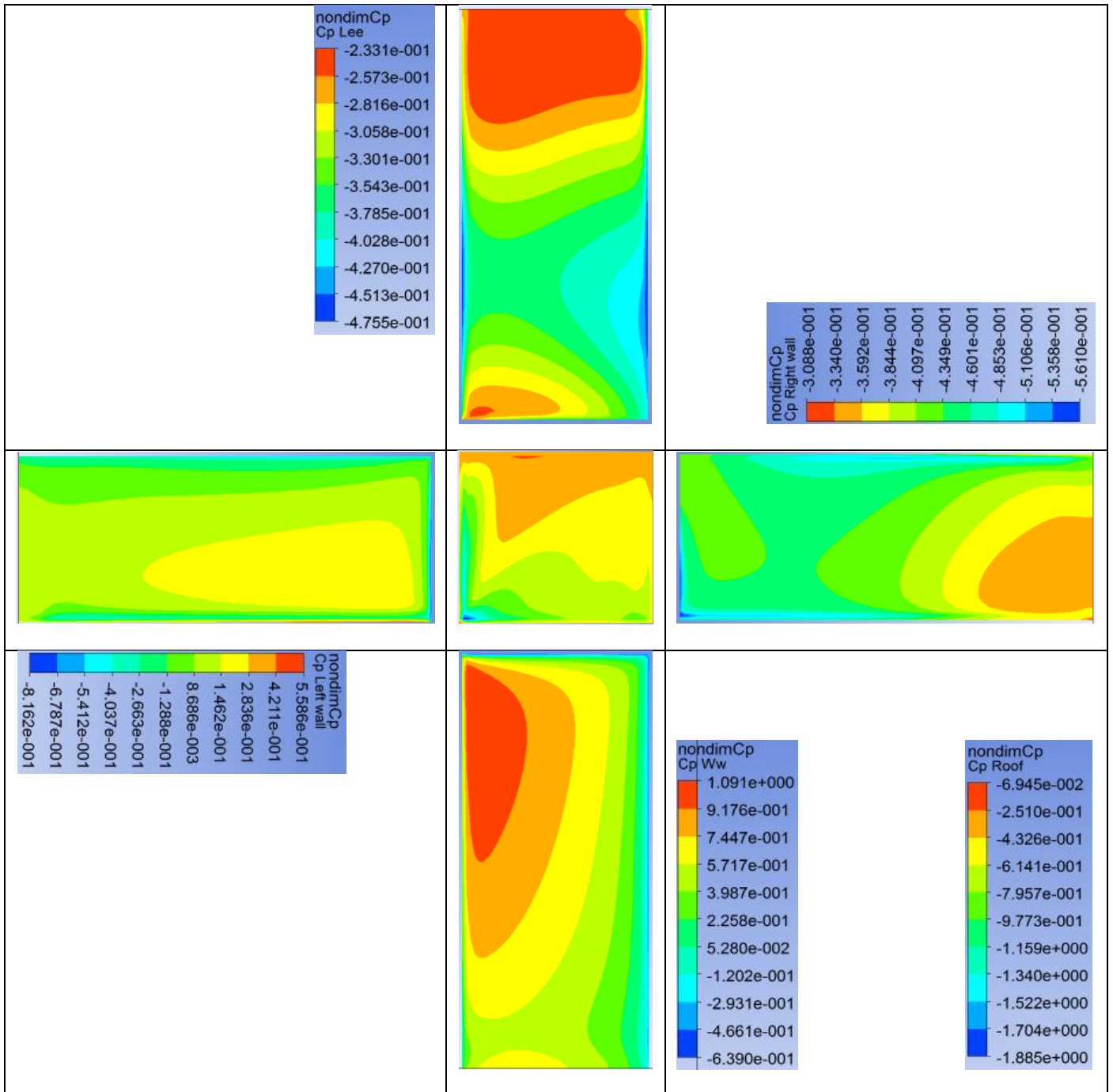
Tabela 5.18. Odstupanja [%] koeficijena pritiska  $C_p$  za susedne mreže

$C_p$ [%]		(A) Vs (B) F5 Vs F4	(B) Vs (C) F4 Vs F3	(C) Vs (D) F3 Vs F2.2	(D) Vs (E) F2.2 Vs F1.7	(E) Vs (F) F1.7 Vs F1.3	(F) Vs (G) F1.3 Vs F1	(F) Vs (G) F1 Vs F0.8
Navetrena fasada	max	0.75	-0.91	-0.50	-0.35	-0.54	0.44	-1.29
	min	-11.22	-14.27	-15.04	-8.51	-3.79	-6.04	-0.41
Levi zid	max	1.36	0.77	5.72	5.43	9.46	10.44	12.21
	min	1.66	-5.58	-31.39	8.36	-12.35	-11.95	-7.73
Zavetrena fasada	max	-0.29	-2.04	-1.09	-0.63	-0.17	-0.09	0.95
	min	1.66	-4.60	0.05	0.48	-1.49	-1.59	-0.09
Desni zid	max	-14.80	-8.52	-15.81	-10.19	-8.49	-5.79	-3.24
	min	2.12	0.43	1.40	1.04	1.15	-0.13	-3.27
Krov	max	8.50	29.81	83.59	292.08	-464.06	-90.78	-40.19
	min	-3.74	-6.71	-5.51	-2.43	-1.34	0.46	3.90

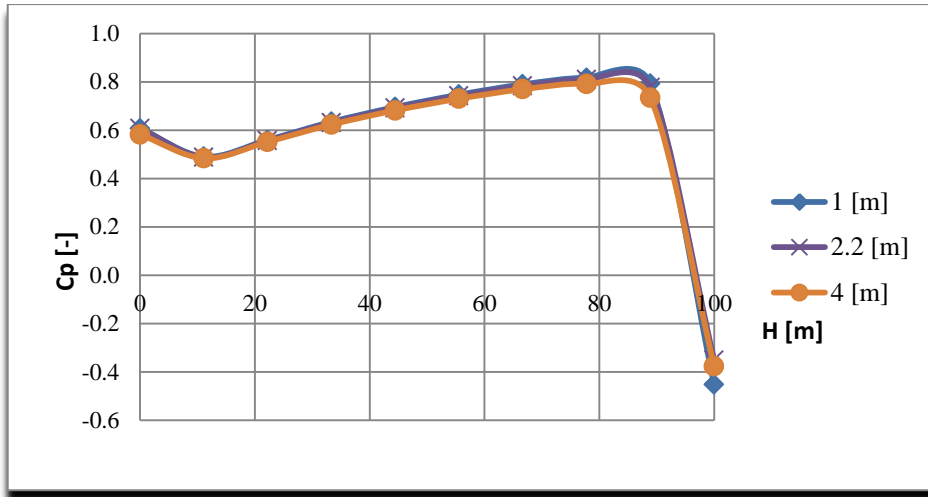
Analizom rezultata prikazanih u tabelama 5.17 i 5.18 zaključeno je da:

- na navetrenoj fasadi je dominantno pritiskujuće dejstvo vetra, osim u uzanim zonama prema desnom bočnom zidu i prema krovnoj ravni, gde se javlja sišuće dejstvo vetra. Širina ovih zona je uglavnom oko 0.5 m ( $\sim B/80$ ) kako prema bočnoj fasadi tako i prema krovu, a maksimalne širine  $\sim 1.5$  m ( $\sim B/60$ ) i to u jednoj uzanoj zoni u donjoj petini navetrene fasade;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.46);
- vrednosti maksimalnog  $C_p$  [-] na navetrenoj strani objekta pokazale su se izuzetno stabilnim za sve analizirane mreže. Maksimalna odstupanja su oko 1%;
- veći deo levog fasadnog zida je izložen pritiskujućem dejstvu vetra i to deo uz fasadu direktno izloženu dejstvu vetra dok je ostatak izložen sišućem dejstvu vetra;
- krovna ravan je kompletno izložena sišućem dejstvu vetra za mrežu veličine 2.2 m i sve sitnije mreže;
- na krovnoj ravni odstupanja maksimalnih vrednosti  $C_p$  [-] su znatna i zavise od veličine elemenata usvojene mreže;
- na zavetrenoj fasadi i desnom zidu objekta dejstvo vetra je isključivo sišuće za sve analizirane mreže;
- vrednosti  $C_p$  [-] na zavetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- maksimalne vrednosti  $C_p$  [-] na navetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- najbolje ukupno slaganje za sve fasadne zidove jeste već kod mreže 1.7 m ali i kod sitnijih mreža 1.3, 1 i 0.8 m.

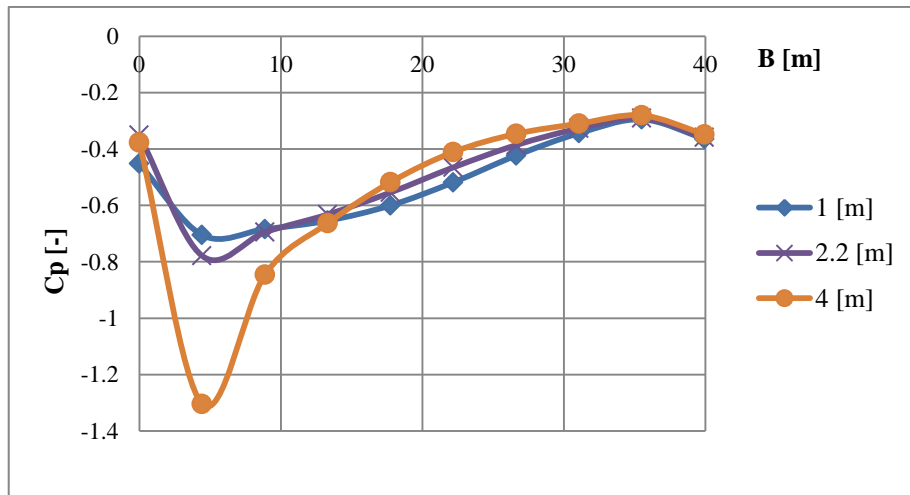
Na slici 5.45 prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka za mrežu sa elementima veličine 1 m. Na slikama 5.46, 5.47 i 5.48 dati su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka po srednjoj liniji navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3).



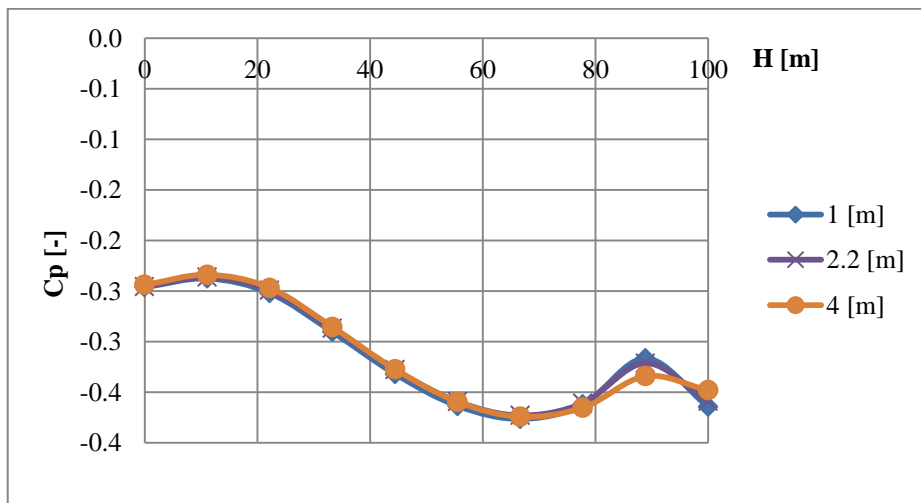
Slika 5.45. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 1 m (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).



Slika 5.46. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.47. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.48. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m

### 5.6.3.2 SST turbulentni model

Isti model analiziran je i primenom SST turbulentnog modela a dobijene vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritisaka,  $C_p$  [-] za sve analizirane mreže prikazani su u tabeli 5.19, a potom upoređeni u tabeli 5.20. Grafički prikaz rezultata dat je na slici 5.49 za mrežu veličine 1 metar. Na slikama 5.50, 5.51 i 5.52 dati su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka po srednjoj liniji navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3).

Tabela 5.19. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela C (SST turbulentni model)

$C_p$ [-]		SST turbulentni model						
		F5-B5	F4-B4	F3-B3	F2.2-B2.2	F1.7-B1.7	F1.3-B1.3	F1-B1
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Navetrena fasada	max	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
	min	-0.40	-0.44	-0.50	-0.55	-0.56	-0.59	-0.64
Levi zid	max	0.67	0.66	0.64	0.57	0.51	0.44	0.36
	min	-0.53	-0.53	-0.55	-0.74	-0.70	-0.78	-0.87
Zavetrena fasada	max	-0.20	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21
	min	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
Desni zid	max	-0.17	-0.19	-0.21	-0.23	-0.25	-0.27	-0.28
	min	-0.66	-0.65	-0.65	-0.63	-0.61	-0.59	-0.62
Krov	max	0.17	0.15	0.09	0.01	-0.06	-0.08	-0.14
	min	-1.59	-1.65	-1.76	-1.80	-1.74	-1.64	-1.61

Tabela 5.20. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže

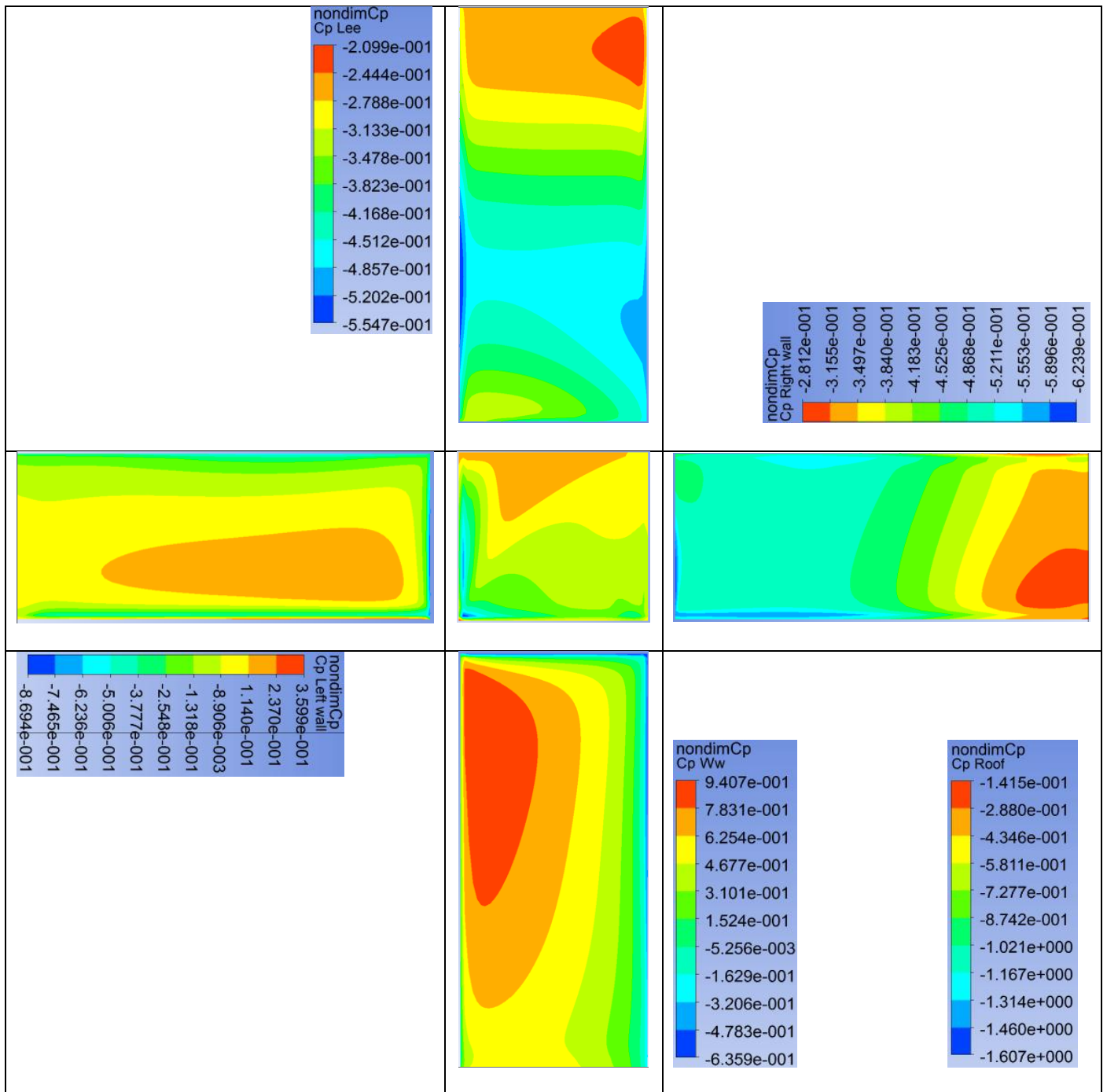
$C_p$ [%]		(A) Vs (B)	(B) Vs (C)	(C) Vs (D)	(D) Vs (E)	(E) Vs (F)	(F) Vs (G)
		F5 Vs F4	F4 Vs F3	F3 Vs F2.2	F2.2 Vs 1.7	F1.7 Vs F1.3	F1.3 Vs F1
Navetrena fasada	max	0.93	0.75	0.21	0.09	0.04	-0.09
	min	-10.16	-12.18	-8.86	-1.53	-4.40	-7.86
Levi zid	max	2.05	3.58	11.47	11.35	16.52	22.11
	min	1.07	-4.24	-25.65	6.23	-10.92	-10.04
Zavetrena fasada	max	-1.08	-0.68	-2.15	-1.00	-0.09	-0.58
	min	0.64	-0.37	0.17	-0.86	1.15	-1.24
Desni zid	max	-10.63	-8.58	-10.37	-9.08	-7.24	-2.89
	min	1.01	0.48	3.48	2.60	3.38	-4.80
Krov	max	14.91	64.40	92.12	112.15	-28.86	-42.87
	min	-3.49	-6.41	-2.12	3.48	5.66	2.26

Analizom rezultata prikazanih u tabelama 5.19 i 5.20 zaključeno je da:

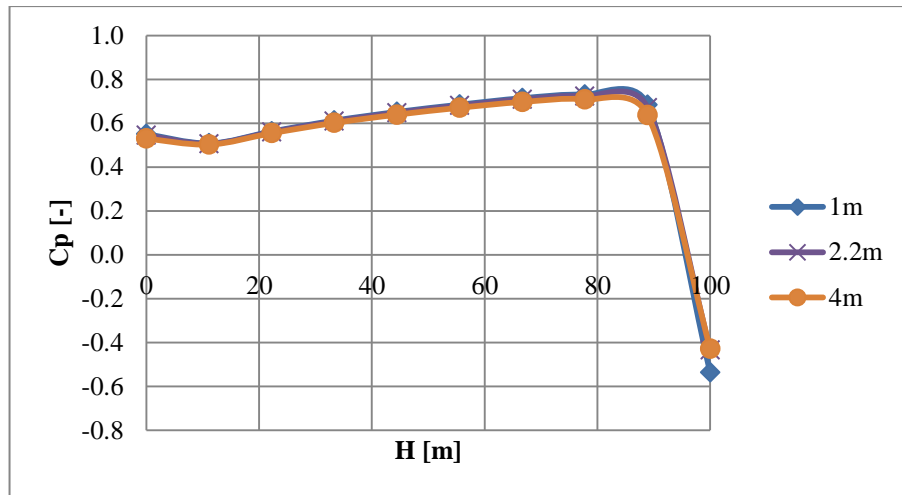
- na navetrenoj fasadi dominantno je pritiskujuće dejstvo vetra, osim u uzanim zonama prema desnom bočnom zidu i prema krovnoj ravni, gde se javlja sišuće dejstvo vetra. Širina ovih zona je uglavnom oko 0.5 m ( $\sim B/80$ ) kako prema bočnoj fasadi tako i prema krovu, a maksimalne širine oko 1.5 m ( $\sim B/30$ ) i to u jednoj uzanoj zoni u donjoj petini navetrene fasade;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.50);
- vrednosti maksimalnog  $C_p$  [-] na navetrenoj strani objekta pokazale su se izuzetno stabilnim za sve analizirane mreže. Maksimalna odstupanja su najviše 1%;
- veći deo levog fasadnog zida je izložen pritiskujućem dejstvu vetra (oko 2/3 fasadne ravni) i to deo uz fasadu direktno izloženu dejstvu vetra, dok je ostatak izložen sišućem dejstvu vetra (oko 1/3 fasadne ravni);
- dejstvo vetra na krovnu ravan zavisilo je od veličine mreže pa se za mreže 5, 4, 3 i 2.2 m na malom delu krovne ravni javlja pritiskujuće dejstvo vetra. Ta zona se nalazi u uglu zgrade prema navetrenoj i levoj fasadi a veličine je maksimalno 1x2 m ( $B/40 \times B/20$ ).
- krovna ravan je kompletno izložena sišućem dejstvu vetra za mrežu veličine 1.7 m i sve sitnije mreže;
- na zavetrenoj fasadi i desnom zidu objekta dejstvo vetra je isključivo sišuće za sve analizirane mreže;
- vrednosti  $C_p$  [-] na zavetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- maksimalne vrednosti  $C_p$  [-] na navetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- dobro ukupno slaganje za sve fasadne zidove jeste već kod mreže 1.7 m ali i kod sitnijih mreža 1.3 i 1.

Na slici 5.49 prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka za mrežu sa elementima veličine 1 m.

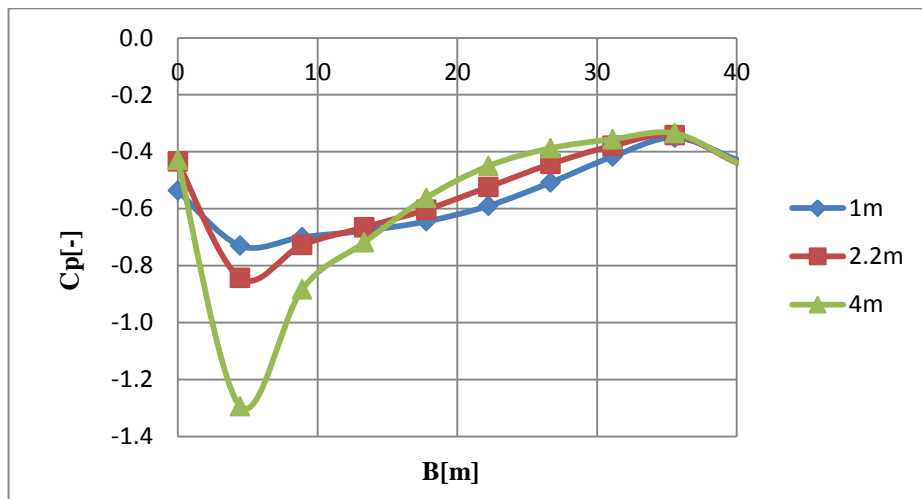




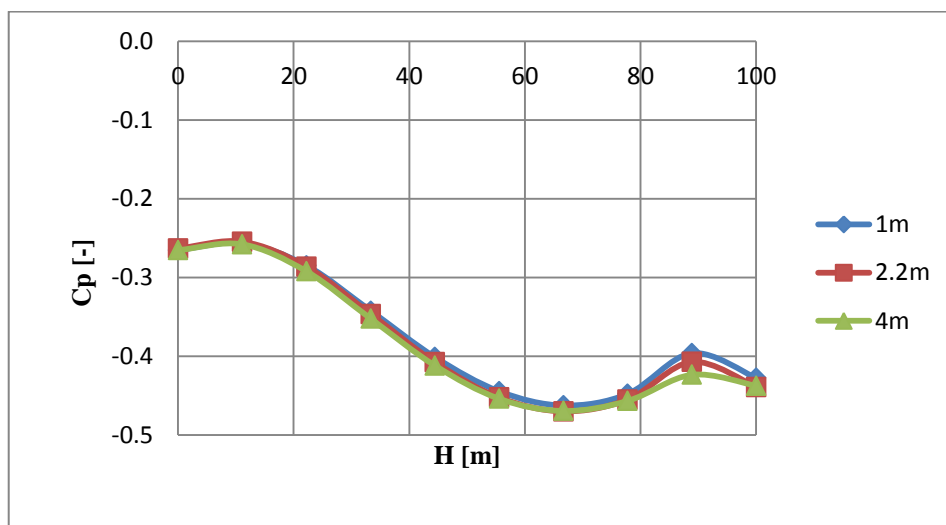
Slika 5.49. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 1m (SST turbulentni model)



Slika 5.50. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



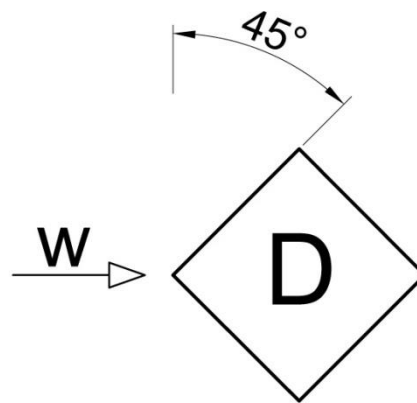
Slika 5.51. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.52. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m

#### 5.6.4 Rezultati za grupu modela D – zgrada pod uglom od $45^\circ$ u odnosu na pravac dejstva vetra

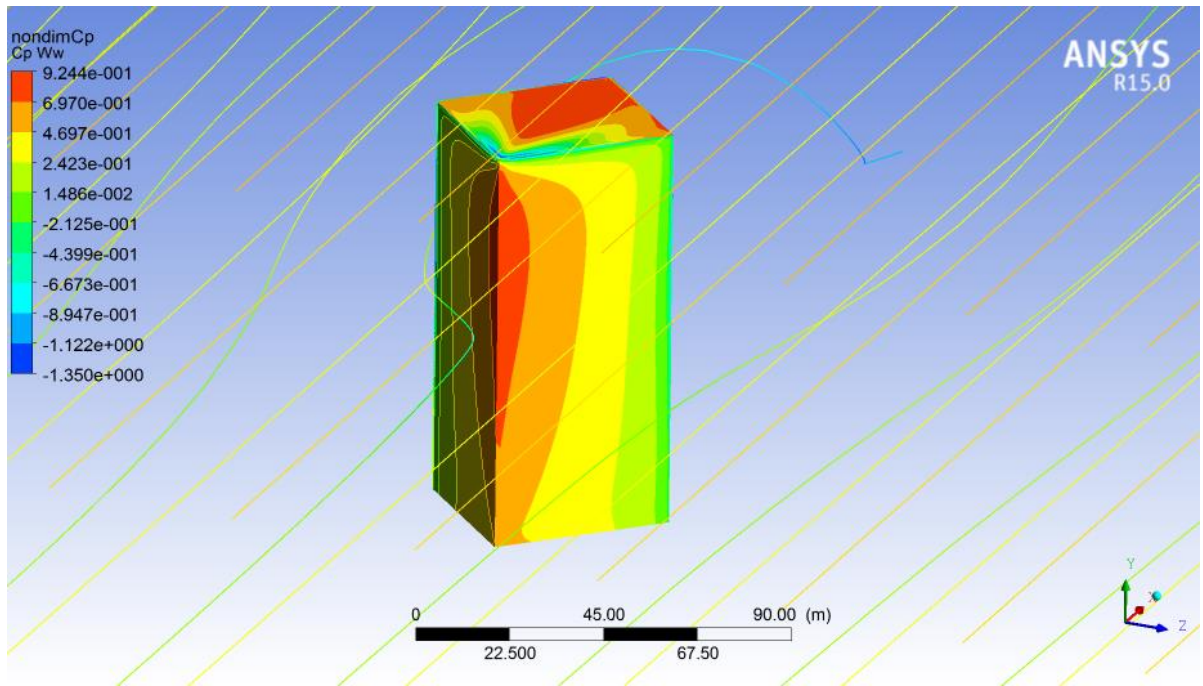
Grupa modela D podrazumevala je izolovanu zgradu u domenu čija navetrena fasada sa ulaznom ravni domena formira ugao od  $45^\circ$  (slika 5.53). Na slici 5.54 (a) prikazan je deo proračunskog domena sa 3D modelom zgrade, dobijenim bezdimenzionalnim koeficijentima pritiska i strujnim linijama oko zgrade dok je na slici 5.54 (b) prikazana ravan paralelna tlu na visini 50 m i raspodela brzine vetra oko zgrade u toj ravni.



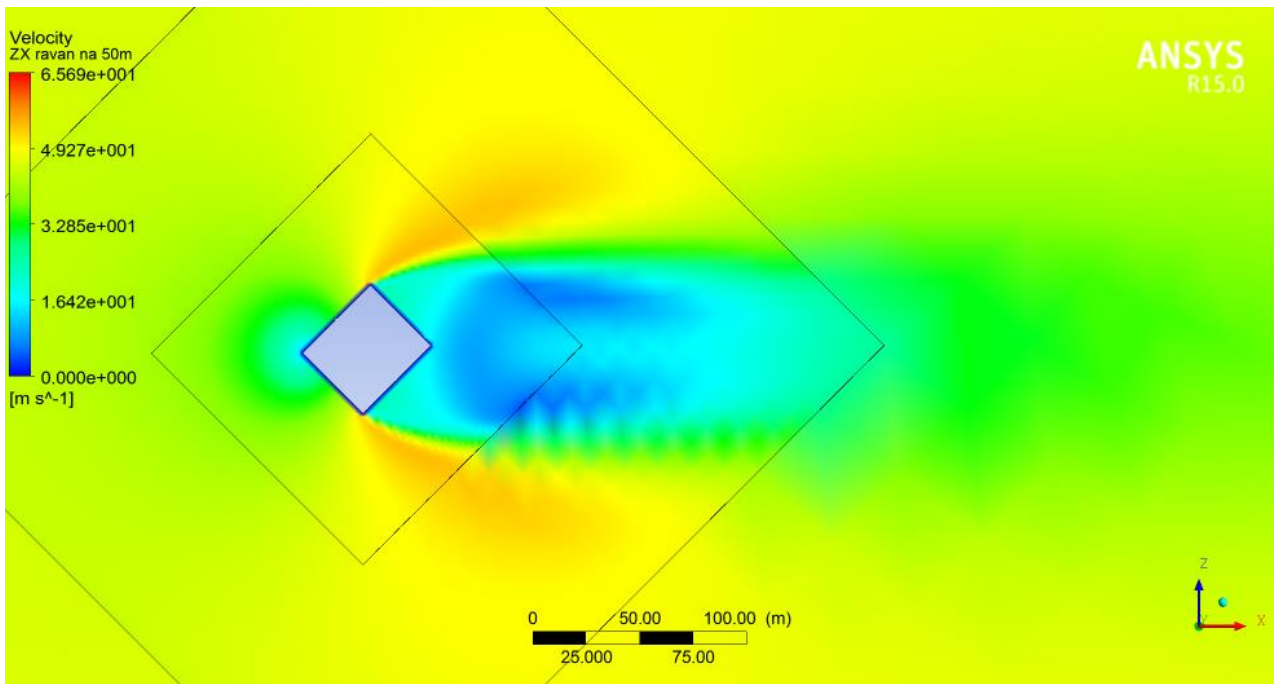
Slika 5.53. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela D

Obzirom da se kod prethodnih grupa modela (A, B i C) insistiralo na analizi primenom *RNG k- $\epsilon$*  modela, slično je pokušano i kod zgrade postavljene pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na pravac dejstva vetra. Međutim nije bilo moguće uraditi analizu gde bi svi parametri bili isti osim veličine mreže, kao što je urađeno kod grupa modela A ( $0^\circ$ ), B ( $15^\circ$ ) i C ( $30^\circ$ ). Da bi analiza bila sprovedena primenom *RNG k- $\epsilon$*  turbulentnog modela, morale su se menjati dimenzije poslednjeg poddomena. Sitnije mreže zahtevale su smanjivanje poslednjeg poddomena. Za jednu veličinu poddomena uspevano je da se uradi analiza za najviše 2 mreže. Ovo je smatrano nedovoljnim da bi se rezultati smatrali relevantnim.

Iz gore navedenih razloga analiza je potom sprovedena primenom *k- $\omega$*  turbulentnog modela međutim, dobijeni rezultati odnosno vrednosti  $C_p$  su bile mnogo veće od očekivanih i od vrednosti dostupnih u literaturi. Zato se od ovog modela odustalo i prešlo na *SST k- $\omega$*  turbulentni model čijom primenom je omogućen isti pristup kao kod grupa zgrada A, B i C. Dakle, svi parametri analize su bili isti a menjana je veličina mreže na isti način kao kod prethodnih grupa modela.

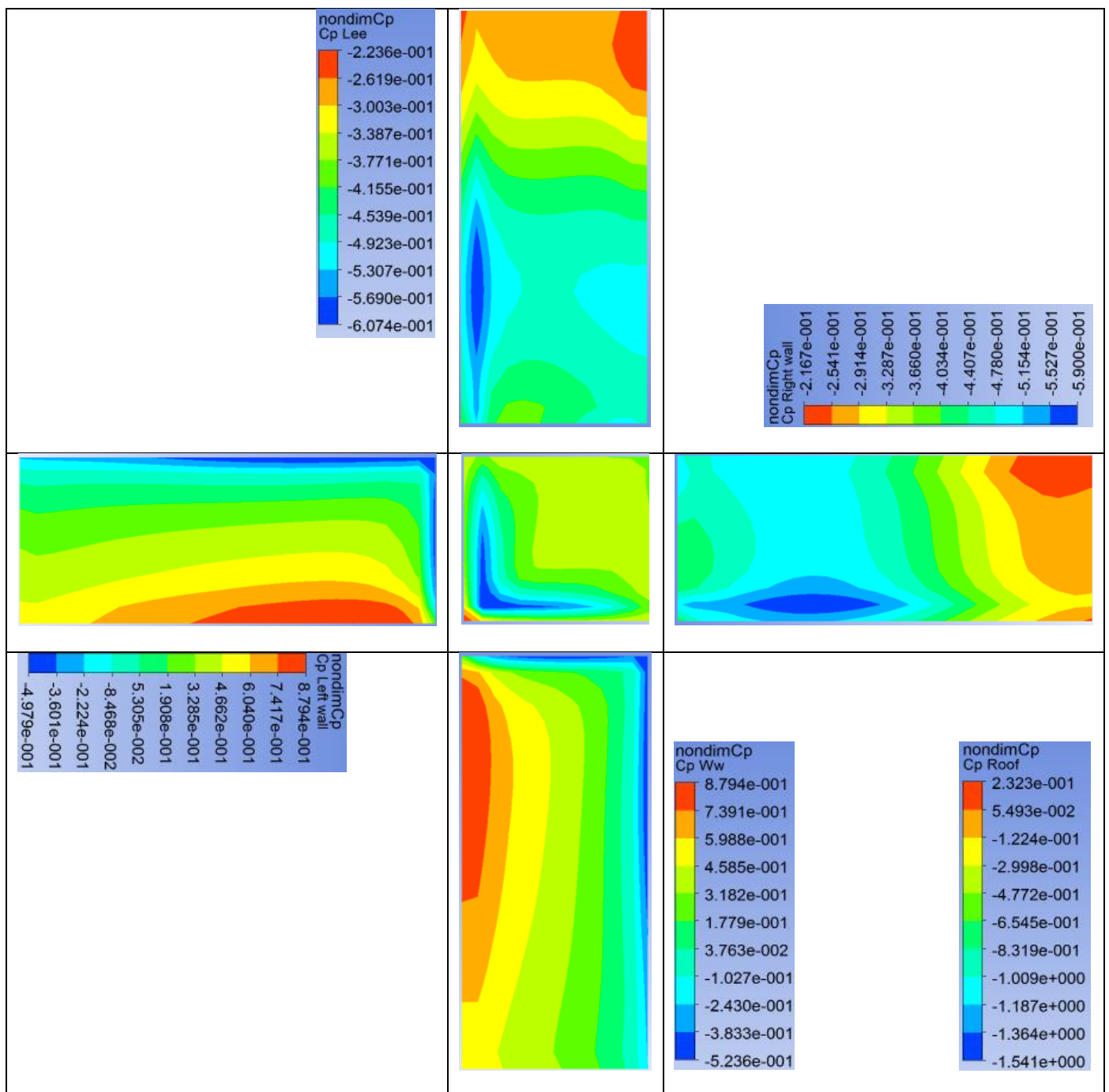


Slika 5.54 (a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela D (zgrada pod uglom od  $45^\circ$ )



Slika 5.54 (b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela D

Na slici 5.55 prikazane su sve fasadne ravni kao i krov objekta sa dobijenim bezdimenzionalnim koeficijentima pritiska primenom SST turbulentnog modela za mrežu veličine ćelije 4 m.



Slika 5.55. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela D i veličinu mreže 4m (SST turbulentni model)

Pregled maksimalnih i minimalnih vrednosti bezdimenzionalnih koeficijenata pritiska,  $C_p$  [-] za sve fasadne i krovnu ravan i sve analizirane mreže prikazani su u tabeli 5.21, a potom upoređeni u tabeli 5.22. Grafički prikaz rezultata dat je na slici 5.56 za mrežu veličine 1 m. Na slikama 5.57, 5.58 i 5.59 dati su bezdimenzionalni koeficijenti pritiska po srednjoj liniji navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3).

Tabela 5.21. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenta pritiska  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mrežegrupe modela D

$C_p$ [-]		SST turbulentni model						
		F5-B5 [m]	F4-B4 [m]	F3-B3 [m]	F2.2-B2.2 [m]	F1.7-B1.7 [m]	F1.3-B1.3 [m]	F1-B1 [m]
Broj elemenata mreže		70.000	86.000	150.000	315.000	620.000	1.35*10 <sup>6</sup>	2.9*10 <sup>6</sup>
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Navetrena fasada	max	0.86	0.88	0.89	0.91	0.91	0.92	0.92
	min	-0.50	-0.52	-0.63	-0.79	-0.94	-1.14	-1.35
Levi zid	max	0.86	0.88	0.89	0.91	0.91	0.92	0.92
	min	-0.49	-0.50	-0.62	-0.77	-0.91	-1.10	-1.31
Zavetrena fasada	max	-0.23	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.21
	min	-0.62	-0.61	-0.58	-0.57	-0.57	-0.56	-0.56
Desni zid	max	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21	-0.21	-0.20	-0.20
	min	-0.63	-0.59	-0.59	-0.61	-0.58	-0.57	-0.56
Krov	max	0.26	0.23	0.17	0.10	0.03	-0.05	-0.15
	min	-1.45	-1.54	-1.70	-1.90	-2.06	-2.34	-2.61

Tabela 5.22. Odstupanja [%] koeficijenta pritiska  $C_p$  za susedne mreže

$C_p$ [%]		(A) Vs (B) F5 Vs F4	(B) Vs (C) F4 Vs F3	(C) Vs (D) F3 Vs F2.2	(D) Vs (E) F2.2 Vs F1.7	(E) Vs (F) F1.7 Vs F1.25	(F) Vs (G) F1.25 Vs F1
Navetrena fasada	max	-2.02	-1.70	-1.15	-0.81	-0.74	-0.56
	min	-4.69	-16.83	-20.56	-15.85	-17.27	-15.65
Levi zid	max	-2.02	-1.70	-1.15	-0.81	-0.74	-0.56
	min	-1.50	-19.87	-19.33	-15.12	-17.32	-16.32
Zavetrena fasada	max	1.22	0.58	1.76	0.44	0.46	0.94
	min	1.77	5.08	1.16	0.63	1.81	-0.01
Desni zid	max	1.57	2.26	2.01	0.34	1.37	1.35
	min	6.38	-0.44	-3.36	5.97	2.07	0.39
Krov	max	12.20	36.51	67.92	196.72	-166.59	-66.48
	min	-5.86	-9.34	-10.32	-8.18	-11.92	-10.34

Obzirom da vetar deluje na analiziranu zgradu pod uglom od 45<sup>0</sup>, očekivano je da vrtložni trag iza objekta bude simetričan. Međutim, na slici 5.54 (b) primetna je njegoa asimetrija. Ovo se objašnjava uticajem oblika osnove objekta. Iako približno kvadratne osnove, odstupanje dimenzija stranica osnove od ~10%, dovodi do stvaranja dužeg vrtložnog traga i njegove asimetrije.

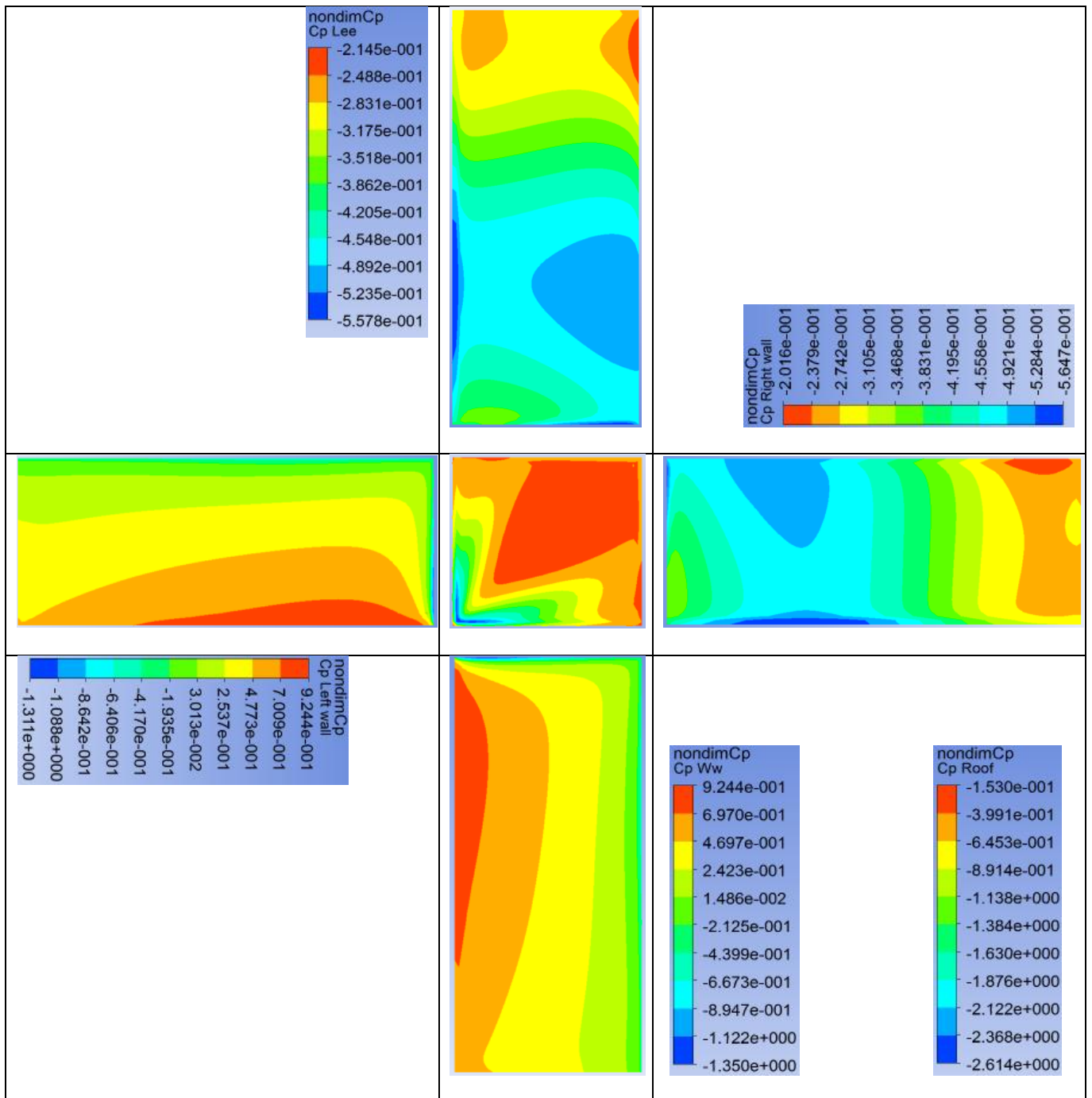


Analizom rezultata delimično prikazanih u tabelama 5.21 i 5.22 zaključeno je da:

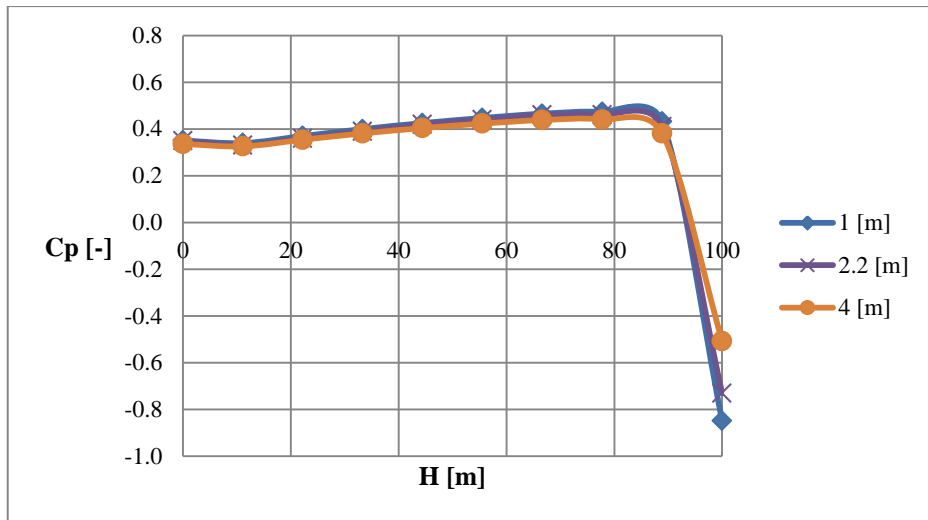
- na navetrenoj fasadi dominantno je pritiskujuće dejstvo vetra osim u zonama prema desnom bočnom zidu i prema krovnoj ravni, gde se javlja sišuće dejstvo vetra. Širina ovih zona je uglavnom oko 2 m ( $\sim B/20$ ) prema bočnoj fasadi a prema krovu nešto manja i iznosi maksimalno 1 m ( $B/40$ );
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na 85% visine zgrade (slika 5.57);
- vrednosti maksimalnog  $C_p$  [-] na navetrenoj strani objekta pokazale su se izuzetno stabilnim za sve analizirane mreže. Maksimalna odstupanja su najviše 2%;
- veći deo levog fasadnog zida je izložen pritiskujućem dejstvu vetra, dok se u zonama prema zavetrenoj fasadi i delu krova javlja sišuće dejstvo vetra;
- dejstvo vetra na krovnu ravan zavisilo je od veličine mreže, pa se za mreže 5, 4, 3, 2.2 i 1.7 m na malom delu krovne ravni javlja pritiskujuće dejstvo vetra. Ta zona se nalazi u uglu zgrade prema navetrenoj i levoj fasadi a veličine je maksimalno 1.5 x 1.5 m;
- krovna ravan je kompletno izložena sišućem dejstvu vetra za mrežu veličine 1.3 i 1 m;
- na zavetrenoj fasadi i desnom zidu objekta, dejstvo vetra je isključivo sišuće za sve analizirane mreže;
- vrednosti  $C_p$  [-] na zavetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- maksimalne vrednosti  $C_p$  [-] na navetrenoj fasadi pokazale su se izuzetno stabilnim i nezavisnim od promene veličine mreže;
- najveća odstupanja javila su se kod minimalnih  $C_p$  [-] na navetrenoj fasadi i levom zidu (do 20%);

Na slici 5.56 prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritisaka za mrežu sa elementima veličine 1 metar.

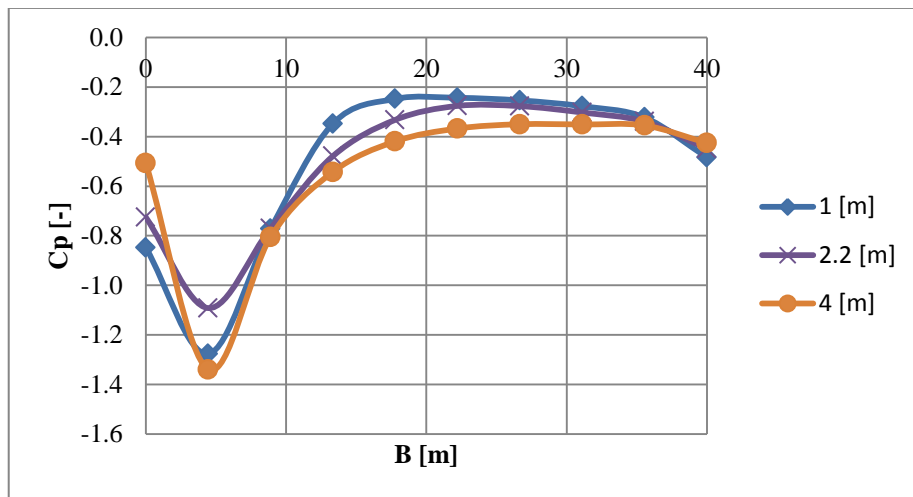




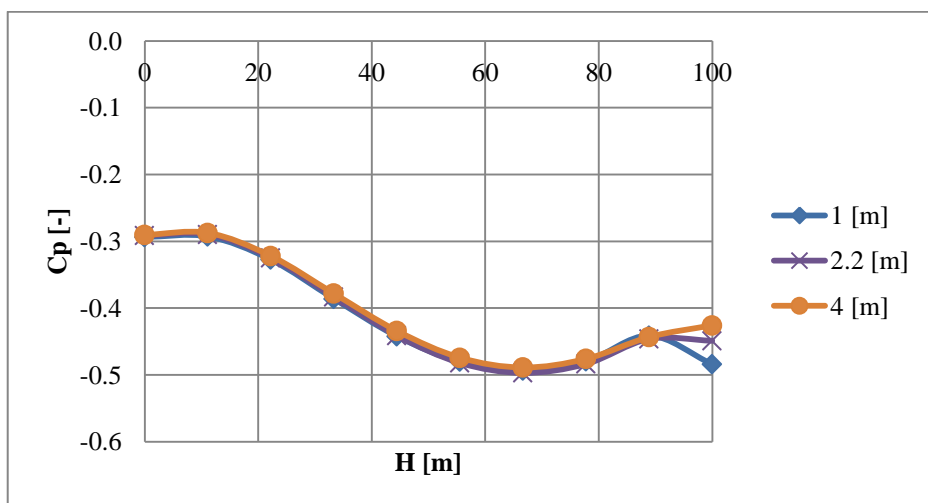
Slika 5.56. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela D i veličinu mreže 1m (SST turbulentni model)



Slika 5.57. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m



Slika 5.58. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4 m

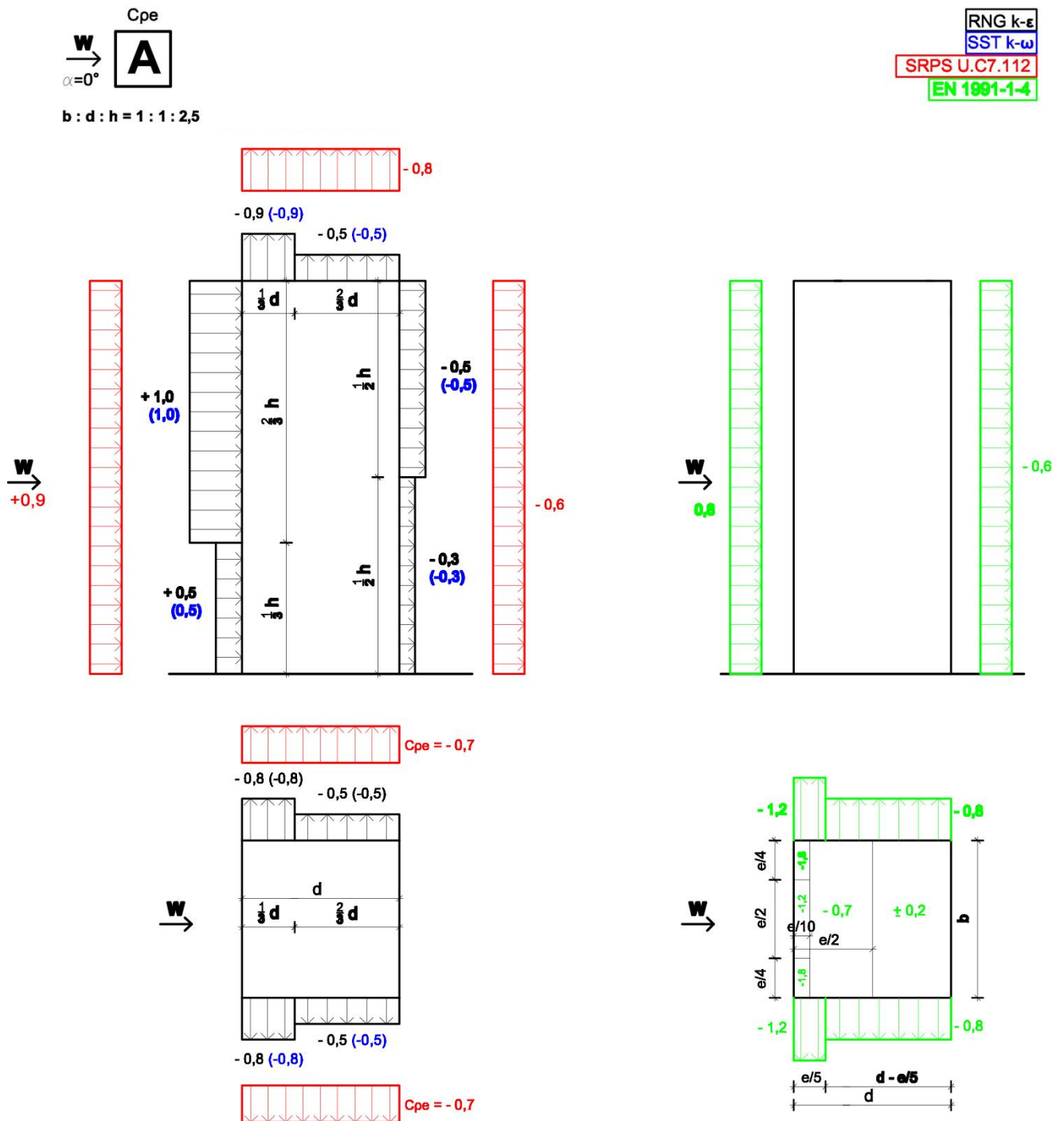


Slika 5.59. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4 m

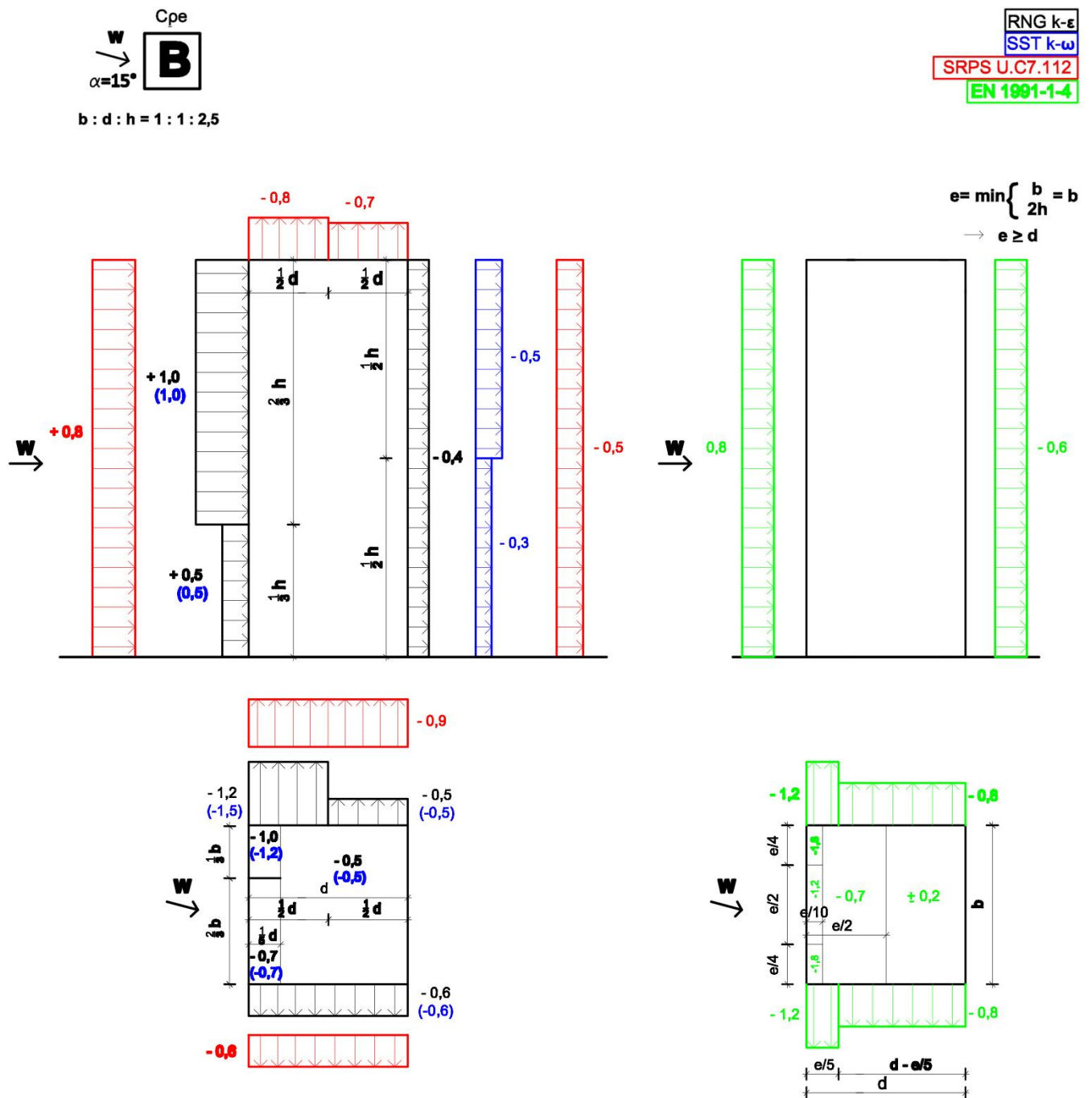
## 6 Analiza rezultata numeričkog modeliranja i zaključci

### 6.1 Analiza rezultata i poredjenje sa aktuelnim standardima

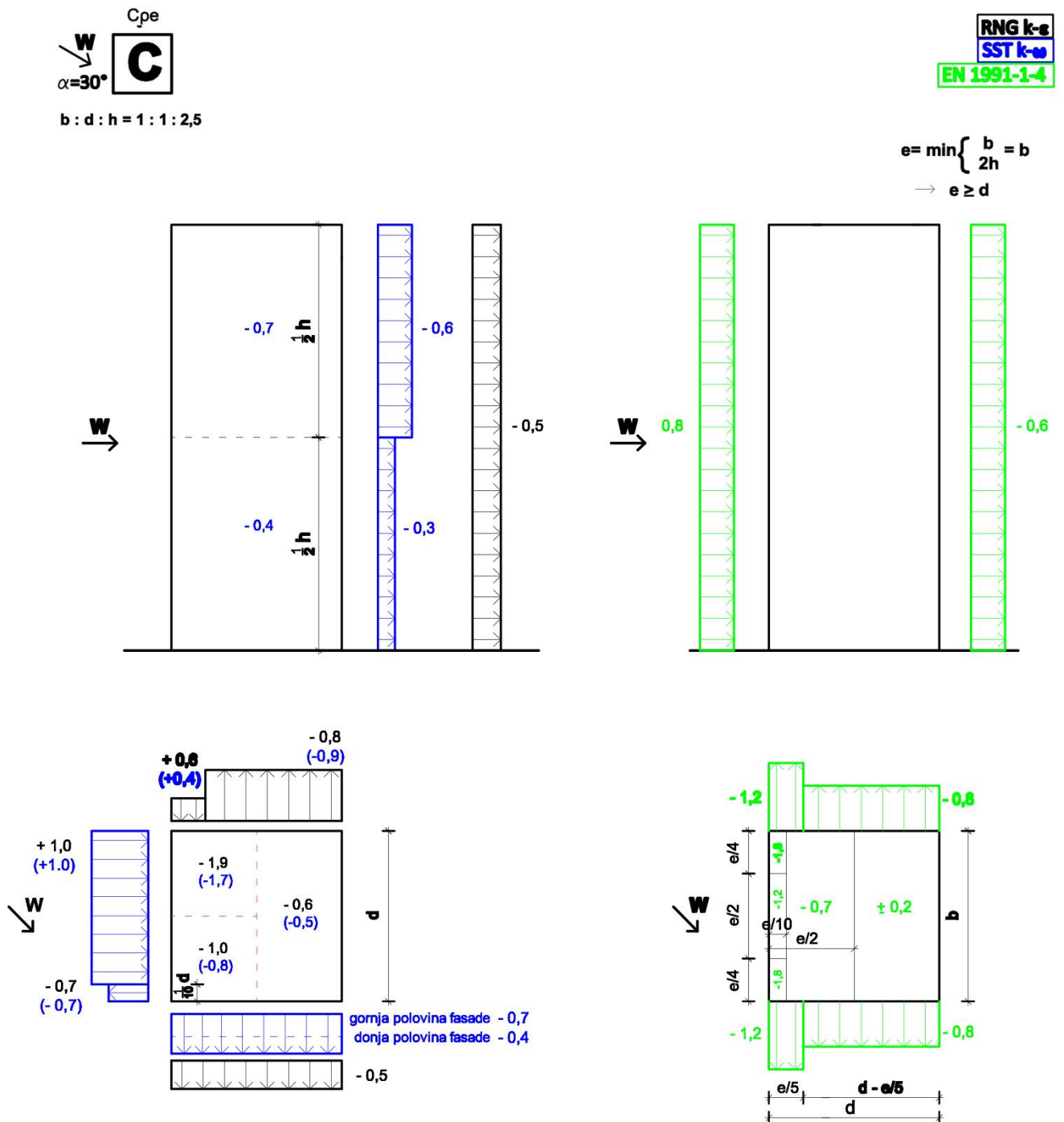
U poglavljima 4.3.1 i 4.3.2 prikazani su delovi standarda SRPS U.C7.112 i SRPS EN 1991-1-4, odnosno spoljašnji koeficijenti pritisaka koji se koriste pri proračunu visokih krutih zgrada na dejstvo vetra. U poglavljima 5.6.1 do 5.6.4 prikazani su koeficijenti pritisaka usled dejstva vetra primenom numeričke dinamike fluida, kada vetar deluje pod uglom od 0, 15, 30 i 45 stepeni na zgradu čiji je odnos dimenzija  $b:d:h \approx 1:1:2.5$ . Da bi poredjenje dobijenih rezultata sa postojećim standardima bilo lakše, vizuelno uočljivije i preglednije dijagrami dobijeni primenom *CFD* tehnike su pojednostavljeni. Na slikama 6.1 do 6.4 prikazani su uporedo koeficijenti pritisaka po standardima SRPS U.C7.112, SRPS EN 1991-1-4 i koeficijenti dobijeni primenom oba primenjena turbulentna modela *RNG  $k-\varepsilon$*  i *SST  $k-\omega$*  za slučaj kada vetar deluje na najbližu fasadu zgrade pod uglom  $0^\circ$  (grupa modela A),  $15^\circ$  (grupa modela B),  $30^\circ$  (grupa modela C) i  $45^\circ$  (grupa modela D).



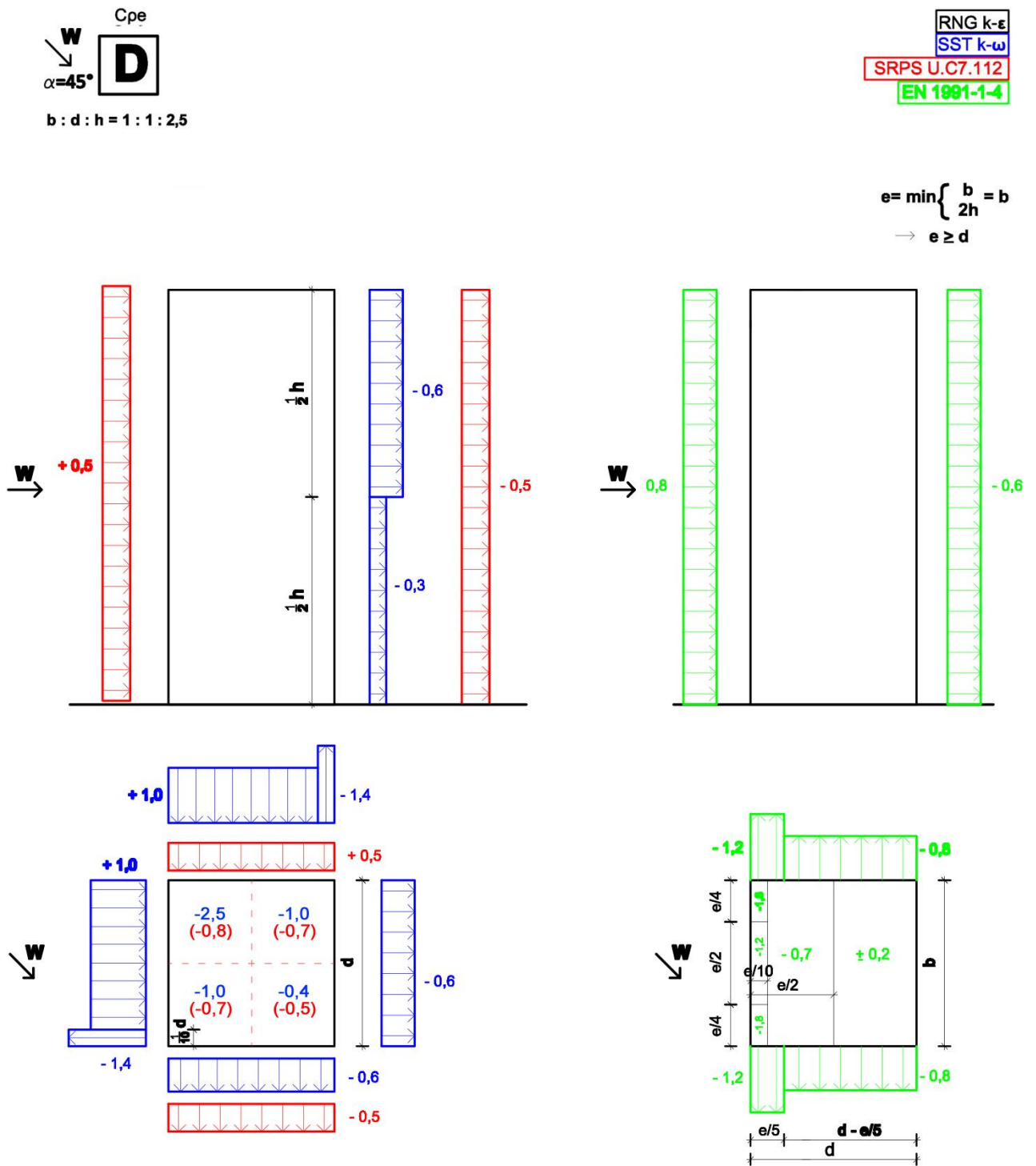
Slika 6.1. Koeficijenti pritiska po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG k- $\epsilon$  i SST k- $\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $0^\circ$  (grupa modela A)



Slika 6.2. Koeficijenti pritiska po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG  $k-\epsilon$  i SST  $k-\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $15^\circ$  (grupa modela B)



Slika 6.3. Koeficijenti pritiska po: SRPS EN 1991-1-4, RNG k-ε i SST k-ω za dejstvo vetra pod uglom od 30° (grupa modela C)



Slika 6.4. Koeficijenti pritisaka po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG k- $\epsilon$  i SST k- $\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $45^\circ$  (grupa modela D)



## **6.2 Zaključci**

Poređenjem spoljašnjih koeficijenata pritisaka,  $C_{pe}$  [-] prikazanih na slikama 6.1 do 6.4, za dejstvo vetra pod uglom od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$  na visoku krutu zgradu, zaključujemo sledeće:

- prema standardu SRPS U.C7.112 spoljašnji koeficijenti pritiska,  $C_{pe}$  [-] za svaku fasadnu ravan i krov objekta imaju konstantnu vrednost na celoj posmatranoj površini, nezavisno od ugla dejstva vetra;
- prema standardu SRPS EN 1991-1-4 spoljašnji koeficijenti pritiska,  $C_{pe}$  [-] za bočne fasadne ravni i krov objekta, nisu konstantni. Te ravni su podeljene u zone sa različitim koeficijentima pritisaka;
- dijagrami koeficijenata  $C_{pe}$  [-] dobijeni u okviru ovog istraživanja, pokazali su da bi sve fasadne ravni i krov trebalo podeliti na najmanje dve zone, sa odgovarajućim koeficijentima pritisaka, kao što je prikazano na slikama 6.1 do 6.4;
- direktno navetrenu i zavetrenu stranu treba podeliti na gornju i donju zonu, gde  $C_{pe}$  [-] u donjoj zoni ima ~2 puta manju apsolutnu vrednost nego u gornjoj zoni. Ovaj zaključak je posledica uticaja atmosferskog graničnog sloja i raspodele brzine vetra po visini;
- poredeći vrednosti koeficijenata  $C_{pe}$  [-] dobijenih u ovom istraživanju i vrednosti date u standardima, SRPS EN 1991-1-4 i SRPS U.C7.112, dolazimo do zaključka da se koeficijenti dobijeni numeričkim modeliranjem, bolje slažu sa aktuelnim standardom SRPS EN 1991-1-4. Uočeno je i da su dobijeni koeficijenti na zavetrenoj strani objekta, ipak nešto manji po apsolutnoj vrednosti, nego u ovom standardu. Takođe, dobijeni koeficijenti  $C_{pe}$  su veći po apsolutnim vrednostima od koeficijenata datih u do skoro važećem standardu SRPS.U.C7.112.

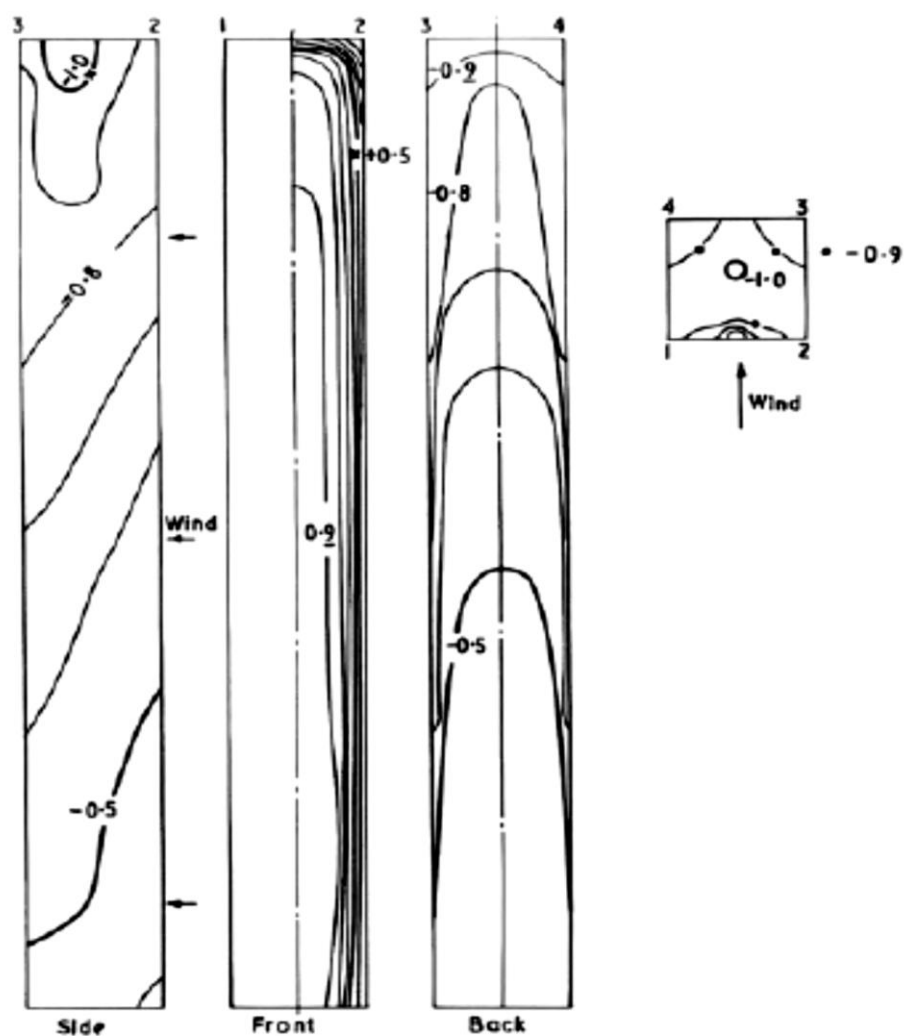
Treba napomenuti da su u standardu SRPS U.C7.112 bili dati spoljašnji i unutrašnji koeficijenti pritisaka za zgradu na koju vetar deluje pod uglom uglom od 0, 15 i 45 stepeni. U okviru važećeg standarda SRPS EN 1991-1-4 dati su jedinstveni koeficijenti pritisaka nezavisno od pravca dejstva vetra.

## **6.3 Analiza rezultata i poredjenje sa rezultatima dostupnih eksperimenata i literaturom**

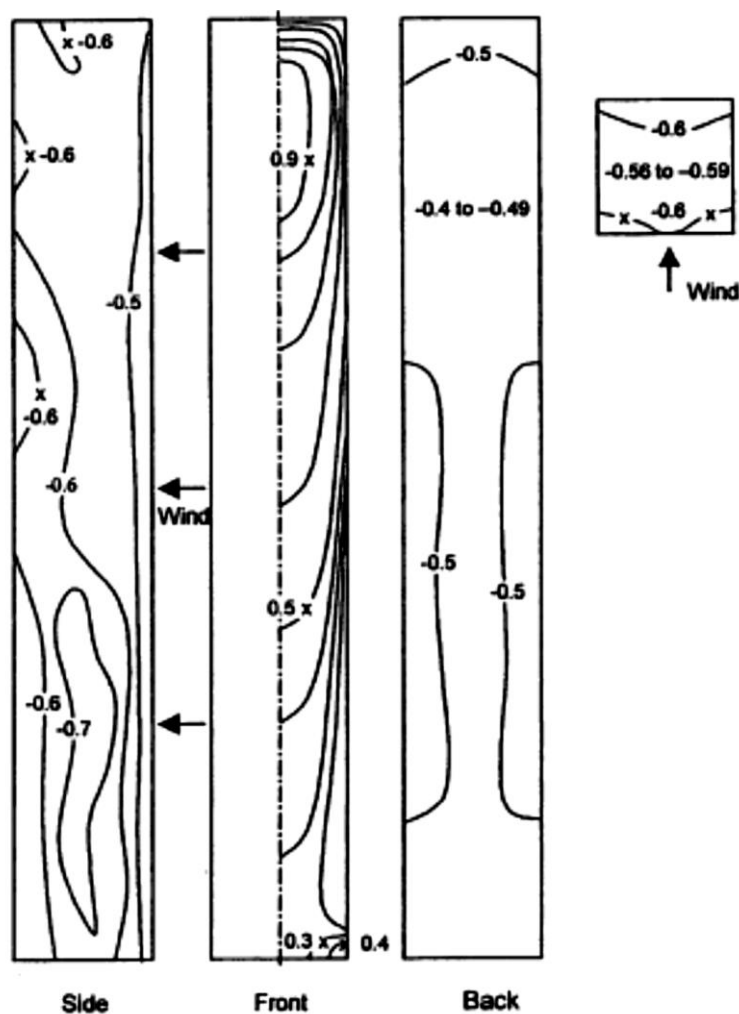
U nastavku će biti prikazani neki od dostupnih rezultata eksperimenata iz literature za višespratne zgrade, istovetne ili slične geometrije kao analizirani model. Obzirom da je sprovođenje eksperimenata u ovoj oblasti zahtevan i skup proces i nije svima i svuda dostupan, istraživači često koriste rezultate

eksperimenata izvedenih na prestižnim univerzitetima i poznatim laboratorijama, koje poseduju aerodinamičke tunele. U nastavku biće prikazani neki od njih.

Na slikama 6.5 i 6.6 prikazani su rezultati eksperimenata koje je sproveo *Baines* 1965. godine, na visokoj zgradi. Ovi rezultati smatraju se pouzdanim i često se koriste za upoređivanje. Raspodela koeficijenata pritiska za sve fasade zgrade i krov dobijena je, kako za ravnomernu raspodelu brzine vetra po visini (slika 6.5), tako i za slučaj kada na raspodelu brzine po visini utiče hrapavost terena (slika 6.6).



*Slika 6.5. Raspodela koeficijenata pritiska bočne (side), navetrene (front), zavetrene (back) fasade i krova pri konstantnoj raspodeli brzine vetra po visini (Baines 1965)*



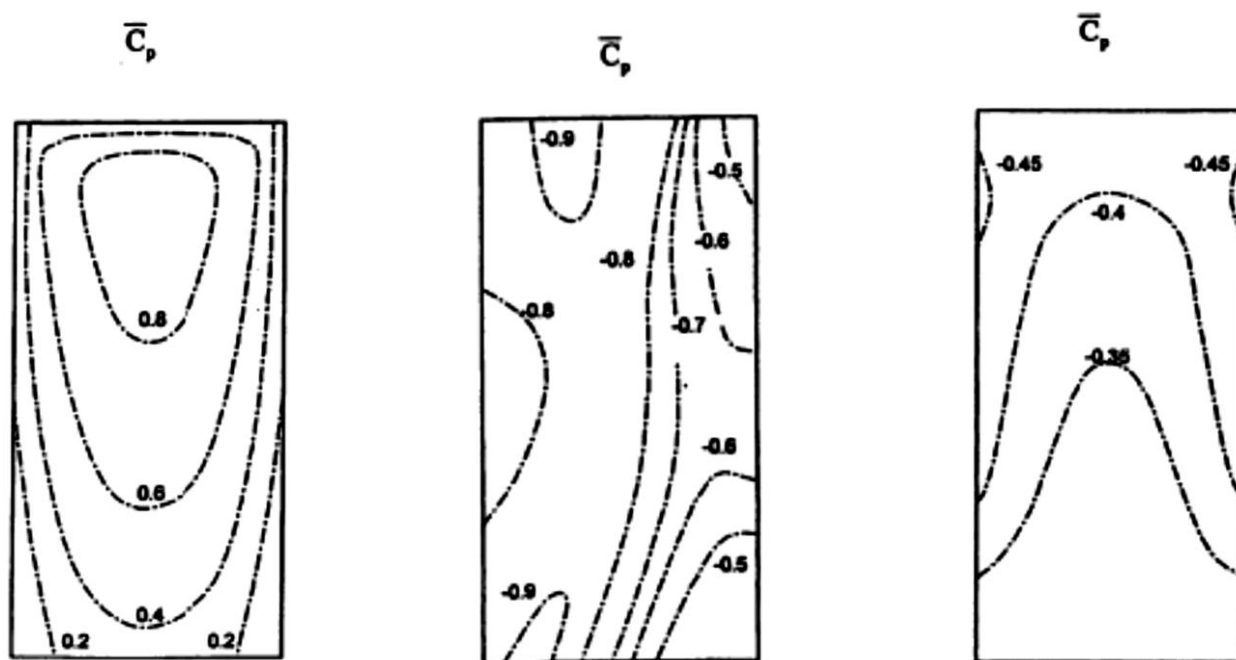
Slika 6.6. Raspodela koeficijenata pritisaka bočne, navetrene i zavetrene fasade i krov u atmosferskom graničnom sloju (AGS) (Baines 1965)

Poređenjem rezultata dobijenih numeričkim modeliranjem u okviru ovog istraživanja prikazanim u poglavlju 5 sa rezultatima ovog eksperimenta (Baines 1965), dolazimo do sledećih zaključaka:

- oblik dijagrama raspodele koeficijenata pritisaka na svim fasadnim ravnima i krovu je istovetan kod numeričkog modeliranja i eksperimenta;
- bočne i zavetrena fasadna ravan kao i krov su u celosti izložene sišućem dejstvu vetra;
- navetrena strana zgrade je kod eksperimentalnih istraživanja izložena u celosti pritiskujućem dejstvu vetra dok se kod numeričkih simulacija uz bočne ivice fasade i ivicu prema krovu javlja uzana zona sa sišućim dejstvom vetra;
- vrednosti koeficijenata pritisaka,  $C_p$  [-], takođe, su pokazale izuzetno dobro slaganje na navetrenoj fasadi, bočnim stranama i krovu objekta;

- odstupanje maksimalne vrednosti koeficijenta pritiska,  $_{max}C_p$  na navetrenoj strani je 10% kod *RNG k- $\epsilon$*  modela, dok je kod *SST k- $\omega$*  turbulentnog modela oko 5%;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na istoj visini kao kod numeričkih modela;
- na zavetrenoj fasadi objekta koeficijenti pritiska,  $C_p$  [-] se slažu jedino uz bočne ivice fasade. Najveća odstupanja  $C_p$  [-] dobijenih numeričkim simulacijama i eksperimentom su upravo na zavetrenoj strani objekta. U gornjoj polovini zavetrene fasade koeficijenti  $C_p$  dobijeni numeričkim simulacijama su niži od vrednosti dobijenih u okviru ovog eksperimenta i to oko 20%. Ova odstupanja rastu kako se ide prema dnu zavetrene fasade, te su u donjoj četvrtini koeficijenti  $C_p$  [-] dobijeni numerički i do tri puta manji od eksperimentalno izmerenih vrednosti.

Nepunih dvadeset godina kasnije, 1984. godine, *Cheung* je izveo eksperiment za zgradu čiji je odnos visine i širine,  $h/d=2.1$ . Uticaj hrapavosti terena takođe je uzet u obzir, odnosno model ispitivane zgrade se nalazio u atmosferskom graničnom sloju. Pored srednjih (*mean*) vrednosti koeficijenata pritisaka na fasadama zgrade prikazanih na slici 6.7, u originalnom istraživanju date su i maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka za svaku fasadu zgrade posebno.

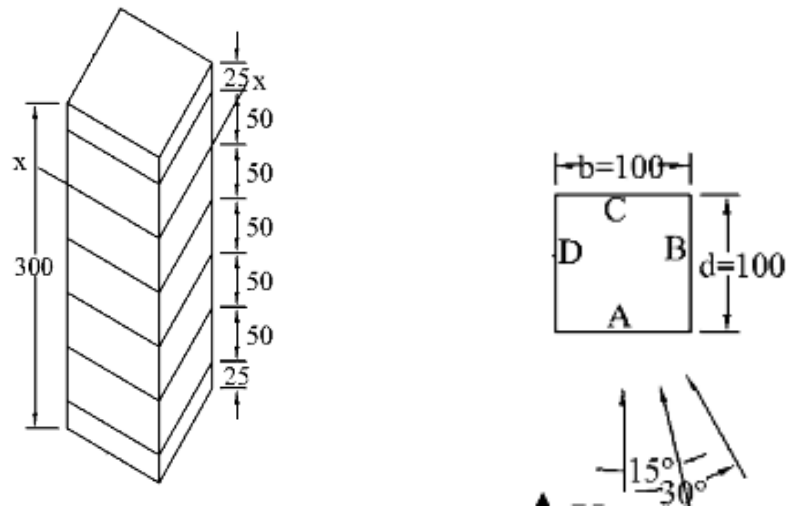


Slika 6.7. Raspodela koeficijenata pritisaka navetrene, bočne i zavetrene fasade u atmosferskom graničnom sloju (AGS) (*Cheung* 1984)

Poređenjem rezultata dobijenih numeričkim modeliranjem prikazanim u poglavlju 5 sa rezultatima ovog eksperimenta (Cheung 1984) dolazimo do sledećih zaključaka:

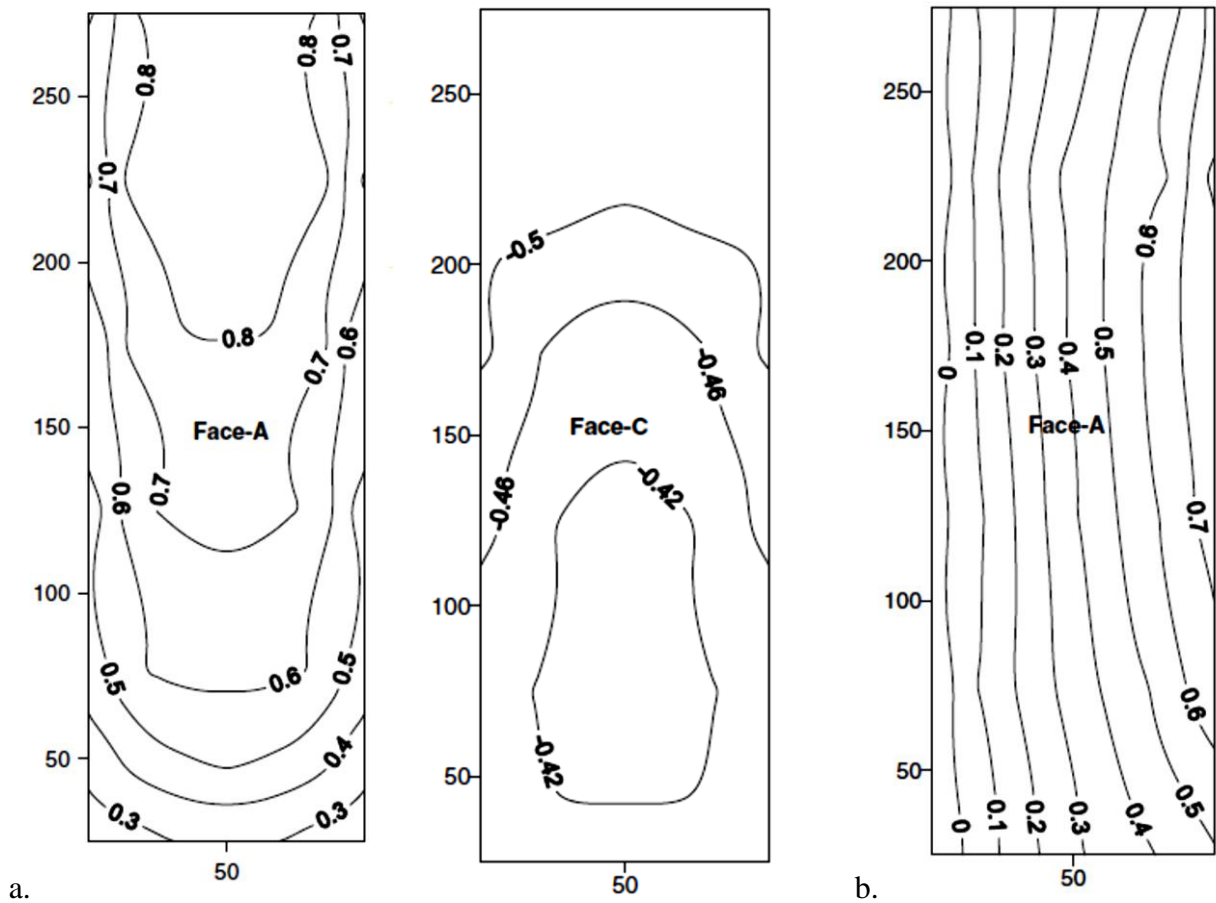
- oblik dijagrama raspodele koeficijenata pritisaka na svim fasadnim ravnima i krovu je istovetan kod numeričkog modeliranja i eksperimenta;
- bočne i zavetrena fasadna ravan kao i krov su u celosti izložene sišućem dejstvu vetra;
- navetrena strana zgrade je kod eksperimentalnih istraživanja izložena u celosti pritiskujućem dejstvu vetra dok se kod numeričkih simulacija uz bočne ivice fasade i ivicu prema krovu javlja uzana zona sa sišućim dejstvom vetra;
- vrednosti koeficijenata pritisaka,  $C_p$  [-] takođe su pokazale izuzetno slaganje na navetrenoj fasadi, bočnim stranama i krovu objekta;
- odstupanje maksimalne vrednosti koeficijenta pritiska,  $_{max}C_p$  [-] na navetrenoj strani je oko 20% kod *RNG*  $k-\varepsilon$  modela, dok je kod *SST*  $k-\omega$  turbulentnog modela oko 15%;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na istoj visini kao kod numeričkih modela;
- najveća odstupanja  $C_p$  dobijenih numeričkim simulacijama i eksperimentom su baš na zavetrenoj strani objekta. U gornjoj polovini zavetrene fasade vrednosti koeficijenta  $C_p$  dobijeni numeričkim simulacijama se dobro slažu sa eksperimentalno dobijenim vrednostima i iznose oko 0.4. Međutim, u donjoj polovini zavetrene fasade odstupanja rastu kako se ide prema dnu fasade, te se maksimalno odstupanje javlja u donjoj četvrtini visine, a vrednosti dobijene numerički su dvostruko manje od vrednosti koeficijenata  $C_p$  dobijenih eksperimentom.

Jedno od novijih istraživanja jeste i rad (Amin i Ahuja 2014) gde je ispitan niz zgrada u aerodinamičkom tunelu, a jedna od njih koristiće se ovde za poređenje sa dobijenim rezultatima ovog istraživanja. Na slici 6.8 prikazana je analizirana zgrada kvadratne osnove čiji je odnos visine i širine  $h/b=3$ .



Slika 6.8. 3-D prikaz i osnova analizirane zgrade (Amin i Ahuja 2014)

Na slici 6.9 (a) prikazani su bezdimenzionalni koeficijenti pritiska za navetrenu i zavetrenu fasadnu ravan kada vetar deluje pod uglom  $0^{\circ}$ . Na slici 6.9 (b) prikazana je navetrena fasada kada vetar deluje pod uglom od  $45^{\circ}$ .



Slika 6.9 Raspodela koeficijenata pritiska: (a) navetrene i zavetrene fasade kada vetar deluje pod uglom  $0^{\circ}$ ; (b) navetrene fasade kada vetar deluje pod uglom  $45^{\circ}$  (Amin i Ahuja 2014)

Poređenjem rezultata dobijenih numeričkim modeliranjem prikazanim u poglavlju 5 sa rezultatima ovog eksperimenta (Amin i Ahuja 2014) dolazimo do sledećih zaključaka, za slučaj kada vetar deluje upravno na fasadnu ravan (slika 6.9 (a)):

- oblik dijagrama raspodele koeficijenata pritisaka na navetrenoj i zavetrenoj fasadi je istovetan kod numeričkog modeliranja i eksperimenta;
- bočne i zavetrena fasadna ravan kao i krov su u celosti izložene sišućem dejstvu vetra;
- navetrena strana zgrade je kod eksperimentalnih istraživanja izložena u celosti pritiskujućem dejstvu vetra dok se kod numeričkih simulacija uz bočne ivice fasade i ivicu prema krovu javlja uzana zona sa sišućim dejstvom vetra;
- odstupanje maksimalne vrednosti koeficijenata pritiska,  $_{max}C_p$  na navetrenoj strani je oko 20% kod *RNG k-ε* modela dok je kod *SST k-ω* turbulentnog modela oko 15%;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na istoj visini kao kod numeričkih modela;
- na zavetrenoj strani objekta vrednosti koeficijenata  $C_p$  [-] kod eksperimentalnih istraživanja su prilično stabilne i u blagom opadanju prema dnu objekta. Kod numeričkih simulacija vrednosti  $C_p$  su takođe u padu od krova prema dnu zavetrene fasade, ali je gradijent opadanja izraženiji. U gornjoj polovini zavetrene fasade vrednosti koeficijenta  $C_p$  dobijeni numeričkim simulacijama se dobro slažu sa eksperimentalno dobijenim vrednostima i iznose od 0.4 do 0.5. U donjoj polovini zavetrene fasade odstupanja rastu kako se ide prema dnu fasade. Tako da se maksimalno odstupanje javlja u donjoj četvrtini visine i vrednosti dobijene numerički su tri puta manje od vrednosti  $C_p$  dobijenih eksperimentom;

Ovo istraživanje je jedno od retkih koje je obuhvatilo i dejstvo vetra pod uglom. Na slici 6.9 (b) prikazana je jedna od dve navetrene fasade objekta kada vetar deluje pod uglom od  $45^0$  u odnosu na fasadu objekta. Upoređujući ove rezultate sa vrednostima koeficijenta  $C_p$  dobijenim numeričkim putem zaključujemo:

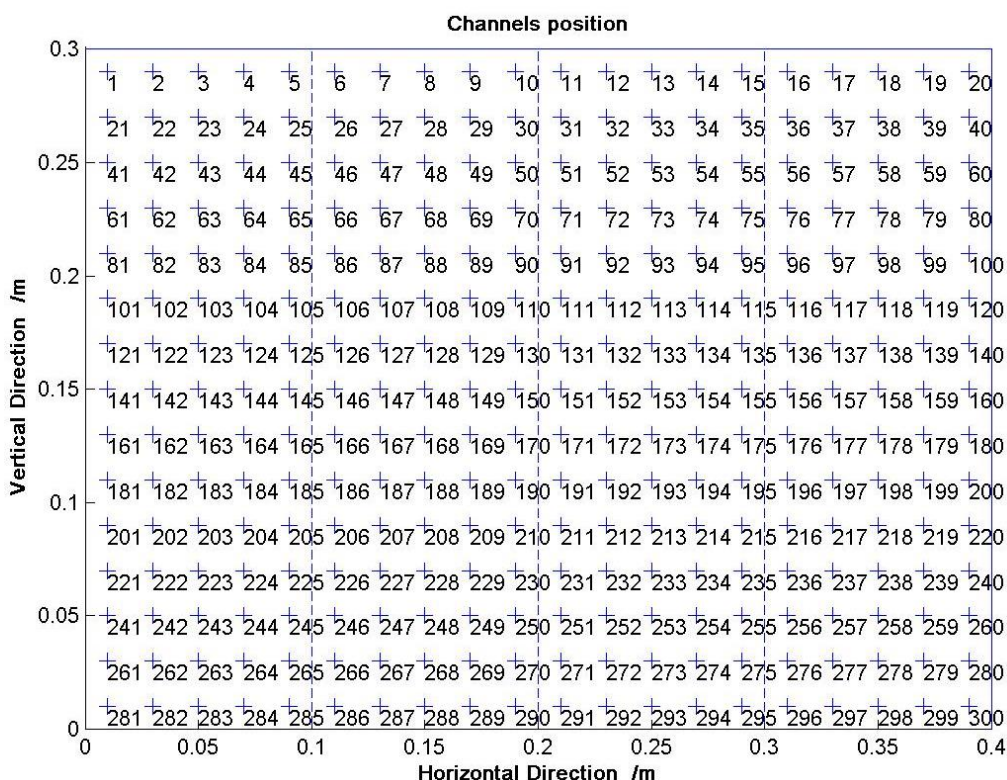
- oblik dijagrama raspodele koeficijenata pritisaka na fasadi direktno izloženoj dejstvu vetra je istovetan kod numeričkog modeliranja i eksperimenta;



- navetrena strana zgrade je kod eksperimentalnih istraživanja izložena u celosti pritiskujućem dejstvu vetra, dok se kod numeričkih simulacija uz bočnu ivicu fasade i ivicu prema krovu javlja uzana zona sa sišućim dejstvom vetra;
- odstupanje maksimalne vrednosti koeficijenta pritiska,  $_{max}C_p$  na navetrenoj strani je oko 20% kod *SST k- $\omega$*  turbulentnog modela;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na istoj visini kao kod numeričkih modela;

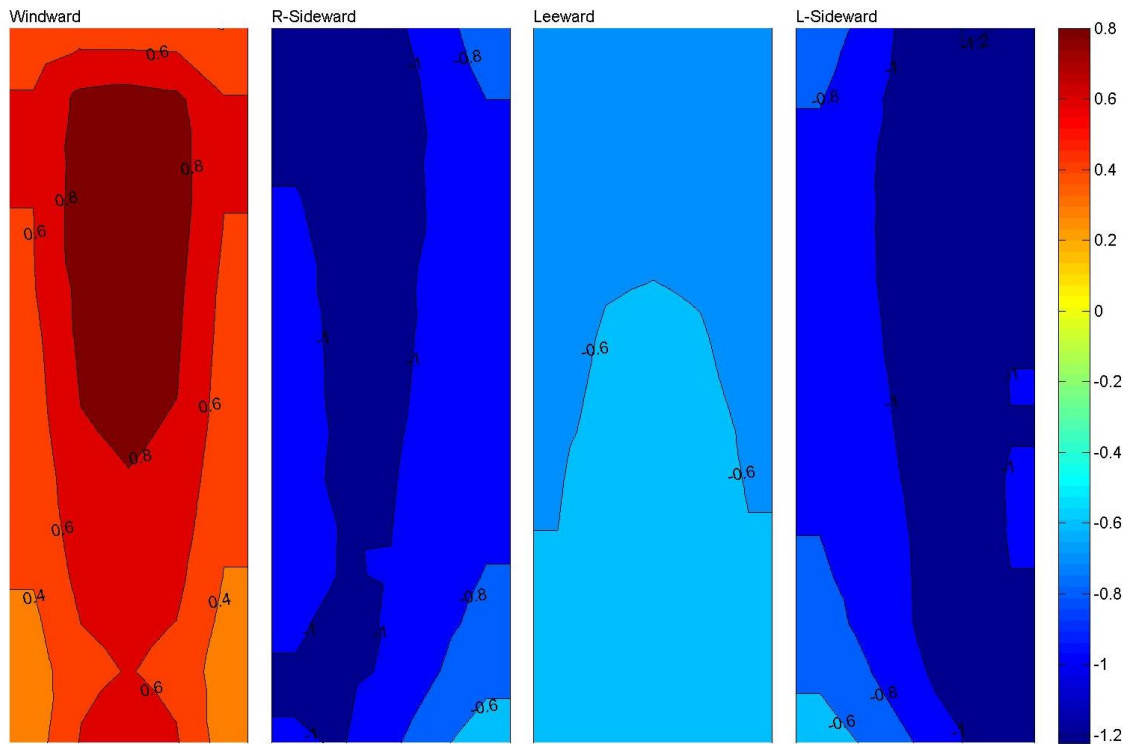
Važno je napomenuti da kod analize rezultata dobijenih eksperimentalnim putem u aerodinamičkim tunelima, treba imati na umu da se tačke u kojima se meri pritisak na fasadama objekta, nalaze na određenom rastojanju od ivice zgrade, a koje je različito za različite eksperimente. Kod prethodno prikazanog eksperimenta (Amin i Ahuja 2014) iznosi 1/13 širine posmatrane fasade dok je to rastojanje kod eksperimenta prikazanog u nastavku čak petina širine posmatrane fasade, B/5 (slika 6.10). Ovo navodi na zaključak da se pritisci ili vrednosti od interesa u zonama blizu uglova objekta ne mogu uzeti sa sigurnošću.

Velika baza podataka formirana je u okviru zajedničkog projekta Politehničkog univerziteta iz Tokija i Univerziteta Notr Dam iz SAD-a, i pristup ovoj bazi je slobodan. Ova baza sadrži podatke merenja dejstva vetra u aerodinamičkom tunelu za veliki broj zgrada, kako izolovanih, tako i za grupe zgrada. Zgrade su različitih odnosa dimenzija i visine, a uzeta je u obzir i hrapavost terena. Ispitivane su zgrade pod različitim uglovima dejstva vetra, od  $0^0$  -  $50^0$  sa korakom od  $5^0$ . Na slici 6.10 data je šema tačaka gde su bile merne tačke za izolovanu zgradu sa odnosom dimenzija  $b:d:h = 1:1:3$ .



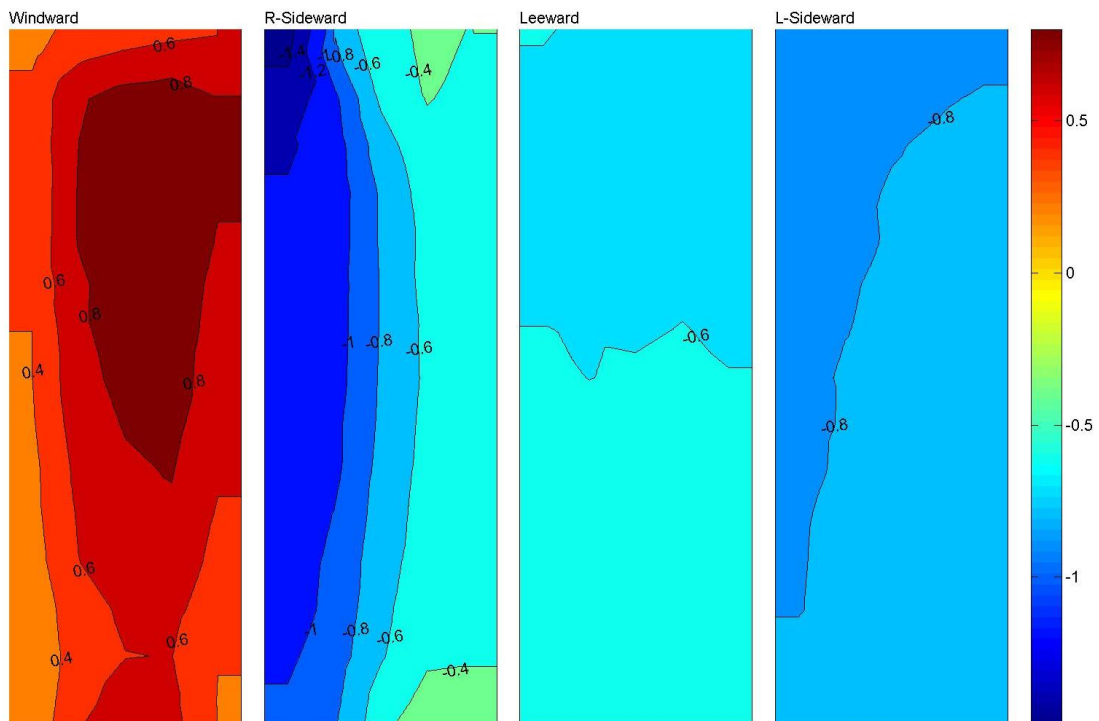
Slika 6.10. Raspored mernih tačaka na sve četiri fasade zgrade  
[http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm)

U nastavku će na slikama 6.11, 6.12, 6.13 i 6.14 biti prikazani bezdimenzionalni koeficijenti pritiska  $C_p$  za zgradu najsličniju zgradi analiziranoj u okviru ovog istraživanja, i to po svim važnim parametrima, odnosu dimenzija u osnovi i visine zgrade i izloženosti objekta preko koeficijenta  $\alpha$  (vidi tabelu 4.5 i 4.10).

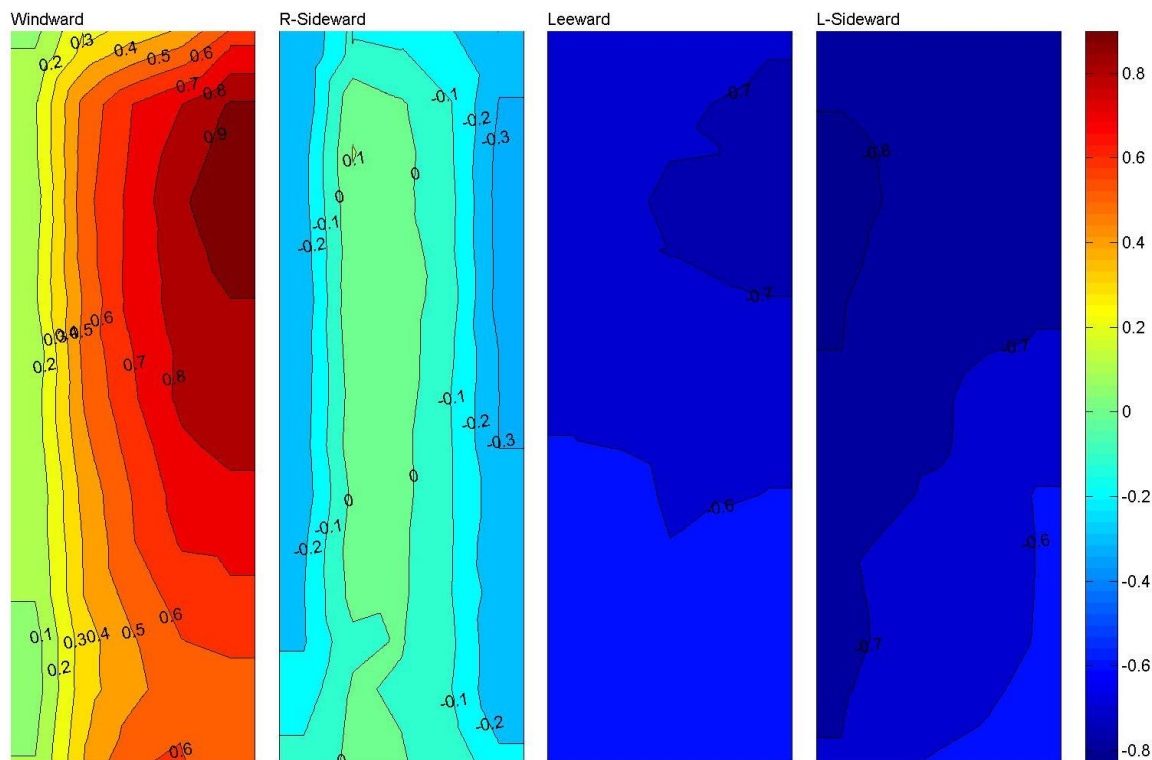


Mean wind pressure coefficients on a high-rise building.

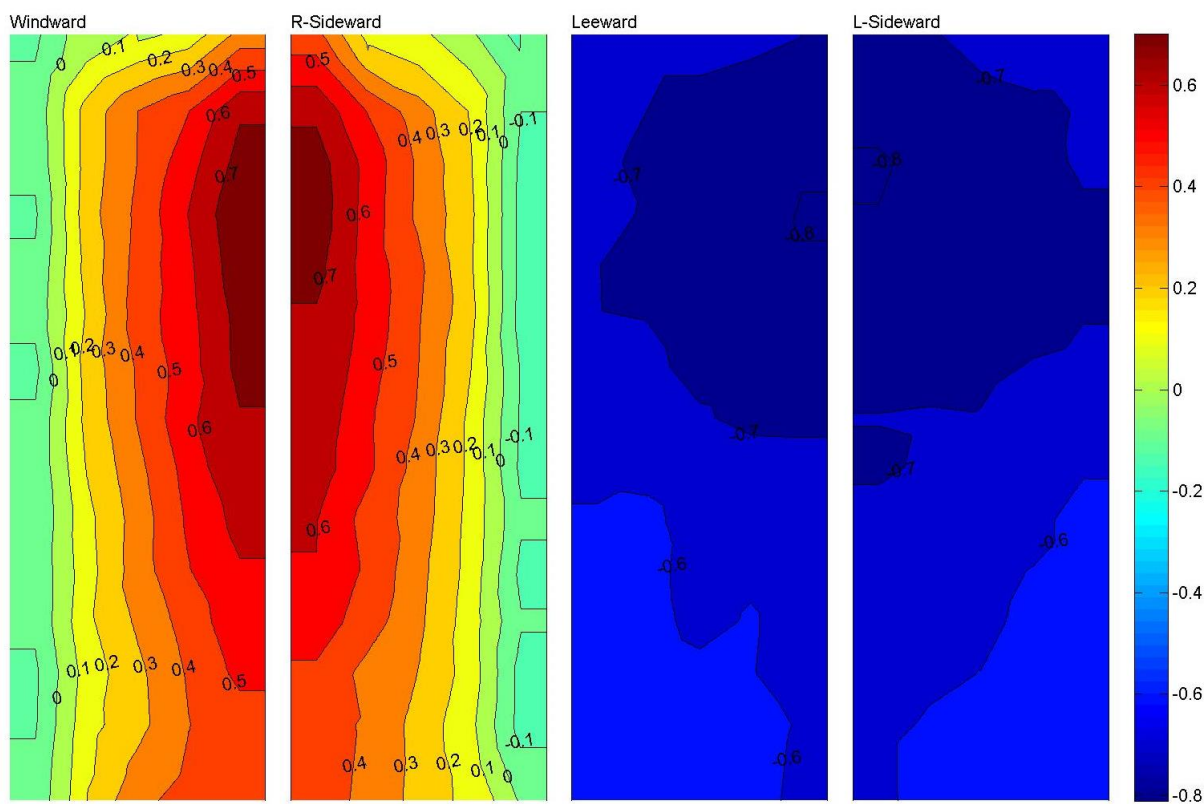
Slika 6.11. Koeficijenti pritiska  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje upravno,  $\alpha=0^\circ$   
[http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm)



Slika 6.12. Koeficijenti pritiska  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha=15^\circ$   
[http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm)



Slika 6.13. Koeficijenti pritiska  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha = 30^\circ$   
[http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm)



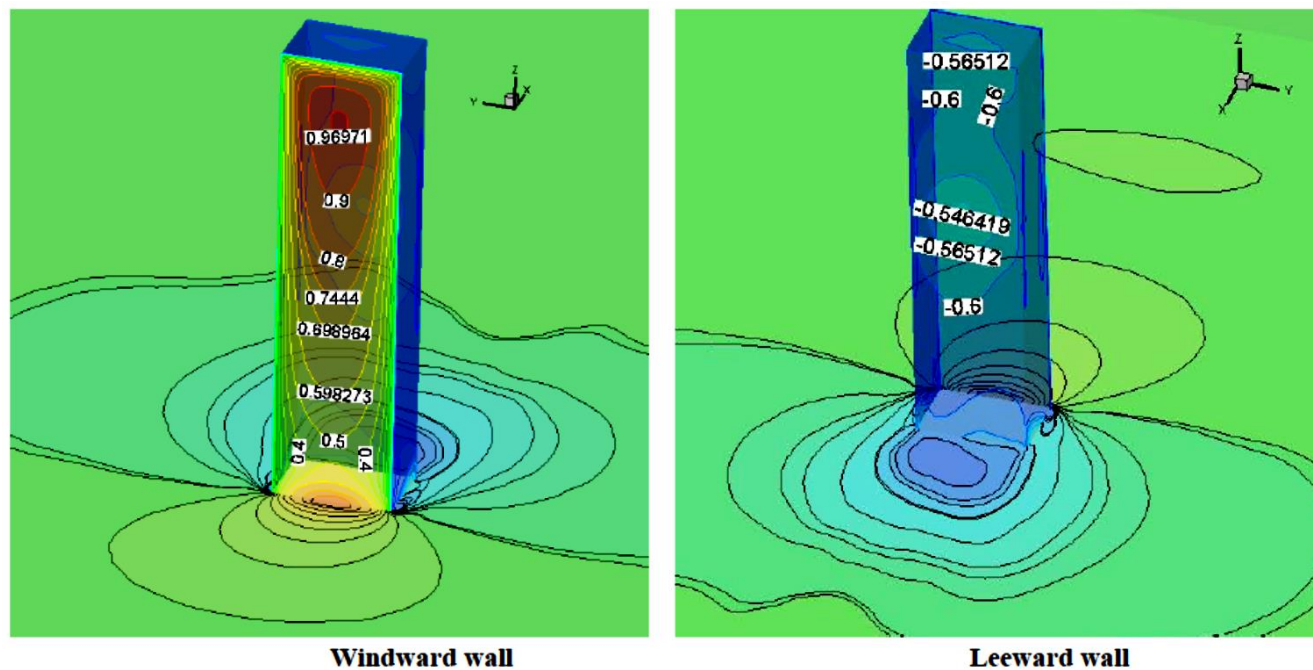
Slika 6.14. Koeficijenti pritiska  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha = 45^\circ$   
[http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info\\_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm](http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm)

U nastavku su upoređeni rezultati dobijeni numeričkim simulacijama u softverskom paketu ANSYS Workbench 15.0 (CFX) koji su prikazani u poglavljima 5.6.1 do 5.6.4 i koeficijenti pritiska prikazani u ovom poglavlju dobijeni eksperimentalnim putem [1]. Treba naglasiti da numerički model i model na kome je vršeno eksperimentalno ispitivanje nisu u potpunosti isti već slični, što je prethodno i opisano. Razlike se pre svega ogledaju u dimenzijama zgrade i odnosu stranica prema visini, a potom i u parametrima kojima se opisuju hrapavost terena. Uz prethodno navedeno zaključujemo sledeće:

- dijagram raspodele koeficijenata pritiska na sve četiri fasade zgrade i krova je istovetan i kod numeričkog i eksperimentalnog pristupa, i vizuelnim pregledom je lako uočljiv;
- generalno najbolje slaganje dobijenih koeficijenata pritiska sa [1] na svim fasadnim ravnima jeste kod modela gde vetar deluje pod uglom od  $30^0$  i  $45^0$ ;
- koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] na navetrenoj strani dobijeni numeričkim simulacijama su nešto veći od koeficijenata dobijenih eksperimentalnim putem [1]. Kod *RNG*  $k-\varepsilon$  modela razlike maksimalnih vrednosti  $C_p$  [-] su 15-20% veće, dok kod *SST*  $k-\omega$  modela je slaganje bolje i razlike iznose 5-10%, zavisno od ugla dejstva vetra;
- na levom zidu slaganja koeficijenata pritiska su veoma dobra i skoro bez odstupanja u polovini zida prema navetrenoj strani za delovanje vetra pod uglom  $15^0$  (grupa modela B) i  $30^0$  (grupa modela C);
- na desnom zidu koeficijenti pritiska dobijeni numeričkim simulacijama su veći od koeficijenata dobijenih eksperimentom na sličnom modelu, i to 10-20% zavisno od položaja zgrade;
- najveća odstupanja upoređenih vrednosti koeficijenata pritiska javila su se na zavetrenoj fasadi. Sama raspodela koeficijenata pritiska je istovetna, međutim, bolje slaganje rezultata je u gornjoj polovini visine fasade gde su odstupanja oko 25%. U donjoj trećini fasade odstupanja su znatna.

Neki od rezultata *CFD* istraživanja takođe su dostupna i mogu poslužiti za upoređivanje sa dobijenim rezultatima sopstvenih istraživanja. U nastavku su prikazani dobijeni koeficijenti pritiska na navetrenoj i zavetrenoj fasadi *CAARC* zgrade koja se smatra dobrim modelom za validaciju rezultata obzirom da pored merenja u aerodinamičkom tunelu ima i dostupnih rezultata dobijenih numeričkim simulacijama. Za detaljnija objašnjenja videti rad (*Dagnew* i dr. 2009).





Slika 6.15. Raspodela koeficijena pritiska navetrene i zavetrene fasade CAARC zgrade (Dagnew i dr. 2009)

Poređenjem rezultata prikazanih na slici 6.15 (Dagnew i dr. 2009) dobijenih numeričkim modeliranjem sa rezultatima ovog istraživanja prikazanim u poglavlju 5 dolazimo do sledećih zaključaka:

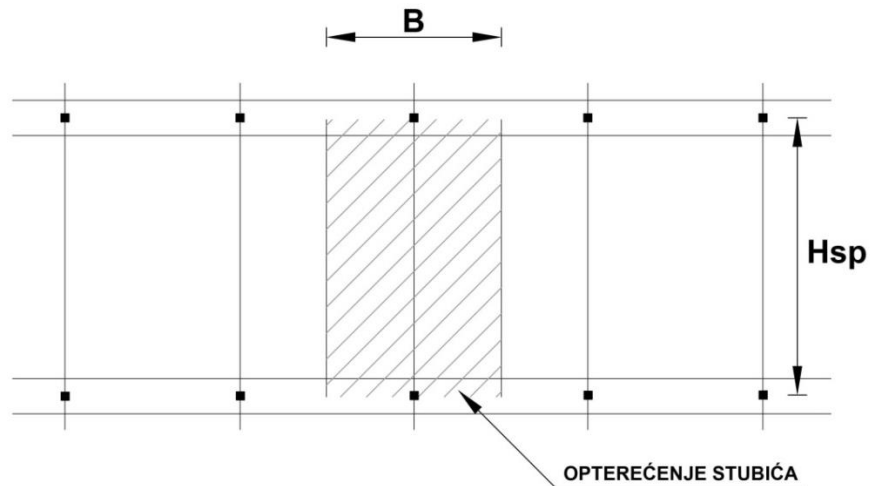
- oblik dijagrama raspodele koeficijena pritiska na navetrenoj i zavetrenoj fasadi je istovetan;
- odstupanje maksimalne vrednosti koeficijenta pritiska,  $max C_p$  na navetrenoj strani je oko 5% kod oba turbulentna modela, *RNG k- $\epsilon$*  i *SST k- $\omega$*  modela;
- maksimalna pozitivna vrednost bezdimenzionalnog koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-] javlja se na istoj visini;
- kao i u prethodnim slučajevima najveće odstupanje se javlja na zavetrenoj strani objekta. U gornjoj polovini zavetrene fasade vrednosti koeficijena pritiska dobijenim u okviru ovog istraživanja se slažu sa prikazanim vrednostima na slici 6.15, dok su u donjoj polovini fasade vrednosti dobijene ovim istraživanjem manje i do tri puta.

# 7 Numeričko modeliranje zid zaveses

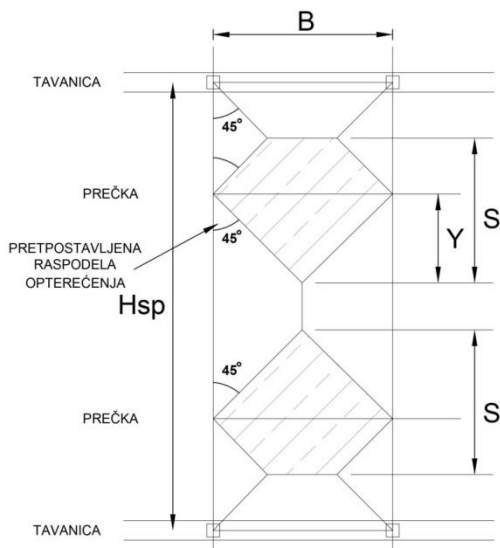
## 7.1 Statički sistemi elemenata zid zaveses

Vertikalni noseći elementi zid zaveses, stubići, u statičkom smislu mogu biti proste grede ili kontinualni nosači na dva polja gde svako polje predstavlja jednu spratnu visinu. Oslonci mogu biti organizovani na različite načine, pa tako stubići mogu biti izloženi zatezanju ili pritisku. Jedan od uobičajenih načina za proračun stubića predstavljen kako u literaturi (Vitomir 2006, TN 21-57) tako i u raznim katalozima i preporukama za proračun zid zaveses jeste taj da stubić bude opterećen jednako podeljenim opterećenjem od vetra po celoj svojoj visini. U ovom slučaju horizontalni noseći elementi zid zaveses, prečke primaju opterećenje od stakla ili druge ispune i prenose ga na stubiće (slika 7.1) putem koncentrisanih sila. Na slici 7.1 sa  $B$  je obeleženo rastojanje između stubića a sa  $H_{sp}$  spratna visina koja predstavlja ujedno i dužinu stubića zid zaveses. Za ekonomičniji dizajn preporučuje se da se opterećenje vetrom na deo fasade raspodeli kako na stubiće tako i na prečke. U ovom slučaju površinsko opterećenje od vetra prenosi se na stubiće i prečke i ima trapezoidni ili trougaoni oblik. Tačan oblik zavisi od spratne visine i međusobnog položaja i rastojanja stubića i prečki (slika 7.2 i 7.3). U ovom slučaju stubići pored direktnog opterećenja vetrom primaju i opterećenje sa prečki u vidu koncentrisanih sila koje potiču od dejstva vetra i težine stakla.

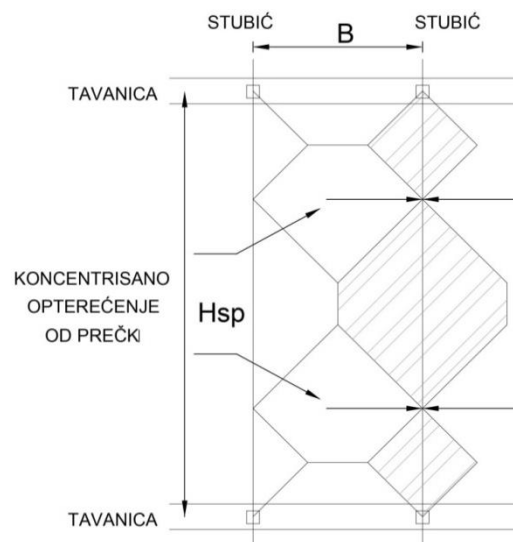




Slika 7.1. Jednakopodeljeno opterećenje vetrom vertikalne zid zavese



Slika 7.2. Opterećenje prečki zid zavese



Slika 7.3. Opterećenje stubića zid zavese

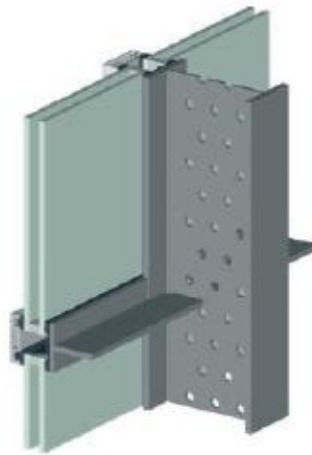
## 7.2 Numeričko modeliranje zid zavese od čelika i aluminijuma

Iako je proračun nosećih elemenata zid zavese, stubića i prečki u katalogima i preporukama predstavljen kao vrlo jednostavan, u praksi su ovi elementi izloženi složenom naprezanju daleko od predstavljenog. Treba imati na umu i da opterećenje vetrom nije ravnomerno ni na jednoj fasadi zgrade već varira a posebno su osetljivi uglovi zgrade i delovi blizu krova.

Pri izradi fasadnih konstrukcija tipa zid zavese, čelik i aluminijum našli su primenu zahvaljujući veoma dobrim mehaničkim svojstvima. Aluminijumske legure kao metali se dosta razlikuju od čelika. Ipak nesporno je da postoje i sličnosti, tako da se u svim istraživanjima neizbežno provlači poredjenje sa čelikom sa svih mogućih aspekata. Takođe, sva tehnička regulativa je neizbežno slična kako po obliku tako i po filozofiji sa odgovarajućom za čelične konstrukcije.

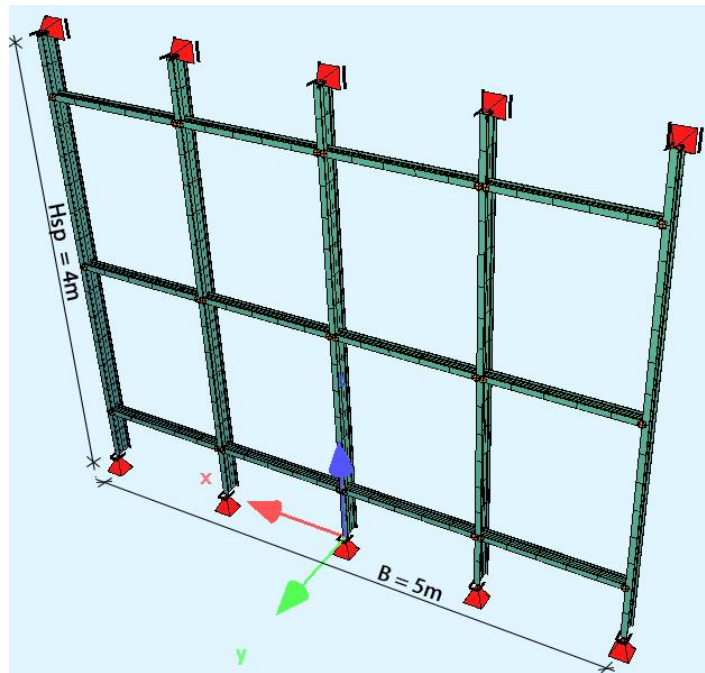
Obzirom na uobičajenu geometriju fasada tipa zid zavesa koja se skoro po pravilu sastoji od velikih panela ispune bilo da je u pitanju staklo ili neki drugi materijal i dugih, vitkih nosećih elemenata, stubića i prečki izrađenih od čelika ili aluminijuma, jasno je da se prilikom proračuna mora voditi računa pre svega o graničnom stanju upotrebljivosti dok će naponi retko biti prekoračeni u ovim elementima.

Već je naglašeno da noseći elementi zid zavesa, stubići i prečke kada se govori o obliku poprečnog preseka predstavljaju veoma raznorodnu grupu. Kod svih oblika poprečnih preseka može doći do lokalnog izvijanja nekog dela preseka. Međutim, grupu karakterističnih poprečnih preseka za ovaj tip fasada čine otvoreni, puni ili olakšani dvostruko-simetrični (slika 7.4) i mono-simetrični I poprečni preseci.



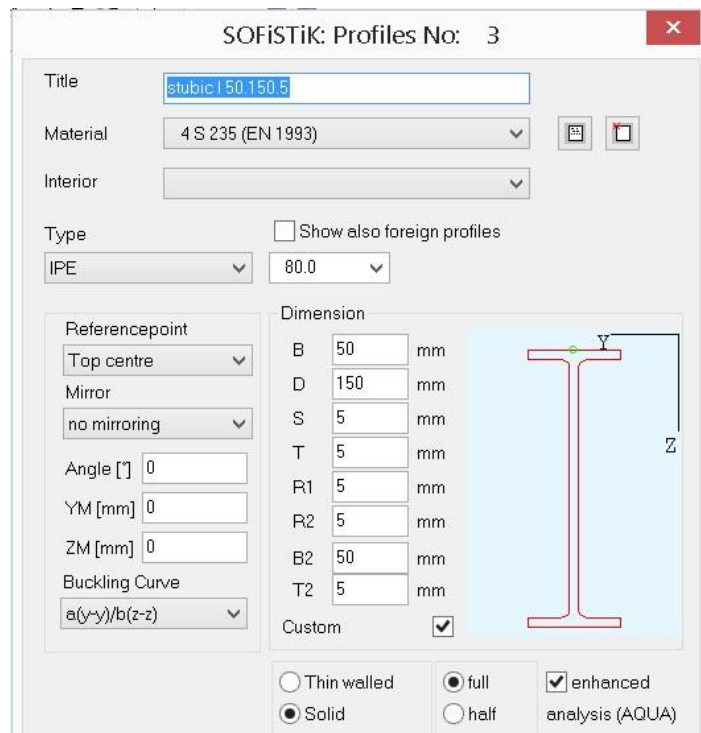
*Slika 7.4. Deo fasade proizvođača SCHUECO – Olakšani dvostruko simetrični stubić i prečka T – preseka (Schueco-Jansen katalog)*

Naredni deo istraživanja koji je obuhvatio numeričku analizu elemenata zid zavesa urađen je pomoću softverskog paketa SOFiSTiK 2014 koji se bazira na Metodi konačnih elemenata. Ovaj napredni softverski paket pored primene prilikom projektovanja inženjerskih konstrukcija nalazi široku primenu i u istraživačkim projektima. U toku ovog dela istraživanja formirane su tri grupe modela. Prvu grupu su činili modeli zid zavesa čiji su noseći elementi izrađeni od čelika S235. Druge dve grupe čine modeli čiji su stubići i prečke izrađeni od aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6, redom. Geometrija sve tri grupe modela je ista i predstavlja jedno karakteristično fasadno polje koje obuhvata deo fasade između susednih nosećih stubova,  $B$  i dve susedne međuspratne tavanice,  $H_{sp}$  (vidi sliku 7.5). Usvojene dimenzije modela su  $B \times H_{sp} = 5 \times 4$  m.



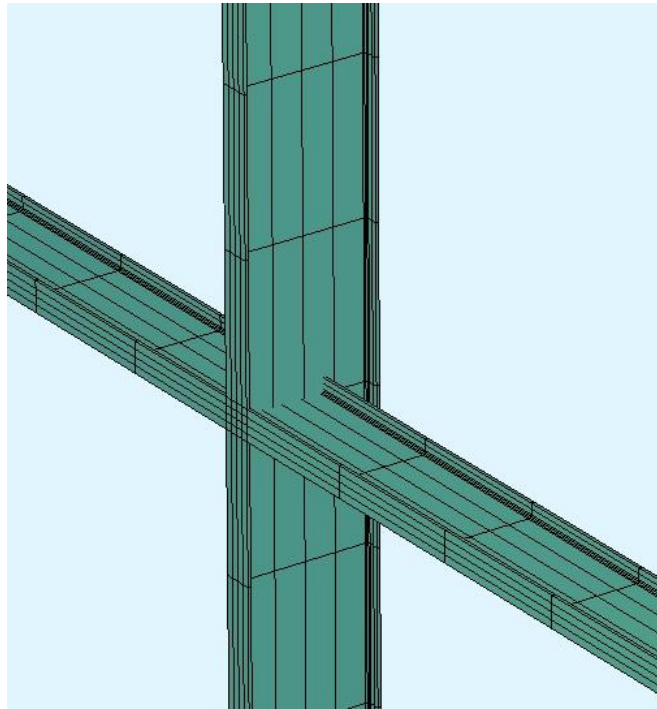
Slika 7.5. Geometrija i dimenzije analiziranog modela (SOFiSTiK 2014)

Za svaki formirani model izvršen je proračun sa dva tipa stubića, prvi gde je širina nožice 50 mm i drugi sa širinom nožice 60 mm obzirom da su to karakteristične širine stubića koje se javljaju kod većine proizvođača. U modulu AQUA pored velike baze standardnih poprečnih preseka profila, postoji mogućnost formiranja proizvoljnih poprečnih preseka. Na slici 7.6 prikazan je način formiranja i zadavanja poprečnog preseka jednog od stubića u SOFiSTiK 2014.



Slika 7.6. Zadavanje poprečnog preseka stubića (SOFiSTiK 2014)

Stubići i prečke su vezani ekscentrično, na način kakav im je položaj na samoj fasadi (vidi sliku 7.7). Za referentne tačke preseka i stubića i prečki usvojena je tačka na osi simetrije, a na gornjoj nožici (*Top centre*).



Slika 7.7. Veza stubića i prečke (SOFiSTiK 2014)

Raspodela opterećenja elemenata zid zavese usvojena je kao na slici 7.1 što znači da su stubići opterećeni jednakopodeljenim opterećenjem usled dejstva vetra dok su prečke opterećene težinom ispune od stakla ( $d_{\text{stakla}}=5+15+5$  mm). Najpre je urađena linearna analiza za pojedinačna opterećenja:

LC 1: sopstvena težina,

LC 2: težina stakla  $q_{\text{stakla}} = 0,375$  kN/m,

LC 3: spoljašnje, pritiskujuće dejstvo vetra  $q_w = +2,0$  kN/m,

LC 4: unutrašnje dejstvo vetra  $q_w = -1,0$  kN/m.

Potom su formirane kombinacije opterećenja LC 1001 – LC 1005 koje su uz stalna opterećenja podrazumevala i spoljašnje dejstvo vetra:

LC 1001:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3$  (po teoriji I reda)

LC 1002:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3$  (po teoriji II reda)

LC 1003:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+IMP$  (po teoriji II reda)

LC 1004:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3-IMP$  (po teoriji II reda)

LC 1005:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+IMP$  (po teoriji II reda uzimajući u obzir redukovanu krutost).

Uticaji od vetra preuzeti su iz dela istraživanja o dejstvu vetra i njegovoj raspodeli na fasade prethodno analizirane zgrade, dobijenih proračunskom dinamikom fluida a potom prikazanih u poglavlju 5.6. Utvrđeno je da za jedno fasadno polje oivičeno dvema susednim međuspratnim tavanicama i susednim nosećim stubovima zgrade, jeste moguće usvojiti dejstvo vetra kao ravnomerno ili približno ravnomerno. Naravno, kolika će vrednost tog opterećenja biti zavisi između ostalog i od položaja fasadnog polja na samoj fasadi. Za proračun sproveden u ovoj fazi istraživanja uzeto je dejstvo vetra na direktno navetrenu fasadu i to na njen centralni deo gde se inače javlja najveće pritiskujuće dejstvo. Analiza je sprovedena korišćenjem modula STAR2 programskog paketa SOFiSTiK 2014 koji omogućava proračun po teoriji I i II reda, unošenje početnih imperfekcija ali i proračun sa redukovanom krutošću. Početne imperfekcije u inicijalnim proračunima su uzete sa vrednošću preporučenom u standardima EN 1993-1-1 i EN 1999-1-1, koja iznosi  $L/200$  (slika 7.8). Međutim, na ovaj način dopušteni ugibi prikazani u poglavlju 3.6 već su bili dostignuti. Iz ovog razloga, početne imperfekcije uzete su u obzir prilikom proračuna i sa redukovanim vrednostima  $L/500$  i  $L/1000$ . Kombinacija opterećenja LC 1005 je pored stalnog opterećenja, spoljašnjeg dejstva vetra i imperfekcija, uzela u obzir i redukciju krutosti preporučenu standardima EN 1993-1-1 i EN 1999-1-1. Faktor redukcije iznosio je 1,1.

Unutrašnje dejstvo vetra se obično zanemaruje kod proračuna glavne noseće konstrukcije visokih zgrada ( $C_{pi}=0$ ). Međutim, kod lokalnog delovanja, u šta spadaju delovi fasade i krova, unutrašnji pritisci se moraju uzeti u obzir (Androić i dr. 2009). Nakon proračuna nosećih elemenata konstrukcije zid zavese gde je uzeto u obzir samo spoljašnje dejstvo vetra formirane su kombinacije opterećenja LC 1006 – LC 1010 koje su pored spoljašnjeg uzele u obzir i unutrašnje dejstvo vetra:

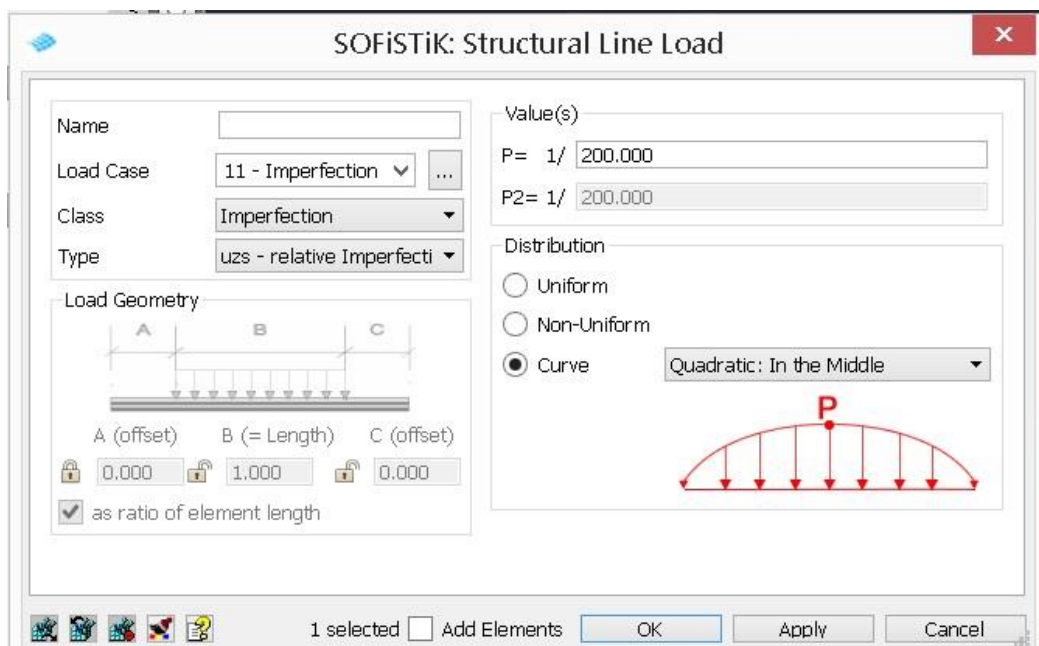
LC 1006:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+1.5*LC4$  (po teoriji I reda)

LC 1007:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+1.5*LC4$  (po teoriji II reda)

LC 1008:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+1.5*LC4+IMP$  (po teoriji II reda)

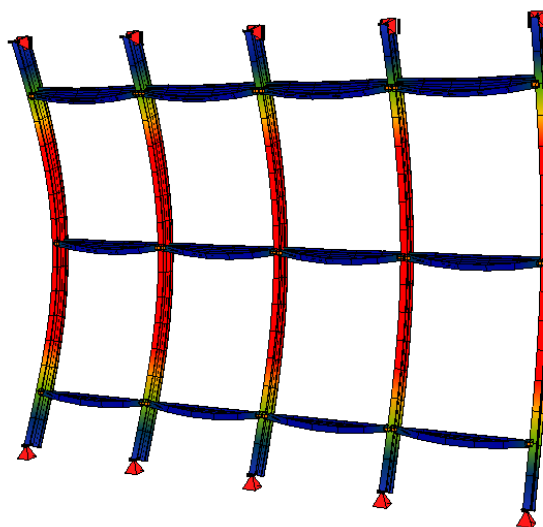
LC 1009:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+1.5*LC4-IMP$  (po teoriji II reda)

LC 1010:  $1.35*LC1+1,35*LC2+1.5*LC3+1.5*LC4+IMP$  (po teoriji II reda uzimajući u obzir redukovanu krutost).



Slika 7.8. Zadavanje imperfekcija u modulu SOFiLOAD (SOFiSTiK 2014)

Na slici 7.9 prikazana je analizirana fasadna konstrukcija i njeno ponašanje usled dejstva opterećenja LC 1003. U tabelama 7.1 do 7.3 prikazani su dobijeni maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{max}$  na stubićima nastalih usled zadatih kombinacija opterećenja. Tabela 7.1 odnosi se na zid zavesu izrađenu od čelika S235, a tabele 7.2 i 7.3 na zid zavese izrađene od aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6, redom. Ove analize odnose se na modele čiji stubići imaju širinu nožice  $b_{1,nož}=50$  mm.



Slika 7.9. Ponašanje fasadne konstrukcije pod dejstvom kombinacije opterećenja LC 1003 (SOFiSTiK 2014)

Tabela 7.1. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za S235

Materijal: <b>S235</b>	$b_{1,nož} = 50 \text{ mm}$						
	Zadata imperfekcija	IMP 1/200		IMP 1/500		IMP 1/1000	
		$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]
LC 1001: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	6.13	12.7	6.13	12.7	6.13	12.7	
LC 1002: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	6.15	12.7	6.15	12.7	6.15	12.7	
LC 1003: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	6.16	32.7	6.16	20.7	6.15	16.7	
LC 1004: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	6.14	-7.4	6.14	4.67	6.14	6.67	
LC 1005: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	6.16	34.0	6.16	22.0	6.16	18.0	
LC 1006: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	9.13	18.9	9.13	18.9	9.13	18.9	
LC 1007: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	9.16	18.9	9.16	18.9	9.16	18.9	
LC 1008: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	9.19	39.0	9.17	26.9	9.16	22.9	
LC 1009: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	9.13	-1.15	9.15	10.9	9.15	14.9	
LC 1010: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	9.19	40.9	9.17	28.8	9.17	24.8	

Kod projektovanja ovih fasada ugibi predstavljaju značajan faktor tako da granično stanje upotrebljivosti biva najčešće prvo dostignuto. Iz ovog razloga, vodilo se računa da ne budu prekoračeni dozvoljeni ugibi upravno na ravan fasade i u ravni same fasade, u svim analiziranim modelima. Ovo se odnosi za slučajeve opterećenja LC 1001 i LC 1002 koji su u svemu isti osim što je proračun za LC 1001 izvršen po teoriji I reda a za LC 1002 po teoriji II reda. Kod analiza koje su uzele u obzir i unutrašnje dejstvo vetra o prekoračenju dozvoljenih ugiba vodilo se računa kod slučajeve opterećenja LC 1006 i LC 1007.

Tabela 7.2. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{z,max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za AW 6063.T5

Materijal: <b>AW 6063.T5</b>	$b_{1,nož} = 50 \text{ mm}$						
	Zadata imperfekcija	IMP 1/200		IMP 1/500		IMP 1/1000	
		$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]
LC 1001: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	6.16	12.8	6.16	12.8	6.16	12.8	
LC 1002: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	6.18	12.9	6.18	12.9	6.18	12.9	
LC 1003: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	6.20	32.9	6.19	20.9	6.19	16.9	
LC 1004: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	6.15	-7.1	6.16	4.9	6.15	8.9	
LC 1005: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	6.20	34.2	6.19	22.2	6.19	18.2	
LC 1006: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	9.16	18.8	9.16	18.9	9.16	18.9	
LC 1007: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	9.18	18.9	9.18	18.9	9.18	18.9	
LC 1008: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	9.21	39.0	9.20	26.9	9.19	22.9	
LC 1009: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	9.17	-1.1	9.15	10.9	9.15	14.9	
LC 1010: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	9.21	40.9	9.20	28.8	9.19	24.8	



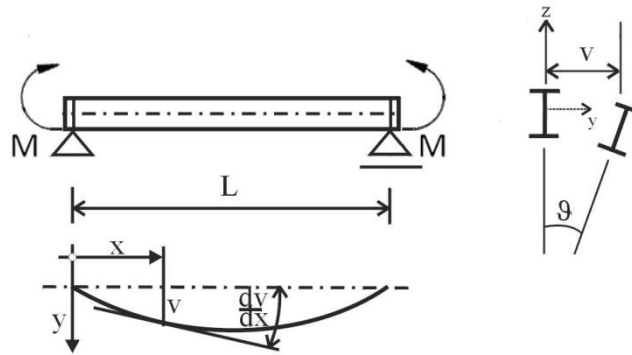
Tabela 7.3. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{z,max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za AW 6082.T6

Materijal: <b>AW 6082.T6</b>	$b_{l,nož} = 50 \text{ mm}$					
	IMP 1/200		IMP 1/500		IMP 1/1000	
	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]	$M_{y,max}$ [kNm]	$f_{max}$ [mm]
Zadata imperfekcija						
LC 1001: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	6.16	12.7	6.16	12.7	6.16	12.7
LC 1002: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	6.17	12.7	6.17	12.7	6.17	12.7
LC 1003: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	6.19	32.7	6.18	20.7	6.18	16.7
LC 1004: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	6.15	-7.4	6.16	4.67	6.16	8.67
LC 1005: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	6.19	34.0	6.18	21.9	6.18	17.9
LC 1006: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH1	9.16	18.8	9.16	18.8	9.16	18.8
LC 1007: 1.35Q+1.35Q+1.5W TH2	9.18	18.9	9.18	18.9	9.18	18.9
LC 1008: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP	9.20	39.0	9.19	26.9	9.18	22.9
LC 1009: 1.35Q+1.35Q+1.5W-IMP	9.16	-1.1	9.17	10.9	9.16	14.9
LC 1010: 1.35Q+1.35Q+1.5W+IMP+RedStiff	9.20	40.9	9.19	28.8	9.20	24.8

### 7.3 Bočno-torziono izvijanje

Oblast stabilnosti kod čelika i aluminijuma konstantan je predmet istraživanja. Ovaj problem jeste kompleksniji kod aluminijumskih legura nego kod čelika iz više razloga. Prvi je, da aluminijumske legure čine mnogo širu familiju materijala nego što je to slučaj kod konstrukcionih čelika, i to ne samo zbog različitih legura odnosno hemijskog sastava, već i zbog znatnih promena mehaničkih karakteristika usled stepena obrade.

Poprečni preseći nosača koji se koriste za noseće elemente zid zavesa, stubiće i prečke čine grupu uskih, a dubokih, poprečnih preseka. Razlog zbog kojeg su se ovakvi preseći odomaćili u konstrukcijama zid zavesa leži u nekoliko činjenica. Pre svega sa spoljašnje strane treba prihvatiti elemente ispune sa opterećenjem koje deluje na njih na adekvatan način a na unutrašnjoj strani treba iste elemente vezati za noseću konstrukciju objekta ili međusobno tako da se omoguće pomeranja usled spoljašnjih uticaja, ali i dilatacije u samim elementima. Ono što je karakteristično za otvorene poprečne preseke čija je visina znatno veća od širine, jeste da je krutost na savijanje oko jače ose ( $I_y$ ) znatno veća od krutosti na savijanje oko slabije ose ( $I_z$ ), dok je torziona krutost ( $I_t$ ) ovih preseka takođe mala. Nosači ovakvih karakteristika osetljivi su na bočna pomeranja i rotaciju oko centra smicanja. Situaciju dodatno usložnjava i činjenica da su preseći za elemente zid zavesa često simetrični samo oko jedne ose. Iz svega prethodno navedenog zaključujemo da je elemente zid zavesa neophodno proveriti na bočno-torziono izvijanje, posebno ako su oni otvorenih poprečnih preseka.



Slika 7.10. Bočno-torziono izvijanje

Bočno-torziono izvijanje nosača podrazumeva bočno pomeranje nosača uz istovremenu rotaciju oko vertikalne ose poprečnog preseka koje nastaje usled savijanja oko jače ose preseka, kada se dosegne kritična vrednost momenta (slika 7.10). Ovaj tip izvijanja nosača karakterističan je i za nosače od čelika i aluminijuma. Međutim, pristup ovom problemu iako ima sličnosti, nije istovetan u propisima vezanim za ova dva materijala (EN 1993-1-1:2005 i EN 1999-1-1:2007). Da bi se odredila relativna bočno-torziona vitkost,  $\bar{\lambda}_{LT}$  neophodno je izračunati elastični kritični moment za bočno-torziono izvijanje,  $M_{cr}$ . Međutim, važeća verzija Evrokoda 3 (EN 1993-1-1:2005) ne daje nikakve preporuke za proračun  $M_{cr}$  osim napomene da proračun elastičnog kritičnog momenta treba bazirati na bruto poprečnom preseku, uzeti u obzir uslove oslanjanja ili bočnih pridržanja kao i vrstu opterećenja. Razlog nepostojanja jasno definisanog izraza za  $M_{cr}$  i preporuka za njegov proračun leži u složenosti ove problematike ali i nepostojanju konsenzusa između članica Evropske unije (Androić 2009). Nasuprot opisanoj situaciji kod proračuna otpornosti čeličnih elemenata na bočno-torziono izvijanje, u propisima vezanim za proračun aluminijumskih nosača na bočno-torziono izvijanje pristup ovom problemu i algoritam proračuna u Evrokodu 9 (EN 1999-1-1:2007) je jasno definisan u Aneksu I. Problemi stabilnosti pa samim tim i problem bočno-torzionog izvijanja mnogo su izraženiji kod aluminijuma obzirom na malu vrednost modula elastičnosti u odnosu na čelik.

Problem bočno-torzionog izvijanja spada u složene probleme obzirom na činjenicu da analitička rešenja za određivanje otpornosti na bočno-torziono izvijanje postoje u zatvorenoj formi samo za najjednostavnije slučajeve kao što je slučaj proste grede duplo simetričnog, konstantnog poprečnog preseka opterećenog jednako podeljenim momentom. Za veliki broj slučajeva koji su česti u praksi da bi se dobila ova otpornost neophodna su približna rešenja.

Postupak dimenzionisanja nosača osetljivih na bočno-torziono izvijanje zavisi od brojnih faktora kao što su oblik poprečnog preseka, vrsta opterećenja, uslovi oslanjanja i bočnih pridržanja, položaj napadne tačke opterećenja, rezidualni naponi, itd. U nastavku će biti prikazane jednačine koje opisuju

problem bočno-torzionog izvijanja aluminijskih nosača i biće data objašnjenja. Više o ovom problemu, istorijatu i njegovim specifičnostima može se naći u literaturi (Vlasov 1940, Timoshenko 1961, Djalaly 1974, Anderson i Trahair 1972, Kitiporinchai 1986, Balaž 1999, Buđevac 1999, Đurić 2002, Galambos 2008, Androić 2009). Jednačinama od 7.1 do 7.5 predstavljen je izraz za elastični kritični moment čijim dostizanjem dolazi do gubitka stabilnosti nosača usled bočno-torzionog izvijanja:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} \quad (7.1)$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[ \sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] \quad (7.2)$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} \quad (7.3)$$

$$\zeta_g = \frac{\pi z_g}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad (7.4)$$

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} \quad (7.5)$$

gde su:

$\mu_{cr}$  – relativni, bezdimenzionalni kritični moment,

G – modul smicanja,

$EI_z$  – krutost na savijanje oko slabije ose preseka,

$EI_t$  – torziona krutost preseka,

$EI_w$  – krutost krivljenja preseka,

L – dužina između bočnih pridržanja.

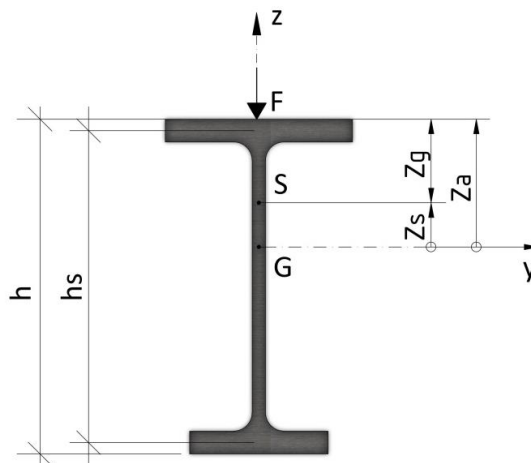
Ovim izrazima (jed. 7.1 do 7.5) obuhvaćeni su različiti uslovi oslanjanja nosača, uticaj položaja napadne tačke opterećenja ali i preseci simetrični oko jedne ose. Kod preseka simetričnih oko obe ose težište i centar smicanja se poklapaju, dok kod preseka simetričnih oko jedne ose to nije slučaj pa su jednačine za proračun složenije. Na slici 7.11 prikazan je monosimetričan presek gde je:

G - težište preseka,

S - centar smicanja,

$z_s$  – rastojanje centra smicanja od težišta preseka,

$z_g$  – rastojanje centra smicanja do napadne tačke opterećenja,  
 $z_a$  – rastojanje od težišta do napadne tačke opterećenja.



Slika 7.11. Monosimetričan I poprečni presek

Koeficijenti  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  zavise od vrste opterećenja i uslova oslanjanja i dati su u tabelama I.1 i I.2 Aneksa I Evrokoda 9 (EN 1999-1-1:2007). U tabeli 7.4 prikazani su koeficijenti  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  koji su se koristili u ovom istraživanju. Koeficijenti  $k_z$  i  $k_w$  predstavljaju faktore dužine izvijanja koji se odnose na rotaciju ( $k_z$ ) i krivljenje ( $k_w$ ) krajnjeg preseka. Ovi koeficijenti se odnose na bočno oslanjanje nosača (upravno na ravan opterećenja) i oni ne moraju biti istovetni sa uslovima oslanjanja u vertikalnoj ravni (Buđevac 1999).

Tabela 7.4. Vrednosti za  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  za odgovarajuća transverzalna opterećenja, faktore  $k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_w$ , faktor monosimetrije  $\psi_f$  i torzioni parametar  $\kappa_{wt}$  (EN 1999-1-1:2007)

Loading and support conditions	Buckling length factors			Values of factors							
	$k_y$	$k_z$	$k_w$	$C_1^{1)}$		$C_2$			$C_3$		
				$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	$\perp$ $\psi_f = -1$	$\perp$ $\perp$ $\perp$ $-0,9 \leq \psi_f \leq 0,9$	$\top$ $\psi_f = 1$	$\perp$ $\psi_f = -1$	$\perp$ $\perp$ $\perp$ $-0,9 \leq \psi_f \leq 0,9$	$\top$ $\psi_f = 1$
	1	1	1	1,127	1,132	0,33	0,459	0,50	0,93	0,525	0,38
	1	1	0,5	1,128	1,231	0,33	0,391	0,50	0,93	0,806	0,38
	1	0,5	1	0,947	0,997	0,25	0,407	0,40	0,84	0,478	0,44
	1	0,5	0,5	0,947	0,970	0,25	0,310	0,40	0,84	0,674	0,44

1)  $C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0})\kappa_{wt} \leq C_{1,1}$ , ( $C_1 = C_{1,0}$  for  $\kappa_{wt} = 0$ ,  $C_1 = C_{1,1}$  for  $\kappa_{wt} \geq 1$ ).

2) Parameter  $\psi_f$  refers to the middle of the span.

3) Values of critical moments  $M_{cr}$  refer to the cross section, where  $M_{max}$  is located

Parametar  $z_j$  je od izuzetne važnosti za određivanje kritičnog momenta na bočno-torziono izvijanje. Jednačina 7.7 prikazuje tačnu formulu za sračunavanje parametra  $z_j$ , međutim, u literaturi postoje brojni predlozi za njegovu aproksimaciju. Kada je poprečni presek simetričan oko jače ose (y-y osa) tada je  $z_j=0$ . Jednačinom 7.8 data je aproksimaciona formula iz Eurokoda 9 (EN 1999-1-1: 2007):

$$z_g = z_a - z_s \quad (7.6)$$

$$z_j = z_s - \frac{0,5}{I_y} \int_A (y^2 + z^2) z dA \quad (7.7)$$

gde su:

$z_a$  – koordinata napadne tačke opterećenja u odnosu na težište,

$z_s$  – koordinata centra smicanja u odnosu na težište,

$z_g$  – koordinata napadne tačke opterećenja u odnosu na centar smicanja.

$$z_j = 0,45\psi_f h_s \left( 1 + \frac{c}{2h_f} \right) \quad (7.8)$$

$$\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}} \quad (7.9)$$

U prethodnim jednačinama je:

$h_f$  – rastojanje između težišta gornje i donje nožice,

$c$  – visina rebra za ojačanje nožice (vidi sliku 7.10),

$\psi_f$  – faktor monosimetrije preseka,

$I_{fc}$  – moment inercije pritiskute nožice oko slabije ose preseka,

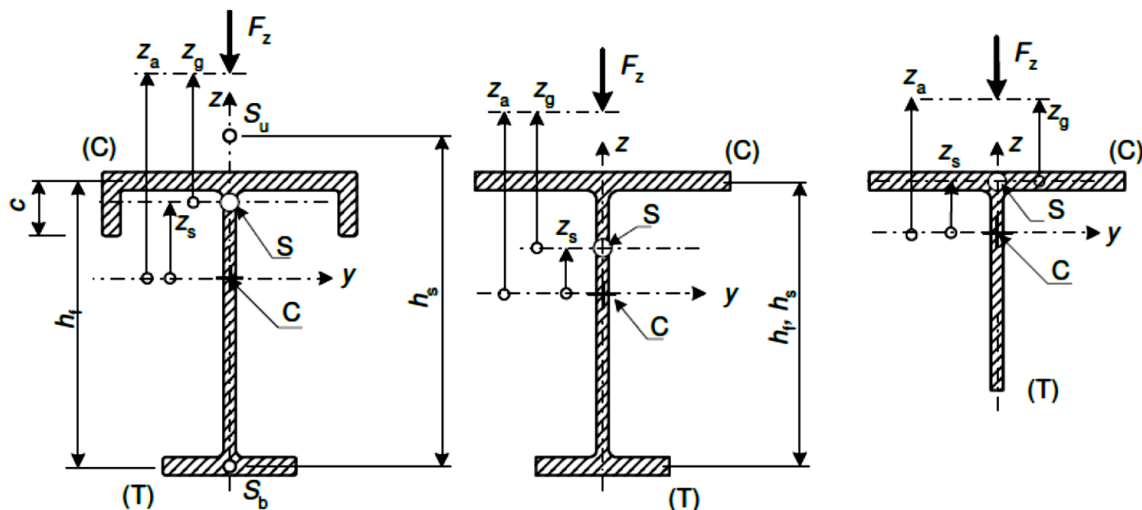
$I_{ft}$  – moment inercije zategnute nožice oko slabije ose preseka,

$h_s$  – rastojanje centra smicanja gornje i centra smicanja donje nožice.

Za I presek sa nejednakim nožicama bez ojačanja važi:

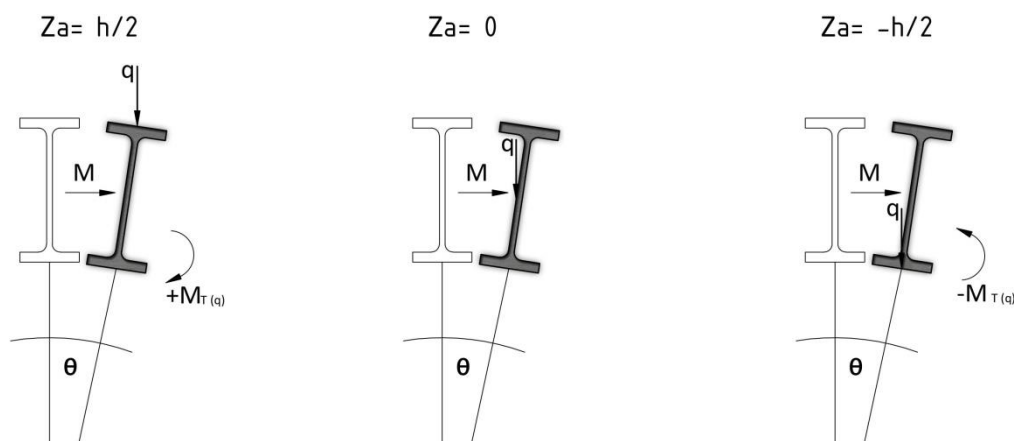
$$I_W = (1 - \psi_f^2) I_z (h_s/2)^2 \quad (7.10)$$

Na slici 7.12 prikazana je usvojena konvencija osa.



Slika 7.12. Konvencija orijentacije osa (EN 1999-1-1:2007)

Kod nosača opterećenih u ravni rebra, položaj napadne tačke sile bitno utiče na vrednost kritičnog momenta bočno-torzionog izvijanja,  $M_{cr}$ . Ukoliko je napadna tačka sile iznad ili ispod tačke smicanja,  $S$  ova sila na već deformisanom nosaču izaziva dodatne torzione uticaje. Ovi uticaji mogu biti stabilizujući za slučaj da sila deluje ispod centra smicanja i destabilizujući kada sila deluje iznad centra smicanja. Dakle, vrednost elastičnog kritičnog momenta je manja kada sila deluje iznad centra smicanja a najpovoljniji položaj napadne tačke opterećenja jeste kada se on nalazi ispod centra smicanja, npr. na donjoj nožici I preseka (slika 7.13).



Slika 7.13. Uticaj položaja napadne tačke opterećenja

Da bi se utvrdilo da je nosač otporan na bočno-torziono izvijanje koristi se jednačina 7.11 gde je sa  $M_{ed}$  označen računski moment savijanja, a sa  $M_{b,rd}$  računaska otpornost na bočno-torziono izvijanje i dat je jednačinom 7.12.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,rd}} \leq 1.0 \quad (7.11)$$

$$M_{b,rd} = \kappa_{LT} \frac{\alpha W_{el,y} f_o}{\gamma_{M1}} \quad (7.12)$$

$$\kappa_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (7.13)$$

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (7.14)$$

U prethodnim jednačinama je:

$\kappa_{LT}$  – faktor redukcije za bočno-torziono izvijanje,

$\alpha_{LT}$  – faktor imperfekcije,

$\bar{\lambda}_{0,LT}$  – granica horizontalnog platoa.

Relativna vitkost kod bočno-torzionog izvijanja data je jednačinom 7.15:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el} f_o}{M_{cr}}} \quad (7.15)$$

gde  $\alpha$  predstavlja faktor oblika i definisan je tabelom 7.5.

Tabela 7.5. Način određivanja koeficijenta oblika,  $\alpha$  (Tabela 6.4 iz EN 1999-1-1:2007)

Cross-section class	Without welds	With longitudinal welds
1	$W_{pl} / W_{el}^{*)}$	$W_{pl, haz} / W_{el}^{*)}$
2	$W_{pl} / W_{el}$	$W_{pl, haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	$W_{eff} / W_{el}$	$W_{eff, haz} / W_{el}$
*) NOTE These formulae are on the conservative side. For more refined value, recommendations are given in Annex F		

Vrednosti za  $\alpha_{LT}$  i  $\bar{\lambda}_{0,LT}$  treba usvojiti kao u tabeli 7.6.



Tabela 7.6. Vrednosti  $\alpha_{LT}$  i  $\bar{\lambda}_{0,LT}$

	$\alpha_{LT}$	$\bar{\lambda}_{0,LT}$
Klasa poprečnog preseka: <b>1 i 2</b>	0,1	0,6
Klasa poprečnog preseka: <b>3 i 4</b>	0,2	0,4

#### 7.4 Proračun otpornosti nosećih elemenata zid zavesa na bočno-torziono izvijanje

Nastavak istraživanja obuhvatio je analizu otpornosti nosača koji se koriste za izradu vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa, stubića, na bočno-torziono izvijanje. Razmatrani su aluminijumski nosači I poprečnih preseka i to kako dvostruko tako i mono-simetričnih preseka. Za ovaj deo istraživanja napravljen je program (*spreadsheet program*) u Majkrosoft Ekselu (*Microsoft Excel*) (u daljem tekstu Excel aplikacija) pod nazivom “*AL\_LTB\_CSP-3plate*”. Ova aplikacija je za proračun geometrijskih karakteristika preseka koristila program “*CSP-3plate*” koji je deo programskog paketa “RUBSTAHL” (*Kindmann 2007*) a koji omogućava proračun geometrijskih karakteristika proizvoljnih poprečnih preseka sastavljenih od najviše 3 elementa (ploče). Aplikacija “*AL\_LTB\_CSP-3plate*” sastoji se od tri sveske (*sheet*) od kojih je prva, “*Cross-sectional values*” preuzet iz “*CSP-3plate*” dok su druge dve napravljene u okviru ovog istraživanja i sastoje se od niza podprograma. U prvoj svesci, “*Cross-sectional values*” mogu se formirati proizvoljni poprečni preseci od najviše 3 ploče (dvostruko-simetrični, mono-simetrični I, T, U, Z preseci) i automatski se sračunavaju geometrijske karakteristike unešenog preseka (slika 7.14).

AL\_LTB\_CSP-3plate AW6063.T5 Print 3.xlsm - Micro

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View

Cut Copy Paste Format Painter Clipboard Font Alignment Number

hS  $f_x$  20

RUBSTAHL-Lehr- und Lernprogramme für Studium und Weiterbildung  
**Program CSP-3plate** written by R. Kindmann  
 Ruhr-Universität Bochum + Lehrstuhl für Stahl- und Verbundbau  
 Prof. Dr.-Ing. R. Kindmann + www.ruhr-uni-bochum.de/stahlbau

Program version 03/2007

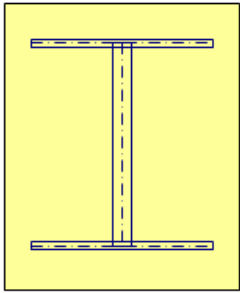
**Cross-sectional values of two- or three-plate cross-sections**

**Comment:** Cross-section of a crane gantry

**Description of the cross-section in reference-C.O.S. (all sizes in cm):**

Reference C.O.S. in the mid of web:  $y(\text{bar})$  to the left,  $z(\text{bar})$  downward

Top flange (horizontal)	Web (vertical)	Bottom flange (horiz.)
$t_o = 0.800$	$t_s = 0.500$	$t_u = 0.800$
$b_o = 5.000$	$h_s = 20.000$	$b_u = 5.000$
$y_o = 0.000$	<b>Hints</b>	$y_u = 0.000$
$z_o = -10.000$		$z_u = 10.000$



$b_o = 5$	[cm]
$t_u = 0.8$	[cm]
$t_o = 0.8$	[cm]
$\beta_f = 0.9$	[cm]
$b_u = 2.40$	[cm]

Areas by parts:  
 $A_o = 4.00$        $A_s = 10.00$        $A_u = 4.00$

The drawing is not in scale

**Results after standardisation and execution of the transformations:**

$I_{fc} = 8.3333$
$I_{ft} = 8.3333$
$I_{fo}/I_{ft} = 1$

**Cross-sectional values for bending (Standardization Part 1)**

Cross-sectional area	$A = 18.00$ cm <sup>2</sup>	$\beta_f = I_{fc}/(I_{fc} + I_{ft}) = 0.5$
Centre of gravity <b>S</b> (reference-C.O.S.)	$y_s = 0.000$ $z_s = 0.000$ cm	$\psi_f = (I_{fc} - I_{ft})/(I_{fc} + I_{ft}) = 0$
Rotation angle of principal axes	$\alpha = 0.000$ Bogenmaß $0.000$ Grad	
Principal moments of inertia	$I_y = 1,134$ $I_z = 16.88$ cm <sup>4</sup>	16.88

**Cross-sectional values for torsion (Standardization Part 2 - plate middle-line model)**

St. Venant torsion resistance	$I_T = 2.54$ cm <sup>4</sup>	proba $I_w$
Warping resistance	$I_\omega = 1,667$ cm <sup>6</sup>	1,646.09
Transformation constant for the warping ordinate	$\omega_k = 0.00$ cm <sup>2</sup>	1,687.50
Coordinates of the reference	$y_D = 0.000$ $z_D = 0.000$ cm	
Shear centre <b>M</b>	$y_M = 0.000$ $z_M = 0.000$ cm	
Shear centre <b>M</b> (reference-C.O.S.)	$y_M = 0.000$ $z_M = 0.000$ cm	

Slika 7.14(a). Eksel sveska "Cross-sectional values" (RUBSTAHL 2008)

37							
38		Ordinates in the reference system:			Ordinates in the principal system:		
39		<b>y</b>	<b>z</b>	<b>w</b>	<b>y</b>	<b>z</b>	<b>w</b>
40	TF / left	2.50	-10.00	25.00	2.50	-10.00	25.00
41	TF / right	-2.50	-10.00	-25.00	-2.50	-10.00	-25.00
42	Web / top	0.00	-10.00	0.00	0.00	-10.00	0.00
43	Web / bottom	0.00	10.00	0.00	0.00	10.00	0.00
44	BF / left	2.50	10.00	-25.00	2.50	10.00	-25.00
45	BF / right	-2.50	10.00	25.00	-2.50	10.00	25.00
46							
47		<b>Sizes for II<sup>nd</sup> order theory/stability</b>			$r_y =$	0.0000	cm
48					$r_z =$	0.000	cm
49					$r_w =$	0.000	
50							
E1							

Slika 7.14(b). Eksel sveska "Cross-sectional values" (RUBSTAHL 2008)

Druga sveska, "AI CS class, Alpha" (slika 7.15) omogućava:

- unošenje izabrane aluminijumske legure, njenih karakteristika i odgovarajuće klase izvijanja;
- određivanje klase za svaki element (deo) poprečnog preseka (gornja nožica, rebro, donja nožica) za slučaj jednakopodeljenog opterećenja;
- usvajanje klase poprečnog preseka kao celine;
- sračunavanje efektivnih debljina elemenata preseka za slučaj da je element klase 4;
- sračunavanje elastičnog, plastičnog i efektivnog otpornog momenta,  $W_{el}$ ,  $W_{pl}$ ,  $W_{eff}$ ;
- određivanje koeficijenta oblika preseka,  $\alpha$  zavisno od klase poprečnog preseka.

B4		fx 110		A	B	C	D	E	F	G	H
2	<b>Determining the Cross Section Class of Aluminium Beam:</b>										
3											
4	$f_o =$	110	N/mm <sup>2</sup>								<b>Legenda:</b>
5	$\gamma_{MI} =$	1.1									Uneti vrednost
6	BucklingClass:	A									Rezultati
7											
8	$\varepsilon = \sqrt{250/f_o} =$	1.508									Oznake, tekst
9											
10	<b>Odredjivanje klase popreznog preseka stapa opterecenog</b>										
11	<b>jednakopodeljenim kontinualnim opterecenjem:</b>										
12											
13	Klasa pop. preseka <u>pritisnute</u> nozice (cist pritisak):										
14											
15	$\beta = b/t_0 =$	1.125									
16											
17	$\beta_1 =$	4.523									
18	$\beta_2 =$	6.78									
19	$\beta_3 =$	9.05									
20	<b>Klasa pop. preseka nozice je:</b>				1	→	$\rho_c =$	Ne racuna se Eff presek!			
21							$t_0$ [cm] =	2.00			
22	Klasa pop. preseka <u>rebra</u> (deo rebra <u>pritisnut</u> a deo zategnut):										
23											
24	$\beta = \eta b/t_s =$	40.00									
25											
26	$\psi = -\sigma_2/\sigma_1 = -y_2/y_1 =$	-1.28									
27	$\eta =$	0.35									
28											
29	$\beta_1 =$	16.58									
30	$\beta_2 =$	24.12									
31	$\beta_3 =$	33.17									
32	<b>Klasa pop. preseka rebra je:</b>				4	→	$\rho_c =$	0.8936			
33							$t_s$ [cm] =	0.45			
34	Provera <u>druge nozice</u> (zbog <u>alternativnog</u> dejstva vetra i ona moze biti <u>pritisnuta</u> ):										
35											
36	$\beta = b/t_u =$	1.75									
37											
38	$\beta_1 =$	4.52									
39	$\beta_2 =$	6.78									
40	$\beta_3 =$	9.05									

Slika 7.15(a). Eksel sveska "Al CS Class, Alpha"

41	<i>Klasa pop.preseka alternativne nožice je:</i>		1	→	$\rho_c =$	Ne racuna se Eff presek!
42					$t_{fl}$ [cm]=	1.00
43	<i>Klasa poprecnog preseka je:</i>		4	→		VITKI PP! (Slender CS!) Sračunati Efektivni PP!
44						
45	<b>Koeficijent oblika preseka, <math>\alpha</math></b> (Shape factor):					
46						
47	$W_{el}$ [cm <sup>3</sup> ]=	677.91				$I_y$ (KSTAB) [cm <sup>4</sup> ]= 23366.12
48	$W_{pl}$ [cm <sup>3</sup> ]=	915.03	$bis=z_B$ [cm]=	36.75		$I_y$ (racunski) [cm <sup>4</sup> ]= 23366.12
49	$W_{eff}$ [cm <sup>3</sup> ]=	648.28				$I_{y,eff}$ (efektivno) [cm <sup>4</sup> ]= 22344.94
50						
51	$\alpha =$	0.956				
52						

Slika 7.15(b). Eksel sveska "Al CS Class, Alpha"

Na osnovu podataka dobijenih u svesci "Al CS Class, Alpha", zadate dužine nosača,  $L$  i računskog momenta savijanja,  $M_{Ed}$  dobijenog na osnovu analize sprovedene u poglavlju 7.2 primenom programskog paketa SOFiSTiK 2014, u svesci "Mrd, Mcr EC9" (slika 7.16) omogućeno je:

- određivanje elastičnog kritičnog momenta na bočno-torziono izvijanje,  $M_{cr}$ , za presek zadat u listu "Al CS class, Alpha" za napadnu tačku opterećenja na gornjoj nožici, centru smicanja i donjoj nožici, kao i svih relevantnih koeficijenta i parametara neophodnih za njegovo izračunavanje;
- određivanje parametra  $z_j$  prema tačnoj formuli i njeno poređenje sa parametrom  $r_z$ ;
- određivanje relativne bočno-torzionne vitkosti,  $\bar{\lambda}_{LT}$  za sva tri položaja napadne tačke opterećenja;
- određivanje faktora redukcije za bočno-torziono izvijanje,  $\kappa_{LT}$  i parametara neophodnih za njegovo određivanje;
- određivanje računске otpornosti na bočno-torziono izvijanje,  $M_{b,Rd}$ ;
- utvrđivanje da li je zadati nosač otporan na bočno-torziono izvijanje.

J11									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1						E=	70000	Mpa	
2		$f_c =$	110	N/mm <sup>2</sup>		=	7000	kN/cm <sup>2</sup>	
3		=	11	kN/cm <sup>2</sup>		G=	2700	kN/cm <sup>2</sup>	
4		$\gamma_{M1} =$	1.1			$\nu =$	0.3		
5									
6	<b>Resistance of Cross-Section for Bending Moment (EC9 str.64):</b>								
7									
8		$M_{c,Rd} =$	6482.790	[kNcm]					
9		=	64.828	[kNm]					
10	<b>Resistance of Members in Bending <math>M_{b,Rd}</math> (EC9 str.75):</b>								
11									
12	$\alpha_{LT} =$	0.2							
13	$\lambda_{0,LT} =$	0.4							
14									
15	$\phi_{LT} =$	3.395							
16	$\kappa_{LT} =$	0.170							
17	$\lambda_{LT} =$	2.32							
18									
19		$M_{b,Rd} =$	1104.524	[kNcm]					
20		=	11.045	[kNm]					
21									
24	<b>Elastic Critical Moment <math>M_{cr}</math> (EC9 Annex I str.172):</b>								
25									
26					Coefficients for <b>uniformly distributed load:</b>				
27	$\kappa_{WT} =$	0.480			L(cm)=	400	$M_{ed}$ [kNm]=	7	
28	$\zeta_g/z_g =$	0.019		$C_1 =$	1.100	$\psi_T =$	0.551		
29	$\zeta_j =$	0.286		$C_2 =$	0.459	$\kappa_w =$	1		
30				$C_3 =$	0.525	$\kappa_z =$	1		
31						$\kappa_y =$	1		
32				$C_{1,0} =$	1.127	<b>Correct formulae for <math>Z_j</math>:</b>			
33				$C_{1,1} =$	1.132	Comparison of $r_z$ and $z_j$ ( $r_z=2z_j$ ):			
34						$z_j =$	14.80	$r_z =$	29.60 [cm]
35								$2z_j =$	29.59 [cm]
36	<b><math>M_{cr}</math> using correct formula from EC9 (using correct formula for <math>z_j</math>):</b>								
37									
38	upper flange loading $z_g =$	13.46	$M_{cr} =$	13.19 [kNm]		$\lambda_{LT} =$	2.32	$\phi_{LT} =$	3.40
39	shear centre loading $z_g =$	0	$M_{cr} =$	14.69 [kNm]	→	$\lambda_{LT} =$	2.20	$\phi_{LT} =$	3.11
40	lower flange loading $z_g =$	-46.54	$M_{cr} =$	20.90 [kNm]		$\lambda_{LT} =$	1.85	$\phi_{LT} =$	2.35
34	<b>Non-dimensional <math>\mu_{cr}[-] = M_{cr}[kNm]*L[cm]/\sqrt{EI_z G I_t}</math>:</b>								
35	upper flange loading $z_g =$	10.00	$\mu_{cr} =$	1.00 [-]					
36	shear centre loading $z_g =$	0	$\mu_{cr} =$	1.16 [-]					
37	lower flange loading $z_g =$	-10.00	$\mu_{cr} =$	1.33 [-]					

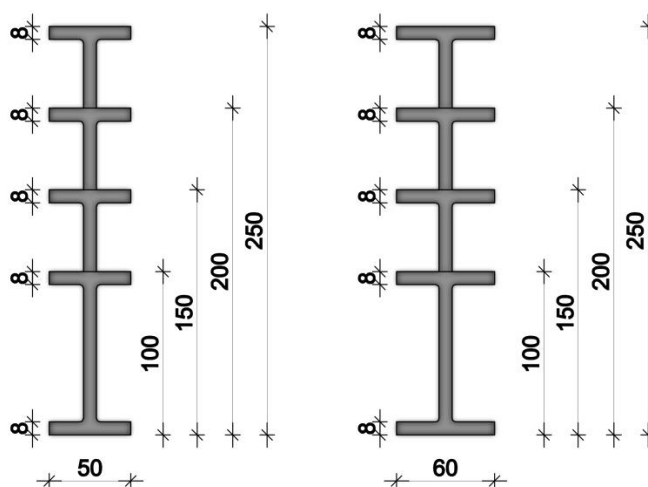
Slika 7.16. Eksel sveska “ $M_{Rd}$ ,  $M_{cr}$  EC9”

		$M_{b,rd}$ [kNm]=	11.05	
		$M_{b,rd}$ [kNm]=	12.23	
		$M_{b,rd}$ [kNm]=	17.04	
		↑		
→	$\kappa_{LT}$ =	0.1704	$M_{b,rd}$ [kNm]=	1104.52
	$\kappa_{LT}$ =	0.1887	$M_{b,rd}$ [kNm]=	1223.08
	$\kappa_{LT}$ =	0.2628	$M_{b,rd}$ [kNm]=	1703.72
		↓		
		$M_{ed}/M_{b,rd}$ =	0.63	→ Presek zadovoljava!
		$M_{ed}/M_{b,rd}$ =	0.57	→ Presek zadovoljava!
		$M_{ed}/M_{b,rd}$ =	0.41	→ Presek zadovoljava!

Slika 7.16. Eksel sveska “ $M_{Rd}$ ,  $M_{cr}$  EC9”

Ovde treba napomenuti da je aplikacija “*AL\_LTB\_CSP-3plate.xlsm*” urađena za slučaj kada su nosači opterećeni jednako-podeljenim opterećenjem, a pored dvostruko-simetričnih i monosimetričnih I poprečnih preseka, obuhvaćeni su i T poprečni preseci.

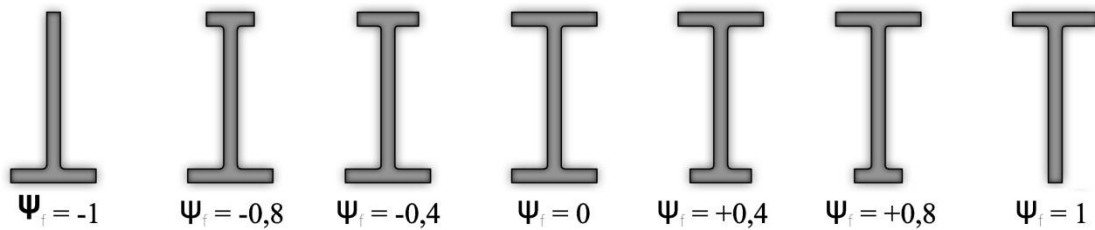
Ova aplikacija poslužila je za analizu otpornosti nosača proizvoljnog I poprečnog preseka, na bočno-torziono izvijanje. Formirane su dve grupe poprečnih preseka. Prva grupa podrazumevala je preseke čija je širina jedne nožice bila  $b_{1,nož}=50$  mm a druga grupa obuhvatala je preseke sa širinom nožice  $b_{2,nož}=60$  mm. Treba naglasiti da su analizom obuhvaćeni i T preseci, kao specijalni slučajevi I preseka. Visine preseka obe grupe bile su  $h=100, 150, 200$  i  $250$  mm (slika 7.17). Filozofija i ponašanje preseka obzirom na bočno-torziono izvijanje nije uslovljeno širinom nožice pa su prikazani samo rezultati za preseke čija je širina nožice  $b_{1,nož}=50$  mm a ostali rezultati priloženi su u digitalnom obliku.



Slika 7.17. Grupe analiziranih stubića



Obzirom da je trebalo izvršiti poređenje nosača sa različitim faktorima monosimetrije,  $\psi_f$  (slika 7.18) to je učinjeno pomoću relativnog, bezdimenzionalnog kritičnog momenta,  $\mu_{cr}$  [-] datog jednačinom 7.2.










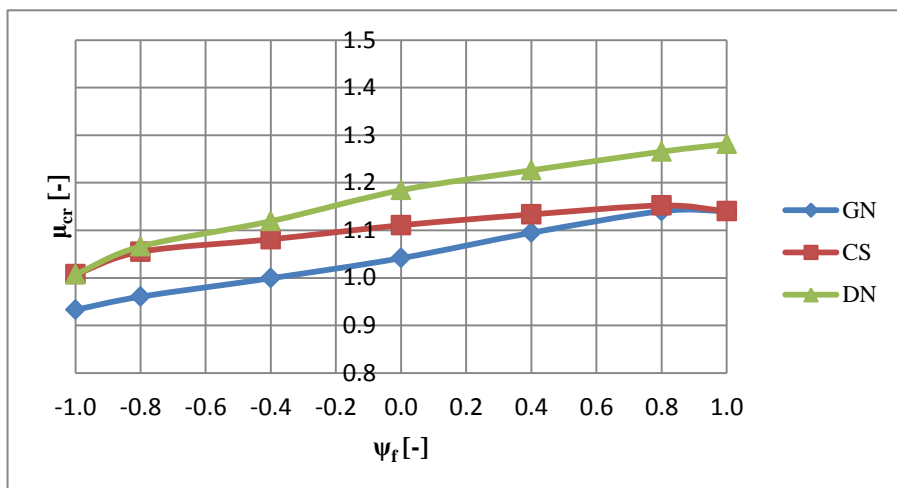
Slika 7.18. Analizirani poprečni preseki

Kod nosećih elemenata zid zavese, stubića i prečki opterećenje deluje uglavnom na tzv. spoljnu nožicu (nožicu bližu spoljašnjoj sredini) obzirom da se elementi ispune najčešće vezuju tako da su noseći elementi unutar objekta. Ovo istraživanje, međutim obuhvatilo je i proračun kritičnog momenta na bočno-torziono izvijanje i kada opterećenje deluje u centru smicanja i tzv. unutrašnjoj nožici.

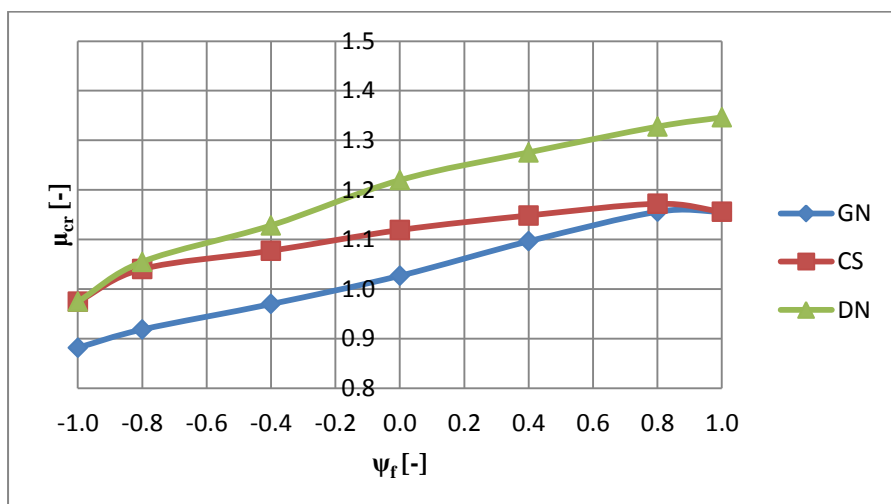
Tabelom 7.7 prikazani su rezultati za jedan ispitani poprečni presek. Tabele sa rezultatima za sve ispitane preseke date su u digitalnom obliku a rezultati su prikazani i grafički na slikama 7.19 do 7.22. Na ovaj način (na ovim dijagramima) prikazana je nosivost na bočno-torziono izvijanje ispitanih preseka (slika 7.17 i 7.18) kada napadna tačka opterećenja deluje na gornju nožicu (*GN*), centar smicanja (*CS*) i donju nožicu (*DN*) u zavisnosti od parametra monosimetrije  $\psi_f$  za sve ispitane visine preseka.

Tabela 7.7 Prikaz rezultata za poprečni presek I 100.50.8 ( $\psi_f=0$ ) i izvedene preseke ( $0 \leq \psi_f \leq 1$ )

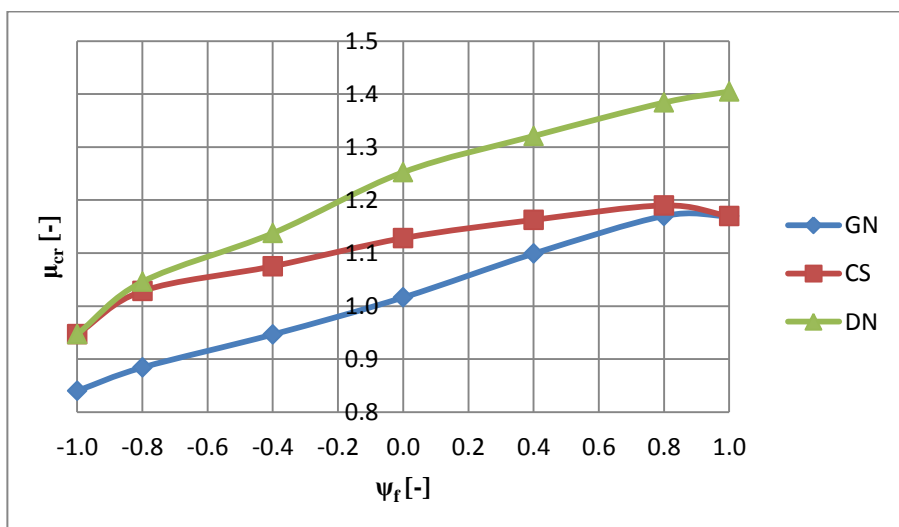
AW 6063.T5 I 100.50.8 ( $\psi_f=0$ )	Graf. prikaz	$\psi_f$	$\beta_f$	$I_z$	$I_y$	$I_t$	$I_w$	$I_y/I_z$	$I_{fc}/I_{ft}$	Klasa p.p.	$\alpha$	$z_j$	nadvučeno $\lambda_{LT}$	$\kappa_{LT}$	$\mu_{cr}$ [-]	Položaj nap.tačke
		-1.0	0.0	8.76	133.55	2.56	0.00	15.25	-	1	1.71	-4.06	1.58	0.38	0.93	Gornja nožica
												1.52	0.41	1.01	Centar smicanja	
												1.52	0.41	1.01	Donja nožica	
	-0.8	0.1	9.68	207.21	2.97	82.98	21.40	0.11	1	1.25	-3.69	1.68	0.33	0.96	Gornja nožica	
												1.60	0.37	1.05	Centar smicanja	
												1.60	0.37	1.07	Donja nožica	
	-0.4	0.3	12.42	241.51	3.21	254.22	19.45	0.44	1	1.14	-1.82	1.63	0.36	1.00	Gornja nožica	
												1.56	0.38	1.08	Centar smicanja	
												1.54	0.40	1.12	Donja nožica	
	0.0	0.5	17.09	267.09	3.41	416.67	15.63	1.00	1	1.07	0.00	1.52	0.41	1.04	Gornja nožica	
												1.47	0.43	1.11	Centar smicanja	
												1.42	0.46	1.18	Donja nožica	
	0.4	0.7	12.42	241.51	3.21	254.22	19.45	2.28	1	1.14	1.82	1.55	0.39	1.09	Gornja nožica	
												1.53	0.40	1.13	Centar smicanja	
												1.47	0.43	1.23	Donja nožica	
	0.8	0.9	9.68	207.21	2.97	82.98	21.40	9.04	1	1.25	3.69	1.54	0.39	1.14	Gornja nožica	
												1.53	0.40	1.15	Centar smicanja	
												1.46	0.44	1.27	Donja nožica	
	1.0	1.0	8.76	133.55	2.56	0.00	15.25	-	1	1.71	4.06	1.43	0.46	1.14	Gornja nožica	
												1.43	0.46	1.14	Centar smicanja	
												1.35	0.51	1.28	Donja nožica	



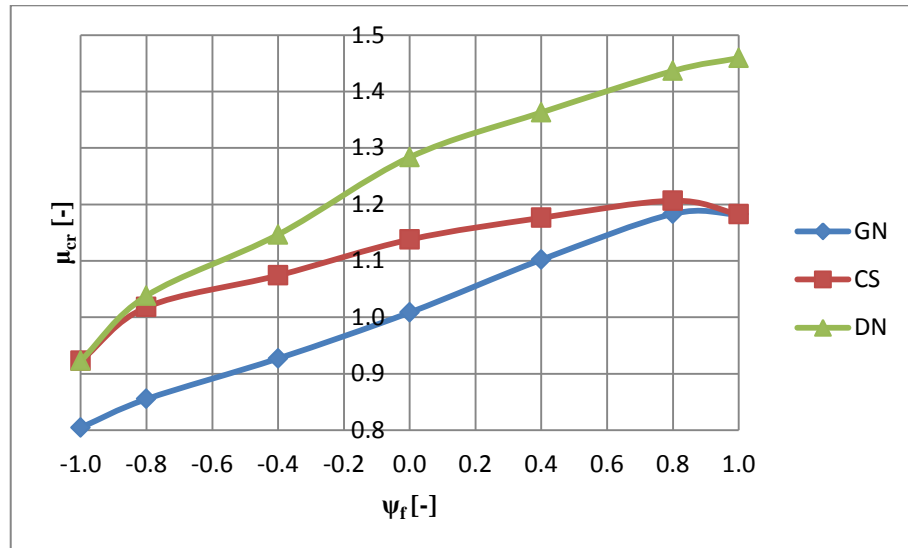
Slika 7.19. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h = 100$  mm



Slika 7.20. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h = 150$  mm

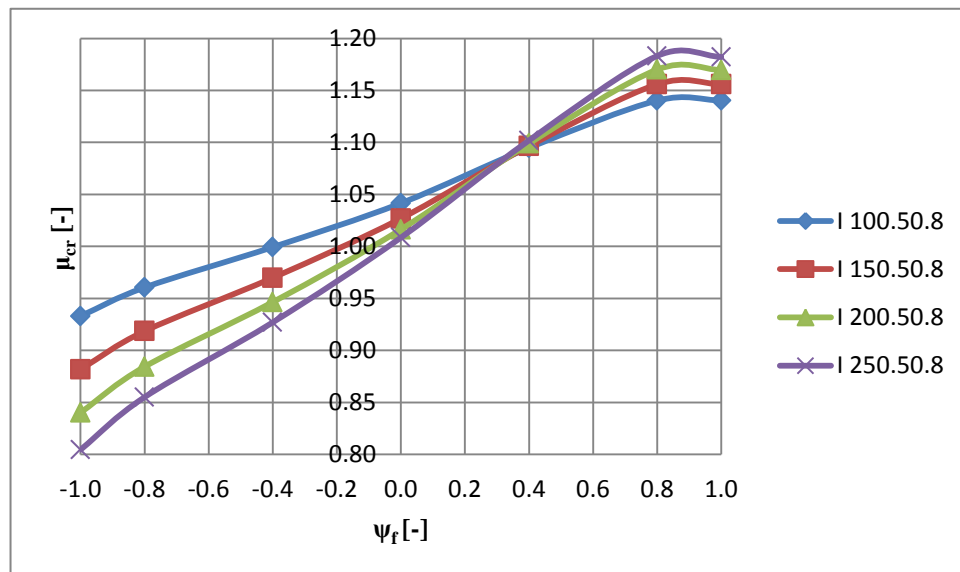


Slika 7.21. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h = 200$  mm

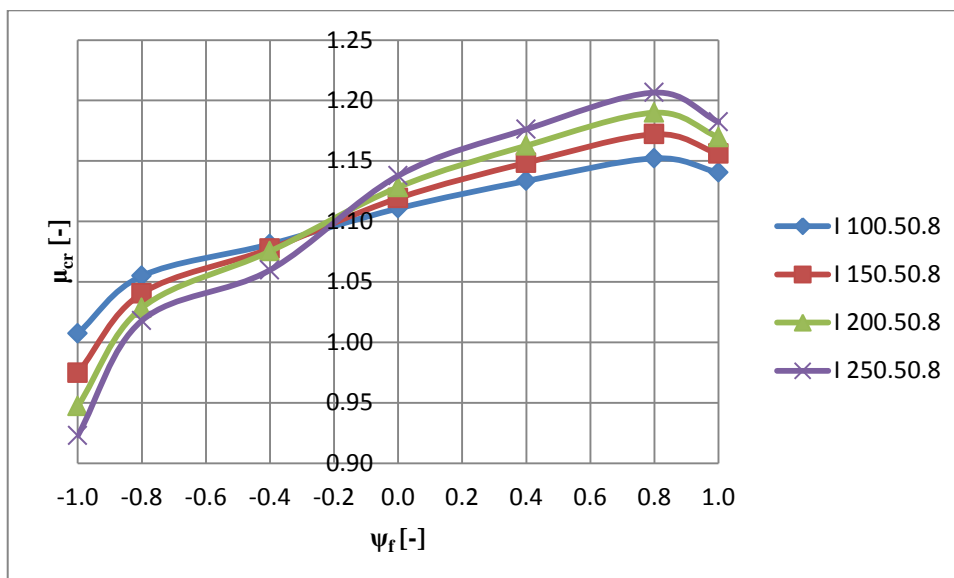
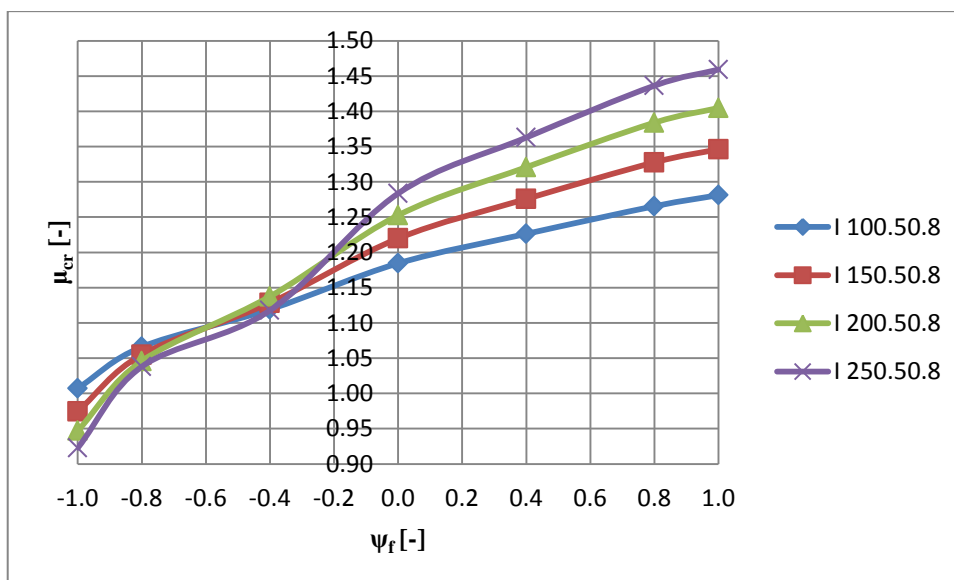


Slika 7.22. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h = 250$  mm

Na slikama 7.23 do 7.25 prikazani su dijagrami zavisnosti bezdimenzionalnog kritičnog momenta  $\mu_{cr}$  [-] od faktora monosimetrije  $\psi_f$  za slučaj kada opterećenje deluje na gornju nožicu (GN), centar smicanja (CS) i donju nožicu (DN), a za slučajeve različitih visina preseka.



Slika 7.23. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na GN

Slika 7.24. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na CSSlika 7.25. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na DN

Iz prethodnih dijagrama je očigledno da oblik poprečnog preseka, izražen preko parametra monosimetrije, ima značajan uticaj na njegovu otpornost na bočno-torziono izvijanje. Obzirom da su poprečni preseki nosećih elemenata zid zavesa često simetrični samo oko jedne ose, prednosti koje ovi preseki pokazuju vezano za otpornost na bočno-torziono izvijanje, treba iskoristiti. Pravilnim odabirom odgovarajućeg oblika poprečnog preseka i položaja napadne tačke opterećenja, može se povećati otpornost na bočno-torziono izvijanje nosećih elemenata zid zavesa.

## 8 Zaključci

Analiza dejstva vetra na visoke zgrade primenom numeričke dinamike fluida (*CFD*) predstavlja savremenu tehniku koja adekvatnom primenom može zameniti skupa eksperimentalna ispitivanja. Obzirom da je predmet istraživanja ove doktorske disertacije podrazumevao analizu fasadnih sistema, tipa zid zavesa, koje je trebalo sagledati na sveobuhvatniji i kompleksniji način, primena ove tehnike pokazala se neophodnom. Prvi deo istraživanja obuhvatio je numeričko modeliranje dejstva vetra na zgradu odnosa dimenzija  $b:d:h \approx 1:1:2.5$  na koju vetar deluje pod uglom od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $45^\circ$ . Pojedinačni zaključci izvedeni za svaku grupu modela prikazani su u poglavljima 5.6.1 do 5.6.4, odmah nakon prikazanih analiza. Međutim, sprovedena obimna analiza takođe je rezultovala konkretnim preporukama za kreiranje modela u *CFD*-u obzirom na izabrani turbulentni model (*RNG k- $\epsilon$*  i *SST k- $\omega$* ), za analizu dejstva vetra na izolovanu zgradu u domenu. Preporuke koje važe za sve grupe modela odnosno nezavisne su od pravca dejstva vetra na zgradu, jesu sledeće:

- kod primene *RNG k- $\epsilon$*  modela neophodna je znatno veća dužina proračunskog domena od dužine date u preporukama (*Franke i dr 2007, AIJ 2005*). Utvrđeno je da dužina domena iza objekta od interesa treba biti  $30 - 35h$ , gde je  $h$  visina objekta;
- kod velikih proračunskih domena čija dužina iznosi i po nekoliko kilometara, a koji su česti kod analiza dejstva vetra na zgrade, dobro je formirati više poddomena umesto jednog velikog. Elementi mreže treba da budu jednaki u poddomenu najbližem ispitivanom objektu;

- gornja granica domena ne mora da bude zadata kao *Inlet* već je dovoljno da bude zadata kao *Symmetry*. Uslov za ovo jeste dovoljna udaljenost od krova objekta do gornje granice domena. Ova analiza je pokazala da je udaljenost od 5h dovoljna da bi gornja granica bila zadata kao *Symmetry*;
- kod primene *RNG k-ε* modela ali i *SST k-ω* turbulentnog modela utvrđeno je da preporučeni faktor uzastopnih mreža koji ima vrednost  $1.5 \times 1.5 \times 1.5 = 4.3$  (Ferziger i Perić, 2002), vodi suviše naglom usitnjavanju mreže. Kod suviše sitnih mreža sišuće dejstvo na uglovima i ivicama objekta postaje predimenzionisano i vodi neočekivano velikim vrednostima koeficijenta pritiska,  $C_p$  [-]. Ovo istraživanje pokazalo je da kod *RNG k-ε* i *SST k-ω* turbulentnog modela taj faktor treba da ima vrednost  $1.25 \times 1.25 \times 1.25 \approx 2$  ili  $1.3 \times 1.3 \times 1.3 \approx 2.2$ ;
- veličina elemenata mreže ima značajan uticaj na konačne rezultate analize. Uočeno je da promenom veličine elemenata mreže može doći čak do promene znaka koeficijenta pritiska  $C_p$  (videti tabele 5.9, 5.13, 5.17, 5.19 i 5.21). Ovo praktično znači, da za dve uzastopne mreže dejstvo vetra za jednu može biti pritiskujuće a za drugu sišuće. Obzirom na osetljivost problema, posebnu pažnju treba posvetiti kreiranju mreže konačnih zapremina jer ona može imati presudan uticaj na tražene rezultate;
- *RNG k-ε* turbulentni model se u literaturi (Stathopoulos i Baniotopoulos 2007, Unhale 2004) preporučuje kao model čijom se primenom dobijaju najprihvatljivije vrednosti pritiska na objekat. Ovom analizom pokazano je da se pored ovog modela može koristiti i *SST k-ω* turbulentni model;
- utvrđeno je da preporučeni broj od 10 elemenata po fasadi (Franke i dr 2007) nije dovoljan da bi se dobili dovoljno pouzdani rezultati, te se preporučuje kreiranje sitnije mreže;
- oblik i dužina vrtložnog traga zavise pored pravca dejstva vetra i od oblika objekta. Simetričan vrtložni trag očekivan je kod grupa modela gde je pravac dejstva vetra  $0^0$  i  $45^0$ . Ovo se pokazalo tačnim samo za prvu grupu modela ( $0^0$ ), dok je kod druge grupe ( $45^0$ ) primetna asimetrija vrtložnog traga (slika 5.54) i smatra se posledicom oblika osnove objekta. Iako je osnova približno kvadratna, mala odstupanja ( $\approx 10\%$ ) od pravilnog kvadrata, dovela su do formiranja različitih vrtloga u graničnim smičućim slojevima, sa jedne i druge strane objekta, ali i dužeg vrtložnog traga;

Rezultati dobijeni numeričkim modeliranjem upoređeni su kako sa rezultatima niza eksperimenata, tako i sa dostupnim rezultatima *CFD* istraživanja, prikazanih u poglavlju 6.3. Na ovaj



način je izvršena verifikacija dobijenih rezultata a primenjeni turbulentni modeli pokazali su dobro slaganje sa prikazanim rezultatima i eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja. Preporučeni turbulentni model  $RNG\ k-\varepsilon$  pokazuje dobro slaganje sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja, kao i primenjeni  $SST\ k-\omega$  model. Zapaženo je da  $SST\ k-\omega$  model u nekim slučajevima pokazuje bolje slaganje sa prikazanim rezultatima, a to je slučaj sa maksimalnim koeficijentom pritiska na navetrenoj strani objekta i koeficijentima pritisaka na krovu objekta. Najveća odstupanja kod oba turbulentna modela javila su se na zavetrenoj fasadi zgrade, posebno u njenoj donjoj polovini.

Analizom rezultata dobijenih numeričkim modeliranjem uočeno je da pored toga što je direktno navetrena fasada najvećim svojim delom izložena pritiskujućem dejstvu vetra, u uzanim zonama prema uglovima ove fasade kao i prema krovu, mogu se javiti i jaka sišuća dejstva. Ova pojava nalazi svoju potvrdu odnosno verifikaciju, poređenjem sa slikama 4.11 i 4.12 na kojima su prikazana oštećenja fasada usled jakih vetrova. Konkretno, na slici 4.11 je očigledno da se najveći broj oštećenih staklenih panela nalazi na jednoj od fasada, neposredno uz krovnu ravan. Takođe, na slici 4.12 primetno je skoro potpuno uništenje staklenih elemenata fasade uz krovnu ravan, ali i na visini gde se pojavljuju maksimalni koeficijenti pritiska ( $\sim 0.85h$ ). Poređenjem slika stvarnih oštećenja fasada tipa zid zavesa, sa rezultatima numeričkih simulacija, pokazala su izuzetno vizuelno slaganje i na neki način dala potvrdu izvršenih analiza.

Analizirajući koeficijente pritisaka  $C_p$  na navetrenoj i zavetrenoj fasadi, uočeno je da oni opadaju prema tlu, što se objašnjava uticajem modelirane hrapavosti terena. Maksimalan koeficijent pritiska  $C_p$  na navetrenoj strani javlja se na  $\sim 0.85h$ , gde je  $h$  visina zgrade, dok se maksimalna vrednost  $C_p$  na zavetrenoj strani javlja na  $\sim 0.65h$ . Položaj maksimalnih  $C_p$  na navetrenoj i zavetrenoj fasadi zgrade isti je kod svih grupa modela, odnosno nezavistan je od ugla dejstva vetra. Takođe, rezultati ovog dela istraživanja pokazali su da bi sve fasadne kao i krovnu ravan trebalo podeliti na najmanje 2 zone sa odgovarajućim koeficijentima pritisaka (videti dijagrame koeficijenata pritisaka prikazanih na slikama 6.1 do 6.4). Kao posledicu uticaja hrapavosti terena odnosno modeliranja atmosferskog graničnog sloja, navetrenu i zavetrenu fasadu treba podeliti na gornju i donju zonu, gde koeficijent pritiska ima  $\sim 2$  puta veću vrednost u gornjoj nego u donjoj zoni.

Na osnovu prethodno izloženih rezultata i zaključaka prvog dela istraživanja nesumnjivo je pokazano, da je razumevanje prirode i ponašanja vetra od ključnog značaja za adekvatno projektovanje lakih fasadnih konstrukcija tipa zid zavesa i da dejstvo vetra na zgradu mora biti predmet analize u najranijim fazama projektovanja.

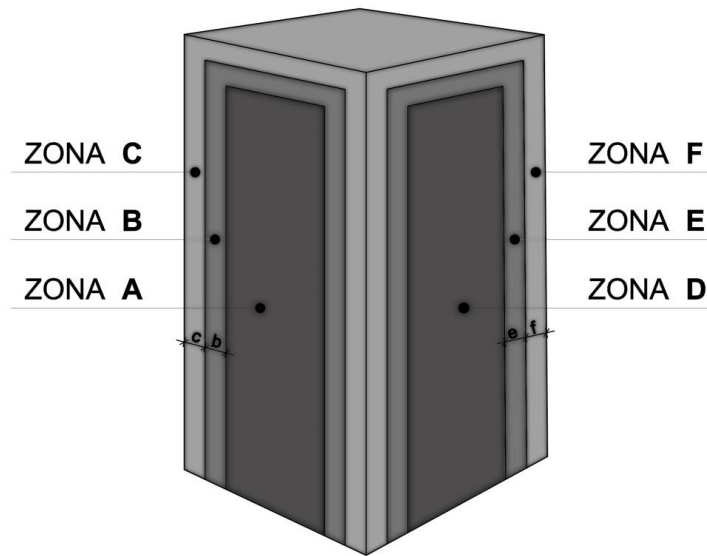
Kada govorimo o standardima koji se bave dejstvom vetra na zgrade važno je istaći da su bezdimenzionalni koeficijenti pritiska,  $C_p$  dati za osnovne oblike zgrada. Za sve ostale oblike neophodno je te koeficijente dobiti eksperimentalnim ispitivanjem u aerodinamičkim tunelima ili u novije vreme primenom numeričke dinamike fluida (CFD). Prema standardu SRPS U.C7.112, primenjivanom do 2012. godine, koeficijenti pritiska  $C_p$  konstantni su za svaku fasadnu ravan ponaosob. U ovom standardu dati su koeficijenti pritiska za slučajeve kada vetar deluje pod uglom od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  i  $45^\circ$ . Prema trenutno važećem standardu SRPS EN 1991-1-4:2012, konstantne vrednosti koeficijenata pritiska predviđene su na direktno navetrenoj i zavetrenoj strani zgrade, dok su bočne fasade i krov podeljeni na zone sa različitim vrednostima koeficijenata  $C_p$ . Koeficijenti pritiska dati ovim standardom univerzalni su i nezavisni od ugla dejstva vetra. Kod oba standarda karakteristično je da su cele fasadne ravni, iako kod SRPS EN 1991-1-4 podeljene na zone, ipak u celini izložene pritiskujućem ili sišućem dejstvu vetra, nezavisno od ugla dejstva vetra. Očigledno je da kad vetar deluje pod uglom od  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ili  $45^\circ$ , neke od fasadnih ravni biće izložene delimično pritiskujućem a delimično sišućem dejstvu vetra. Manjkavosti standarda SRPS EN 1991-1-4 koje se pre svega ogledaju u nedostatku odgovarajućih koeficijenata pritiska za različite uglove dejstva vetra i uniformnost njegovog dejstva (pritisak ili sisanje) na fasadnim ravnima, mogu se prevazići primenom rezultata dobijenih u okviru ovog istraživanja koji su prikazani u obliku dijagrama na slikama 6.1 do 6.4.

Upoređujući koeficijente  $C_p$  dobijene numeričkim modeliranjem sa standardima SRPS U.C7.112 i SRPS EN 1991-1-4 zaključujemo da su dobijene vrednosti  $C_p$  veće po apsolutnoj vrednosti od koeficijenata datih standardom SRPS U.C7.112. i da je bolje slaganje sa trenutno važećim standardom SRPS EN 1991-1-4.

Istraživanje sprovedeno u ovoj disertaciji pokazalo je da dinamička analiza dejstva vetra primenom numeričke dinamike fluida daje, za razliku od statičke analize, preciznije uticaje na fasadu. Njenom adekvatnom primenom mogu se prevazići gore navedeni nedostaci aktuelne regulative, a uticaji vetra na fasade zgrada se sagledati na realniji način.

Obzirom na prethodno opisanu mogućnost pojave jakih sišućih dejstava u uzanim zonama direktno navetrene fasade, prema bočnim zidovima i krovu, smatra se opravdanim i racionalnim zoniranje fasadnih ravni. Kod fasada velikih površina preporuka je da se izvrši zoniranje fasade prema sprovedenim analizama i dobijenim rezultatima dejstva vetra na konkretan objekat na zadatoj lokaciji. Efekti zoniranja bili bi posebno vidljivi kod fasada velikih površina. Zoniranje je moguće izvršiti kako po horizontali tako i po vertikali odnosno visini objekta na osnovu prethodno sprovedene analize dejstva vetra. Međutim, najbolje je zoniranje izvršiti tako da zone obuhvataju obode svake pojedinačne fasadne ravni (slika 8.1). Dimenzije preseka nosećih elemenata zid zavesa u zonama oko uglova

objekta i prema krovu bile bi veće nego u centralnim zonama fasadnih ravni obzirom mogućnost pojave jakih sišućih dejstava vetra.



Slika 8.1. Zoniranje fasadnih ravni

Analiza dejstva vetra putem numeričke dinamike fluida koja je sprovedena u ovoj disertaciji na velikom broju modela i za različite pravce dejstva vetra, potvrdila je preporuke i predlog zoniranja dat u literaturi (*Simiu & Scanlan 1996, American National Standard A58.1*).

Drugi deo istraživanja obuhvatio je numeričku analizu modela zid zavesa izrađenih od čelika S235 i aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T5, uzimajući u obzir dobijene rezultate prethodno sprovedene analize vetra u poglavlju 5. Važno je istaći još jednom, da su primetne razlike u pritiscima na fasadama objekta primenom standarda SRPS U.C7.112, SRPS EN 1991-1-4 i primenom CFD-a. One se odražavaju i na aluminijumske i čelične elemente kao sastavne delove zid zavesa. Dimenzije vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa, izrađenih kako od čelika tako i od ispitanih aluminijumskih legura, neće se bitno razlikovati primenom proračuna po teoriji I i II reda. Razlog za ovo, pored strogih uslova za ugib, takođe leži i u činjenici da obzirom na male poprečne preseke, težina ovih elemenata nije velika, pa nema velikih normalnih sila u štapovima. Proračun vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa po teoriji I i II reda pokazali su male, skoro beznačajne razlike, koje nisu prelazile 1%.

Kod proračuna vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa obzirom na male dopuštene ugibe koji su posledica najčešće krutih elemenata ispune, početne imperfekcije ne mogu se uzeti u iznosu predviđenim standardima EN 1993-1-1:2005 i EN 1999-1-1:2007. Vrednost početnih imperfekcija usvojena prema ovim standardima sama po sebi dostiže maksimalne vrednosti dopuštenih ugiba

prikazanih jednačinom 3.4. Ipak, smatra se neophodnim njihovo uvođenje u proračun nosećih elemenata zid zavesa obzirom na male poprečne preseke i velike dužine ovih elemenata. Iz prethodno navedenih razloga predlaže se uvođenje početnih imperfekcija u proračun ovih elemenata u opsegu  $L/500$  do  $L/1000$  što bi zavisilo od konkretnog slučaja. Na ovaj način početne imperfekcije ne bi bile zanemarene u proračunu.

Važno je pored kontrole nosivosti i kontrole upotrebljivosti izvršiti kontrolu stabilnosti nosećih elemenata zid zavesa obzirom da spadaju u izuzetno vitke nosače. Kontrola bočno-torzionog izvijanja nosećih elemenata zid zavesa posebno je važna ako poprečni preseki stubića i prečki nisu izrađeni od cevastih profila. U cilju lakšeg sagledavanja uticaja oblika poprečnog preseka na bočno-torziono izvijanje vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa, napravljena je aplikacija u *Excel*-u pod nazivom "AL\_LTB\_CSP-3plate". Ova aplikacija, za određivanje geometrijskih karakteristika preseka koristi već postojeći program *CSP-3plate*, deo programskog paketa "RUBSTAHL" (Kindmann 2007). Novi deo aplikacije koji nastaje kao rezultat ovog istraživanja, omogućava lako, pregledno i jednostavno određivanje klase poprečnog preseka dvostruko i mono-simetričnih, aluminijskih I nosača, njihovih kritičnih momenta na bočno-torziono izvijanje,  $M_{cr}$  i svih parametara neophodnih za njihovo određivanje. Aplikacija automatski daje vrednosti kritičnih momenata na bočno-torziono izvijanje za tri karakteristična položaja napadne tačke opterećenja i konačno daje izveštaj da li je zadati nosač otporan na bočno-torziono izvijanje.

Ovo istraživanje potvrdilo je činjenicu da, kako se položaj napadne tačke opterećenja pomera od gornje nožice ka donjoj, otpornost preseka na bočno-torziono izvijanje raste. Ono što se još zaključuje jeste da sa povećanjem visine preseka ova pojava postaje izraženija. Na osnovu prethodnog, zaključuje se da bi vertikalni noseći elementi zid zavesa bili ekonomičniji kada bi se paneli ispune vezali za centar smicanja stubića ili njegovu donju nožicu.

Posebna pažnja posvećena je parametru monosimetrije  $\psi_f$  i njegovom uticaju na bočno-torziono izvijanje. Sa porastom ovog parametra, raste i otpornost ispitanih preseka na bočno-torziono izvijanje. Za vertikalne noseće elemente zid zavesa obzirom na bočno-torziono izvijanje, povoljno je koristiti monosimetrične poprečne preseke gde je parametar monosimetrije  $\psi_f > 0$ . Ispitani su preseki sa vrednostima  $-1 \leq \psi_f \leq 1$ , a povoljno ponašanje pokazali su preseki gde je  $0.2 \leq \psi_f \leq 0.8$ . Poređenjem otpornosti ispitanih preseka na bočno-torziono izvijanje utvrđeno je da poprečni preseki sa parametrom monosimetrije  $\psi_f = 0.8$  jesu najpovoljniji kada opterećenje deluje na gornju nožicu i centar smicanja (slika 7.23 i 7.24).

Na ovaj način usvajajući mono-simetrične I preseke ostvarile bi se značajne uštede u materijalu. Ovo ne bi trebalo zanemariti znajući činjenicu da cena fasade značajno učestvuje u ukupnoj ceni objekta.

Cilj ovog naučnog istraživanja bio je da se zid zavesa kao lake fasadne konstrukcije sagledaju kompleksnije. Uključivanjem dinamičke analize dejstva vetra na fasade visokih zgrada dobila se realnija slika opterećenja i naprezanja koje nastaje u nosećim elementima zid zavesa, posebno elemenata na uglovima objekta i na velikim visinama, obzirom na promenu brzine vetra sa visinom.

Prikazani zaključci jasno potvrđuju polaznu hipotezu koju je trebalo potvrditi ovim istraživanjem a sastojala se u pretpostavci da ima mesta usavršavanju lakih fasadnih konstrukcija, tipa zid zavesa i njihovih sistema, kako u smislu projektovanja, tako i izrade. Takođe je potvrđeno da ima mesta usavršavanju nosećih elemenata zid zavesa, u smislu njihove racionalnosti ali bez ugrožavanja stabilnosti.

## 9 Literatura

Allana, K.P., Carter, D., 2012. *Curtain Wall Issues, Problems and Solutions*, Building Envelope Technology Symposium.

American Institute of Architects, *Building at Risk: Wind Design Basics for Practicing Architects*.

American national Standard A58.1, 1982. *Building Code Requirements for Minimum Design Loads*, American National Standards Institute, New York.

American Society of Civil Engineers ASCE, 1999. *Wind tunnel studies of buildings and structures*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practise No. 67, Aerospace Division of the American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Amin, J.A., Ahuja, A.K., 2014. *Characteristics of wind forces and responses of rectangular tall buildings*, International Journal of Advanced Structural Engineering, Vol. 6, Issue 3, Springer.

Anderson, J.M., Trahair, N.S., 1972. *Stability of Monosymmetric Beams and Cantalivers*, Journal of Structural Division, Proceedings of ASCE, ST1, pp. 169-287.

Androić, B., 1988. *Osnovi statičkog proračuna aluminijumskih fasadnih stijena*, Primjena aluminija u građevinstvu, građevinski institut Fakulteta građevinskih znanosti sveučilišta u Splitu, Split.

Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., 2009. *Čelične konstrukcije 1*, IA Projektiranje, Zagreb.

ANSYS Workbench 15.0 (CFX), softverski paket.

ANSYS CFD Manual.

- Architectural Institute of Japan (AIJ), 2005. *Guide for numerical prediction of wind loads on buildings*.
- Baetke F., Werner H., Wengle H., 1990. *Numerical Simulation of Turbulent Flow over Surface Mounted Obstacles with Sharp Edges and Corners*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 35, p.129-147, Elsevier.
- Baines, W.D., 1965. *Effects of Velocity Distribution on Wind Loads and Flow Patterns on Buildings*, Proceedings, Symposium N<sup>o</sup> 16 - Wind Effects on Buildings and Structures, held at National Physical Laboratory, England, in 1963, published by HMSO London 1965.
- Balaž, I., 1999. *Buckling of Monosymmetric Beams – Conjured Problem*. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> EUROSTEEL Conference, Prague.
- Beers, P.E., 2011. *Hurricane and Tornado Damage in Urban Areas – A Recent History*, Pushing the Building Envelope. <https://buildingenvelope.wordpress.com/2011/05/>.
- Behr, R.A., 2009., *Architectural glass to resist seismic and extreme events*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge CB21 6AH, UK.
- Bhandari, N.M., Krishna, P., Kumar, K., Gupta, A., *An Explanatory Handbook on Proposed IS 875 (Part 3) Wind Loads on Buildings and Structures*. Document No.:IITK-GSDMA-Wind06-V3.0. Final Report:: B – Wind Codes, IITK – GSDMA Project on Building Codes.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. *CFD simulation of the atmospheric boundary layer – wall function problems*, Atmospheric Environment 41 (2), pp. 238-252, Elsevier.
- Bojović, A., 1993., *Proračun opterećenja vetrom građevinskih konstrukcija*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Buđevac, D., Marković, Z., Bogavac, D., Tošić, D., 1999., *Metalne konstrukcije – Osnove proračuna i konstruisanja*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- Cheung, J.C.K., 1984. *Effect of tall building edge configurations on local surface wind pressures*. 3rd International Conference on Tall Buildings, Hong Kong and Guangzhou.
- Crosbie, J.M., Perry D., Smith T., 1998. *Wind Design Basics for Practicing Architects*, Publication of the American Institute of Architects, AIA, Washington DC.
- Curtain walls and roof lights – *Thermally insulated mullion-transom systems*, katalog Schuco Stahlssysteme, Jansen.
- Čikić, J., 2007., *Staklo i konstruktivna primena u arhitekturi*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Dagnev, A.K., Bitsuamalk, G.T., Ryan, M., 2009. *Computational Evaluation on tall buildings*, 11<sup>th</sup> Americas Conference on Wind Engineering – San Juan, Puerto Rico.



Damnjanović, M., 1980., *Proizvodi od aluminijuma i aluminijumskih legura i njihova primena u građevinarstvu*, magistarski rad, Građevinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Damnjanović, M., 1993., *Metalne konstrukcije zgrada – Aluminijumske konstrukcije*, Građevinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Davenport, A.G., Grimmond, S., Oke, T., Wieringa, J., 2000. *The revised Davenport roughness classification for cities and sheltered country*, Third Symposium on the Urban Environment, pp. 7-8, Davis, California.

Djalaly, H., 1974. *Calcul de la resistance ultime au deversement*, Construction Metallique, No.1, pp. 58-77, No.3, pp. 43-56, No.4, pp. 54-61.

Đurić, D., 2002. *Influence of the Cross-Section-Shape on the Bifurcation-Loads of Bending Girders*, Master Thesis, Ruhr-Universitaet Bochum, Germany.

EN 12179, 2000. *Curtain walling. Resistant to wind load – Test method*, European committee for standardization, Brussels, Belgija.

EN 13116, 2001. *Curtain walling. Resistant to wind load – Performance requirements*, European committee for standardization, Brussels, Belgija.

EN 13830, 2003. *Curtain walling – Product standard*, European committee for standardization, Brussels, Belgija.

EN 1991-1-4:2005. 2009. *Dejstva na konstrukcije. Deo 1-4: Dejstva vetra*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.

Ferziger J.H., Peric M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3<sup>rd</sup> ed., Springer, Berlin.

Franke, J., Hirsch C., Jensen A.G., Krüs H.W., Schatzmann M., Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A., and Wright N.G., 2004. *Recommendations on the Use of CFD in Wind Engineering*, Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics: COST Action C14 - Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment, May 5 - 7, Rhode-Saint-Genève, Belgium.

Franke, J., Hellsten A., Schuenen H., Carrisimo B., 2007. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*, COST Action 732 – Quality assurance and improvement of microscale meteorological models.

Franke J., 2007. *Introduction to the Prediction of Wind Loads on Buildings by CWE*, editors: Stathopoulos T., Baniotopoulos C.C., Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures, p.67-103, Springer.

Galambos, T.V., Surovek, A.E., 2008. *Structural Stability of Steel – concepts and applications for structural engineers*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken New Jersey.

Gligić, B., 1993., *Stabilnost nosećih konstrukcija od aluminijumskih legura*, magistarski rad, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Gyula, S. 1998. *Construction: Craft to Industry*, Spon Press, London, UK.

Hall, R.C., 1997. *Evaluation of modeling uncertainty. CFD modeling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU final report*, European Commission Directorate-General XII Science, Research and Development Contract EV5V-CT94-0631, WS Atkins Consultants Ltd., Surrey.

Hoffer, R., Niemann H.-J., 2008. *Wind actions on buildings and structures*, lecture within Permasteelisa – Technical Training, Dublin.

Holmes J. D., 2001. *Wind Loading of Structures*, Spon Press (Taylor & Francis Group), London.

Kazmierczak, K., 2010. *Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions*, Conference BEST 2 – Design and Rehabilitation, Session EE4-1, Portland, Oregon.

Kazmierczak, K., 2008. *Movements & Tolerances. Considerations for curtain wall and cladding design*, The Construction Specifier, October 2008.

Kindmann, R., 2007., *Program CSP-3plate*, RUBSTAHL-Lehr und Lernprogramme für Studium und Weiterbildung, Lehrstuhl für Stahl und Verbundbau, Ruhr-Universität Bochum.

Kitiporinchai, S. Wang, C.M., Trahair, J.S., 1986. *Buckling of Monosymmetric I-Beams under Moment Gradient*. Journal of Structural Engineering, Vol. 112, No.4, pp.781-799.

Kolmogorov, 1942.A.N., *Equations of turbulent motion of an incompressible fluid*, IZv. Akad. Nauk SSSR Ser. Phys., Vol.6, No. ½, pp. 56-58.

Launder, B.E., Spalding, D.B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic, London.

Makepeace, C., Shooner A., Kyle, B., Miguel L., 2004. *Glass and Metal Curtain Walls – Best Practice Guide*, Canada Mortgage and Housing Corporation – CMHC&SC.

Mendis, P., Ngo, T., Haritos, N., Hira, A., Samali, B., Cheung, J., 2007. *Wind Loading on Tall Buildings*, EJSE International Special Issue: Loading on Structures.

Menter, F. R., 1994. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.

Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003. *Ten Years of industrial Experience with the SST Turbulence model*, Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begel House.

Milosavljević, M., 1983, *Meteorologija, 11. izdanje*. Naučna knjiga, Beograd.

Mislin, M., 2009. *Annotations on the History of Curtain Walls an Industrial Buildings of the United States and Germany between 1890 and 1920*, Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus.

Mochida, A., Tominaga, Y., Murakami, S., Yoshie, R., Ishihara, T. And R. Ooka, 2002. *Comparison of various  $k-\epsilon$  models and DSM to flow around a high-rised building – report of AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment*, Wind & Structures, Vol.5, No. 2-4, pp. 227-244.

Newman, A., 2001. *Structural Renovation of Buildings. Methods, Details and Design Examples*, McGraw-Hill, New York.

Prandtl, L., 1945. *Ubereinnewes Formelsystem fur die ausgebild ete Turbulenz*, Nachr Akad. Der Wissenschaftin Gottingen, van der Loekund Ruprecht, pp. 6-19.

Pravilnik o tehničkim normativima za opterećenja nosećih građevinskih konstrukcija, 1988. Službeni list SFRJ broj 26.

Privremeni tehnički propisi za opterećenje zgrada (PTP-2), 1948. Posebno izdanje Ministarstva građevina FNRJ.

Radas, A., 1988. *Konstrukcije aluminijumskih otvora i fasada*, Primjena aluminija u građevinstvu, građevinski institut Fakulteta građevinskih znanosti sveučilišta u Splitu, Split.

Rajčić, A., 2009. Skripta iz Arhitektonskih konstrukcija 2, Tehnički fakultet u Novom Sadu.

Richards, P.J. and Hoxey, R.P., 1993. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using  $k-\epsilon$  turbulence model*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 46 & 47, pp. 145-153, Elsevier.

Richards, P.J., Norris, S.E., 2011. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering model revisited*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 99, pp. 257-266, Elsevier.

Sachs, P., 1986., *Uticao vetra na konstrukcije*, Građevinska knjiga, Beograd.

Sanket A.U., 2004. *Application and analysis of RANS based turbulence models for bluff body aerodynamics*, Master Thesis, Texas Tech University.

Savić, J., Đurić–Mijović, D., Bogdanović, V., 2013. *Architectural Glass: Types, Performance and Legislation*, Facta Universitatis, Vol. 11, No 1, pp. 35–45, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Schuco – Jansen catalogue: *Curtain walls and roof lights. Thermally insulated mullion-transom systems*, Schuco International KG ([www.schueco.com](http://www.schueco.com)).

Sedlacek G., Blank K., Gusgen J., 1995. *Glass in structural engineering*, The structural Engineer, Vol. 73, No 2, pp. 17-22, The Institution of Structural Engineers.

Siedenburg, R., 1974. *Beitrag zur beurteilung von Windlasten und ihrer Haeufigkeit*, Der Stalbau 43, Heft 12.

Simiu E., Scanlan R., 1996. *Wind effects on structures*, John Wiley & Sons, New York.

SOFiSTiK 2014, Softverski paket.

SRPS U.C7.110. 1992. *Osnove proračuna građevinskih konstrukcija - Opterećenje vetrom - Osnovni principi i osrednjeni aerodinamički pritisak vetra.* (u svemu isti kao JUS U.C7.110. iz 1992. godine)

SRPS U.C7.111. 1992. *Osnove proračuna građevinskih konstrukcija - Opterećenje vetrom - Dinamički koeficijent i aerodinamički pritisak vetra.* (u svemu isti kao JUS U.C7.111. iz 1992. godine)

SRPS U.C7.112. 1992. *Osnove proračuna građevinskih konstrukcija - Opterećenje vetrom - Opterećenje vetrom zgrada* (u svemu isti kao JUS U.C7.112. iz 1992. godine).

Stamenković, Ž., 2013., *Magnetno hidrodinamička (MHD) strujanja jednog i dva fluida u kanalima*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Stathopoulos, T., Baniotopoulos, C.C., 2007. *Wind effects on buildings and design of wind-sensitive structures (part: Franke J., Introduction to the Prediction of Wind Loads on Buildings by Computational Wind Engineering)*, Springer, Wien-New York.

Stevanović M. Žarko, 2008. *Numerički aspekti turbulentnog prenošenja impulsa i toplote*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Stevanović Ž. Žana, 2015. *Istraživanje prostorne uniformnosti indikatora toplotnog komfora u zgradama javne namene*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Tamura, T., Nozawa K., Kondo K., 2008. *AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, p.1974-1984, Elsevier.

Technical Note N° 21, 2000. *Tolerance, fit and appearance of cladding*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 26, 2000. *Introduction to structural design of stick curtain walling*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 27, 2000. *Structural design of stick curtain walling*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 28, 2000. *Performance requirements for curtain wall brackets*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 29, 2000. *Design of curtain wall brackets*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 30, 2000. *Cladding of buildings subject to earthquakes*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 55, 2007. *Movement accomodation in Building Envelopes*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 56, 2007. *Accomodation of structural movement*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Technical Note N° 57, 2007. *Cladding movement*, Centre for Window and Cladding Technology (CWCT), University of Bath, Claverton Down, Bath, UK.

Tehnički propisi o dejstvu vetra na noseće čelične konstrukcije, 1964. Službeni list SFRJ broj 41.

Timoshenko, S.P., Gere, J.M., 1961. *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York.

Unhale, S.A., 2004. *Application and analysis of RANS based turbulence models for bluff body aerodynamics*, Master thesis, Texas Tech University.

VDI, 2005. *Environmental meteorology – Prognostic microscale windfield models – Evaluation for flow around buildings and obstacles*, VDI guideline 3783, Part 9, VDI, Düsseldorf.

VDI, 2000. *Environmental meteorology – Physical modelling of flow and dispersion processes in the atmospheric boundary layer – Application of wind tunnels*, VDI guideline 3783, Part 12, VDI, Düsseldorf.

Vitomir, J., 2006., *Konstrukcija aluminijumskih fasada*, AD ALPRO Vlasenica, Vlasenica.

Vlasov, V.Z., 1940. *Thin-Walled Elastic Beams, Strength, Stability, Vibrations*, Strojizdat Narkomstroja, Moskow, Leningrad.

Wilcox, D.C., 1993. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries La Canada, California.

Wright, N.G., Easom, G.J., 2003. *Non-linear  $k-\varepsilon$  model results for flow over a building at full-scale*. *Applied Mathematical Modelling* 27, pp. 1013-1033.

Yakhot V., Orszag. S.A., Thangam. S., Gatski. T.B., Speziale, C.G., 1992. *Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique*, *Physics of Fluids A4*, p. 1510- 1520.

Yeomans, D., 2014., *The Origins of the Modern Curtain Wall*, Association for Preservation Technology International(ATP).

## Spisak slika:

- Slika 2.1. Kristalna palata, London 1851. (Wikipedia)
- Slika 2.2. Bauhaus i preteča zid zavesa (Mislin 2009)
- Slika 2.3. Boley Clothing Company, Kansas City (Allana 2012)
- Slika 2.4. Lever House, New York City, 1952 (Wikipedia).
- Slika 2.5. Katalog kompanije McCoy Bronze iz 1922. godine (Yeomans 2014)
- Slika 2.6. Katalog kompanije Helliwell Patent Glazing iz 1928. godine (Yeomans 2014)
- Slika 3.1.  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrami za staklo i čelik (Sedlacek i dr. 1995)
- Slika 3.3. Ramberg-Ozgodov model  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama
- Slika 3.4. Uporedni  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram za aluminijumske legure i čelik
- Slika 3.5. Raznolikost čeličnih profila koji se koriste u konstrukciji zid zavesa (Schuco-Jansen katalog)
- Slika 3.6. Karakteristična vezastubića za međuspratnu konstrukciju (Schueco katalog)
- Slika 3.7. Štapasti sistem zid zavesa
- Slika 3.8. Panelni sistem zid zavesa (element fasada)
- Slika 3.9. Panelni sistem zid zavesa (element fasada)
- Slika 3.10. Primeri različitih stubića: oslabljeni (a), rešetkasti (b), monosimetrični I-presek (c) i kutijasti (d) (Brookes 2008)
- Slika 3.11. Masivni i skeletni konstruktivni sistem (Kazmierczak 2010)
- Slika 3.12. Ponašanje zid zavesa usled deformacije glavne noseće konstrukcije (Kazmierczak 2010)
- Slika 3.13. Uticaj ugiba međuspratne konstrukcije kod zid zavesa tipa SP (a), tipa S (b), tipa P (c) (Radas 1988)
- Slika 3.14. Uticaj ugiba međuspratne konstrukcije kod element fasada (Radas 1988)
- Slika 3.15. Klasična zid zavesa sa stubićima od čeličnih I profila
- Slika 4.1. Pojednostavljen model cirkulacije u atmosferi.
- Slika 4.2. Opšta raspodela pritisaka i vetrova na površini Zemlje.
- Slika 4.3. Šematski prikaz formiranja vetra u atmosferskom graničnom sloju (Milosavljević, 1983).
- Slika 4.4. Različiti profili vetra zavisno od tipa i hrapavosti terena.
- Slika 4.5. Strujanje vetra oko visoke zgrade, osnova i presek.
- Slika 4.6. Strujanje vetra oko visoke zgrade- tačka stagnacije, tačka odvajanja, oblast vrtložnog traga.
- Slika 4.7. Efekti strujanja vetra oko visoke zgrade sa arkadom.
- Slika 4.8. Ponašanje zgrade usled dejstva vetra
- Slika 4.9. Oštećena fasada tipa zid zavesa tokom tornada, Atlanta 2000 (Beers 2011).
- Slika 4.10. Oštećenje staklene fasade tokom uragana Ike, Houston 2006 (Beers 2011).
- Slika 4.11. Oštećenja fasade tokom uragana Wilma, Miami 2005 (Beers 2011).
- Slika 4.12. Oštećenje fasade Bank One Tower, Teksas, 2000.
- Slika 4.13. Oštećenje fasade hotela Hyatt Regency New Orleans, 2005.
- Slika 4.14. Oštećenje noseće konstrukcije fasadnog zida glavne železničke stanice, Berlin.
- Slika 4.15. Oštećenje fasadnih zidova (Hoffer 2008).
- Slika 4.16. Laminirano staklo (laminated glass) izloženo dejstvu jakog vetra ostaje u ramu ali dolazi do deformacije vertikala i horizontala
- Slika 4.17. Oštećenje fasadnog zida (Kazmierczak 2010)
- Slika 4.18. Raspodela koeficijenata pritisaka  $C_{pe}$ ,  $C_{pi}$  i  $C_{pl}$  kod zgrada  $h/b > 2$  i ravnim krovom (SRPS U.C7.112, 1992.)
- Slika 4.19. Raspodela koeficijenata pritisaka za zatvorenu visoku kvadratnu zgradu  $h:b:l=2.5:1:1$  (SRPS U.C7.112, 1992; Scanlan and Simiu 1996)

Slika 4.20. Referentna visina  $z_e$ , u zavisnosti od dimenzija  $h$  i  $b$ , kao i odgovarajući dijagram pritiska vetra

Slika 4.21. Zone A, B, C, D i E za vertikalne zidove zgrada pravougaone osnove (EN 1991-1-4:2005).

Slika 4.22. Preporučeni postupak za određivanje koeficijenta spoljašnjeg pritiska  $c_{pe}$ , za zgrade sa opterećenom površinom  $A$  između  $1 \text{ m}^2$  i  $10 \text{ m}^2$  (EN 1991-1-4:2005)

Slika 4.23. Ravan krov podeljen na zone po EN 1991-1-4:2005.

Slika 5.1. Položaj osnova zgrada u odnosu na pravac delovanja vetra (grupe modela: A, B, C i D)

Slika 5.2. Preporučene dimenzije domena i položaj objekta u njemu: po Franke-u i Hall-u (u zagradi)

Slika 5.3. Linije mreže upravne na fasadne ravni kod zgrade pod uglom od  $0^\circ$  ( $90^\circ$ ) na pravac delovanja vetra

Slika 5.4. Linije mreže upravne na fasadne ravni kod zgrade pod uglom od  $45^\circ$  na pravac delovanja vetra

Slika 5.5. Prikaz mreže iznad krova objekta kod automatskog formiranja mreže

Slika 5.6. Dimenzije glavnog proračunskog domena i poddomena 1 i 2 za grupu modela A

Slika 5.7. Mreža na uglu krova posle formiranja poddomena.

Slika 5.8. Vertikalni presek kroz domen. Različita gustina mreže duž domena

Slika 5.9. Zadati parametri koji opisuju kvalitet mreže (preprocessing - mesh set-up parameters)

Slika 5.10. Neki od zadatih parametara u CFX-Pre

Slika 5.11. Profili brzine vetra: (a) konstantan i (b) atmosferski granični sloj (Crosbie i dr. 1998)

Slika 5.12. Uzvodni, centralni i nizvodni deo domena (A – ulazni profil vetra, B – profil vetra koji deluje na objekat)

Slika 5.13. Profili brzine vetra na 400m od ulaza u domen: a) konstantna brzina po visini domena i b) brzina sa uticajem atmosferskog graničnog sloja

Slika 5.14. Profil brzine vetra: vertikalni presek kroz ceo domen (a) vertikalni presek kroz deo domena (b) kod grupe modela A

Slika 5.15. Deo zadavanja izlazne granice domena (Outlet).

Slika 5.16. Neki od zadatih parametara pri definisanju konvergencije

Slika 5.17. Primer konvergencije za zgradu grupe A ( $0^\circ$ ), mreža 1,7m

Slika 5.18. Primer monitor tačke za zgradu grupe A ( $0^\circ$ ), mreža 1,7m

Slika 5.19. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra za grupu modela A .

Slika 5.20(a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritisaka za grupu modela A .

Slika 5.20(b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela A .

Slika 5.21. Koeficijenti pritisaka,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 4m (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).

Slika 5.22. Koeficijenti pritisaka,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 1m (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).

Slika 5.23. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po srednjim linijama navetrene fasade (1), krova (2) i zavetrene fasade (3)

Slika 5.24. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.25. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.26. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.27. Koeficijenti pritisaka,  $C_p$  za grupu modela A i veličinu mreže 1m (SST turbulentni model).

Slika 5.28. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.29. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 6.30. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.31. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela B.

Slika 5.32(a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritisaka za grupu modela B .

Slika 5.32(b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela B .



Slika 5.33. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela B i veličinu mreže 4m (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

Slika 5.34. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela B i veličinu mreže 1m (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

Slika 5.35. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.36. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.37. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.38. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela B i veličinu mreže 1,3m (SST turbulentni model).

Slika 5.39. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.40. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.41. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj strani objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.42. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela C.

Slika 5.43(a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela C (zgrada pod uglom  $30^\circ$ ).

Slika 5.43(b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela C.

Slika 5.44. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 4m (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

Slika 5.45. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 1m (RNG  $k-\varepsilon$  turbulentni model).

Slika 5.46. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.47. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.48. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.49. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela C i veličinu mreže 1m (SST turbulentni model).

Slika 5.50. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.51. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.52. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.53. Položaj zgrade u odnosu na pravac dejstva vetra kod grupe modela D.

Slika 5.54(a). 3D prikaz zgrade sa dobijenim koeficijentima pritiska za grupu modela D (zgrada pod uglom  $45^\circ$ ).

Slika 5.54(b). Raspodela brzine vetra u osnovi domena za grupu modela D.

Slika 5.55. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela D i veličinu mreže 4m (SST turbulentni model).

Slika 5.56. Koeficijenti pritiska,  $C_p$  za grupu modela D i veličinu mreže 1m (SST turbulentni model).

Slika 5.57. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (1) na navetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.58. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (2) na krovu objekta za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 5.59. Koeficijenti pritiska  $C_p$  [-] po liniji (3) na zavetrenoj fasadi za mreže 1, 2.2 i 4m

Slika 6.1. Koeficijenti pritiska po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG  $k-\varepsilon$  i SST  $k-\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $0^\circ$  (grupa modela A)

Slika 6.2. Koeficijenti pritiska po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG  $k-\varepsilon$  i SST  $k-\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $15^\circ$  (grupa modela B)

Slika 6.3. Koeficijenti pritiska po: SRPS EN 1991-1-4, RNG  $k-\varepsilon$  i SST  $k-\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $30^\circ$  (grupa modela C)

Slika 6.4. Koeficijenti pritiska po: SRPS U.C7 110-112, SRPS EN 1991-1-4, RNG  $k-\varepsilon$  i SST  $k-\omega$  za dejstvo vetra pod uglom od  $45^\circ$  (grupa modela D)

Slika 6.5. Raspodela koeficijenata pritiska bočne, navetrene, zavetrene fasade i krova pri konstantnoj raspodeli brzine vetra po visini (Baines 1965)

Slika 6.6. Raspodela koeficijenata pritiska bočne, navetrene i zavetrene fasade i krov u atmosferskom graničnom sloju (AGS) (Baines 1965)

Slika 6.7. Raspodela koeficijenata pritisaka navetrene, bočne i zavetrene fasade u atmosferskom graničnom sloju (AGS) (Cheung 1984)

Slika 6.8. 3-D prikaz i osnova analizirane zgrade (Amin i Ahuja 2014)

Slika 6.9 Raspodela koeficijenata pritisaka: (a) navetrene i zavetrene fasade kada vetar deluje pod uglom  $0^{\circ}$ ; (b) navetrene fasade kada vetar deluje pod uglom  $45^{\circ}$  (Amin i Ahuja 2014)

Slika 6.10. Raspored mernih tačaka na sve četiri fasade zgrade

Slika 6.11. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje upravno,  $\alpha=0^{\circ}$

Slika 6.12. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha=15^{\circ}$

Slika 6.13. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha=30^{\circ}$

Slika 6.14. Koeficijenti pritisaka  $C_p$  za sve četiri fasade za zgradu na koju vetar deluje pod uglom  $\alpha=45^{\circ}$

Slika 6.15. Raspodela koeficijenata pritisaka navetrene i zavetrene fasade (Dagnew i dr. 2009)

Slika 7.1. Jednakopodeljeno opterećenje vetrom vertikale zid zavese

Slika 7.2. Opterećenje prečki zid zavese

Slika 7.3. Opterećenje stubića zid zavese

Slika 7.4. Deo fasade proizvođača SCHUECO – Olakšani dvostruko simetrični stubić i prečka T - preseka

Slika 7.5. Geometrija i dimenzije analiziranog modela (SOFiSTiK 2014)

Slika 7.6. Zadavanje poprečnog preseka stubića (SOFiSTiK 2014)

Slika 7.7. Veza stubića i prečke

Slika 7.8. Zadavanje imperfekcija u modulu SOFiLOAD (SOFiSTiK 2014)

Slika 7.9. Ponašanje fasadne konstrukcije pod dejstvom kombinacije opterećenja LC 1003

Slika 7.10. Bočno-torziono izvijanje

Slika 7.11. Monosimetričan I poprečni presek

Slika 7.12. Konvencija orijentacije osa (EN 1999-1-1:2007)

Slika 7.13. Uticaj položaja napadne tačke opterećenja

Slika 7.14. Eksel sveska “Cross-sectional values” (RUBSTAHL 2008)

Slika 7.15. Eksel sveska “Al CS Class, Alpha”

Slika 7.16. Eksel sveska “ $M_{Rd}$ ,  $M_{cr}$  EC9”

Slika 7.17. Grupe analiziranih stubića

Slika 7.18. Analizirani poprečni preseci

Slika 7.19. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h= 100$  mm

Slika 7.20. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h= 150$  mm

Slika 7.21. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h= 200$  mm

Slika 7.22. Zavisnost  $\mu_{cr}$  od  $\psi_f$  za visinu preseka  $h= 250$  mm

Slika 7.23. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na GN

Slika 7.24. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na CS

Slika 7.25. Zavisnost  $\mu_{cr}$  [-] od  $\psi_f$  za različite visine preseka kada opterećenje deluje na DN

Slika 8.1. Zoniranje fasadnih ravni

## Spisak tabela:

- Tabela 3.1. Dozvoljeni naponi na savijanje za vučeno, termički ojačano i kaljeno staklo*
- Tabela 3.2. Tabela aluminijumskih legura i njihove karakteristike(EN 1999-1-1:2007)*
- Tabela 3.3. Zatezna čvrstoća i granica razvlačenja za različite vrste čelika*
- Tabela 3.4. Usporedne karakteristike materijala koji se najčešće pojavljuju na zid zavesama*
- Tabela 4.1. Brzine vetra po Boforovoj skali merene na 10 metara iznad površine terena (Bojović, 1993)*
- Tabela 4.2. Boforova, Safir-Simpsonova i skala Fujita – opis vetra, srednja brzina vetra na 10m visine, odgovarajući pritisak vetra.*
- Tabela 4.3 – Pregled faktora hrapavosti terena i gradijentnih visina (preuzeta iz SRPS U.C7.110)*
- Tabela 4.4 – Klasifikacija hrapavosti terena i odgovarajuće gradijentne visine (Davenport, 2000)*
- Tabela 4.5. – Pregled faktora hrapavosti terena i gradijentnih visina (preuzeta iz SRPS U.C7.110)*
- Tabela 4.6. Kategorije i parametri terena (preuzeto iz EN 1991-1-4:2005)*
- Tabela 4.8. Preporučene vrednosti koeficijenta spoljašnjeg pritiska, za vertikalne zidove zgrada pravougaone osnove (tabela preuzeta iz EN 1991-1-4:2005).*
- Tabela 4.9. Koeficijenti spoljašnjeg pritiska za ravne krovove (deo tabele iz EN 1991-1-4:2005)*
- Tabela 4.10. Parametri hrapavosti terena*
- Tabela 5.1 Koeficijenti pritisaka,  $C_p$  za sve fasadne ravni kada je rastojanje zgrade od ulaza u domen 5h*
- Tabela 5.2. Koef. pritisaka,  $C_p$  za sve fasadne ravni kada je rastojanje zgrade od ulaza u domen 10h*
- Tabela 5.3. Poređenje koeficijenta pritisaka na svim fasadnim ravnima za položaj zgrade 5h i 10h od ulaza*
- Tabela 5.4. Aktuelne preporuke za dimenzije domena*
- Tabela 5.5. Usvojene dimenzije domena za sve grupe modela*
- Tabela 5.6. Veličine glavnog i poddomena kod grupa modela A ( $0^0$ ), B ( $15^0$ ), C ( $30^0$ ) i D ( $45^0$ ).*
- Tabela 5.7. Broj elemenata mreže za različite grupe modela*
- Tabela 5.8. Razlika koeficijenata pritisaka kada je gornja granica zadata kao Inlet i Simetrija*
- Tabela 5.9. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela A (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).*
- Tabela 5.10. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.11. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela A (SST turbulentni model)*
- Tabela 5.12. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.13. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mrežegrupe modela B (RNG  $k-\epsilon$  turbulentni model).*
- Tabela 5.14. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.15. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela B (SST turbulentni model)*
- Tabela 5.16. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.17. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela C*
- Tabela 5.18. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.19. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mreže grupe modela C (SST turbulentni model)*
- Tabela 5.20. Odstupanja [%] koeficijenata pritisaka  $C_p$  za susedne mreže*
- Tabela 5.21. Maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenata pritisaka  $C_p$  za sve fasadne ravni i krov objekta za sve analizirane mrežegrupe modela D*

*Tabela 5.22. Odstupanja [%] koeficijenta pritiska  $C_p$  za susedne mreže*

*Tabela 7.1. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za S235*

*Tabela 7.2. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{z,max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za AW 6063.T5*

*Tabela 7.3. Maksimalni momenti savijanja  $M_{y,max}$  i maksimalni ugibi  $f_{z,max}$  na stubićima za različite kombinacije opterećenja i različite zadate imperfekcije za AW 6082.T6*

*Tabela 7.4. Vrednosti za  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  za odgovarajuća transverzalna opterećenja, faktore  $k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_w$ , faktor monosimetrije  $\psi_f$  i torzioni parametar  $k_{wt}$  (EN 1999-1-1:2007)*

*Tabela 7.5. Način određivanja koeficijenta oblika,  $\alpha$  (Tabela 6.4 iz EN 1999-1-1:2007)*

*Tabela 7.6. Vrednosti  $\alpha_{LT}$  i  $\bar{\lambda}_{0,LT}$*

*Tabela 7.7 Prikaz rezultata za poprečni presek I 100.50.8 ( $\psi_f=0$ ) i izvedene preseke ( $0 \leq \psi_f \leq 1$ )*

## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Danijela Đurić-Mijović, rođena je 03.12.1973. godine u Nišu. Osnovnu školu "Maršal Tito" (sada "Radoje Domanović") pohađala je u Nišu i završila je sa odličnim uspehom kao dobitnik "Vukove diplome". Više puta je učestvovala na opštinskim i regionalnim takmičenjima iz predmeta Matematike i Fizike. Školske 1988/89. godine upisala je Gimnaziju "Bora Stanković" u Nišu i završila je sa odličnim uspehom.

Građevinski fakultet u Nišu, smer Visokogradnje upisala je školske 1992/93. godine. Za postignut uspeh u trećoj godini studija nagrađena je knjigom i poveljom Građevinskog fakulteta u Nišu. Leta 1997. godine učestvovala je u međunarodnoj razmeni studenata i tom prilikom boravila na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Damasku, Sirija. Diplomirala je na Građevinsko–arhitektonskom fakultetu u Nišu 15.12.1998. godine, sa ocenom 10, sa temom "Idejni projekat osnovne škole" (predmeti: Projektovanje društvenih zgrada, Betonske konstrukcije i Urbanizam) kod mentora Prof. dr Nikole Cekića i time stekla zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva (smer Visokogradnja). Prosečna ocena u toku studija je 8,33.

U radni odnos na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu primljena je posredstvom Zavoda za tržište rada Republike Srbije 1. aprila 1999. godine, u trajanju od četiri godine, na mesto istraživača - pripravnika. Od 1. aprila 2003. godine do 1. jula 2003. godine bila je zaposlena na radnom mestu stručnog saradnika, a 1. jula 2003. god. izabrana je u zvanje asistenta za užu naučnu oblast Konstrukcije i konstrukcijski sistemi arhitektonskih objekata, na period od četiri godine.

Okobra 2000. godine Građevinsko–arhitektonski fakultet u Nišu upućuje je na stručno usavršavanje, poslediplomske studije na engleskom jeziku "Computational Engineering" na Građevinski fakultet, Ruskog Univerziteta u Bohumu, Nemačka. Poslediplomske studije trajale su 4 semestra a u prva tri semestra položila je svih 19 obaveznih i izbornih predmeta. Magistarsku tezu sa temom "Influence of the cross-section-shape on the bifurcation loads of bending girders" radila je i odbranila kod prof. Dr.–Ing. R. Kindmana, šefa Instituta i katedre za čelične konstrukcije. Prilikom rada na magistarskoj tezi, radila je sa specijalno dizajniranim softverskim paketom "RUBSTAHL" odnosno sa programom "KSTAB 2000". Deo magistarskog rada predstavlja izradu dodatnog dela gore navedenog programa u "Visual Basic"–u vezanog za probleme stabilnosti čeličnih konstrukcija. Magistarsku tezu pod gore navedenim naslovom

odbranila je 22.08.2002. godine sa najvišom ocenom, 1,0. Sve vreme studija u Bohumu bila je stipendista DAAD-a (Deutscher Akademischer Austauschdienst).

Stečenu diplomu magistra nostrifikovao je Građevinsko–arhitektonski fakultet u Nišu dana 26.03.2003. godine kao Diplomom magistra tehničkih nauka.

Od samog početka rada na fakultetu saradivala je na predmetima: Arhitektonske konstrukcije 2, Arhitektonske konstrukcije 3, Metalne konstrukcije zgrada i Montažne zgrade na Odseku arhitekture. Od uvođenja novih nastavnih planova i programa zadužena je za izvođenje vežbi iz predmeta: Arhitektonske konstrukcije III, Metalne konstrukcije zgrada I, Montažne zgrade I i Građevinskih konstrukcija I na Osnovnim akademskim studijama kao i za izvođenje vežbi iz predmeta: Savremene fasadne konstrukcije i forme, Arhitektonsko-konstruktivski dizajn i Metalne konstrukcije u visokogradnji na Diplomskim akademskim studijama na Studijskom programu Arhitekture.

Aprila 2008. godine podnela je prijavu Nastavno–naučnom veću Građevinsko–arhitektonskog fakulteta u Nišu za izradu doktorske disertacije pod nazivom: “Arhitektonsko–konstruktivski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”. Nastavno–naučno veće Fakulteta je na sednici održanoj juna 2008. godine a potom i Univerzitet u Nišu, odobrili su izradu predložene doktorske disertacije i za mentora odredili Prof. dr Milisava Damnjanovića.

Reizabrana je u zvanje asistenta za užu naučnu oblast Projektovanje konstrukcija arhitektonskih objekata septembra 2015. godine, na period od tri godine.

Autor je brojnih naučnih radova prezentovanim na međunarodnim konferencijama i radova objavljenih u domaćim i stranim stručnim časopisima.

## IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**“Arhitektonsko –konstrukcijski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”**

koja je odbranjena na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao/la na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio/la autorska prava, niti zloupotrebio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, \_\_\_\_\_

Potpis autora disertacije:

\_\_\_\_\_  
(Danijela Đurić Mijović)



**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ELEKTRONSKOG I ŠTAMPANOG OBLIKA DOKTORSKE  
DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

**“Arhitektonsko –konstrukcijski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predala za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, \_\_\_\_\_

Potpis autora disertacije:

\_\_\_\_\_  
(Danijela Đurić Mijović)

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

### **“Arhitektonsko –konstrukcijski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”**

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (**CC BY**)
2. Autorstvo – nekomercijalno (**CC BY-NC**)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (**CC BY-NC-ND**)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (**CC BY-NC-SA**)
5. Autorstvo – – bez prerade (**CC BY-ND**)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (**CC BY-SA**)

U Nišu, \_\_\_\_\_

Potpis autora disertacije:

---

(Danijela Đurić Mijović)