

# Analiza strujanja zraka oko solarnih kolektora postavljenih na ravnom krovu gospodarske zgrade

---

Šešet, Krunoslav

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:240398>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Krunoslav Šešet**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.  
Dr. sc. Ante Šoda

Student:

Krunoslav Šešet

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem svome mentoru dr. sc. Anti Šodi na pomoći i uloženom trudu i vremenu pri izradi ovog rada.

Krunoslav Šešet



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

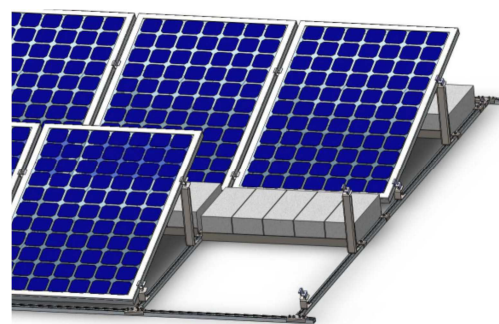
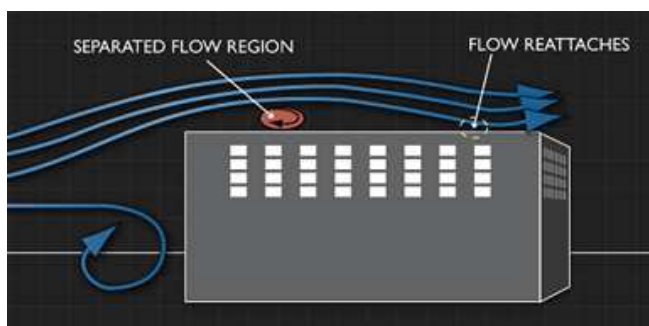
Student: **Krunoslav Šešet** Mat. br.: **0035167485**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza strujanja zraka oko solarnih kolektora postavljenih na ravnom krovu gospodarske zgrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of airflow around solar panels installed on the flat roof of a large industrial building**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je provesti računalne simulacije strujanja zraka oko solarnih kolektora postavljenih na ravnom krovu gospodarske zgrade, npr. trgovačkog centra ili sportske dvorane. Kako bi kolektori bili otporni na udare vjetra, potrebno ih je opteretiti sa utezima. To obično zahtjeva čvršću i skuplju konstrukciju krova, pa postoji potreba ispitivanja aerodinamičnih svojstava solarnih kolektora. Cilj takve analize je ustanoviti kakve aerodinamične sile se javljaju na kolektorima, te kakva udaljenost između redova kolektora je potrebna, da bi se smanjila potrebna masa utega. Solarni kolektori postavljeni su kao paneli dimenzija 1 m × 1.65 m u nekoliko redova na krovu zgrade. Brzina vjetra u razmatranju je 160 km/h. U radu će se koristiti kompjuterski program Fluent. Pri radu treba se držati pravila koja su uobičajena za izradu semestralnih radova kao i posebnih pravila za izradu završnih radova. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.



Zadatak zadan:

**11.11.2011**

Rok predaje rada:

1. rok:  
2. rok:

Predviđeni datumi obrane:

1. rok:  
2. rok:

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Predsjednik povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Dr. sc. Ante Šoda

*Ante Šoda*

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	X
1. UVOD.....	1
2. AERODINAMIKA.....	6
2.1. Fizikalni zakoni.....	6
2.2. Pojednostavljenje jednadžbi.....	8
2.3. Machov broj ( $Ma$ ) .....	9
2.4. Vrste strujanja .....	10
2.5. Sile na tijelo .....	12
2.6. Reynoldsov broj ( $Re$ ).....	14
2.7. Aerodinamični koeficijenti .....	14
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA (CFD) .....	17
3.1. Opis alata.....	17
4. SIMULACIJE .....	20
4.1. Geometrije.....	20
4.2. Mreže .....	22
4.3. Postavke strujanja .....	31
5. REZULTATI .....	33
5.1. Izračunati koeficijenti otpora ( $CD$ ) i uzgona ( $CL$ ) .....	33
5.2. Simulacija A.....	35
5.3. Simulacija B.....	36
5.4. Simulacija C.....	37
5.5. Simulacija D.....	38
5.6. Simulacija D sa suprotnim smjerom strujanja .....	41
5.7. Simulacija E .....	44
5.8. Simulacija E sa suprotnim smjerom strujanja.....	47
5.9. Simulacija F .....	50
5.10. Simulacija F sa suprotnim smjerom strujanja .....	53
5.11. Simulacija G.....	56
5.12. Simulacija H.....	57
5.13. Simulacija H sa suprotnim smjerom strujanja .....	60
5.14. Simulacija I.....	63
5.15. Simulacija I sa suprotnim smjerom strujanja.....	66
6. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA.....	69
6.1. Usporedba simulacija A i B te B i C.....	70
6.2. Usporedba simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na simulaciju F. 71	71

---

6.3.	Usporedba simulacije I u odnosu na simulaciju I sa suprotnim smjerom strujanja...	73
6.4.	Usporedba simulacije I u odnosu na simulaciju F .....	75
6.5.	Usporedba simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na simulaciju F sa suprotnim smjerom strujanja.....	76
7.	ZAKLJUČAK.....	78
8.	PRILOZI.....	79
9.	LITERATURA .....	80

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Opstrujavanje zraka oko zgrade [1].....	1
Slika 2.	Primjer prirodna ventilacija gospodarskog objekta [2] .....	2
Slika 3.	Urušavanje Tacoma Narrows mosta, Washington 1940. [3].....	3
Slika 4.	Moguća rješenja za redukciju aerodinamičnih sila na most [4] .....	3
Slika 5.	Lijevo: solarni paneli na krovu Londonske gradske vijećnice [5] .....	4
Slika 6.	Desno: primjer solarnih panela na krovu stambenog objekta [6].....	4
Slika 7.	Lijevo: solarni paneli na ravnom krovu [7].....	4
Slika 8.	Desno: primjer kako vjetar može oštetiti solarne panele [8].....	4
Slika 9.	Referentni koordinatni sustav .....	5
Slika 10.	Trajektorije i strujnice [12].....	10
Slika 11.	Lijevo: Laminarno strujanje oko aerodinamičnog profila (lijevo) [11] .....	10
Slika 12.	Granični sloj uz ravnu ploču [14].....	11
Slika 13.	Primjeri odvajanja graničnog sloja prilikom opstrujavanja tijela [9].....	12
Slika 14.	Odvajanje i ponovno nalijeganje graničnog sloja [14].....	13
Slika 15.	Vremenski usrednjena brzina pri turbulentnom strujanju [10] .....	14
Slika 16.	Opstrujavanje aerodinamični neoblikovanog tijela [18] .....	15
Slika 17.	Opstrujavanje aerodinamični oblikovanog tijela, $A_{ref} = L \cdot B$ [17] .....	16
Slika 18.	Nestrukturirana mreža .....	18
Slika 19.	Strukturirana mreža .....	18
Slika 20.	Hibridna mreža .....	19
Slika 21.	Domena strujanja [26] .....	20
Slika 22.	Geometrije A i B .....	21
Slika 23.	Geometrija C .....	21
Slika 24.	Geometrije D, E i F .....	22
Slika 25.	Geometrije G, H i I.....	22
Slika 26.	Mreža simulacije A .....	23
Slika 27.	Mreža simulacije B.....	24
Slika 28.	Mreža simulacije C.....	25
Slika 29.	Mreža simulacije D .....	26
Slika 30.	Mreža simulacije E.....	27
Slika 31.	Mreža simulacije F.....	28
Slika 32.	Mreža simulacije G .....	29
Slika 33.	Mreža simulacije H .....	30
Slika 34.	Mreža simulacije I.....	31
Slika 35.	Rubni uvjeti domene .....	32
Slika 36.	Polje tlaka simulacije A.....	35
Slika 37.	Strujnice simulacije A .....	35
Slika 38.	Polje tlaka simulacije B.....	36
Slika 39.	Strujnice simulacije B .....	36
Slika 40.	Polje tlaka simulacije C.....	37
Slika 41.	Strujnice simulacije C .....	37
Slika 42.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. red panela u simulaciji D .....	38
Slika 43.	Konvergencija koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panel u simulaciji D.....	38
Slika 44.	Polje tlaka simulacije D.....	39

Slika 45.	Strujnice simulacije D .....	39
Slika 46.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji D .....	40
Slika 47.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji D.....	40
Slika 48.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D .....	40
Slika 49.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja.....	41
Slika 50.	Konvergencija koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja.....	41
Slika 51.	Polje tlaka simulacije D sa suprotnim smjerom strujanja .....	42
Slika 52.	Strujnice simulacije D sa suprotnim smjerom strujanja.....	42
Slika 53.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja .....	43
Slika 54.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja .....	43
Slika 55.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja .....	43
Slika 56.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E .....	44
Slika 57.	Konvergencija koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E .....	44
Slika 58.	Polje tlaka simulacije E .....	45
Slika 59.	Strujnice simulacije E.....	45
Slika 60.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji E.....	46
Slika 61.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji E .....	46
Slika 62.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E .....	46
Slika 63.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja.....	47
Slika 64.	Konvergencija koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja.....	47
Slika 65.	Polje tlaka simulacije E sa suprotnim smjerom strujanja.....	48
Slika 66.	Strujnice simulacije E sa suprotnim smjerom strujanja .....	48
Slika 67.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja .....	49
Slika 68.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja .....	49
Slika 69.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja .....	49
Slika 70.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F .....	50
Slika 71.	Konvergencija koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F .....	50
Slika 72.	Polje tlaka simulacije F .....	51
Slika 73.	Strujnice simulacije F.....	51
Slika 74.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji F .....	52
Slika 75.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji F .....	52
Slika 76.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F .....	52
Slika 77.	Konvergencija koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja.....	53

Slika 78.	Konvergenција koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja.....	53
Slika 79.	Polje tlaka simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja .....	54
Slika 80.	Strujnice simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja.....	54
Slika 81.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja .....	55
Slika 82.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja .....	55
Slika 83.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja .....	55
Slika 84.	Konvergencije rješenja simulacije G.....	56
Slika 85.	Konvergenција koeficijenta uzgona simulacije G.....	56
Slika 86.	Konvergenција koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H .....	57
Slika 87.	Konvergenција koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H .....	57
Slika 88.	Polje tlaka simulacije H.....	58
Slika 89.	Strujnice simulacije H .....	58
Slika 90.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji H .....	59
Slika 91.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji H.....	59
Slika 92.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H .....	59
Slika 93.	Konvergenција koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja.....	60
Slika 94.	Konvergenција koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja.....	60
Slika 95.	Polje tlaka simulacije H sa suprotnim smjerom strujanja .....	61
Slika 96.	Strujnice simulacije H sa suprotnim smjerom strujanja.....	61
Slika 97.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja .....	62
Slika 98.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja .....	62
Slika 99.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja .....	62
Slika 100.	Konvergenција koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I .....	63
Slika 101.	Konvergenција koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I.....	63
Slika 102.	Polje tlaka simulacije I .....	64
Slika 103.	Strujnice simulacije I.....	64
Slika 104.	Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji I.....	65
Slika 105.	Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji I .....	65
Slika 106.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I.....	65
Slika 107.	Konvergenција koeficijenta $CD$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja.....	66
Slika 108.	Konvergenција koeficijenta $CL$ za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja.....	66
Slika 109.	Polje tlaka simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja.....	67
Slika 110.	Strujnice simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja .....	67
Slika 111.	Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja .....	68

---

Slika 112. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja .....	68
Slika 113. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja .....	68

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mreža simulacije A .....	23
Tablica 2. Mreža simulacije B.....	23
Tablica 3. Mreža simulacije C.....	24
Tablica 4. Mreža simulacije D .....	25
Tablica 5. Mreža simulacije E.....	26
Tablica 6. Mreža simulacije F.....	27
Tablica 7. Mreža simulacije G .....	28
Tablica 8. Mreža simulacije H .....	29
Tablica 9. Mreža simulacije I.....	30
Tablica 10. Koeficijenti $CD$ i $CL$ za zgradu i $v_{max}$ simulacija A, B i C .....	34
Tablica 11. Koeficijenti i sile na referentne panele simulacija D, E, F, H i I za oba smjera strujanja .....	34



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$x$	-	os referentnog koordinatnog sustava
$y$	-	os referentnog koordinatnog sustava
$t$	$s$	vrijeme
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	gustoća
$V$	$m^3$	volumen
$\vec{v}$	$\frac{m}{s}$	brzina
$\vec{F}$	$N$	sila
$\vec{r}$	-	radij vektor
$e$	$\frac{J}{kg}$	specifična energija
$W$	$W$	mehanički rad
$Q$	$J$	toplina
$MS$	-	materijalna površina
$MV$	-	materijalni volumen
$KV$	-	kontrolni volumen
$KS$	-	kontrolna površina
$S$	$m^2$	površina
$\vec{n}$	-	normalni vektor na površinu
$\vec{f}$	$\frac{N}{kg}$	vektor masene sile
$\vec{\sigma}_n$	$Pa$	tenzor naprezanja
$\mu$	$Pas$	dinamička viskoznost
$\Delta$	-	Laplaceov operator
$Ma$	-	Machov broj
$v_i$	$\frac{m}{s}$	brzina tijela
$v_z$	$\frac{m}{s}$	brzina zvuka
$F_D$	$N$	sila otpora
$ABL$	-	debljina atmosferskog graničnog sloja

---

$F_L$	$N$	silna uzgona
$Re$	-	Reynoldsov broj
$v$	$\frac{m}{s}$	brzina fluida
$H_{ref}$	$m$	referentna dužina
$C_D$	-	aerodinamični koeficijent otpora
$C_L$	-	aerodinamični koeficijent uzgona
$\rho_\infty$	$\frac{kg}{m^3}$	gustoća fluida neporemećene struje
$v_\infty$	$\frac{m}{s}$	brzina fluida neporemećene struje
$A_{ref}$	$m^2$	referentna površina
$CFD$	-	računalna dinamika fluida
$v_{max}$	$\frac{m}{s}$	vrijednost maksimalne brzine
■	-	fizikalna veličina
∇	-	Hamiltonov diferencijalni operator
$\tau$	$Pa$	smično naprezanje
$m$	$kg$	masa

## SAŽETAK

Zadatak ovog rada je istražiti strujanje oko zadanog oblika gospodarske zgrade i solarnih panela na njoj te prikazati utjecaj smjera strujanja na aerodinamične sile zraka. Isto tako, cilj je analizirati utjecaj dvaju oblika solarnih panela, koje se mogu naći na ravnom krovu zgrade, na aerodinamične sile koje djeluju na njih.

U skladu s tim, provedeno je dvodimenzijско (2-D) numeričko ispitivanje oblika vertikalnog presjeka gospodarskog objekta s različitim geometrijama solarnih panela i smjerova strujanja. Ispitivanje je provedeno koristeći računalni program Fluent [27].

Ispitivanje je provedeno na 2-D geometriji sa različitim geometrijama solarnih panela, od geometrije sa oklopljenim solarnim panelom do geometrije sa otvorenom zadnjom stranom panela.

Analiza rezultata obuhvaća utjecaj oblika solarnih panela i smjera strujanja zraka te utjecaj tipa diskretizacije domene strujanja (vrste CFD mreže) na aerodinamične sile.

Razmatrana je raspodjela koeficijenta tlaka i aerodinamičnih sila po površini tijela, a uspoređene su trenutne slike strujnica oko tijela.

Analizom rezultata dobivene su osnovne smjernice kojih se treba pridržavati pri odabiru i postavljanju solarnih panela na krov objekta.

Rezultati pokazuju da su sile otpora zanemarive naspram sila uzgona te da najveće sile djeluju na panele koji se nalaze uz rub zgrade. Isto tako da oblik panela te smjer strujanja znatno utječe na aerodinamične sile.

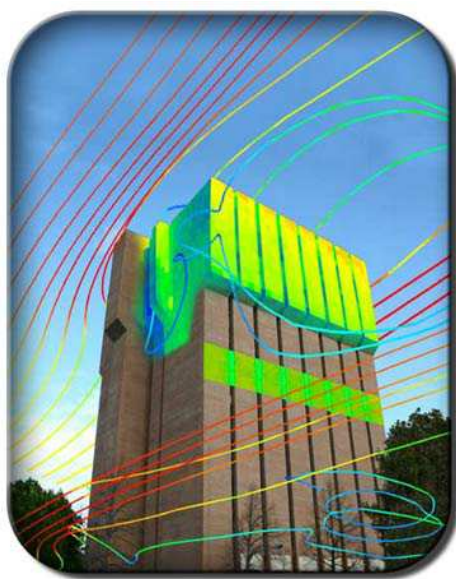
Razlozi leže u raspodijeli polja tlaka i vrtlozima stvorenih oko promatranih objekata koji su posljedica ometenog gibanja struje zraka radi promatranih objekata.

## 1. UVOD

Dinamika fluida je disciplina mehanike fluida koja proučava sile koje nastaju uslijed gibanja tijela kroz mirujući fluid ili gibanja fluida oko mirujućeg tijela. Aerodinamika je grana dinamika fluida i u aerodinamici taj fluid čini zrak.

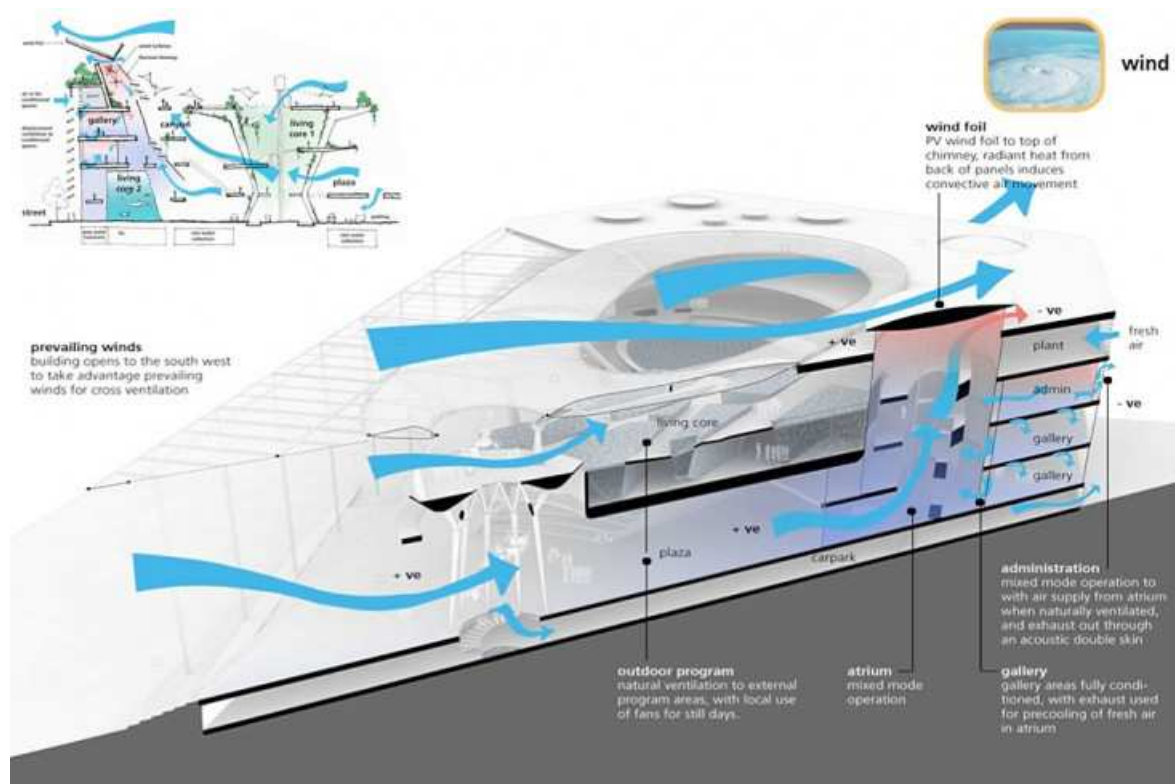
Aerodinamika poprima sve veću važnost kod projektiranja građevinskih objekata. Porastom zahtjeva za energetsom učinkovitošću, počela je veća primjena znanja iz aerodinamike na konstrukciju i arhitekturu građevinskih objekata [Slika 1].

Smanjenje opterećenja direktno utječe na masu, volumen i korištene materijale u izgradnji objekta što opet direktno utječe na količinu materijala i energije potrebne za proizvodnju.



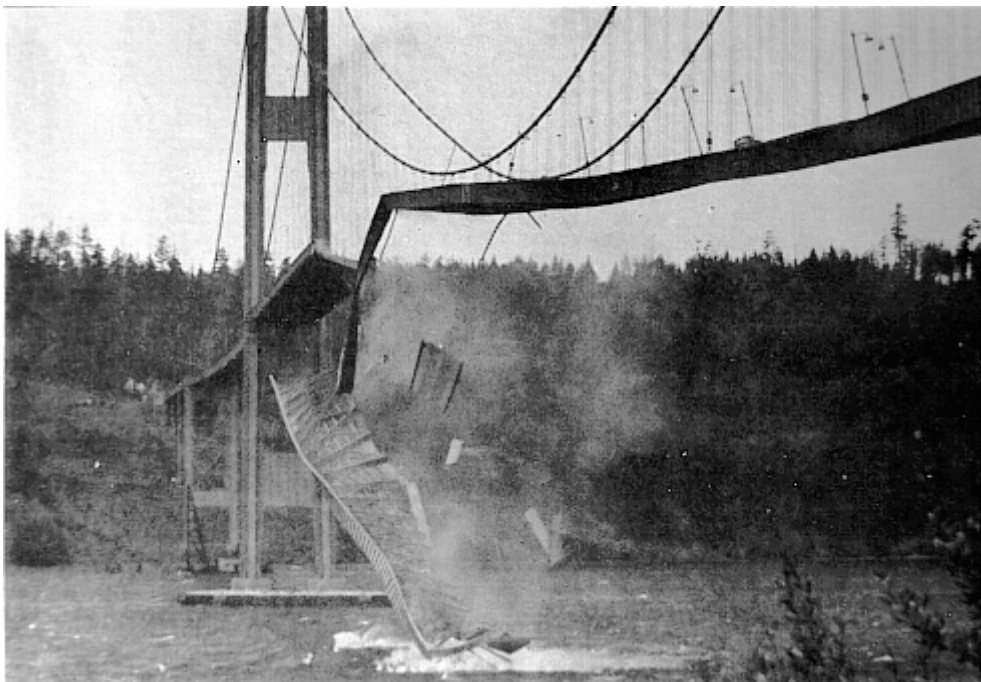
**Slika 1.** Opstrujavanje zraka oko zgrade [1]

Korištenjem prirodne struje zraka u ventilacijske svrhe direktno se može utjecati na energetska učinkovitost građevine u njezinoj primjeni i tome je danas pridodana velika važnost [Slika 2]. Prirodna ventilacija je jedna od glavnih stavki kod gradnje energetski učinkovitih zgrada.

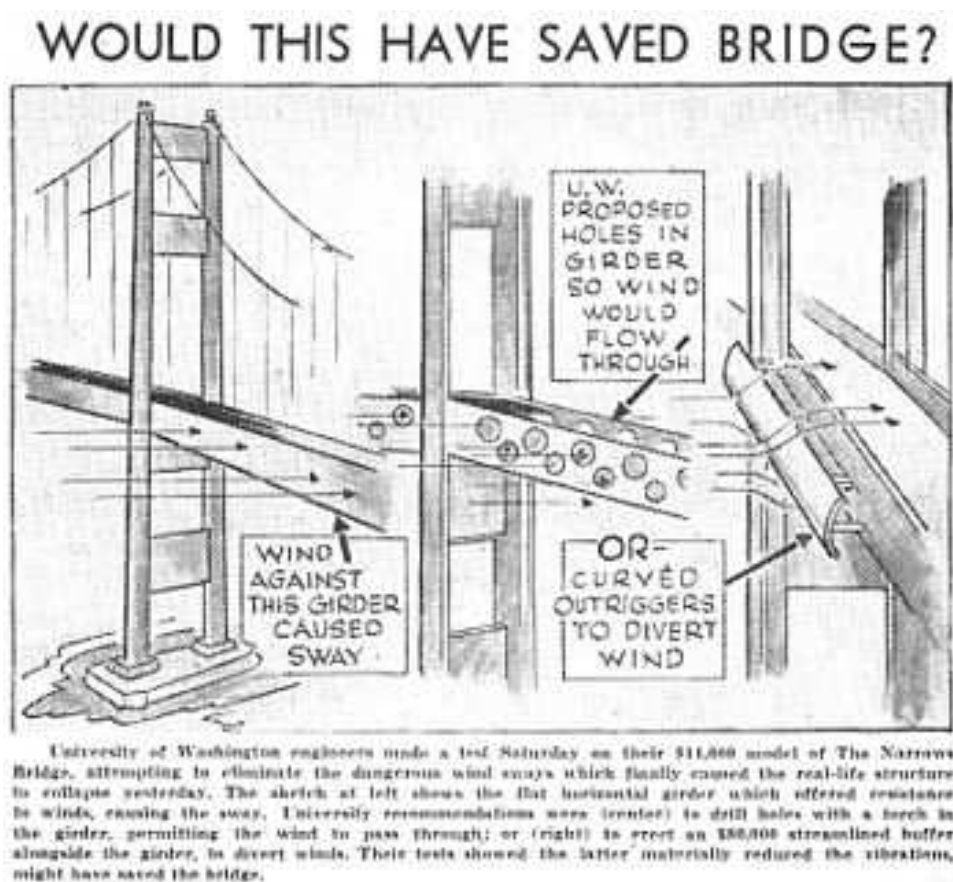


Slika 2. Primjer prirodna ventilacija gospodarskog objekta [2]

Tipične građevine koje su izložene utjecaju vjetra su mostovi. Zbog svog oblika i konstrukcije dugački mostovi se moraju izvoditi kao vitke i fleksibilne konstrukcije, što ih često čini osjetljivima na frekvenciju i amplitudu udara vjetra [Slika 3]. Dodatnu poteškoću čini i geografski položaj na kojem se obično postavljaju dugački viseći mostovi, a to su strme obale na morima i oceanima, između kopna i otoka itd. Kod konstrukcije mostova je tendencija da veliki naleti vjetra što manje utječu na opterećenje mosta i da ne ometaju prometovanje njime. Kod mostova je tendencija da veliki naleti vjetra što manje utječu na opterećenje mosta i da ne ometaju prometovanje njime. Primjer gdje je nalet vjetra, čak relativno male brzine od  $64 \frac{km}{h}$  srušio most, je *Tacoma Narrows* most u Washingtonu, SAD [Slika 3]. Most je imao problem jer je relativno jako oscilirao na vjetru, a nije upotrijebljeno kvalitetno rješenje da se taj problem riješi, što je konačno dovelo do nesreće 1940. god.. Odmah nakon nesreće je u novinama „*Seattle Times*“ objavljen crtež sa mogućim rješenjima kojima su se mogle reducirati aerodinamične sile, koje su predlagali inženjeri Sveučilišta u Washingtonu još prije nesreće [Slika 4].



Slika 3. Urušavanje Tacoma Narrows mosta, Washington 1940. [3]



Slika 4. Moguća rješenja za redukciju aerodinamičnih sila na most [4]



Jedan od specifičnih i vrlo aktualnih problema predstavlja postavljanje solarnih panela za grijanje objekata ili direktnu proizvodnju struje na krov gospodarskih i stambenih zgrada [Slika 5]. Na gospodarskim zgradama sa ravnim krovovima velikih površina solarni paneli moraju se postaviti pod kutom i time predstavljaju dodatnu prepreku strujanju zraka preko zgrade. Kad zapuše snažan vjetar na panelima se stvaraju aerodinamične sile uzgona i otpora koje podižu panele sa krova i mogu ih oštetiti ili čak baciti sa krova [Slika 6]. Zato se i prilikom projektiranja i postavljanja solarnih panela na krovovima zgrada sve više koriste znanja iz primijenjene aerodinamike. Ovaj završni rad bavi se upravo tom problematikom.



**Slika 5. Lijevo: solarni paneli na krovu Londonske gradske vijećnice [5]**

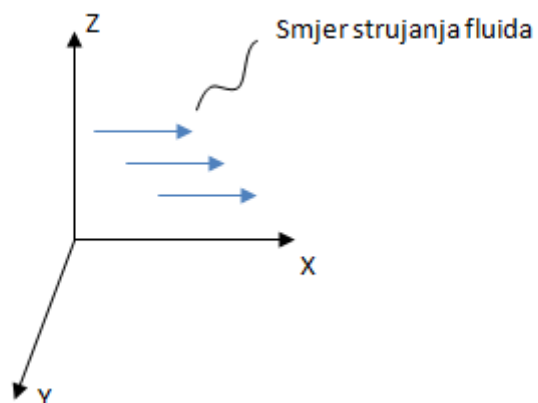
**Slika 6. Desno: primjer solarnih panela na krovu stambenog objekta [6]**



**Slika 7. Lijevo: solarni paneli na ravnom krovu [7]**

**Slika 8. Desno: primjer kako vjetar može oštetiti solarne panele [8]**

Za razmatranja rezultata u ovom radu bitno je definirati orijentaciju referentnog koordinatnog sustava. Referentni koordinatni sustav vezan je za fluid pri čemu je  $x$  os referentnog koordinatnog sustava usmjerena u smjeru strujanja fluida [Slika 9]. Osi  $y$  i  $z$  su okomita na strujanje fluida s tim da je  $z$  os vertikalna.



**Slika 9.** Referentni koordinatni sustav



## 2. AERODINAMIKA

### 2.1. Fizikalni zakoni

Za opis strujanja fluida najprije je potrebno definirati jednu česticu, infitezimalne mase i volumena, tzv. materijalnu česticu. Za tu česticu vrijede prirodni fizikalni zakoni (osnovni zakoni očuvanja) zapisani u matematičkom obliku:

- Zakon očuvanja mase:  $\frac{d}{dt}(\rho \cdot \delta V) = 0$  [10]
- Zakon očuvanja količine gibanja:  $\frac{d}{dt}(\rho \cdot \vec{v} \cdot \delta V) = \delta \vec{F}$  [10]
- Zakon očuvanja momenta količine gibanja (drugi Newtonov zakon)  
 $\frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{v} \cdot \rho \cdot \delta V) = \vec{r} \times \delta \vec{F}$  [10]
- Zakon očuvanja energije (1. zakon termodinamike):  $\frac{d}{dt}(\rho \cdot e \cdot \delta V) = \delta W + \delta Q$  [10]

Gdje su  $t$  – vrijeme,  $\rho$  – gustoća,  $V$  – volumen,  $\vec{v}$  – brzina,  $\vec{F}$  – sila,  $\vec{r}$  – radij vektor,  $e$  – specifična energija,  $W$  – mehanički rad,  $Q$  – toplina.

Za beskonačan broj materijalnih čestica kažemo da one sačinjavaju *materijalni volumen* (MV). Taj materijalni volumen se uvijek sastoji od istih čestica. Matematički operator koji pretvara fizikalne zakone za materijalnu česticu u fizikalne zakone za materijalni volumen naziva se *materijalna derivacija*  $\left(\frac{D}{Dt}\right)$  i glasi:  $\frac{D\blacksquare}{Dt} = \frac{\partial\blacksquare}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\blacksquare$  [10]

Gdje su  $\blacksquare$  – fizikalna veličina,  $\frac{\partial\blacksquare}{\partial t}$  lokalna derivacija tj. promjena veličine  $\blacksquare$  u nekoj točki prostora,  $(\vec{v} \cdot \nabla)\blacksquare$  konvektivna derivacija tj. promjena veličine  $\blacksquare$  zbog promjene položaja čestice u prostoru.

Transformirani fizikalni zakoni sada glase:

- Zakon očuvanja mase:  $\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \cdot dV = 0$
- Zakon očuvanja količine gibanja:  $\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \cdot \vec{v} \cdot dV = \vec{F}_{MV}$   
 Zakon očuvanja momenta količine gibanja  $\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \cdot \vec{r} \times \vec{v} \cdot dV = \vec{M}_{MV}$
- Zakon očuvanja energije (prvi zakon termodinamike):  
 $\frac{D}{Dt} \int_{MV} \rho \cdot e \cdot dV = \dot{W}_{MV} + \dot{Q}_{MV}$

Granice materijalnog volumena, koje opisuje *materijalna površina* (MS), ne koincidiraju sa čvrstim granicama (stijenama objekta) i njihov oblik se mijenja u vremenu pa nam takve nisu od koristi. Zato definiramo proizvoljni volumen čije granice, definirane površinom, djelom koincidiraju sa čvrstim granicama tj. stijenkama objekta a djelom su okomite na smjer strujanja. Taj proizvoljno definirani volumen naziva se *kontrolni volumen* (KV) a površina koja opisuje njegove granice *kontrolna površina* (KS) i u njemu se određuju dinamički i termodinamički učinci fluida.

Da bi matematički opisali fiziku kontrolnog volumena moramo transformirati fizikalne zakone materijalnog volumena. To radimo pomoću *Reynoldsovog transportnog teorema* koji glasi:

$$\frac{D}{Dt} \int_{MV} \mathbf{■} \cdot dV = \int_{KV} \frac{d\mathbf{■}}{dt} \cdot dV + \int_{KP} \mathbf{■} \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad [10]$$

Gdje su  $S$  – površina,  $\vec{n}$  – normalni vektor na površinu.

Transformirani fizikalni zakoni sada glase:

- Zakon očuvanja mase:  $\int_{KV} \frac{d\rho}{dt} \cdot dV + \int_{KP} \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0$ 
  - povećanje mase u vremenu unutar kontrolnog volumena + protok mase (istjecanje/utjecanje mase) kroz granicu kontrolnog volumena (kontrolnu površinu) = nula.
- Zakon očuvanja količine gibanja:  $\int_{KV} \frac{d(\rho \cdot \vec{v})}{dt} \cdot dV + \int_{KP} (\rho \cdot \vec{v}) \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{F}_{KV}$ 
  - promjena količine gibanja u vremenu unutar kontrolnog volumena + protok količine gibanja (istjecanje/utjecanje količine gibanja) kroz granicu kontrolnog volumena (kontrolnu površinu) = rezultatna sila koja djeluje na kontrolni volumen (masena + kontaktna).

$$\vec{F}_{KV} = \int_{KV} \vec{f} \cdot \rho \cdot dV + \int_{KP} \vec{\sigma}_n \cdot dS$$

Gdje su  $\vec{f}$  – vektor masene sile,  $\vec{\sigma}_n$  – tenzor naprezanja.

- Zakon očuvanja momenta količine gibanja

$$\int_{KV} \frac{d(\rho \cdot \vec{r} \times \vec{v})}{dt} \cdot dV + \int_{KP} (\rho \cdot \vec{r} \times \vec{v}) \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{M}_{KV}$$

- promjena momenta količine gibanja u vremenu unutar kontrolnog volumena + protok momenta količine gibanja (istjecanje/utjecanje momenta količine gibanja) kroz granicu kontrolnog volumena (kontrolnu površinu) = moment na kontrolni volumen prouzročen od vanjskih sila.

- Zakon očuvanja energije (prvi zakon termodinamike):

$$\int_{KV} \frac{d(\rho \cdot e)}{dt} \cdot dV + \int_{KP} (\rho \cdot e) \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = \dot{W}_{KV} + \dot{Q}_{KV}$$

- promjena energije u vremenu unutar kontrolnog volumena + protok energije (istjecanje/utjecanje energije) kroz granicu kontrolnog volumena (kontrolnu površinu) = snaga predana sustavu + toplina dodana sustavu

Kroz kontrolni volumen prolaze različiti materijalni volumeni pa da bi mogli koristiti Reynoldsov transportni teorem moramo usvojiti jednu pretpostavku, a to je da u određenom vremenskom trenutku koincidiraju kontrolni i materijalni volumen. Znači u jednom, nama interesantnom, trenutku zaustavimo gibanje materijalnih volumena i u tom trenutku oni koincidiraju sa kontrolnim volumenima. U tom trenutku možemo pomoću transformiranih fizikalnih zakona za kontrolni volumen računati dinamičke i termodinamičke učinke fluida.

## 2.2. Pojednostavljenje jednadžbi

Dobiveni fizikalni zakoni za kontrolni volumen pojednostavljaju naše razmatranje tj. naš sustav kako bi ih mogli brže i točnije riješiti. To radimo usvajanjem pretpostavke da je razmatrano strujanje nestlačivo što nam daje sljedeća pojednostavljenja:

$$\rho = konst. \rightarrow \frac{d\rho}{dt} = 0$$

U fluidu nema spregova sila raspodijeljenih po površini ili unutar kontrolnog volumena (to smo već uzeli u obzir kod definiranja tenzora naprezanja  $\vec{\sigma}_n$  promatravši ga simetričnog) → jednadžba momenta količine gibanja je zadovoljena pa se ne koristi.

Pojednostavljeni fizikalni zakoni sada glase:

- Zakon očuvanja mase:

$$\int_{KV} \frac{d\rho}{dt} \cdot dV + \int_{KP} \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0 \rightarrow \int_{KP} \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = 0 \rightarrow \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{x}} = 0$$

- Zakon očuvanja količine gibanja:

$$\rho \cdot \int_{KV} \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot dV + \rho \cdot \int_{KP} \vec{v} \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{F}_{KV} \quad (1)$$

$$\vec{F}_{KV} = \rho \cdot \int_{KV} \vec{f} \cdot dV + \int_{KP} \vec{\sigma}_n \cdot dS \quad (2)$$

$$\vec{\sigma}_n = \text{tlak} + \text{smik} = -\text{grad}(p) + \mu \cdot \Delta \cdot \vec{v} \quad (3)$$

Gdje su  $\mu$  – dinamička viskoznost,  $\Delta$  – Laplaceov operator.

Član  $\mu \cdot \Delta \cdot \vec{v}$  predstavlja smično naprezanje  $\tau$  definirano Newtonovim zakonom viskoznosti [10].

$$\rho \cdot \left( \int_{KV} \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot dV + \int_{KP} \vec{v} \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dS \right) = \rho \cdot \int_{KV} \vec{f} \cdot dV - \int_{KP} (\text{grad}(p) + \mu \cdot \Delta \cdot \vec{v}) \cdot dS$$

Navier-Stokes jednadžbe:

$$\rho \cdot \left( \frac{dv_x}{dt} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho \cdot f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{dv_y}{dt} + v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \rho \cdot f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{dv_z}{dt} + v_x \cdot \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho \cdot f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

U nestlačivom strujanju zakon očuvanja energije opisuje temperaturno polje koje je konstantno pa se gibanje fluida opisuje samo zakonom očuvanja mase i zakonom očuvanja količine gibanja. Kako u numeričkim simulacijama ne razmatram energijsku jednadžbu nju ovdje nećemo raspisivati.

### 2.3. Machov broj (Ma)

Machov broj je odnos brzine tijela i brzine zvuka u istom sredstvu.

$$Ma = \frac{v_i}{v_z}$$

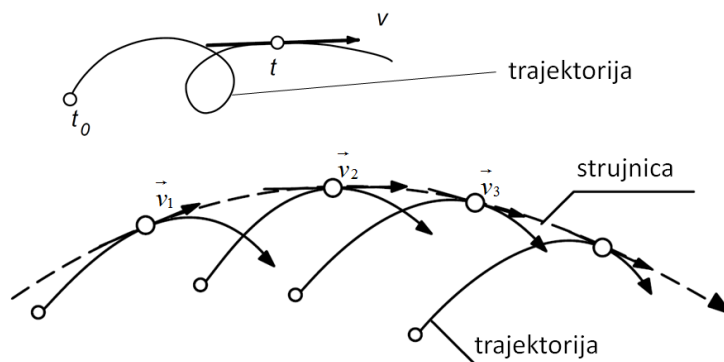
Gdje su  $v_i$  – brzina tijela,  $v_z$  – brzina zvuka.

U aerodinamici je to sredstvo zrak i brzina zvuka u atmosferi pri temperaturi od 15°C iznosi 340,3 m/s. Kod svih strujanja zraka, gdje je Machov broj manji od 0,3, temperaturno polje je približno konstantno te se strujanje može promatrati kao nestlačivo.

Zbog toga se u tim strujanjima (gdje je  $Ma \leq 0,3$ ) gotovo nikad ne koristi zakon očuvanja energije. U ovom radu brzine strujanja zraka daleko su ispod brzine zvuka ( $Ma \leq 0,3$ ) pa nam je opravdana usvojena pretpostavka da je naše strujanje nestlačivo. [11]

## 2.4. Vrste strujanja

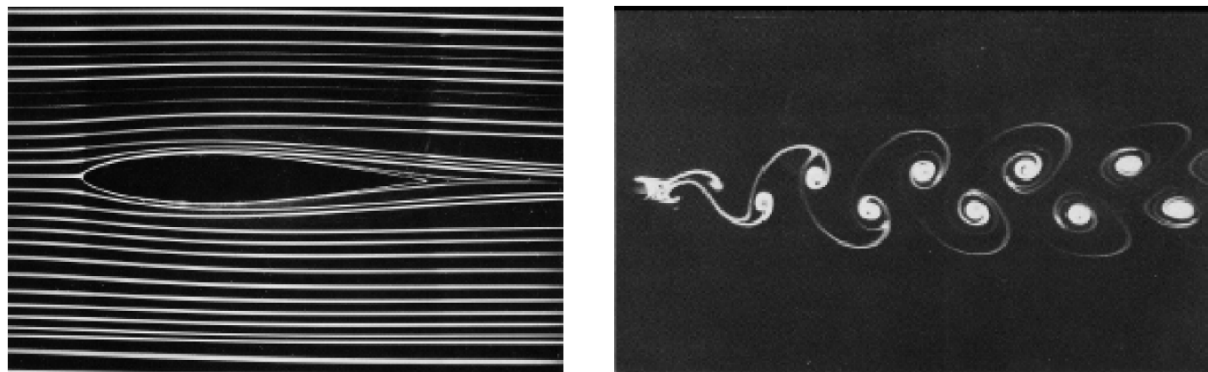
Strujnice su zamišljene krivulje kojima se u svakoj točki smjer tangente poklapa sa smjerom vektora brzine, te se one ne mogu sjeći [Slika 10]. Strujnice prikazuju trenutnu sliku strujanja. S druge strane, trajektorija je prostorna krivulja koju opisuje čestica fluida svojim gibanjem u protoku vremena. Trajektorija dakle prikazuje put pojedine čestice u različitim vremenskim trenucima, zato se trajektorije mogu sjeći.



**Slika 10. Trajektorije i strujnice [12]**

Strujanje fluida se može podijeliti i na laminarno i turbulentno. Laminarno strujanje [Slika 11 lijevo] je ono strujanje kod kojega su strujnice paralelne i možemo reći da one dijele promatrani fluid na slojeve (lamelle) koji se ne miješaju i strujanje možemo u potpunosti opisati sa zakonom očuvanja mase i zakonom očuvanja količine gibanja.

Turbulentno strujanje [Slika 11 desno] je kaotično gibanje čestica gdje dolazi do stvaranja vrtloga i navedeni slojevi (lamelle) se međusobno miješaju. Turbulentno strujanje također možemo opisati s dva navedena zakona kao i kod laminarnog strujanja ali je potrebna i jedna jednačba, tzv. model turbulencije, koja će opisati utjecaj turbulencije na polje strujanja i to prvenstveno oko stijenki opstrujavanog objekta što je nama najzanimljivije.



**Slika 11. Lijevo: Laminarno strujanje oko aerodinamičnog profila (lijevo) [11]**

**Desno: Turbulentno strujanje oko beskonačno dugog valjka (desno) [11]**

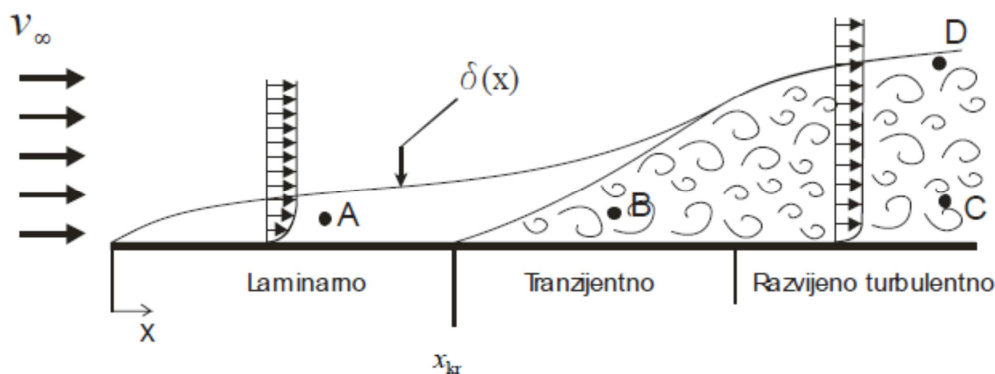
Za opis utjecaja turbulencije na polje strujanja postoji više modela npr. Spalart-Allmaras model, k- $\epsilon$  model, k- $\omega$  model, itd.. U ovom razmatranju korišten je Spalart-Allmaras model koji je prvenstveno napravljen i korišten za zrakoplovstvo ali jako dobro opisuje strujanje oko aerodinamični neoblikovanih tj. tupih tijela. [13]

Granični sloj (*eng. Boundary layer, njem. Grenzschicht*) je tanak sloj fluida oko tijela gdje prevladavaju viskozne sile zbog kojih brzina fluida raste od  $0 \frac{m}{s}$  na površini tijela do lokalne brzine optjecanja neviskoznom strujanjem. Na površini tijela fluid je „zaljepljen“ (*eng. no-slip boundary condition*) za tijelo i njegova relativna brzina u odnosu na tijelo iznosi  $0 \frac{m}{s}$ , a odmicanjem od tog sloja relativna brzina slojeva raste do brzine strujanja fluida. Što brže brzina strujanja uz stijenku dosegne lokalnu brzinu neporemećene struje to će granični sloj biti tanji i manji će biti njegov utjecaj na okolno strujanje.

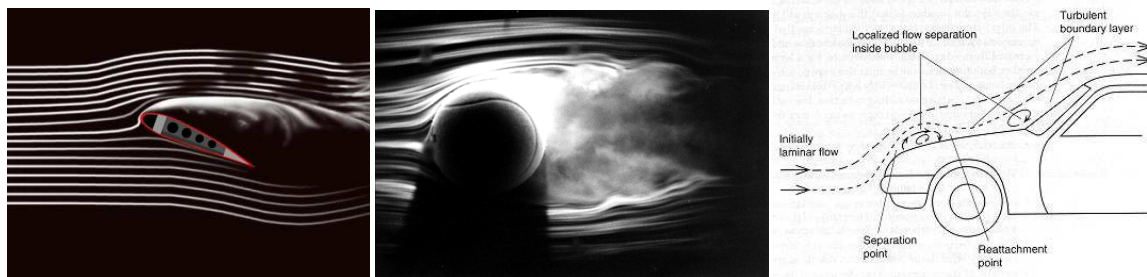
Razlikujemo dvije vrste graničnih slojeva [Slika 12]:

- Laminarni – laminarno strujanje fluida od „zaljepljenog“ sloja do vanjskog sloja.
- Turbulentni – iznad „zaljepljenog“ sloja na stijenci tijela nalazi se turbulentni sloj gdje je turbulentno (vrtložno) strujanje.

Kada granični sloj dosegne preveliku debljinu ili kada strujanje uz stijenku nije u mogućnosti pratiti naglu promjenu geometrije dolazi do pojave odvajanja graničnog sloja od stjenke (*eng. Flow separation, njem. Strömungsablösung*) [Slika 13].



Slika 12. Granični sloj uz ravnu ploču [14]



Slika 13. Primjeri odvajanja graničnog sloja prilikom opstrujavanja tijela [9]

## 2.5. Sile na tijelo

Djelovanje fluida na uronjeno tijelo možemo zamijeniti jednom rezultantnom silom u težištu tijela i jednim rezultantnim momentom oko težišta tijela. Tu rezultantnu silu i moment možemo razložiti na tri komponente [15]:

- Rezultantna sila:
  - U smjeru x osi je sila otpora i označava se sa  $F_D$  (eng. *Drag*)
  - U smjeru z osi je sila uzgona i označava se sa  $F_L$  (eng. *Lift*)
  - U smjeru y osi je bočna sila
- Rezultantni moment:
  - Oko x osi je moment valjanja
  - Oko z osi je moment skretanja
  - Oko y osi je moment propinjanja

Sila otpora gibanja tijela kroz fluid (sila  $F_D$ ) sastoji se od dvije komponente:

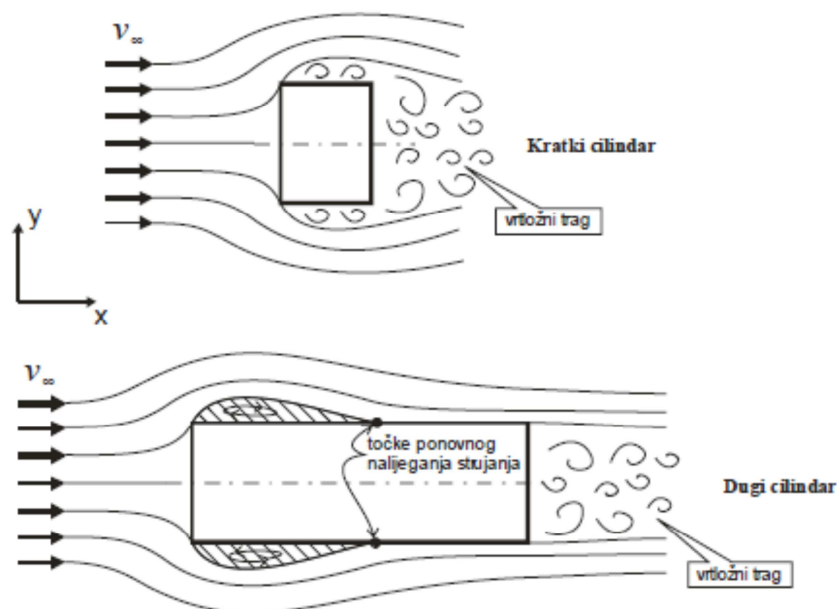
- Sila trenja kao posljedica komponente smičnog naprezanja već ranije definiranog tenzora naprezanja  $\vec{\sigma}_n$ .
- Tlačna sila kao posljedica normalne komponente naprezanja već ranije definiranog tenzora naprezanja  $\vec{\sigma}_n$

U aerodinamici razlikujemo dvije vrste tijela:

- Aerodinamični oblikovana tijela (eng. *Streamlined bodies*)
- Tupa tijela (eng. *Bluff bodies*)

Aerodinamični oblikovana tijela su tijela kod kojih je sila otpora (sila  $F_D$ ) prvenstveno posljedica sile trenja i kod njih je opstrujavanje općenito bez vrtloga npr. krilo aviona. Tlačna sila je zanemariva u odnosu na silu trenja.

Aerodinamični tupa tijela su tijela kod kojih je dominantna tlačna sila, dok je sila trenja zanemariva. Karakteristika tupih tijela je da im je dužina u smjeru strujanja manja ili jednaka dužini okomitoj na strujanje fluida [16] što ima za posljedicu da relativno kasno dolazi do ponovnog nalijeganja graničnog sloja tj. da u strujanju oko tijela postoje veliki vrtlozi [Slika 14].

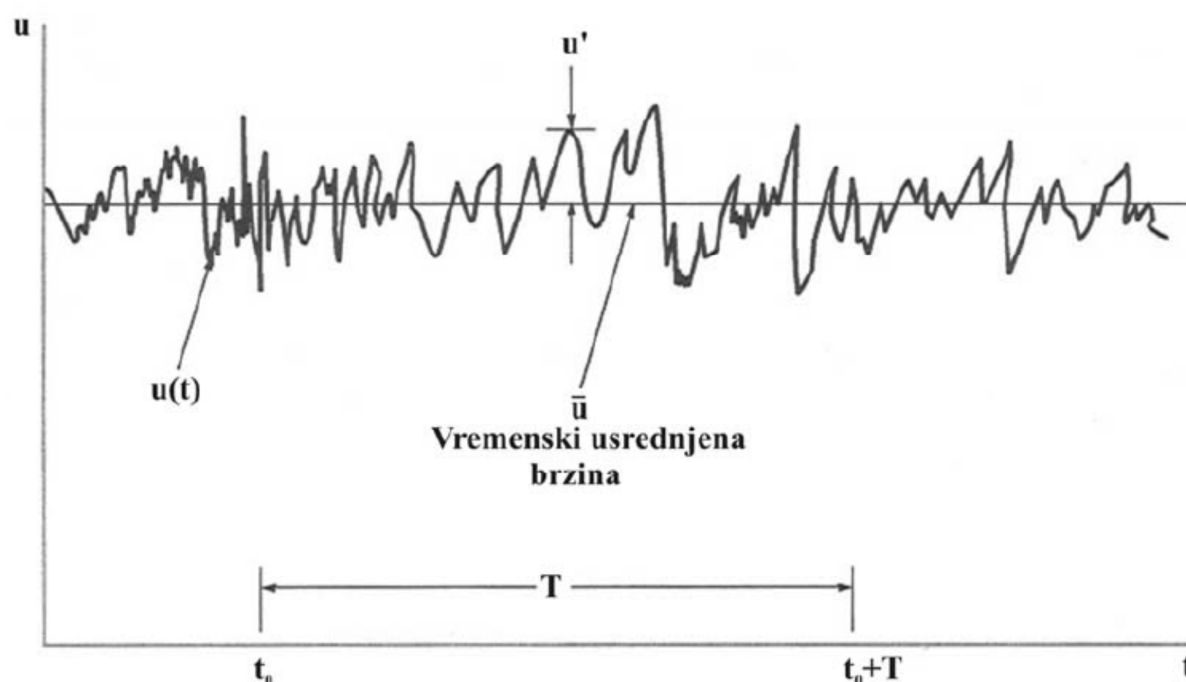


**Slika 14. Odvajanje i ponovno nalijeganje graničnog sloja [14]**

Zbog svih navedenih pojava pri opstrujavanju tupih tijela nastaju velike fluktuacije fizikalnih veličina u prostoru i vremenu. Ako je promjena strujanja s vremenom velika, onda je opstrujavanje tupih tijela općenito nestacionarno tj. vremenski promjenjivo. Radi toga je prilikom računanja aerodinamičnih sila za takve slučajeve važno vršiti nestacionarne simulacije. U drugim slučajevima, kada se slika strujanja ne mijenja izrazito s vremenom, za slučajeve opstrujavanja tupih tijela s velikim vrtlozima biti će dovoljne i stacionarne simulacije.

Da bi dobili konačne vrijednosti sila kod nestacionarnih strujanja vrši se vremensko usrednjavanje [Slika 15].





Slika 15. Vremenski usrednjena brzina pri turbulentnom strujanju [10]

## 2.6. Reynoldsov broj (Re)

Podjela na laminarno i turbulentno strujanje vrši se pomoću tzv. Reynolds-ovog broja, koji predstavlja omjer sila inercije i sila viskoznosti u strujanju. Sile inercije su posljedica mase i brzine fluida a sile viskoznosti su posljedica sila među česticama fluida tj. sile trenja među susjednim slojevima (lamelama) u fluidu koji struje različitim brzinama.

Kada inercijske sile postanu veće od viskoznih sila tj. kada Reynoldsov broj prijeđe kritičnu vrijednost, strujanje postaje turbulentno.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot H_{ref}}{\mu} \quad [14]$$

Gdje su  $v$  – brzina fluida,  $H_{ref}$  – referentna dužina.

## 2.7. Aerodinamični koeficijenti

Da bi mogli usporediti aerodinamične sile među tijelima različitih oblika i veličina koristimo bezdimenzijske koeficijente. Ti koeficijenti pokazuju veličinu sila u odnosu na veličinu referentne površine tj. u odnosu na veličinu one površine koja je prvenstveno zaslužna za tu silu (*vidi 2.5. Sile na tijelo*), što znači da su ti koeficijenti neovisni o dimenzijama tijela.

Dva najbitnija koeficijenta su:

- Aerodinamični koeficijent otpora  $C_D$  (eng. *Drag coefficient*, njem. *Widerstandskoeffizient*):

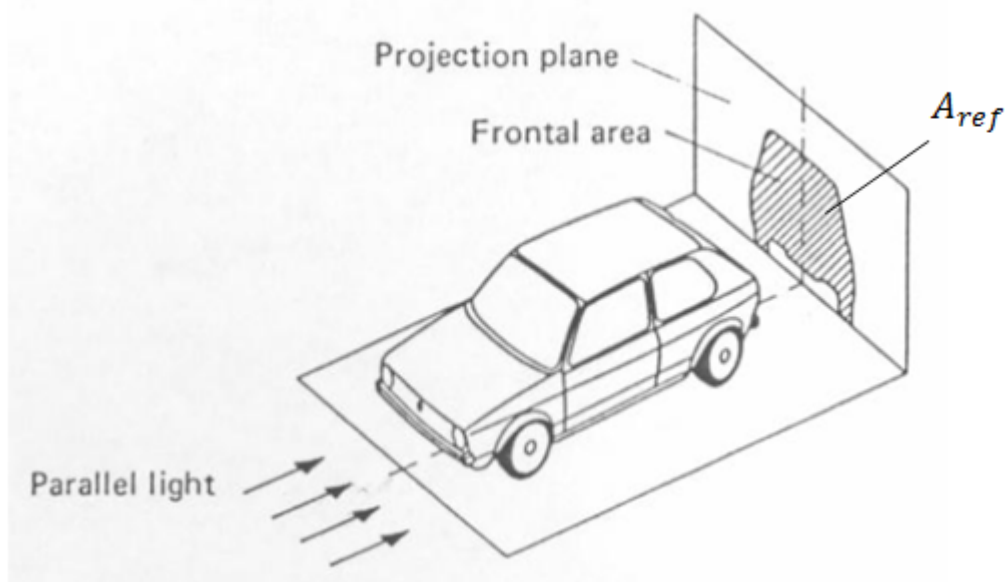
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} v_{\infty}^2 \cdot A_{ref}} \quad [10]$$

- Aerodinamični koeficijent uzgona  $C_L$  (eng. *Lift coefficient*, njem. *Auftriebskoeffizient*):

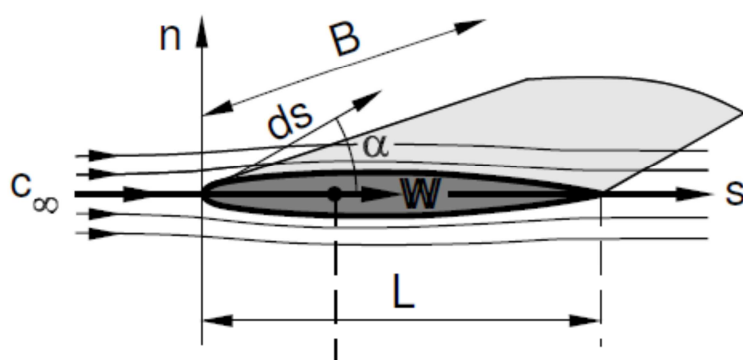
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} v_{\infty}^2 \cdot A_{ref}} \quad [10]$$

Gdje su  $\rho_{\infty}$  – gustoća fluida neporemećene struje,  $v_{\infty}$  – brzina fluida neporemećene struje,  $A_{ref}$  – referentna površina.

Referentna površina je ona površina tijela koja je glavni uzrok nastajanja rezultantne sile na uronjeno tijelo. Za tupa tijela [Slika 16] ta površina je projekcija tijela na ravninu okomitu na vektor brzine nastrujavanja fluida (frontalna površina), a za aerodinamični oblikovana tijela [Slika 17] ta površina je „kvašena površina“ tijela tj. površina tijela paralelna sa vektorom brzine nastrujavanja tj. površina na kojoj se ostvaruje trenje (površina u tlocrtu).



Slika 16. Opstrujavanje aerodinamični neoblikovanog tijela [18]



Slika 17. Opstrujavanje aerodinamični oblikovanog tijela,  $A_{ref} = L \cdot B$  [17]

### 3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA (CFD)

Računalna dinamika fluida (*engl. Computational Fluid Dynamics - CFD*) je grana mehanike fluida kojoj je glavni cilj izrada računalnih modela kojima se matematički opisuje strujanje fluida [24].

CFD se u većini slučajeva temelji na Navier-Stokesovim jednažbama, koje definiraju općenito strujanje homogenog fluida. Izostavljanjem nekih komponenti ili pretpostavljanjem da su pojedina fizikalna svojstva konstantna u vremenu možemo pojednostaviti Navier-Stokesove jednažbe do te razine, da ih je moguće analitički riješiti npr. statika fluida se može veoma točno riješiti analitičkim metodama. CFD se primjenjuje za rješavanje problema gdje tolika pojednostavljenja (da bi koristili analitičke metode) nisu moguća.

Glavni elementi CFD-a su [19]:

- Diskretizacija prostora strujanja fluida tj. CFD mreže – prostor se dijeli u skup konačnih volumena tj. prostor oko objekta se opisuje konačnim volumenima.
- Diskretizacija jednažbi – pridruživanje jednažbi fizikalnih zakona konačnim volumenima u mreži, tj. pretvaranje diferencijalnih jednažbi u algebarske jednažbe
- Rješavanje algebarskih jednažbi iterativnim metodama (ponavljanje velikog broja relativno jednostavnih koraka) pomoću računala
- Analiza rezultata

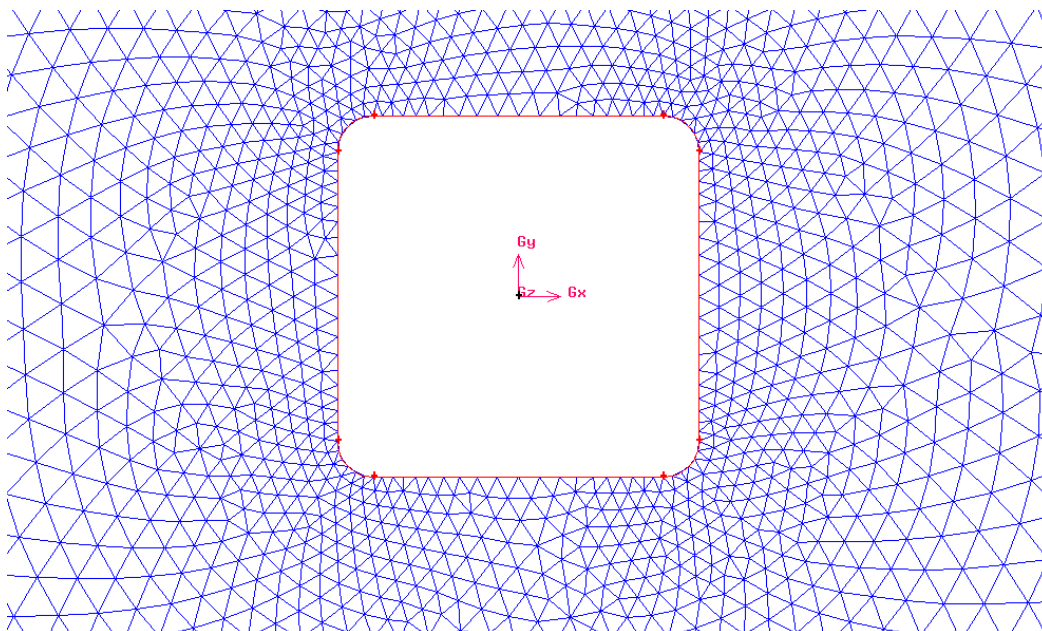
#### 3.1. Opis alata

U ovom radu je korišten komercijalni CFD programski paket Fluent 6.2.16. [27]

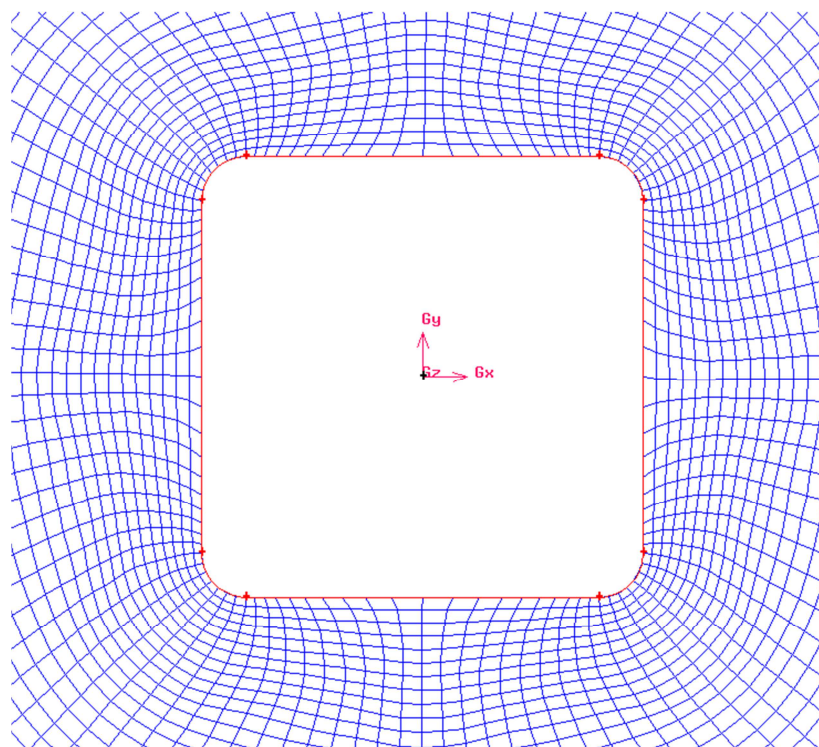
Fluent pruža mogućnosti modeliranja širokog raspon nestlačivih i stlačivih, laminarnih i turbulentnih problema strujanja fluida. U radu je simulirano 2-D strujanje zraka pri relativno velikim brzinama vjetra od  $v = 160 \frac{km}{h} = 44,44 \frac{m}{s}$ , što za razmatrane geometrije velikih zgrada daje velike Reynoldsove brojeve reda veličine  $Re = 35 \cdot 10^6$ . Tako veliki Re-brojevi znače, da je strujanje od samog početka turbulentno.

Fluent može koristiti tri vrste mreža [20]:

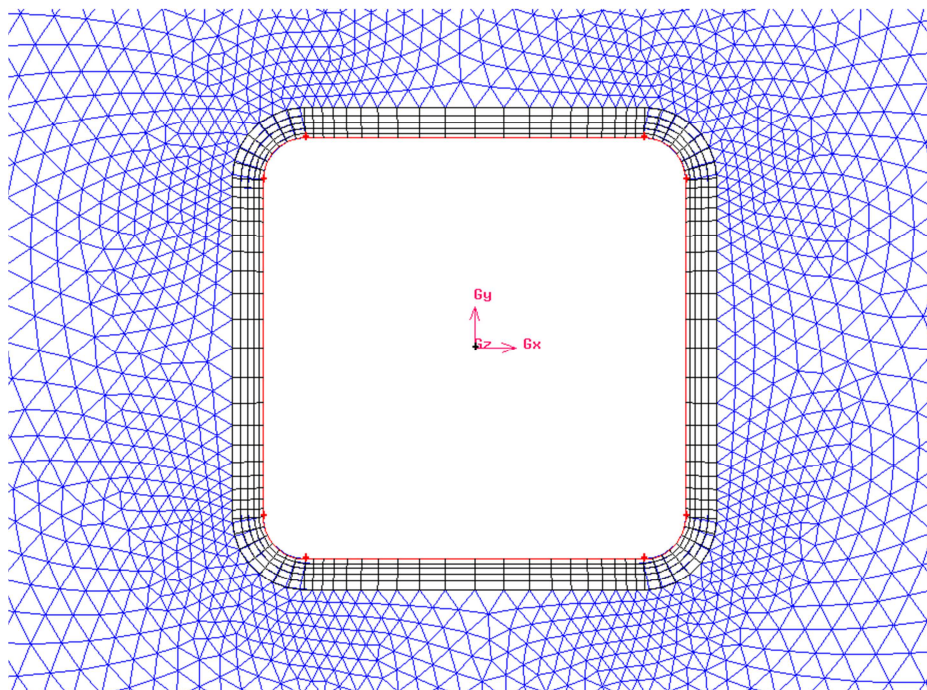
- Nestrukturiranu – sastoji se samo od trokutnih elemenata [Slika 18]
- Strukturiranu – sastoji se samo od četverokutnih elemenata [Slika 19]
- Hibridnu – sastoji se od strukturiranih i nestrukturiranih elemenata [Slika 20]



**Slika 18. Nestrukturirana mreža**



**Slika 19. Strukturirana mreža**



**Slika 20. Hibridna mreža**

Zbog toga što se četverokutni elementi mogu pozicionirati da im je rub okomit na vektor strujanja oni daju točnije rezultate od trokutnih elemenata uz stijenku tijela [21], ali je izrada strukturiranih mreža složenija od izrade nestrukturiranih mreža.

Hibridna mreža sadrži pozitivne karakteristike nestrukturirane i strukturirane mreže. Na mjestima gdje su veliki gradijenti fizikalnih veličina i gdje su potrebna točnija rješenja (npr. granični sloj) postavlja se fina mreža sa četverokutnim elementima, a u ostalom dijelu polja strujanja postavljaju se trokutni elementi čija veličina ovisi također o gradijentima fizikalnih veličina u tom dijelu polja. U ovom radu korištene su nestrukturirane i hibridne mreže.

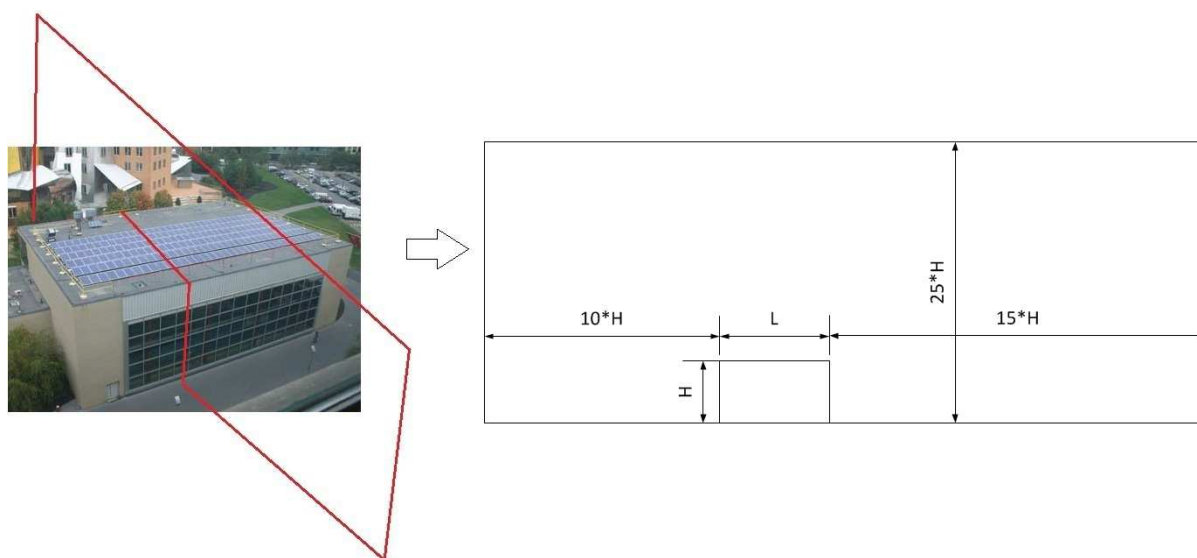
Za simuliranje turbulencije Fluent raspolaže s nekoliko različitih modela od kojih je u ovome radu korišten tzv. Spalart-Allmarasov model [28].

## 4. SIMULACIJE

### 4.1. Geometrije

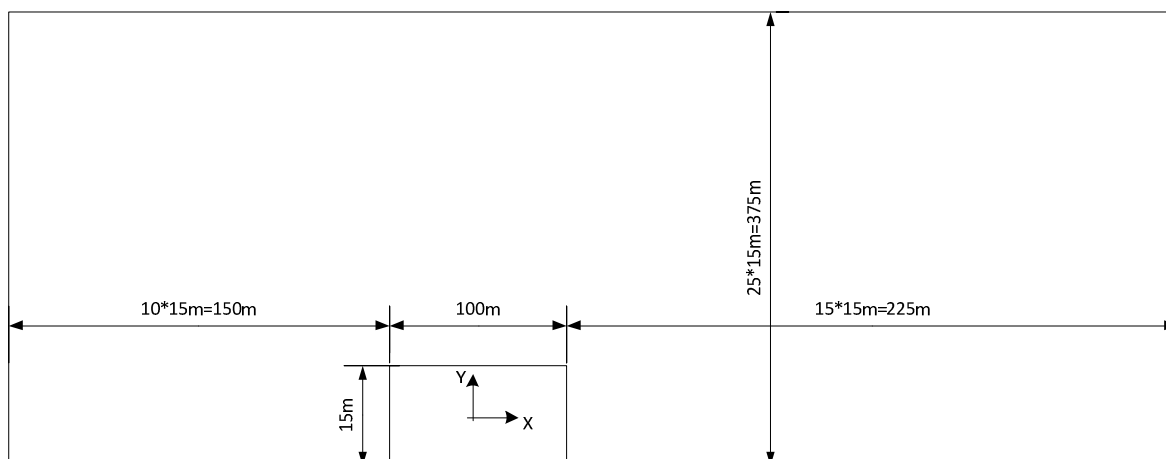
Geometrija oko koje se ispituje strujanje vjetra definirana je u zadatku. Uzet je 2-D presjek gospodarske zgrade (tvornička hala, sportska dvorana, skladište, itd.) sa ravnom krovom na kojem su postavljena 34 reda solarnih panela [Slika 21]. Za tu geometriju je napravljeno 15 simulacija, počevši od najjednostavnije geometrije (generički oblik zgrade bez panela na krovu), do detaljne geometrije (zgrada sa montiranim solarnim panelima na postoljima).

Domena strujanja je određena prema preporukama iz znanstvenih članaka u kojima je rađena simulacija strujanja oko objekata u urbanim sredinama [22], [23], [24], [25].



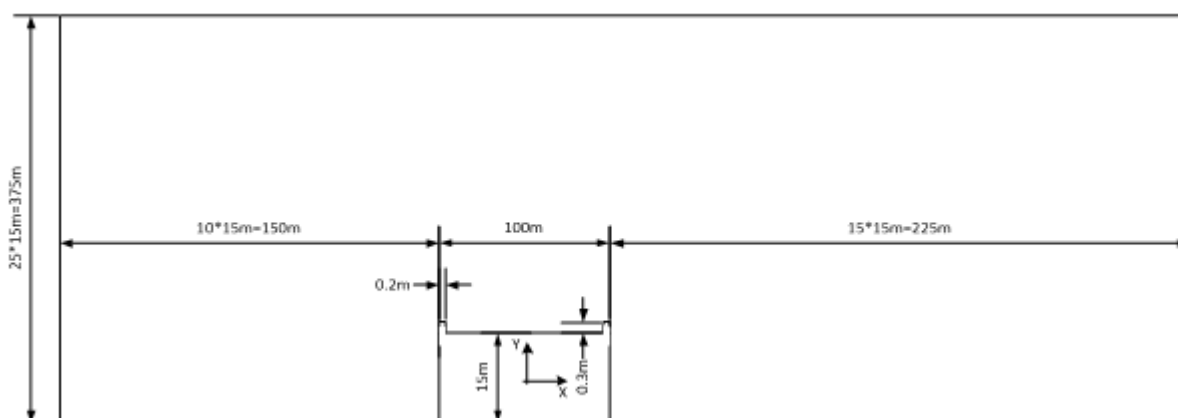
Slika 21. Domena strujanja [26]

Simulacija A je napravljena za zgradu s potpuno ravnim krovom bez panela [Slika 22]. Simulacija B ima jednaku geometriju kao i simulacija A, a razlikuje se samo u kvaliteti CFD mreže, kao što je navedeno u poglavlju 4.2 *Mreže*. Cilj ove dvije simulacije je ispitati općenito strujanje oko zgrade, bez detalja na krovu, tj. kakva je karakteristika strujanja vjetra preko krova bez prisutnosti solarnih panela.



Slika 22. Geometrije A i B

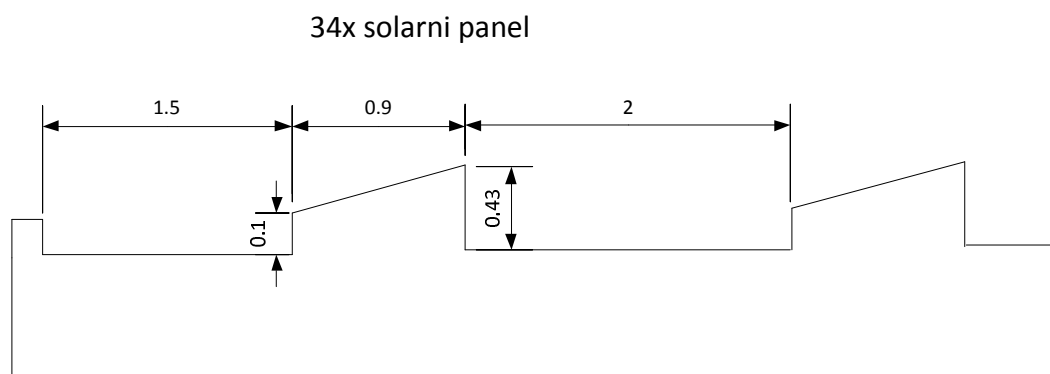
Razlika geometrija simulacije C [Slika 23] i simulacija A i B je u tome što su dodana uzvišenja na rubovima zgrade. Takva geometrija odgovara presjeku stvarne gospodarske zgrade, bez prisutnosti solarnih panela na krovu. Usporedba rezultata iz simulacija A, B i C će pokazati kakav je utjecaj uzvišenja na rubovima zgrade na općenito strujanje preko krova.



Slika 23. Geometrija C

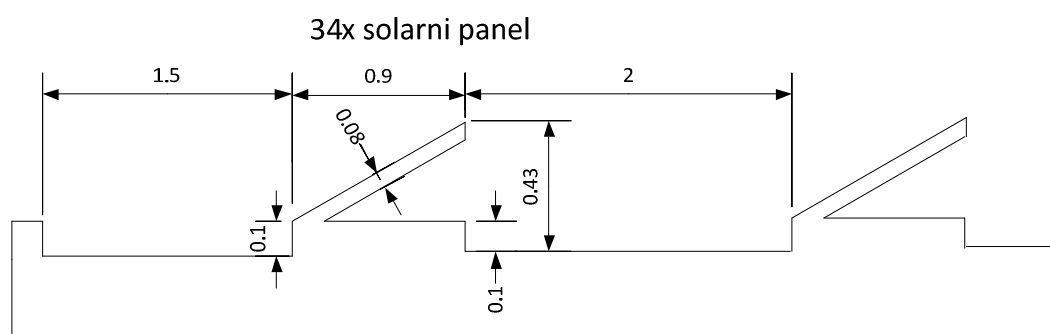
Geometrije simulacija D, E i F [Slika 24] su jednake a baziraju se na geometriji simulacije C. Na geometriju simulacije C je dodano 34 reda solarnih panela. Razmak između redova panela iznosi 2m, dok je udaljenost od ruba zgrade prvog/zadnjeg panela 1,5m.





Slika 24. Geometrije D, E i F

Geometrije simulacija G, H i I [Slika 25] su također jednake i baziraju se na geometriji simulacija D, E i F samo što je ovdje detaljnija geometrija solarnih panela, tj. dopušteno je da zrak ulazi u prostor između panela i postolja sa balastom.



Slika 25. Geometrije G, H i I

## 4.2. Mreže

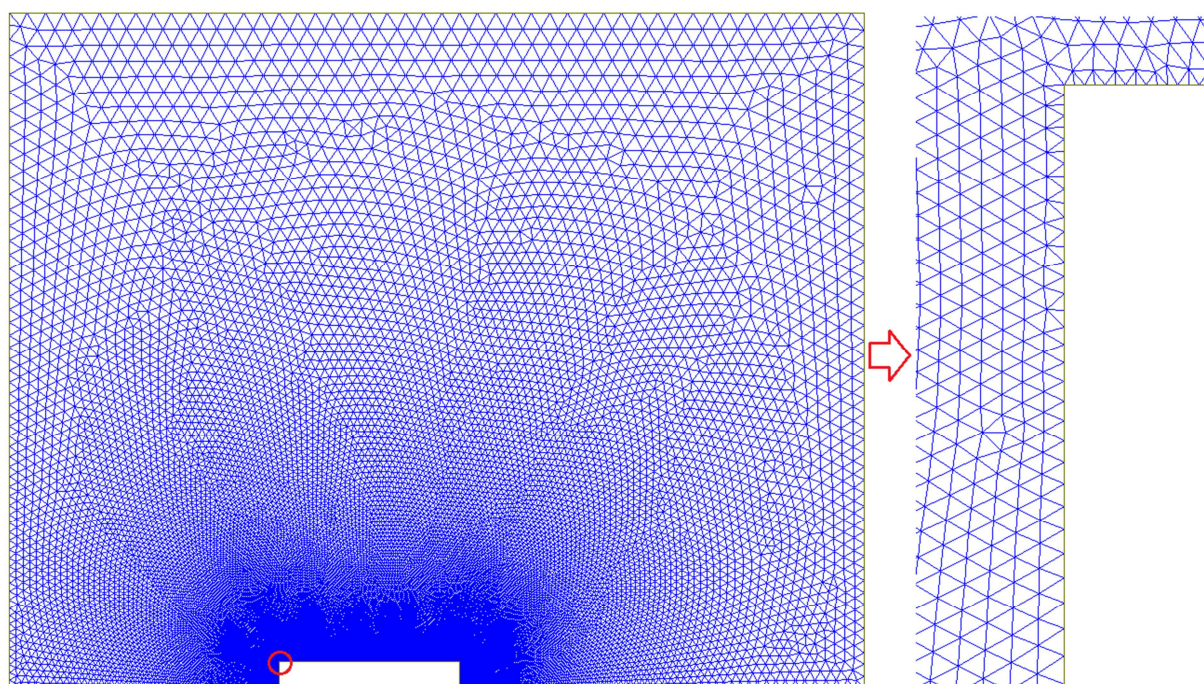
Mreže koje su korištene u ovom radu su nestrukturirane i hibridne. U svim mrežama su rubovi zgrade podijeljeni na jednak broj elemenata sa jednakim razmakom između čvorova kako bi usporedba rezultata bila objektivnija.

Područja gdje je na malim udaljenostima gradijent fizikalnih svojstava veliki, veći je broj elemenata i manje su površine tj. mreža je gušća da bi dobili točnije rezultate. Ta područja se nalaze uz stjenke tj. zidove i podloge. Kod hibridnih mreža na tim mjestima se stavljaju strukturirani elementi, kako bi se što bolje simulirao granični sloj.

Debljina atmosfernog graničnog sloja (*eng. atmosphere boundary layer – ABL*) također je određena prema preporukama iz već navedenih znanstvenih članaka [22], [23], [24], [25] i iznosi oko 1m iznad površine zemlje za urbane sredine.

**Tablica 1. Mreža simulacije A**

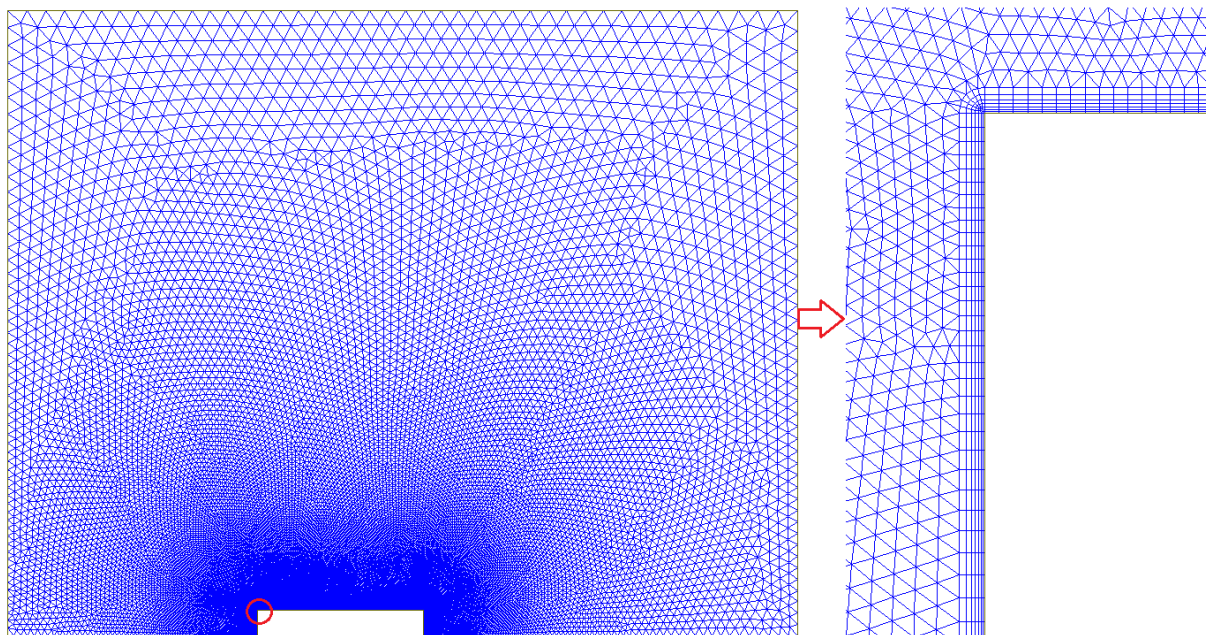
Tip mreže	Nestrukturirana mreža
Debljina graničnog sloja [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,00285
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	54,385
Broj elemenata	88244



**Slika 26. Mreža simulacije A**

**Tablica 2. Mreža simulacije B**

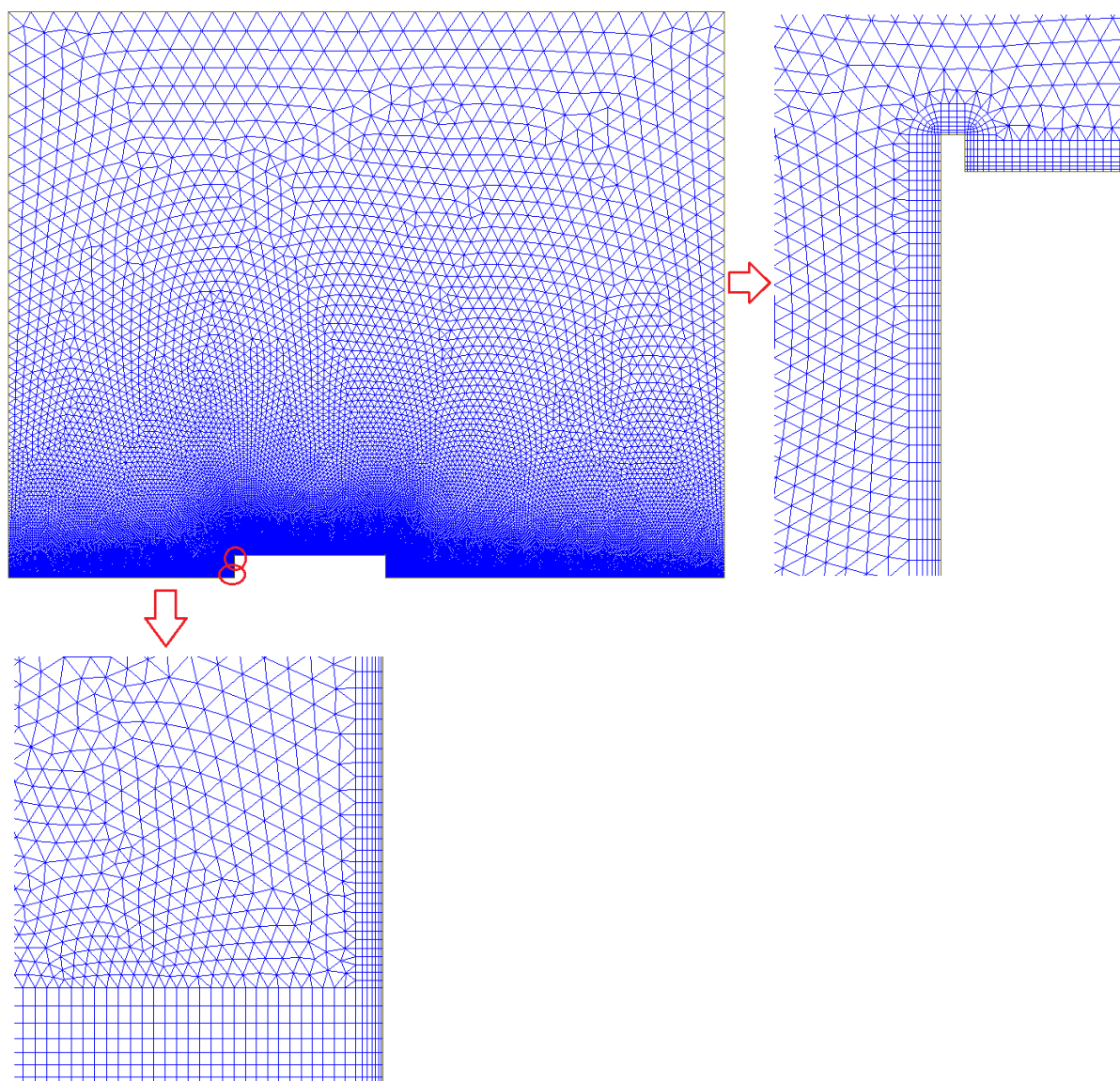
Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,255
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,00047
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	55,548
Broj elemenata	93753



Slika 27. Mreža simulacije B

Tablica 3. Mreža simulacije C

Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,255
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	0,95
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,0004
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	123,176
Broj elemenata	104100

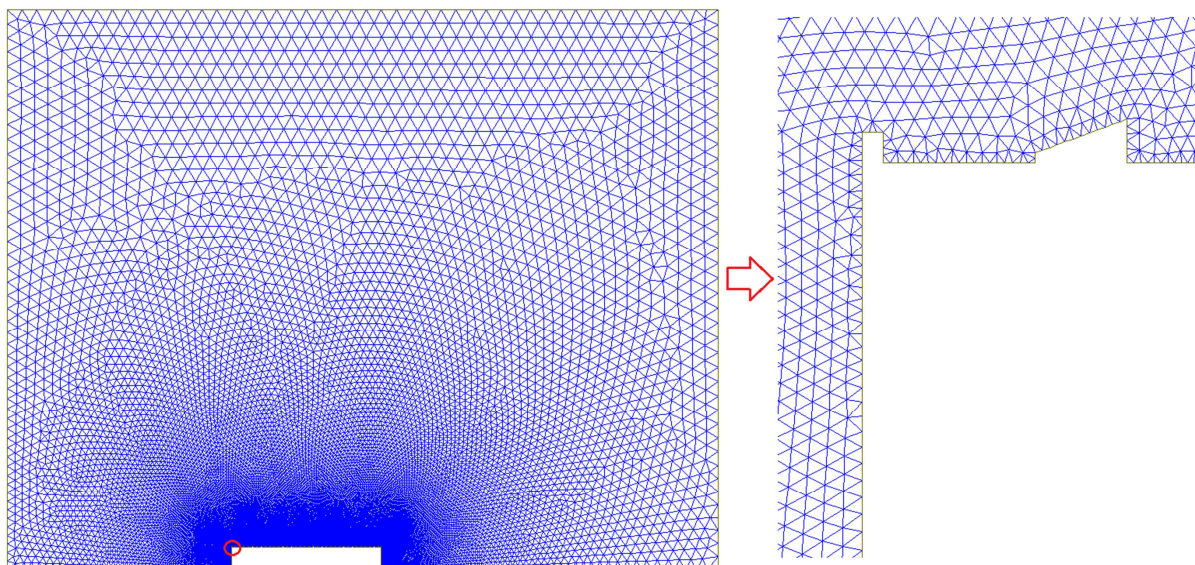


Slika 28. Mreža simulacije C

Tablica 4. Mreža simulacije D

Tip mreže	Nestrukturirana mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	/
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,00124
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	54,175
Broj elemenata	87582



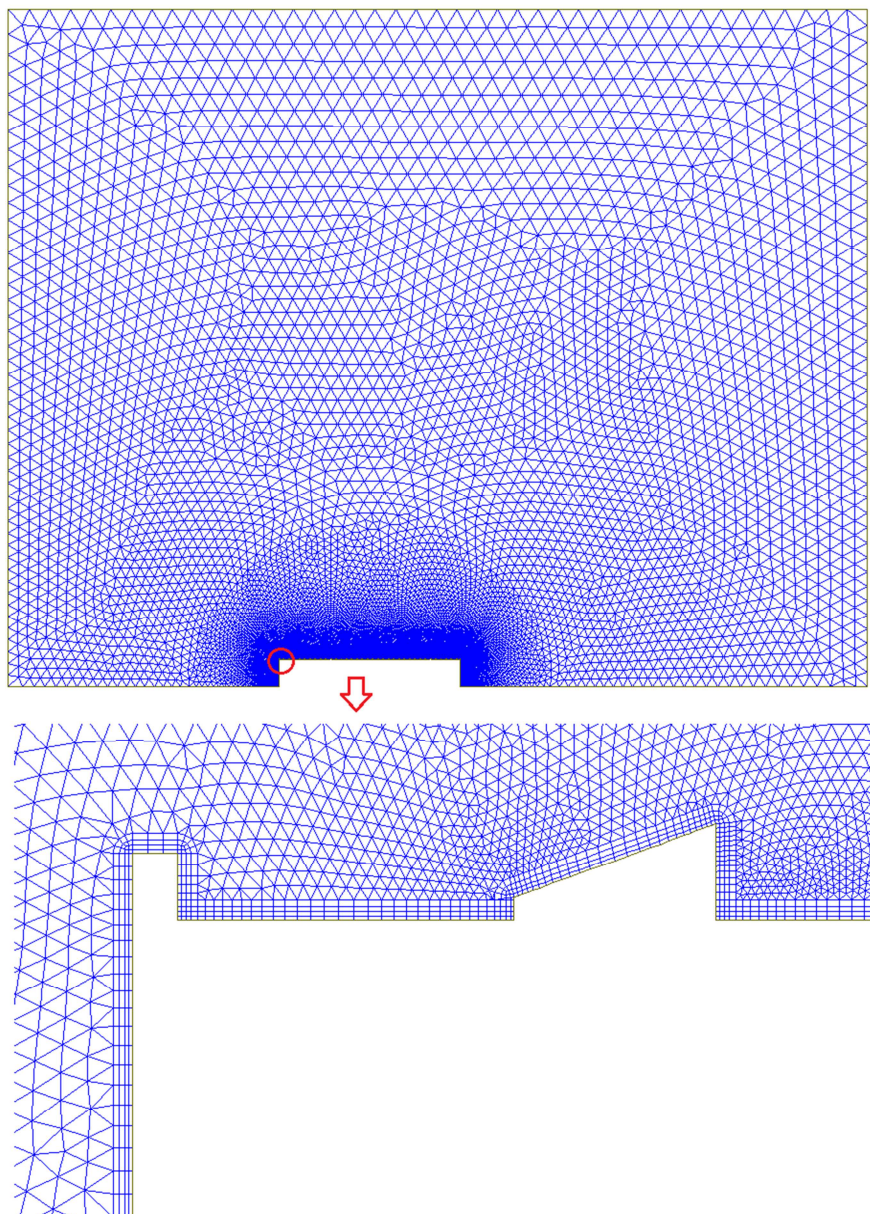


Slika 29. Mreža simulacije D

Tablica 5. Mreža simulacije E

Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,088
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,00002
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	69,52
Broj elemenata	115508

Razlog smanjenja visine graničnog sloja kod simulacije E i svih sljedećih simulacija je složenost geometrije na krovu.

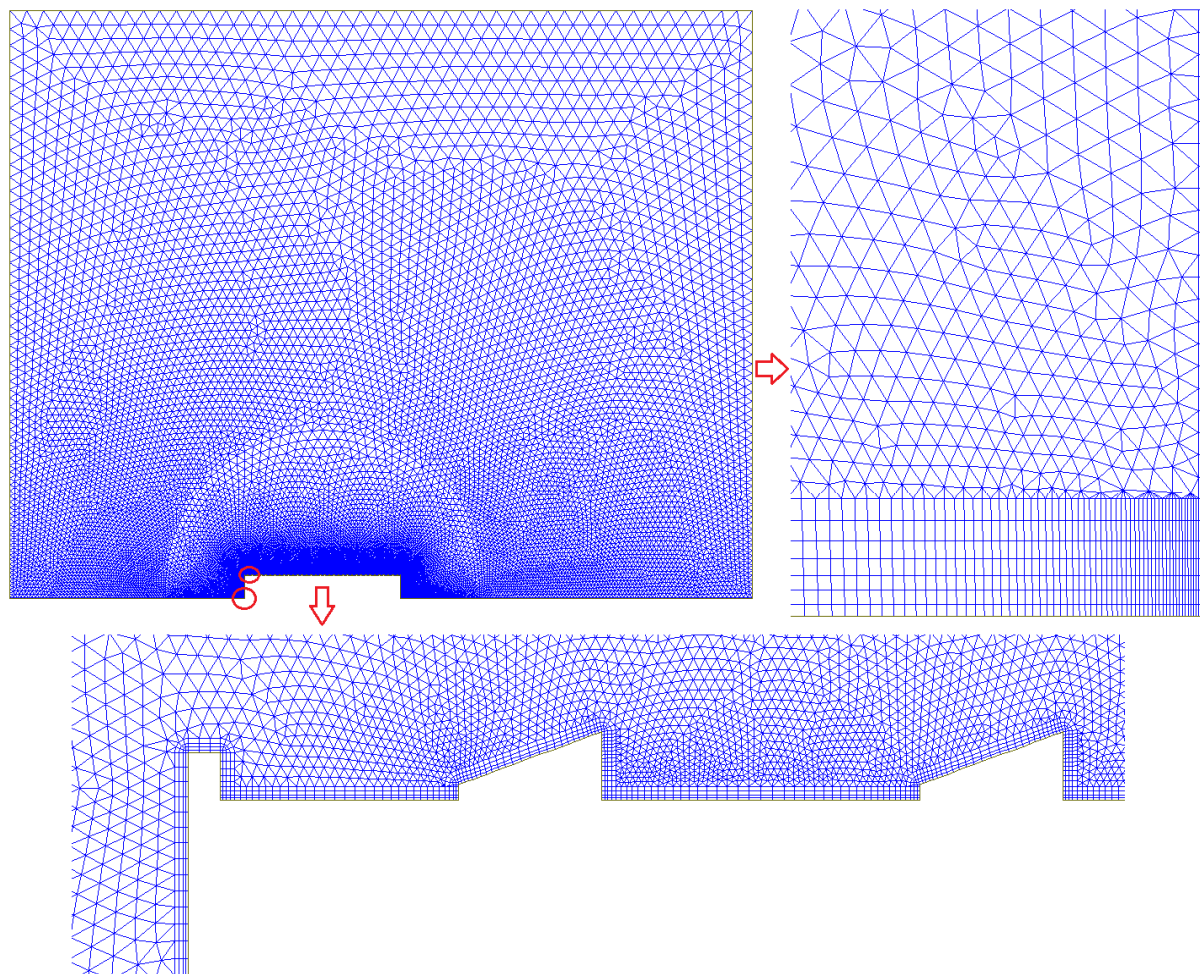


Slika 30. Mreža simulacije E

Tablica 6. Mreža simulacije F

Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,088
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	0,95
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,00002
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	61,373
Broj elemenata	129105

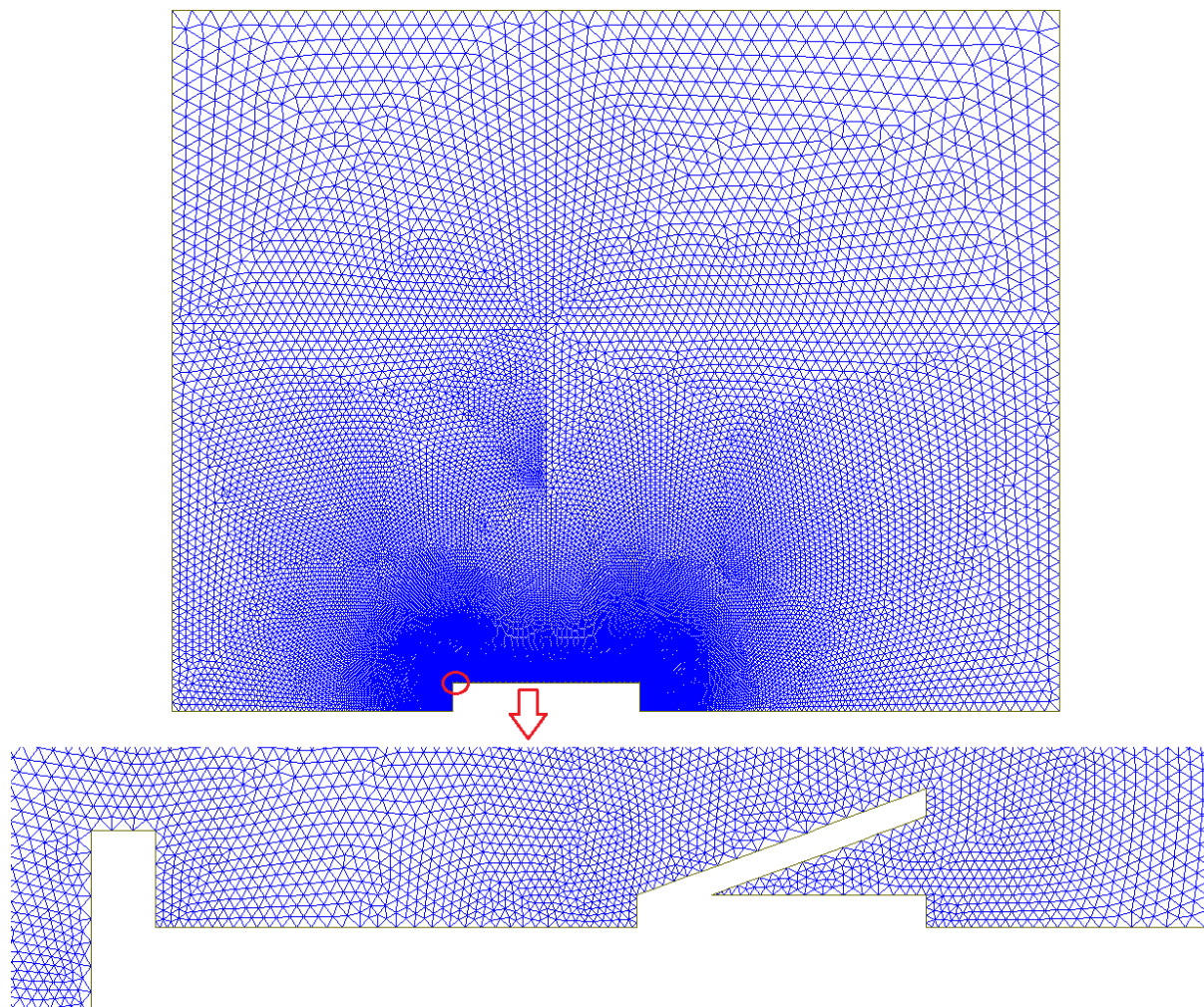




Slika 31. Mreža simulacije F

Tablica 7. Mreža simulacije G

Tip mreže	Nestrukturirana mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	/
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,0000463
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	66,76
Broj elemenata	313462



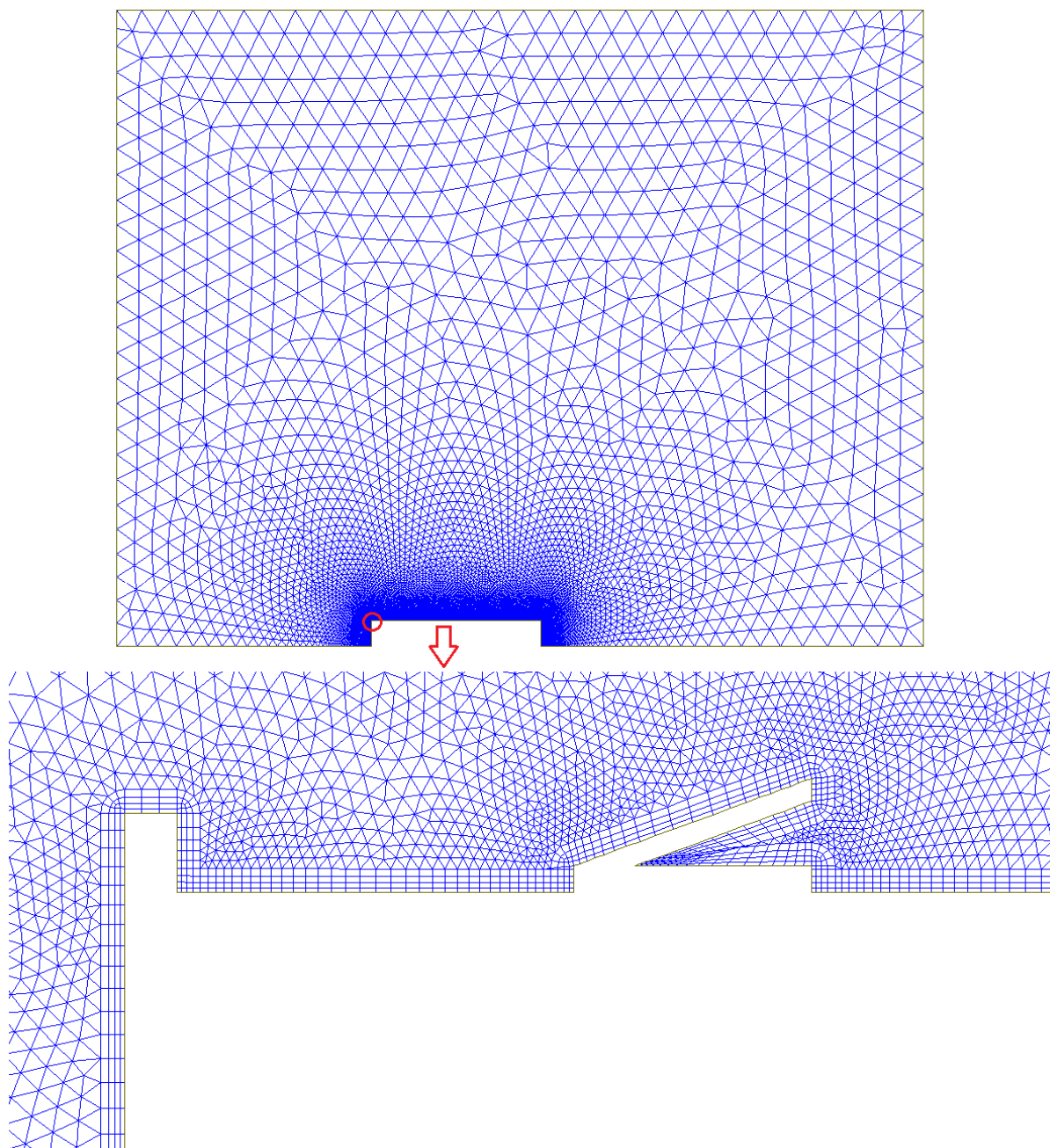
Slika 32. Mreža simulacije G

Tablica 8. Mreža simulacije H

Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,088
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	/
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,0000214
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	143,17
Broj elemenata	118770

Razlog relativno naglog prorjeđivanja mreže od simulacije H na dalje s obzirom na prijašnje mreže je to što se već nakon 2/3 visine zgrade (H) strujanje smiruje tj. gradijenti postaju zanemarivi udaljavanjem od zgrade, pa u tom području nema ni potrebe za mrežom bolje kvalitete. To se može vidjeti u rezultatima simulacija u poglavlju 5. REZULTATI.

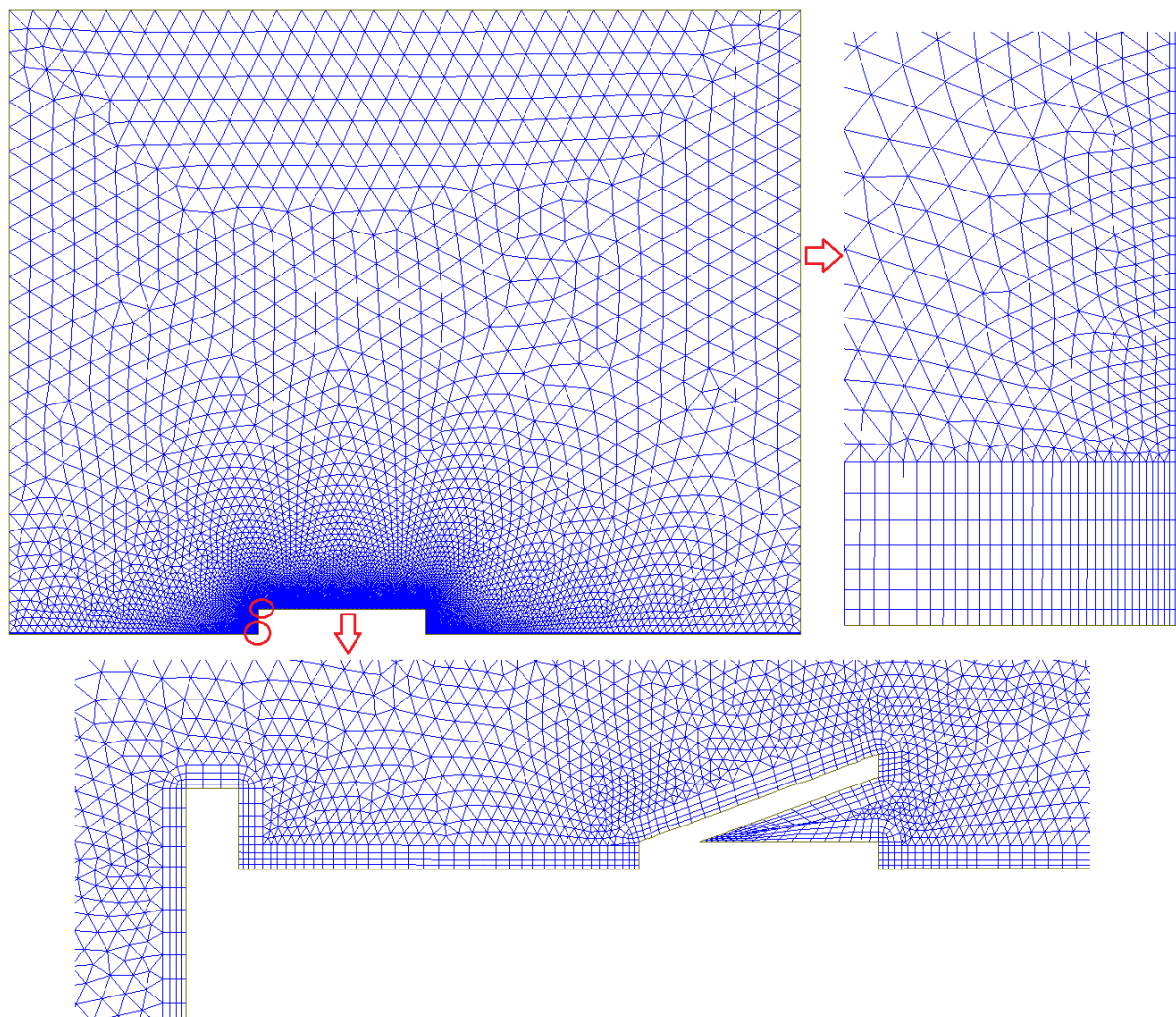




Slika 33. Mreža simulacije H

Tablica 9. Mreža simulacije I

Tip mreže	Hibridna mreža
Debljina graničnog sloja na objektu [m]	0,088
Debljina graničnog sloja na podlozi [m]	0,95
Površina najmanjeg elementa [m <sup>2</sup> ]	0,0000214
Površina najvećeg elementa [m <sup>2</sup> ]	142,63
Broj elemenata	124169



Slika 34. Mreža simulacije I

### 4.3. Postavke strujanja

Sve simulacije pretpostavljaju stacionarno strujanje sa zrakom kao fluidom koji se ponaša kao idealni plin. Brzina zraka iznosi  $160 \frac{km}{h}$  tj.  $44,44 \frac{m}{s}$  i vektor strujanja je orijentiran u smjeru osi  $X$  tj. paralelno s podlogom. Takva brzina vjetra simulira npr. vrlo snažan udar bure na području uz more, gdje solarni paneli mogu biti postavljeni na krovu sportske dvorane ili gospodarske zgrade. Machov broj za zadanu brzinu strujanja od  $44,44 \frac{m}{s}$  iznosi 0,13 što potvrđuje da strujanje možemo promatrati kao nestlačivo.

Poželjno je da je metoda rješavanja koja se koristi za nestlačiva strujanja fokusirana na tlak (eng. *Pressure based solver*) a za stlačiva strujanja na gustoću (eng. *Density based solver*) [27]. Za sve simulacije u ovom radu odabran je specifični Fluent „segregated solver“, koji rješava jednačbe strujanja jednu za drugom.

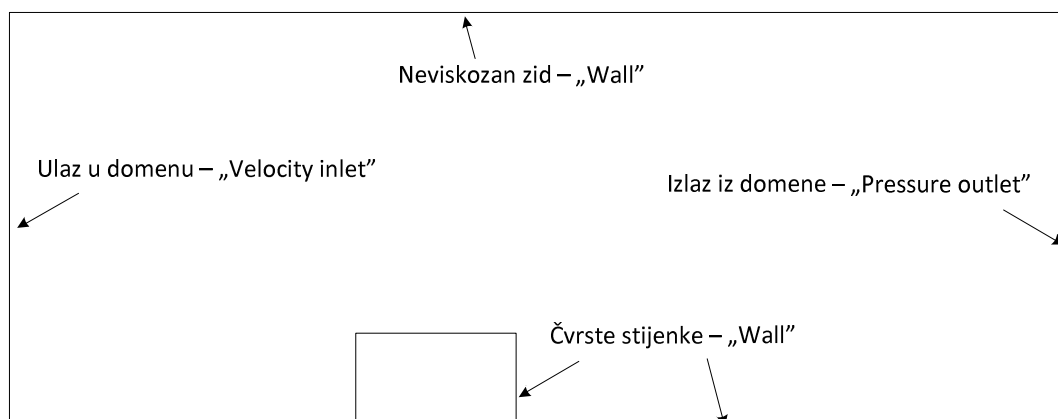
Za računanje gradijenta unutar domene strujanja (*eng. Gradient option*) korišten je „Green-Gauss Node-Based Gradient Evaluation“ koji za izračunavanje gradijenta koristi aritmetičku sredinu vrijednosti susjednih čvorova dok „Green-Gauss Cell-Based Derivative Evaluation“ za izračunavanje gradijenta koristi aritmetičku sredinu vrijednosti susjednih elemenata. Ta čvorno bazirana metoda rješavanja (*eng. node-based averaging scheme*) je točnija za nestrukturirane mreže od metode bazirane na elementima (*eng. cell-based scheme*) [27].

Za model turbulencije, kao što je već navedeno u poglavlju 3.1 *Opis alata*, korišten je Spalart–Allmaras-ov model turbulencije s intenzitetom turbulencije u strujanju od 10%.

### **Rubni uvjeti**

Ulazna brzina fluida u domenu strujanja definirana je na lijevom rubu domene (strujanje s lijeva na desno), dok je izlazno strujanje fluida iz domene jednako kao i ulazno tj. pretpostavlja se da se strujanje „smirilo“ dok je došlo do kraja domene strujanja, pa se na izlaznom rubu definira samo atmosferski tlak. Za pojedine mreže simulirano je i strujanje iz suprotnog smjera, tj. ulaz i izlaz iz domene su zamijenili mjesta, pa se razmatra strujanje s desna na lijevo. To je važno zbog toga što u ovom radu želimo ispitati sile na panelima u slučaju puhanja vjetra iz dva različita smjera.

Sve čvrste stijenke definirane su kao 'no-slip' wall, dakle brzina strujanja na stijenkama je nula. Rubni uvjet za neviskozni zid na stropu domene je napravljen tako da je stavljena čvrsta stijenka tj. običan zid ali je u Fluent-u umjesto „No slip“ uvjeta na tom zidu definirano posmično naprezanje od  $0 \frac{N}{m^2}$ . Sva ta ograničenja na rubovima domene čine rubne uvjete (*eng. Boundary conditions*) bez kojih ne bi bilo moguće izvršiti izračune jednadžbi. Zadani rubni uvjeti prikazani su na slici 35.



**Slika 35. Rubni uvjeti domene**

## 5. REZULTATI

### 5.1. Izračunati koeficijenti otpora ( $C_D$ ) i uzgona ( $C_L$ )

Za računanje koeficijenta  $C_D$  i  $C_L$ , uzeta referentna površina je visina zgrade ( $H$ ). Dubina domene strujanja tj. dimenzija po osi  $Z$  je uzeta  $1m$  jer su simulacije u ovom radu dvodimenzijske, pa veličina referentne površine za koeficijente  $C_D$  i  $C_L$  iznosi  $A_{ref} = 15m^2$ .

Vidi se da koeficijenti na svim panelima manje ili više osciliraju [Slika 42, Slika 43, Slika 49, Slika 50, Slika 56, Slika 57, Slika 63, Slika 64, Slika 70, Slika 71, Slika 77, Slika 78, Slika 86, Slika 87, Slika 93, Slika 94, Slika 100, Slika 101, Slika 107, Slika 108], no simulacije su dovoljno duge (do 5000 iteracija) da omogućuju periodičku konvergenciju, tj. periodičke oscilacije koeficijenata iz kojih se mogu izračunati srednje vrijednosti. U tablici 11 se nalaze srednje vrijednosti koeficijenata izračunate iz posljednjih 1000 iteracija.

Sile na pojedini panel su izračunate pomoću formule za aerodinamične koeficijente [2.7. Aerodinamični koeficijenti] za koju gustoća fluida neporemećene struje iznosi  $\rho_\infty = 1,176674 \frac{kg}{m^3}$  a brzina fluida neporemećene struje  $v_\infty = 44,44 \frac{m}{s}$ . Treba uzeti u obzir da su zbog dvodimenzijskih simulacija (dimenzija po osi  $Z$  je  $1m$ ) sile na red panela izražene po metru dubine panela.

Predznaci vrijednosti su određeni referentnim koordinatnim sustavom [Slika 22].

Paneli su numerirani rednim brojevima počevši sa lijeve strane zgrade prema desnoj tj. 1. panel je onaj na kojeg prvog nalijeće strujanje u normalnom smjeru strujanja.

Prikazane su slike:

- Konvergencija koeficijenta  $C_D$  i  $C_L$  za 5 referentnih redova panela:
  - Prva 3 reda na koje nastrojava zrak
  - 17. red panela
  - Zadnji red panela
- Strujnice oko prva 3 reda panela
- Strujnice oko srednja 2 reda panela
- Strujnice oko zadnja 3 reda panela
- Strujnice oko zgrade

Za simulacije A, B i C ispisane su vrijednosti koeficijenata ( $C_D$  i  $C_L$ ) i služe za usporedbu korištenih mreža. Također je za simulacije A, B i C ispisana vrijednost maksimalne brzine  $v_{max}$  nad stropom zgrade (mjesto gdje dolaze paneli).

**Tablica 10. Koeficijenti  $C_D$  i  $C_L$  za zgradu i  $v_{max}$  simulacija A, B i C**

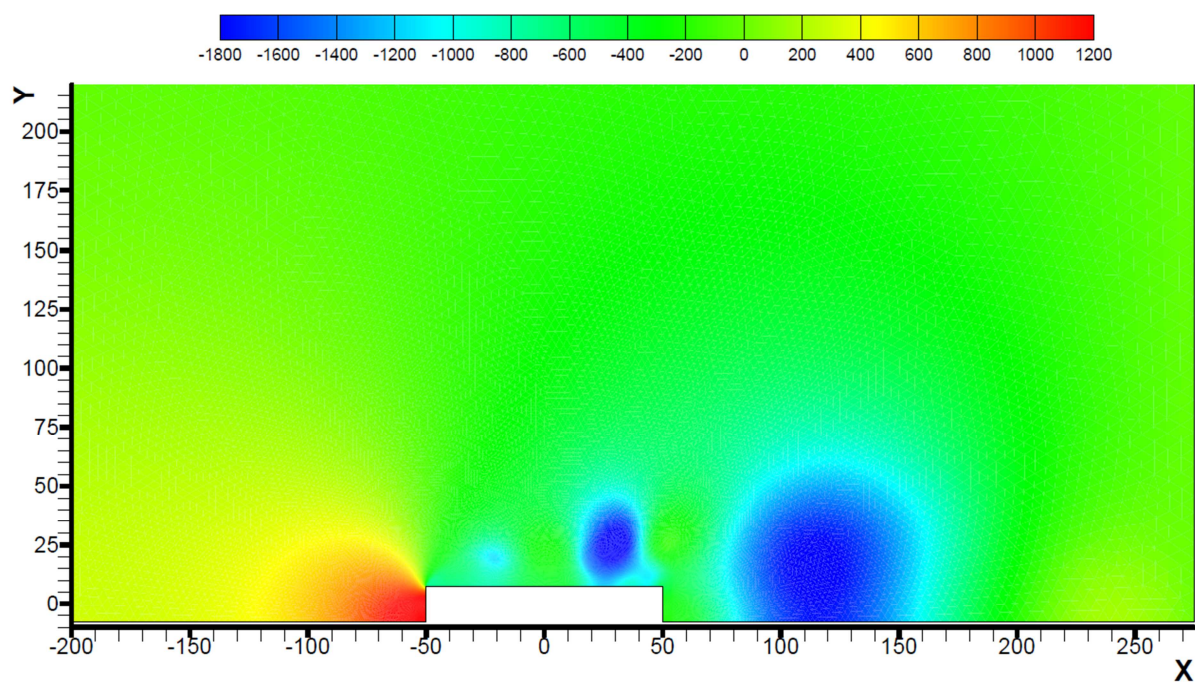
	Simulacija A		Simulacija B		Simulacija C	
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona
Zgrada	1,3824	4,3791	1,4121	4,3519	1,3462	4,0354
$v_{max}$	-30,4 m/s		-27,1 m/s		-25,3 m/s	

**Tablica 11. Koeficijenti i sile na referentne panele simulacija D, E, F, H i I za oba smjera strujanja**

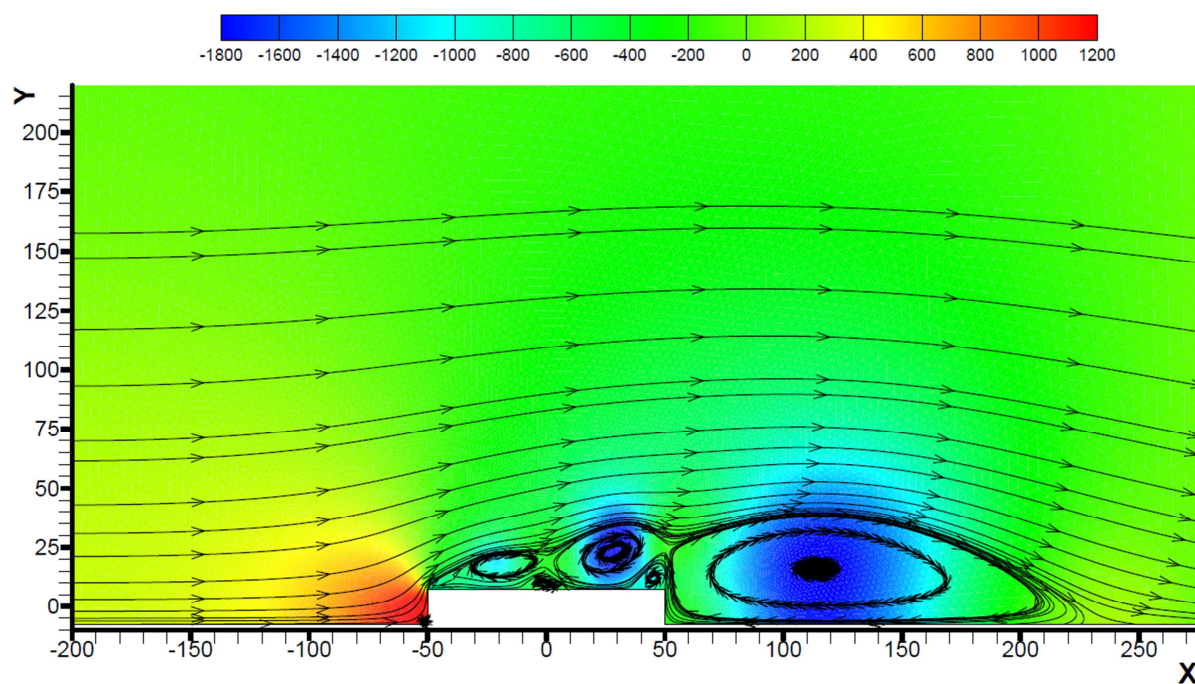
	Simulacija D					Simulacija D - suprotno strujanje			
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]		Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]
Panel 1	-0,0008461	0,03850	-14,75	671,01	Panel 1	-0,0000867	0,05030	-1,51	876,66
Panel 2	-0,0006000	0,03750	-10,46	653,58	Panel 17	-0,0001911	0,04100	-3,33	714,58
Panel 3	-0,0004490	0,03690	-7,83	643,12	Panel 32	0,0003859	0,04070	6,73	709,35
Panel 17	0,0001853	0,03660	3,23	637,89	Panel 33	0,0005447	0,04100	9,49	714,58
Panel 34	0,0002590	0,04740	4,51	826,12	Panel 34	0,0012000	0,04160	20,91	725,03
	Simulacija E					Simulacija E - suprotno strujanje			
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]		Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]
Panel 1	-0,0008397	0,03940	-14,64	686,69	Panel 1	-0,0001768	0,04980	-3,08	867,95
Panel 2	-0,0005688	0,03850	-9,91	671,01	Panel 17	-0,0000241	0,03930	-0,42	684,95
Panel 3	-0,0003889	0,03790	-6,78	660,55	Panel 32	0,0003025	0,03910	5,27	681,46
Panel 17	0,0000268	0,03710	0,47	646,61	Panel 33	0,0004603	0,03930	8,02	684,95
Panel 34	0,0001819	0,04820	3,17	840,06	Panel 34	0,0008654	0,03990	15,08	695,41
	Simulacija F					Simulacija F - suprotno strujanje			
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]		Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]
Panel 1	-0,0010000	0,03630	-17,43	632,66	Panel 1	-0,0000746	0,04700	-1,30	819,15
Panel 2	-0,0007028	0,03510	-12,25	611,75	Panel 17	-0,0000638	0,03720	-1,11	648,35
Panel 3	-0,0004716	0,03430	-8,22	597,81	Panel 32	0,0004640	0,03770	8,09	657,06
Panel 17	0,0000558	0,03320	0,97	578,63	Panel 33	0,0007141	0,03810	12,45	664,03
Panel 34	0,0000458	0,04310	0,80	751,18	Panel 34	0,0008482	0,03890	14,78	677,98
	Simulacija H					Simulacija H - suprotno strujanje			
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]		Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]
Panel 1	-0,0010000	0,04390	-17,43	765,12	Panel 1	-0,0003255	0,05410	-5,67	942,89
Panel 2	-0,0006037	0,04250	-10,52	740,72	Panel 17	-0,0000345	0,04350	-0,60	758,15
Panel 3	-0,0004007	0,04190	-6,98	730,26	Panel 32	0,0004356	0,04350	7,59	758,15
Panel 17	-0,0000120	0,04080	-0,21	711,09	Panel 33	0,0005372	0,04380	9,36	763,38
Panel 34	0,0002455	0,05250	4,28	915,01	Panel 34	0,0006229	0,04430	10,86	772,09
	Simulacija I					Simulacija I - suprotno strujanje			
	Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]		Koeficijent otpora	Koeficijent uzgona	Sila otpora [N]	Sila uzgona [N]
Panel 1	-0,0011000	0,04150	-19,17	723,29	Panel 1	-0,0001257	0,04820	-2,19	840,06
Panel 2	-0,0008668	0,04050	-15,11	705,86	Panel 17	0,0000119	0,03910	0,21	681,46
Panel 3	-0,0005823	0,03950	-10,15	688,43	Panel 32	0,0005329	0,03990	9,29	695,41
Panel 17	0,0000580	0,03800	1,01	662,29	Panel 33	0,0008006	0,04040	13,95	704,12
Panel 34	-0,0000334	0,04630	-0,58	806,95	Panel 34	0,0009566	0,04120	16,67	718,06



## 5.2. Simulacija A



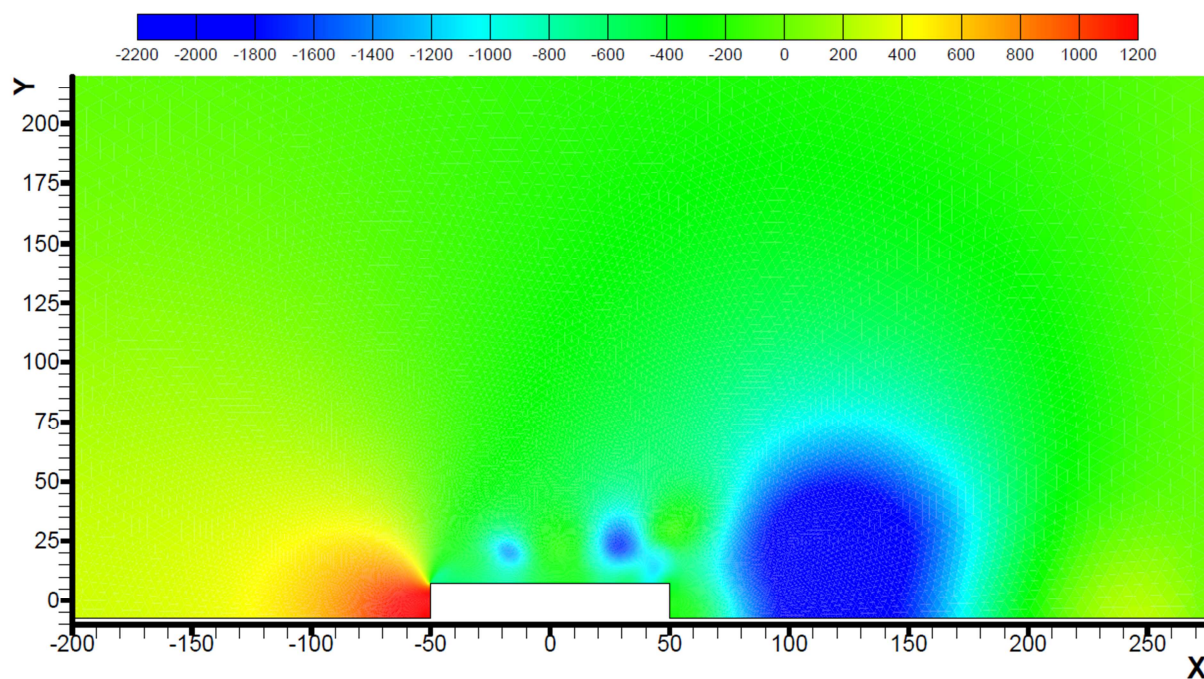
Slika 36. Polje tlaka simulacije A



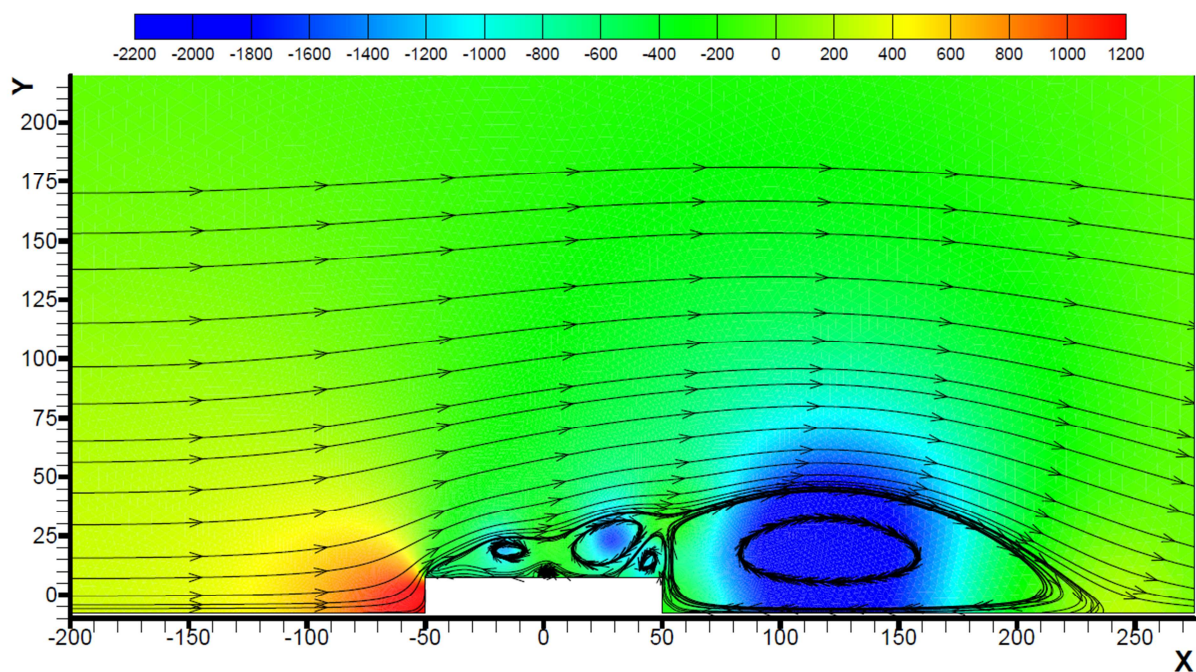
Slika 37. Strujnice simulacije A



### 5.3. Simulacija B



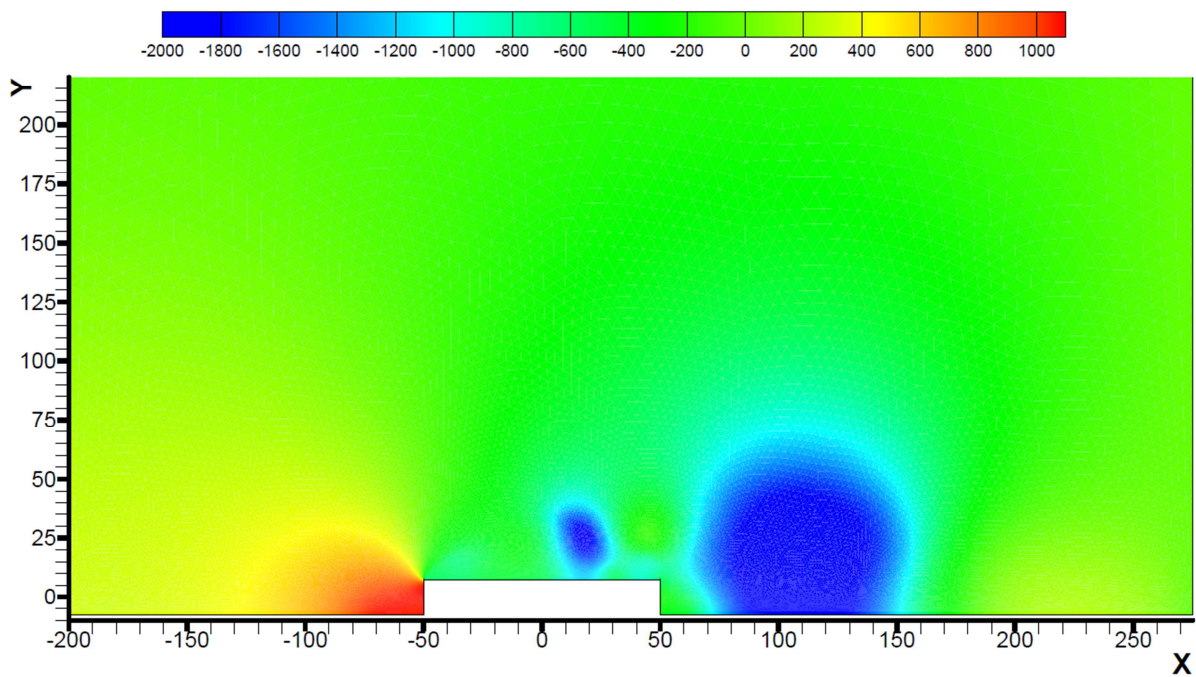
Slika 38. Polje tlaka simulacije B



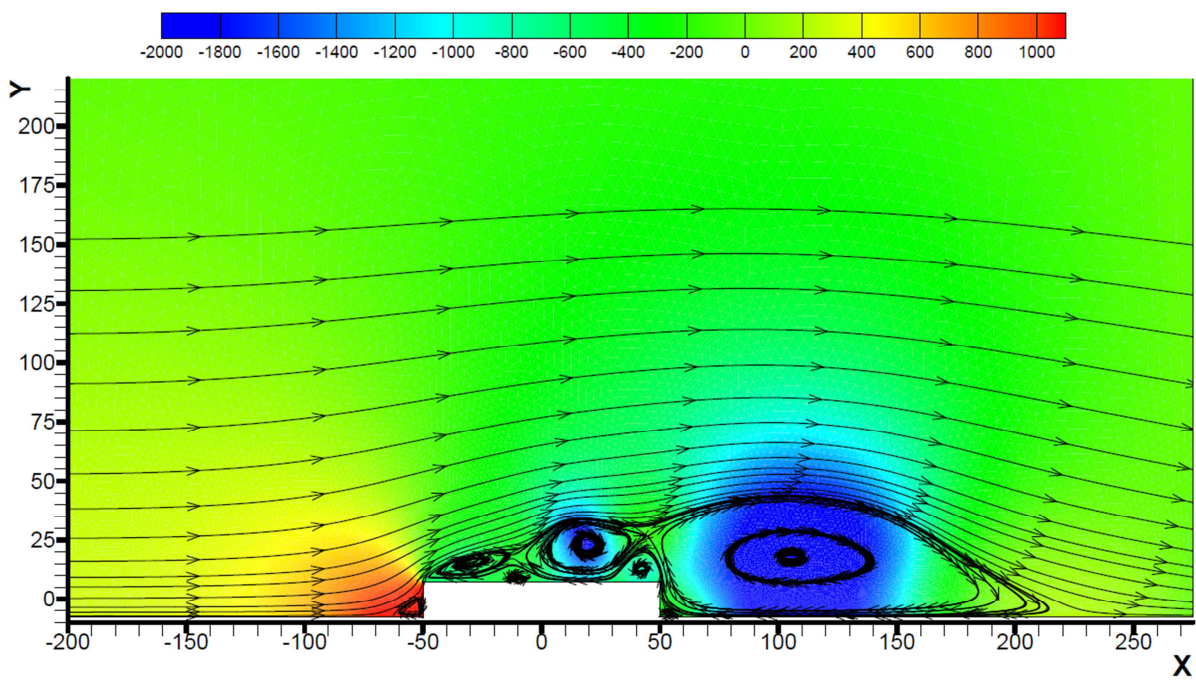
Slika 39. Strujnice simulacije B



## 5.4. Simulacija C



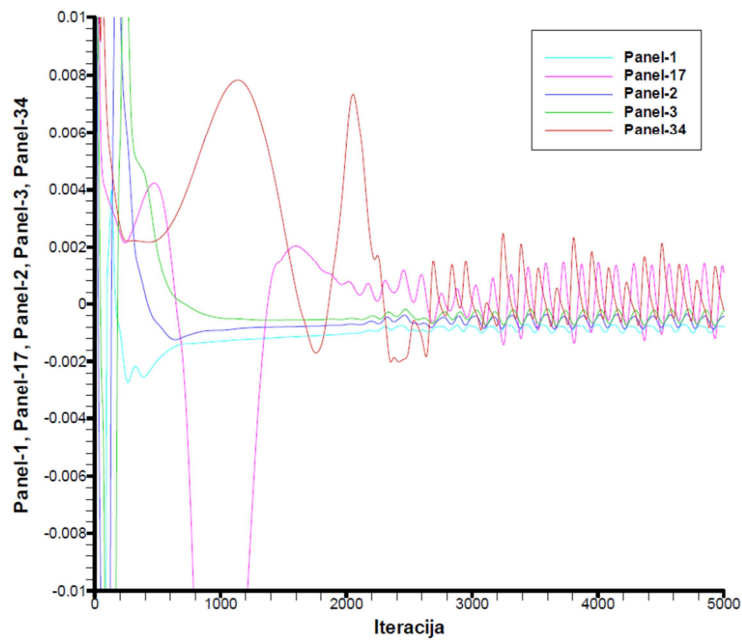
Slika 40. Polje tlaka simulacije C



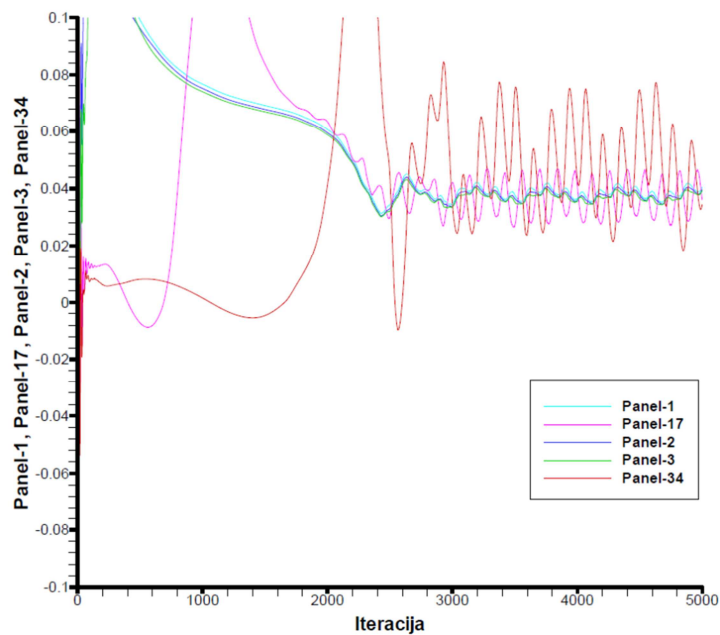
Slika 41. Strujnice simulacije C



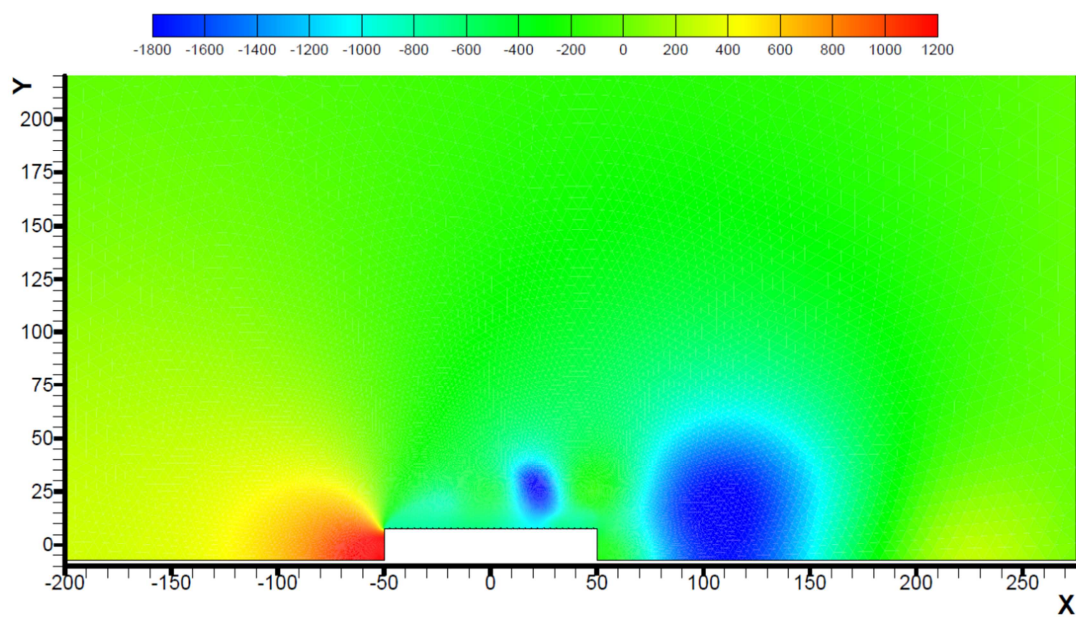
## 5.5. Simulacija D



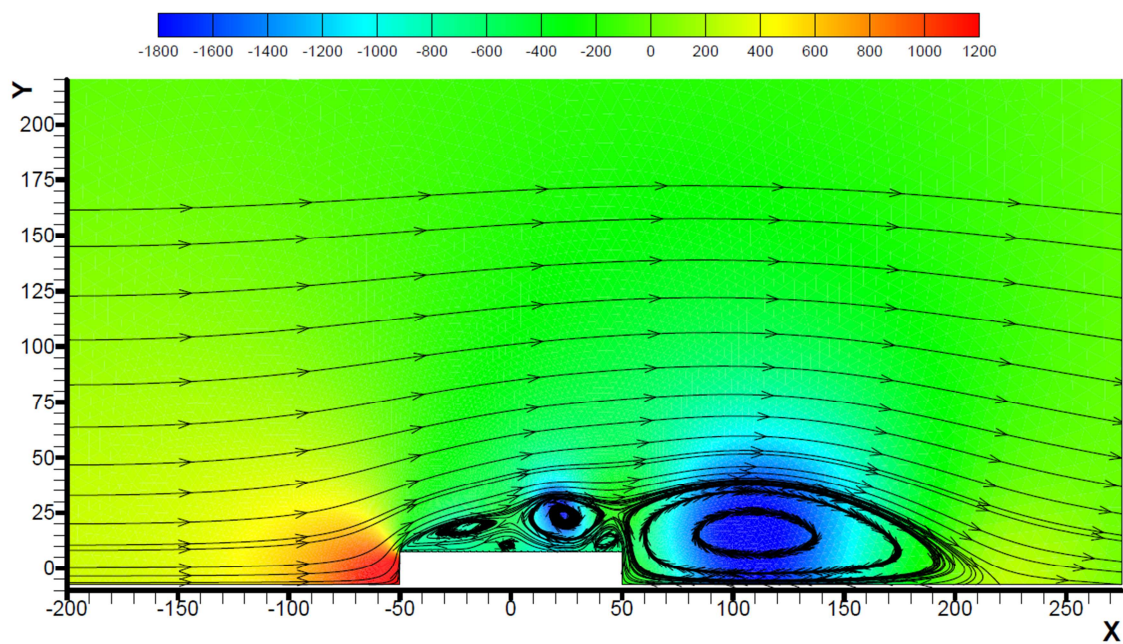
Slika 42. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. red panela u simulaciji D



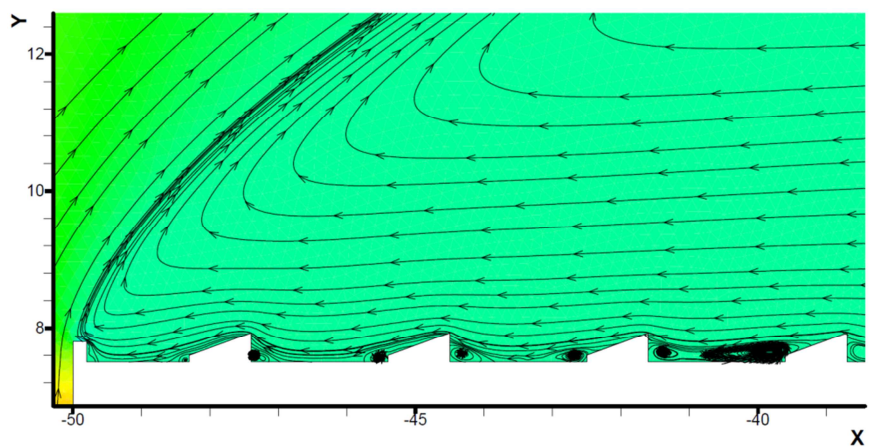
Slika 43. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panel u simulaciji D



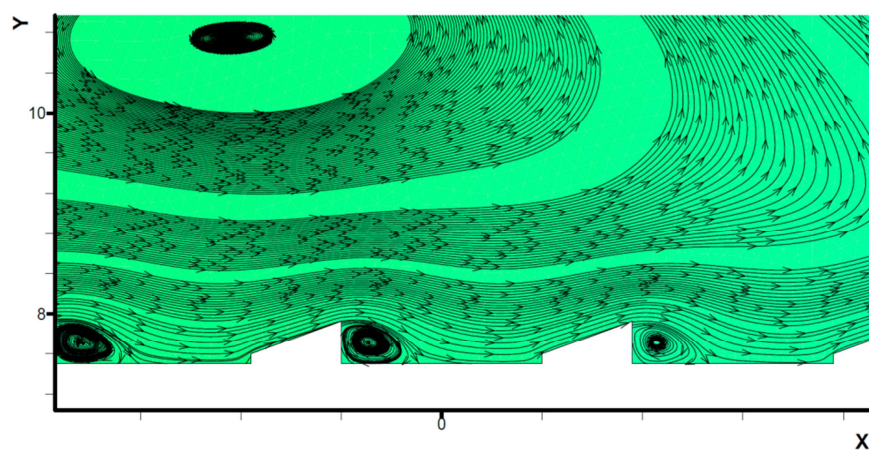
Slika 44. Polje tlaka simulacije D



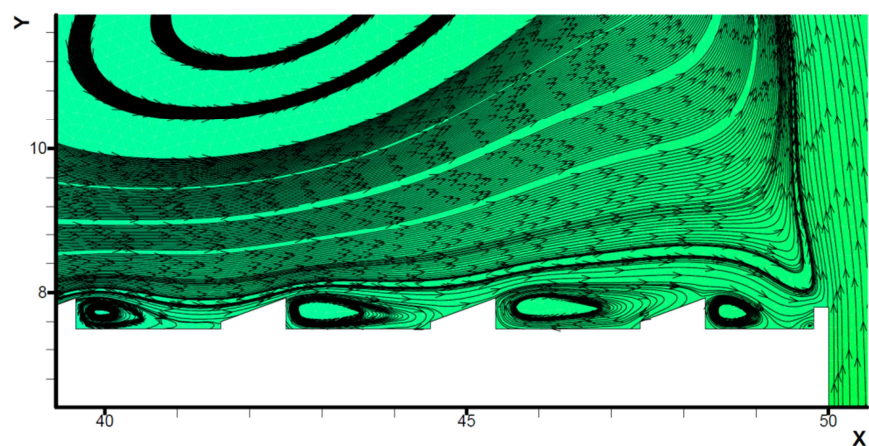
Slika 45. Strujnice simulacije D



Slika 46. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji D



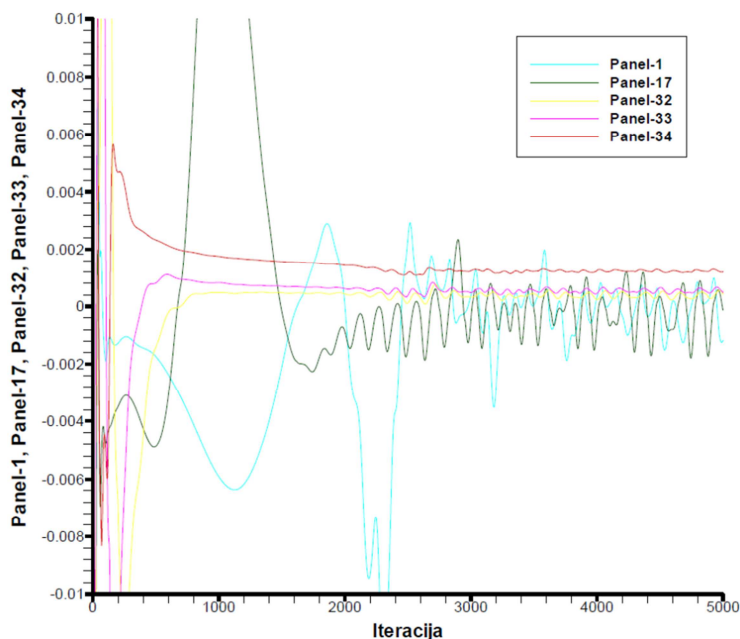
Slika 47. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji D



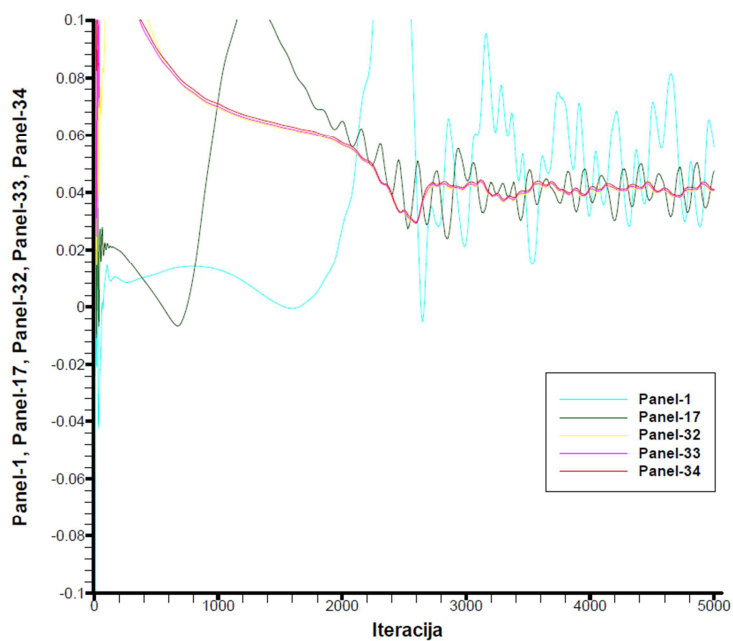
Slika 48. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D



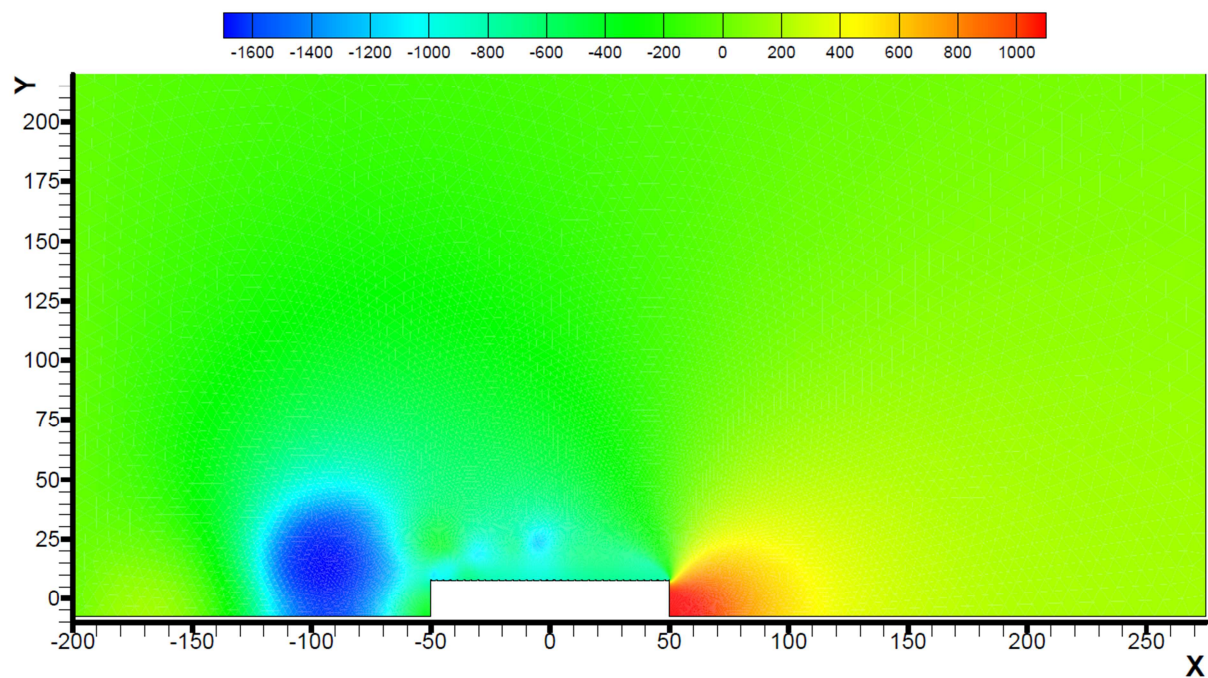
## 5.6. Simulacija D sa suprotnim smjerom strujanja



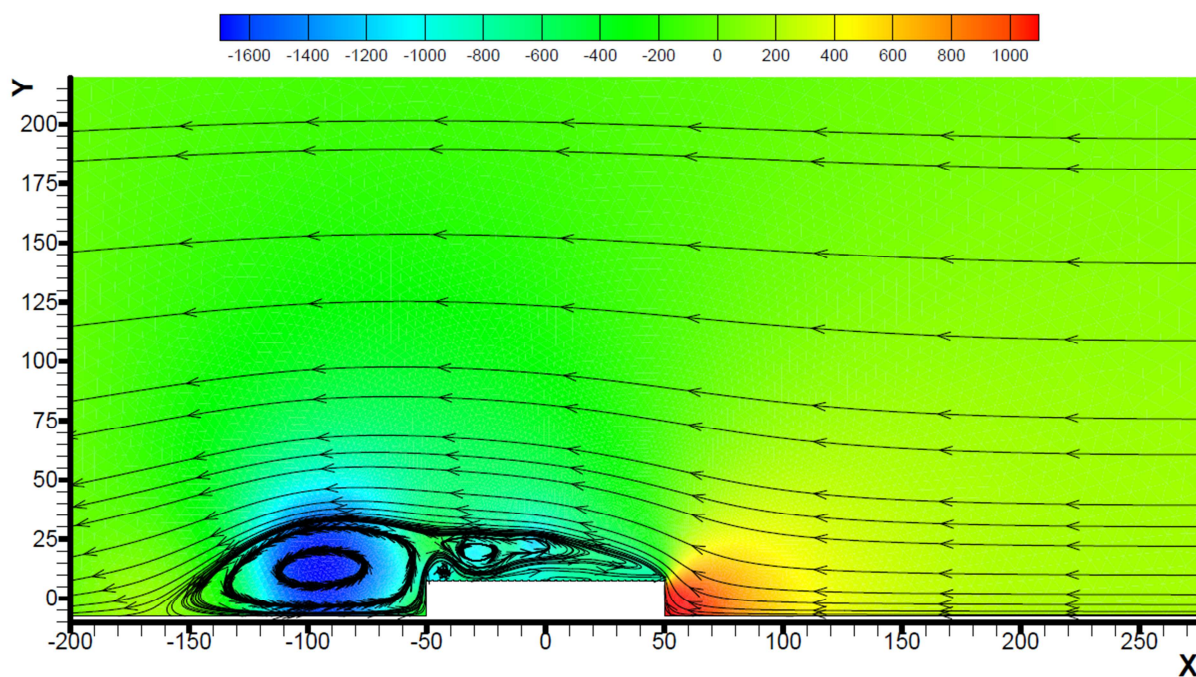
Slika 49. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja



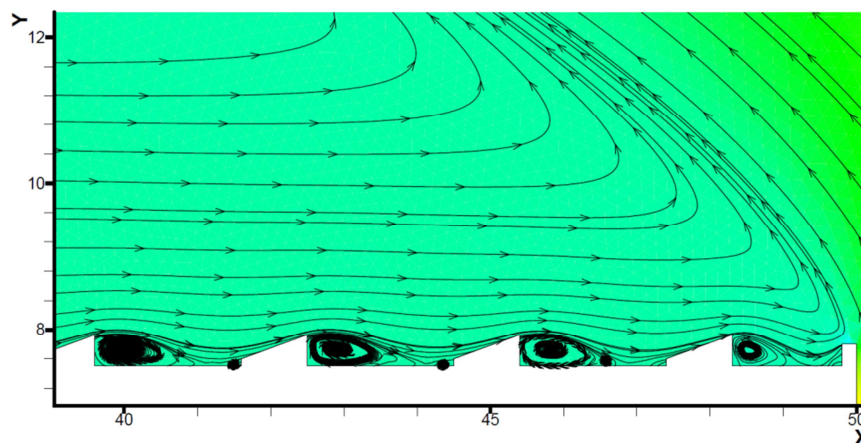
Slika 50. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja



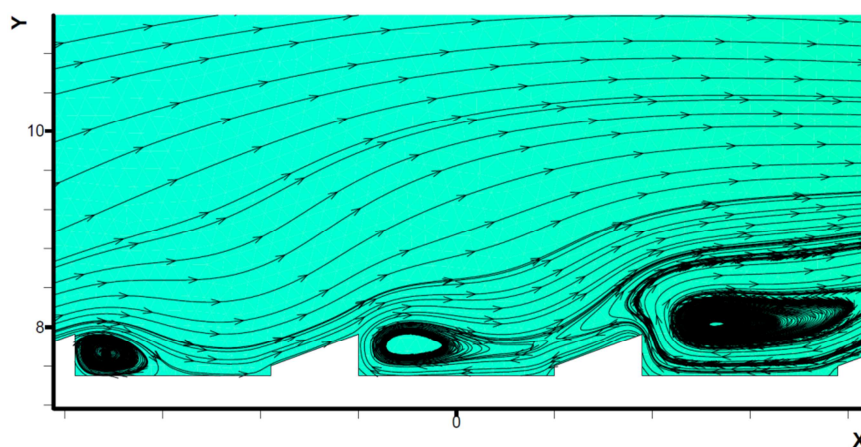
Slika 51. Polje tlaka simulacije D sa suprotnim smjerom strujanja



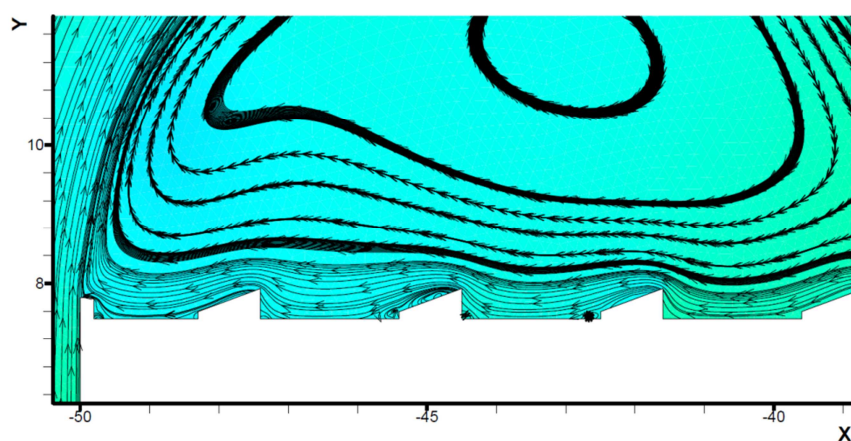
Slika 52. Strujnice simulacije D sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 53. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja



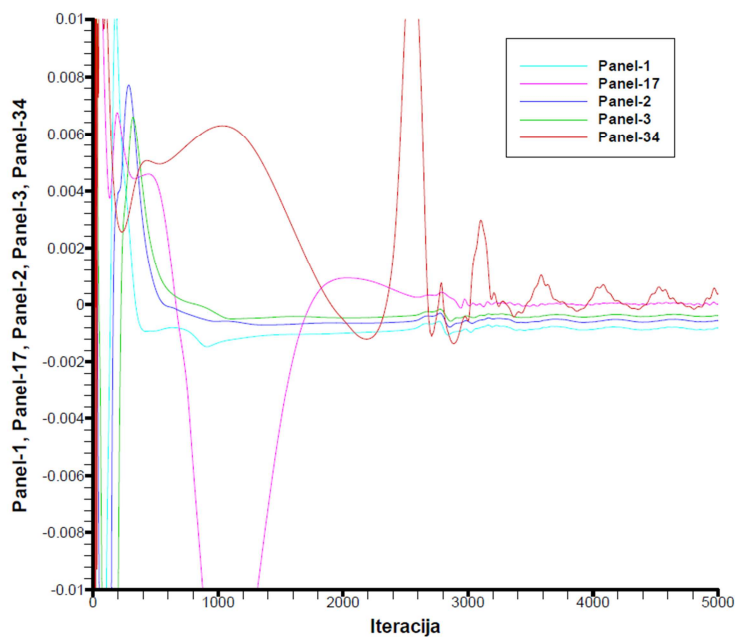
Slika 54. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja



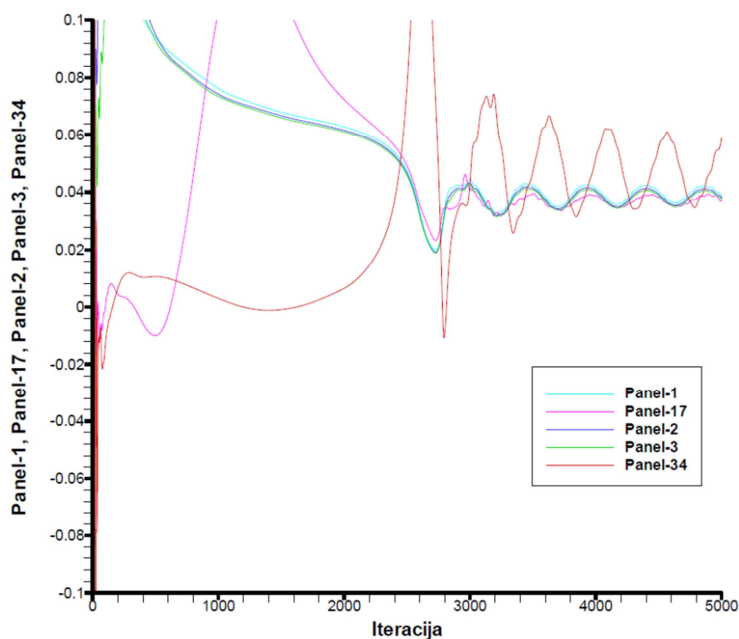
Slika 55. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji D sa suprotnim smjerom strujanja



## 5.7. Simulacija E

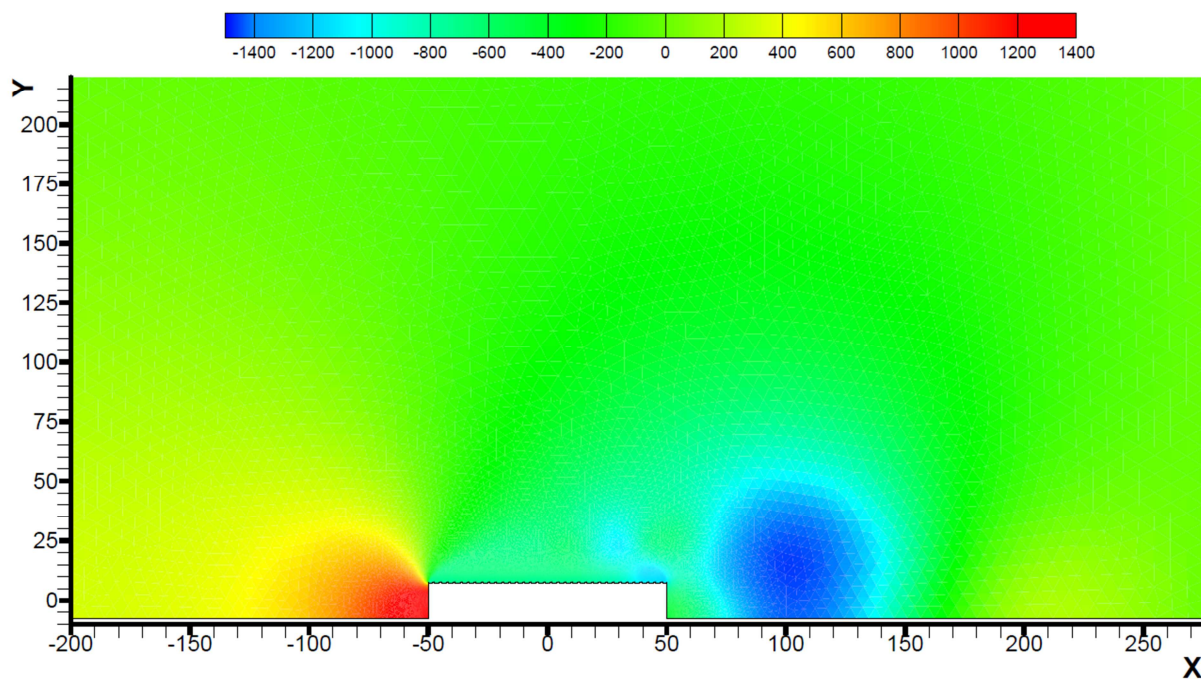


Slika 56. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E

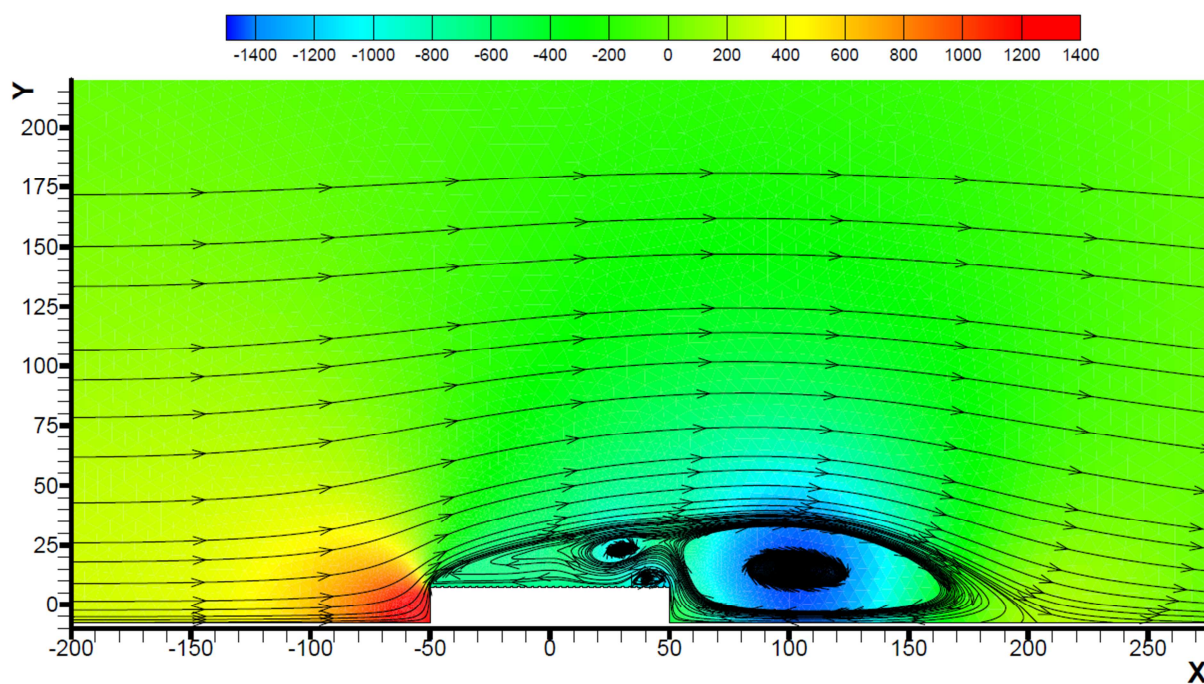


Slika 57. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E

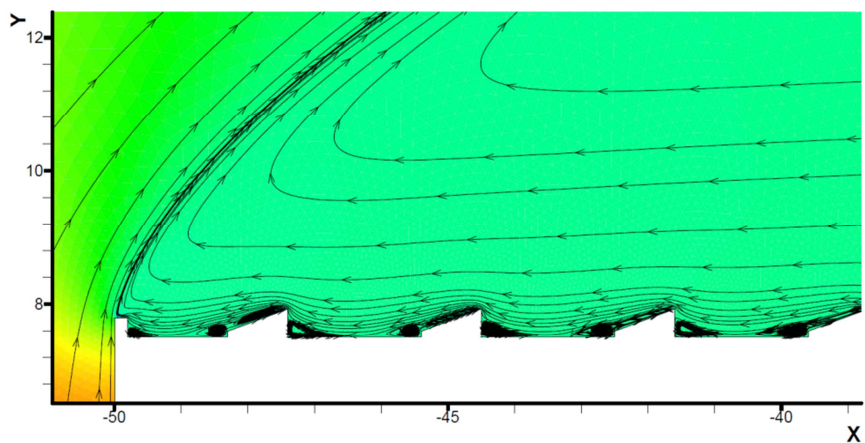




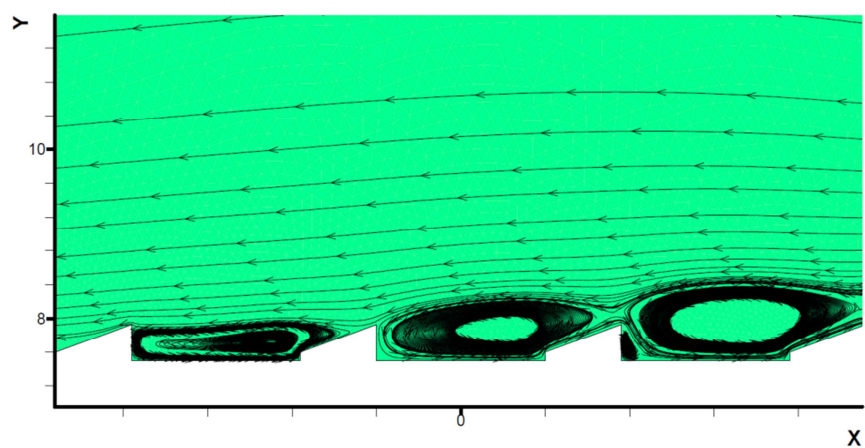
Slika 58. Polje tlaka simulacije E



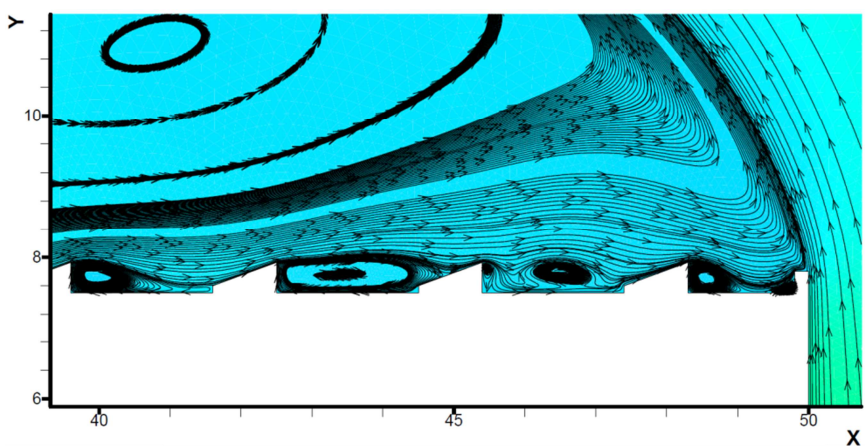
Slika 59. Strujnice simulacije E



Slika 60. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji E

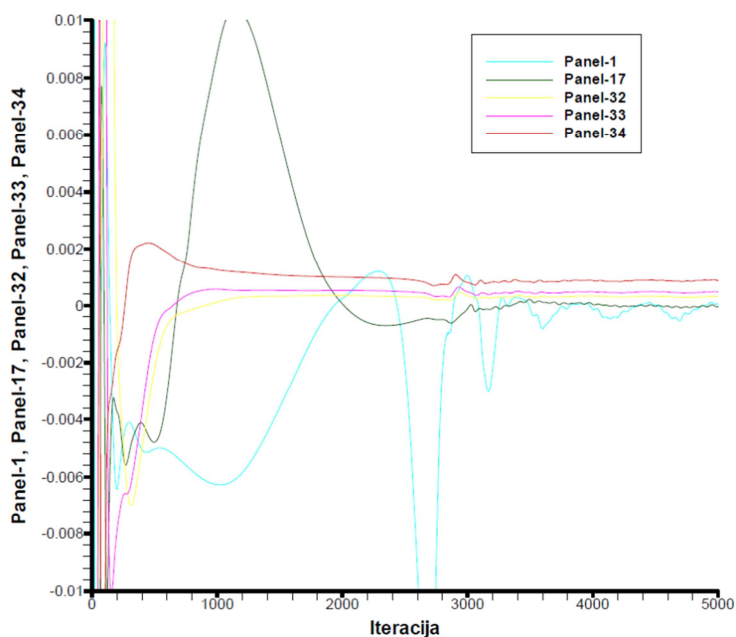


Slika 61. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji E

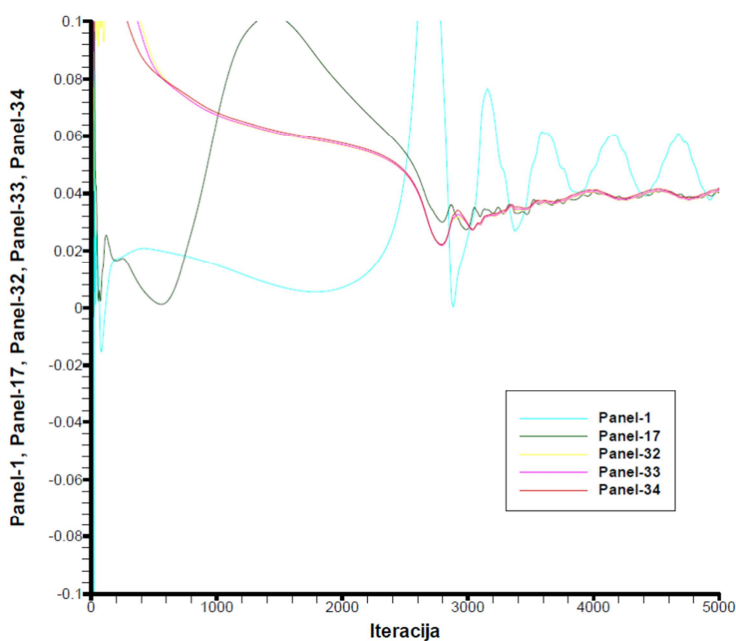


Slika 62. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E

## 5.8. Simulacija E sa suprotnim smjerom strujanja

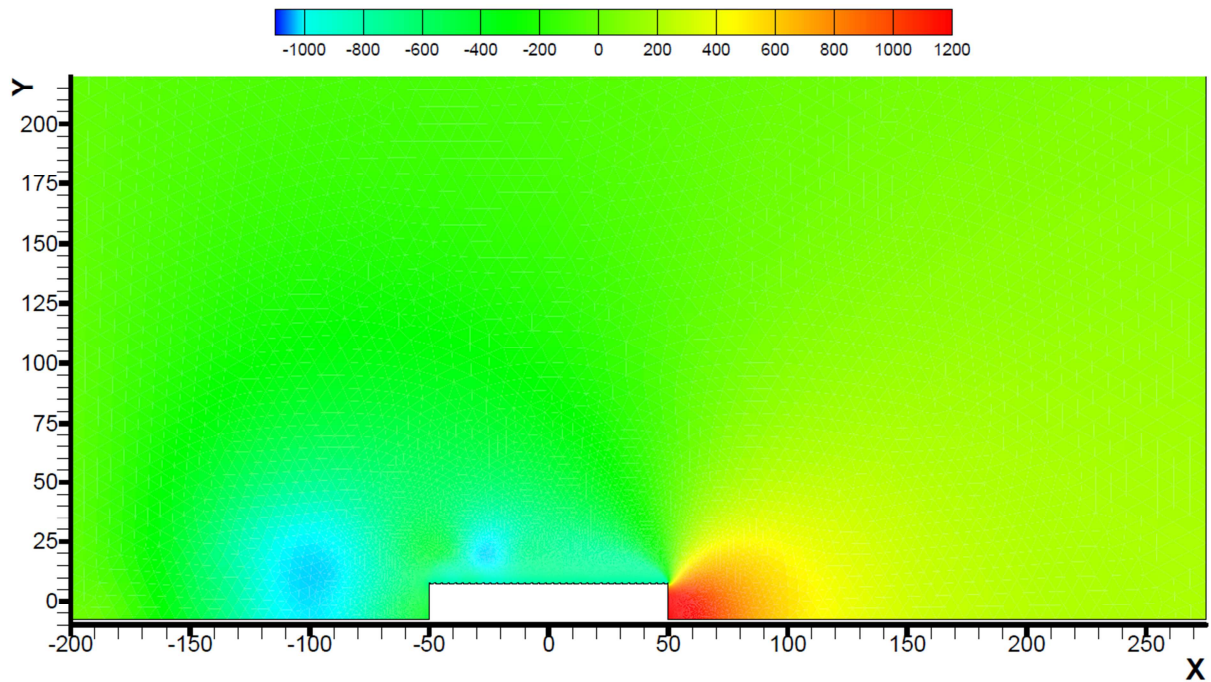


Slika 63. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja

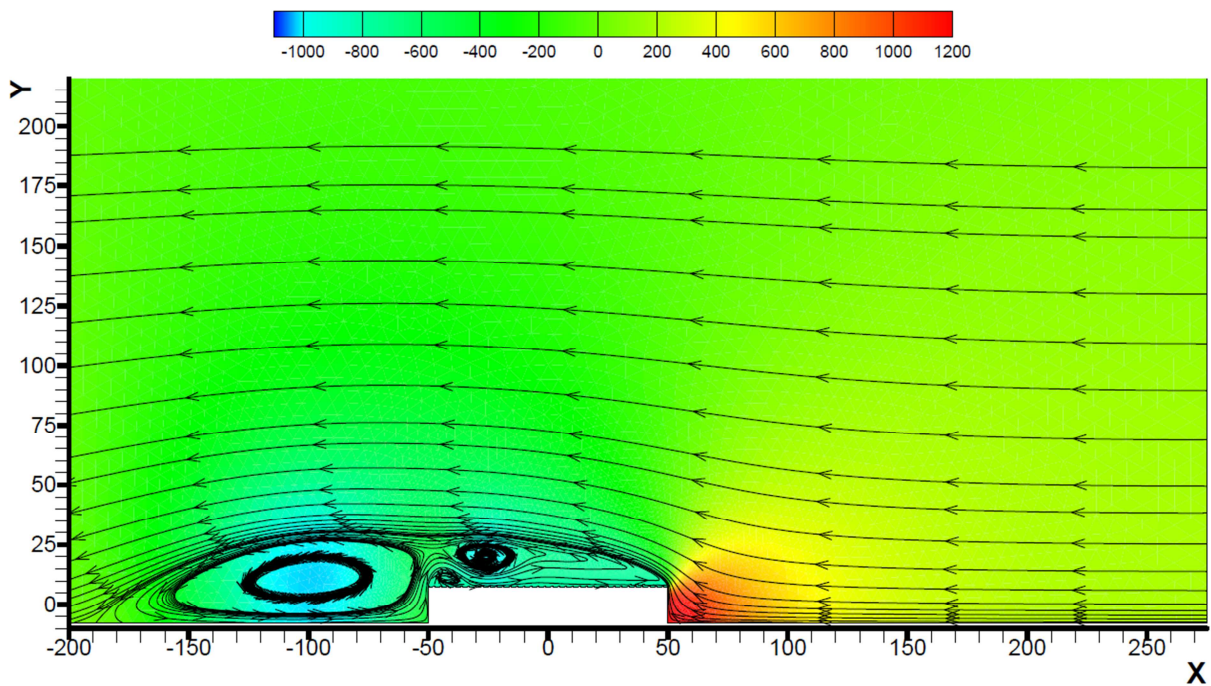


Slika 64. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja

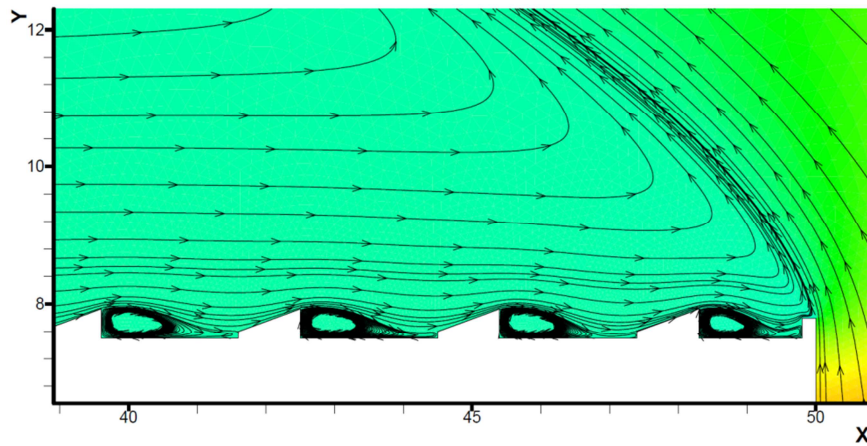




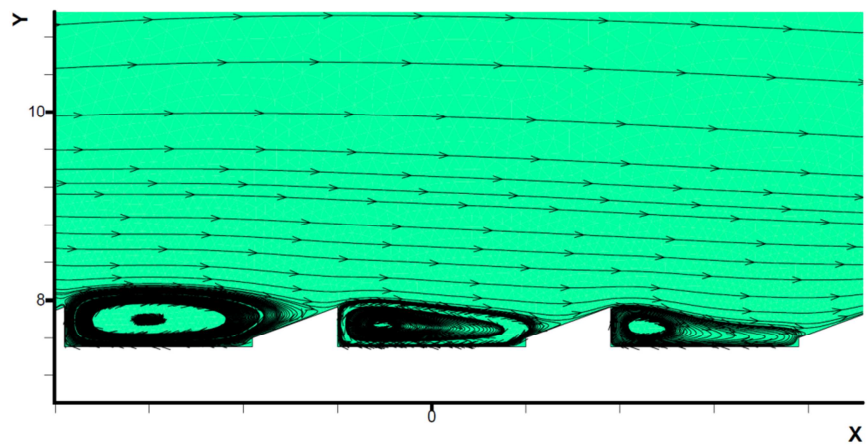
Slika 65. Polje tlaka simulacije E sa suprotnim smjerom strujanja



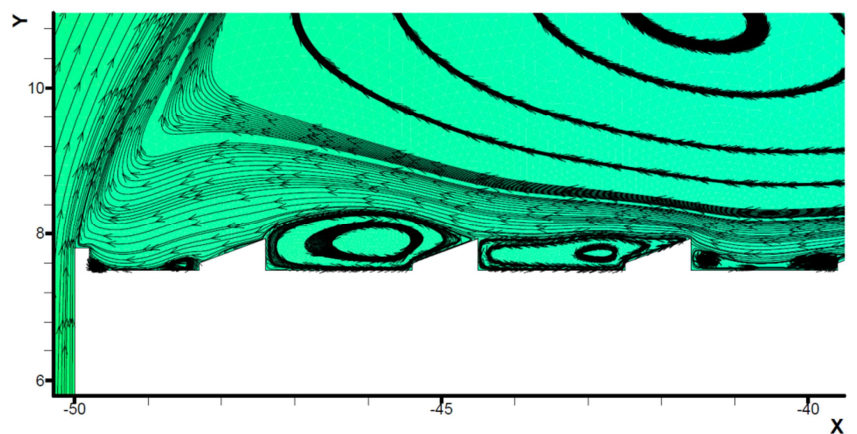
Slika 66. Strujnice simulacije E sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 67. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja

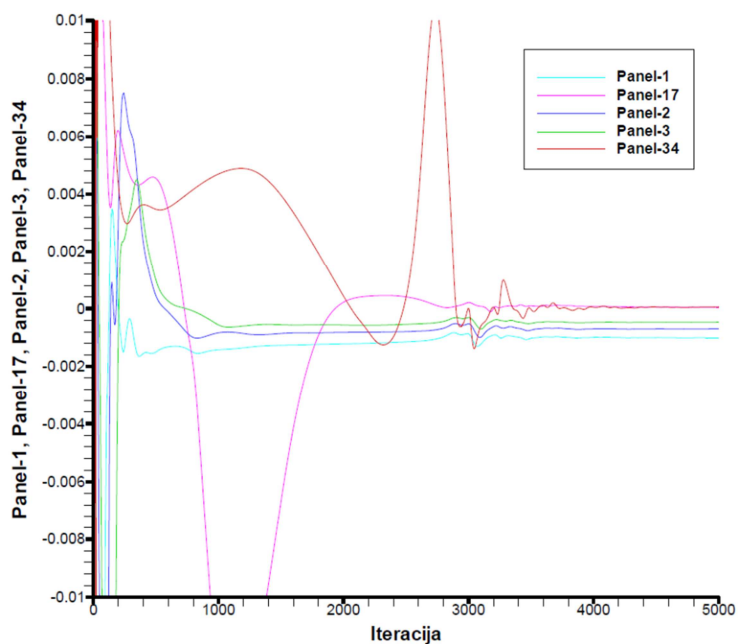


Slika 68. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja

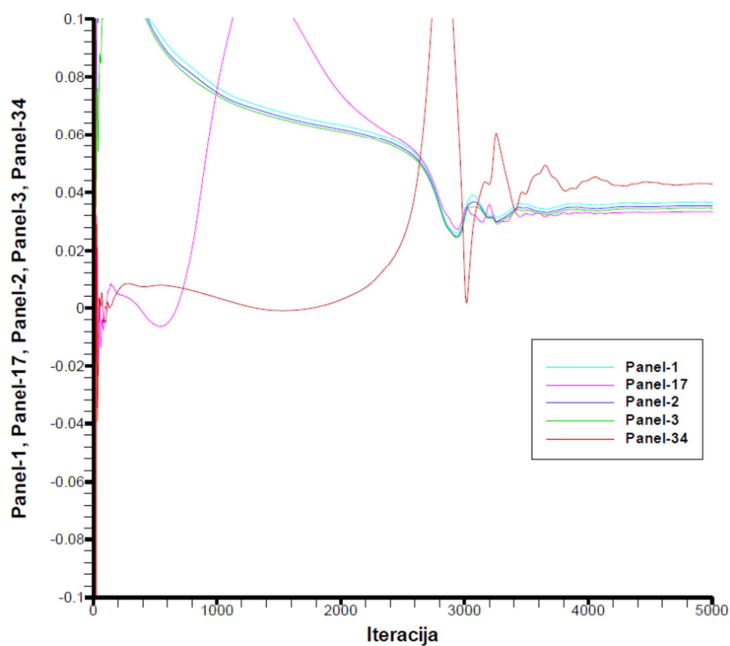


Slika 69. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji E sa suprotnim smjerom strujanja

## 5.9. Simulacija F

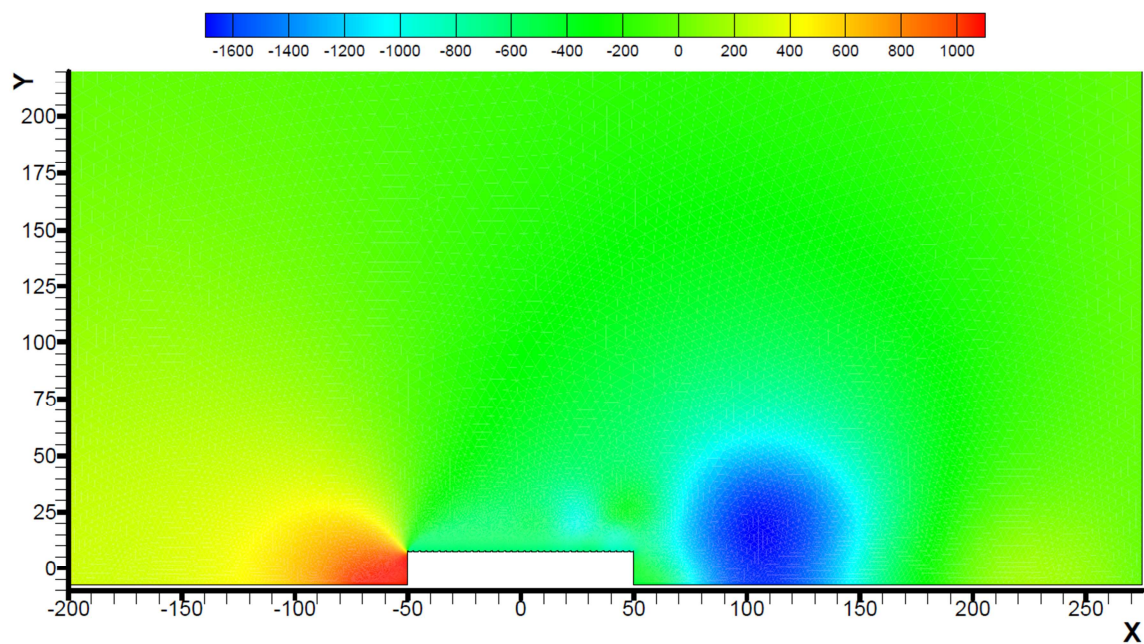


Slika 70. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F

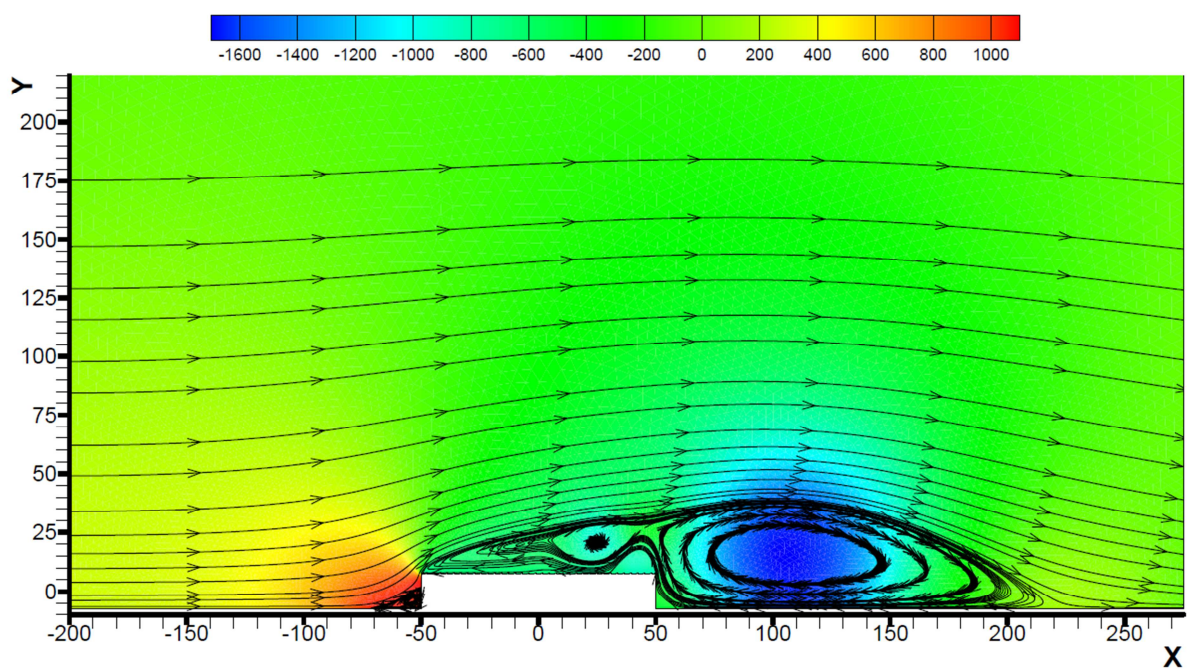


Slika 71. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F



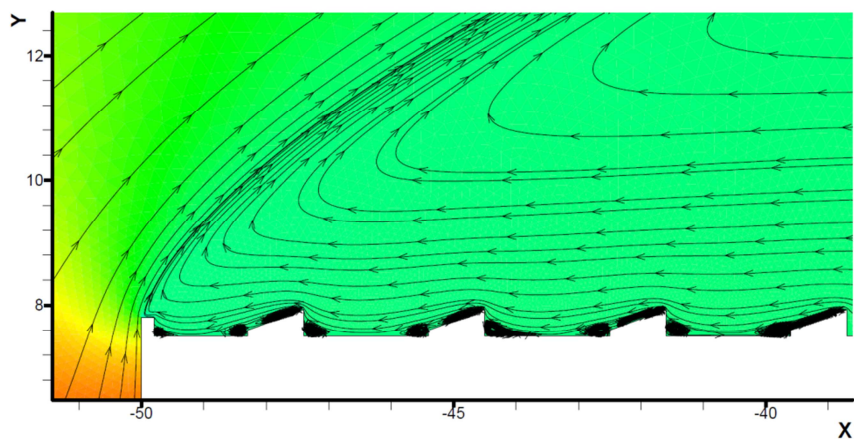


Slika 72. Polje tlaka simulacije F

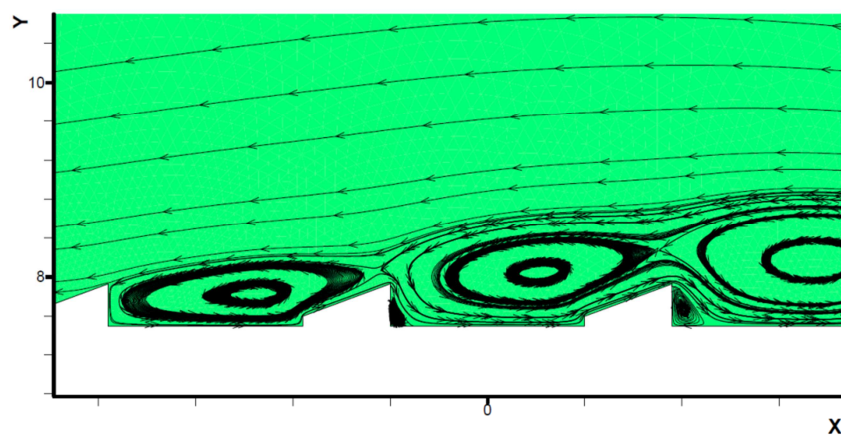


Slika 73. Strujnice simulacije F

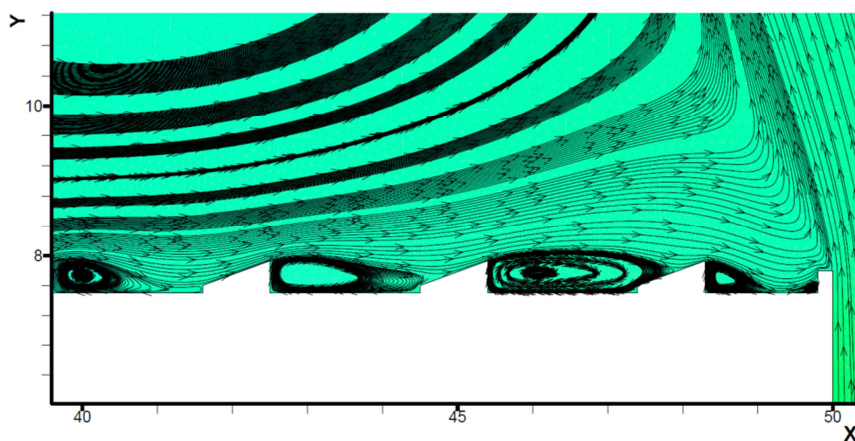




Slika 74. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji F

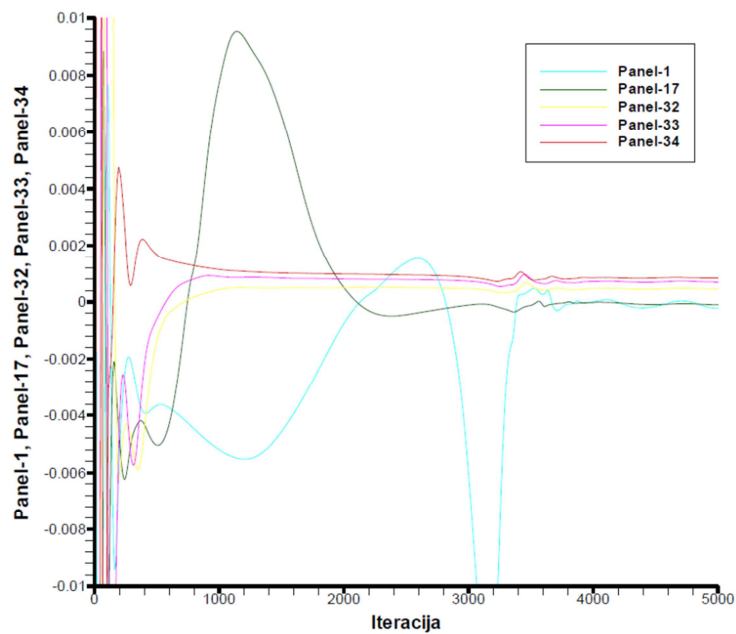


Slika 75. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji F

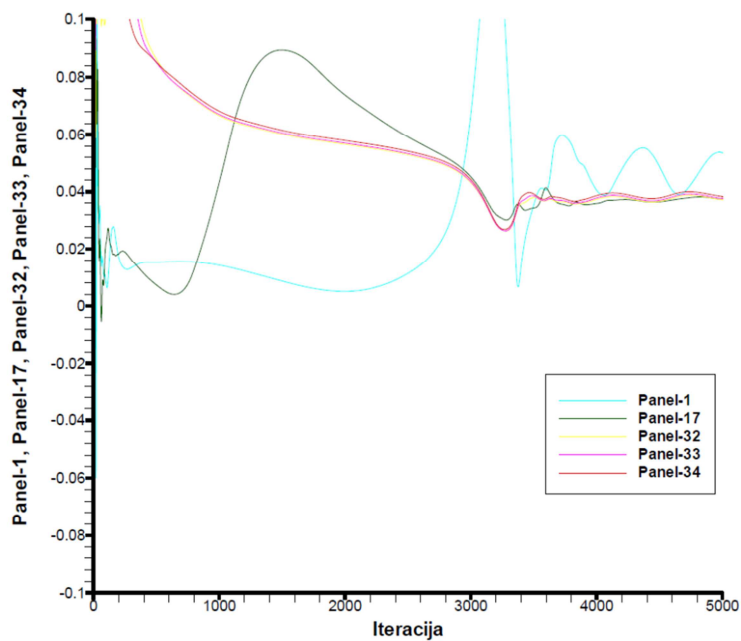


Slika 76. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F

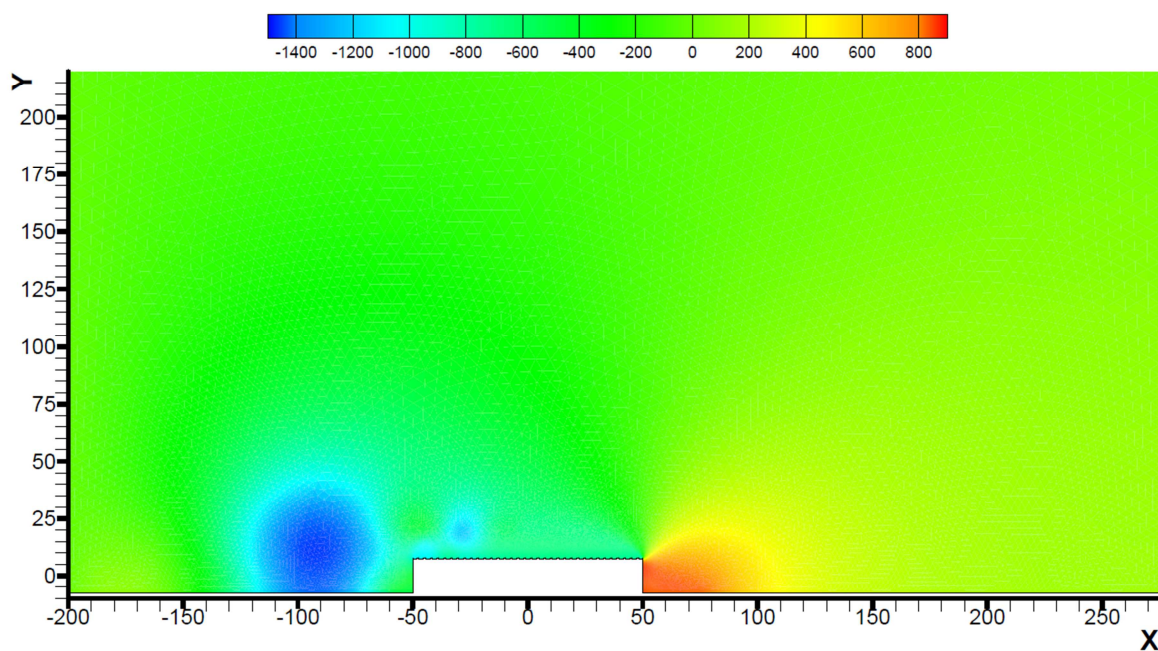
### 5.10. Simulacija F sa suprotnim smjerom strujanja



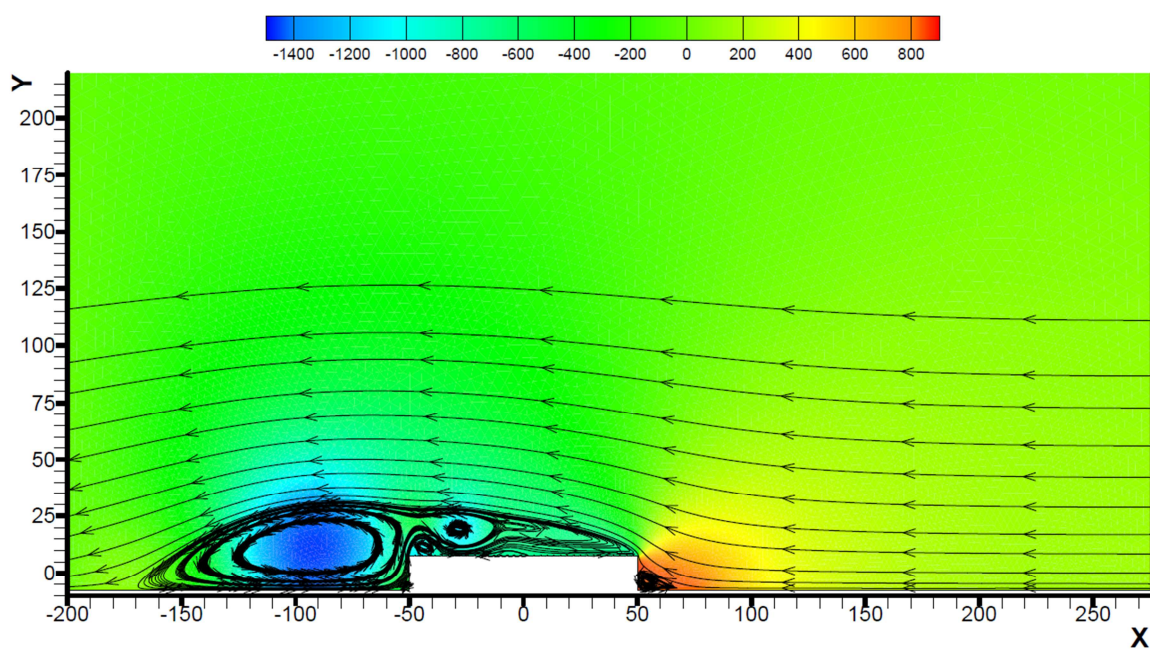
Slika 77. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 78. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja

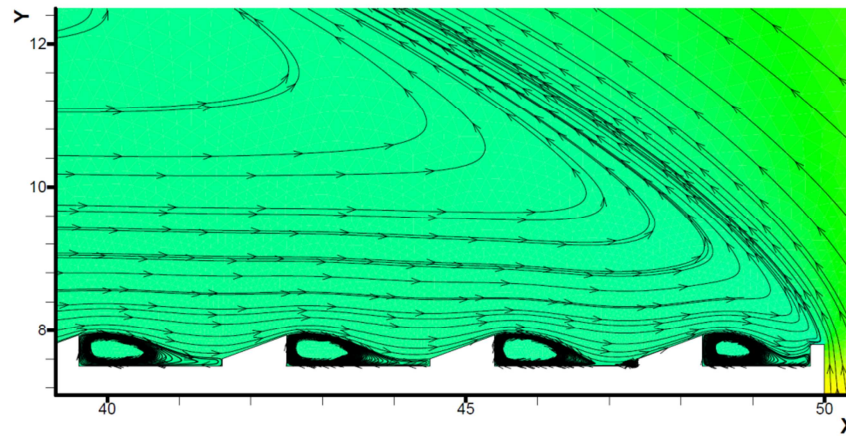


Slika 79. Polje tlaka simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja

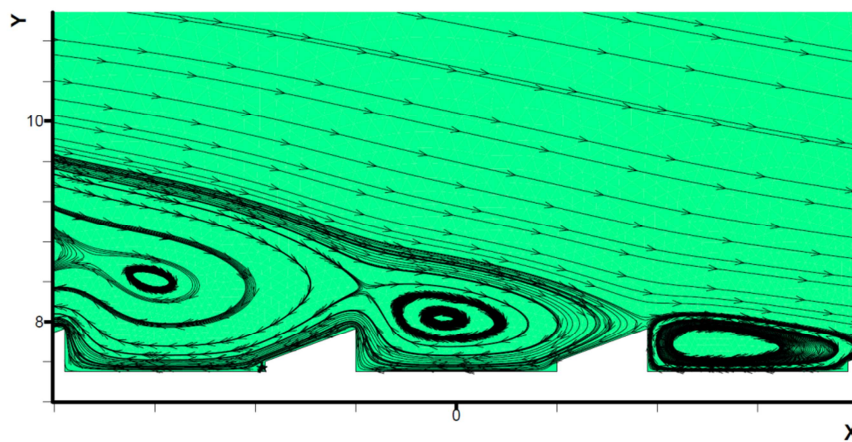


Slika 80. Strujnice simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja

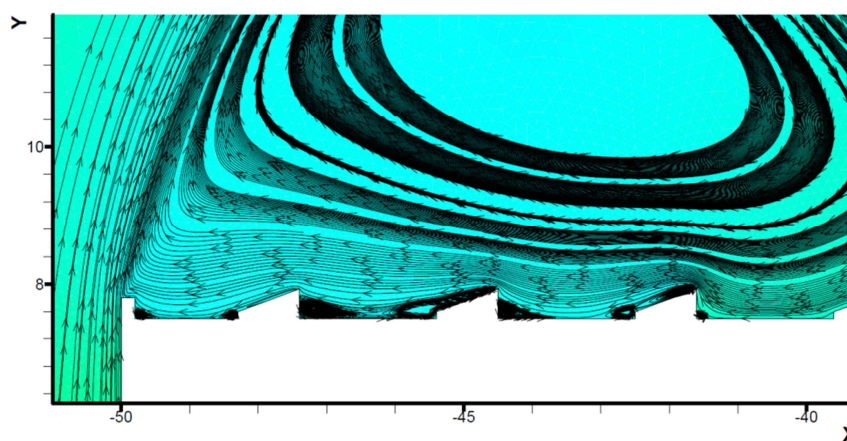




Slika 81. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja



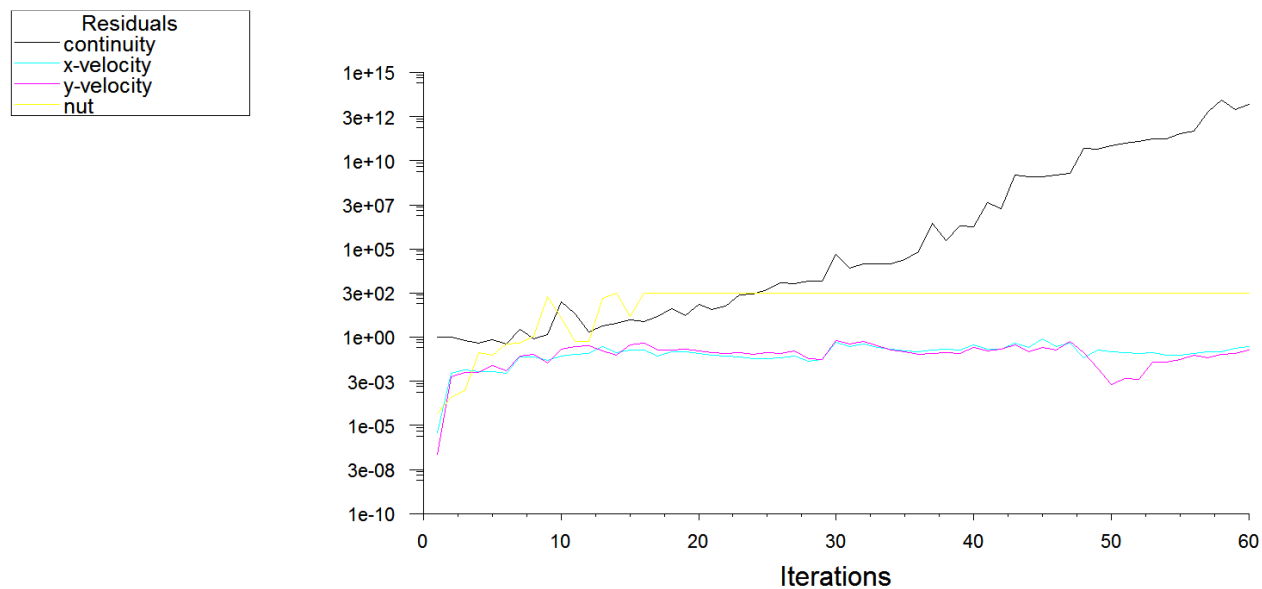
Slika 82. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja



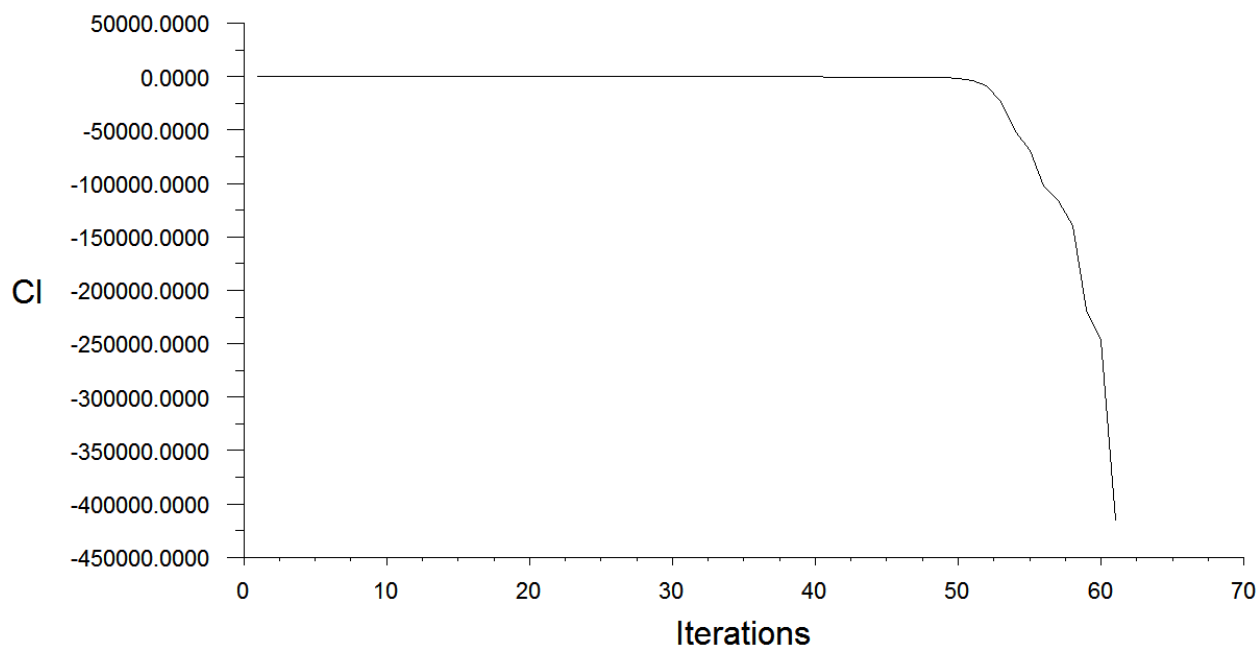
Slika 83. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja

## 5.11. Simulacija G

Razlog zašto nema rezultata simulacije G je jer rješenje ne konvergira [Slika 84, Slika 85].



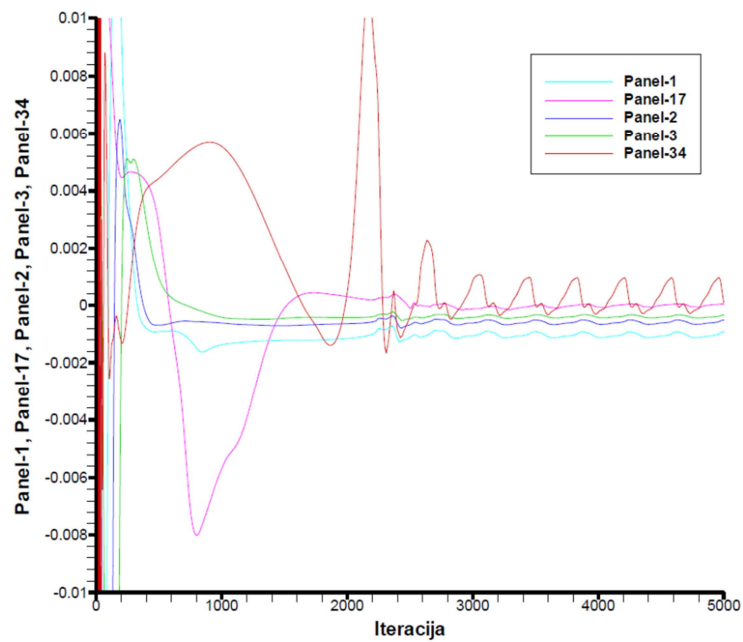
Slika 84. Konvergenције rješenja simulacije G



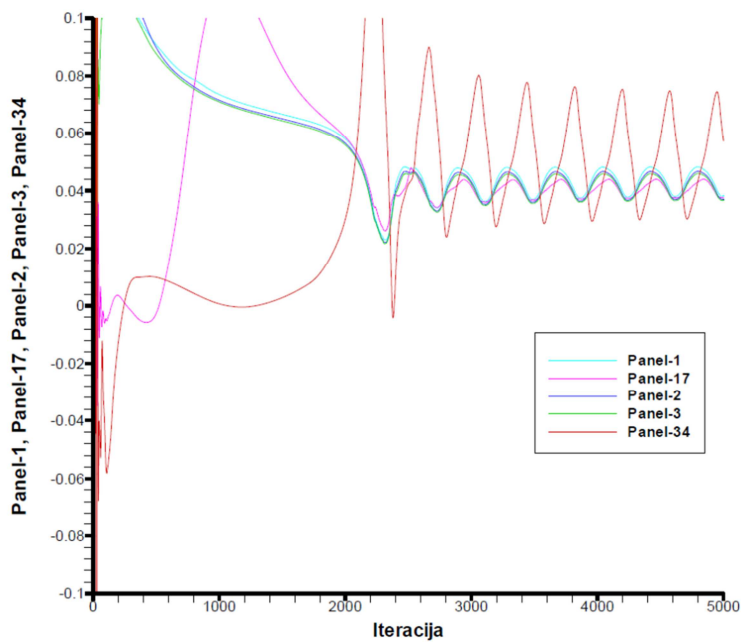
Slika 85. Konvergenција koeficijenta uzgona simulacije G



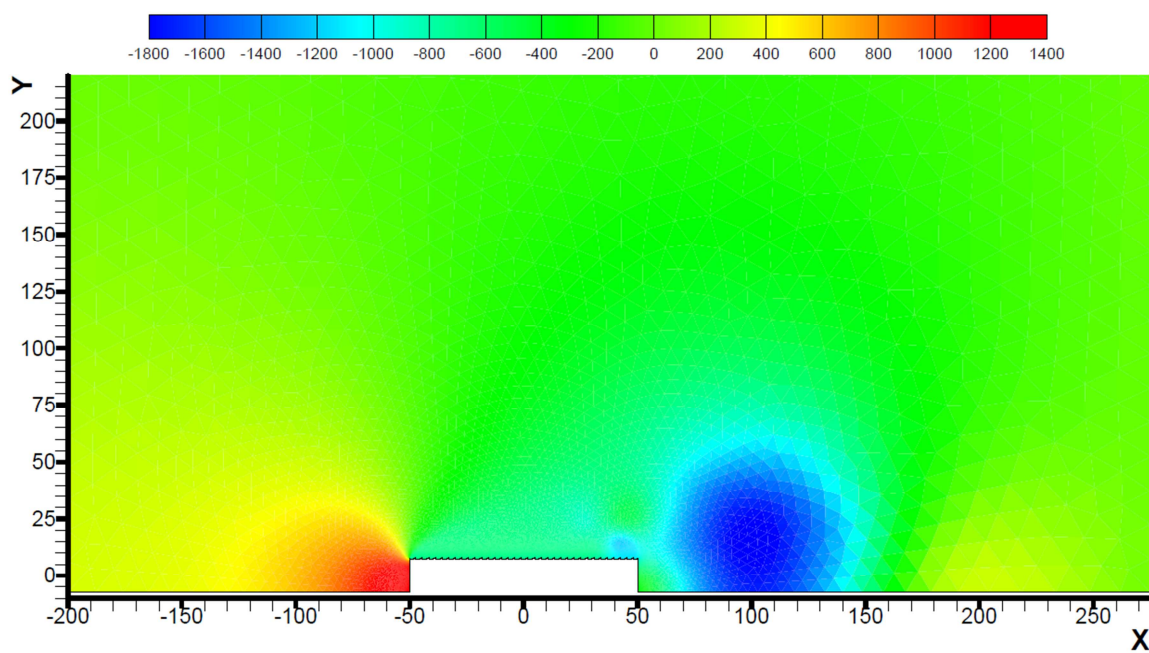
## 5.12. Simulacija H



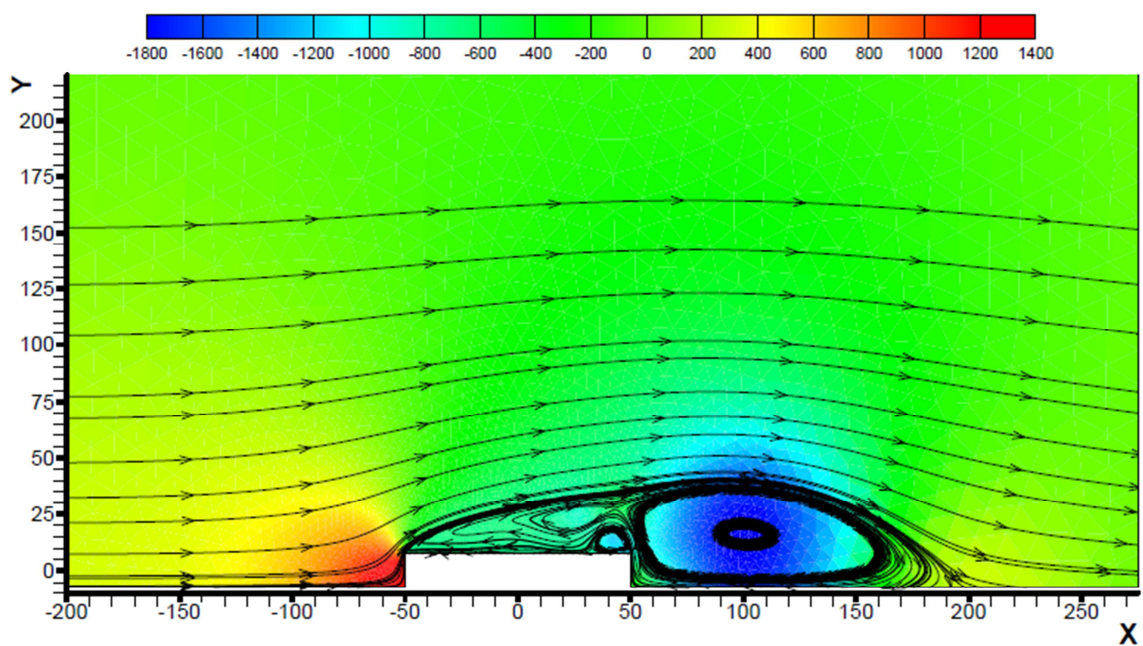
Slika 86. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H



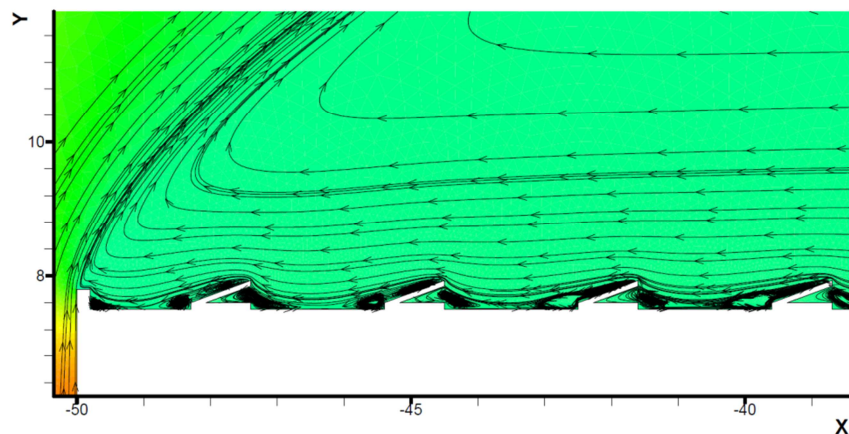
Slika 87. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H



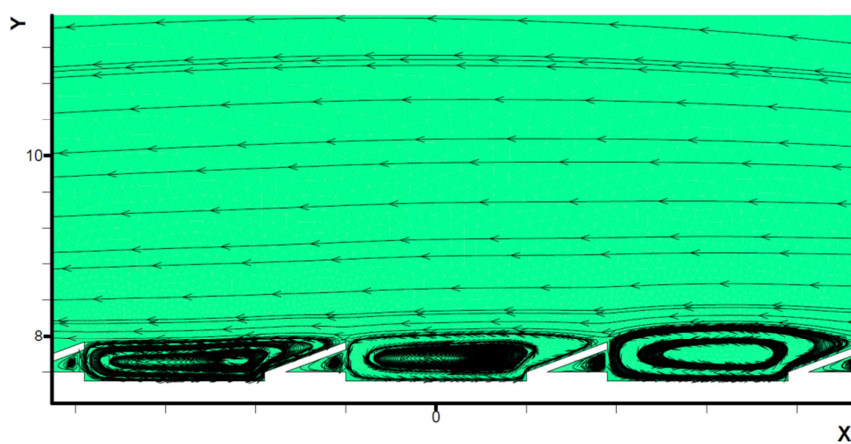
Slika 88. Polje tlaka simulacije H



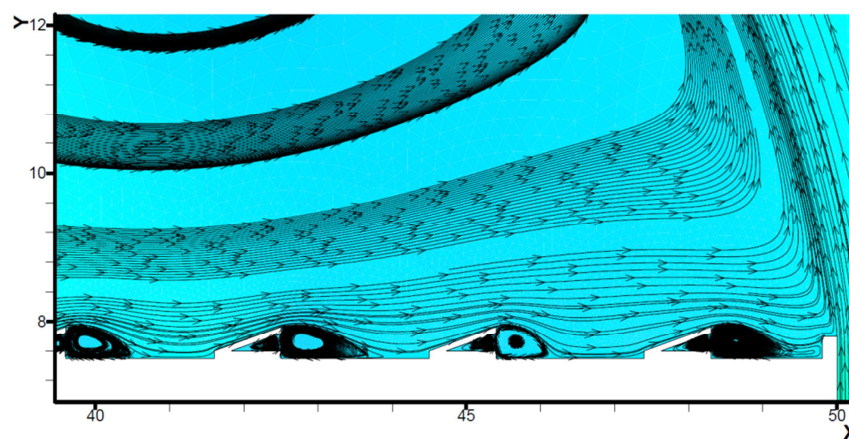
Slika 89. Strujnice simulacije H



Slika 90. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji H

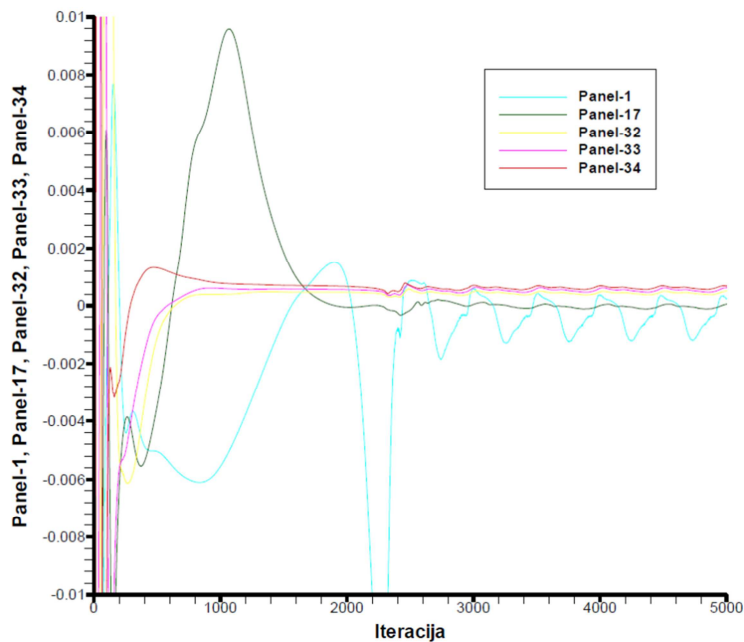


Slika 91. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji H

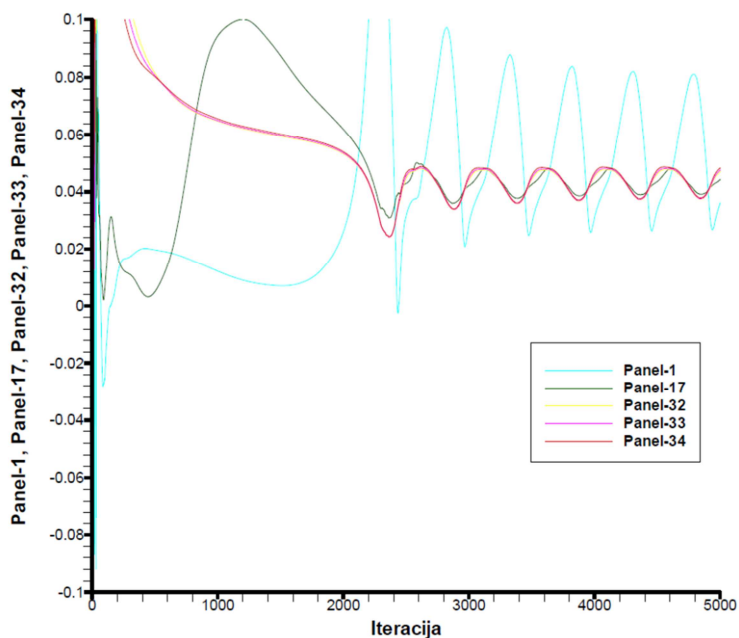


Slika 92. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H

### 5.13. Simulacija H sa suprotnim smjerom strujanja

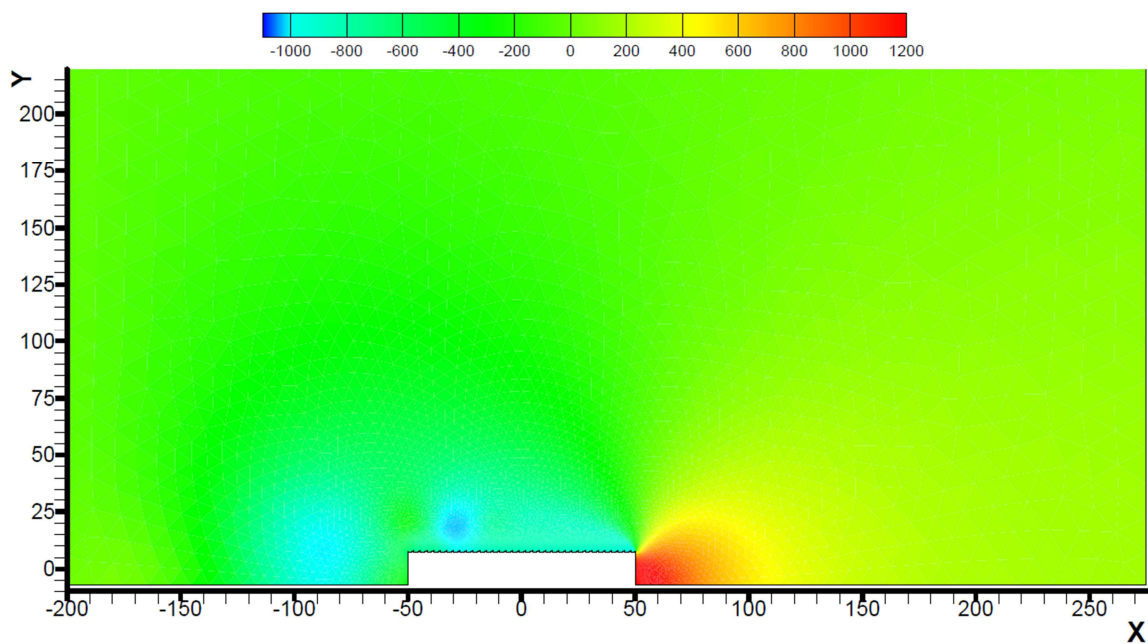


Slika 93. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja

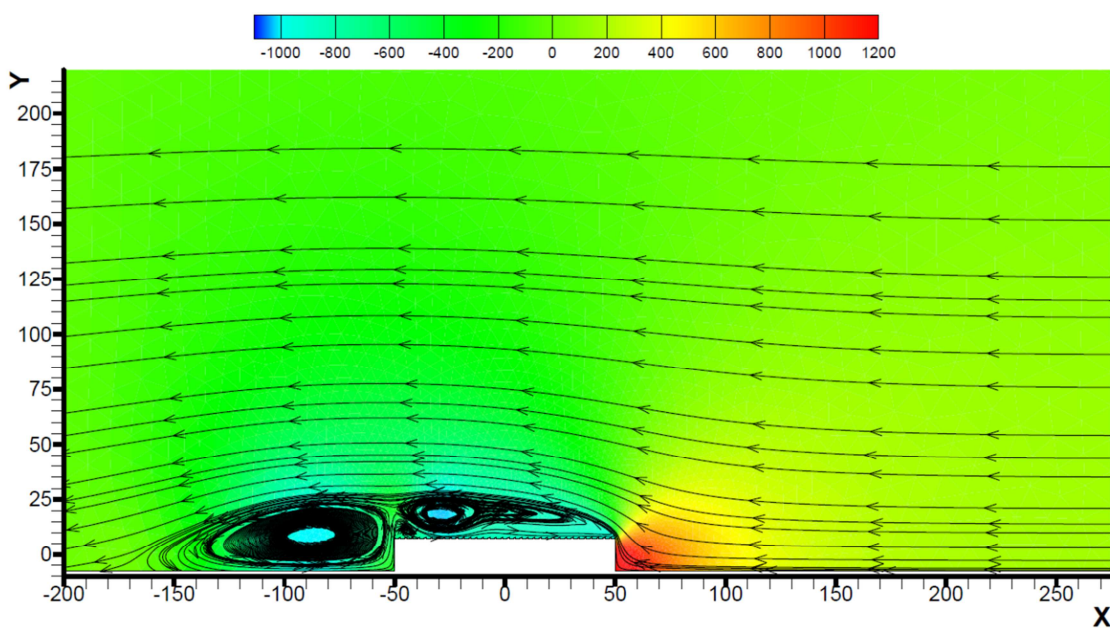


Slika 94. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja



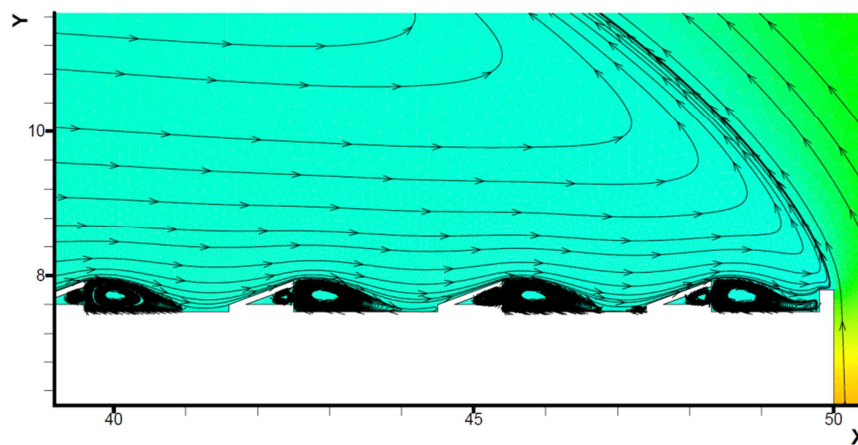


Slika 95. Polje tlaka simulacije H sa suprotnim smjerom strujanja

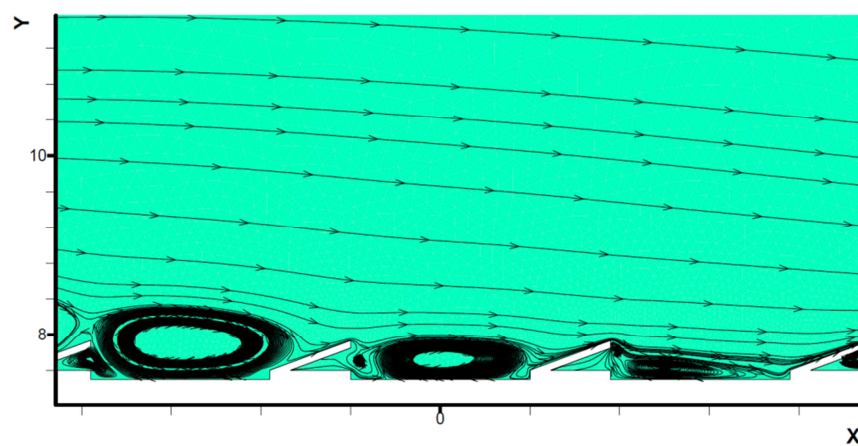


Slika 96. Strujnice simulacije H sa suprotnim smjerom strujanja

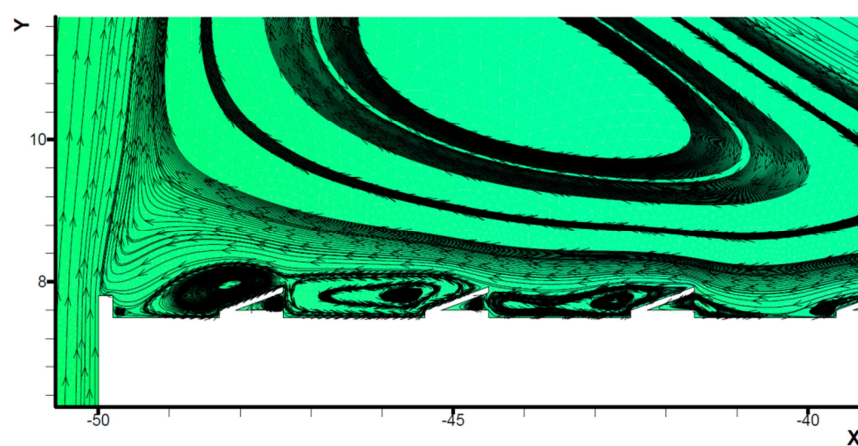




Slika 97. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja

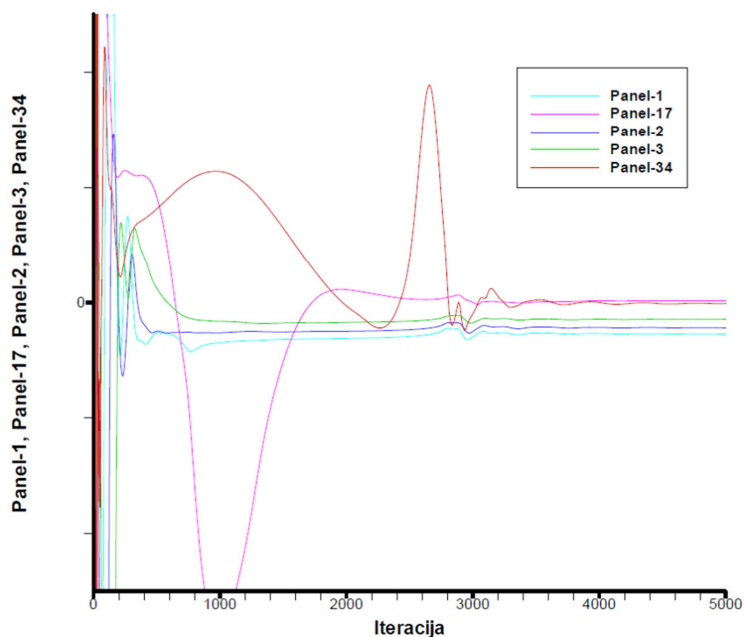
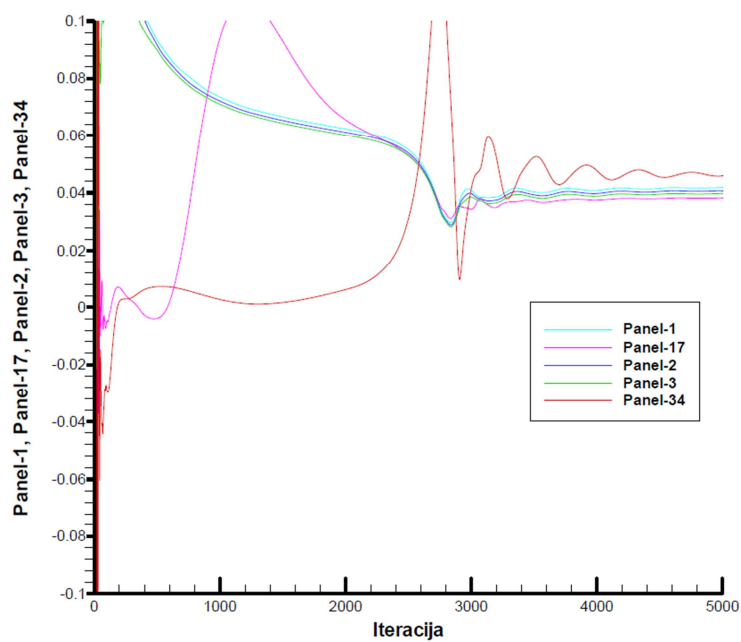


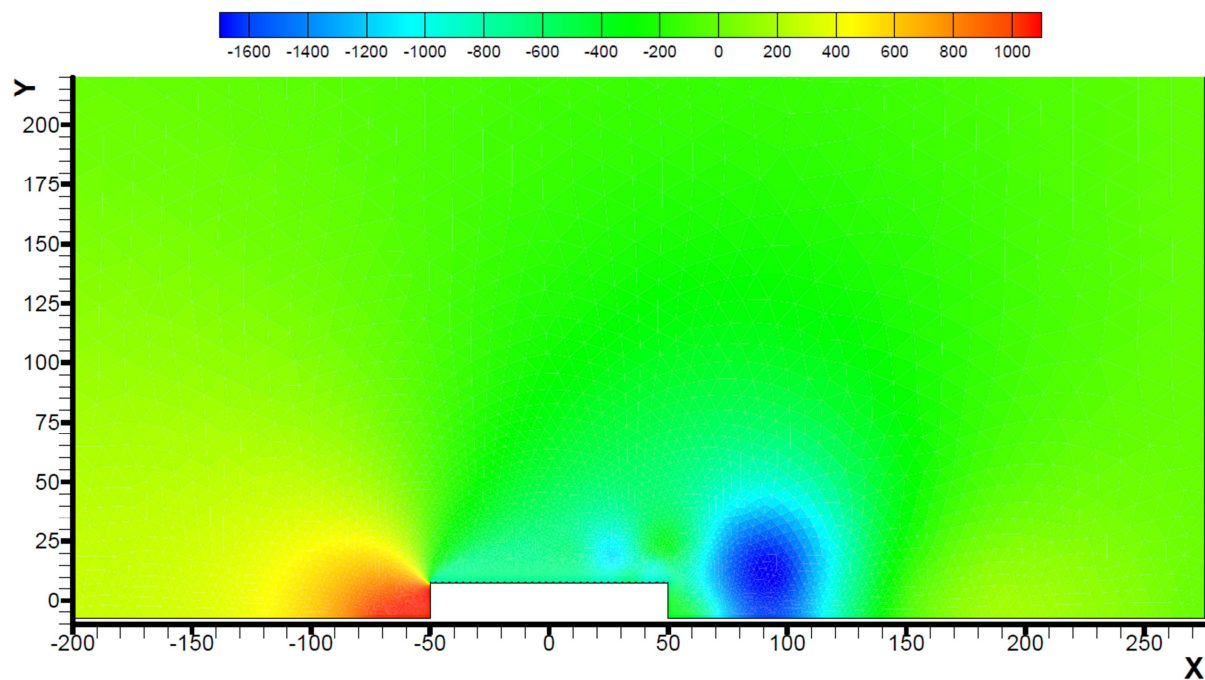
Slika 98. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja



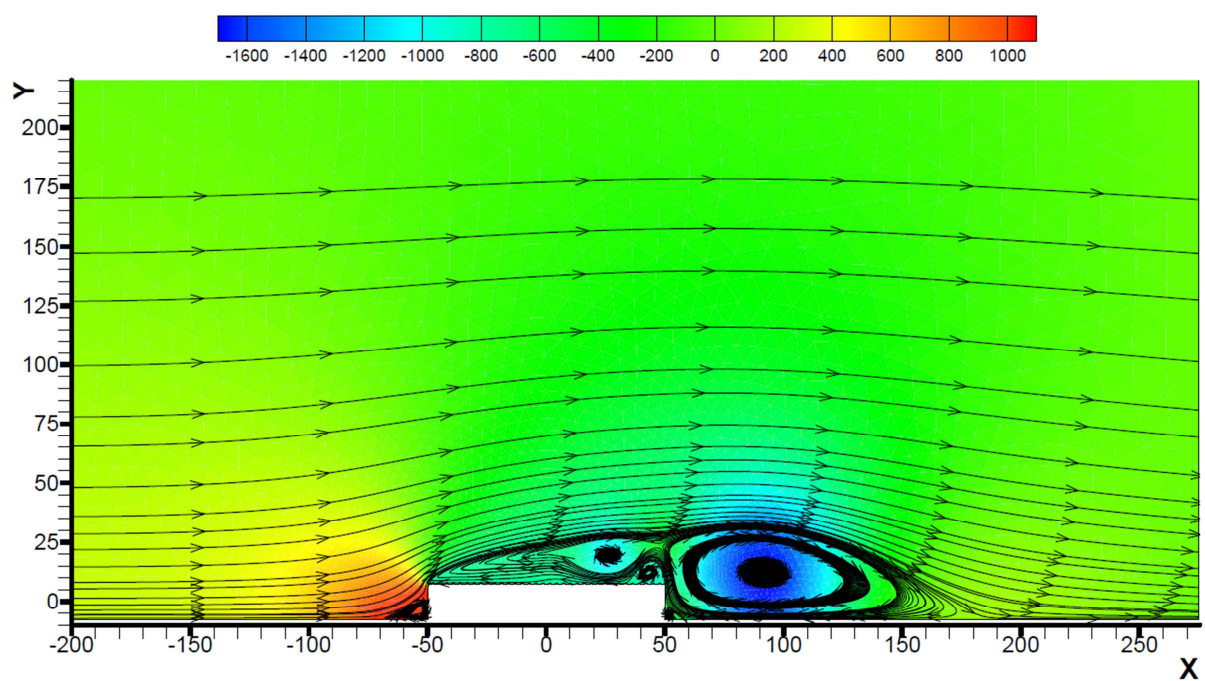
Slika 99. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji H sa suprotnim smjerom strujanja

## 5.14. Simulacija I

Slika 100. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji ISlika 101. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I

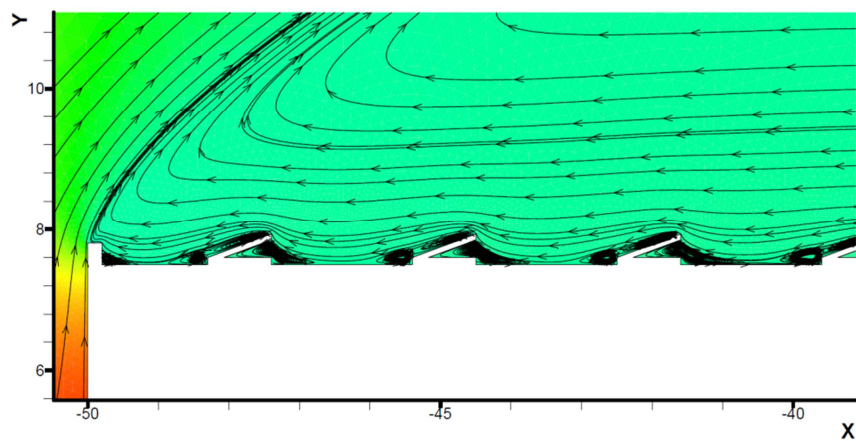


Slika 102. Polje tlaka simulacije I

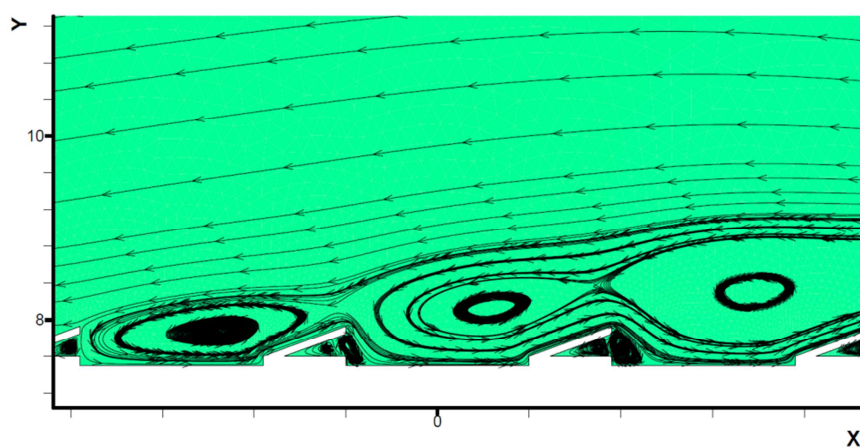


Slika 103. Strujnice simulacije I

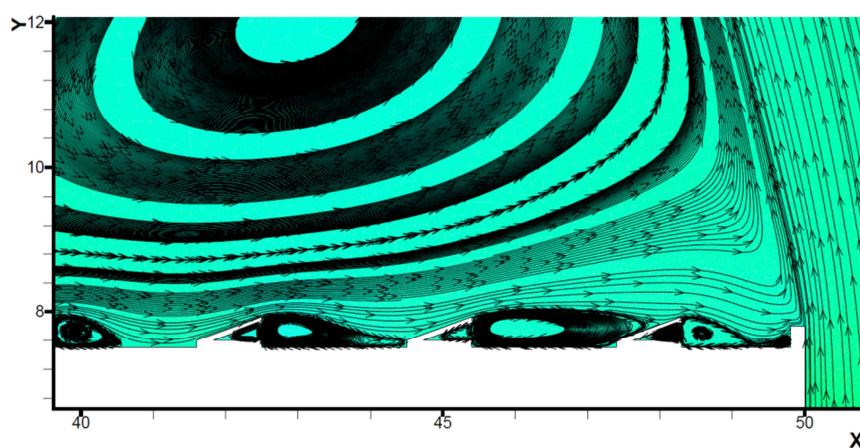




Slika 104. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji I

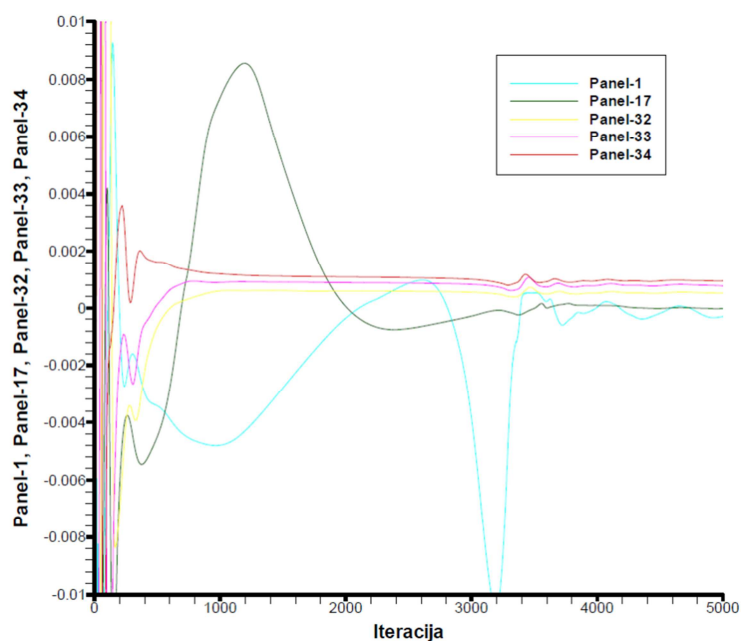


Slika 105. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji I

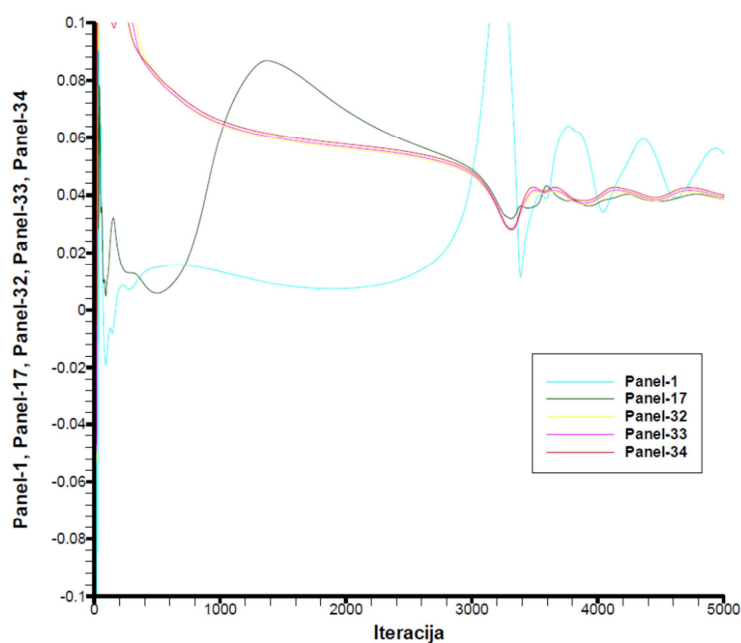


Slika 106. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I

### 5.15. Simulacija I sa suprotnim smjerom strujanja

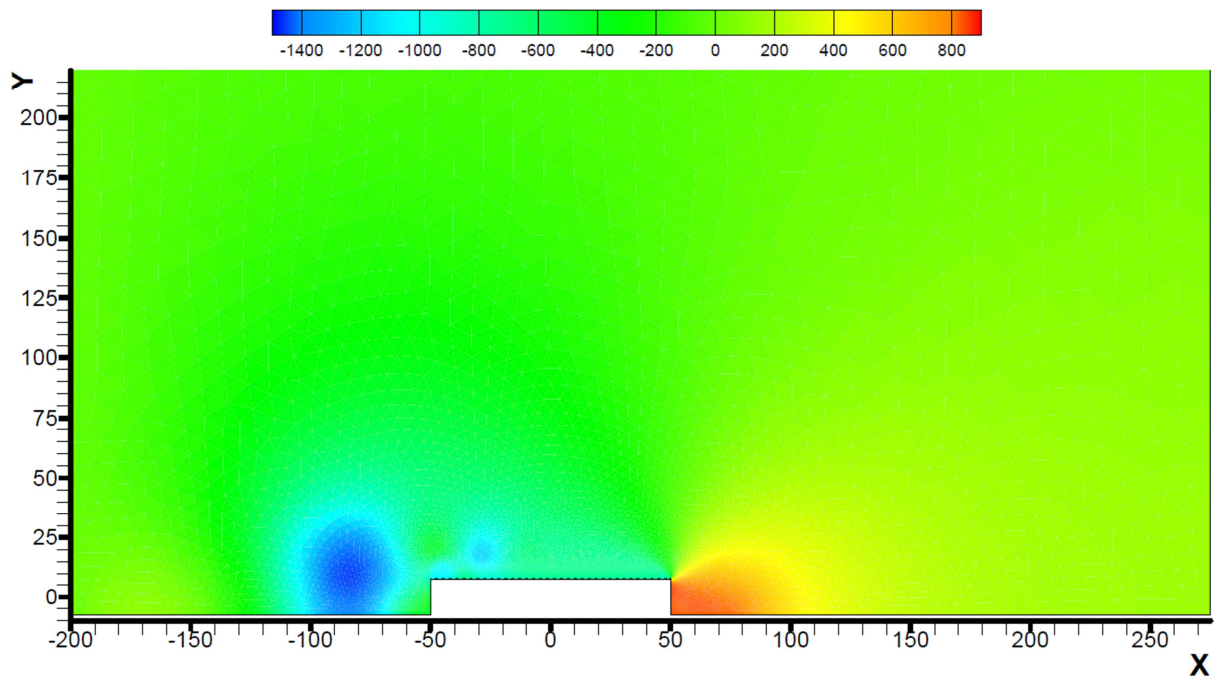


Slika 107. Konvergencija koeficijenta  $C_D$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja

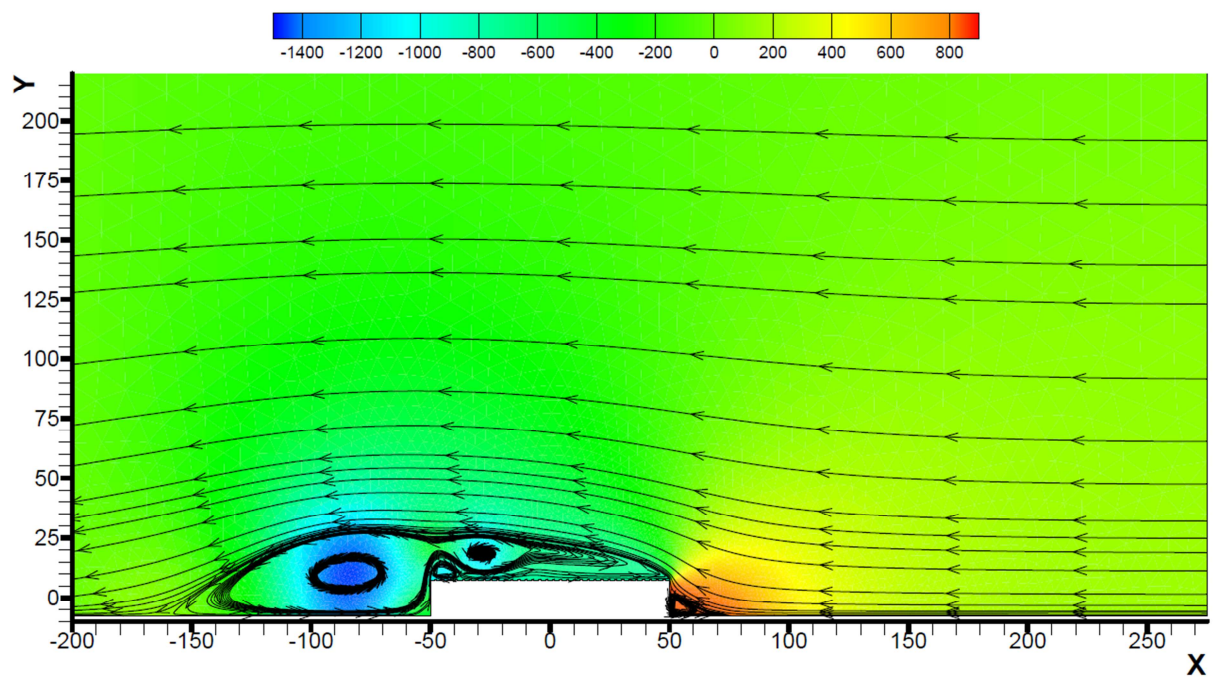


Slika 108. Konvergencija koeficijenta  $C_L$  za 1., 17., 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja

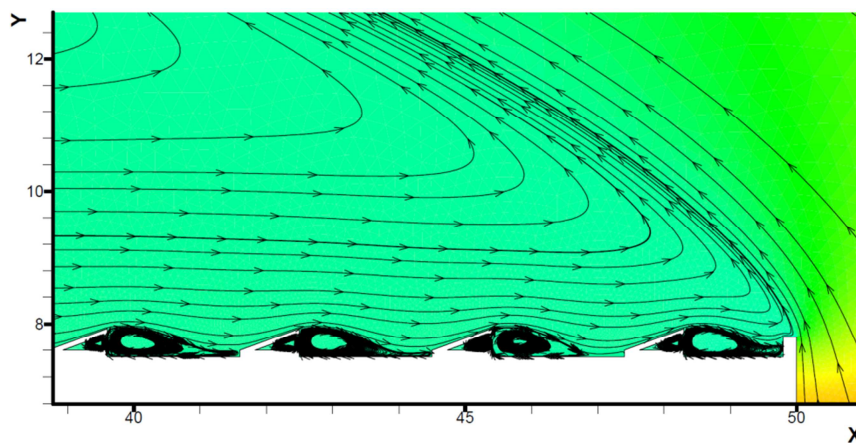




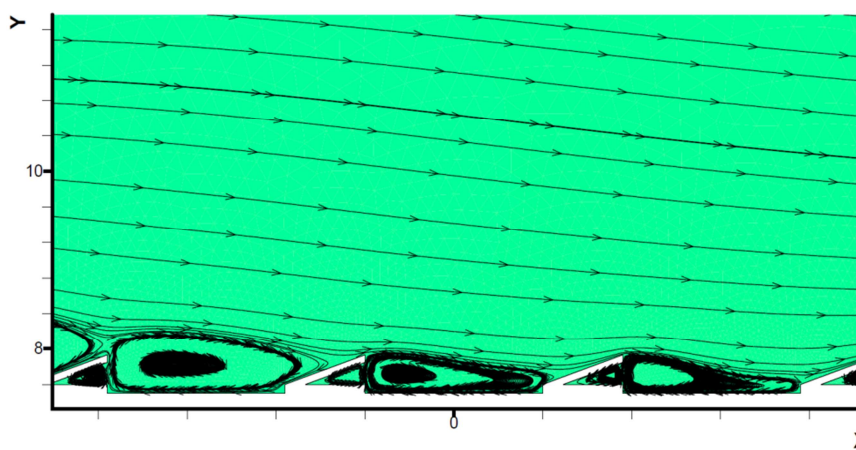
Slika 109. Polje tlaka simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja



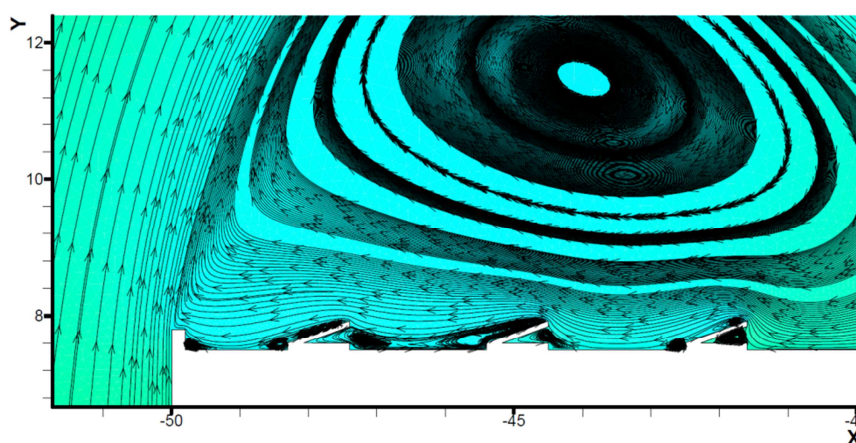
Slika 110. Strujnice simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 111. Opstrujavanje oko 32., 33. i 34. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 112. Opstrujavanje oko 17. reda panela (lijevi) u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja



Slika 113. Opstrujavanje oko 1., 2. i 3. reda panela u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja

## 6. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA

Zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata za ovaj problem koji bi služili kao referentne vrijednosti usvojena je pretpostavka da je hibridna mreža točnija od nestrukturirane mreže što je objašnjeno u poglavlju 4.2. *Mreže*.

Razlog povećanja/smanjenja vrijednosti koeficijenata među uspoređivanim simulacijama su razlike u polju tlaka oko zgrade koje čine različite brzine strujanja te dimenzije vrtloga oko promatrane zgrade. Suma razlika koje su posljedica različitih brzina strujanja i dimenzija vrtloga čini postojeće razlike u polju tlaka. Bitno je naglasiti kako je za razliku među koeficijentima otpora između promatranih simulacija najzaslužniji vrtlog iza zgrade a za koeficijent uzgona vrtlog iznad zgrade.

Također je bitno imati na umu da vrtlozi iznad panela, uz ostale uzročnike, doprinose povećanju/smanjenju sile otpora, jer zbog nagiba panela stvaraju dodatnu komponentu sile u smjeru  $X$  osi.

Razlika brzine strujanja kroz domenu i dimenzije vrtloga posljedica je oblika geometrije ili tipa, veličine i broja elemenata koji čine domenu tj. kvaliteti očitavanja gradijenata. Kao što je već navedeno, strukturirani slojevi su točniji od nestrukturiranih i bolje prikazuju gradijente fizikalnih svojstava koji definiraju vrijednost sila na čvrste stjenke (*vidi 3.1. Opis alata*).

U slikama strujnica [Slika 37, Slika 39, Slika 41, Slika 45, Slika 52, Slika 59, Slika 66, Slika 73, Slika 80, Slika 89, Slika 96, Slika 103 i Slika 110] vidi se da je iznad zgrade jedan glavni vrtlog velikih dimenzija koji je zaslužan za suprotan smjer strujanja zraka uz strop zgrade od smjera nastrujavanja zraka na zgradu (inicijalnog strujanja). To suprotno strujanje je određuje smjer sile otpora na panele. Vidi se da sila otpora ima suprotan smjer od smjera inicijalnog strujanja na svim panelima osim na onima koji se nalaze u područjima gdje dolazi do odvajanja graničnog sloja glavnog vrtloga od stropa zgrade. Na tim mjestima se stvaraju manji vrtlozi koji uz strop imaju jednaki smjer strujanja kao i inicijalno strujanje. Vidi se da se glavni vrtlog na dva mjesta odvaja od stropa zgrade. Prvo mjesto odvajanja nalazi se oko sredine zgrade a drugo prije kraja zgrade.

Iz tablice 11 se vidi da je sila otpora zanemariva u odnosu na silu uzgona. Sila otpora je 36 i više puta manja od sile uzgona, što čini manje od 3% apsolutne sile na panel.

Također se vidi da najveća uzgonska sila djeluje na zadnji panel promatrajući od smjera nastrujavanja i da najveća uzgonska sila od  $840N$  djeluje na panel 1 u suprotnom smjeru strujanja. Bitno je ovdje paziti na razmještaj panela koji je definiran u poglavlju 5.1. Izračunati koeficijenti otpora ( $C_D$ ) i uzgona ( $C_L$ ).

### 6.1. Usporedba simulacija A i B te B i C

Usporedbom slika polja tlaka i strujanja simulacija A i B [Slika 36, Slika 37, Slika 38 i Slika 39] vidi se da je u simulaciji A glavni vrtlog većeg intenziteta (područje plave boje je tamnije i većih dimenzija) a vrtlog iza zgrade manjeg intenziteta i dimenzija (područje plave boje je svjetlije i manjih dimenzija) nego kod simulacije B.

- Usporedba simulacije B u odnosu na simulaciju A [Tablica 10]:
  - Porast koeficijenta  $C_D$  za 2,1%
  - Pad koeficijenta  $C_L$  za 0,6%
  - Produženje vrtloga iz zgrade za  $20m$  tj. za 8,3%
  - Pad za  $v_{max}$  za 10,8%
  - 8% manja dužina graničnog sloja na stropu (5m ranije drugo odvajanje graničnog sloja)
- Usporedba simulacije C u odnosu na simulaciju B [Tablica 10]:
  - Pad koeficijenta  $C_D$  za 4,7%
  - Pad koeficijenta  $C_L$  za 7,3%
  - Skraćenje vrtloga iza zgrade za  $30m$  tj. za 11,5%
  - Pad za  $v_{max}$  za 6,6%
  - Jednaka dužina graničnog sloja ali se prvo odvajanje događa 10m prije

Iz navedenih usporedbi vidi se utjecaj dodavanja graničnog sloja uz čvrste stijenke zgrade i uz podloge oko zgrade na aerodinamične koeficijente. Treba uzeti u obzir da dodatna razlika između simulacija B i C [Slika 22 i Slika 23], koju čine uzdignuća na krajevima zgrade, također ima utjecaj u razlici rezultata. Vidi se da najveća razlika u silama iznosi 7,3% a među brzinama nad stropom 10,8%. Također se vidi da je veća razlika u polju tlaka nad stropom kod postavljanja graničnog sloja na same stijenke zgrade što se može opravdati boljom točnošću strukturiranih elemenata.

Promatranjem razlika u iznosu aerodinamičnih koeficijenata među istim panelima, za simulacije sa istom geometrijom ali različitim tipom mreže, vidi se da je taj postotak

višestruko veći nego kod usporedbe simulacija A i B. Npr. usporedbom simulacija D i E [Tablica 11] razlika prelazi i 100% za panel 17 što se također može opravdati boljom točnošću strukturiranih elemenata. Bitno je ovdje uzeti u obzir da su referentne površine zgrade  $\approx 100$  puta veće u x smjeru i  $\approx 35$  puta veće u y smjeru od referentnih površina panela. a dijele jednako diskretiziranu domenu tj. imaju elemente jednakih veličina, pa su i relativno male lokalne oscilacije za zgradu utjecajne za panele.

## **6.2. Usporedba simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na simulaciju F**

Usporedbom slika polja tlaka i strujanja simulacija F i F sa suprotnim smjerom strujanja [Slika 72, Slika 73, Slika 79 i Slika 80] vidi se da su opstrujavanja približno jednakog oblika i dimenzija. Razlike se vide na mjestima odvajanja glavnog vrtloga od stropa i veličini vrtloga iza zgrade.

Kod suprotnog smjera strujanja polje podtlaka iza zgrade je manje i slabije pa se i priljepljivanje graničnog sloja iza zgrade događa  $\approx 40$ m prije (pomak sa  $\approx 220$ m na  $\approx 180$ m).

Kod normalnog strujanja, drugo odvajanje glavnog vrtloga na stropu zgrade se događa  $\approx 5$ m prije nego kod suprotnog strujanja, zbog čega se povećava veličina, za  $\approx 5$ m, i intenzitet (veće je polje nižeg tlaka i tamnije je plave boje) manjeg vrtloga na kraju zgrade. Ta razlika povećava aerodinamične sile na panele na kraju zgrade. To se vidi i usporedbom sila na panel 34 simulacije sa normalnim i panela 1 simulacije sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11].

Prvo se odvajanje graničnog sloja glavnog vrtloga vidi na panelu 17 [Slika 75 i Slika 82]. Vidi se da su jednake veličine vrtloga oko panela 17 u oba smjera strujanja, iz čega se može zaključiti da se na jednakoj udaljenosti od kraja zgrade događa prvo odvajanje u obje simulacije.

Razlika sile uzgona od 12% na panel 17 je posljedica razlike polja tlaka (vidi se razlika u boji [Slika 75 i Slika 82]).

Usporedbom aerodinamičnih sila panela na koje prve nastupaju struja zraka [Slika 74 i Slika 81] vidi se da je veća uzgonska sila kod suprotnog strujanja. Razlog je područje nižeg tlaka (vidi se razlika u boji) nad promatranim panelima. Također se vide vrtlozi na stijenci panela kod normalnog strujanja koji povećavaju silu uzgona ali, prema Tablici 11, se može zaključiti da veći utjecaj ima razlika tlaka.



- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 1 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 15,2%
  - Rast sile uzgona za 7,2%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 33 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 2 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 1,6%
  - Rast sile uzgona za 8,5%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 31 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 3 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 1,6%
  - Rast sile uzgona za 9,9%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 34 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 62,8%
  - Rast sile uzgona za 9%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 1 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 92,5%
  - Rast sile uzgona za 29,5%
- Usporedba sila na panel 17 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 17 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 14,5%
  - Rast sile uzgona za 12%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 34 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 1750,6%
  - Pad sile uzgona za 9,74%

- Suprotan smjer sile otpora

Iz navedenih usporedbi vidi se utjecaj smjera strujanja na aerodinamične sile koje djeluju na panele oblika F [Slika 24]. Može se zaključiti da iako su promjene sile otpora višestruko veće od promjena sila uzgona, njihov utjecaj je zanemariv (*vidi 6. Usporedba i analiza rezultata*). Također se može zaključiti da najveće povećanje uzgonske sile od 29,5% ima panel 1. Panel 34 je na istom položaju ali on zbog svoje orijentacije ne trpi tolika povećanja.

### 6.3. Usporedba simulacije I u odnosu na simulaciju I sa suprotnim smjerom strujanja

Usporedbom slika polja tlaka i strujanja simulacija I i I sa suprotnim smjerom strujanja [Slika 102, Slika 103, Slika 109 i Slika 110] vidi se da su razlike opstrujavanja daleko manje nego kod simulacija F.

Kod suprotnog smjera strujanja polje podtlaka iza zgrade je manje i slabije (vidi se razlika u boji) pa se i priljepljivanje graničnog sloja iza zgrade događa  $\approx 20\text{m}$  prije (pomak sa  $\approx 180\text{m}$  na  $\approx 160\text{m}$ ).

Zanimljivo je da je dvostruko manja razlika veličine i intenziteta vrtloga na kraju zgrade u odnosu na simulacije F. To se također vidi usporedbom sila na panel 34 simulacije sa normalnim i panela 1 simulacije sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11].

Također je zanimljivo da je razlika polja tlaka iznad panela 17 manja i da se prvo odvajanje graničnog sloja glavnog vrtloga događa  $\approx 4\text{m}$  prije kod simulacije sa normalnim smjerom strujanja [Slika 105 i Slika 112]. Posljedica navedenog je da je sila uzgona na panel 17 4 puta manja [Tablica 11].

Usporedbom panela na koje prve nastupaju struja zraka [Slika 104 i Slika 111] vidi se da je polje tlaka veoma slično, što rezultira približno jednakim silama uzgona navedenih panela. [Tablica 11]

- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 1 u simulaciji I [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 13%
  - Pad sile uzgona za 0,7%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 33 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 2 u simulaciji I [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 7,6%

- Pad sile uzgona za 0,2%
- Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 31 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 3 u simulaciji I [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 8,5%
  - Rast sile uzgona za 1%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 34 u simulaciji I [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 276,1%
  - Rast sile uzgona za 4,1%
- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji I u odnosu na silu na panel 1 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 88,6%
  - Rast sile uzgona za 16,1%
- Usporedba sila na panel 17 u simulaciji I u odnosu na silu na panel 17 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 79,4%
  - Rast sile uzgona za 2,9%
- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 34 u simulaciji I [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 2962,8%
  - Pad sile uzgona za 11%
  - Suprotan smjer sile otpora

Iz navedenih usporedbi vidi se utjecaj smjera strujanja na aerodinamične sile koje djeluju na panele oblika I [Slika 25]. Može se zaključiti da najveće povećanje uzgonske sile od 16,1% ima panel 1 što je isto kao i kod usporedbe simulacija F (vidi 6.2. *Usporedba simulacije F sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na simulaciju F*).

#### 6.4. Usporedba simulacije I u odnosu na simulaciju F

Usporedbom slika strujanja i polja tlaka simulacija I i F [Slika 72, Slika 73, Slika 102 i Slika 103] vidi se da su razlike opstrujavanja veoma male ali da postoji razlika u intenzitetu polja tlaka. Najveća se razlika vidi u vrtlogu iza zgrade i u polju tlaka na kraju zgrade, kod panela 34. Po cijeloj dužini zgrade je približno jednaka razlika polja tlaka među simulacijama, osim na kraju zgrade, kod panela 34, gdje je ta razlika dvostruko manja. To se također vidi usporedbom sila uzgona među navedenim panelima [Tablica 11].

Kod simulacije I polje podtlaka iza zgrade je manje i slabije pa se i priljepljivanje graničnog sloja iza zgrade događa  $\approx 40\text{m}$  prije (pomak sa  $\approx 220\text{m}$  na  $\approx 180\text{m}$ ).

Vidi se da nema značajne razlike u mjestima odvajanja graničnog sloja glavnog vrtloga, niti strujanja oko panela na istim položajima u uspoređenim simulacijama.

- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji I u odnosu na sile na panel 1 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 10%
  - Rast sile uzgona za 14,3%
- Usporedba sila na panel 2 u simulaciji I u odnosu na sile na panel 2 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 23,3%
  - Rast sile uzgona za 15,4%
- Usporedba sila na panel 3 u simulaciji I u odnosu na sile na panel 3 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 23,5%
  - Rast sile uzgona za 15,2%
- Usporedba sila na panel 17 u simulaciji I u odnosu na sile na panel 17 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 4,1%
  - Rast sile uzgona za 14,5%
- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji I u odnosu na sile na panel 34 u simulaciji F [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 27,1%
  - Rast sile uzgona za 7,4%
  - Suprotan smjer sile otpora

Iz navedenih usporedbi vidi se utjecaj oblika panela na aerodinamične sile kod strujanja u normalnom smjeru u odnosu na referentni smjer strujanja (*vidi 1. Uvod, Slika 9*). Može se zaključiti da na panele oblika I djeluju 15% veće uzgonske sile nego na panele oblika F.

### **6.5. Usporedba simulacije I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na simulaciju F sa suprotnim smjerom strujanja**

Usporedbom slika strujanja i polja tlaka simulacija I i F sa suprotnim smjerom strujanja [Slika 79, Slika 80, Slika 109 i Slika 110] vidi se da su razlike u polju tlaka manje a razlike u opstrujavanju veće nego kod usporedbe istih simulacija sa normalnim smjerom strujanja.

Najveća razlika tlaka se vidi u dijelu domene iza zgrade a najveća razlika opstrujavanja na sredini zgrade. Utjecaj na sile se najbolje vidi usporedbom sila među panelima [Tablica 11].

Kod simulacije I polje podtlaka iza zgrade je manje i slabije pa se i priljepljivanje graničnog sloja iza zgrade događa  $\approx 20\text{m}$  prije (pomak sa  $\approx 180\text{m}$  na  $\approx 160\text{m}$ ).

Vidi se da nema značajne razlike u mjestima odvajanja graničnog sloja glavnog vrtloga.

- Usporedba sila na panel 1 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na sile na panel 1 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 64,4%
  - Rast sile uzgona za 2,6%
- Usporedba sila na panel 17 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na sile na panel 17 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 81,3%
  - Rast sile uzgona za 5,1%
  - Suprotan smjer sile otpora
- Usporedba sila na panel 32 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na sile na panel 32 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 14,9%
  - Rast sile uzgona za 5,8%
- Usporedba sila na panel 33 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na sile na panel 33 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Rast sile otpora za 12,1%
  - Rast sile uzgona za 6%



- Usporedba sila na panel 34 u simulaciji I sa suprotnim smjerom strujanja u odnosu na silu na panel 34 u simulaciji F sa suprotnim smjerom strujanja [Tablica 11]:
  - Pad sile otpora za 12,8%
  - Rast sile uzgona za 5,9%

Iz navedenih usporedbi vidi se utjecaj oblika panela na aerodinamične sile kod strujanja u suprotnom smjeru u odnosu na referentni smjer strujanja. Može se zaključiti da na panele oblika I djeluju 6% veće uzgonske sile nego na panele oblika F.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je bio cilj pokazati primjenu računalne metode konačnih volumena za aerodinamične probleme strujanja oko tupih tijela te analizirati jedan od aktualnih problema postavljanja solarnih panela na ravni strop gospodarske zgrade. Provedenim simulacijama cilj je ispunjen, te su dobiveni odgovori na mnoga pitanja. U radu se nije detaljno ulazilo u kvantitativnu točnost dobivenih simulacija jer je za to ipak potreban veći opseg ispitivanja a time i vremena.

Analiza pokazuje da je sila otpora zanemariva u odnosu na silu uzgona, da najveća sila uzgona djeluje na zadnji panel, promatrajući od smjera nastrujavanja, te da smjer nastrujavanja značajno utječe na iznos sile uzgona koje djeluju na promatrane solarne panele. Nadalje došlo se do zaključka da bi se odmicanjem solarnih panela od ruba zgrade mogle smanjiti aerodinamične sile.

Najzanimljiviji detalj u analizi je da oblik solarnih panela ima značajan utjecaj na sile koje djeluju na njega te da je oblik panela koji ima zatvoren prostor sa zadnje strane značajno bolji od onog koji nema.

## **8. PRILOZI**

I. CD-R disk

## 9. LITERATURA

- [1] <http://www.dynamiq-eng.co.uk/pages/aerodynamics.php>
- [2] <http://inhabitat.com/building-information-modeling/bim-wind-flow-model/>
- [3] <http://www.engineering.com/Library/ArticlesPage/tabid/85/ArticleID/171/Tacoma-Bridge.aspx>
- [4] [http://simple.wikipedia.org/wiki/File:Systems\\_to\\_save\\_the\\_Tacoma\\_Narrows\\_bridge.jpg](http://simple.wikipedia.org/wiki/File:Systems_to_save_the_Tacoma_Narrows_bridge.jpg)
- [5] <http://www.london-se1.co.uk/news/view/3176>
- [6] <http://generate-power.maxupdates.tv/3-reasons-to-use-solar-panels-on-your-roof>
- [7] <http://generate-power.maxupdates.tv/solar-energy-believe-the-hype>
- [8] <http://www.australiansolarquotes.com.au/solar-panels-floods-safety-advice>
- [9] <http://wings.avkids.com/Tennis/Book/laminar-01.html>,  
<http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/VehicleAero.htm>
- [10] Luka Sopta, Lado Kranjčević: Mehanika fluida, Skripta za Studente Tehničkog Fakulteta u Rijeci, Rijeka 2006.
- [11] Buresti G.: Bluff Body Aerodynamics Lecture Notes, Department of Aerospace Engineering, University of Pisa, Italy 2000.
- [12] Prof.dr.sc. Vladimir Andročec, MEHANIKA TEKUĆINA, 4. PREDAVANJE
- [13] Šoda A., Mannini, C., Sjerid, M.: Investigation of Unsteady air Flow Around Two-Dimensional Rectangular Cylinders, Transactions of FAMENA XXXV-2 (2011), Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, ISSN 1333-1124
- [14] Virag, Z.: Mehanika Fluida II - Što valja zapamtiti, FSB, Zagreb 2009.
- [15] Kesić P. : Osnove aerodinamike, skripta, FSB, Zagreb, 2000.
- [16] Newcamp J. : Bluff Body Aerodynamics and Flow Separation, AME 342, 2002
- [17] Oertel H.: Introduction to Fluid Mechanics, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe 2005.
- [18] Hucho W. H.: Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition
- [19] Džijan I.: Računalna dinamika fluida, 2010, [http://www.fsb.unizg.hr/hydro/web\\_pdf/](http://www.fsb.unizg.hr/hydro/web_pdf/)
- [20] Jiyuan T., Guan., H. Y., Chaoquin, L.: Computational Fluid Dynamics, USA 2008.
- [21] GAMBIT 2.2 Documentation

- [22] Blockena B., Stathopoulos T., Carmeliet J. : CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, *Atmospheric Environment* 41 (2007) 238–252
- [23] Zhou Y., Kijewski T., Kareem A. : Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database, *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE / MARCH 2003*.
- [24] Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. : Best practice guideline for the cfd simulation of flows in the urban environment, *COST Action 732 Quality assurance and improvement of microscale meteorological models*, COST Office 2007.
- [25] Tominaga Y., Yoshie R., Mochida A., Kataoka H., Harimoto K., Nozu T. : Cross Comparisons of CFD Prediction for Wind Environment at Pedestrian Level around Buildings, Part 2 : Comparison of Results for Flowfield around Building Complex in Actual Urban Area, *APCWE-VI, Korea 2005*
- [26] <http://web.mit.edu/newsoffice/2007/solar-panel.jpg>
- [27] [www.ansys.com](http://www.ansys.com), *Fluent 6.2.16 Help*
- [28] <http://courses.washington.edu/mengr543/reports/teymour-report.pdf>