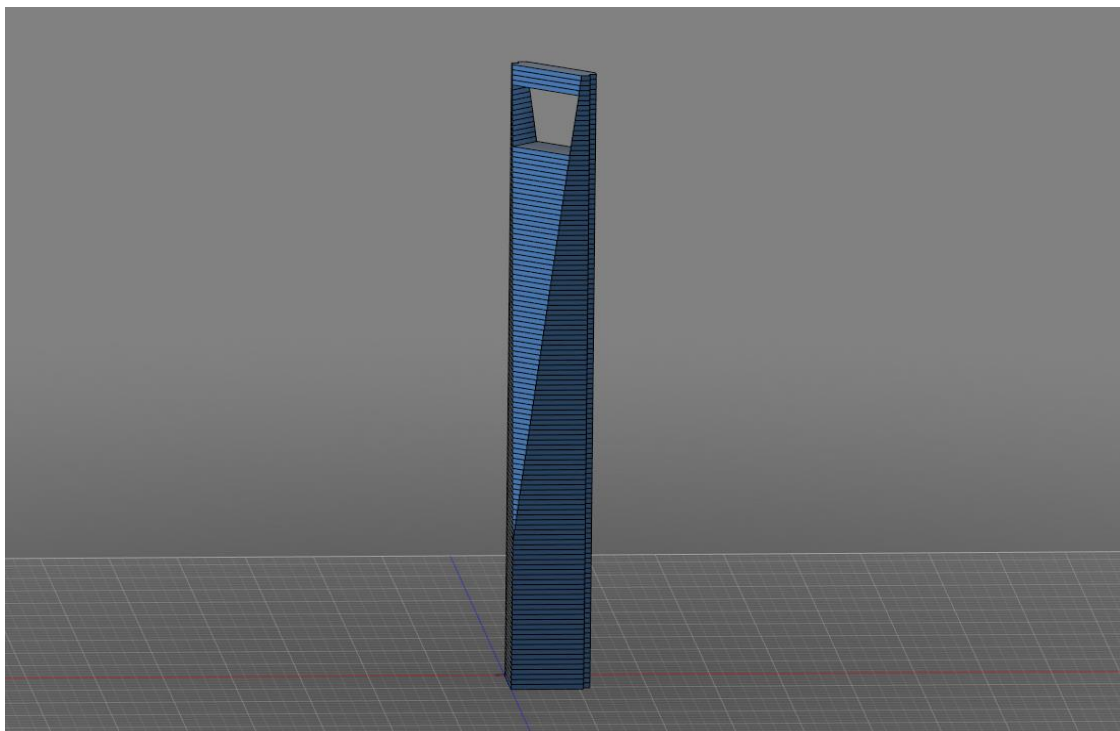




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

**Διερεύνηση μέσω λογισμικού της επίδρασης του ανέμου  
στο σχεδιασμό υψηλών κτιρίων**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κυριακίδης Δ. Σωτήριος**

Επιβλέπων: Εμμανουήλ Βουγιούκας

Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Τζουβαδάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διερεύνηση μέσω λογισμικού της επίδρασης του ανέμου  
στο σχεδιασμό υψηλών κτιρίων**

**Κυριακίδης Δ. Σωτήριος**  
Επιβλέπων: Εμμανουήλ Βουγιούκας  
Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Τζουβαδάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



Copyright © Κυριακίδης Σωτήριος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική, με τίτλο «Διερεύνηση μέσω λογισμικού της επίδρασης του ανέμου στον σχεδιασμό υψηλών κτιρίων», εκπονήθηκε για τον τομέα Δομοστατικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. από τον φοιτητή Κυριακίδη Σωτήριο. Αντικείμενο της αποτελεί η μελέτη της επίδρασης του ανέμου σε υψηλά κτίρια, αναλόγως της μορφής αυτών. Υπεύθυνος της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής του Ε.Μ.Π., κ. Βουγιούκας Εμμανουήλ και συνεπιβλέπων ο κ. Τζουβαδάκης Ιωάννης, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω για την επίβλεψη και τον χρόνο που αφιέρωσαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το στενό φίλο και συμφοιτητή Θεόδωρο Μούρτη, με τον οποίο έχουμε συνεργαστεί και σε ανάλογα θέματα στο παρελθόν, όπως και τον Ιωάννη Νικολέτο του οποίου οι μηχανολογικές γνώσεις συνέβαλαν αποφασιστικά.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη στο φιλικό και οικογενειακό μου περιβάλλον για την στήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα. Χωρίς την συμβολή όλων των παραπάνω η πραγμάτωση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Σ. Κυριακίδης





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην μελέτη και κατανόηση της διαφοροποίησης της συμπεριφοράς του ανέμου, αλλά και της δράσης του συγκριτικά με το αντικείμενο το οποίο παρεμβάλλεται στην ροή του.

Σε πρώτη φάση, η μελέτη υπαρχόντων υψηλών κτιρίων οδηγεί σε κάποια προκαταρκτικά συμπεράσματα όσο αφορά την κατανόηση της γενικότερης συμπεριφοράς του ανέμου σε σχέση με την μορφή του εμποδίου.

Σε δεύτερη φάση, γίνεται προσπάθεια γένεσης νέων ιδεών, σχετικά με την μορφή του κτιρίου, για την όλο και περισσότερο καλύτερη αντιμετώπιση των φορτίων του ανέμου. Αυτή η παραμετροποίηση γίνεται σταδιακά με βάση τα προηγουμένως εξαχθέντα συμπεράσματα από την πρώτη φάση. Η παραμετροποίηση αυτή, για να έχει αξιόπιστα αποτελέσματα, κρατάει σταθερά τα εξής χαρακτηριστικά: Πρώτον το ύψος του κτιρίου, ίσο με 400 m, και δεύτερον το εμβαδό της κάτοψης ισογείου. Αλλάζουμε την μορφή της κάτοψης, κάτι που οδηγεί σε διάφορα σενάρια.

Κύρια επιδίωξη είναι η δημιουργία ενός υψηλού κτιρίου συμμετρικού ως προς άξονα, δηλαδή κτιρίου που να έχει την ίδια συμπεριφορά από οποιαδήποτε διεύθυνση προσβολής του από τα φορτία του ανέμου, το οποίο να εμφανίζει ικανοποιητική αεροδυναμική συμπεριφορά με στόχο την ελαχιστοποίηση της καταπόνησης του.

Ένα μοντέλο με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά προτείνεται και μελετάται στο τέλος της διπλωματικής αυτής εργασίας, στο οποίο αξιοποιούνται οι πληροφορίες που προέκυψαν από την μελέτη που προηγήθηκε.



## **Abstract**

The subject of this thesis is the study and understanding of the change in wind's response, as well as its force, compared to the object that is opposite to the wind's flow.

First of all, the study of real-life tall buildings leads to some preliminary results concerning the general understanding of the wind's behavior towards the shape of the building it faces.

Furthermore, an attempt is being made towards the creation of new ideas concerning the shape of the tall building, which purpose is to minimize the wind's force and abnormalities. This customization takes place gradually, in continuation of the previously exported results. For the reliability of those results, the customization that is being made holds some basic grounds: Firstly the height of the building, equal to 400 m, and secondly the base floor area, equal to 1600 m<sup>2</sup>. The shape of the floor plan is being changed, which is something that leads to different scenarios.

The main objective is the making of the shape of a tall building with a single or double axis of symmetry, meaning a building that has the same response whichever the wind's direction. This building has to produce satisfactory aerodynamic behavior, which goal is to minimize the force that takes place.

A model with the previously noted characteristics is suggested and is also put under study in the closing chapter of this thesis. This suggested model takes into account all of the information that was gathered from the previously made study.



## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1	Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2	Δομή της εργασίας .....	1
2.	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	3
2.1	Ουρανοξύστες .....	3
2.1.1	Ιστορική αναδρομή-Ανάγκη για δημιουργία ψηλών κτιρίων .....	3
2.2	Υπό μελέτη κτίρια.....	3
2.3	Άνεμος.....	6
2.3.1	Σημαντικότητα .....	6
2.3.2	Μονάδες μέτρησης, κλίμακες, τυπικές τιμές.....	6
2.3.3	Διαφορές ανά περιοχή και ανάγλυφο.....	7
2.3.4	Ευρωκώδικας και παραδοχές.....	8
2.4	Τούνελ Αέρα.....	10
2.4.1	Ιστορικά στοιχεία.....	10
2.4.2	Στοιχεία .....	10
2.4.3	Χρήση .....	11
2.4.4	Προσομοίωση-Υπολογιστές .....	12
2.5	Αντίσταση και συντελεστής αντίστασης .....	13
3.	Προγράμματα Σχεδιασμού και Ανάλυσης.....	15
3.1	Μοντέλα: Fusion 360 Autodesk .....	15
3.2	Ανάλυση: Flow Design Autodesk .....	15
4.	Ουρανοξύστες.....	17
4.1	Ταίρει 101 .....	17
4.1.1	Γενικά στοιχεία .....	17
4.1.2	Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	18
4.1.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	19
4.2	Willis Tower .....	27
4.2.1	Γενικά στοιχεία .....	27
4.2.2	Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	28
4.2.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	29
4.3	Westin Peachtree Plaza.....	36
4.3.1	Γενικά στοιχεία .....	36

4.3.2	Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	36
4.3.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	38
4.4	Shanghai WFC .....	41
4.4.1	Γενικά στοιχεία .....	41
4.4.2	Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	42
4.4.3	Αποτελέσματα ανάλυσης.....	44
4.5	Συμπεράσματα.....	57
5.	Παραμετροποίηση σχήματος .....	59
5.1	Παραδοχές.....	59
5.1.1	Άνεμος.....	59
5.1.2	Έδαφος – Συνοριακές συνθήκες.....	59
5.2	Τρόπος σκέψης-Λογική.....	60
5.3	Τετραγωνική κάτοψη.....	61
5.3.1	Σενάριο 1.....	61
5.3.2	Σενάριο 2.....	66
5.4	Στρογγυλευμένες γωνίες .....	66
5.4.1	Σενάριο 1.....	66
5.4.2	Σενάριο 2.....	72
5.5	Στρογγυλευμένες γωνίες με τρύπες.....	72
5.5.1	Σενάριο 1.....	74
5.5.2	Σενάριο 2.....	78
5.6	Κύλινδρος.....	78
6.	Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Πρόταση .....	85
6.1	Πινακοποίηση αποτελεσμάτων παραμετροποίησης .....	85
6.1.1	Τετραγωνική κάτοψη .....	85
6.1.2	Τετραγωνική με στρογγυλευμένες γωνίες.....	85
6.1.3	Τετραγωνική με στρογγυλευμένες γωνίες και οπές.....	86
6.1.4	Κυκλική.....	86
6.2	Πρόταση .....	86
6.2.1	Χαρακτηριστικά μοντέλου.....	87
6.2.2	Χαρακτηριστικά οπών .....	90
6.2.3	Αποτελέσματα ανάλυσης μοντέλου πρότασης .....	91
7.	Επίλογος – Προτάσεις περαιτέρω μελέτης.....	99
8.	Βιβλιογραφία.....	101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	103
Autodesk Fusion 360 .....	103
Χρήση Flow Design.....	103





# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η μελέτη και κατανόηση της διαφοροποίησης της συμπεριφοράς του ανέμου και της δράσης του σε σχέση με το αντικείμενο που παρεμβάλλεται στην ροή του.

Σε πρώτη φάση, η μελέτη υπαρχόντων υψηλών κτιρίων οδηγεί σε κάποια προκαταρκτικά συμπεράσματα όσο αφορά την κατανόηση της γενικότερης συμπεριφοράς του ανέμου σε σχέση με την μορφή του εμποδίου. Σε δεύτερη φάση, γίνεται προσπάθεια γένεσης νέων ιδεών, σχετικά με την μορφή του κτιρίου, για την όλο και περισσότερο καλύτερη αντιμετώπιση των φορτίων του ανέμου. Αυτή η παραμετροποίηση γίνεται σταδιακά με βάση τα προηγουμένως εξαχθέντα συμπεράσματα από την πρώτη φάση. Η παραμετροποίηση αυτή, για να έχει αξιόπιστα αποτελέσματα, κρατάει σταθερά τα εξής χαρακτηριστικά: Πρώτον το ύψος του κτιρίου, ίσο με 400 m, και δεύτερον το εμβαδό της κάτοψης ισογείου. Αλλάζουμε την μορφή της κάτοψης, κάτι που οδηγεί σε διάφορα σενάρια.

Κύρια επιδίωξη είναι η δημιουργία ενός υψηλού κτιρίου συμμετρικού ως προς άξονα, δηλαδή κτιρίου που να έχει την ίδια συμπεριφορά από οποιαδήποτε διεύθυνση προσβολής του από τα φορτία του ανέμου, το οποίο να εμφανίζει ικανοποιητική αεροδυναμική συμπεριφορά με στόχο την ελαχιστοποίηση της καταπόνησης του.

## 1.2 Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας και της γενικότερης δομής της. Αναφέρονται επιγραμματικά τα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου της.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε βασικές γνώσεις που απαιτούνται-διευκολύνουν την κατανόηση του συνόλου της εργασίας. Αυτή περιέχει γενικά στοιχεία γύρω από τα ψηλά κτίρια, και κάποια ιστορικά στοιχεία. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση στα αίτια που καθιστούν τον άνεμο ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο υπολογισμού και ακόμη παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία για την λειτουργία και τα αποτελέσματα των Τούνελ Αέρα. Τέλος, παρουσιάζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας, οι λόγοι που επιλέχθηκε έναντι άλλων και επισημαίνονται κάποια κύρια στοιχεία για την κατανόηση της λειτουργίας τους, και την σωστή χρήση τους.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα τέσσερα υπάρχοντα κτίρια που εμφανίζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ακόμη, εξάγονται και παρατίθενται τα αποτελέσματα από την μελέτη αυτών των τεσσάρων υπαρχόντων

χαρακτηριστικών περιπτώσεων σχήματος ψηλών κτιρίων. Εξάγονται επίσης κάποια προκαταρκτικά συμπεράσματα που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια. Καθοριστικός είναι ο καθορισμός του αεροδυναμικού (ολικού) συντελεστή αντίστασης  $C_d$ .

Στο κεφάλαιο 5 επιχειρείται, μέσω παραμετροποίησης, η μείωση του συντελεστή αντίστασης μέσω διαδοχικών δοκιμών-πειραμάτων εναλλακτικών μοντέλων. Άμεση συνέπεια αυτής της μείωσης είναι οι ηπιότερες ανομοιομορφίες στην ροή του ανέμου, όπως οι τοπικές επιταχύνσεις ή οι τοπικές αποκολλήσεις. Παρουσιάζονται εκτενώς και με κατάλληλα εργαλεία παρουσίασης όλα τα σημαντικά αποτελέσματα της ανάλυσης.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται συνολική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, και αναλύονται διεξοδικά οι διαφορές που παρουσιάστηκαν. Υπάρχει επίσης η παρουσίαση των καταληκτικών συμπερασμάτων σε σχέση με την αντιστοιχία μορφής κτιρίου- ανέμου, και την διαφοροποίηση του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει των αλλαγών που λαμβάνουν χώρα. Τέλος, παρουσιάζεται και μελετάται μία πρόταση αεροδυναμικά αποδοτική.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται σύνοψη των συμπερασμάτων που εξάγονται γενικότερα από την παρούσα διπλωματική εργασία και προτείνονται στοιχεία που χρειάζονται περαιτέρω μελέτη και έρευνα πάνω στο πεδίο αυτό.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπάρχει παράρτημα σχετικό με την χρήση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Ουρανοξύστες

#### 2.1.1 Ιστορική αναδρομή-Ανάγκη για δημιουργία ψηλών κτιρίων

Ο πρώτος ουρανοξύστης που κατασκευάστηκε τοποθετείται χρονικά το 1885 στο Σικάγο. Η συνέχεια της τάσης αυτής μεταφέρθηκε στην Νέα Υόρκη και έπειτα πέρασε στην Ασία σε πόλεις όπως το Τόκιο, η Σαγκάη και το Χονγκ Κονγκ αλλά και στα Αραβικά Εμιράτα.

Δύο κυρίως λόγοι οδήγησαν στην γένεση της ιδέας και την ανάπτυξη της.

Αρχικά η ίδια η τεχνολογική εξέλιξη και οι γνώσεις που αποκτήθηκαν εκείνη την εποχή, δηλαδή ο ασφάλινος σκελετός και οι ανελκυστήρες, οδήγησε στην χρήση της.

Επίσης, τα τελευταία χρόνια, λόγω πολλών παραγόντων ξεκίνησε να παρατηρείται συνωστισμός ατόμων σε πολύ μικρό χώρο, φαινόμενο που έχει πολλαπλές αιτίες. Αυτό το γεγονός επέβαλε την ανάγκη για περισσότερες κατοικίες-γραφεία σε περιορισμένο χώρο, είναι αυτό που ονομάζουμε κάθετη δόμηση.

Επομένως στις μεγαλουπόλεις ολοένα και κρίνεται επιτακτική η ανέγερση ψηλών κτιρίων, ακριβώς για την κάλυψη των αυξημένων αυτών αναγκών. Λόγοι οικονομικοί επομένως αλλά και εξοικονόμησης χώρων οδήγησαν τις σημερινές μεγαλουπόλεις στην σημερινή τους μορφή. Πόλεις όπως η Νέα Υόρκη, το Λονδίνο και το Τόκιο αποτελούνται κυρίως από ουρανοξύστες.

Οι ουρανοξύστες εξυπηρετούν πολλές ανάγκες όπως είναι γραφεία μεγάλων εταιρειών, ξενοδοχειακές μονάδες αλλά και κατοικίες. Φιλοξενούν ακόμη μεγάλες ομάδες αιθουσών για συνεδριάσεις, μεγάλα εμπορικά κέντρα και εστιατόρια.

Η Αθήνα αποτελεί μία από τις λίγες εξαιρέσεις μεγαλουπόλεων που δεν υπάρχει πληθώρα τέτοιων κτιρίων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην νομοθεσία που διέπει την κατασκευή τέτοιων κτιρίων, πιο συγκεκριμένα, δεν την επιτρέπει.

### 2.2 Υπό μελέτη κτίρια

Τα ψηλά κτίρια που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την αρχικού σταδίου κατανόηση της σημασίας του σχήματος όσον αφορά την πίεση του ανέμου και την μείωση αυτής είναι τα εξής:

- Taipei 101
- Willis Tower
- Westin Peachtree Plaza
- Shanghai World Financial Center



Εικόνα 2.1: Taipei 101, Taiwan



Εικόνα 2.2: Willis Tower, London



Εικόνα 2.3: Westin Peachtree Plaza, Atlanta, USA



Εικόνα 2.4: WFC Shanghai, Shanghai

## 2.3 Άνεμος

### 2.3.1 Σημαντικότητα

Ο σχεδιασμός της μορφής ενός ουρανοξύστη είναι πολύ μεγάλης σημασίας, διότι το κόστος κατασκευής του δεν επιτρέπει ενδεχόμενο λάθους. Ειδικότερα, τα οριζόντια φορτία ανέμου σε κτίρια μεγάλου ύψους είναι καθοριστικής σημασίας στον εξωτερικό σχεδιασμό, καθώς και στην στατική μελέτη αυτών των κτιρίων. Η αύξηση του ανέμου και της πίεσης του, αυξανόμενου του ύψους, κατατάσσει τα αιολικά φορτία σημαντικότερα των νεκρών φορτίων όσο και των ζωντανών φορτίων.

Οι ασκούμενες δυνάμεις στις κατασκευές είναι δυναμικής φύσεως, ωστόσο, για τους συνήθεις υπολογισμούς γίνεται η παραδοχή ότι επενεργούν στατικά, εκτός από ειδικές περιπτώσεις (π.χ. καπνοδόχοι, κρεμαστές γέφυρες), όπου είναι επιβεβλημένο να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας της φόρτισης.

Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ένταση καθώς και την κατανομή της πίεσης του ανέμου είναι: η κάτοψη του κτιρίου, η ύπαρξη ανοιγμάτων στις όψεις, η τραχύτητα της προσβαλλόμενης επιφάνειας, η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και το περιβάλλον (π.χ. εντός πόλης, σε παραθαλάσσια περιοχή, πεδιάδα ή δασώδη περιοχή).

### 2.3.2 Μονάδες μέτρησης, κλίμακες, τυπικές τιμές

Ο άνεμος και η ένταση του μετριέται σε απόλυτη κλίμακα, αναλόγως με την ταχύτητα που αναπτύσσει. Δηλαδή σε m/s, mph/h. Η κλίμακα Beaufort που χρησιμοποιείται για την θάλασσα είναι και αυτή κλίμακα ταχύτητας.

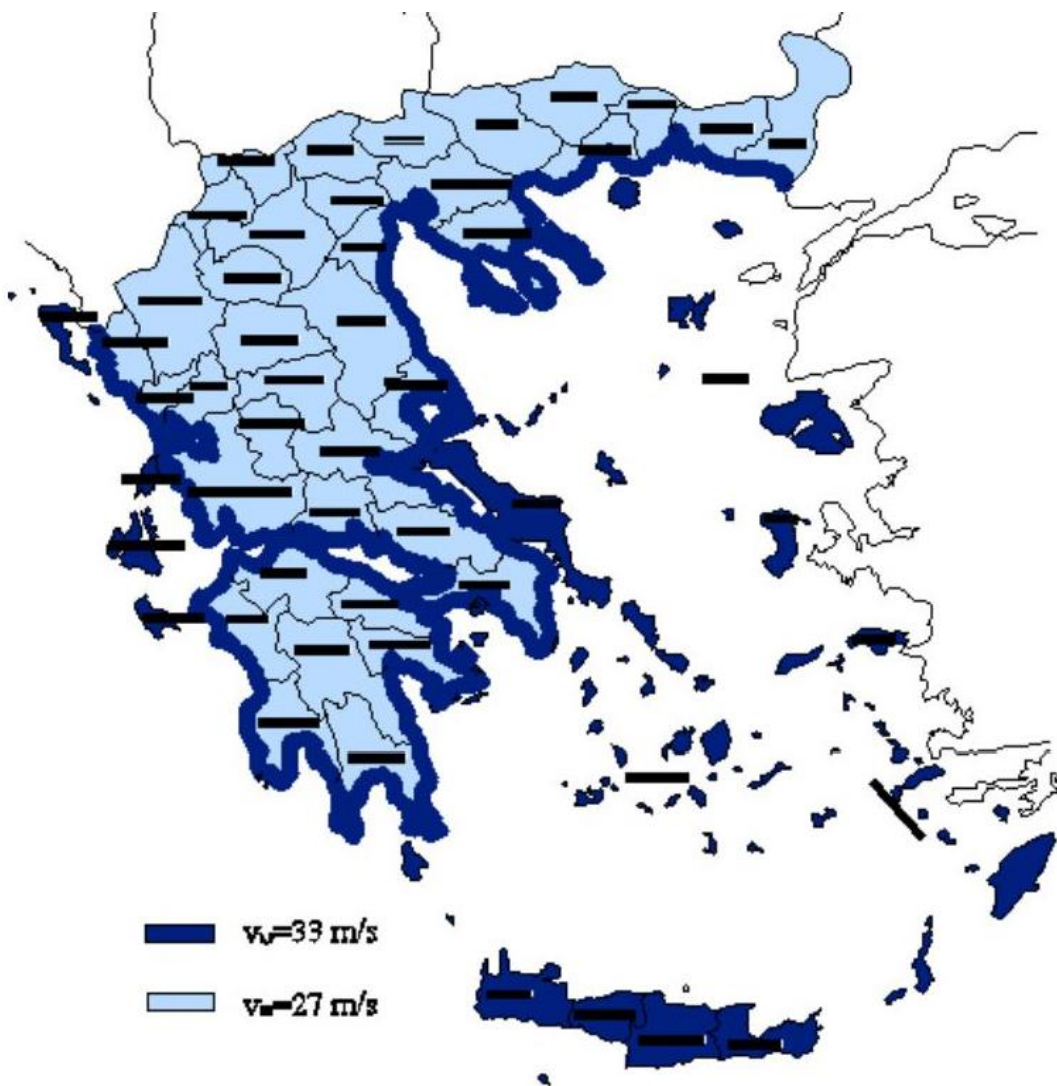
ΚΑΙΜ. BEAUFORT	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΥ	ΣΕ m/sec	ΣΕ km/h	κόμβοι	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΞΗΡΑ
0	Άπνοια Calm	0 - 0.2	1	< 1	Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα
1	Σχεδόν άπνοια Light Air	0.3 - 1.5	1 - 5	< 3	Η διεύθυνση του ανέμου φαίνεται από τον καπνό και όχι από τον ανεμοδείκτη.
2	Πολύ ασθενής Light breeze	1.6 - 3.3	6-11	4-6	Άνεμος αισθητός στο πρόσωπο. Τα φύλλα των δένδρων θροίζουν και ο ανεμοδείκτης κινείται.
3	Ασθενής Gentle Breeze	3.4 - 5.4	12-19	7-10	Τα φύλλα και τα μικρά κλωνάρια των δένδρων βρίσκονται σε συνεχή κίνηση. Ο άνεμος τεντώνει μικρή σημαία.
4	Σχεδόν Μέτριος Moderate breeze	5.5 - 7.9	20 - 28	11-16	Ο άνεμος σηκώνει σκόνη και φύλλα χαρτιού. Κινεί μικρά δένδρα.
5	Μέτριος Fresh Breeze	8.0 - 10.7	29 - 38	17-21	Μικρά δένδρα με φύλλα αρχίζουν να κινούνται. Σχηματίζονται κοματίδια σε λίμνες.
6	Ισχυρός Strong breeze	10.8 - 13.8	39 - 49	22-27	Κινούνται μεγάλα κλαδιά δένδρων. Ακούγεται συριγμός στα τηλεγραφικά σύρματα. Οι ομπρέλες χρησιμοποιούνται με δυσκολία.
7	Σχεδόν θυελλώδης Near Gale	13.9 - 17.1	50 - 61	28-33	Τα δένδρα κινούνται ολόκληρα. Το αντίθετο στον άνεμο βάδισμα γίνεται δύσκολο.
8	Θυελλώδης Gale	17.2 - 20.7	62 - 74	34-40	Θραύει μικρά κλωνάρια δένδρων. Γενικά εμποδίζει το αντίθετο στον άνεμο βάδισμα.
9	Πολύ θυελλώδης Strong gale	20.8 - 24.4	75 - 88	41-47	Προκαλούνται μικρές ζημιές σε κατασκευές. Αναρπάζονται πηλίνοι καπνοδόχοι και κεραμίδια.
10	Θύελλα Storm	24.5 - 28.4	89 - 102	48-55	Σπάνια παρατηρείται στο εσωτερικό της ξηράς. Ξεριζώνει δένδρα και προξενεί μεγάλες ζημιές σε κατασκευές.
11	Ισχυρή θύελλα Violent Storm	28.5 - 32.6	103 - 117	56-63	Πολύ σπάνια παρατηρείται. Γίνονται πολύ μεγάλες ζημιές.
12	Τυφώνας Hurricane	32.7 και περισσότερο	>= 118	>= 64	...

Πίνακας 2.1: Κλίμακα Beaufort

### 2.3.3 Διαφορές ανά περιοχή και ανάγλυφο

Η βασική ταχύτητα ελέγχου ανέμου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, καθώς εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες. Σημαντικότεροι εξ αυτών είναι η γεωγραφική τοποθεσία αλλά και το ανάγλυφο.

Στην Ελλάδα υπάρχουν 2 βασικές ταχύτητες ελέγχου, μία για τα ηπειρωτικά και μία για τα παράλια-νησιά. Αυτή θα χρησιμοποιηθεί, λίγο αυξημένη, στην παρούσα διπλωματική για την οριακή κατάσταση ελέγχου, διότι θεωρούμε ότι η τοποθεσία του κτιρίου είναι σε παραθαλάσσια περιοχή απαλλαγμένη από αστικό περιβάλλον ή βλάστηση. Η ταχύτητα αυτή ορίζεται στα 27 m/s στα ηπειρωτικά και 33 m/s στα νησιώτικα και παραθαλάσσια.



Εικόνα 2.5: Χάρτης θεμελιώδους βασικής ταχύτητας του ανέμου

### 2.3.4 Ευρωκώδικας και παραδοχές

Ευρωκώδικας 1 – Δράσεις στις κατασκευές  
Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις ανέμου

Κατά EC: Βασική ταχύτητα ανέμου: η μέση ταχύτητα ανέμου διάρκειας 10 λεπτών, με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.02, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου, σε ύψος 10 m πάνω από επίπεδη ανοιχτή περιοχή εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του υψομέτρου (εάν απαιτείται).

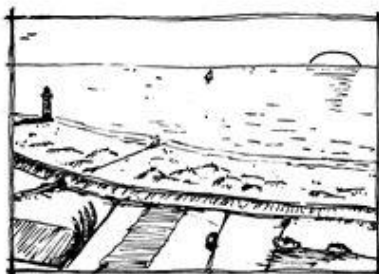
Κατηγορία εδάφους 0, κατά EC 1.4, που αντιστοιχεί σε θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα.



## A.1 Απεικονίσεις της ανώτερης τραχύτητας κάθε κατηγορίας εδάφους

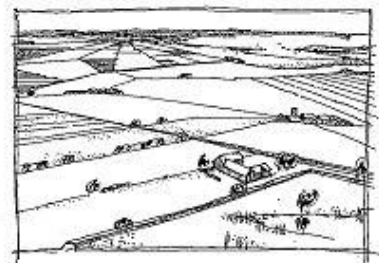
### Κατηγορία εδάφους 0

Θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα



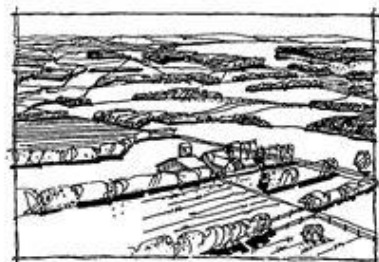
### Κατηγορία εδάφους I

Λίμνες ή περιοχή με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια



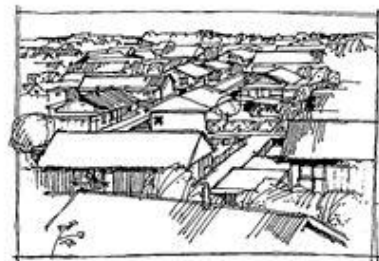
### Κατηγορία εδάφους II

Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων



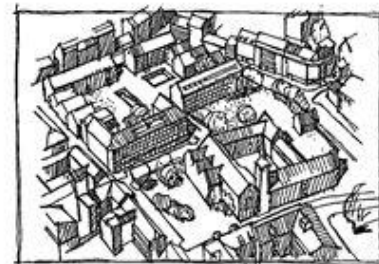
### Κατηγορία εδάφους III

Περιοχή με κανονική κάλυψη από βλάστηση ή από κτίρια ή από μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)



### Κατηγορία εδάφους IV

Περιοχή στην οποία τουλάχιστον το 15 % της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m

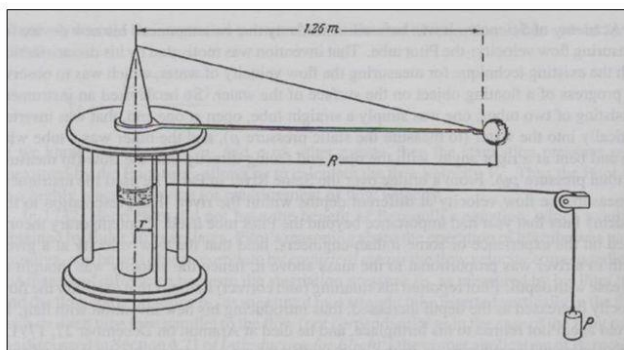


Εικόνα 2.6: Απεικονίσεις τραχύτητας κατά ΕΚ 1-4

## 2.4 Τούνελ Αέρα

### 2.4.1 Ιστορικά στοιχεία

Η αρχική ιδέα πίσω από την εξέλιξη των τούνελ αέρα ήταν ο περιστρεφόμενος βραχίονας (whirling arm). Ήταν μία συσκευή για την αεροδυναμική εκτέλεση αεροδυναμικών πειραμάτων. Το μοντέλο μεταφέρεται πάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου, ενώ βρίσκεται τοποθετημένο σε έναν βραχίονα. Η κίνηση του πραγματοποιείται πάνω σε οριζόντιο επίπεδο.



Benjamin Robins (1707 – 1751) invented whirling arm for measuring aerodynamic forces. Borda in 1763 experimentally showed that lift on a plate varies as  $U^2 \sin \Theta$  and not  $U^2 \sin^2 \Theta$  as Newton suggested.

*First wind tunnel built in 1884 by Horatio Phillips*

Εικόνα 2.7: Περιστρεφόμενος βραχίονας

Ο Βενιαμίν Ρόμπινς (Benjamin Robins) (1707-1751), Άγγλος μαθηματικός, εφηύρε τον περιστρεφόμενο βραχίονα για την μέτρηση των αεροδυναμικών μεγεθών.

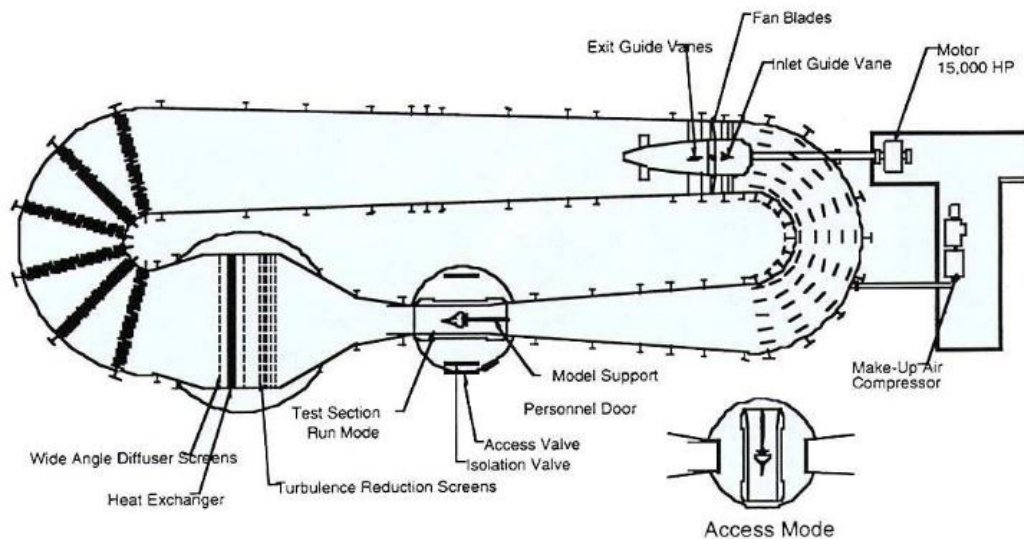
Όμως τεχνικές δυσκολίες μέτρησης όπως και διαφόρων λεπτομερειών υπαγόρευαν την ανάγκη για κάτι αποτελεσματικότερο. Τον περιστρεφόμενο βραχίονα, επομένως, διαδέχτηκε το τούνελ αέρα. Ο σχεδιασμός και η χρήση του πρώτου τέτοιου τούνελ χρεώνεται στον Frank H. Wenham (1824-1908) το 1871, ο οποίος αποτελούσε ένα μέλος του συμβουλίου της Αεροναυτικής κοινότητας της Μεγάλης Βρετανίας.

### 2.4.2 Στοιχεία

Το τούνελ αέρα αποτελείται από ένα απλό κλειστό πέρασμα μέσα από το οποίο ο αέρας διέρχεται από κάποιον ανεμιστήρα ή κατάλληλο μηχανισμό κίνησης. Στο κέντρο του τούνελ είναι τοποθετημένο το μοντέλο, υπό κλίμακα, το οποίο είναι εκτεθειμένο στο ελεγχόμενο ρεύμα αέρα. Η διαδικασία αυτή

αναπαριστά την πραγματικότητα και εξάγει τα συμπεράσματα.

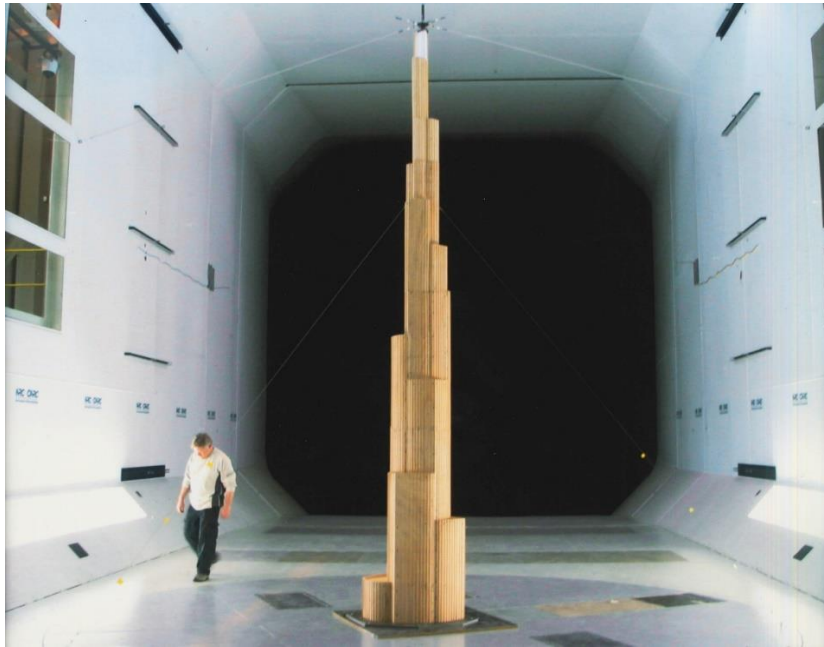
Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται μία τυπική μορφή τούνελ αέρα, καθώς και τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 2.8: Τυπικό τούνελ αέρα

### 2.4.3 Χρήση

Τα τούνελ αέρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την αεροδυναμική μελέτη στερεών που έρχονται σε επαφή με τον αέρα. Αυτοκίνητα, αεροπλάνα και κτίρια μελετώνται σε τέτοια τούνελ για τον καθορισμό της αεροδυναμικής τους αντίστασης καθώς και της πίεσης που δέχονται.



Εικόνα 2.9: Τούνελ Αέρα  
Μοντέλο: Burj Khalifa

Σε μικροκλίμακα και με τον κατάλληλο εξοπλισμό καθίσταται δυνατή επομένως η και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς ψηλών κτιρίων σε διάφορες ενδεχόμενες φορτίσεις από άνεμο.

Η αρχή της χρήσης του τοποθετείται, όπως προαναφέρθηκε, στον 19<sup>ο</sup> αιώνα, αρχικά για την μελέτη ιπτάμενων αντικειμένων βαρύτερων του αέρα, και η λογική τους βασίζεται στην σχετική κίνηση του αέρα ως προς το αντικείμενο. Δηλαδή, η κίνηση του αντικειμένου με π.χ. 10 m/s είναι το ίδιο με την κίνηση αέρα ταχύτητας 10 m/s και το αντικείμενο αυτό ακίνητο.

Σε τούνελ αέρα, η προσομοίωση του ανέμου και του περιβάλλοντος, όπως και του υπό μελέτη μοντέλου, έχει γίνει με επαρκή ακρίβεια.

Το πρόβλημα του προσανατολισμού της κίνησης αντιμετωπίζεται με την ίδια λογική, δηλαδή την στροφή του αντικειμένου στον χώρο. Στρέφοντας το αντικείμενο γύρω από τον άξονα του μεταβάλλεται το μέτωπο πρόσπτωσης, και δίνεται η δυνατότητα μελέτης όλων των πιθανών διευθύνσεων της ανεμικής φόρτισης. Ειδικότερα επομένως σε κτίρια με μορφή και ύψος «ασυνήθιστο» είναι αναγκαία αυτή η προσομοίωση. Στόχος είναι ο καθορισμός της ροής του ανέμου στην περιοχή κοντά στο κτίριο, η πίεση που ασκείται σε αυτό καθώς και συγκεκριμένες σημαντικές για την μελέτη μετακινήσεις σημείων.

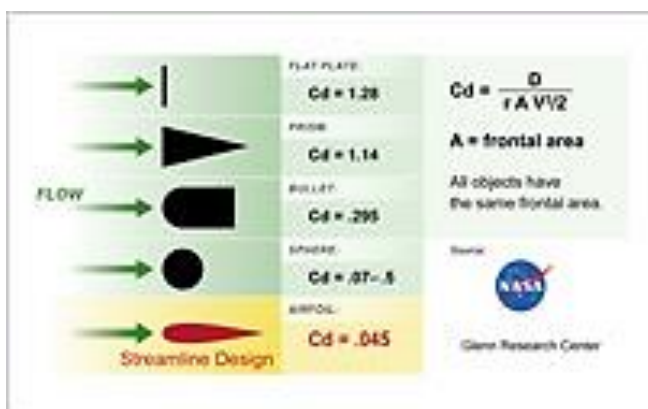
#### 2.4.4 Προσομοίωση-Υπολογιστές

Πλέον η προσομοίωση αυτή, σε αρχικό-προκαταρκτικό στάδιο, συνηθίζεται να γίνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό είναι χρήσιμο για την εξαγωγή πρώιμων αποτελεσμάτων, για μία πρώτη επίβλεψη της ιδέας που πρόκειται να υλοποιηθεί. Υπερτερεί σε ταχύτητα και κόστος, και επίσης σε ευκολία μελέτης πολλών εναλλακτικών μοντέλων με μικρές διαφοροποιήσεις.

## 2.5 Αντίσταση και συντελεστής αντίστασης

Η αντίσταση (Drag Force), η οποία στην παρούσα διπλωματική θα αναφέρεται ως  $F_d$ , είναι μία δύναμη η οποία εμφανίζεται κατά την σχετική κίνηση σωμάτων και ρευστών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα αναφερόμαστε στην αντίσταση που παρουσιάζεται από το κτίριο ως αντίδραση στην κίνηση του ανέμου. Σαν δύναμη οφείλεται στην διαφορετική πίεση που επικρατεί στις 2 πλευρές ενός σώματος. Συγκεκριμένα, η δύναμη αυτή που ασκείται λοιπόν στο σώμα, διαιρεμένη με τη μετωπική του επιφάνεια μας δίνει μια πίεση η οποία ασκείται επάνω του στην πλευρά του η οποία έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Εκεί λοιπόν έχουμε αυξημένη πίεση σε σχέση με την οπίσθια πλευρά του στην οποία επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση (ίσως και χαμηλότερη). Η διαφορά αυτή των πιέσεων είναι η αντίσταση.

Η αντίσταση, σαν μέγεθος, εξαρτάται από την σχετική ταχύτητα σώματος-ρευστού, το εμβαδό της προσβαλλόμενης επιφάνειας (μετωπικά), την πυκνότητα του ρευστού και τον συντελεστή αντίστασης  $C_d$  (Drag Coefficient). Χαμηλότερη τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή σημαίνει μικρότερη αεροδυναμική δύναμη αντίστασης.



Εικόνα 2.10: Συντελεστής  $C_d$

Ο συντελεστής αντίστασης είναι αδιάστατος, και εξαρτάται, (κυρίως – παίζει ρόλο και και ο αριθμός *Reynolds* ( $Re$ )) από την γεωμετρία του σώματος. Ο συντελεστής αυτός και η μείωση του είναι ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



### 3. Προγράμματα Σχεδιασμού και Ανάλυσης

#### 3.1 Μοντέλα: Fusion 360 Autodesk

Το Fusion 360 από την εταιρεία Autodesk είναι ένα πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού υψηλών δυνατοτήτων. Χρησιμοποιείται ευρέως και επιτρέπει την υλοποίηση οποιασδήποτε ιδέας με σχετικά εύκολο χειρισμό. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος επιλογής του, σε συνδυασμό με την συμβατότητα του με το πρόγραμμα ανάλυσης της ροής που παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι εφαρμογές του Fusion 360 επεκτείνονται και πέρα από τον σχεδιασμό, καθώς είναι δυνατή η επιλογή υλικού των στοιχείων-μελών, animation αλλά και βασικών στατικών επιλύσεων, δυνατότητες που προστέθηκαν πρόσφατα.



Εικόνα 3.1: Λογότυπο Autodesk Fusion 360

Ιδιαίτερα σημαντική στον σχεδιασμό είναι η ακρίβεια των μοντέλων και ο σεβασμός των ιδιοτήτων του καθενός, καθώς μικρές αλλαγές στην μορφή έχουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάλυση αλλά και στα αποτελέσματα αυτής.

#### 3.2 Ανάλυση: Flow Design Autodesk

Το Flow Design 2014 από την εταιρεία Autodesk είναι ένας προσομοιωτής τούνελ αέρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για μοντέλα όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα αλλά και κτίρια. Χρησιμοποιήθηκε διότι ταιριάζει απόλυτα στις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής λόγω ανάλυσης και πολλαπλών τρόπων παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Το αποτέλεσμα είναι μία πλήρης και αναλυτική απεικόνιση της γραμμών ροής του αέρα γύρω από το μοντέλο που εξετάζεται, όπως επίσης και η κατανομή των πιέσεων στο υπό μελέτη σώμα.

Η βάση πίσω από την χρησιμότητα του προγράμματος βασίζεται στην γένεση μίας ιδέας και στην ανάγκη ελέγχου αυτής σε στάδιο προμελέτης. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της μορφής του, στην περίπτωση μας, ψηλού κτιρίου, ως προς το χαρακτηριστικό που επιθυμούμε.

Στην παρούσα διπλωματική στόχος είναι η άμβλυση έντονων διαφορών στις τοπικές ταχύτητες, στα φαινόμενα δευτερεύουσας ροής, η αποφυγή τύρβης και γενικότερα η εξομάλυνση των ανομοιομορφιών των γραμμών ροής. Αυτό συνεπάγεται άμεσα μείωση αλλά και καλύτερη κατανομή των πιέσεων στο σώμα του κτιρίου, κάτι που είναι ουσιαστικά το ζητούμενο.



Εικόνα 3.2: Λογότυπο Autodesk Flow Design

Για την σωστή χρήση του προγράμματος και την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων-αποτελεσμάτων, πρέπει να προσεχθούν τα εξής.

- Επιλογή κατάλληλου όγκου αναφοράς, ο οποίος καθορίζεται κυρίως από τις διαστάσεις του μοντέλου.
- Επιλογή κατάλληλου προσανατολισμού, για να ληφθούν υπ' όψη όλες οι περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν.
- Επιλογή κατάλληλης ανάλυσης της προσομοίωσης, για εξειδικευμένα αποτελέσματα. Μικρότερη ανάλυση της προσομοίωσης δημιουργεί μικρότερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων κάτι που μοιραία οδηγεί σε αγνόηση σημαντικών χαρακτηριστικών σημείων της μορφής του αντικειμένου.
- Επιλογή κατάλληλων εργαλείων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



## 4. Ουρανοξύστες

Τα μοντέλα των υπαρχόντων ουρανοξυστών είναι σχεδιασμένα με ιδιαίτερη λεπτομέρεια και σεβασμό στις αρχιτεκτονικές ιδιαιτερότητες του καθενός, καθώς αυτές κρίνονται πολύ σημαντικές στον καθορισμό της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς. Σεβασμός στην ιδιαιτερότητα της μορφής στην λεπτομέρεια είναι αναγκαίος για την εξαγωγή ρεαλιστικών και κυρίως αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μας ενδιαφέρουν τα σημεία εμφάνισης επιταχύνσεων και γενικότερα η συμπεριφορά της ροής, επομένως γίνεται τυπική ανάλυση για ταχύτητα 10 m/s.

Θα εφαρμοστεί επομένως τυπική συνήθης ταχύτητα ανέμου ίση με 10 m/s, η οποία αντιστοιχεί σε χαρακτηρισμό «Μέτριος» (fresh breeze) στην κλίμακα Beaufort. Αυτό το προφίλ θα είναι σταθερό καθ' ύψος.

### 4.1 Taipei 101

#### 4.1.1 Γενικά στοιχεία

Ουρανοξύστης ύψους 449.2 m. Βρίσκεται στο Ταιπέι στην Ταϊβάν. Εκτόπισε, την περίοδο κατασκευής του, τους Petronas Towers από κορυφή της λίστας με τα ψηλότερα κτίρια παγκοσμίως (2004). Παρέμεινε στην κορυφή της συγκεκριμένης λίστας ως το 2010, όταν και έδωσε την θέση του στον Burj Khalifa στο Ντουμπάι. Έχει επίσης δεχτεί σημαντικές διακρίσεις όσον αφορά την «οικολογικότητα» του ως κτίριο.

Ο σχεδιασμός του ξεκίνησε το 1997, η κατασκευή του περίπου το 1999 ενώ δόθηκε πλήρως σε λειτουργία την πρωτοχρονιά του 2004.

Αποτελείται από 101 ορόφους και 5 υπόγεια. Ο αριθμός 101 δεν επιλέχθηκε τυχαία, καθώς η επιλογή αυτή κρύβει έναν συμβολισμό. Ως ύψος οι 101 όροφοι αποδίδουν ένα φόρο τιμής στην ανανέωση του χρόνου: ο καινούριος αιώνας έφτασε με το χτίσιμο του πύργου (100+1) και όλα τα νέα έτη που ακολουθούν από δω και στο εξής (1η Ιανουαρίου = 1-01). Συμβολίζουν τα υψηλά ιδανικά πηγαίνοντας στο "ένα επιπλέον" του 100, που θεωρείται παραδοσιακά ο αριθμός που αντιστοιχεί στο τέλειο. Ο συγκεκριμένος αριθμός επίσης υπονοεί και το δυαδικό αριθμητικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην ψηφιακή τεχνολογία.

Ο κύριος πύργος αποτελείται από μια σειρά από 8 τμήματα, 8 ορόφων το καθένα. Στην κινέζικη κουλτούρα ο αριθμός 8 σχετίζεται με την αφθονία, την ευφορία και την καλή τύχη.

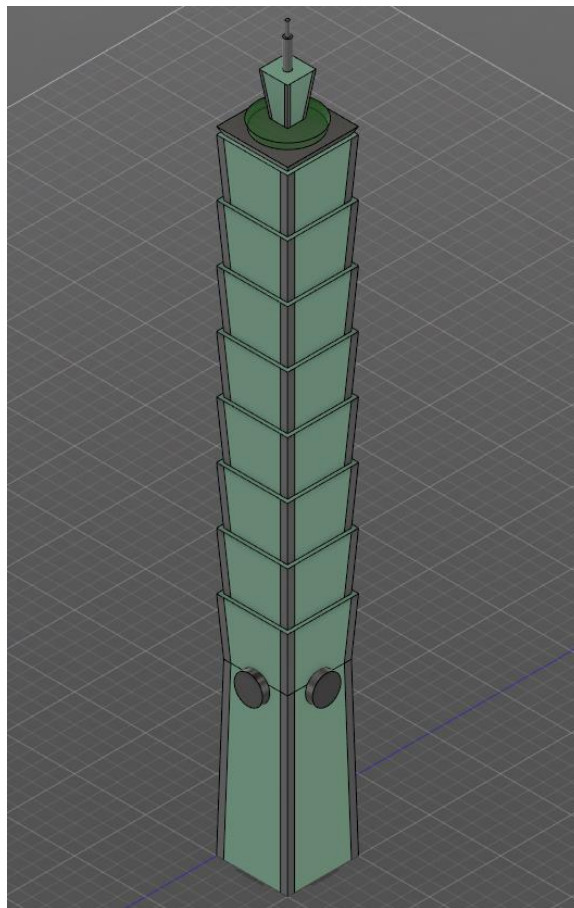
Τα επαναλαμβανόμενα τμήματα ταυτόχρονα θυμίζουν τους ρυθμούς της Ασιατικής παγόδας (ένας πύργος που συνδέει τον ουρανό και τη γη, και επίσης υπονοείται στους πύργους Petronas), ένα τμήμα από μπαμπού (εικόνα της μάθησης και της ανάπτυξης), και μία στοιβιά από αρχαίους κινέζικους ράβδους χρυσού (σύμβολο αφθονίας). Συχνά χιουμοριστικά συνδέεται το σχήμα του κτιρίου με αυτό της στοιβιάς από κουτιά παράδοσης φαγητού που χρησιμοποιούνται σε κινέζικα φαγητά δυτικού τύπου: φυσικά η μορφή αυτή τοποθέτησης των κουτιών σε στοιβιά προέρχεται και αυτή από την τοποθέτηση των αρχαίων ράβδων χρυσού. Οι 4 δίσκοι σε κάθε μία από τις προσόψεις του κτιρίου όπου η βάση συναντά τον πύργο

αντιπροσωπεύουν νομίσματα. Το έμβλημα πάνω από τις εισόδους απεικονίζει τρία χρυσά νομίσματα αρχαίας σχεδίασης με τρύπες στο κέντρο τέτοιου σχήματος που να υπαινίσσεται τους Αραβικούς αριθμούς 1-0-1. Η δομή περιλαμβάνει πολλά σχήματα τετραγώνων και κύκλων για να φτάνουν μια ισορροπία μετά yin και yang.

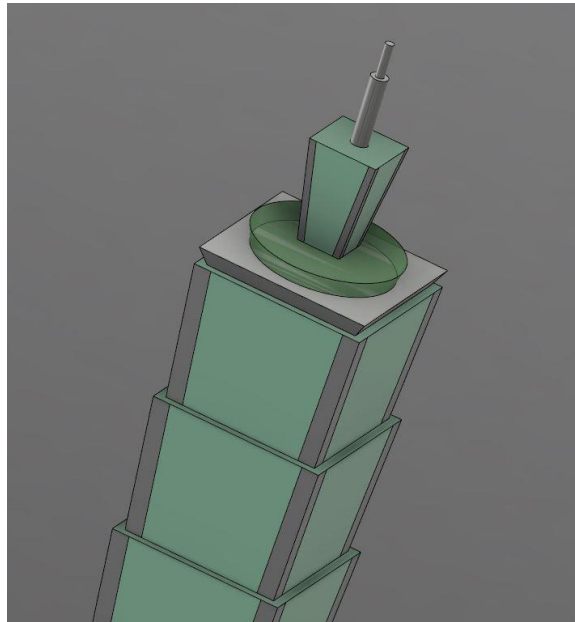
#### 4.1.2 Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ως πρώτη μορφή ουρανοξύστη θα χρησιμοποιηθεί ο Ταίρει 101. Χρησιμοποιείται ως δείγμα κτιρίου ορθογωνικού σχήματος, με τετραγωνική κάτοψη περίπου σταθερή καθ' ύψος. Επομένως είναι ένα κτίριο βαρύ, με κυρίως τετραγωνική κάτοψη, το οποίο αναμένεται να είναι σχετικά δυσμενές όσον αφορά τον αεροδυναμικό του συντελεστή.

Αποτελεί ένα από τα πιο σταθερά κτίρια παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, έχει σχεδιαστεί για να αντέχει τυφώνα ταχύτητας μέχρι και 60 m/s, όπως επίσης και σεισμική δόνηση περιόδου επαναφοράς 2500 ετών.



Εικόνα 4.1: Taipei 101, Taiwan  
(Μοντέλο Fusion 360)



Εικόνα 4.2: Σχεδιαστική λεπτομέρεια

- 101 όροφοι
- 5 υπόγεια
- 449.2 m ύψος τελευταίου ορόφου
- 509.2 m ύψος κορυφής
- 412.500 m<sup>2</sup> συνολική κάτοψη
- Εμβαδό τυπικής κάτοψης 2500 m<sup>2</sup>

#### 4.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Θα εξεταστούν 2 σενάρια ανεμικής φόρτισης.

Στο σενάριο A θεωρούμε ότι ο άνεμος προσβάλλει το κτίριο υπό γωνία 0 μοιρών ως προς την κύρια όψη του.

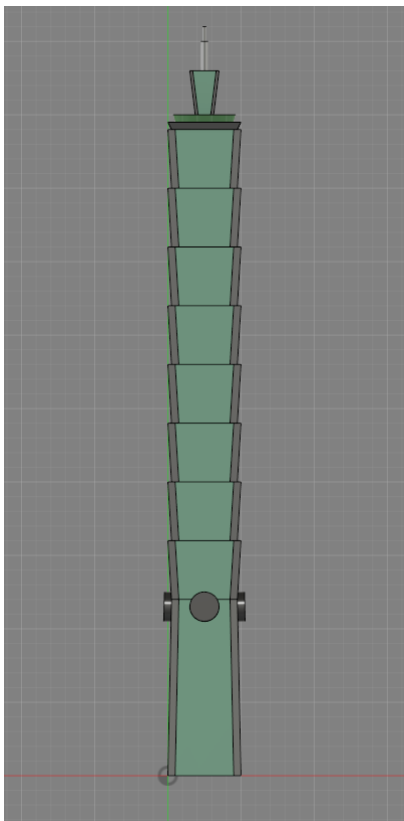
Στο σενάριο B θεωρούμε ότι ο άνεμος προσβάλλει το κτίριο υπό γωνία 45 μοιρών ως προς την κύρια όψη του. Έχει περιστραφεί, δηλαδή, το κτίριο 45 μοίρες ως προς τον καθ' ύψος άξονα συμμετρίας του.

Τα στοιχεία προσομοίωσης του τούνελ, και για τις τρεις περιπτώσεις, είναι:

- Μήκος 1800 m
- Πλάτος 600 m
- Ύψος 1800 m

#### ❖ Σενάριο A

Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία  $\theta$  μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή μετωπικά όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Προβλέπεται να είναι το πιο δυσμενές, λόγω μορφής και επιφάνειας προσβολής.



Εικόνα 4.3: Μέτωπο πρόπτωσης ανέμου

Σενάριο A

Στην λεπτομέρεια 1, παρουσιάζονται κατά σειρά ο συντελεστής αντίστασης  $C_d$  (Drag Coefficient), η συνολική δύναμη αντίστασης  $F_d$  (Drag Force), και ο μέσος συντελεστής αντίστασης (Average Drag Coefficient). Ο υπολογισμός του συντελεστή  $C_d$  προκύπτει από αριθμητική μέθοδο που εκτελεί το πρόγραμμα ανάλυσης. Όταν εξισώνεται ή σχεδόν εξισώνεται, υπάρχει σύγκλιση της μεθόδου και επομένως το αποτέλεσμα είναι και το εξαγόμενο.

Επομένως, στο συγκεκριμένο κτίριο, στο σενάριο, παρατηρείται συντελεστής αντίστασης σχήματος  $C_d=1.23$ . Επιπλέον, για την συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, εξάγεται και μία δύναμη αντίστασης  $F_d=1.650.350$  N. Δηλαδή, ο συντελεστής σχήματος εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του σχήματος και της προσβαλλόμενης επιφάνειας (διαφορετικός προσανατολισμός του μοντέλου οδηγεί συνήθως σε άλλη γεωμετρία), ενώ φυσικά η δύναμη αντίστασης εξαρτάται και από το μέγεθος της ταχύτητας.

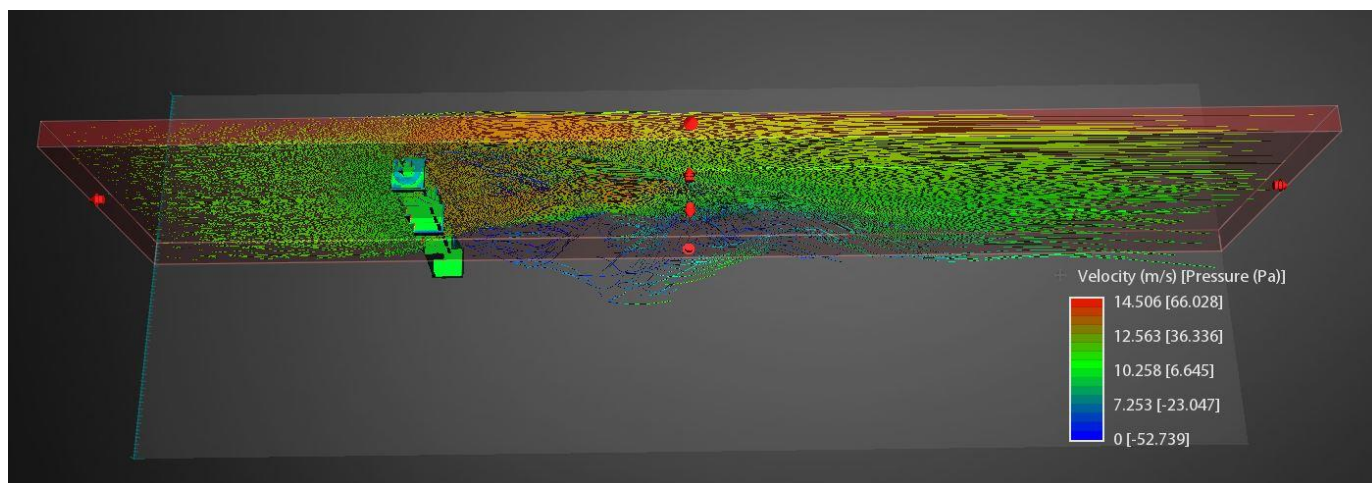
Drag coefficient: 1.23

Drag force: 1650359.250 (N)

Average drag coefficient: 1.23

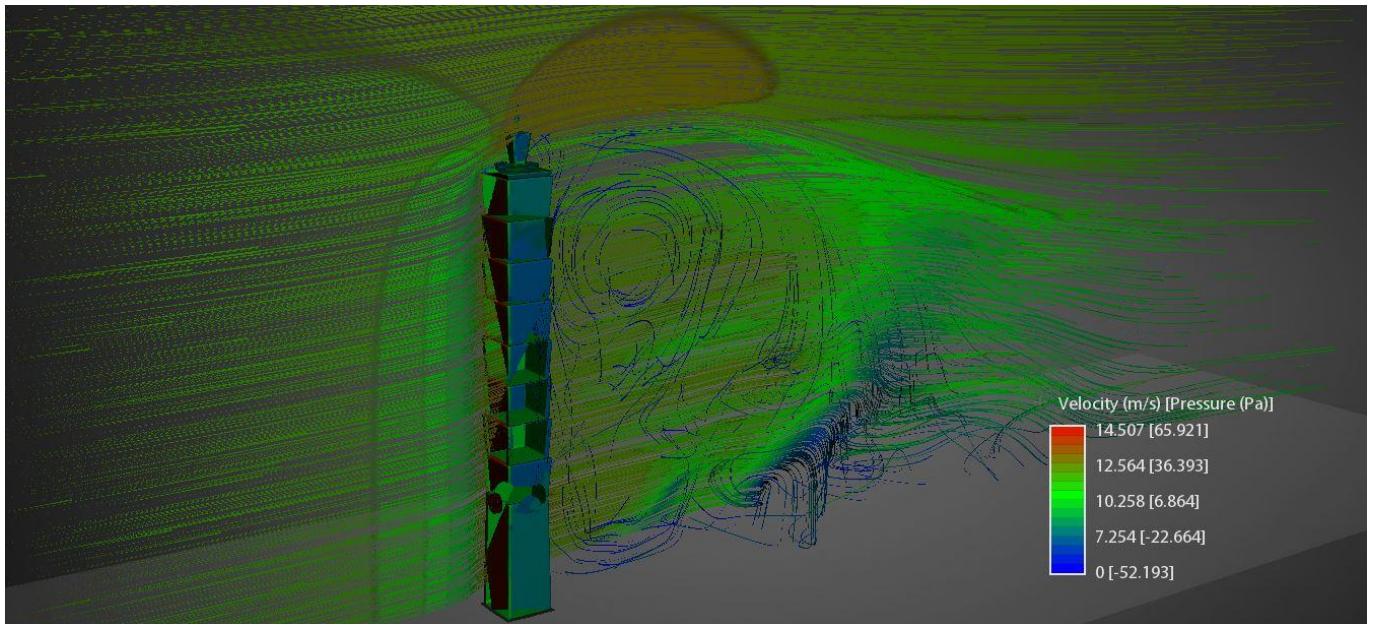
Εικόνα 4.4: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2, φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο έχουμε επιλέξει να εμφανίσουμε μία λεπτή και χαρακτηριστική λωρίδα της ροής. Αυτό έγινε λόγω ευκρίνειας ελέγχου και παρουσίασης των αποτελεσμάτων, και είναι η βασική μέθοδος παρουσίασης του συγκεκριμένου αποτελέσματος σε όλες τις ανάλογες περιπτώσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα έχουμε επιλέξει την λωρίδα της οποίας η άνω όψη φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια 2

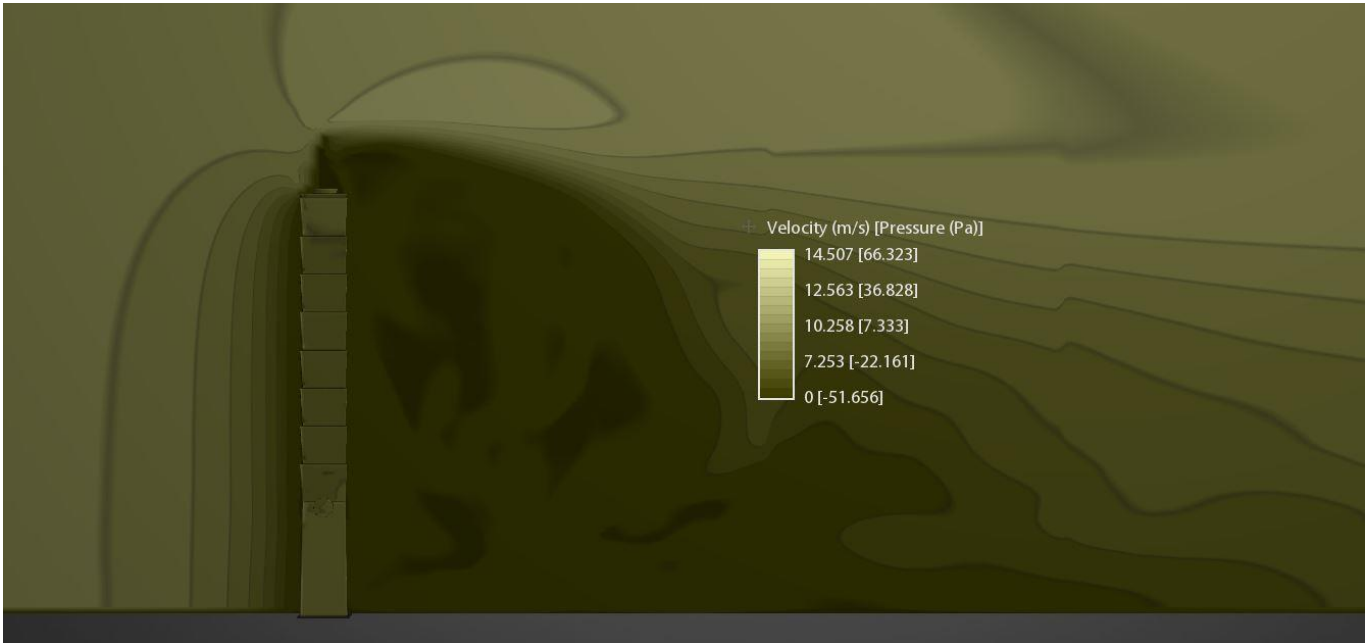
Στην λεπτομέρεια 3 φαίνεται χαρακτηριστικά η λωρίδα που επιλέξαμε να εμφανίσουμε, όπως αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο (λεπτομέρεια 2). Στην λεπτομέρεια 3 λοιπόν η διαφοροποίηση των χρωμάτων μας δείχνει την αλλαγή της ταχύτητας των μορίων του αέρα. Ακριβέστερα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η πράσινη απόχρωση αντιστοιχεί περίπου στην ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή σε αυτή των 10 m/s. Οι κίτρινες και κόκκινες αποχρώσεις φανερώνουν επιτάχυνση της ροής και τέλος, οι μπλε αποχρώσεις αντιστοιχούν σε χαμηλότερες ταχύτητες.



Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια 3

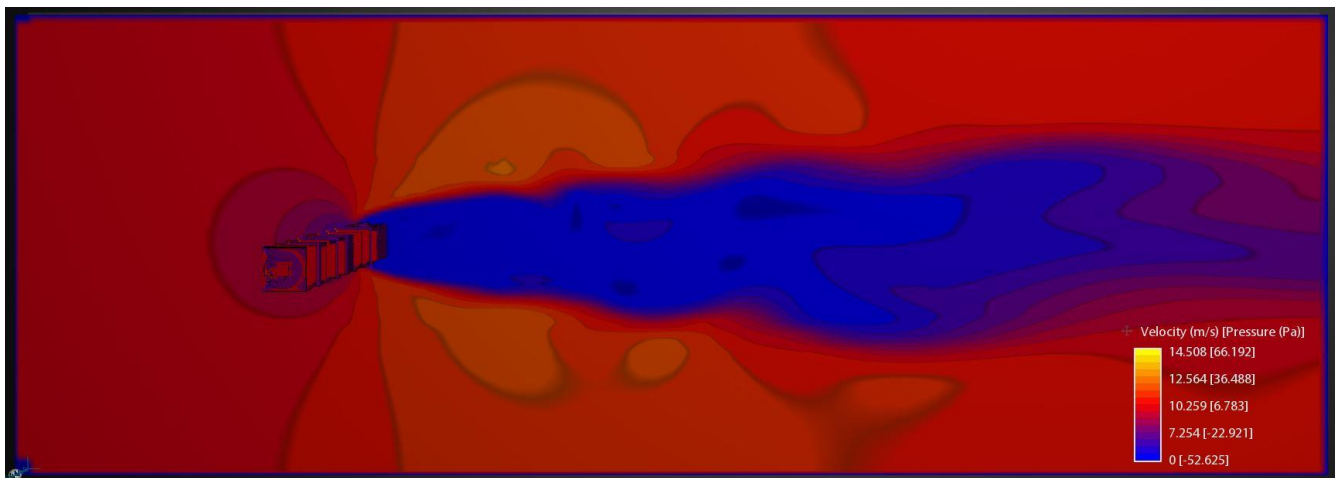
Στην λεπτομέρεια 4, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα πάνω σε μόνο μία χαρακτηριστική επιφάνεια κατά μήκος της ροής. Για λόγους ευκρίνειας έχουν επιλεγεί αποχρώσεις του *seria*. Επίσης έχει επιλεγεί και η εμφάνιση «ασυψών», δηλαδή γραμμών που διαχωρίζουν τις περιοχές των περίπου ίσων ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ευκολότερη η επίβλεψη των αποτελεσμάτων και της γενικότερης συμπεριφοράς της ροής κατά μήκος της. Όσο πιο σκούρα η απόχρωση, τόσο χαμηλότερη η ταχύτητα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Επισημαίνεται ότι το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αντικατοπτρίζει την υπάρχουσα κατάσταση σε μία μόνο επιφάνεια της ροής, δηλαδή αν η τομή ήταν σε άλλη, κοντινή, θέση, θα παρατηρούσαν διαφορετική κατανομή ταχυτήτων. Κάποιες φορές αρκετά διαφορετική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία ενδεχόμενη τομή που θα περιλάμβανε και την κεραία. Τοπικά δημιουργεί διαφοροποίηση, όμως στην γύρω περιοχή της δεν θα είχε ιδιαίτερη επιρροή. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο έχει επιλεγεί τομή περίπου στα  $\frac{3}{4}$  (τρία τέταρτα) της πρόσοψης, που κρίνεται ως η πλέον χαρακτηριστική.

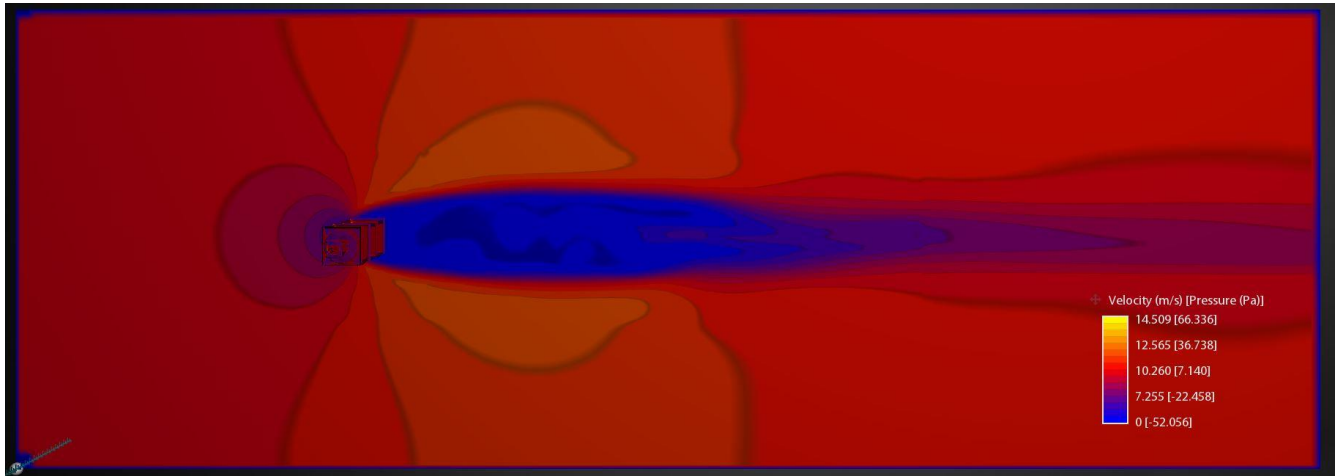


Εικόνα 4.7: Λεπτομέρεια 4

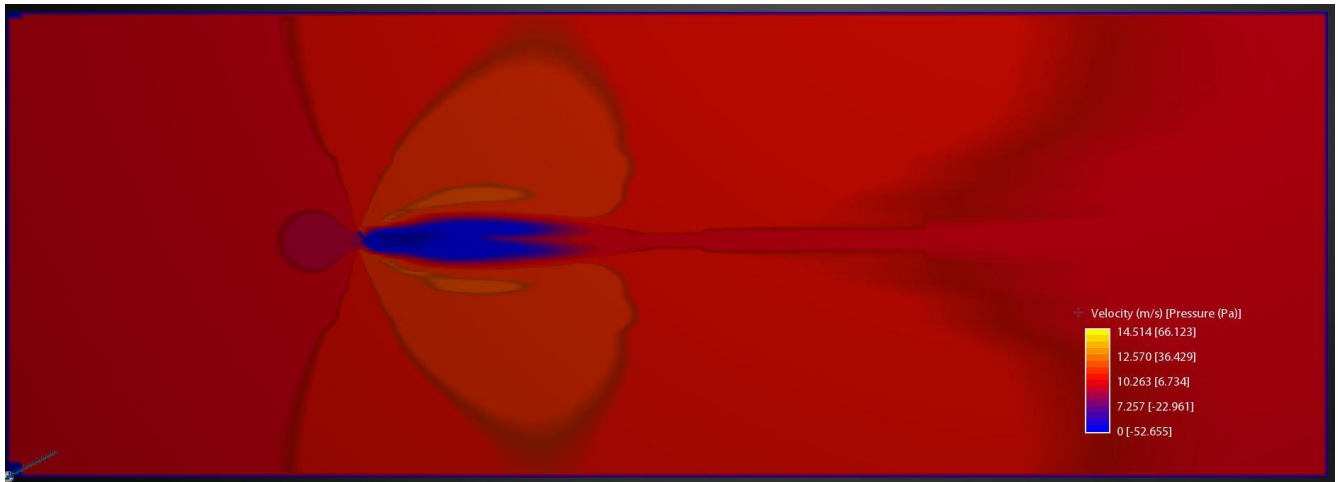
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες 5, 6 και 7, από τις οποίες καθεμιά είναι μία επιφάνεια-τομή σε επίπεδο παράλληλο ως προς το έδαφος, σε χαρακτηριστικό ύψος. Η λεπτομέρεια 5 σε ύψος 60 m από το έδαφος, η λεπτομέρεια 6 σε ύψος 250 m και τέλος η λεπτομέρεια 7 λίγο χαμηλότερα από την κορυφή. Στόχος της συγκεκριμένης επιλογής των λεπτομερειών είναι η κατανόηση της επιρροής του σχήματος της κάτοψης όσον αφορά την διαταραχή της ροής, και το μήκος επιρροής αυτού αναλογικά με την απόσταση από το έδαφος. Έχουν επιλεγεί χρωματισμοί με χρώμα βάσης το κόκκινο (10 m/s). Οι κίτρινες αποχρώσεις αντιστοιχούν σε υψηλότερες ταχύτητες, ο μπλε σε χαμηλότερες.



Εικόνα 4.8: Λεπτομέρεια 5



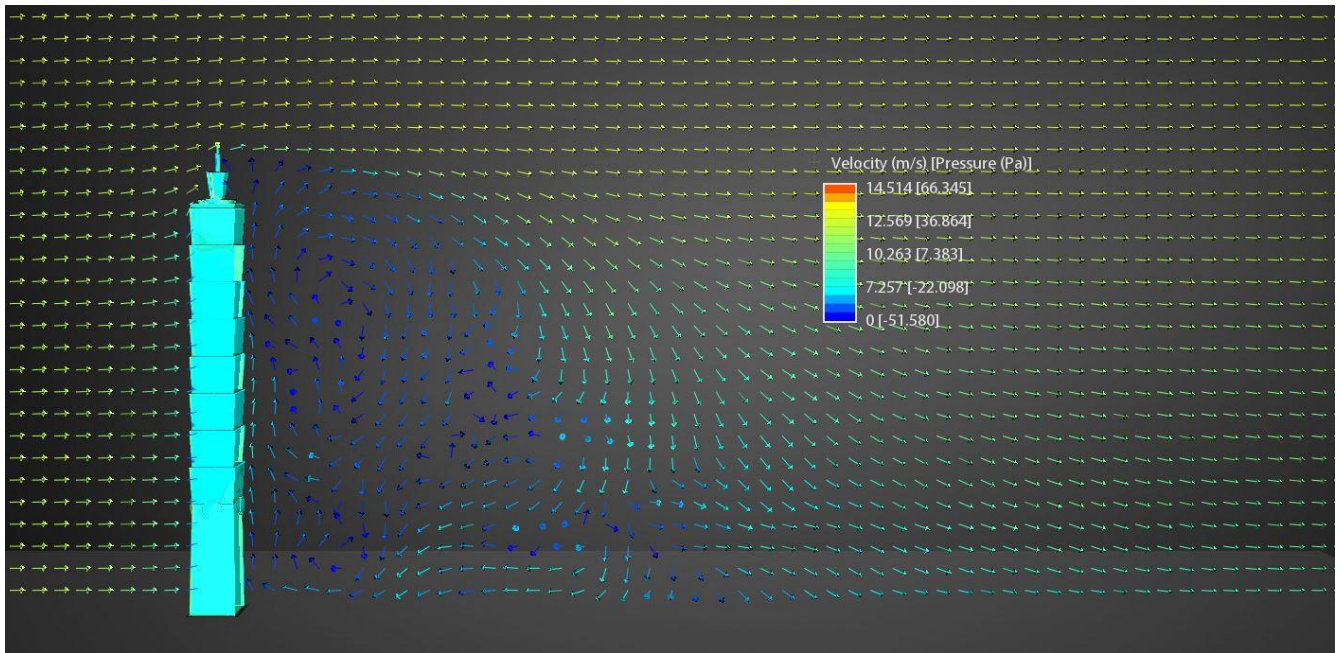
Εικόνα 4.9: Λεπτομέρεια 6



Εικόνα 4.10: Λεπτομέρεια 7

Στην λεπτομέρεια 8 παρουσιάζεται μέσω διανυσμάτων η κατεύθυνση και η ταχύτητα των μορίων του αέρα σε τομή κάθετη στο έδαφος, παράλληλα με την ροή στο μέσον της βάσης του κτιρίου. Διακρίνουμε στροβιλισμό της ροής στην πίσω όψη, μεγάλης έκτασης, αλλά και δυνάμεις που ασκούνται στο πίσω μέρος του.

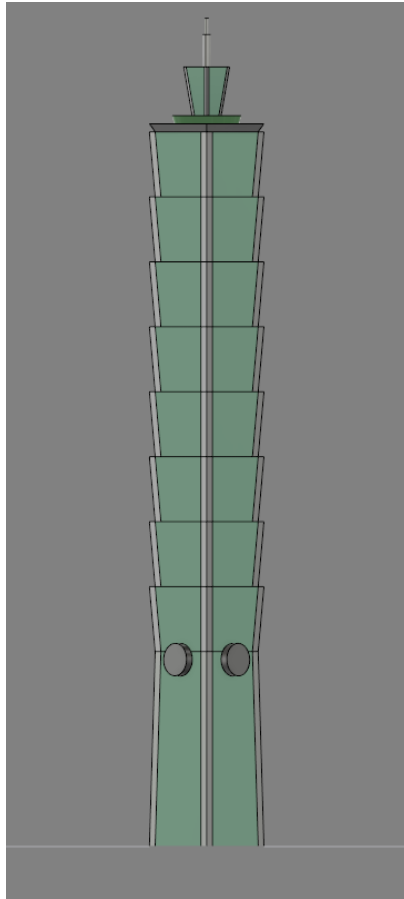




Εικόνα 4.11: Λεπτομέρεια 8

❖ Σενάριο B

Στο σενάριο B θεωρούμε ότι έχει περιστραφεί, το κτίριο 45 μοίρες ως προς τον καθ' ύψος άξονα συμμετρίας του, σε σχέση με το Σενάριο A. Το μέτωπο πρόσπτωσης παρουσιάζεται καθαρά στην εικόνα.



Εικόνα 4.12: Μέτωπο πρόσπτωσης ανέμου  
Σενάριο B

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται  $C_d=1.12$ , ιδιαίτερα μικρότερος από αυτόν του σεναρίου A. Επίσης, παρατηρείται δύναμη 2.012.585 N.

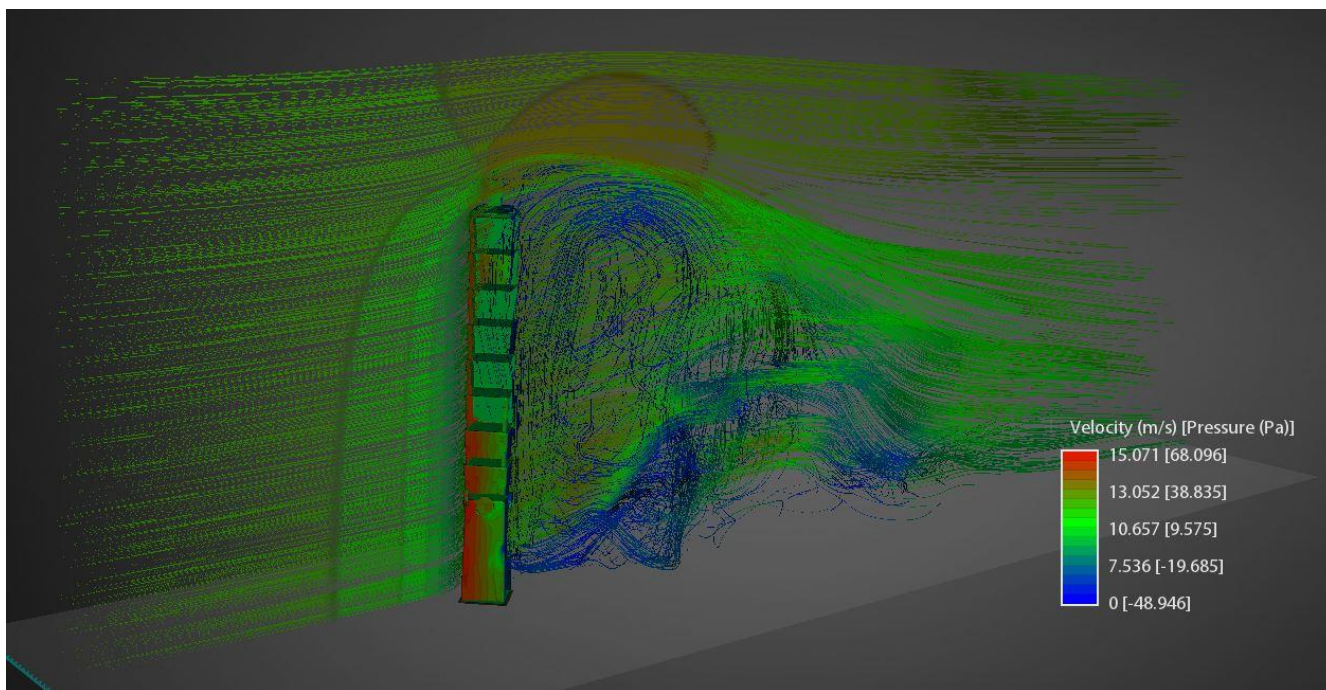
Drag coefficient: 1.12

Drag force: 2012584.625 (N)

Average drag coefficient: 1.12

Εικόνα 4.13: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρουσιάζεται η ανάπτυξη μέγιστης ταχύτητας 13.5 m/s περίπου, και εστιάζεται στην κορυφή και τις πλευρές του κτιρίου.



Εικόνα 4.14: Λεπτομέρεια 2

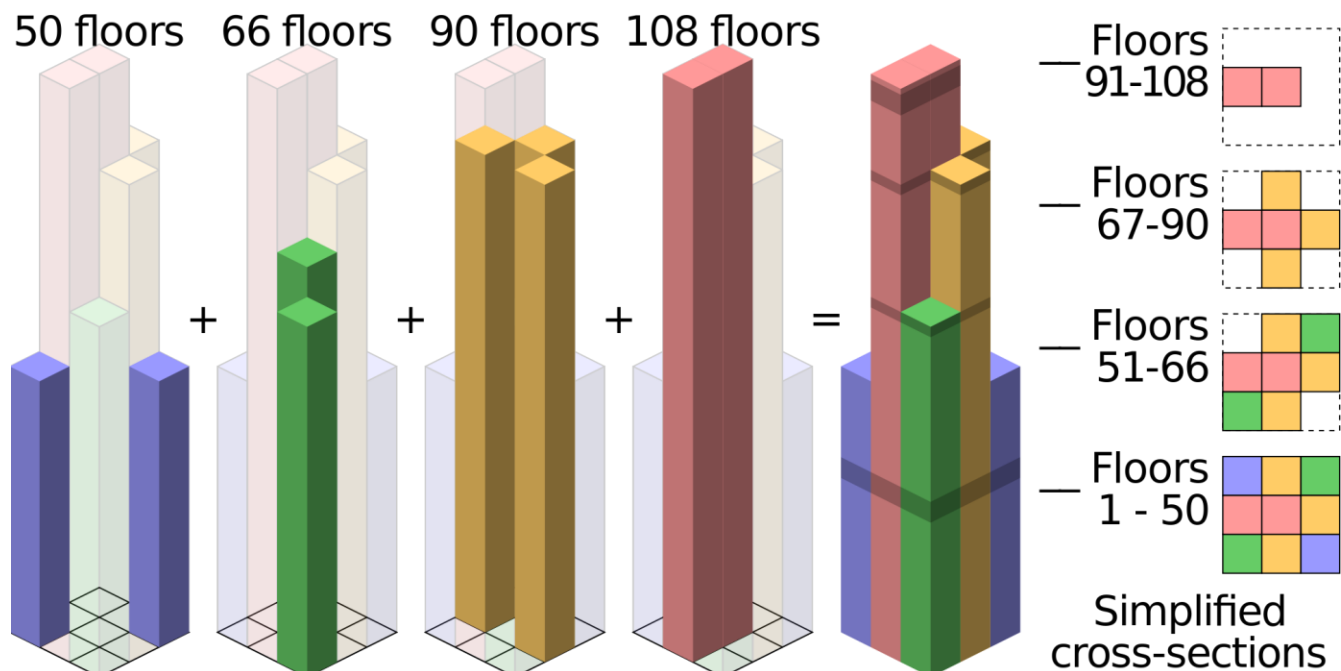
## 4.2 Willis Tower

### 4.2.1 Γενικά στοιχεία

Ο Willis Tower, γνωστός και ως Sears Tower, είναι ένας ουρανοξύστης 108 ορόφων, ύψους 442 μέτρων. Είναι χτισμένος στο Σικάγο των ΗΠΑ. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του το 1973 ξεπέρασε το World Trade Center και έγινε το ψηλότερο κτίριο στον κόσμο, έναν τίτλο που κράτησε για περίπου 25 χρόνια. Ο Willis Tower είναι το 2ο ψηλότερο κτίριο των ΗΠΑ και το 14 ψηλότερο στον κόσμο. Ωστόσο, το αρχικό πλάνο δεν προέβλεπε 108 πατώματα, αλλά αρκετά λιγότερα. Το 1982 προστέθηκαν 2 κεραίες στην κορυφή του, φέρνοντας έτσι το ύψος του στα 527 μέτρα. Με μία επιπλέον επέκταση της δυτικής κεραίας τον Ιούνιο του 2000, το ύψος του έφτασε τα 530 μέτρα επιτρέποντας του μόλις να διεκδικήσει τον τίτλο του ψηλότερου κτιρίου λόγω ύψους κορυφής (pinnacle height).

Το κτίριο έχει σχεδιαστεί ως 9 τετράγωνοι σωλήνες (tubes), ξεχωριστά κτίρια στην ουσία, ενωμένα σε έναν «πίνακα» 3x3, σχηματίζοντας έτσι συνολικά μια τετράγωνη βάση με πλευρές 69 μέτρων. Και οι 9 σωλήνες φτάνουν μέχρι τον 50ο όροφο. Από κει και πέρα, ο βορειοδυτικός και νοτιοανατολικός σωλήνας σταματούν στον 50ο όροφο, ο βορειοανατολικός και νοτιοδυτικός στον 60ο όροφο και ο βόρειος, ανατολικός και

νότιος στον 90ο. Οι υπόλοιποι 2 σωλήνες, ο δυτικός και ο κεντρικός συνεχίζουν μέχρι τον 108ο όροφο. Στην εικόνα που παρατίθεται αυτό γίνεται πολύ πιο ξεκάθαρο.



Εικόνα 4.15: Λεπτομέρεια κατανόησης σωλήνων (tubes)

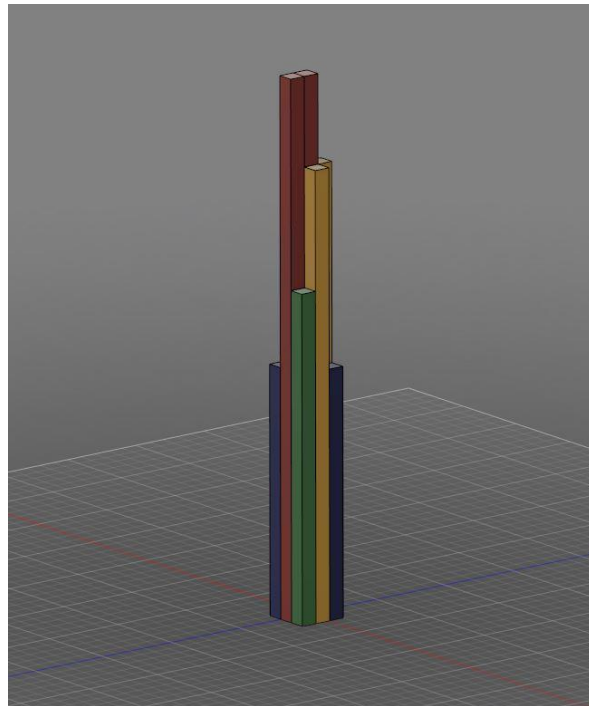
Ο Willis Tower είναι το πρώτο κτίριο που χρησιμοποίησε την *bundled tube structure* του Khan. Γύρω από τους ορόφους 29–32, 64–65, 88–89, και 104–108, εμφανίζονται μαύρες λωρίδες. Αυτές είναι γρίλιες που επιτρέπουν τον εξαερισμό για τον εξοπλισμό των υπηρεσιών και κρύβουν τα δικτύωματα της κατασκευής. Το κτίριο επιπλέον έχει ψεκασθήρες φωτιάς, αν και οι κανονισμοί δεν απαιτούσαν κάτι τέτοιο. Στην κορυφή του ουρανοξύστη τοποθετήθηκαν κεραίες τηλεοπτικής και ραδιοφωνικής μετάδοσης.

Στις 22 Ιουνίου 1974 άνοιξε στο κοινό το παρατηρητήριο του Willis Tower, που βρίσκεται στον 103ο όροφο και αποτελεί ένα από τους σπουδαιότερους τουριστικούς προορισμούς του Σικάγο. Από τόσο ψηλά, οι επισκέπτες μπορούν εύκολα να αισθανθούν την ταλάντωση του κτιρίου όταν φυσάει. Ο ουρανοξύστης γέρνει κατά περίπου 10 εκατοστά στα δυτικά λόγω της σχετικά ασύμμετρης κατασκευής του η οποία είναι εμπνευσμένη από μια διαφήμιση από ένα πακέτο από τσιγάρα.

#### 4.2.2 Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ως δεύτερη μορφή ουρανοξύστη θα χρησιμοποιηθεί ο Willis Tower. Ουρανοξύστης αρκετά παλαιάς κατασκευής, η οποία κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1973, χρησιμοποιείται ως δείγμα ψηλού κτιρίου με μειούμενη καθ' ύψος κάτοψη. Κτίριο με τετραγωνική στην βάση και πολυγωνική από ένα ύψος και έπειτα, ιδιαίτερης μορφής.

- 108 όροφοι
- 3 υπόγεια
- 442.1 m ύψος τελευταίου ορόφου
- 527 m ύψος κορυφής
- Εμβαδό κάτοψης βάσης 4760 m<sup>2</sup>
- Εμβαδό βάσης κάθε «τετραγώνου» 529 m<sup>2</sup>



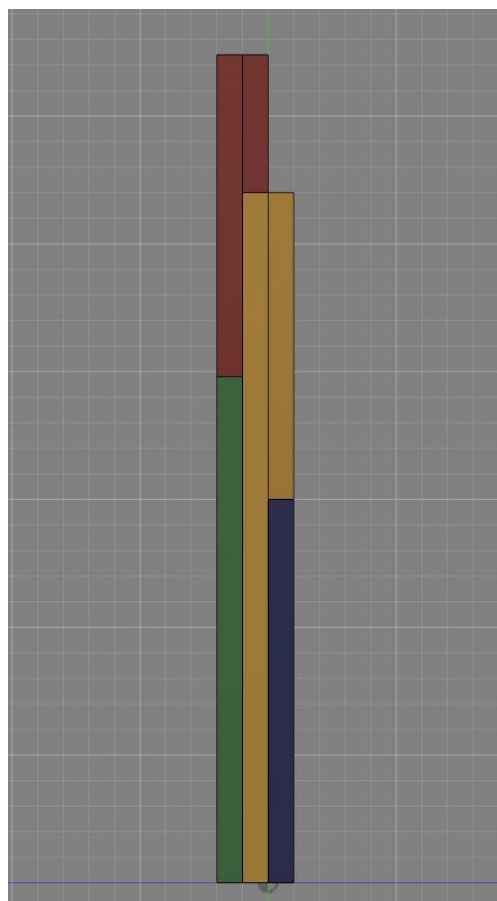
Εικόνα 4.16: Willis Tower, London  
(Μοντέλο Fusion 360)

#### 4.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Θα εξεταστούν 2 σενάρια ανεμικής φόρτισης. Στα επιμέρους σενάρια Α, Β θεωρούμε ότι ο άνεμος προσβάλλει το κτίριο κάθετα στην επιφάνεια της οποίας η πρόσοψη παρουσιάζεται πριν το κάθε σενάριο. Τα στοιχεία προσομοίωσης του τούνελ, για όλες τις περιπτώσεις, είναι:

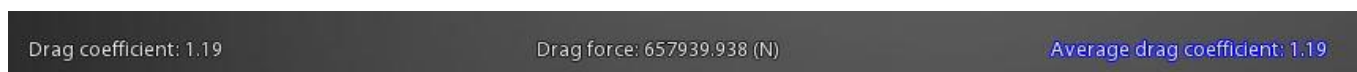
- Μήκος 2000 m
- Πλάτος 500 m
- Ύψος 2000 m

❖ Σενάριο A



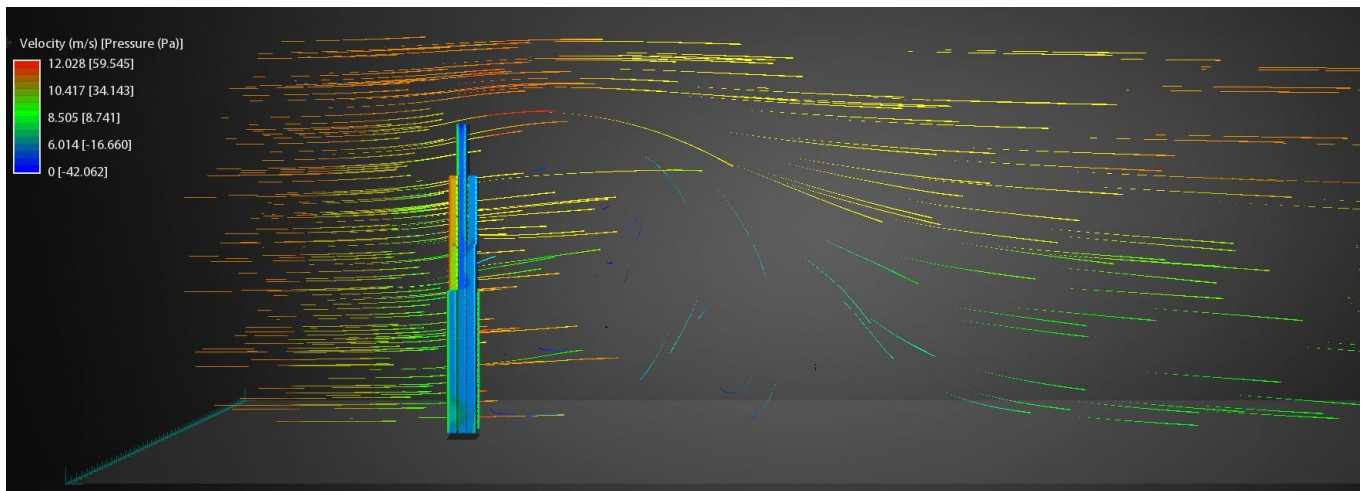
Εικόνα 4.17: Μέτωπο πρόσπτωσης  
Σενάριο A

Στην λεπτομέρεια 1 του σεναρίου A παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d = 1.19$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 657.939 N.



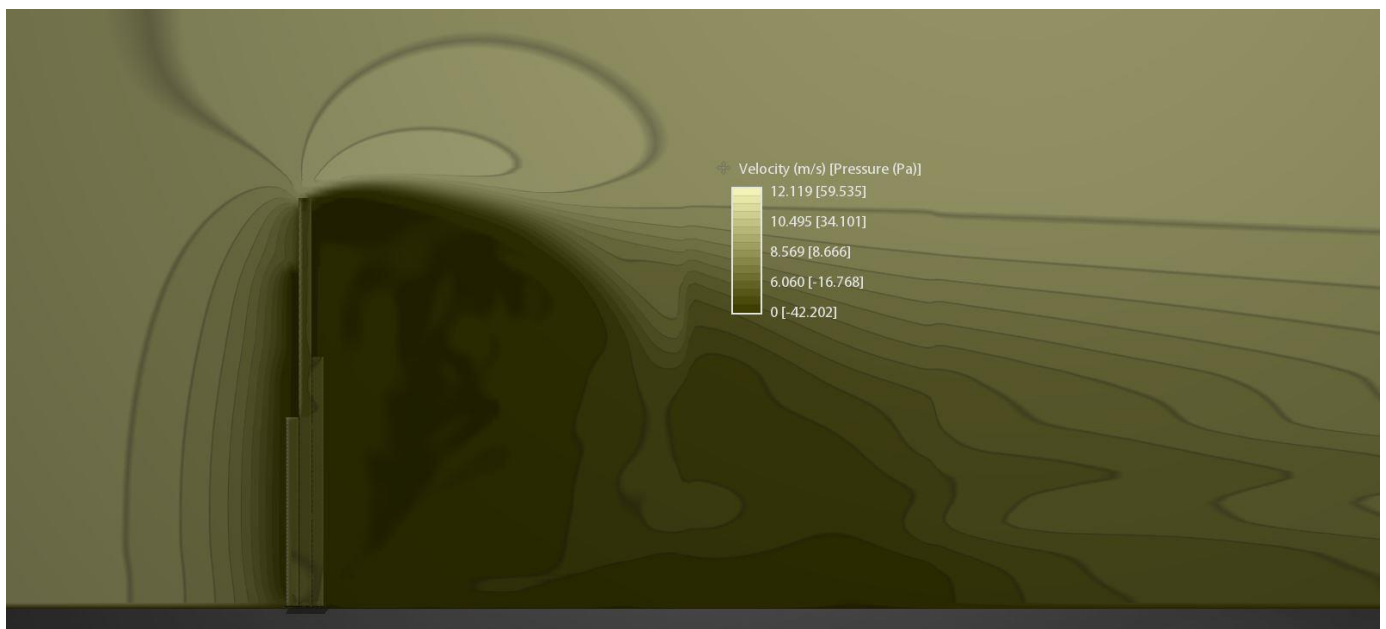
Εικόνα 4.18: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 του σεναρίου A παρατηρείται μία αύξηση της ταχύτητας από τα 10 m/s σε 12 m/s, δηλαδή μία αύξηση της τάξεως του 20% πλησίον της κορυφής του κτιρίου. Επίσης παρατηρείται μία αύξηση, μικρότερη, πλευρικά. Πιο συγκεκριμένα πλευρικά η αύξηση είναι περίπου 10%, από 10 m/s σε περίπου 11 m/s. Επίσης, δεν παρατηρείται ιδιαίτερος στροβιλισμός της ροής.



Εικόνα 4.19: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 του σεναρίου Α είναι πιο φανερή ακόμα, καθώς σημειώνεται μέσω ισοϋψών, η κατανομή των ταχυτήτων καθ' ύψος αλλά και σε βάθος. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αναφέρεται σε μία μόνο επιφάνεια, κατά μήκος τομή σε επιλεγμένο χαρακτηριστικό σημείο της πρόσοψης. Ακόμη γίνεται φανερό ένα αρκετά σημαντικό μήκος επιρροής, το οποίο πλησιάζει τα 900 μ. μετά το εμπόδιο.

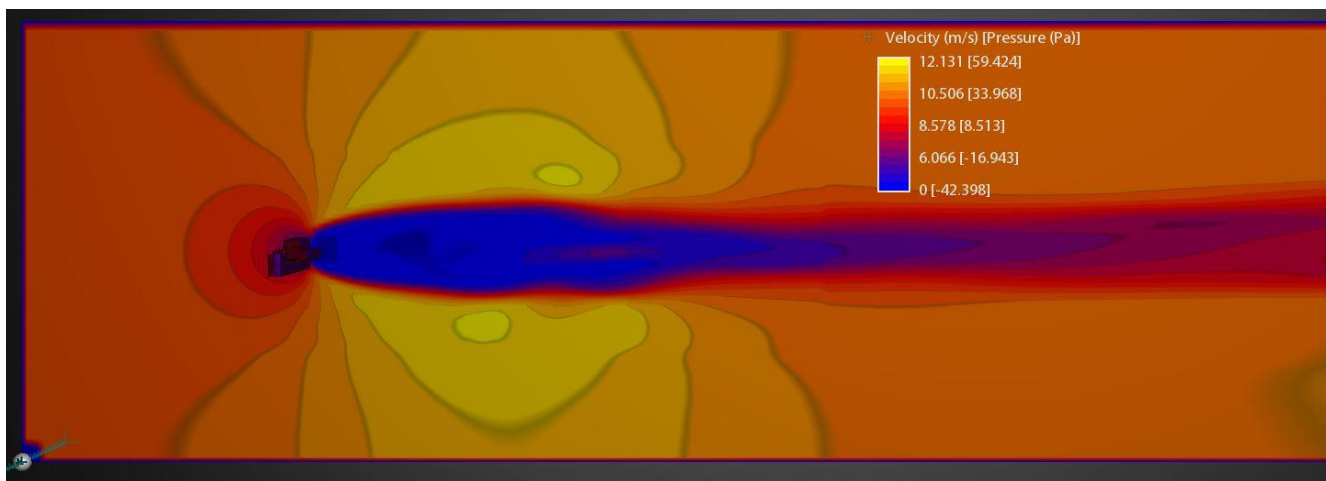


Εικόνα 4.20: Λεπτομέρεια 3

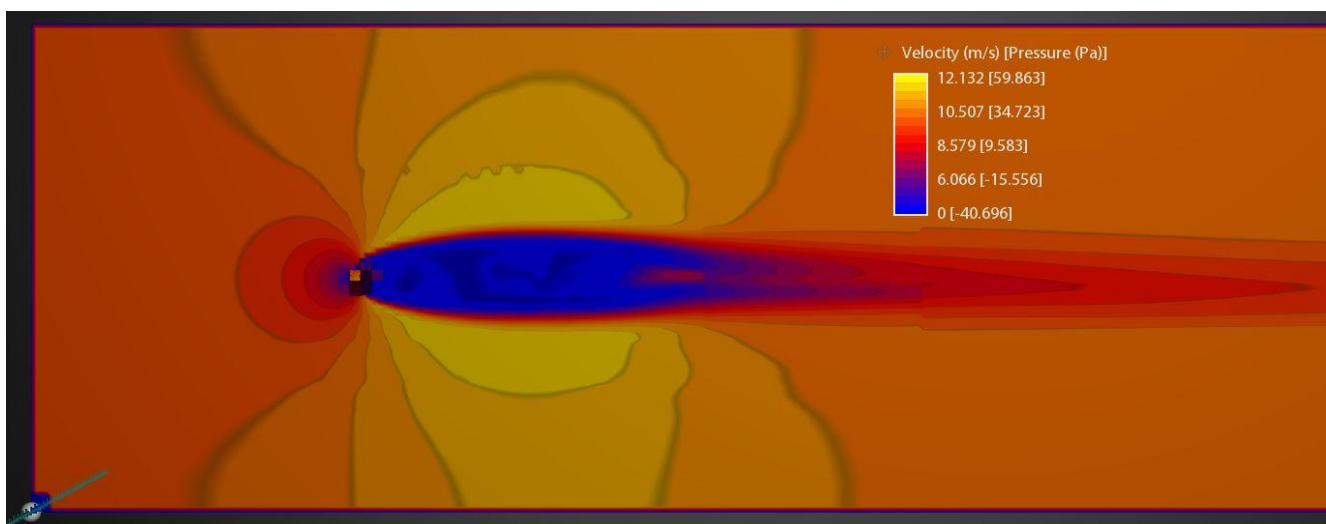
Στην λεπτομέρεια 4 του σεναρίου Α έχει επιλογή μία καθ' ύψος τομή στο επίπεδο του ορόφου 40, και ως τομή περιέχει και τα 9 tubes. Μήκος επιρροής είναι περίπου τα 900 m. Παρατηρείται ακόμη αύξηση ταχύτητας, μέγιστη, πλευρικά, της τάξεως του 20%.

Στην λεπτομέρεια 5 του σεναρίου Α έχει επιλεγεί μία καθ' ύψος τομή στο επίπεδο του ορόφου 80, και ως

τομή περιέχει 5 tubes, αυτά που έχουν μείνει σε εκείνο το ύψος. Μήκος επιρροής είναι περίπου τα 600 m. Παρατηρείται ακόμη αύξηση ταχύτητας, μέγιστη, πλευρικά, της τάξεως του 15%.



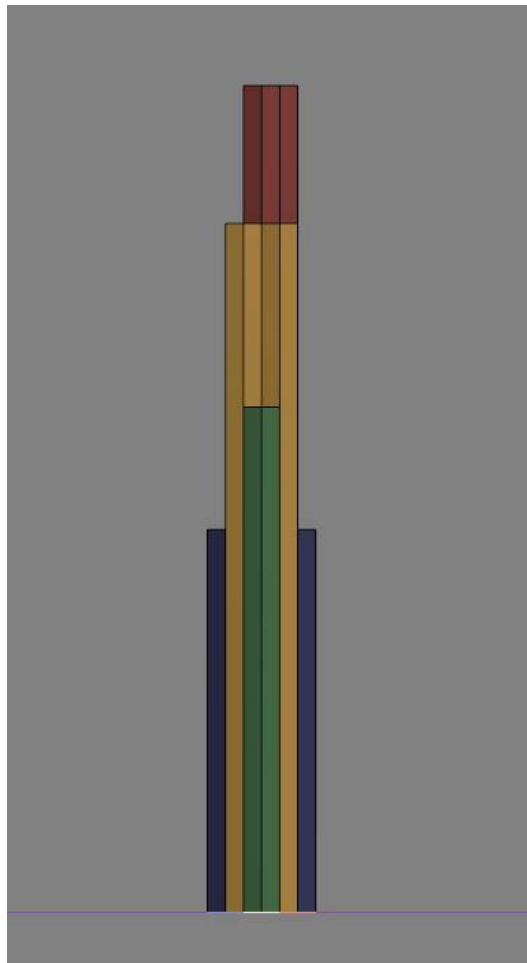
Εικόνα 4.21: Λεπτομέρεια 4



Εικόνα 4.22: Λεπτομέρεια 5



❖ Σενάριο B



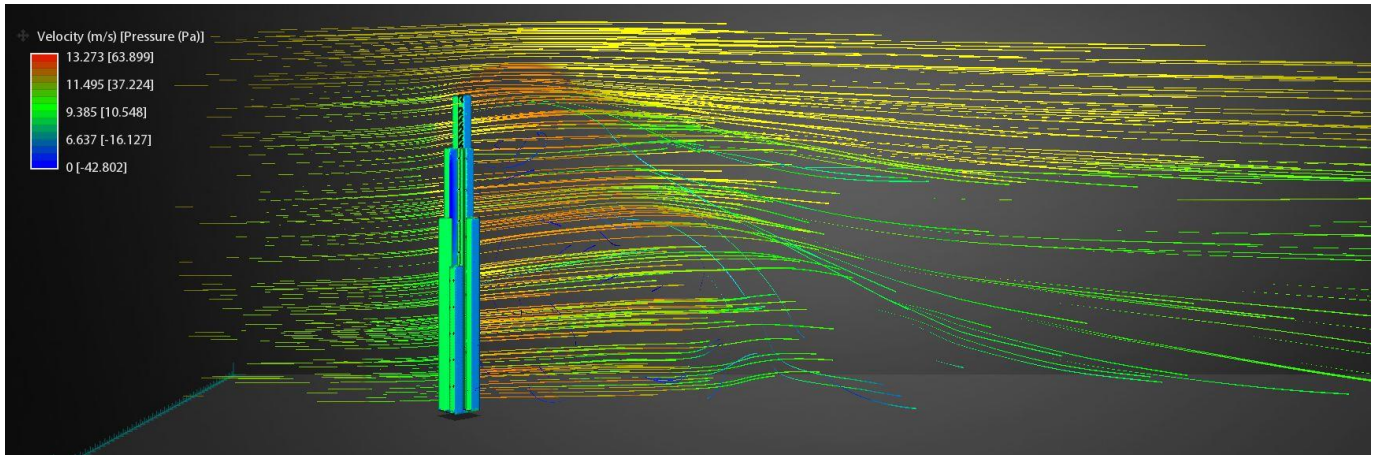
Εικόνα 4.23: Μέτωπο πρόσπτωσης  
Σενάριο B

Στην λεπτομέρεια 1 του σεναρίου B παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d = 0.61$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 427.419 N



Εικόνα 4.24: Λεπτομέρεια 1

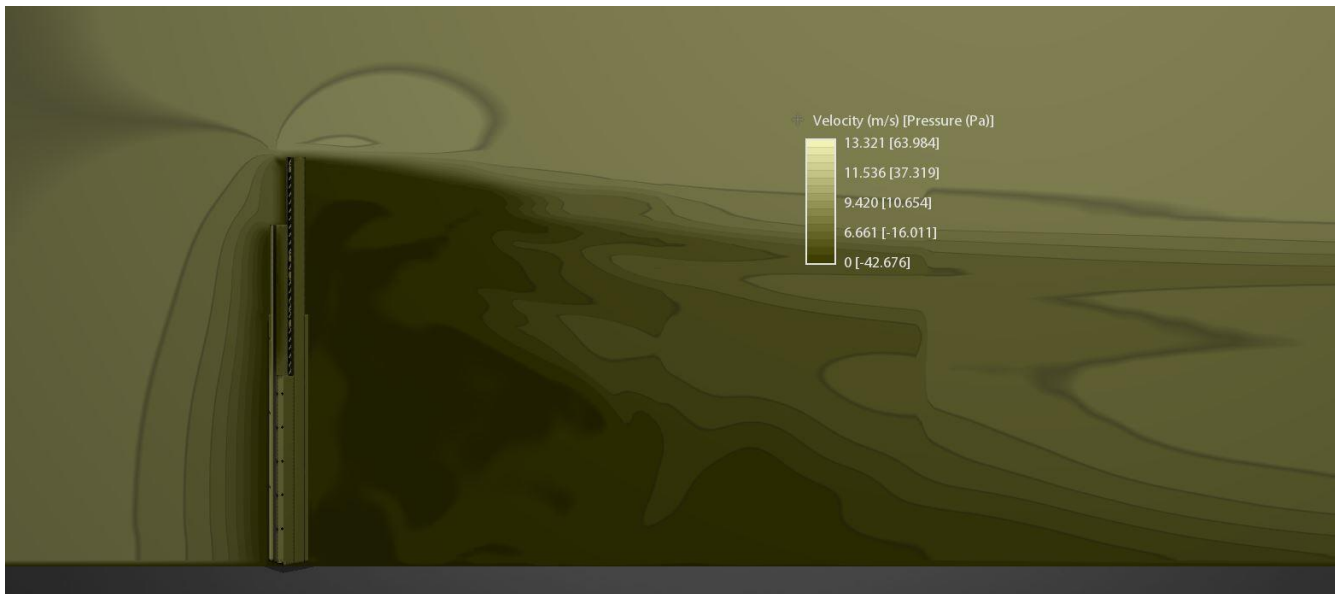
Στην λεπτομέρεια 2 του σεναρίου B παρατηρείται μία αύξηση της ταχύτητας από τα 10 m/s σε 11.50 m/s, δηλαδή μία αύξηση της τάξεως του 15% πλησίον της κορυφής του κτιρίου και πλευρικά. Ακόμη, δεν παρατηρείται ιδιαίτερος στροβιλισμός της ροής.



Εικόνα 4.25: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 του σεναρίου B καθίσταται ακόμη πιο καθαρή, καθώς σημειώνεται μέσω ισούψων, η κατανομή των ταχυτήτων καθ' ύψος αλλά και σε βάθος. Σημειώνεται, όπως και στο σενάριο A, ότι το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αναφέρεται σε μία μόνο επιφάνεια, κατά μήκος τομή σε επιλεγμένο χαρακτηριστικό σημείο της πρόσοψης.

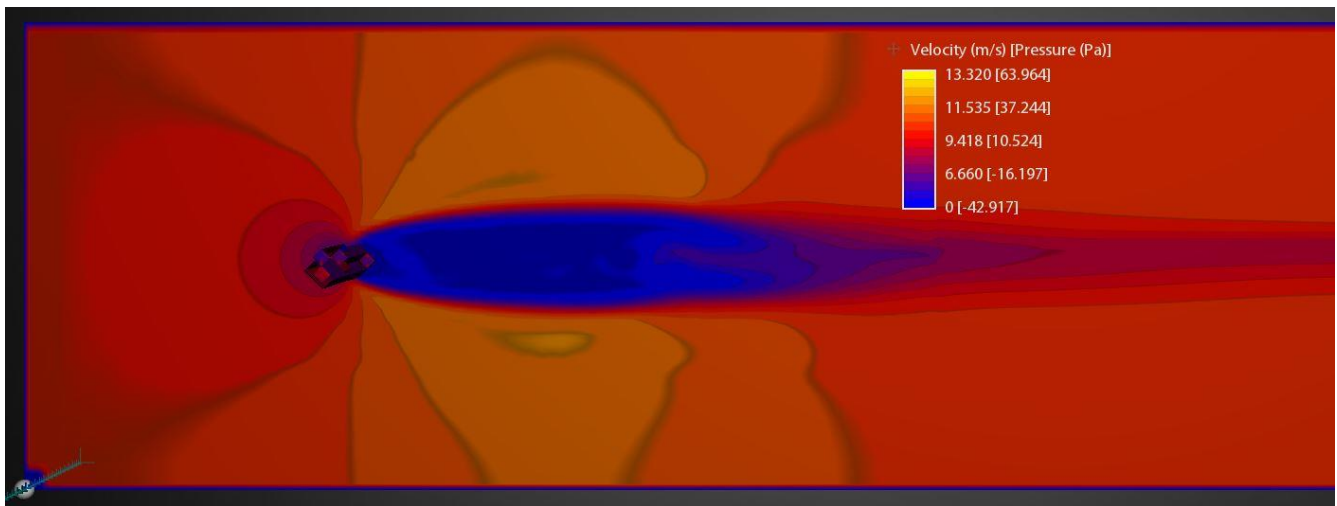
Ακόμη γίνεται φανερό ένα πιο μικρό, αλλά σημαντικό μήκος επιρροής, το οποίο πλησιάζει τα 650 μ. μετά το εμπόδιο.



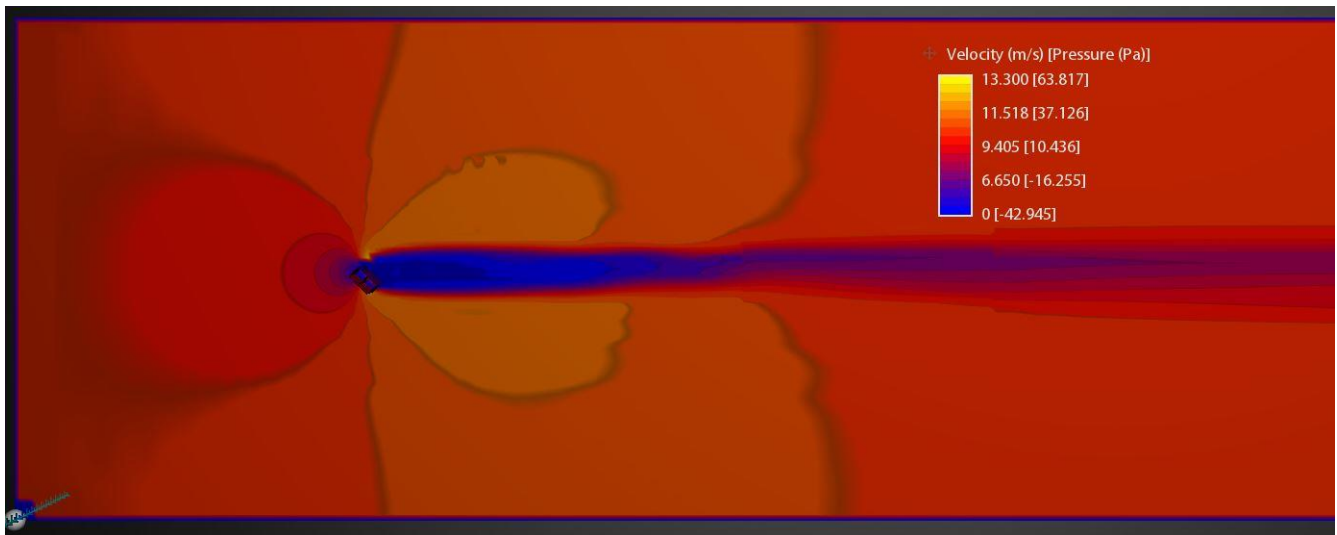
Εικόνα 4.26: Λεπτομέρεια 3

Στην λεπτομέρεια 4 του σεναρίου Β, κατ' αναλογία με το σεναρίου Α (για λόγους σύγκρισης), έχει επιλογή μία καθ' ύψος τομή στο επίπεδο του ορόφου 40, και ως τομή περιέχει και τα 9 tubes. Μήκος επιρροής είναι περίπου τα 600 μ. Παρατηρείται ακόμη αύξηση ταχύτητας, μέγιστη 12 m/s, πλευρικά, που αντιστοιχεί σε αύξηση τάξεως του 20%.

Στην λεπτομέρεια 5 του σεναρίου Β έχει επιλεγεί μία καθ' ύψος τομή στο επίπεδο του ορόφου 80, και ως τομή περιέχει 5 tubes, αυτά που έχουν μείνει σε εκείνο το ύψος. Μήκος επιρροής είναι περίπου τα 500 μ. Παρατηρείται ακόμη αύξηση ταχύτητας, μέγιστη, πλευρικά, της τάξεως του 15%.



Εικόνα 4.27: Λεπτομέρεια 4



Εικόνα 4.28: Λεπτομέρεια 5

## 4.3 Westin Peachtree Plaza

### 4.3.1 Γενικά στοιχεία

Ο Westin Peachtree Plaza είναι ένας ουρανοξύστης ξενοδοχείο στο δρόμο Peachtree της Ατλάντα, Γεωργία, ΗΠΑ. Με ύψος 220.37 μέτρα, διάμετρο 57 μέτρα και 73 ορόφους, ο πύργος είναι ο 2ος ψηλότερος ουρανοξύστης στο δυτικό ημισφαίριο και ο 17ος στον κόσμο που είναι μόνο ξενοδοχείο.

Το κτίριο είναι εμπλουτισμένο με ανακλαστικό γυαλί σε κυλινδρικό σχήμα έτσι ώστε να αντανακλά ένα μεγάλο μέρος της πόλης στον ορίζοντα (skyline), αν και κάθε ένα από τα 5600 παράθυρα είναι επίπεδο και όχι κυρτό. Ένας άλλος μικρός κύλινδρος διατρέχει όλο το κτίριο από τη μία πλευρά και φιλοξενεί δύο γραφικούς ανελκυστήρες. Στα ανώτερα πατώματα βρίσκεται το Sun Dial Restaurant and Bar, ένα περιστρεφόμενο εστιατόριο που προσφέρει πανοραμική θέα στην πόλη και τα περίχωρά της. Ο τελευταίος όροφος του εστιατορίου ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή κάθε 30 λεπτά, και το κάτω μέρος κάθε 60 λεπτά.

Στις 14 Μαρτίου του 2008, το κτίριο μαζί με άλλους γειτονικούς ουρανοξύστες υπέστη βλάβη όταν ένας ανεμοστρόβιλος χτύπησε την περιοχή. Αναφορές λένε ότι το κτίριο ταλαντεύτηκε μπρος και πίσω περίπου πάνω από μισό μέτρο προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως είχε σχεδιαστεί. Στις 9 Νοεμβρίου 2010 η ανακαίνιση του κτιρίου ολοκληρώθηκε για την αποκατάσταση των ζημιών που είχε υποστεί από τον ανεμοστρόβιλο δυο χρόνια πριν.

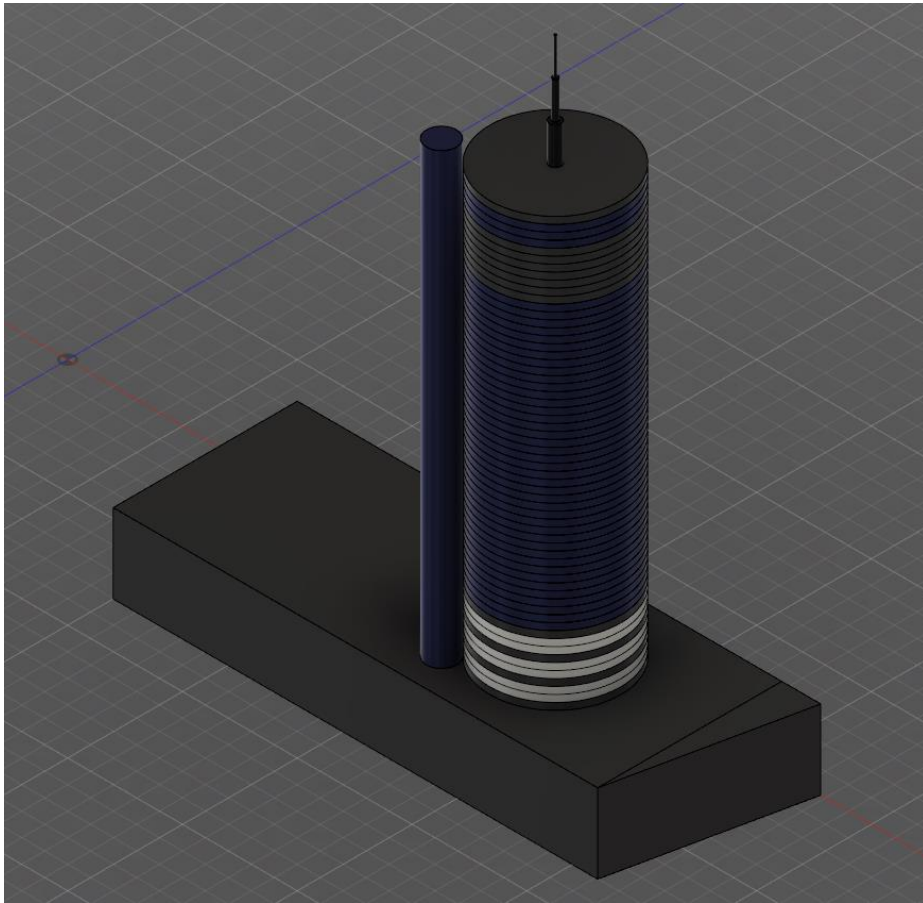
### 4.3.2 Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ως τρίτη μορφή ουρανοξύστη θα χρησιμοποιηθεί ο Westin Peachtree Plaza. Παλιά κατασκευή, επιλέγεται για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ως χαρακτηριστικό παράδειγμα ψηλού κτιρίου κυκλικής διατομής.

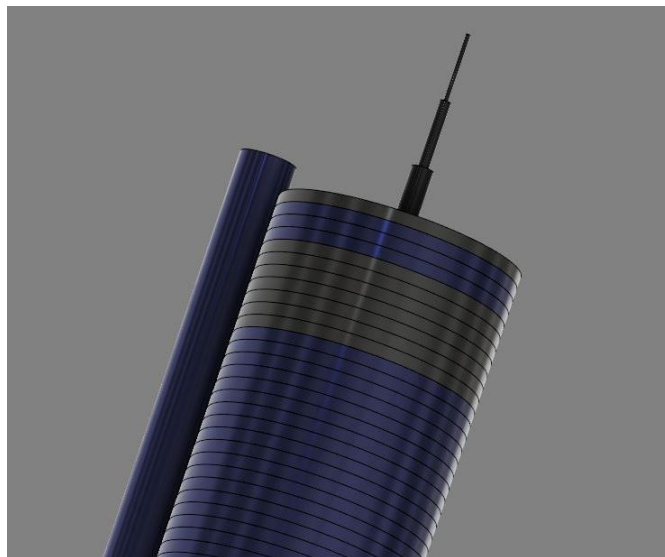
Ενδιαφερόμαστε, αεροδυναμικά, για το κυλινδρικό μέρος του κτιρίου. Έχει σχετικά μεγάλη κάτοψη ως προς το ύψος του, κάτι που αμβλύνει σε μεγάλο βαθμό την πρόσοψη του.

Κτίριο επομένως με κυκλική κάτοψη από ένα συγκεκριμένο ύψος και μετά, το οποίο αναμένεται να είναι συγκριτικά ευμενέστερο, αεροδυναμικά, από τις 2 προηγούμενες δοκιμές.

- 73 όροφοι
- 220.37 m ύψος τελευταίου ορόφου
- 269.10 m ύψος κορυφής (antenna)
- Εμβαδό τυπικής κάτοψης περίπου 2500 m<sup>2</sup>



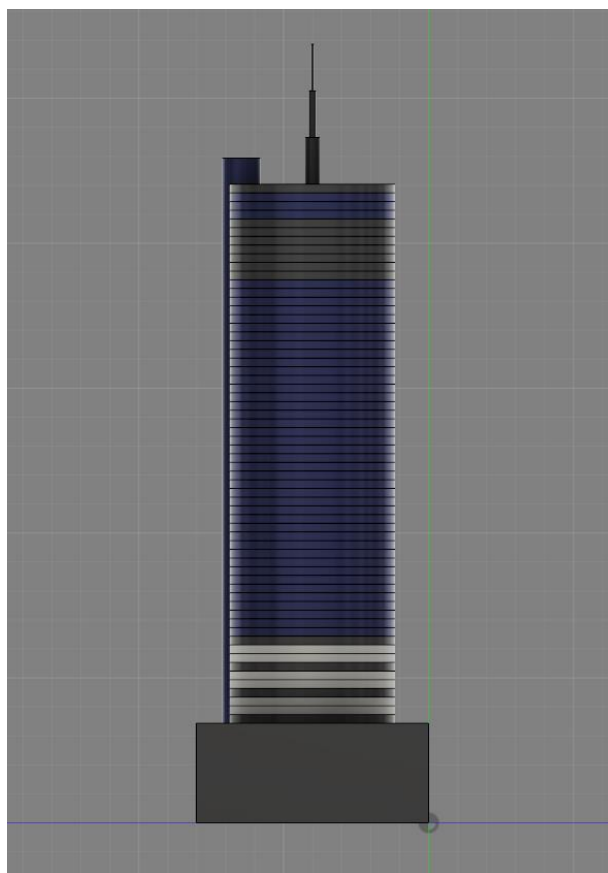
Εικόνα 4.29: Westin Peachtree Plaza, Atlanta, USA  
(Μοντέλο Fusion 360)



Εικόνα 4.30: Σχεδιαστική λεπτομέρεια

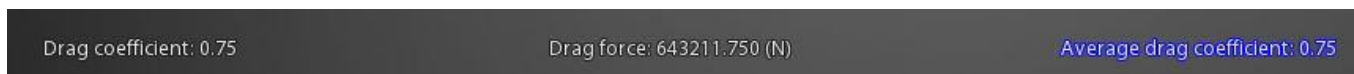
### 4.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Θα εξεταστεί μόνο μία διεύθυνση, καθώς μας απασχολεί η απόκριση του κυκλικού μέρους του κτιρίου. Άλλωστε, το ύψος του ορθογωνίου-τραπεζίου της βάσης δέχεται, στην πραγματικότητα, πολύ μικρή φόρτιση από άνεμο για 2 λόγους. Ο πρώτος ότι είναι σχετικά μικρού ύψους και ο δεύτερος ότι ο ουρανοξύστης βρίσκεται σε πλήρως αστικοποιημένη περιοχή κάτι, που όπως προαναφέρθηκε, αντιστοιχεί σε ιδιαίτερα τραχύ οριακό στρώμα και επομένως μέγιστες ταχύτητες σε συγκριτικά πολύ μεγαλύτερο ύψος. Το ζήτημα της εξάρτησης της ταχύτητας από το ανάγλυφο παρουσιάζεται και στο κεφάλαιο 5.



Εικόνα 4.31: Μέτωπο πρόπτωσης

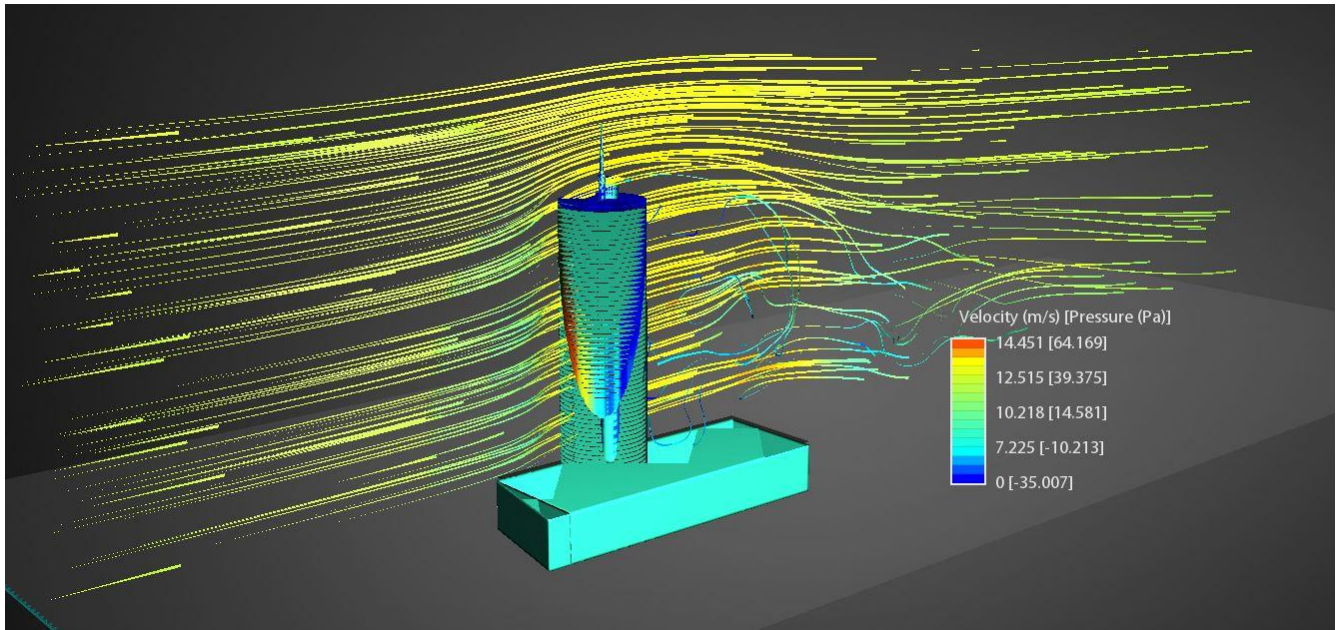
Στην λεπτομέρεια παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d=0.75$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 643.212 N



Εικόνα 4.32: Λεπτομέρεια 1

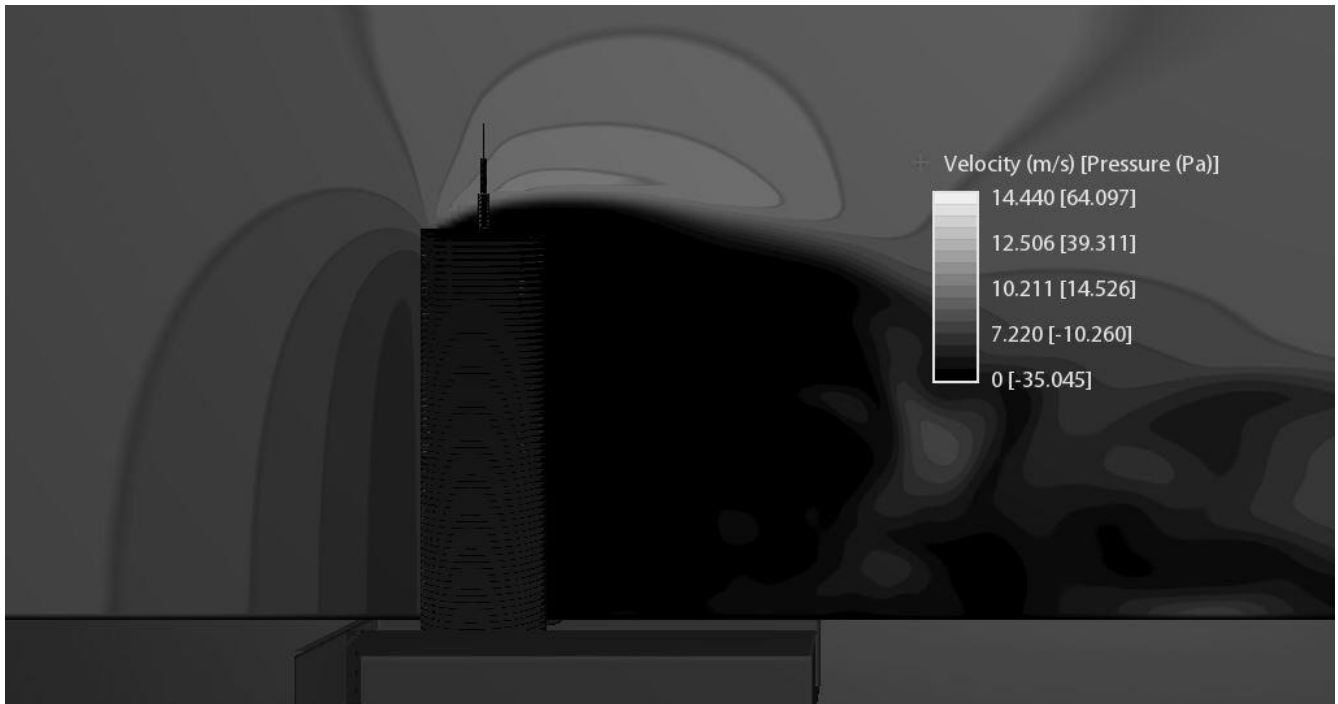
Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται μία αύξηση της ταχύτητας από τα 10 m/s σε 14 m/s, δηλαδή μία αύξηση

της τάξεως του 40% πλησίον της κορυφής του κτιρίου και πλευρικά αύξηση περίπου 25%. Τέλος, δεν παρατηρείται ιδιαίτερος στροβιλισμός της ροής.



Εικόνα 4.33: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 καθίσταται ακόμη πιο καθαρή, καθώς σημειώνεται μέσω ισοϋψών, η κατανομή των ταχυτήτων καθ' ύψος αλλά και σε βάθος. Σημειώνεται γενικότερα, ότι το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αναφέρεται σε μία μόνο επιφάνεια, κατά μήκος τομή σε επιλεγμένο χαρακτηριστικό σημείο της πρόσοψης. Ακόμη γίνεται φανερό ένα πιο μικρό, αλλά σημαντικό μήκος επιρροής, το οποίο πλησιάζει τα 300 μ. μετά το εμπόδιο, που αντιστοιχεί 1.5 φορά στο ύψος του εμποδίου.

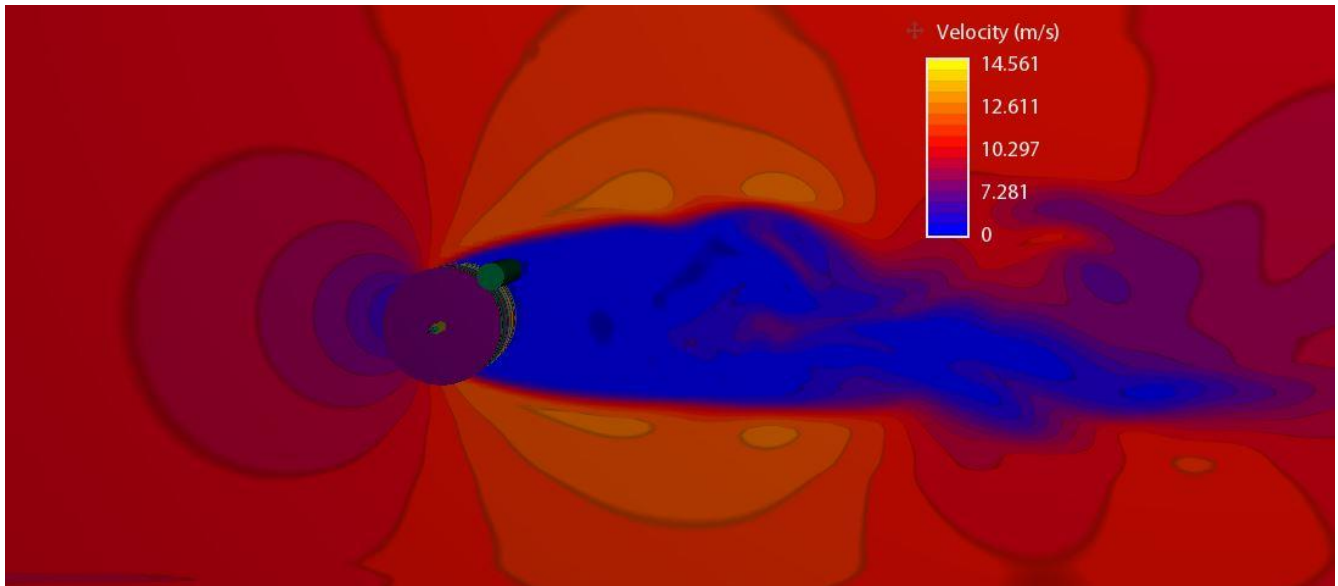


Εικόνα 4.34: Λεπτομέρεια 3

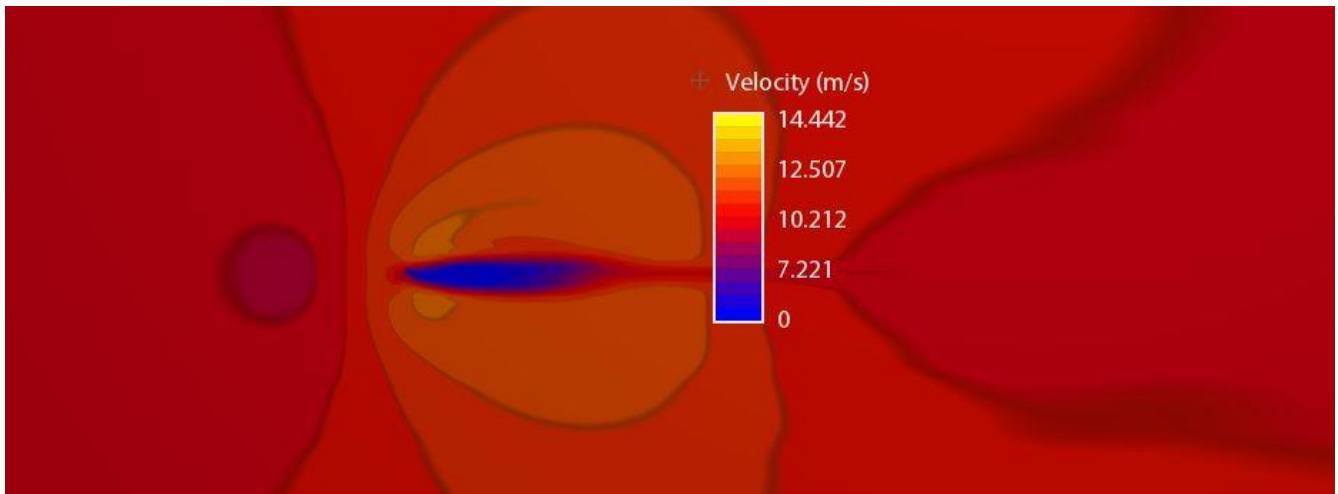
Στην λεπτομέρεια 4, έχει επιλογή μία καθ' ύψος τομή σε ύψος 100 m από την βάση του κυλίνδρου. Μήκος επιρροής είναι περίπου τα 300 μ. Παρατηρείται ακόμη αύξηση ταχύτητας, μέγιστη 13 m/s, πλευρικά, που αντιστοιχεί σε αύξηση τάξεως του 30%.

Στην λεπτομέρεια 5 έχει επιλεγεί μία καθ' ύψος τομή πάνω από το τέλος του κυλίνδρου, με στόχο τον προσδιορισμό της επιτάχυνσης της ροής στην κορυφή. Αυτή προσδιορίζεται σε 13.5 m/s, αύξηση 35%. Ο μηδενισμός ταχυτήτων που φαίνεται στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο οφείλεται στο tip του κτιρίου.





Εικόνα 4.35: Λεπτομέρεια 4



Εικόνα 4.36: Λεπτομέρεια 5

## 4.4 Shanghai WFC

### 4.4.1 Γενικά στοιχεία

Το Παγκόσμιο Οικονομικό Κέντρο Σαγκάης είναι ψηλός ουρανοξύστης ο οποίος βρίσκεται στην Σαγκάη, Κίνα. Το ύψος του φτάνει τα 492 m και αποτελείται από 101 ορόφους.

Ουρανοξύστης ιδιαίτερης μορφής, που χαρακτηρίστηκε το έτος που ολοκληρώθηκε (2008) ως ο καλύτερος

ουρανοξύστης που έχει κατασκευαστεί.

Φιλοξενεί χώρους γραφείων, ξενοδοχείο, μουσείο, συγκροτήματα με αίθουσες παρουσιάσεων, παρατηρητήριο, εμπορικά κέντρα αλλά και πάρκινγκ. Ξεχωριστό αρχιτεκτονικό στοιχείο αποτελεί το τραπεζοειδές κενό κοντά στην κορυφή του.

Στο αρχικό σχέδιο το κενό ήταν κυκλικής μορφής, διαμέτρου 46 μέτρων, τόσο για να μειώνει τις πιέσεις λόγω των ανέμων, όσο και για να αποτελεί αναφορά στην αναπαράσταση του ουρανού ως κύκλο όπως περιγραφόταν στη μυθολογική παράδοση της Κίνας. Επιπλέον έμοιαζε με Κινέζικη πύλη φεγγαριού που εμφανιζόταν συχνά στην Κινέζικη αρχιτεκτονική. Το σχήμα εγκαταλείφθηκε τελικά εξαιτίας ποικίλων διαμαρτυριών και προτάθηκε η σημερινή του μορφή. Ανεπίσημα, εξαιτίας του σχήματος του κενού, το κτίριο αναφέρεται συχνά και ως «ανοιχτήρι μπουκαλιού».

Πιο συγκεκριμένα, ο πύργος αποτελείται από τρία ξεχωριστά παρατηρητήρια, πάνω και κάτω από το άνοιγμα της κορυφής αντίστοιχα. Το ύψος του χαμηλότερου παρατηρητηρίου βρίσκεται στα 423 μέτρα στον 94 όροφο, το δεύτερο στα 439 μέτρα στον 97ο όροφο, και το ψηλότερο στα 474 μέτρα στον 100ο όροφο.

Το ύψος του ουρανοξύστη αρχικά είχε υπολογιστή να φτάνει στα 509.2 μέτρα για να ξεπεράσει τον Ταιπεί 101, αλλά λόγω επιβολής ορίου ύψους έφτασε το μέγιστο ύψος του στα 492 μέτρα.

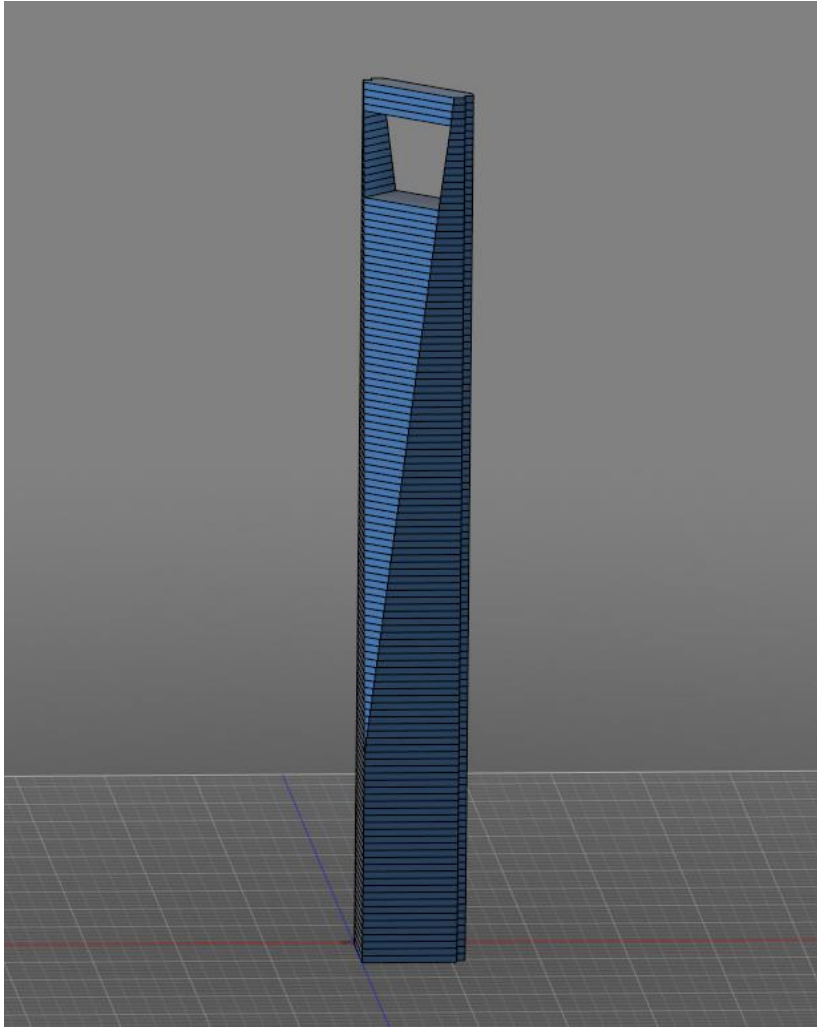
Το τραπεζοειδές τελείωμα είναι φτιαγμένο από δομικό χάλυβα και ενισχυμένο τσιμέντο. Ένα μεγάλο πλήθος δυνάμεων όπως ο άνεμος, οι άνθρωποι και ο βαρύς εξοπλισμός του κτιρίου λειτουργούν ως η δομή του Shanghai WFC. Οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται στο έδαφος μέσω διαγώνιων συνδέσμων. Αυτή η σχεδίαση θέτει έναν αποδοτικό τρόπο χρήσης των υλικών γιατί μειώνει το πάχος των εξωτερικών τοιχωμάτων πυρήνα και το βάρος του δομικού χάλυβα στους περιμετρικούς τοίχους.

#### 4.4.2 Σημαντικά βασικά στοιχεία – Τεχνικά χαρακτηριστικά

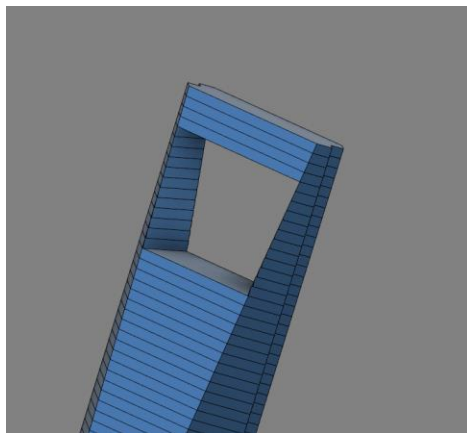
Επιλέγεται για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ως παράδειγμα για ψηλό κτίριο μειούμενης κάτοψης, με κενό για την δίοδο του ανέμου, αρχιτεκτονικά ξεχωριστό.

Πολύ νεότερο σε σύγκριση με τα μελετώμενα, ως τώρα, κτίρια.

- 101 όροφοι
- 3 υπόγεια
- 492 m ύψος τελευταίου ορόφου
- 494.20 m ύψος κορυφής
- Εμβαδόν κάτοψης ισογείου 3364 τ.μ.



Εικόνα 4.37: WFC Shanghai, Shanghai  
(Μοντέλο Fusion 360)



Εικόνα 4.38: Λεπτομέρεια

#### 4.4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

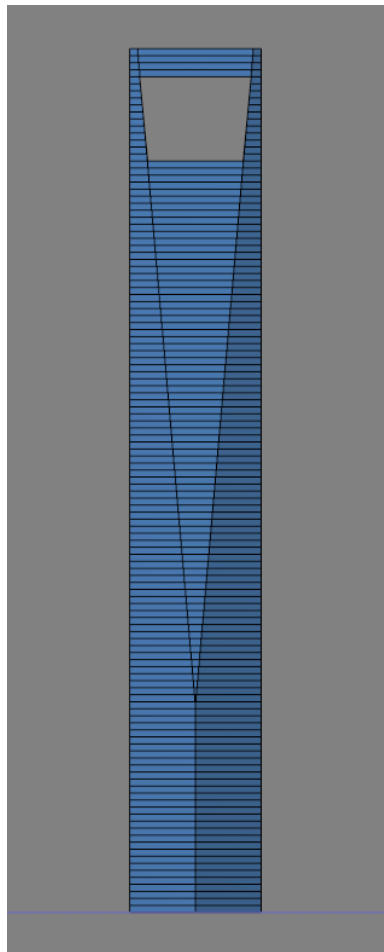
Εφαρμόζουμε τυπική μορφή ανέμου σε wind tunnel σταθερής έντασης 10 m/s.

Εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης του ανέμου, καθώς οι τρεις αυτές περιπτώσεις καλύπτουν όλα τα πιθανά ενδεχόμενα. Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζονται τα μέτωπα πρόσπτωσης του ανέμου.

Τα στοιχεία προσομοίωσης του τούνελ, και για τις τρεις περιπτώσεις, είναι:

- Μήκος 1800 m
- Πλάτος 600 m
- Ύψος 1800 m

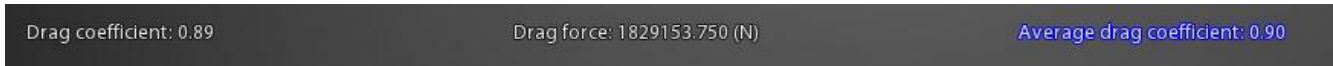
❖ Σενάριο A



Εικόνα 4.39: Μέτωπο Πρόσπτωσης

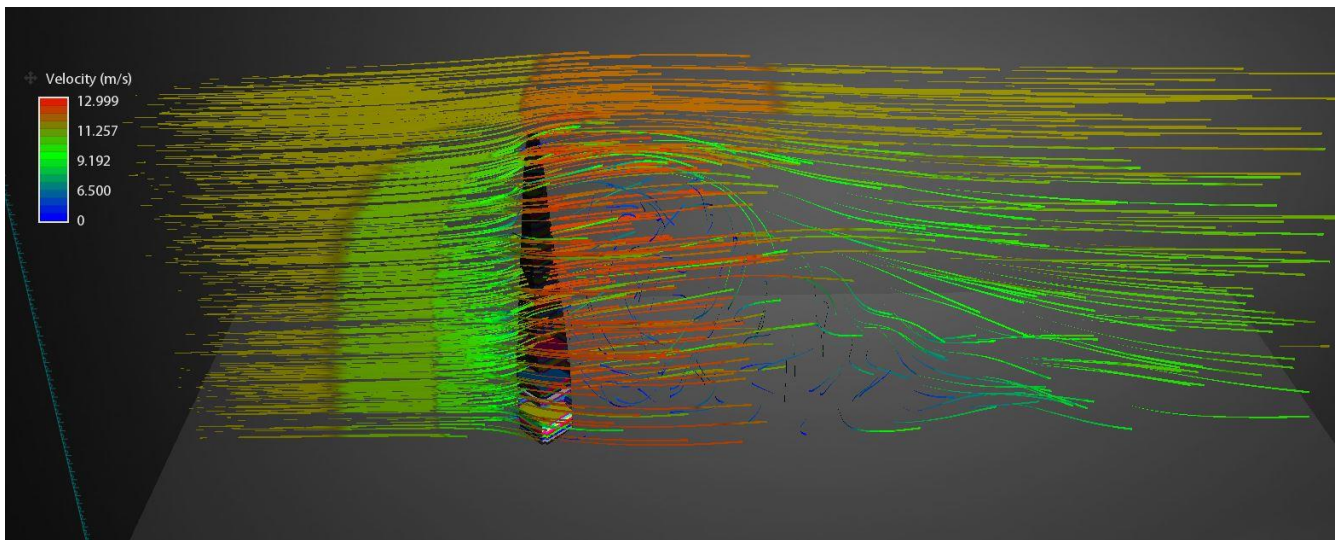
Σενάριο A

Στην λεπτομέρεια παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d = 0.90$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 1.829.154 N



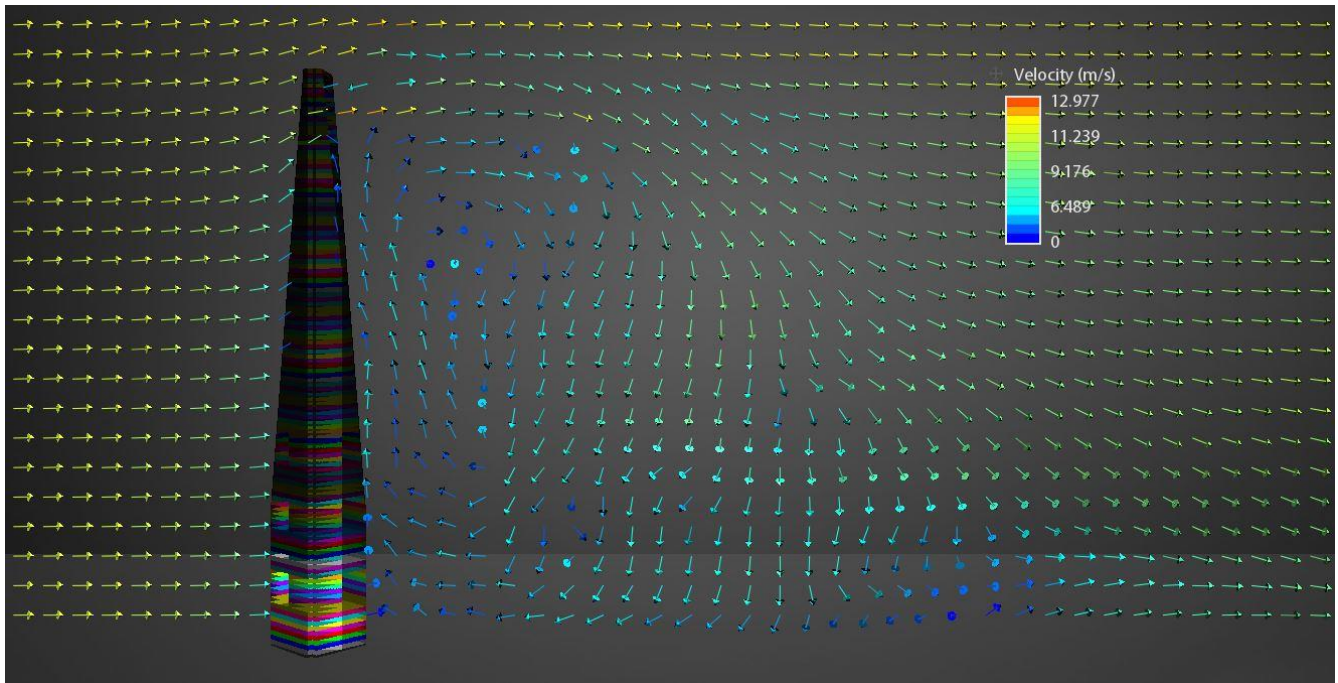
Εικόνα 4.40: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται μία αύξηση της ταχύτητας από τα 10 m/s σε 13 m/s, δηλαδή μία αύξηση της τάξεως του 30% πλησίον της κορυφής του κτιρίου αλλά κυρίως πλευρικά.



Εικόνα 4.41: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 παρουσιάζεται μέσω διανυσμάτων η κατεύθυνση και η ταχύτητα των μορίων του αέρα σε τομή κάθετη στο έδαφος, παράλληλα με την ροή στο μέσον της βάσης του κτιρίου. Διακρίνουμε στροβιλισμό της ροής αλλά και δυνάμεις που ασκούνται στο πίσω μέρος του.



Εικόνα 4.42: Λεπτομέρεια 3

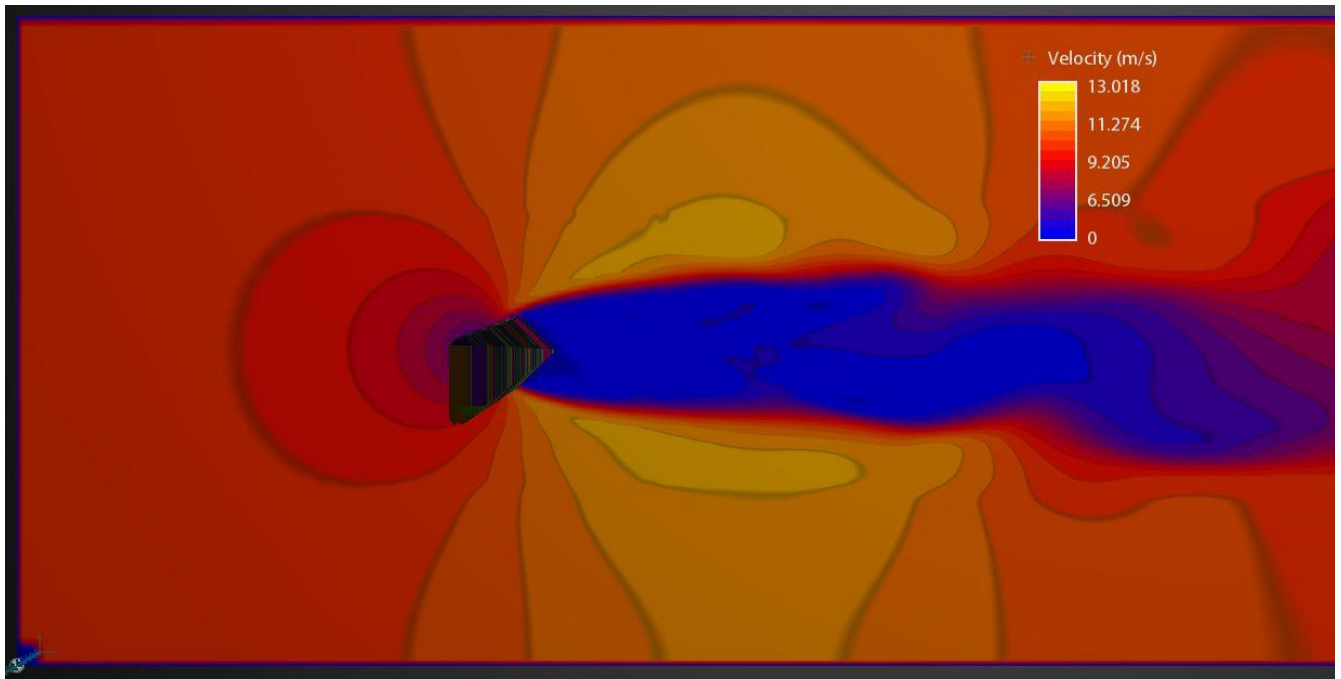
Στην συνέχεια εξετάζονται 3 παράλληλες με το επίπεδο του εδάφους τομές, με στόχο την επαρκή κατανόηση του μήκους επιρροής του εμποδίου σε σχέση με την απόσταση από το έδαφος.

Η λεπτομέρεια 4 είναι η τομή σε ύψος 80 m από το έδαφος (λίγο πριν την αρχή της μείωσης της κάτοψης), η λεπτομέρεια 5 σε ύψος 250 m από το έδαφος (μέσο ύψος) και η λεπτομέρεια 6 στο επίπεδο του τραπεζοειδούς κενού (σημαντική μορφολογική λεπτομέρεια).

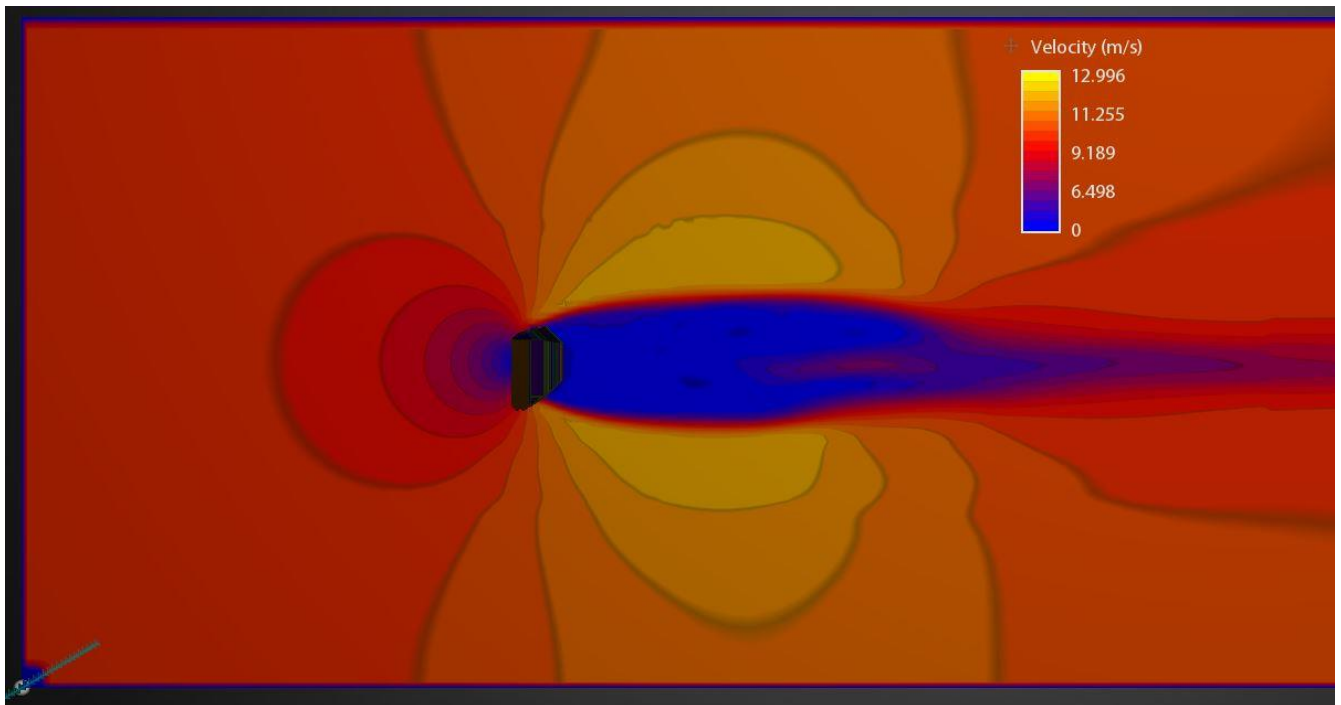
Στην λεπτομέρεια 4 παρατηρούμε μήκος επιρροής 750 m και μέγιστη πλευρική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα 13 m/s.

Στην λεπτομέρεια 5 παρατηρούμε μήκος επιρροής 500 m και μέγιστη πλευρική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα 13 m/s, αλλά με μεγαλύτερο πλάτος επιρροής από την λεπτομέρεια 4.

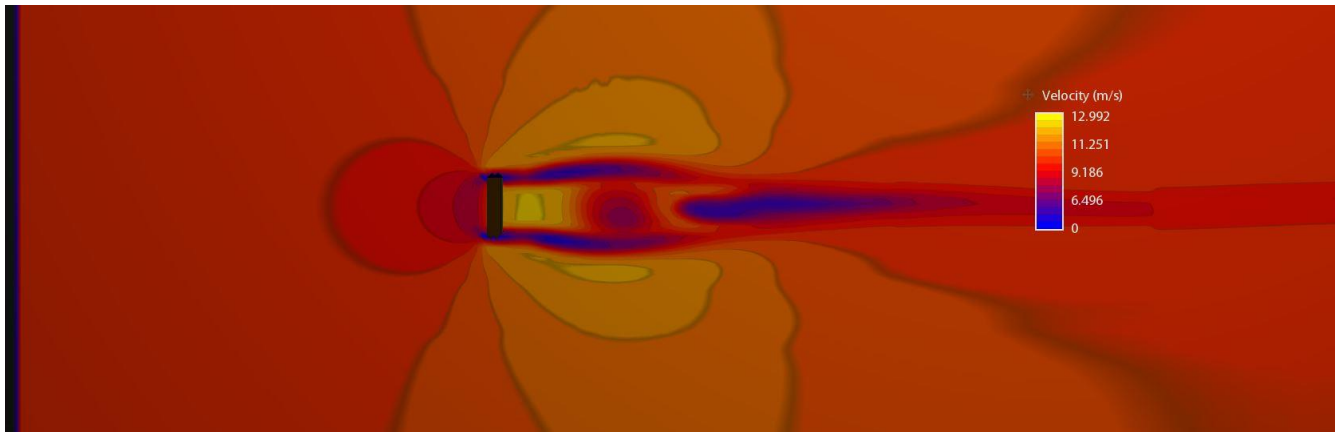
Στην λεπτομέρεια 6 παρατηρούμε μήκος επιρροής 200 m και μέγιστη πλευρική, αλλά και στο τραπεζοειδές κενό, αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα 13 m/s. Το τελευταίο συμπέρασμα είναι και η βάση της σκέψης για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας προς όφελος της λειτουργίας του ουρανοξύστη, κάτι το οποίο θα προσπαθήσουμε να εκμεταλλευτούμε και εμείς στην πρόταση που παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου 5.



Εικόνα 4.43: Λεπτομέρεια 4



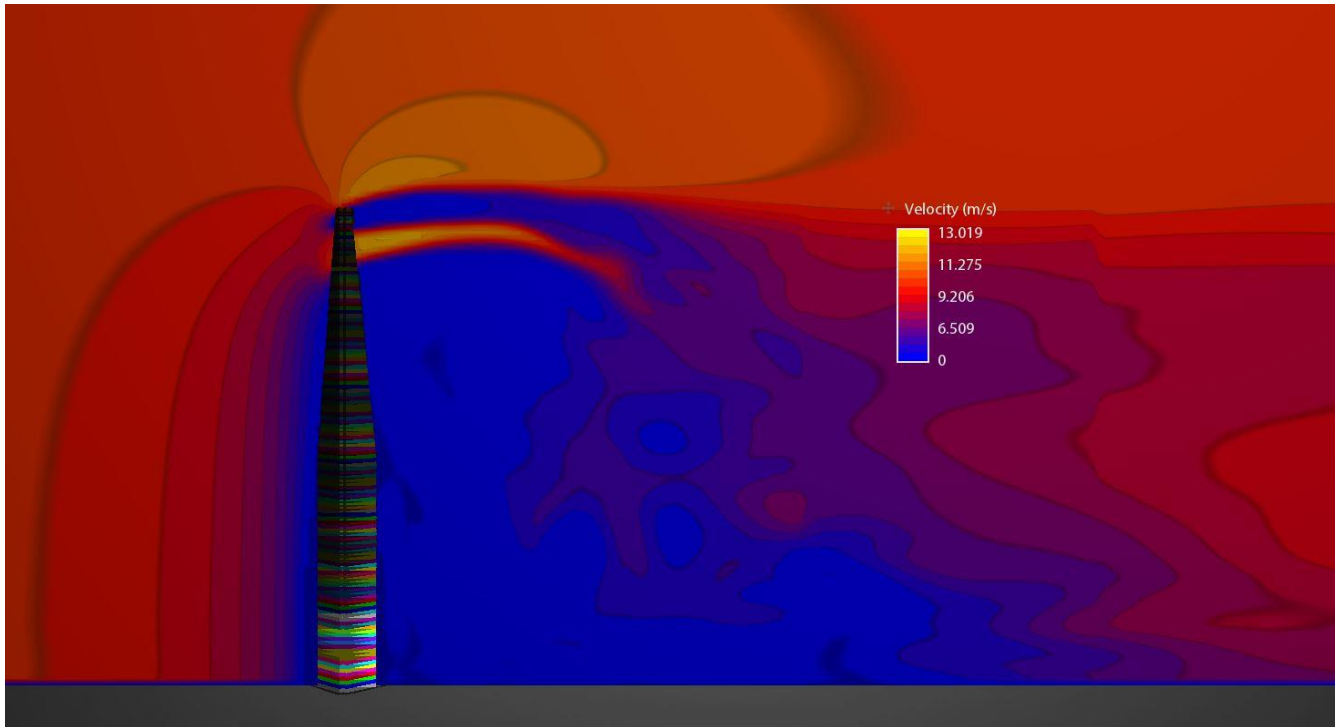
Εικόνα 4.44: Λεπτομέρεια 5



Εικόνα 4.45: Λεπτομέρεια 6

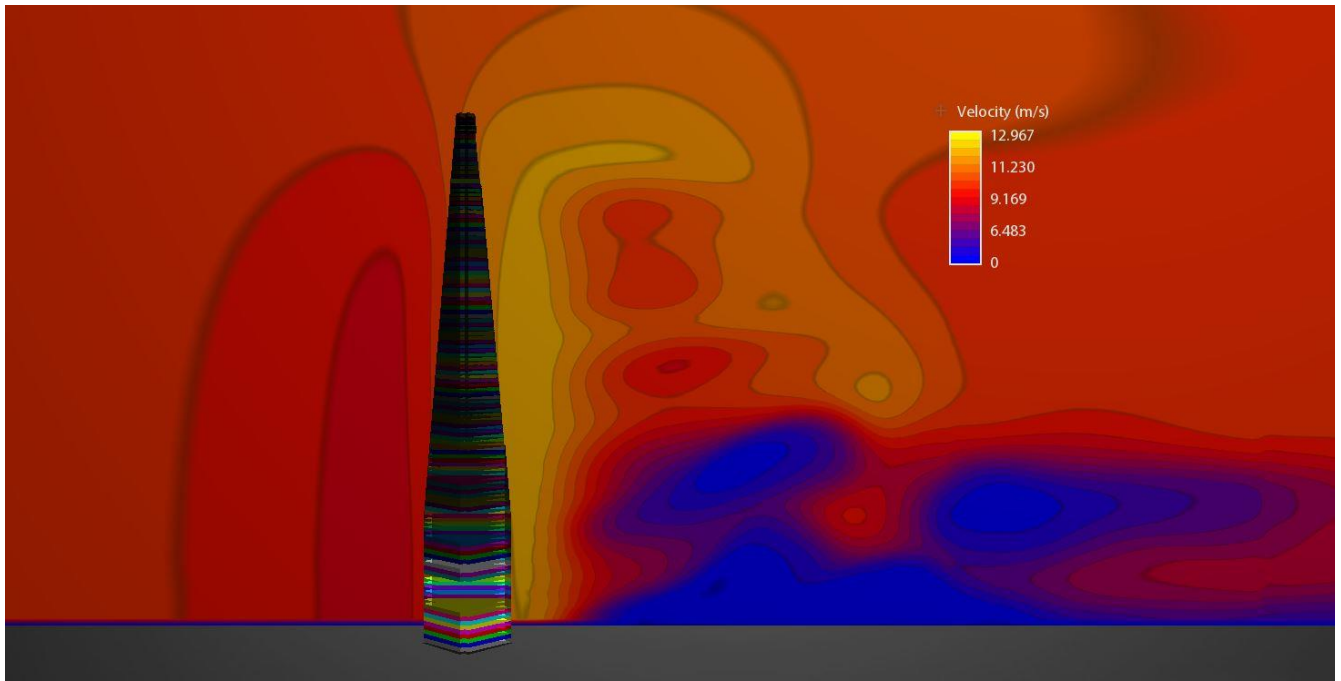
Στις λεπτομέρειες 7 και 8 έχουν επιλεγεί 2 καθ' ύψος τομές, η λεπτομέρεια 7 στο μέσον του μετώπου πρόσπτωσης και η λεπτομέρεια 8 στην παρειά (απόσταση από την παρειά 20 m). Αυτή η επιλογή έγινε για να μελετηθεί η συμπεριφορά του ανέμου στα σημεία που δεν τέμνει το μοντέλο, αλλά επηρεάζεται από την παρουσία του και δημιουργεί ανωμαλίες ροής.

Συγκεκριμένα, στην λεπτομέρεια 7 γίνονται φανερά τα σημεία αύξησης της ταχύτητας σε κορυφή και τραπεζοειδές κενό, και στην λεπτομέρεια 8 πλευρικά.



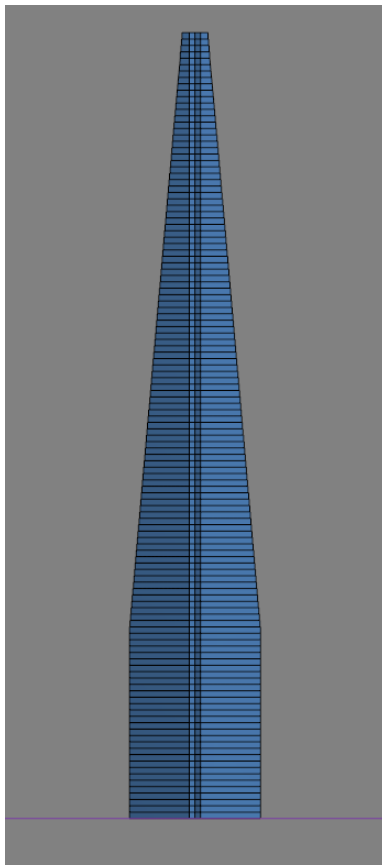
Εικόνα 4.46: Λεπτομέρεια 7





Εικόνα 4.47: Λεπτομέρεια 8

❖ Σενάριο B



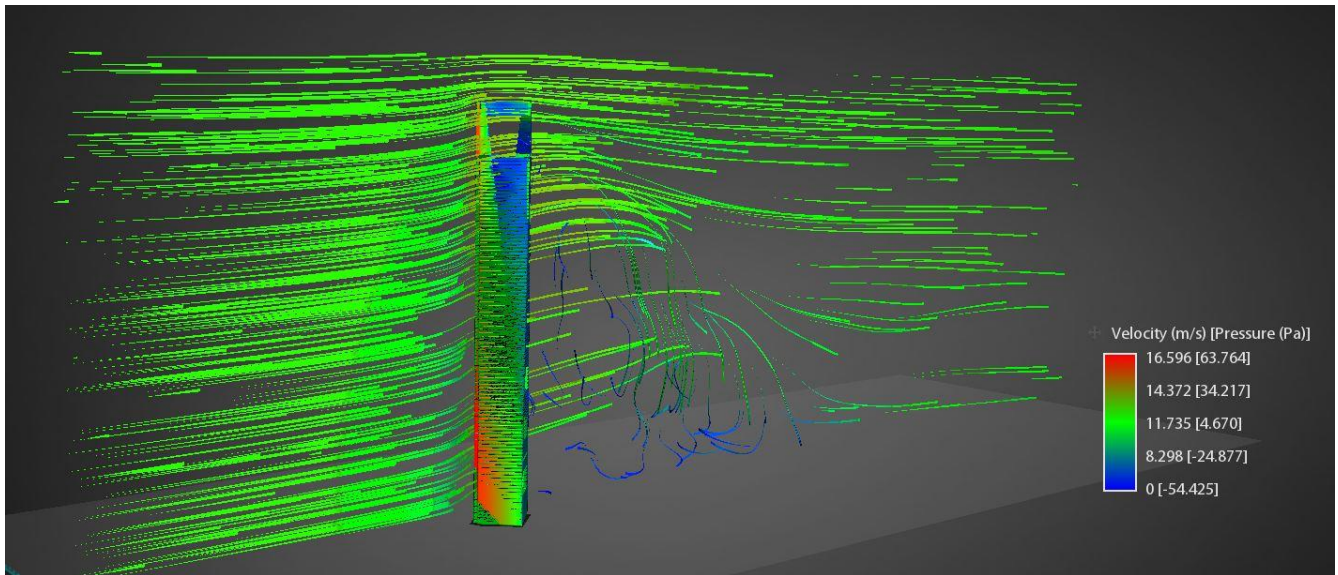
Εικόνα 4.48: Μέτωπο Πρόσπτωσης  
Σενάριο B

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d = 0.86$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 1.486.376 N



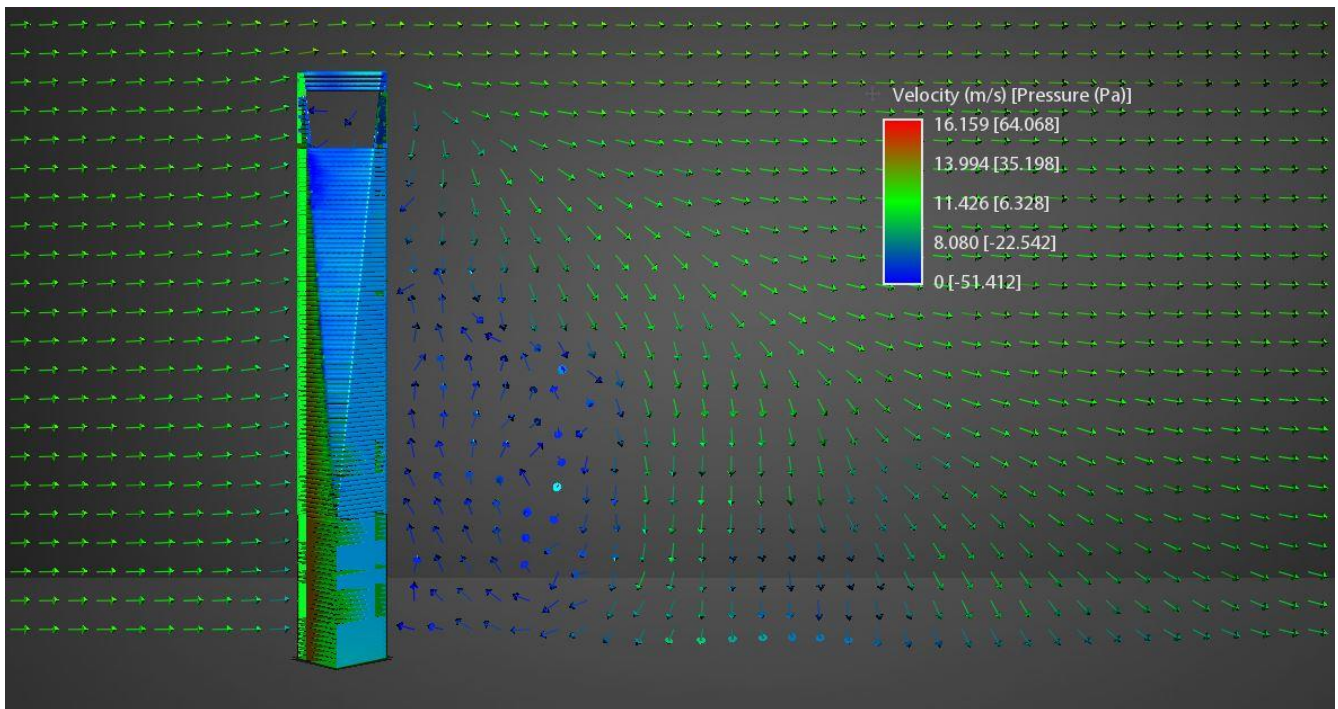
Εικόνα 4.49: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται μικρή αύξηση της ταχύτητας της ροής. Ακόμη παρατηρείται πολύ περιορισμένος στροβιλισμός στην πίσω πλευρά του κτιρίου.



Εικόνα 4.50: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 γίνεται εμφανής ο στροβιλισμός στην πίσω πλευρά του κτιρίου του σεναρίου αυτού, ο οποίος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικής κλίμακας.



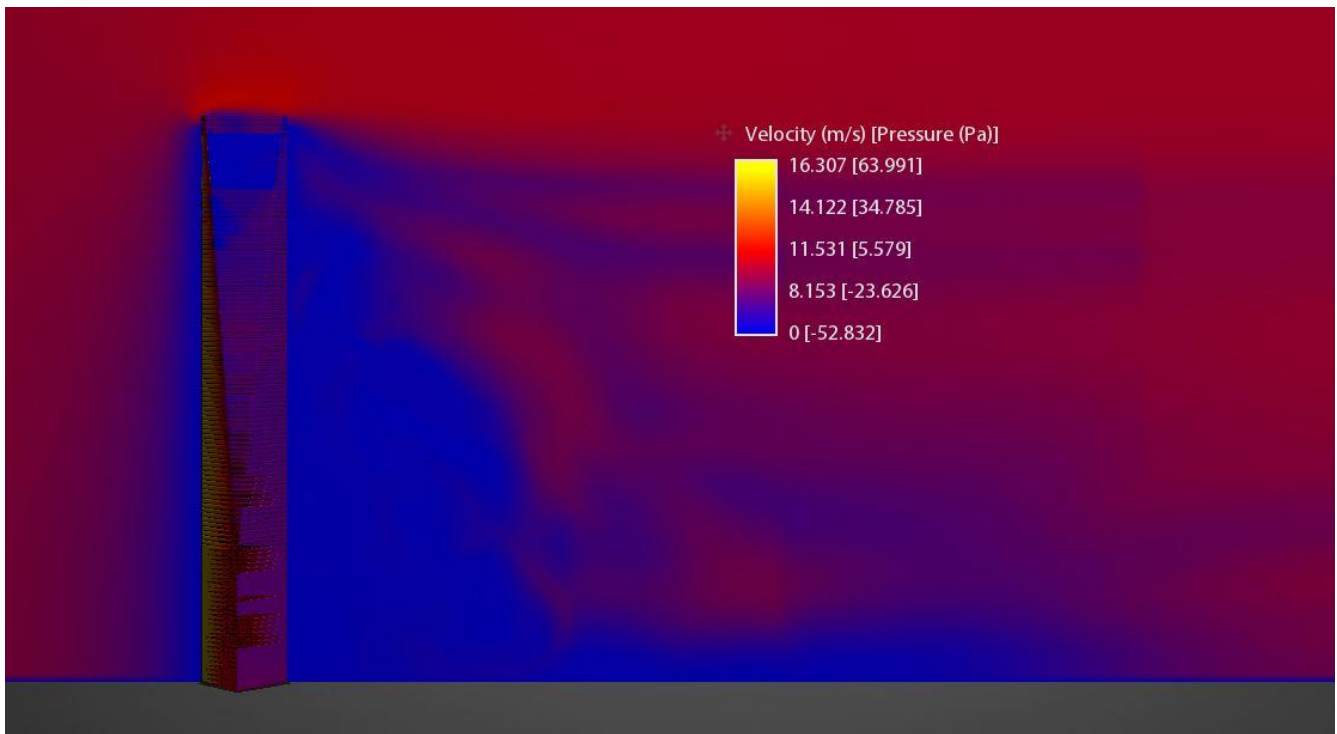
Εικόνα 4.51: Λεπτομέρεια 3

Στις λεπτομέρειες 4 και 5 έχουν επιλεγεί 2 καθ' ύψος τομές, η λεπτομέρεια 4 στο μέσον του μετώπου

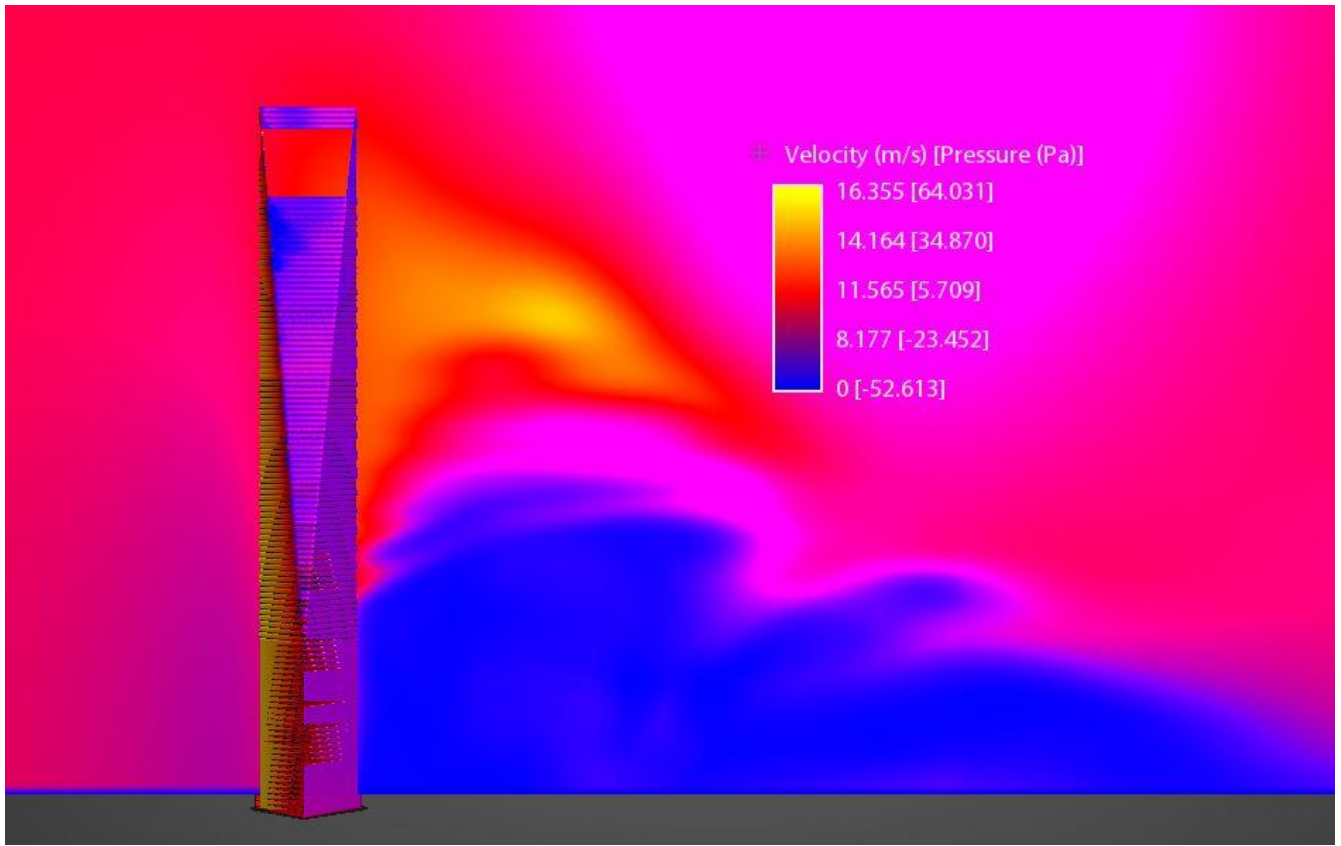
πρόσπτωσης και η λεπτομέρεια 8 στην παρειά (απόσταση από την παρειά 20 m). Αυτή η επιλογή, όπως και στο προηγούμενο σενάριο, έγινε για να μελετηθεί η συμπεριφορά του ανέμου στα σημεία που δεν τέμνει το μοντέλο, αλλά επηρεάζεται από την παρουσία του και δημιουργεί ανωμαλίες ροής.

Συγκεκριμένα, στην λεπτομέρεια 4 γίνονται φανερά τα σημεία αύξησης της ταχύτητας σε κορυφή. Οι τιμές της ταχύτητας προσεγγίζουν την τιμή των 14 m/s, που αντιστοιχούν σε 40% αύξηση της ταχύτητας.

Στην λεπτομέρεια 5 έχει φωτιστεί το μοντέλο, κάτι που ήτα αναγκαίο για να τονιστεί μία σημαντική λεπτομέρεια. Η λεπτομέρεια αυτή είναι η αύξηση 50% και πλέον της ταχύτητας ροής σε κάποια σημεία της ροής. Αυτό οφείλεται στα ιδιαίτερα στοιχεία μορφής του κτιρίου (η μειούμενη κάτοψη επιταχύνει την ροή σε εκείνη την περιοχή που φαίνεται στην λεπτομέρεια 4).

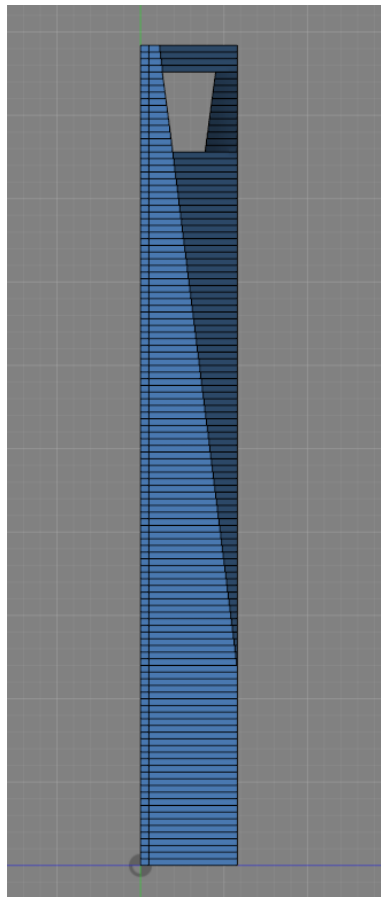


Εικόνα 4.52: Λεπτομέρεια 4



Εικόνα 4.53: Λεπτομέρεια 5

❖ Σενάριο Γ



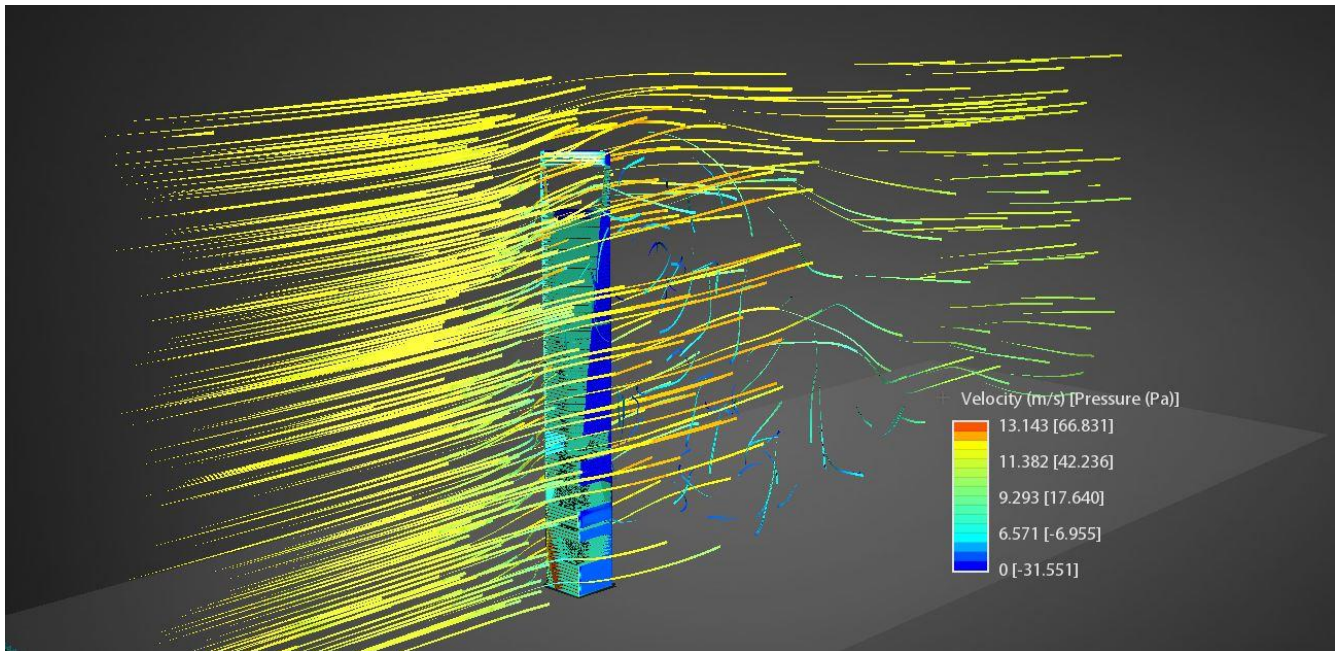
Εικόνα 4.54: Μέτωπο Πρόσπτωσης  
Σενάριο Γ

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρούμε μέσο συντελεστή αντίστασης  $C_d = 1.13$ , και συνολική δύναμη αντίστασης 1.860.137 N



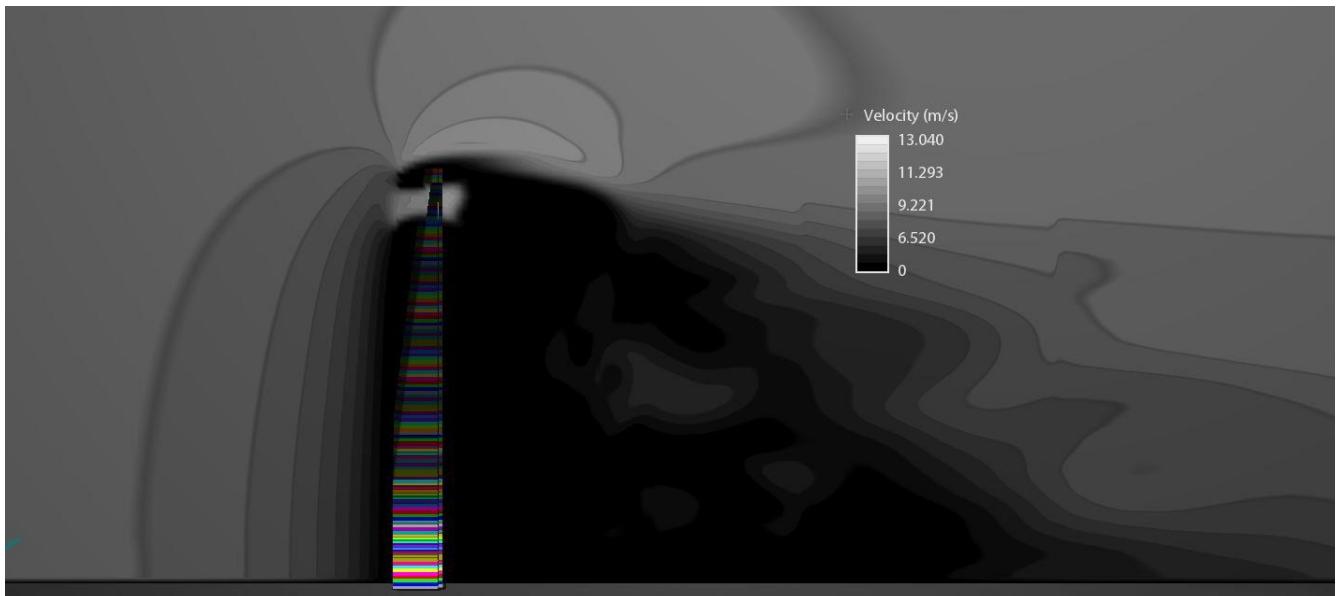
Εικόνα 4.55: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται μία αύξηση της ταχύτητας από τα 10 m/s σε 12.5 m/s, δηλαδή μία αύξηση της τάξεως του 25% πλησίον της κορυφής του κτιρίου αλλά κυρίως πλευρικά. Ακόμη παρατηρείται στροβιλισμός στην πίσω πλευρά του κτιρίου, αλλά περιορισμένης κλίμακας.



Εικόνα 4.56: Λεπτομέρεια 2

Στην λεπτομέρεια 3 γίνεται φανερό ένα σημαντικό μήκος επιρροής, το οποίο πλησιάζει τα 700 m μετά το εμπόδιο, που αντιστοιχεί 1.4 περίπου φορές στο ύψος του εμποδίου. Φαίνεται επίσης μία τοπική αύξηση της ταχύτητας στο τραπεζοειδές κενό που φτάνει τα 13 m/s, αύξηση 30%.



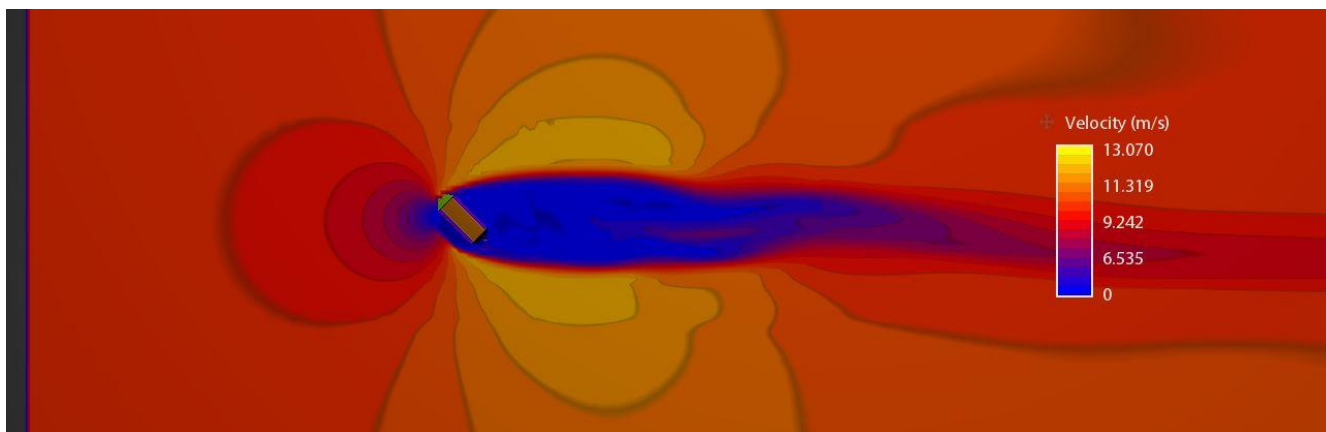
Εικόνα 4.57: Λεπτομέρεια 3

Στην συνέχεια εξετάζονται 2 παράλληλες με το επίπεδο του εδάφους τομές, με στόχο την κατανόηση της επιρροής του προσανατολισμού του εμποδίου σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή.

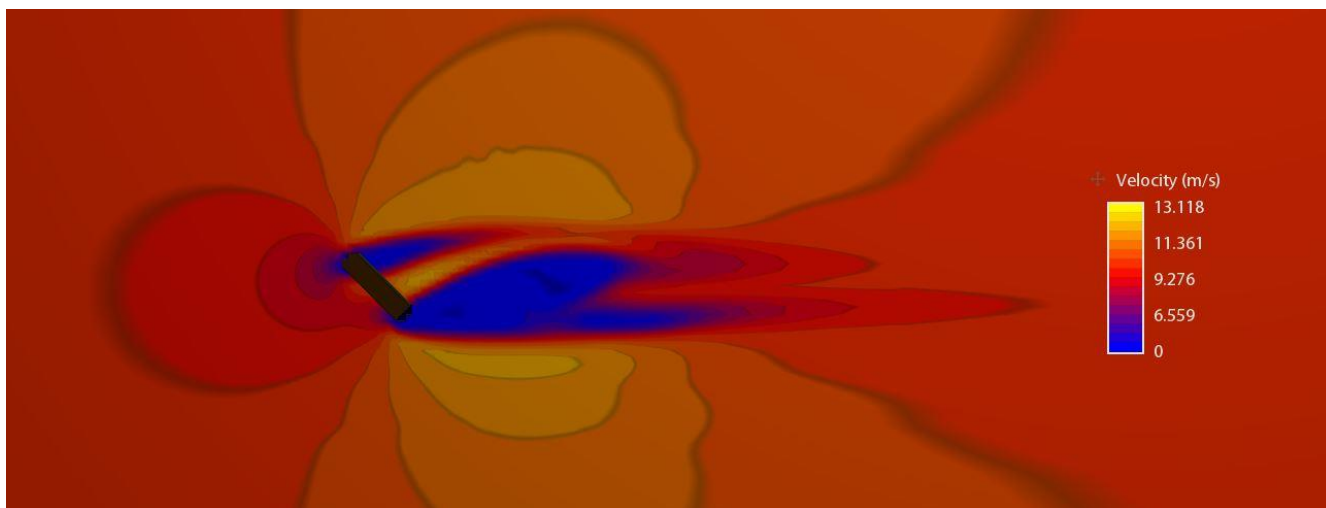
Η λεπτομέρεια 4 είναι σε ύψος 250 m από το έδαφος (μέσο ύψος) και η λεπτομέρεια 5 στο επίπεδο του τραπεζοειδούς κενού (σημαντική μορφολογική λεπτομέρεια).

Στην λεπτομέρεια 4 παρατηρείται μήκος επιρροής 500 m και μέγιστη πλευρική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα 12.5 m/s. Η ανωμαλία της ροής στο επίπεδο που εξετάζουμε δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη ιδιαιτερότητα.

Στην λεπτομέρεια 5 παρατηρούμε μήκος επιρροής 300 m, που συγκριτικά με το πρώτο σενάριο είναι μεγαλύτερο. Μέγιστη πλευρική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου είναι τα 12.5 m/s. Η ανομοιομορφία επομένως παρατηρούμε ότι δεν οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας.



Εικόνα 4.58: Λεπτομέρεια 4



Εικόνα 4.59: Λεπτομέρεια 5



## 4.5 Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά παρατίθενται τα βασικά αποτελέσματα της ως τώρα ανάλυσης και τα συμπεράσματα αυτής. Ως βασικότερο μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης,  $C_d$ . Όσο υψηλότερος ο συντελεστής αυτός, τόσο μεγαλύτερη αντίσταση που προβάλλεται από το μοντέλο στα φορτία του ανέμου. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη δράση, επομένως μεγαλύτερη αντίδραση και συνεπώς πολύ μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Η δράση βέβαια, που εκφράζεται από την δύναμη αντίστασης, εξαρτάται και από την προσβαλλόμενη επιφάνεια.

Στο πρώτο μοντέλο, συγκρινόμενων των 2 σεναρίων, δυσμενέστερο προκύπτει το σενάριο A, στο οποίο ο αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης του ουρανοξύστη είναι  $C_d=1.23$ .

Στις λεπτομέρειες 1, 2 και 3 γίνεται φανερή η αύξηση της ταχύτητας του αέρα από το 10.00 m/s σε μέγιστη 13.40 m/s περίπου. Αυτό αντιστοιχεί σε 34% αύξηση της ταχύτητας. Οι μέγιστες τιμές αυτές εμφανίζονται κοντά στα στερεά όρια (παρειές).

Τέλος, παρατηρείται μία συνολική ασκούμενη δύναμη περίπου 1.650.359 N.

Στο δεύτερο μοντέλο, το σενάριο A χαρακτηρίζεται από  $C_d= 1.19$ , πολύ μεγαλύτερο από τον  $C_d= 0.61$  που παρουσιάζεται στο σενάριο B.

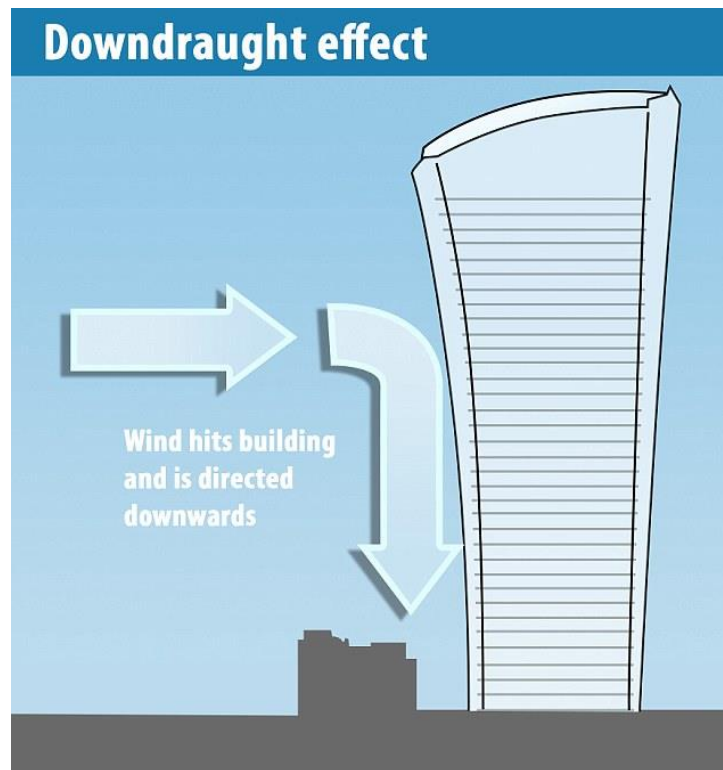
Επιλέγουμε να αναλύσουμε το σενάριο B διότι μας δίνει πληροφορίες για την επίδραση της μειούμενης κάτοψης καθ' ύψος, και όπως παρατηρείται, μία τέτοια αλλαγή δημιουργεί πολύ μεγάλη διαφοροποίηση. Συνεπώς η μείωση της κάτοψης αναλόγως του υψομέτρου είναι μία τεχνοτροπία με πολύ επιθυμητά αποτελέσματα.

Επίσης, αν συνυπολογιστεί και η συνολική μείωση της επιφάνειας φόρτισης την οποία συνεπάγεται η μείωση της κάτοψης, σε συνδυασμό με την απόσταση αυτής από την πάκτωση (έδαφος), γίνεται αντιληπτό το πόσο μεγάλη σημασία αποκτά αυτή η μέθοδος. Το συγκεκριμένο ζήτημα δεν αποτελεί μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λαμβάνεται όμως υπ' όψη λόγω της σημαντικότητας του και αναλύεται περαιτέρω σε επόμενη παράγραφο.

Η συνολική δύναμη που ασκείται, και στα 2 σενάρια φόρτισης, είναι σχεδόν η μισή από αυτήν που ασκείται στον Ταίρει 101. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μικρότερη επιφάνεια φόρτισης του Willis, λόγω της μείωσης της κάτοψης μειώνεται το εμβαδόν της προσβαλλόμενης επιφάνειας.

Στο τρίτο μοντέλο, το οποίο είναι συγκριτικά με τα υπόλοιπα πολύ πιο μικρό σε ύψος, παρατηρείται συντελεστής αντίστασης  $C_d = 0.65$ , και συνολική ασκούμενη δύναμη  $F_d = 541.572$  N. Η δύναμη είναι χαρακτηριστικά μικρότερη και λόγω του μικρού συντελεστή αντίστασης, αλλά και της μικρής συγκριτικά προσβαλλόμενης επιφάνειας.

Στο τέταρτο και τελευταίο μοντέλο, εξετάζεται η κύρια διεύθυνση του κτιρίου, η οποία παρουσιάζει αεροδυναμικό ενδιαφέρον λόγω σχήματος. Η κλίση καθ' ύψος εκτός από την εκτόνωση των πιέσεων, οδηγεί τις γραμμές ροής προς τα άνω και είναι μέτρο αντιμετώπισης και του downdraught effect, ενός φαινομένου που κατά της πρόσπτωση του ανέμου οδηγεί ρεύματα του προς τα κάτω, δημιουργώντας πολλαπλά προβλήματα.



Εικόνα 4.60: Downdraught effect

Ο συντελεστής αντίστασης εμφανίζεται, λόγω του τραπεζοειδούς κενού και της κεκλιμένης από ένα σημείο και άνω επιφάνειας πρόσπτωσης, ιδιαίτερα μειωμένος και ίσος με  $C_d=0.90$ . Η δύναμη αντίστασης είναι  $F_d=1.829.154 \text{ N}$ .

Επομένως ως τώρα έχουμε καταλήξει, μέσω των δοκιμών, σε κάποια προκαταρκτικά συμπεράσματα όσον αφορά την σχέση σχήματος κάτοψης κτιρίου και την μείωση των ανεμικών δράσεων. Ιδιαίτερα κομβικής σημασίας κρίνεται η αποφυγή γωνιών, όπως επίσης και η μείωση της κάτοψης καθ' ύψος. Ακόμη σημαντική, αλλά λιγότερο, φαίνεται να είναι και η ύπαρξη διόδων αέρα. Αυτά τα συμπεράσματα εξετάζονται σε συγκρίσιμα μεταξύ τους μοντέλα στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

## 5. Παραμετροποίηση σχήματος

### 5.1 Παραδοχές

Θεωρούμε ως θέση του κτιρίου την Νότια Αττική, παραθαλάσσια περιοχή. Επίσης θεωρούμε την γειτονία του κτιρίου μη αστικοποιημένη.

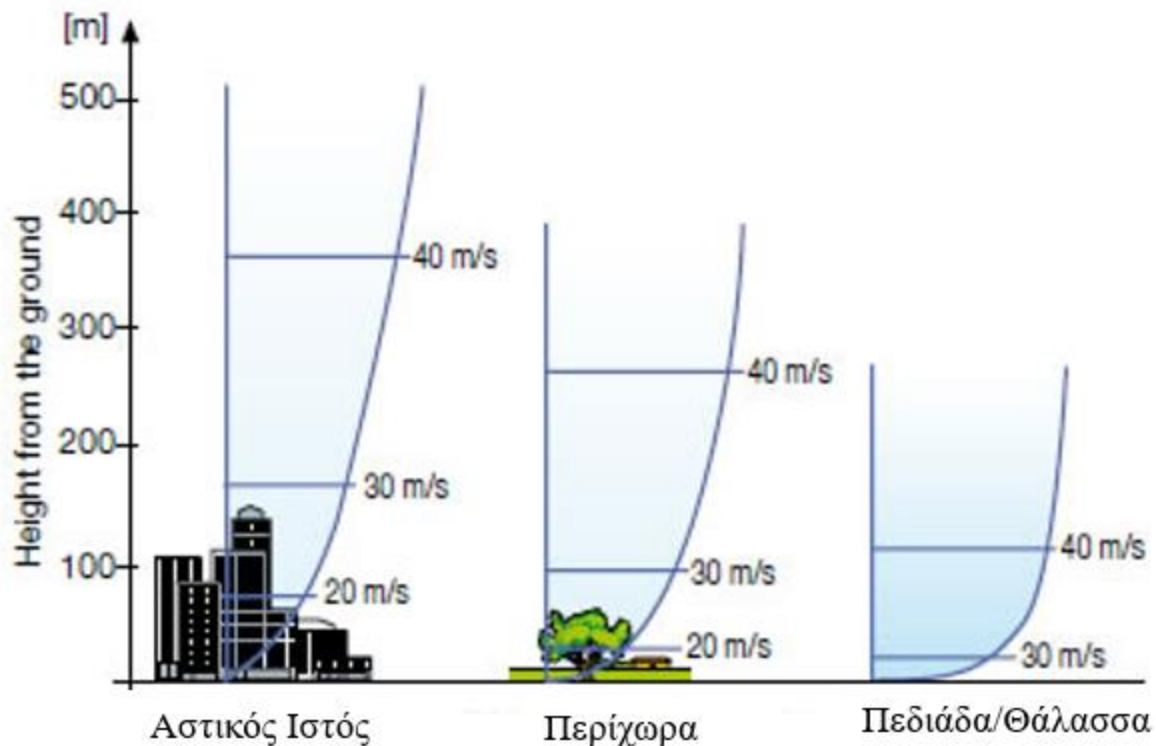
#### 5.1.1 Άνεμος

Για τον άνεμο θεωρείται ότι ισχύει πρακτικά η θεωρία του οριακού στρώματος και ότι η ταχύτητα του μεταβάλλεται καθ' ύψος με λογαριθμικό τρόπο. Αυτό δεχόμαστε (EK1.4) ότι ισχύει μέχρι ύψους 200 m. Για τις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής, θεωρούμε ότι από το ύψος αυτό και έπειτα η τιμή της ταχύτητας παραμένει σταθερή, ίση με αυτήν που είχε στο ύψος των 200m.

Στην παραμετροποίηση θα χρησιμοποιηθεί τυπική ταχύτητα ανέμου 38 m/s, η οποία αντιστοιχεί σε επίπεδα τυφώνα, κυρίως για να γίνει παράλληλα και μία προσέγγιση της πίεσης που ασκείται στο κτίριο σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο.

#### 5.1.2 Έδαφος – Συνοριακές συνθήκες

Στην περιοχή που έχουμε θεωρήσει την κατασκευή μας σε συνδυασμό με το μη άμεσα αστικό περιβάλλον, οδηγεί σε πιο απότομη αύξηση της ταχύτητας προσβολής. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό με το παρακάτω σχήμα, που στόχο έχει να συγκρίνει διαφορετικά προφίλ ανέμου ίδιας έντασης λόγω διαφορετικών συνοριακών συνθηκών. Οι διαφορετικές αυτές συνοριακές συνθήκες, οι οποίες στην μηχανική των ρευστών ονομάζονται «τραχύτητα», είναι ουσιαστικά η διαφορά στο ανάγλυφο της επιφάνειας της περιοχής. Περιοχές που χαρακτηρίζονται από πυκνή και ψηλή βλάστηση, ή μία περιοχή έντονα αστικοποιημένη, είναι πιο «τραχείς» από π.χ. μία ημι-ερημική περιοχή με χαμηλή βλάστηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα διαφορετική κατανομή της ταχύτητας, καθ' ύψος.



Εικόνα 5.1: Χαρακτηριστικά προφίλ ανέμου

## 5.2 Τρόπος σκέψης-Λογική

Ακολουθώντας τα προκαταρκτικά συμπεράσματα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4.5, θα προσπαθήσουμε να συγκρίνουμε την διαφοροποίηση μεγεθών όπως ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης σχήματος  $C_d$ , σχετική ταχύτητα/επιτάχυνση και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη, κρατώντας σταθερά κάποια στοιχεία.

Επομένως, επιλέγουμε να διατηρήσουμε σταθερά 2 βασικά στοιχεία του κτιρίου τα οποία θα είναι το ύψος του και η επιφάνεια κάτοψης. Παραμετροποιούμε δηλαδή την μορφή του ουρανοξύστη μεταβάλλοντας την μορφή της κάτοψης αρχικά, συνεχίζουμε ανοίγοντας «διόδους» αέρα, όπως έχει γίνει στον Shanghai WFC, και τελικά ελέγχουμε και την διαφοροποίηση που επιφέρει η μειούμενη καθ' ύψος κάτοψη.

Το σταθερό ύψος και η κάτοψη βάσης μας δίνουν την δυνατότητα πιο σωστής επίβλεψης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων, κάτι που δεν ήταν δυνατό προηγουμένως με την σύγκριση τελείως ανόμοιων σχημάτων.

Σε όλη την διαδικασία της παραμετροποίησης τα στοιχεία του τούνελ παραμένουν σταθερά λόγω των σταθερών στοιχείων των μοντέλων αλλά και για λόγους άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

Τα εν λόγω στοιχεία είναι:

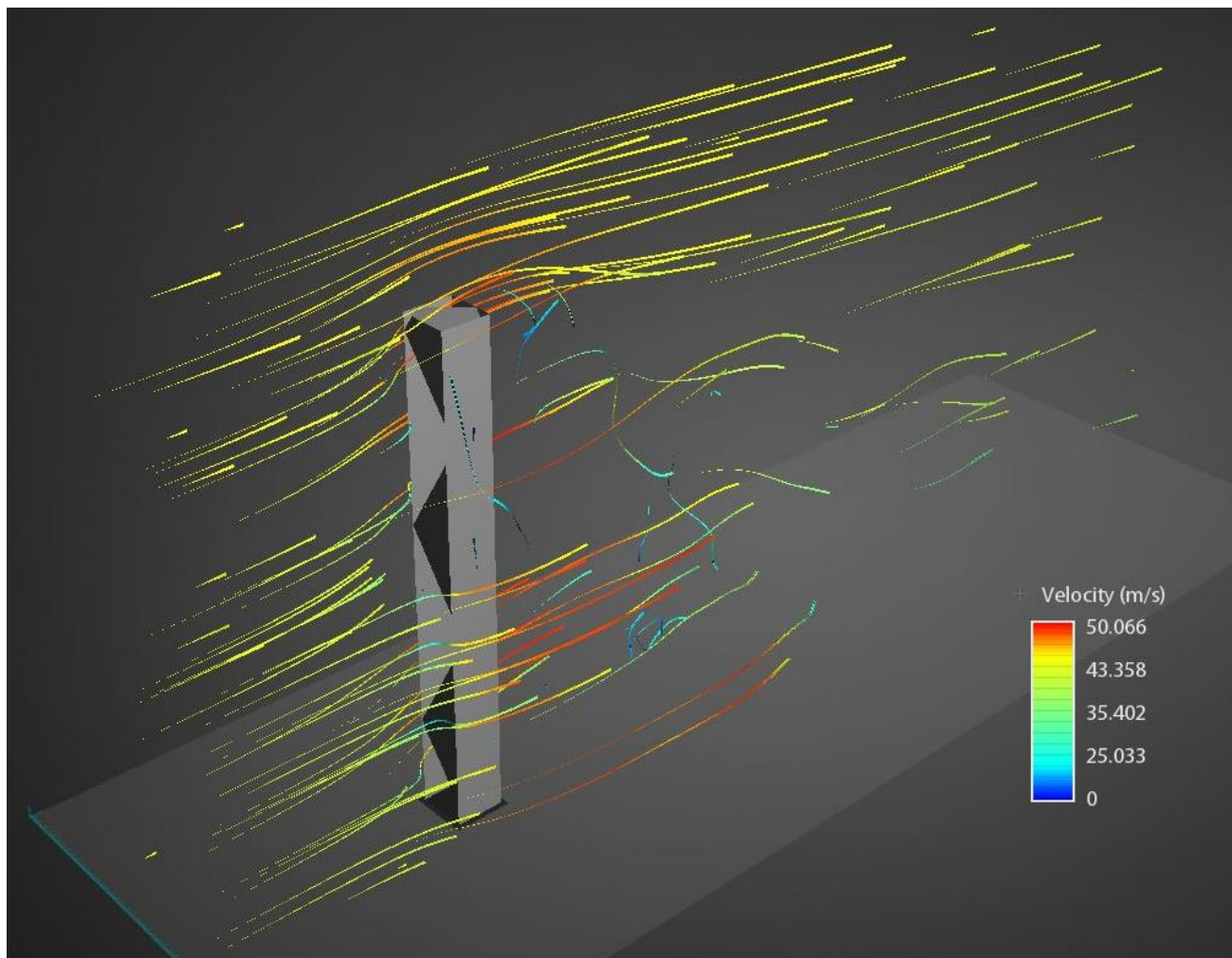
- Μήκος 1400 m
- Πλάτος 600 m
- Ύψος 1600 m

### 5.3 Τετραγωνική κάτοψη

Το βασικό σχήμα είναι ένα κτίριο τετραγωνικής κάτοψης, με πλευρά 40 m, και ύψος 400 m. Υποθέτουμε, με βάση τους ελέγχους του προηγούμενου κεφαλαίου, και λόγω μέγιστης μετωπικής επιφάνειας πρόσπτωσης ανέμου, ότι αυτό το σχήμα είναι το δυσμενέστερο, αεροδυναμικά, σενάριο.

#### 5.3.1 Σενάριο 1

Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία 0 μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή μετωπικά όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Προβλέπεται να είναι το πιο δυσμενές, λόγω μορφής και επιφάνειας προσβολής.



Εικόνα 5.2: Μέτωπο προσβολή

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται:

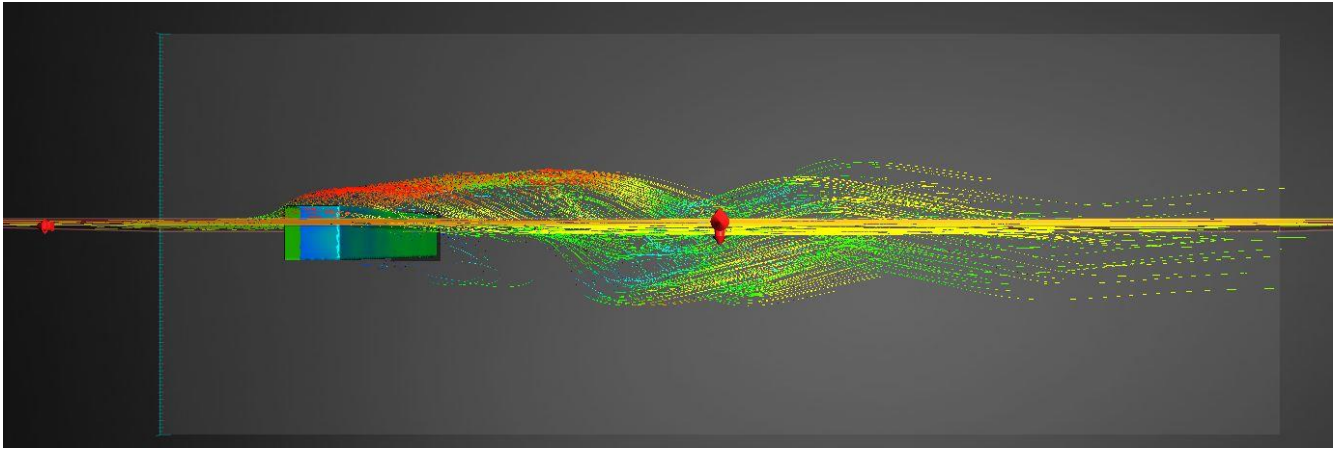
- Αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=1.55$ .
- Δύναμη αντίστασης  $F_d=33.708.932$  N.



Εικόνα 5.3: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται:

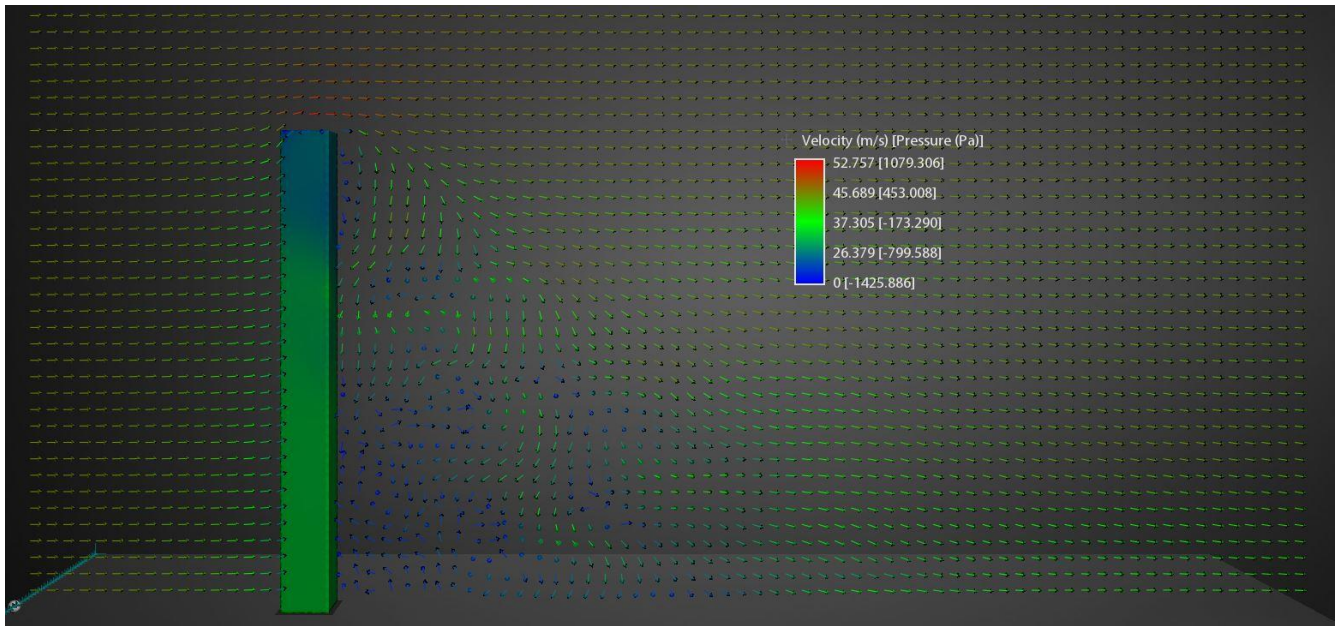
- Αύξηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο στερεό όριο.
- Στροβιλισμός-ανακάτεμα των γραμμών ροής σε μεγάλο βαθμό.



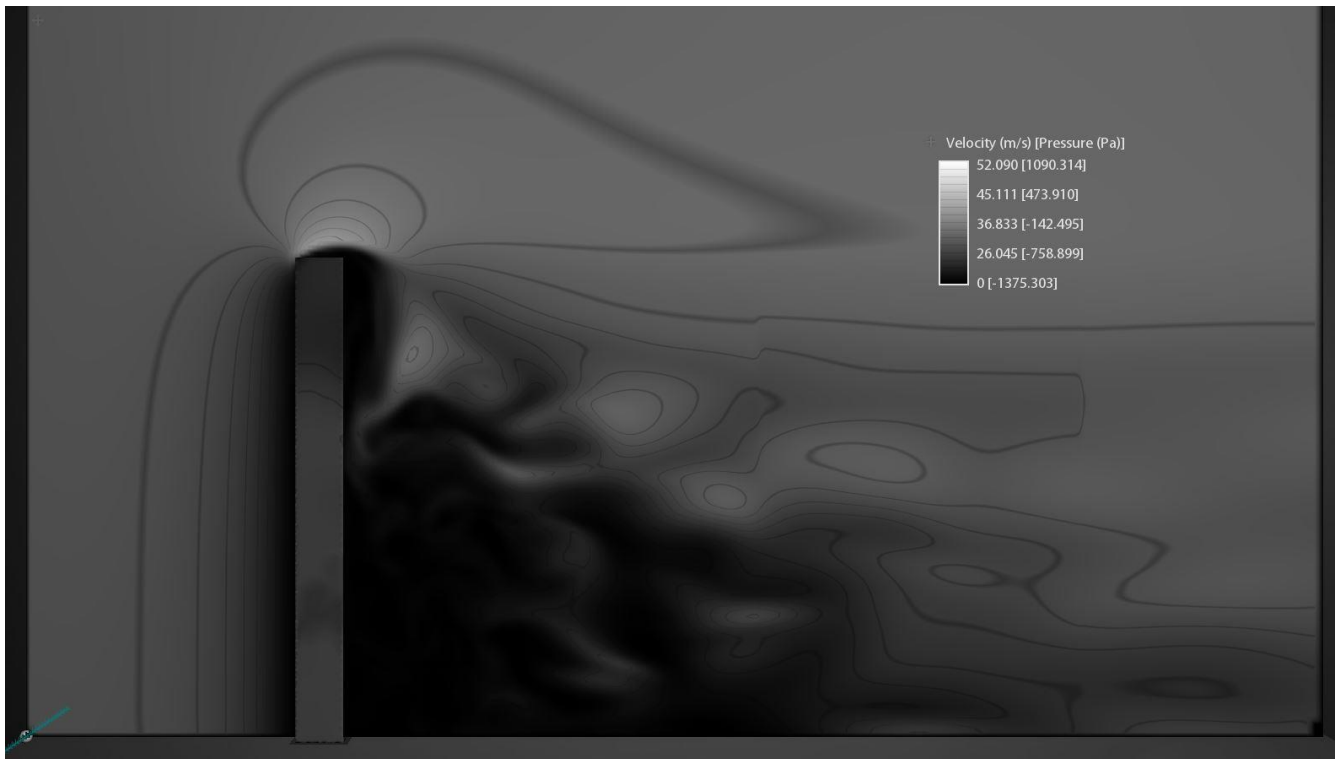
Εικόνα 5.4: Λεπτομέρεια 2

Στις λεπτομέρειες 3, 4 παρατηρείται:

- Αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε τοπική 52 m/s, κάτι που αντιστοιχεί σε αύξηση 37%.
- Γραμμές ροής οι οποίες αλλάζουν τελείως προσανατολισμό, δημιουργώντας δευτερεύουσες ροές και έντονη τύρβη.
- Ανωμαλία της ροής σε περίπου απόσταση 1.5 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του εμποδίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση περίπου 600 μέτρα (λεπτομέρεια 4).



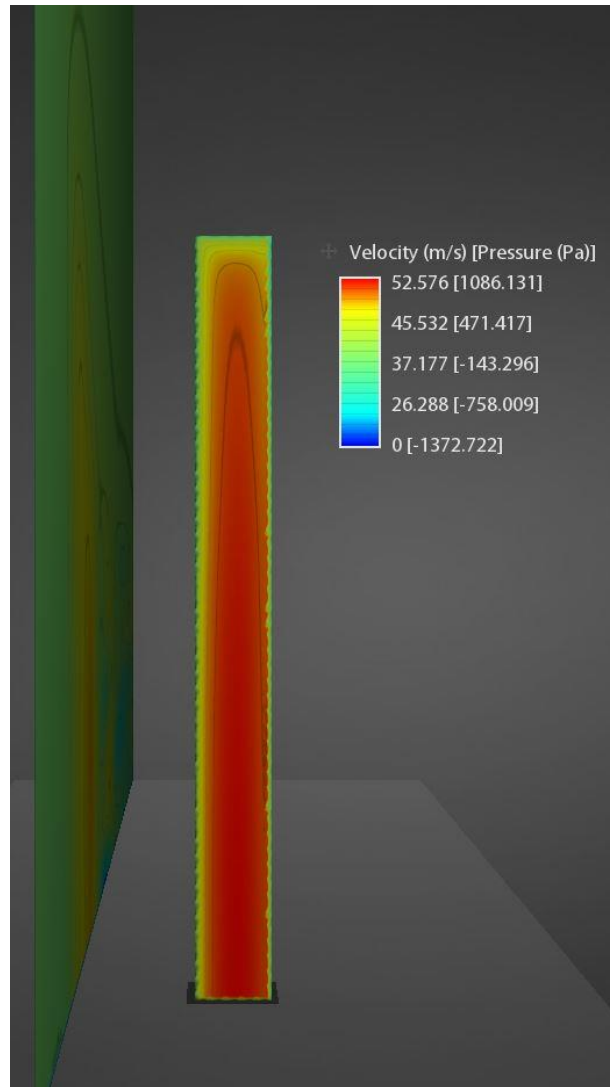
Εικόνα 5.5: Λεπτομέρεια 3



Εικόνα 5.6: Λεπτομέρεια 4

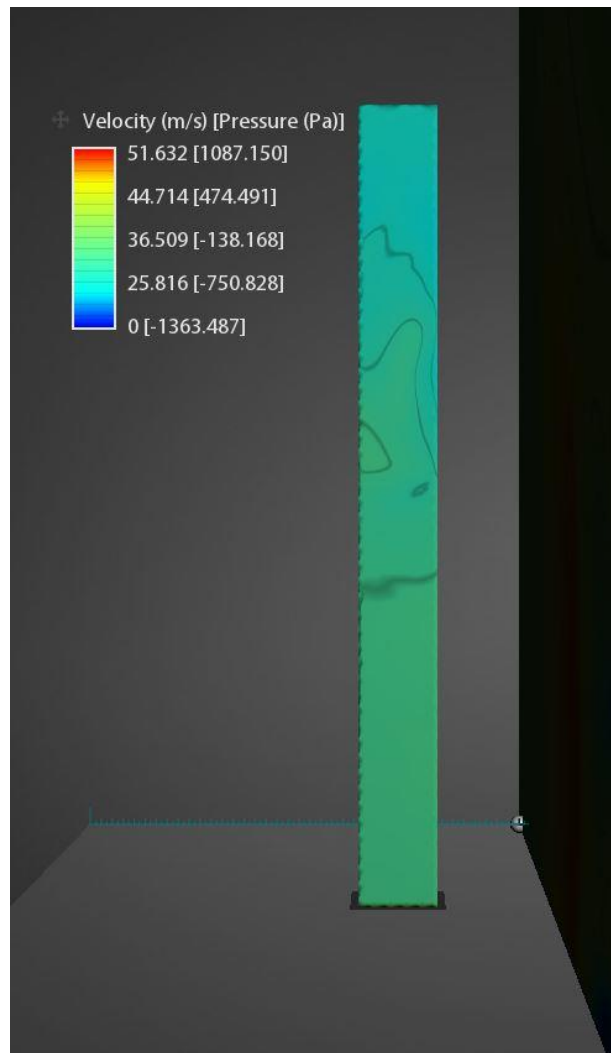
Στις λεπτομέρειες 5, 6 παρατηρείται:

- Τυπική μέγιστη πίεση παρατηρείται κεντρικά στην πρόσοψη και ισούται με περίπου 1100 Pa, ενώ στα σημεία κοντά στις γωνίες οι τιμές σταδιακά μειώνονται. Τυπική τιμή είναι των 470 Pa.
- Αλγεβρικά ελάχιστη πίεση (υποπίεση) παρατηρείται στην πίσω όψη του κτιρίου. Στα υψηλότερα σημεία αυτής έχουμε τιμές μέγιστες (κατ' απόλυτη τιμή) κοντά στα 700 Pa, η οποία, όπως αναμέναμε, μειώνεται καθ' ύψος, ώστε να προσεγγίσει την ατμοσφαιρική τιμή.



Εικόνα 5.7: Λεπτομέρεια 5



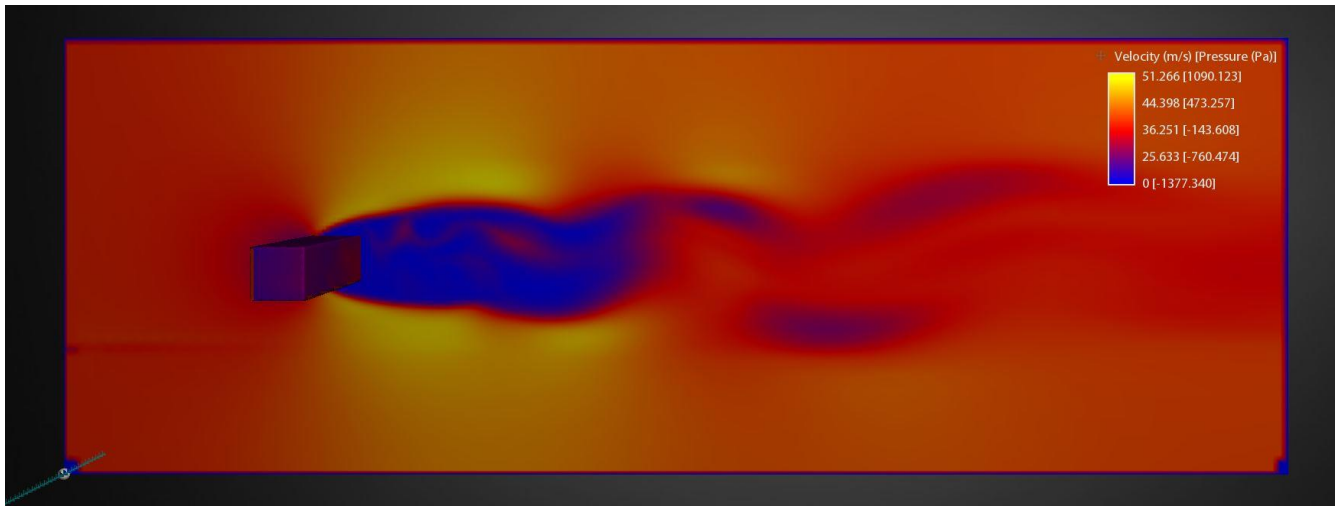


Εικόνα 5.8: Λεπτομέρεια 6

Η λεπτομέρεια 7 αποτελεί απεικόνιση των τιμών της ταχύτητας σε τομή παράλληλη με το έδαφος, σε ύψος 200 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Στην λεπτομέρεια 7 παρατηρείται:

- Γίνεται φανερό το μήκος επιρροής του εμποδίου στην αναταραχή της ροής, στο επίπεδο των 200 m.
- Παρατηρείται, σε τυπική καθ' ύψος τομή 200 m από το έδαφος, μία αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε 51m/s μέγιστη, δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 34%.



Εικόνα 5.9: Λεπτομέρεια 7

### 5.3.2 Σενάριο 2

Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία 45 μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή περιστραμμένο γύρω από το καθ' ύψος άξονα συμμετρίας του κατά 45 μοίρες.

Συντελεστής αντίστασης σχήματος 0.98

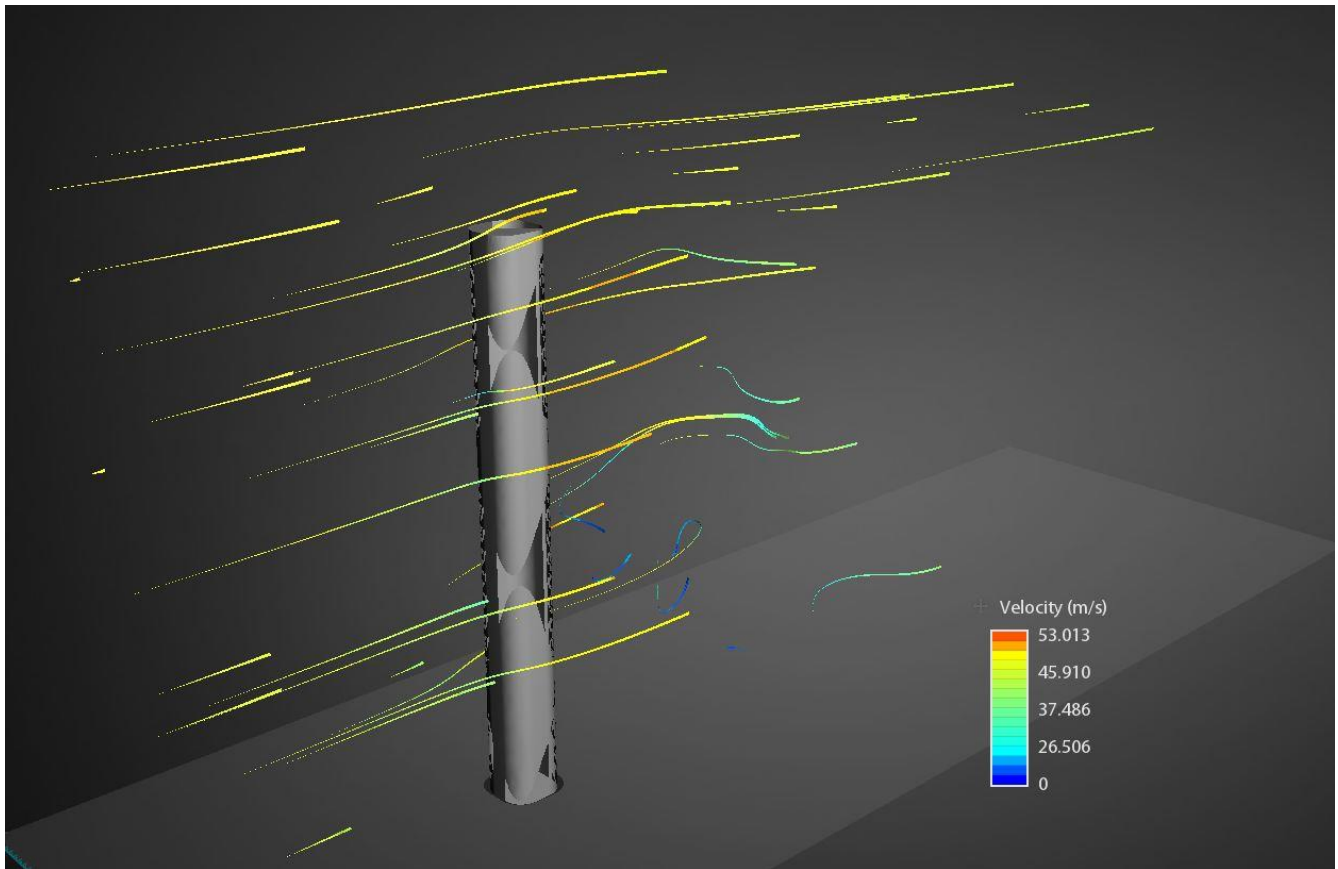
Ο συντελεστής αντίστασης σχήματος για αυτήν την διεύθυνση ροής του ανέμου είναι μικρότερος από αυτόν στο σενάριο 1, επομένως είναι ευμενέστερος και δεν κρίνεται απαραίτητη περαιτέρω διερεύνηση για αυτή την διεύθυνση ροής.

## 5.4 Στρογγυλεμένες γωνίες

Διατηρούμε σταθερό εμβαδόν κάτοψης περίπου ίσο με 1600 τ.μ., σταθερό επίσης παραμένει το ύψος των 400 m. Προβλέπεται να είναι λιγότερο δυσμενές από πριν, λόγω άμβλυνσης των γωνιών.

### 5.4.1 Σενάριο 1

Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία 0 μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή μετωπικά όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.10: Μέτωπο πρόπτωσης

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται:

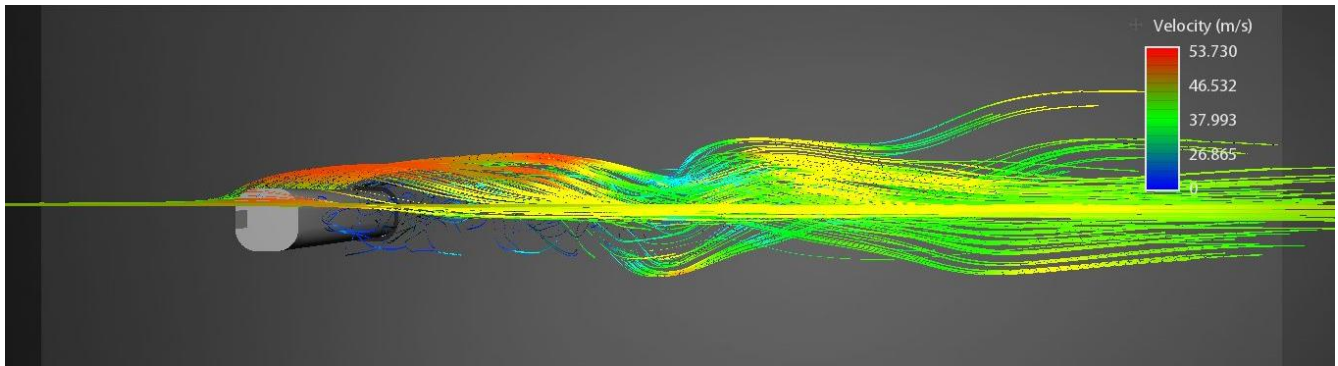
- Αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=0.98$ .
- Δύναμη αντίστασης  $F_d=22.387.348$  N.



Εικόνα 5.11: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται:

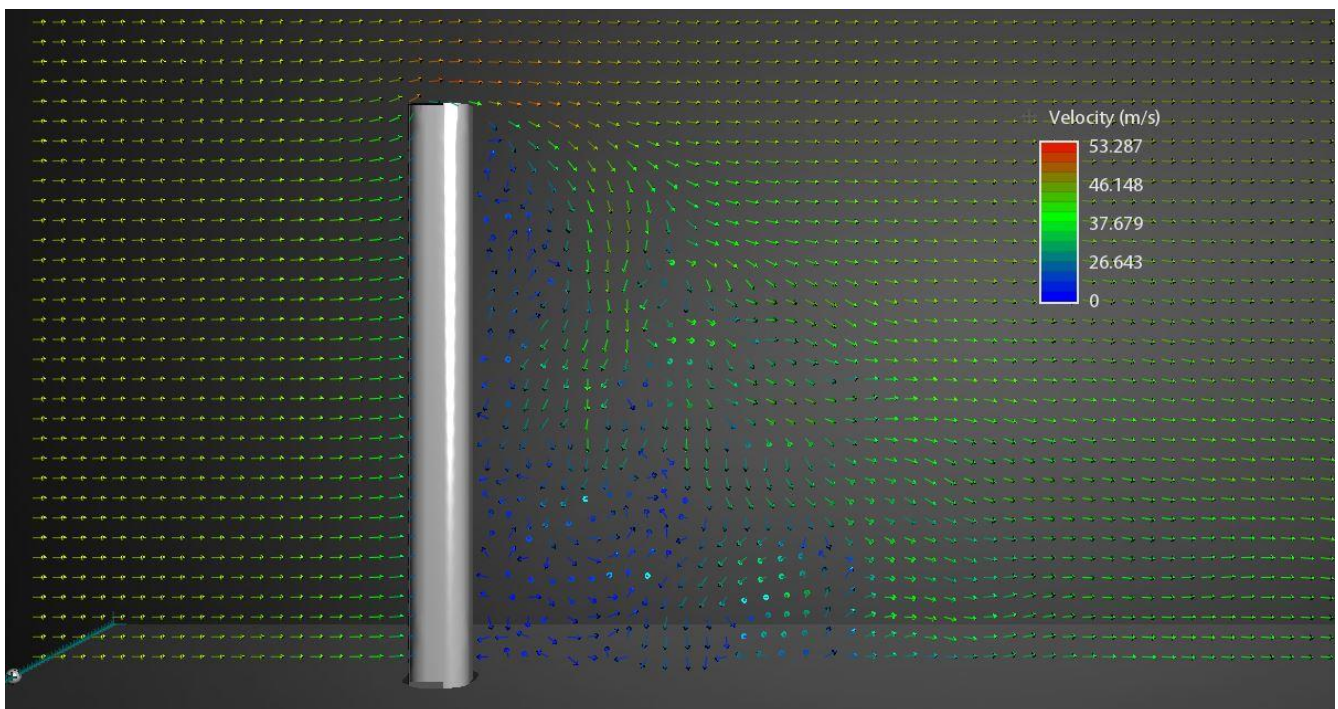
- Αύξηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο στερεό όριο.
- Στροβιλισμός-ανακάτεμα των γραμμών ροής, περιορισμένης έκτασης.



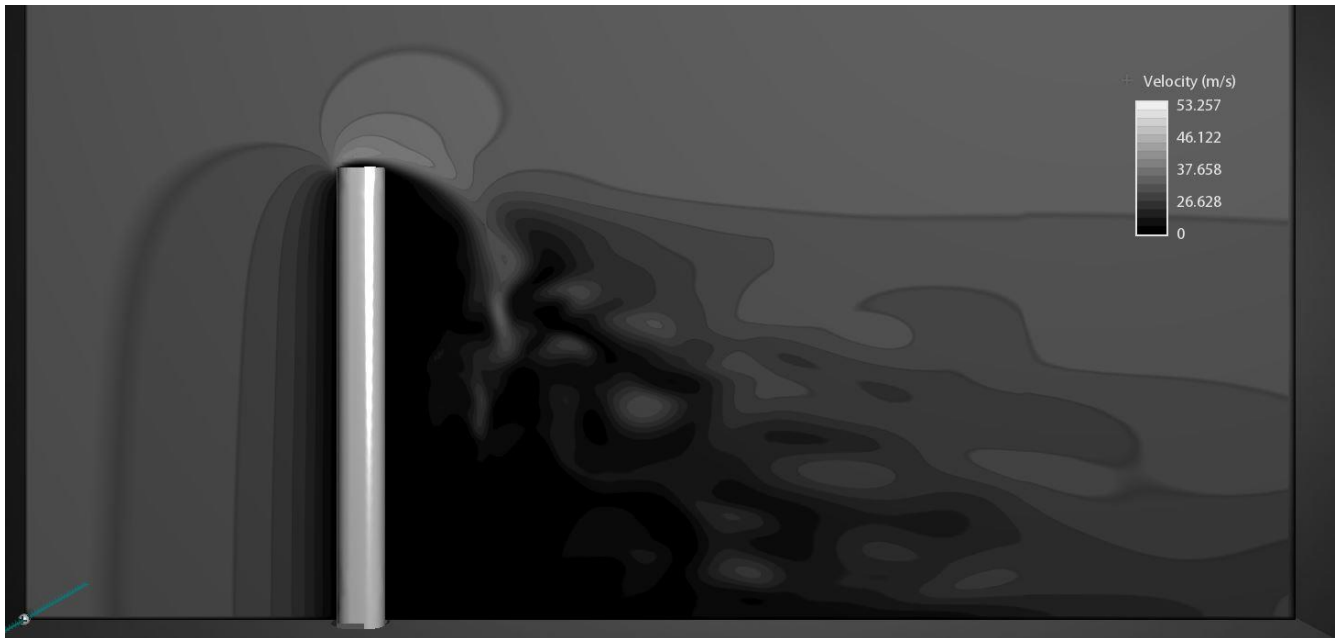
Εικόνα 5.12: Λεπτομέρεια 2

Στις λεπτομέρειες 3, 4 παρατηρείται:

- Αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε τοπική 53.5 m/s, κάτι που αντιστοιχεί σε αύξηση 41%.
- Γραμμές ροής οι οποίες αλλάζουν τελείως προσανατολισμό, δημιουργώντας δευτερεύουσες ροές και έντονη τύρβη.
- Ανωμαλία της ροής σε περίπου απόσταση 1.5 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του εμποδίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση περίπου 600 μέτρα (λεπτομέρεια 4).



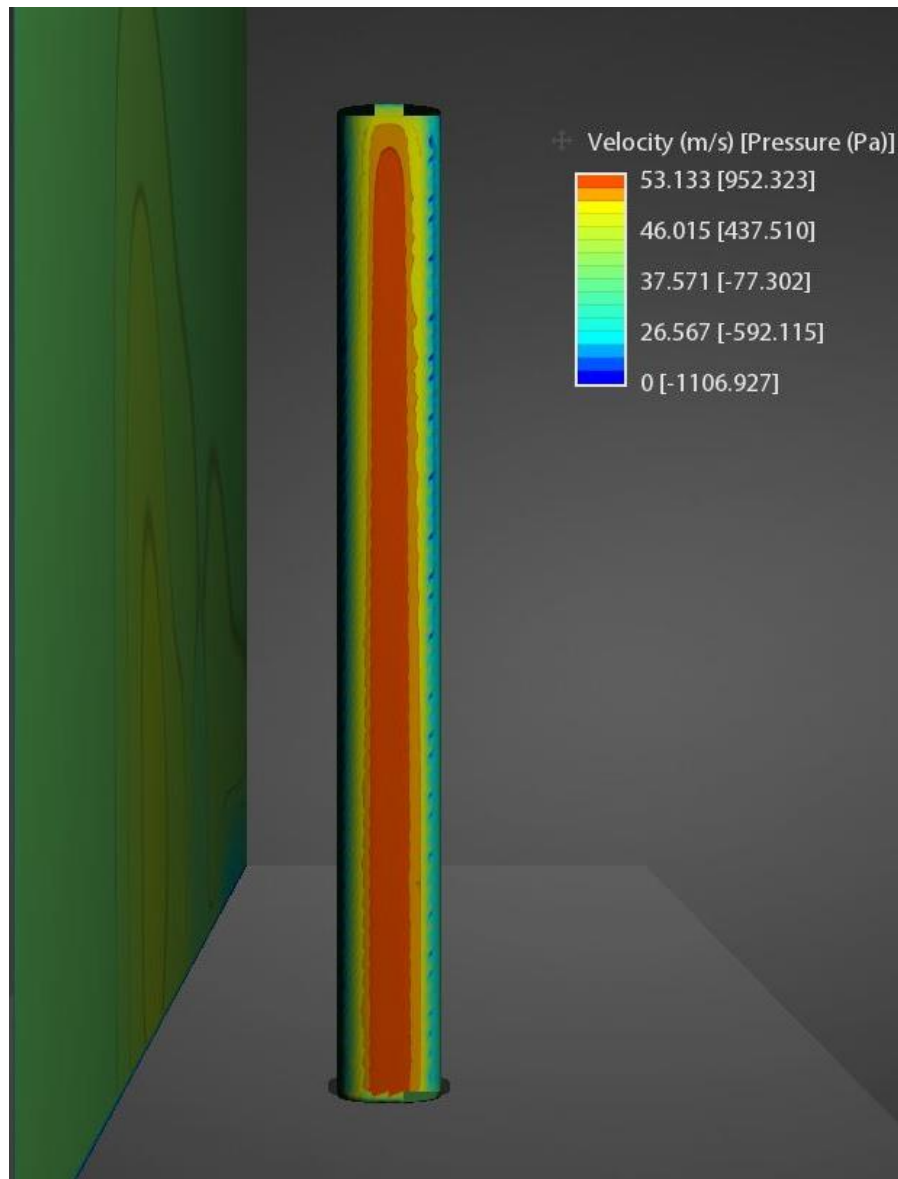
Εικόνα 5.13: Λεπτομέρεια 3



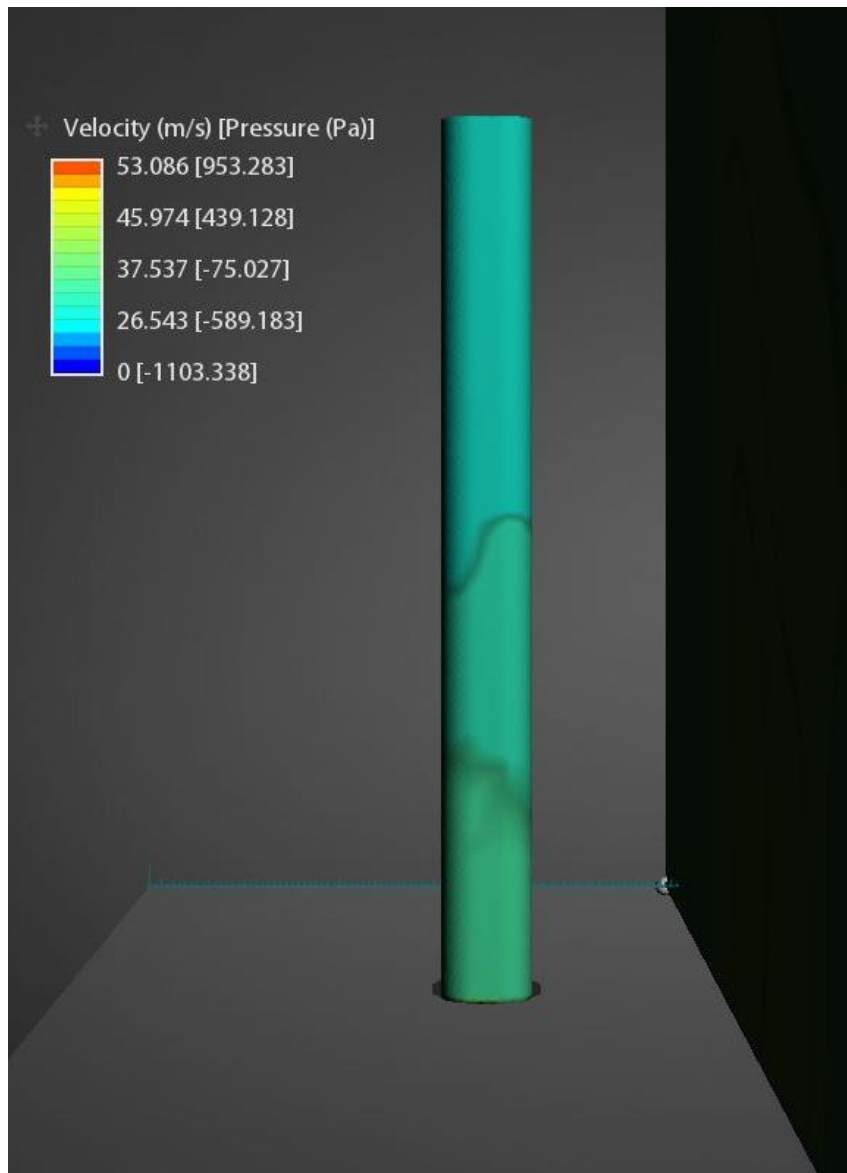
Εικόνα 5.14: Λεπτομέρεια 4

Στις λεπτομέρειες 5, 6 παρατηρείται:

- Τυπική μέγιστη πίεση παρατηρείται πολύ κεντρικά στην πρόσοψη και ισούται με περίπου 950 Pa, ενώ και στα σημεία πιο μακριά από τις γωνίες οι τιμές σταδιακά μειώνονται. Τυπική τιμή είναι των 430 Pa.
- Αλγεβρικά ελάχιστη πίεση (υποπίεση) παρατηρείται στην πίσω όψη του κτιρίου. Στα υψηλότερα σημεία αυτής έχουμε τιμές μέγιστες (κατ' απόλυτη τιμή) κοντά στα 500 Pa, η οποία, όπως αναμέναμε, μειώνεται καθ' ύψος, ώστε να προσεγγίσει την ατμοσφαιρική τιμή.



Εικόνα 5.15: Λεπτομέρεια 5

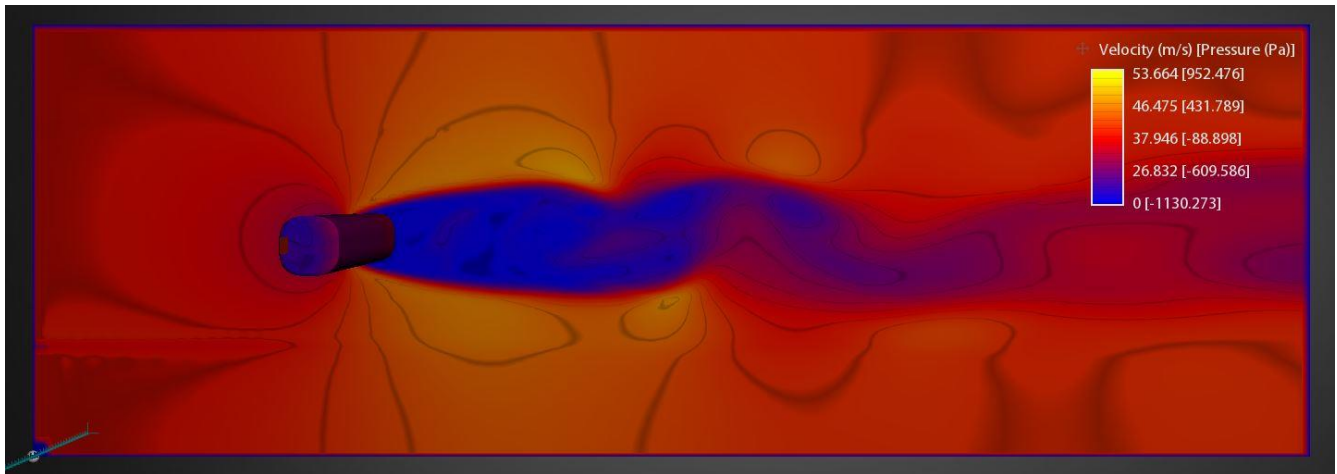


Εικόνα 5.16: Λεπτομέρεια 6

Η λεπτομέρεια 7 αποτελεί απεικόνιση των τιμών της ταχύτητας σε τομή παράλληλη με το έδαφος, σε ύψος 200 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Στην λεπτομέρεια 7 παρατηρείται:

- Γίνεται φανερό το μήκος επιρροής του εμποδίου στην αναταραχή της ροής σε αυτό το υψόμετρο.
- Παρατηρείται, σε τυπική καθ' ύψος τομή 200 m από το έδαφος, μία αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε 54 m/s μέγιστη, δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 42%.



Εικόνα 5.17: Λεπτομέρεια 7

#### 5.4.2 Σενάριο 2

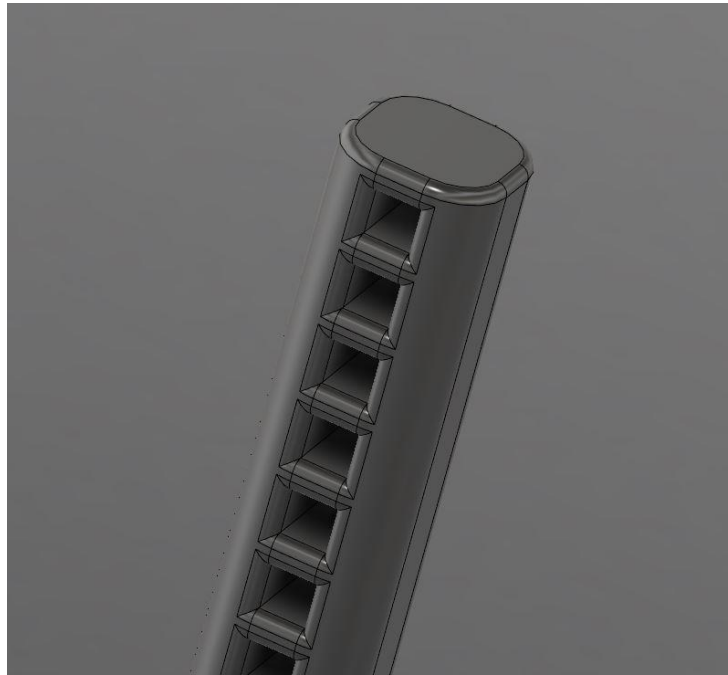
Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία 45 μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή περιστραμμένο γύρω από το καθ' ύψος άξονα συμμετρίας του κατά 45 μοίρες.

Ο συντελεστής αντίστασης σχήματος για αυτήν την διεύθυνση ροής του ανέμου, όπως και προηγουμένως, είναι μικρότερος από αυτόν στο σενάριο 1, επομένως είναι ευμενέστερος και δεν κρίνεται απαραίτητη περαιτέρω διερεύνηση για αυτή την διεύθυνση ροής.

### 5.5 Στρογγυλεμένες γωνίες με τρύπες

Διατηρούμε σταθερό το σχήμα του προηγούμενου ελέγχου. Εμβαδόν κάτοψης 1600 τ.μ., ύψος 400 μ. Στα  $\frac{3}{4}$  του σχήματος, μετρημένου από επάνω (δηλαδή από ύψος 100 μ. έως ύψος 400 μ. ανοίγονται 13 τετραγωνικές οπές (πιθανές θέσεις τοποθέτησης στοιχείων για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας). Οι οπές αυτές επίσης είναι σχεδιασμένες με αμβλυμένες γωνίες, με στόχο την περαιτέρω μείωση του συντελεστή αντίστασης. Οι οπές αυτές σχεδιάζονται για ύψος μεγαλύτερο των 100 m, λόγω της ανάπτυξης πλήρους ταχύτητας του ανέμου από αυτό το ύψος και πάνω, όπως έχει εξηγηθεί αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Χαμηλότερα δεν έχει νόημα η ύπαρξη τέτοιων οπών, διότι δεν θα είναι αποδοτική ενεργειακά η ενδεχόμενη τοποθέτηση ανεμογεννητριών ή άλλων τέτοιων μέσων εκμετάλλευσης.



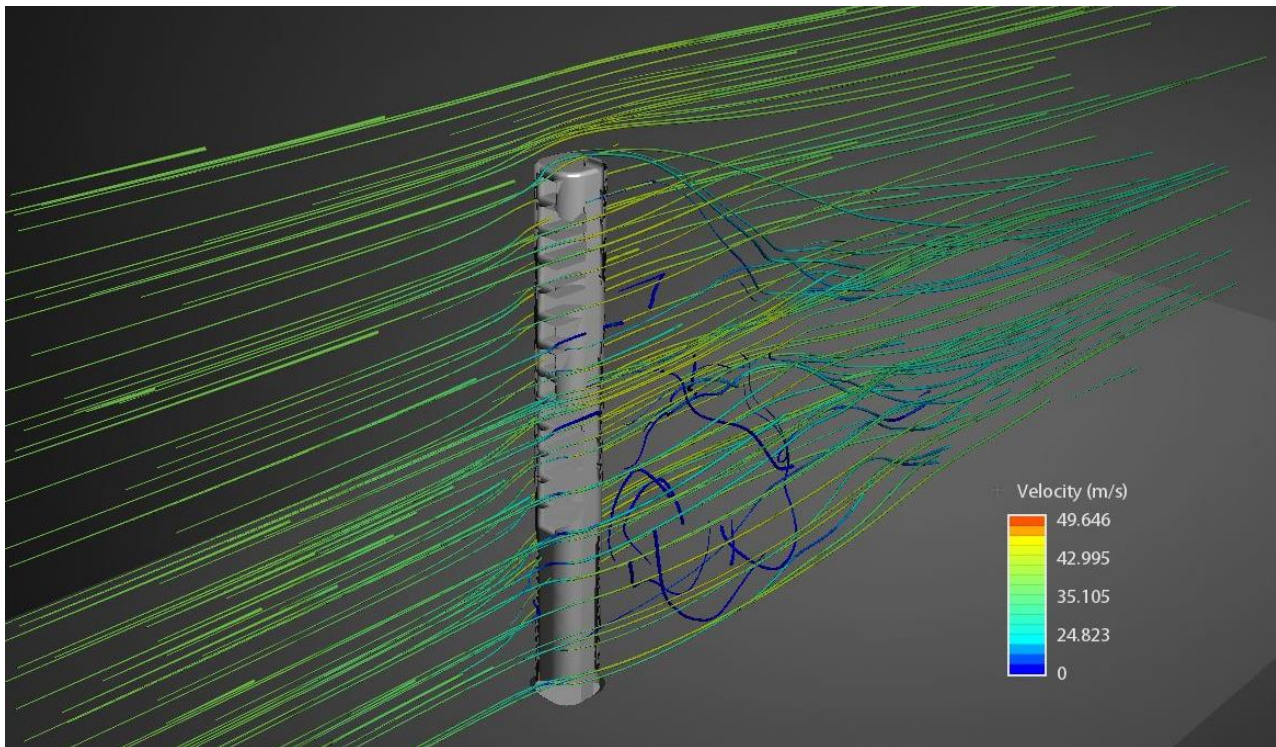


Εικόνα 5.18: Σχεδιαστικές Λεπτομέρειες

Προβλέπεται συντελεστής αντίστασης ακόμη χαμηλότερος από πριν, λόγω διόδων του αέρα μέσω των οπών. Επίσης αναμένουμε και άμβλυνση της πίεσης.

### 5.5.1 Σενάριο 1

Το κτίριο προσβάλλεται υπό γωνία 0 μοιρών ως προς την κύρια όψη του, δηλαδή μετωπικά όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.19: Μέτωπο πρόπτωσης

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται:

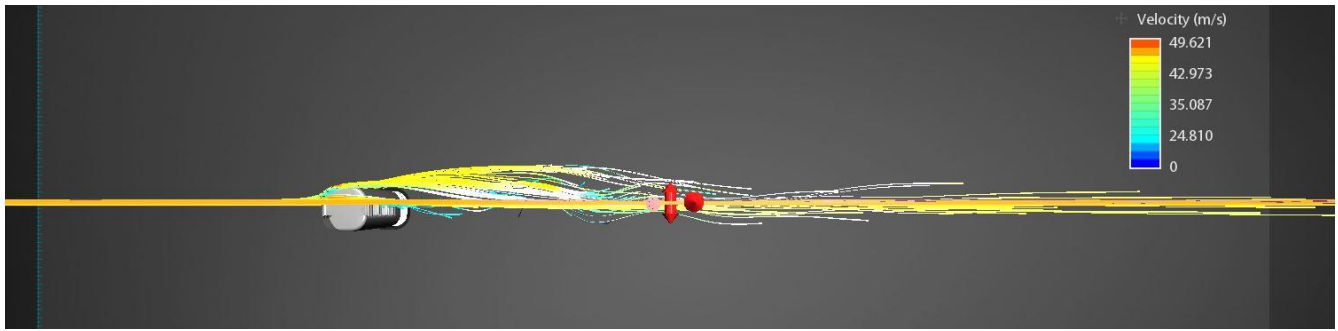
- Αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=0.78$ .
- Δύναμη αντίστασης  $F_d=10.172.011$  N.



Εικόνα 5.20: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται:

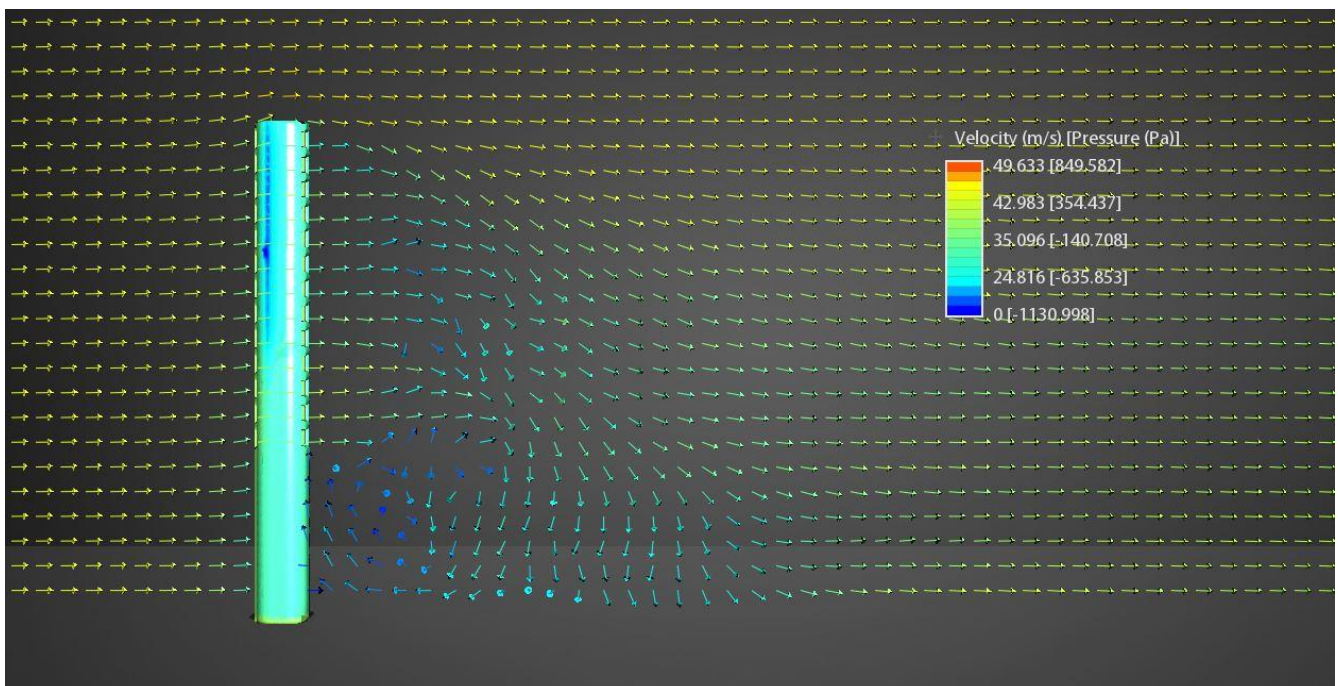
- Μικρή αύξηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο στερεό όριο.
- Ελάχιστος στροβιλισμός-ανακάτεμα των γραμμών ροής.



Εικόνα 5.21: Λεπτομέρεια 2

Στις λεπτομέρειες 3,4 παρατηρείται:

- Αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε τοπική 49.6 m/s, κάτι που αντιστοιχεί σε αύξηση 30%.
- Γραμμές ροής οι οποίες αλλάζουν προσανατολισμό μόνο σε ύψος μικρότερο των 100 m, απόρροια της μη ύπαρξης οπών ως αυτό το ύψος, δημιουργώντας όχι ιδιαίτερα μεγάλη τύρβη.
- Ανωμαλία της ροής σε περίπου απόσταση ίση περίπου με το ύψος του εμποδίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση προφανώς περίπου 400 μέτρα.
- Είναι φανερή η αποφόρτιση της ροής και οι αισθητά πιο ήπιες μεταβολές της ροής.



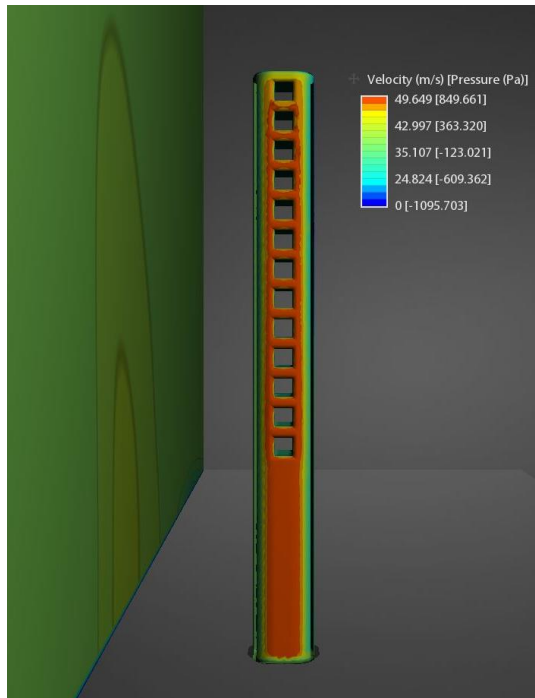
Εικόνα 5.22: Λεπτομέρεια 3



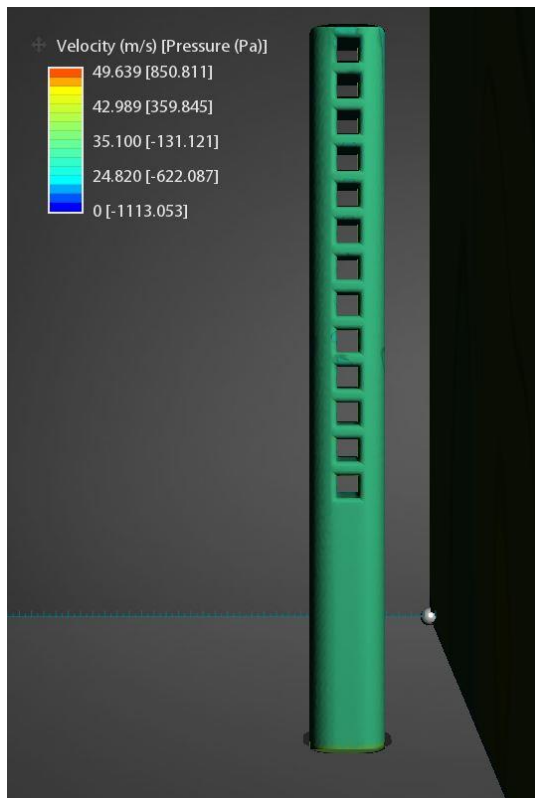
Εικόνα 5.23: Λεπτομέρεια 4

Στις λεπτομέρειες 5, 6 παρατηρείται:

- Τυπική μέγιστη πίεση παρατηρείται πολύ κεντρικά στην πρόσοψη και ισούται με περίπου 850 Pa, ενώ και στα σημεία πιο μακριά από τις γωνίες οι τιμές σταδιακά μειώνονται. Τυπική τιμή είναι των 350 Pa.
- Αλγεβρικά ελάχιστη πίεση (υποπίεση) δεν παρατηρείται εστιασμένη κάπου, είναι περίπου ατμοσφαιρική καθ' ύψος.



Εικόνα 5.24: Λεπτομέρεια 5

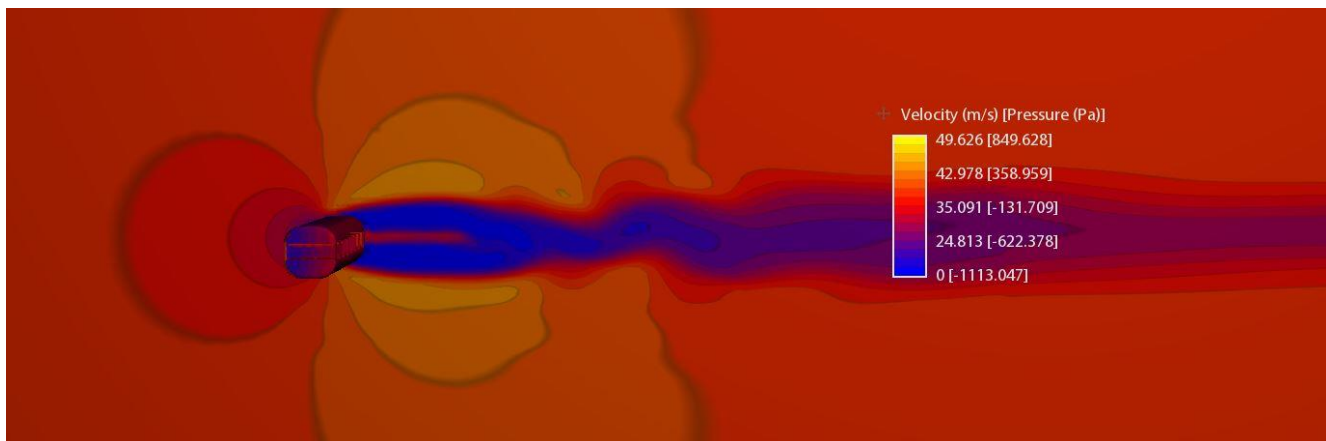


Εικόνα 5.25: Λεπτομέρεια 6

Η λεπτομέρεια 7 αντιστοιχεί στην αντίστοιχη τομή των προηγούμενων 2 σεναρίων που εξετάστηκαν.

Στην λεπτομέρεια 7 παρατηρείται:

- Γίνεται φανερό το μήκος επιρροής του εμποδίου στην αναταραχή της ροής.
- Παρατηρείται, σε τυπική καθ' ύψος τομή 200 m από το έδαφος, μία αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε 48 m/s μέγιστη, δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 26%.



Εικόνα 5.26: Λεπτομέρεια 7

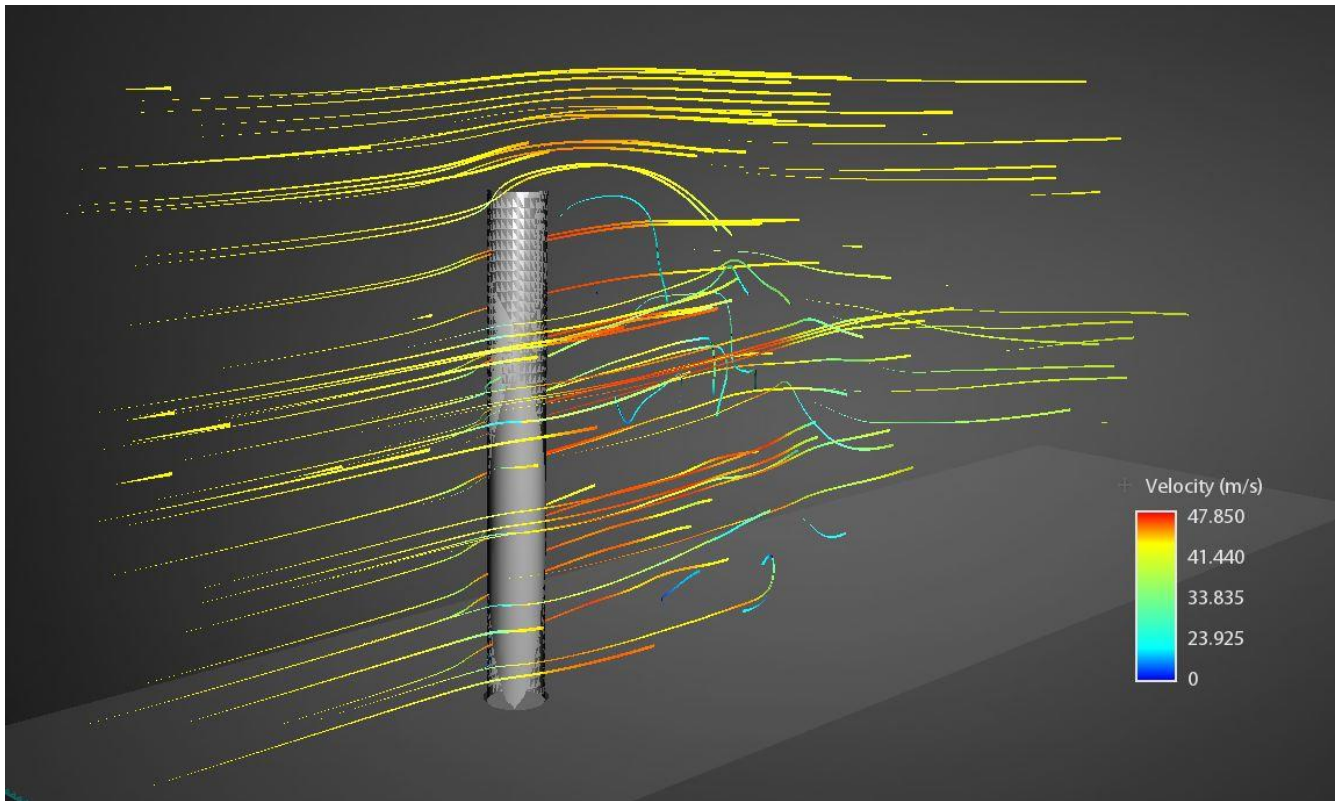
Σε αυτήν την περίπτωση τονίζεται το γεγονός της ενδεχόμενης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που διέρχεται από τις οπές. Αυτή συντελείται με κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό, δηλαδή ανεμογεννήτριες οριζοντίου ή και καθέτου άξονα.

### 5.5.2 Σενάριο 2

Το σενάριο 2 συμπίπτει με το προηγούμενο σενάριο, οπότε δεν μελετάται ξανά.

## 5.6 Κύλινδρος

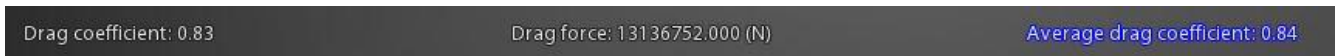
Διατηρούμε σταθερό εμβαδόν κάτοψης περίπου ίσο με 1600 τ.μ., σταθερό επίσης παραμένει το ύψος των 400 m. Ελέγχεται, ως συνέχεια του 5.4, η περίπτωση του απλού κυλίνδρου. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι η συμμετρία ως προς σημείο και άξονα, επομένως όλα τα μέτωπα προσβολής είναι πανομοιότυπα.



Εικόνα 5.27: Μέτωπο πρόπτωσης

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται:

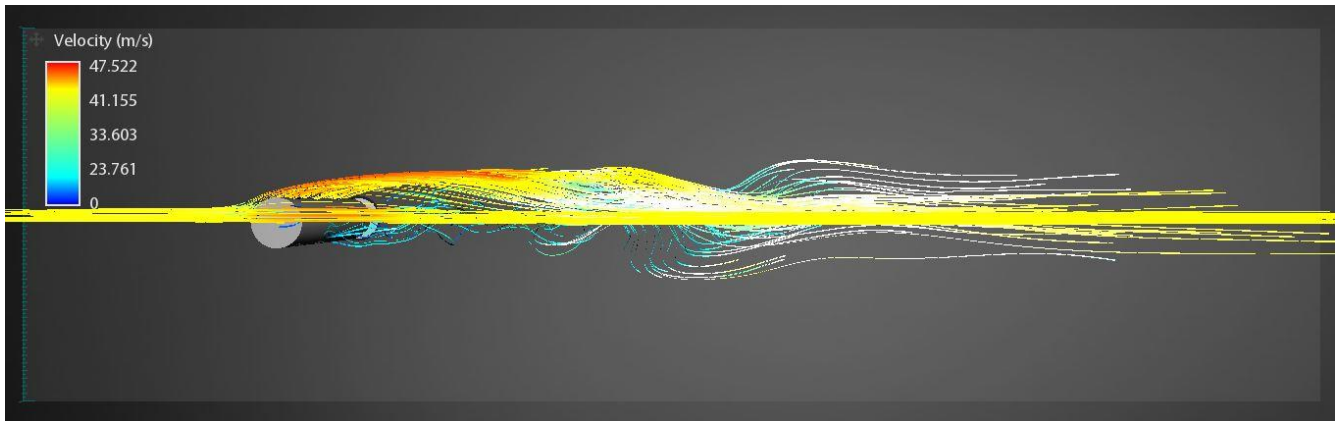
- Αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=0.84$ .
- Δύναμη αντίστασης  $F_d=13.136.752$  N.



Εικόνα 5.28: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται:

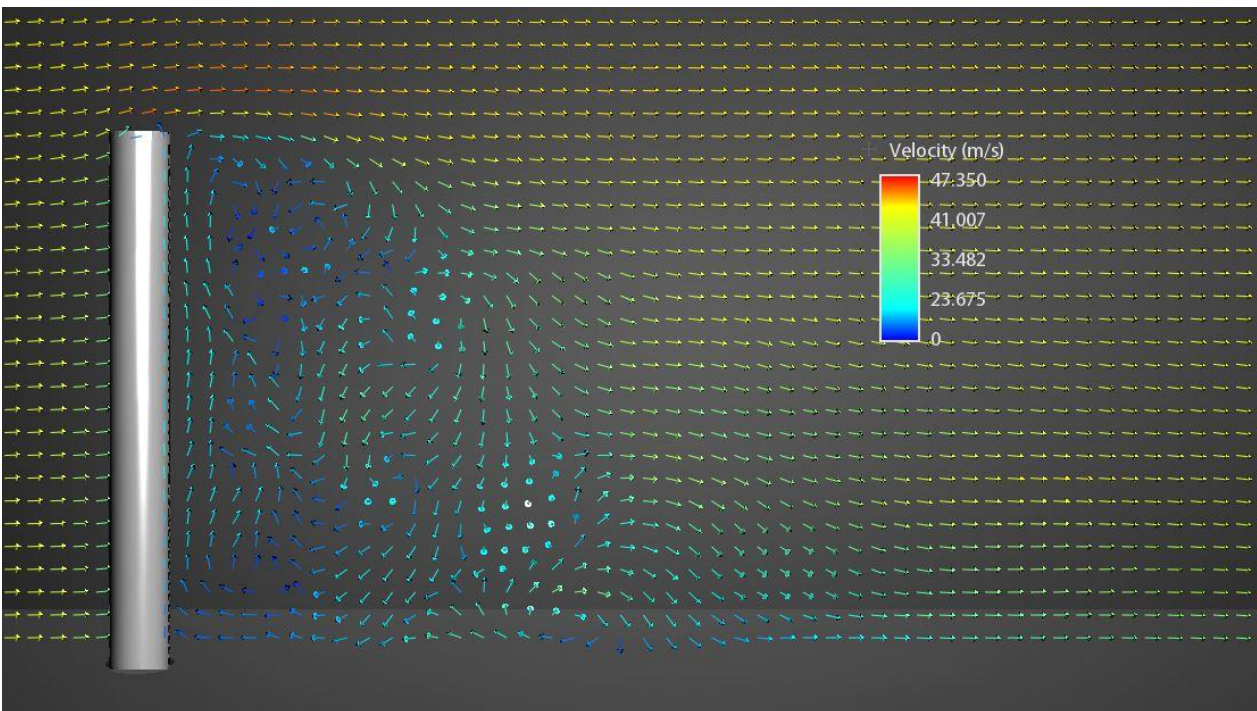
- Μικρή αύξηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο στερεό όριο.
- Περιορισμένος στροβιλισμός-ανακάτεμα των γραμμών ροής.



Εικόνα 5.29: Λεπτομέρεια 2

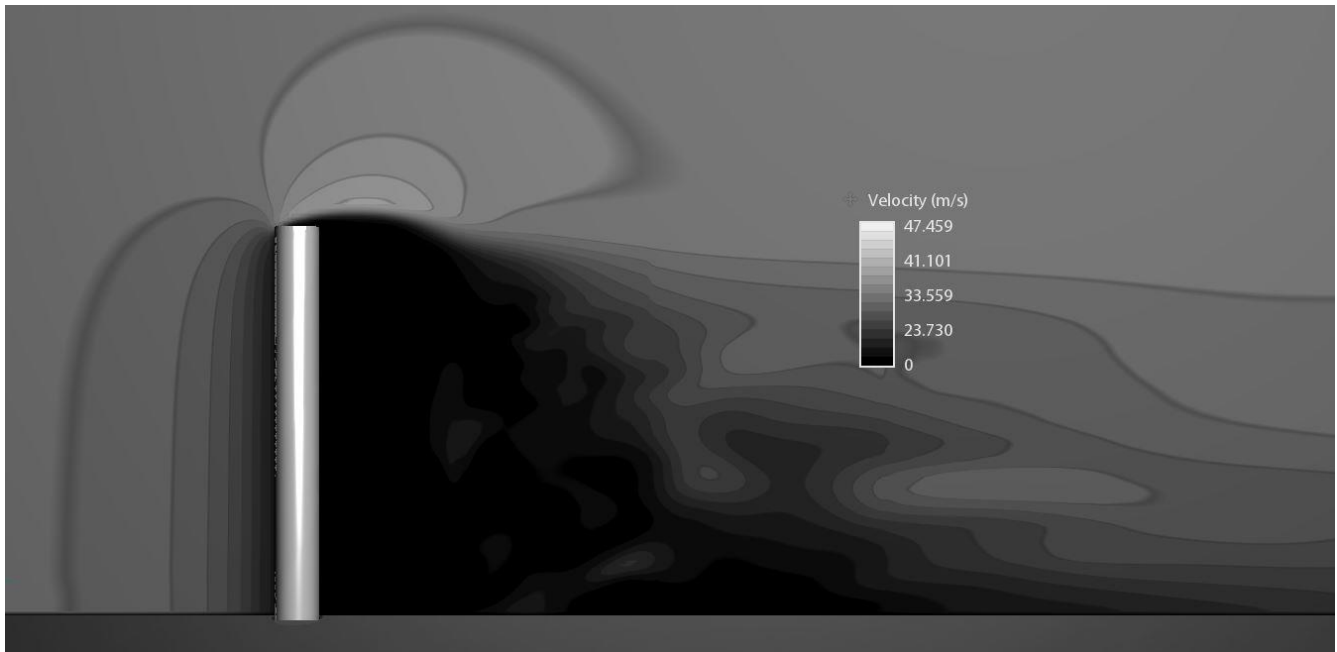
Στις λεπτομέρειες 3, 4 παρατηρείται:

- Αύξηση της ταχύτητας από τα 38 m/s σε τοπική 47 m/s, κάτι που αντιστοιχεί σε αύξηση 24%.
- Γραμμές ροής οι οποίες αλλάζουν προσανατολισμό σε όλο το ύψος, και δημιουργείται έντονος στροβιλισμός (λεπτομέρεια 3).
- Ανωμαλία της ροής σε περίπου απόσταση ίση περίπου με 1.5 φορές το ύψος του εμποδίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση προφανώς περίπου 600 μέτρα.
- Είναι φανερή η αποφόρτιση της ροής και οι αισθητά πιο ήπιες μεταβολές της ροής ωστόσο.



Εικόνα 5.30: Λεπτομέρεια 3

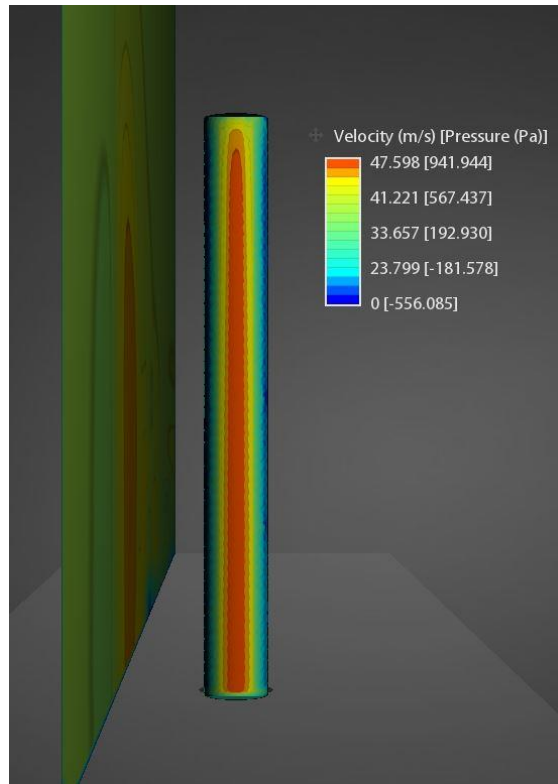




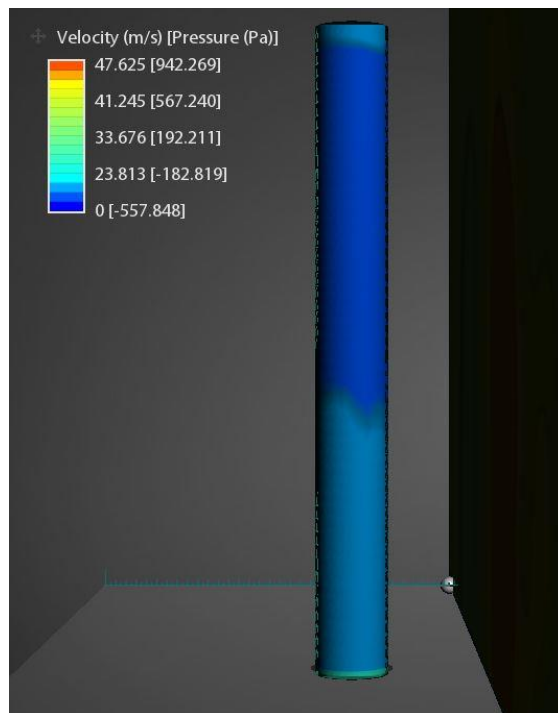
Εικόνα 5.31: Λεπτομέρεια 4

Στις λεπτομέρειες 5, 6 παρατηρείται:

- Τυπική μέγιστη πίεση παρατηρείται πολύ κεντρικά στην πρόσοψη και ισούται με περίπου 940 Pa, ενώ και στα σημεία πιο μακριά από τις γωνίες οι τιμές σταδιακά μειώνονται. Τυπική τιμή είναι των 570 Pa.
- Αλγεβρικά ελάχιστη πίεση (υποπίεση) παρατηρείται στην πίσω όψη του κτιρίου. Στα υψηλότερα σημεία αυτής έχουμε τιμές μέγιστες (κατ' απόλυτη τιμή) κοντά στα 560 Pa, η οποία, όπως αναμέναμε, μειώνεται καθ' ύψος, ώστε να προσεγγίσει την ατμοσφαιρική τιμή.



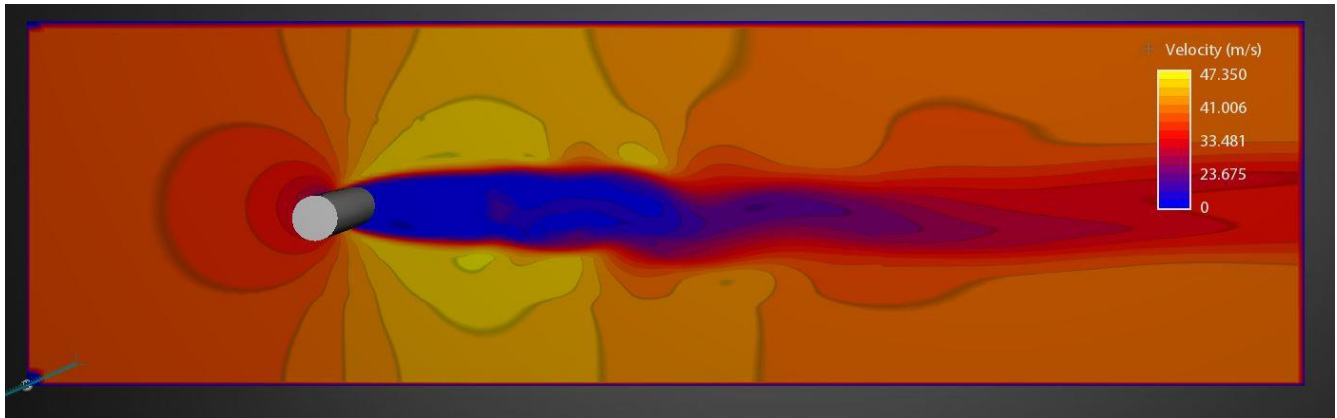
Εικόνα 5.32: Λεπτομέρεια 5



Εικόνα 5.33: Λεπτομέρεια 6

Στην λεπτομέρεια 7 παρατηρείται:

- Γίνεται φανερό το μήκος επιρροής του εμποδίου στην αναταραχή της ροής.
- Παρατηρείται, σε τυπική καθ' ύψος τομή 200 m από το έδαφος, μία αύξηση της ταχύτητας από τα 47.5 m/s μέγιστη, δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 25%.



Εικόνα 5.34: Λεπτομέρεια 7



## 6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Πρόταση

### 6.1 Πινακοποίηση αποτελεσμάτων παραμετροποίησης

Πινακοποιούνται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις του κεφαλαίου 5 και τα αποτελέσματα αυτών για ευχέρεια σύγκρισης του. Στόχος είναι η ακριβής κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανέμου-κτιρίου σε σχέση με την αλλαγή της μορφής του, για την κατάληξη σε πρόταση αεροδυναμικά βελτιωμένης.

	$C_d$	$F_d$ (N)	Max V (m/s)	$\Delta V$ (%)
Τετραγωνική	1.55	33.708.932	52	37
Τετραγωνική με στρογγυλεμένες γωνίες	0.98	22.387.348	53.5	41
Τετραγωνική με στρογγυλεμένες γωνίες και οπές	0.78	10.172.011	48	26
Κυκλική	0.84	13.136.752	47	24

Πίνακας 6.1: Σύγκριση Περιπτώσεων

#### 6.1.1 Τετραγωνική κάτοψη

Η τετραγωνική κάτοψη οδήγησε σε συντελεστή  $C_d=1.55$ , και δύναμη  $F_d=33.708.932$  N. Η μεγάλη αυτή δύναμη αυτή οφείλεται στην μεγάλη μετωπική επιφάνεια που έχει η συγκεκριμένη μορφή.

Ο δυσμενής συντελεστής στις απότομες γωνίες στις παρειές αλλά και στην κορυφή.

Ακόμη, παρατηρείται επιτάχυνση της ροής 37% επί της αρχικής ταχύτητας.

#### 6.1.2 Τετραγωνική με στρογγυλεμένες γωνίες

Η τετραγωνική κάτοψη με στρογγυλεμένες γωνίες οδήγησε σε συντελεστή  $C_d=0.98$ , και δύναμη  $F_d=22.387.348$  N. Η δύναμη αυτή οφείλεται στην ακόμα μεγάλη μετωπική επιφάνεια που έχει η συγκεκριμένη μορφή, αλλά σαφώς μειωμένη από την περίπτωση 6.1.1.

Ο σημαντικά ευμενέστερος συντελεστής που χαρακτηρίζει αυτήν την περίπτωση οφείλεται στην άμβλυνση των γωνιών στις παρειές και όπως γίνεται κατανοητό είναι καταλυτικής σημασίας. Σε σχέση με την τετραγωνική κάτοψη ο συντελεστής αντίστασης  $C_d$  έχει υποστεί μείωση 37%.

Παρατηρείται ωστόσο επιτάχυνση της ροής 41% επί της αρχικής ταχύτητας.

### 6.1.3 Τετραγωνική με στρογγυλεμένες γωνίες και οπές

Η προηγούμενη περίπτωση, με την προσθήκη των οπών για την διόδο του ανέμου, οδήγησε σε συντελεστή  $C_d=0.78$ , και δύναμη  $F_d=10.172.011$  N. Η δύναμη αυτή εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη κάτι που οφείλεται στην μείωση της μετωπικής επιφάνειας που έχει η συγκεκριμένη μορφή λόγω της ύπαρξης των οπών.

Ο περαιτέρω ευμενής συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση οφείλεται στην προσθήκη των οπών. Σε σχέση με την τετραγωνική κάτοψη ο συντελεστής αντίστασης  $C_d$  έχει υποστεί μείωση 50%. Μειώθηκε επομένως ακόμα 13% σε σύγκριση με την προηγούμενη δοκιμή.

Παρατηρείται ηπιότερη επιτάχυνση της ροής που αντιστοιχεί σε 26% επί της αρχικής ταχύτητας.

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη περίπτωση δίνει και την δυνατότητα ενεργειακής εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας για τις ανάγκες του κτιρίου και ενδεχομένως της παραπλήσιας περιοχής αυτού.

### 6.1.4 Κυκλική

Η κυκλική κάτοψη οδήγησε σε συντελεστή  $C_d=0.84$ , και δύναμη  $F_d=13.136.752$  N.

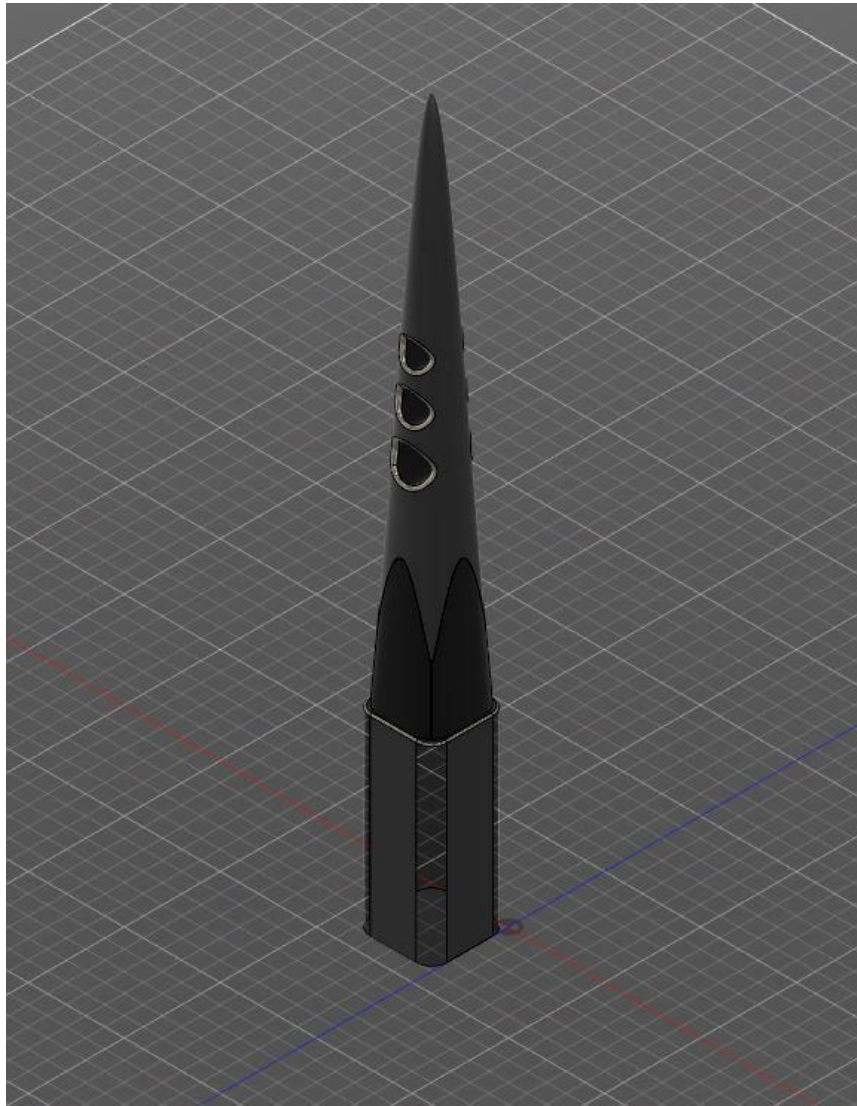
Ο ευμενής αεροδυναμικός συντελεστής της συγκεκριμένης μορφής οφείλεται στην μορφή της επιφάνειας πρόσπτωσης. Σε σχέση με την τετραγωνική κάτοψη ο συντελεστής αντίστασης  $C_d$  έχει υποστεί μείωση 45% η οποία είναι ευμενέστερη από την περίπτωση 6.1.2, αλλά δυσμενέστερη από την 6.1.3.

Παρατηρείται ακόμη ηπιότερη επιτάχυνση της ροής που αντιστοιχεί σε 24% επί της αρχικής ταχύτητας.

## 6.2 Πρόταση

Προς εκμετάλλευση των στοιχείων που μελετήθηκαν, γίνεται προσπάθεια δημιουργίας ενός μοντέλου αεροδυναμικά όσο το δυνατόν αεροδυναμικά ευμενέστερου. Εστιάζεται η προσοχή στην βαρύτητα που παρατηρήθηκε ότι έχουν στοιχεία όπως η μειούμενη κάτοψη, η αποφυγή γωνιών και η ύπαρξη διόδου για τον άνεμο στο σώμα του κτιρίου.

Η ανάλυση θα γίνει και για την περίπτωση της οριακής φόρτισης των 38 m/s. Το προτεινόμενο μοντέλο επίσης επιδιώκεται να εξαλείφει της διαφοροποίηση του συντελεστή  $C_d$  σε περιπτώσεις διαφορετικής διεύθυνσης φορτίσεως.



Εικόνα 6.1: Πρόταση

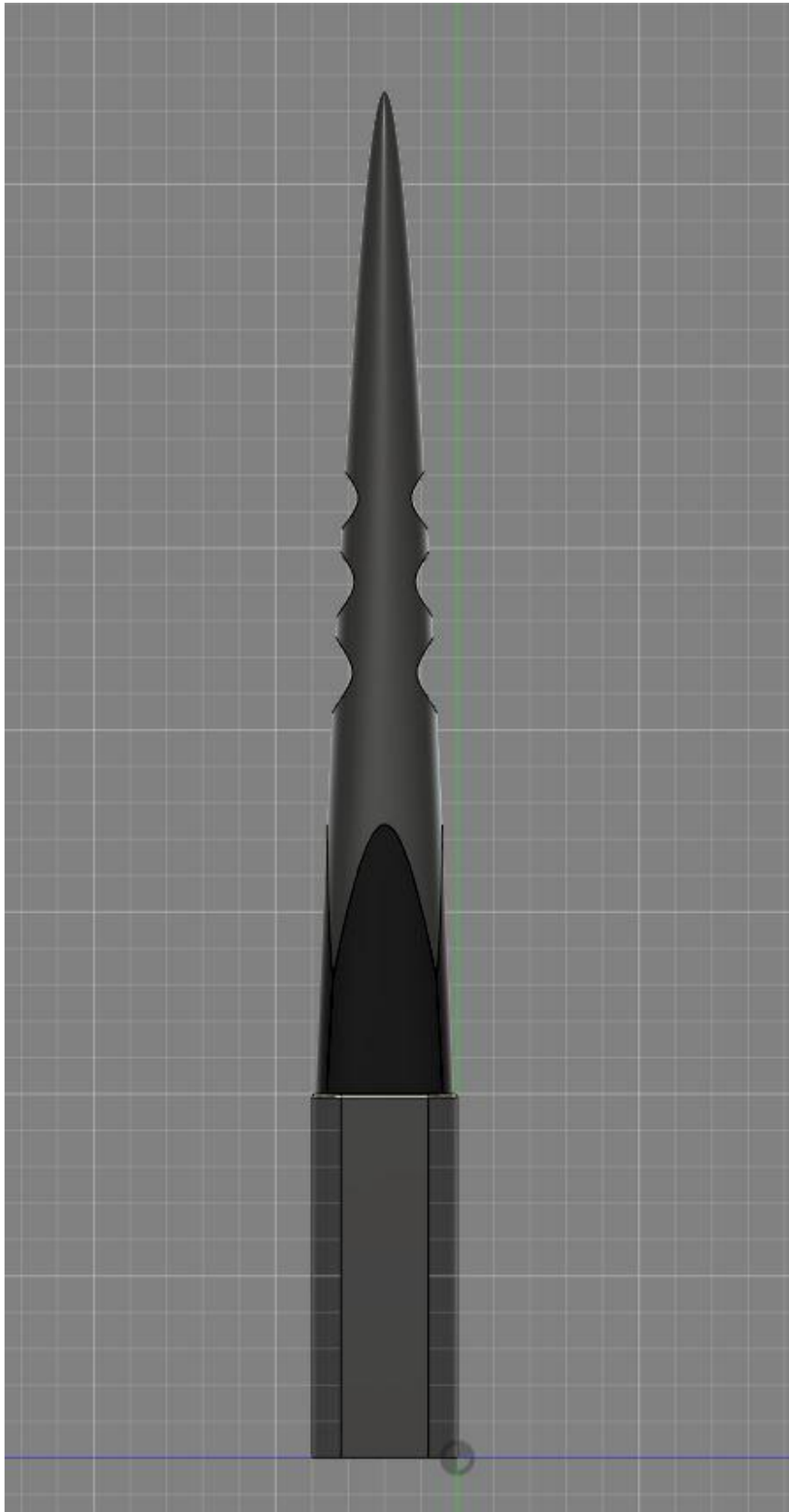
### 6.2.1 Χαρακτηριστικά μοντέλου

- Ύψος συνολικό 400 m.
- Ύψος κομματιού τύπου 6.1.2 100 m.
- Ύψος πυραμίδας με αμβλυμένες γωνίες 300 m.
- Εμβαδόν κάτοψης βάσης 1600 m<sup>2</sup>.

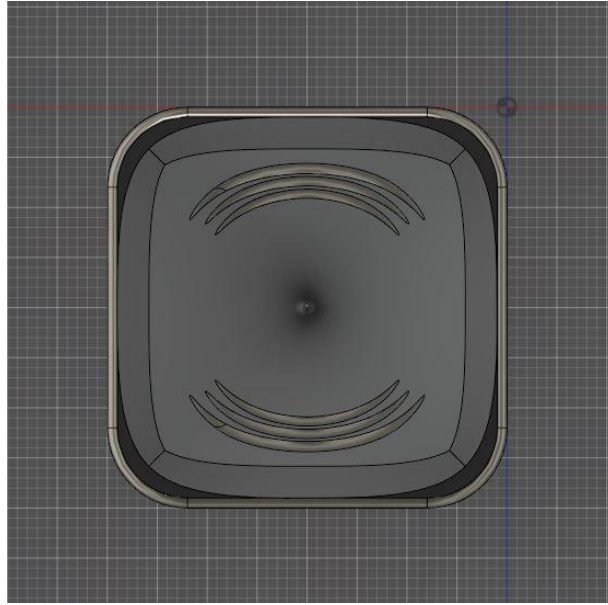


Εικόνα 6.2: Όψη 1 πρότασης





Εικόνα 6.3: Όψη 2 πρότασης



Εικόνα 6.4: Άνω Όψη πρότασης

### 6.2.2 Χαρακτηριστικά οπών

- 1<sup>η</sup> οπή με διάμετρο 18 m. Και απόσταση κέντρου της από το έδαφος τα 209 m.
- 2<sup>η</sup> οπή με διάμετρο 15 m. Και απόσταση κέντρου της από το έδαφος τα 230 m.
- 3<sup>η</sup> οπή με διάμετρο 13 m. Και απόσταση κέντρου της από το έδαφος τα 255 m.



Εικόνα 6.5: Λεπτομέρεια οπών

### 6.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης μοντέλου πρότασης

Στην λεπτομέρεια 1 παρατηρείται

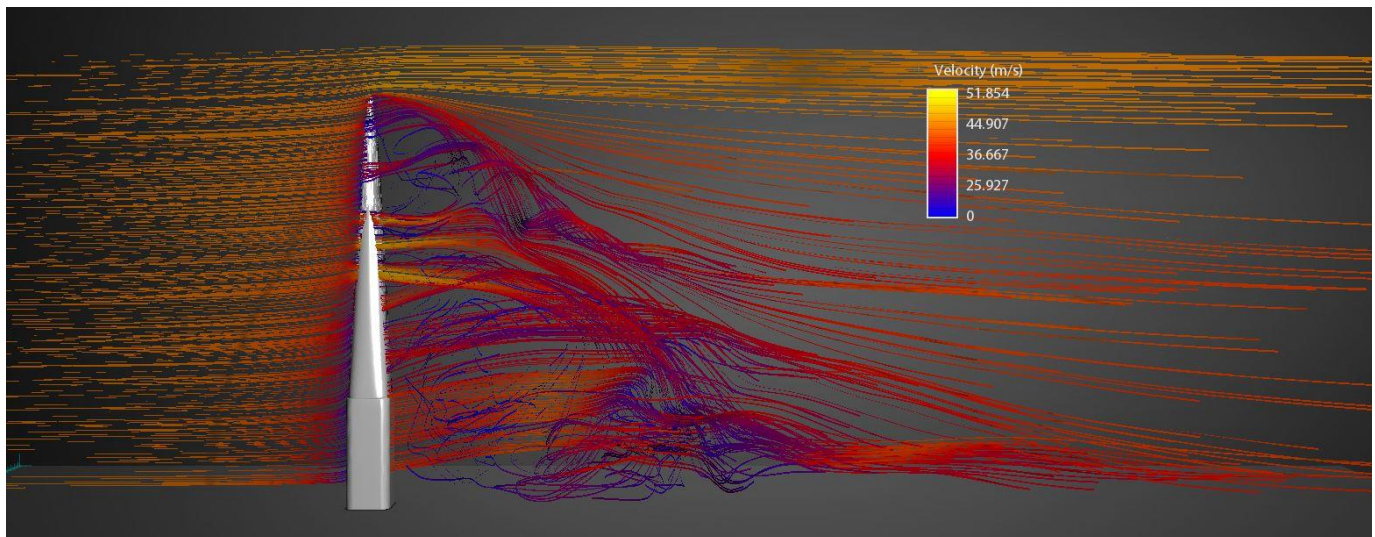
- Αδιάστατος συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=0.76$
- Δύναμη αντίστασης 6.866.586 N.



Εικόνα 6.6: Λεπτομέρεια 1

Στην λεπτομέρεια 2 παρατηρείται:

- Αύξηση της ταχύτητας της ροής κοντά στο στερεό όριο, από 38 m/s σε 44 m/s.
- Μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας σε κορυφή και οπές, από 38 m/s σε 52 m/s.
- Περιορισμένος στροβιλισμός-ανακάτεμα των γραμμών ροής σε σχετικά μικρή απόσταση πίσω από το κτίριο.

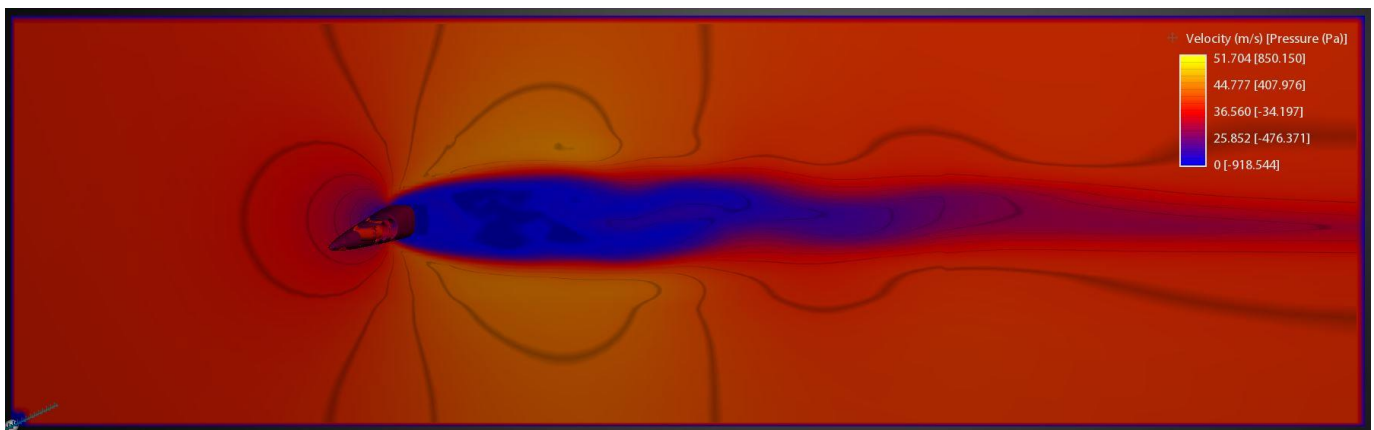


Εικόνα 6.7: Λεπτομέρεια 2 - Μέτωπο πρόπτωσης

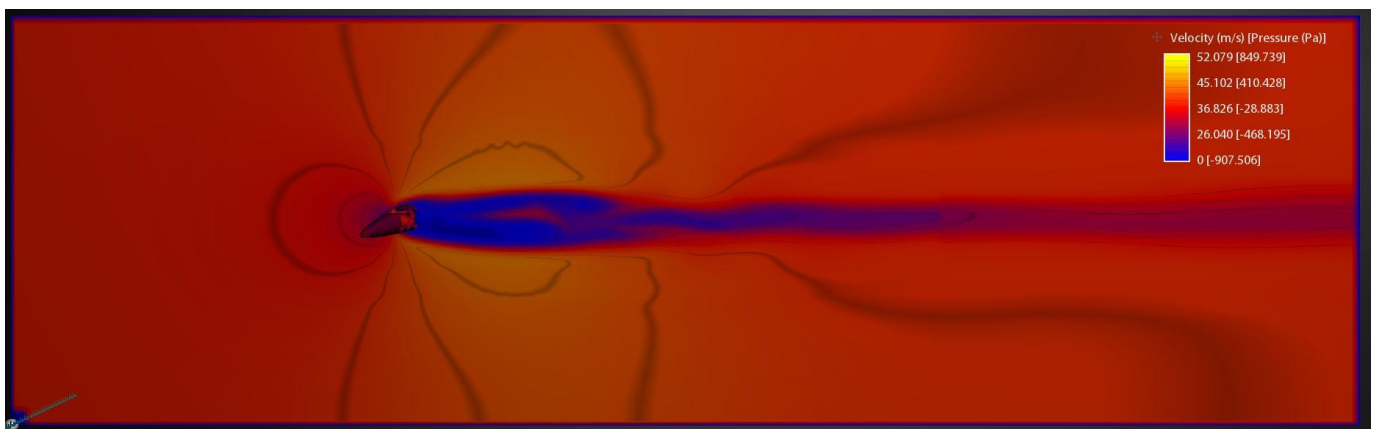
Η λεπτομέρεια 3 είναι καθ' ύψος τομή παράλληλα με το έδαφος σε υψόμετρο 95 m, λίγο πριν από την αλλαγή της κάτοψης του κτιρίου. Η λεπτομέρεια 4 είναι επίσης τέτοια τομή, σε υψόμετρο 200 m, δηλαδή λίγο πριν από τις σπές.

Στις λεπτομέρειες 3, 4 παρατηρείται:

- Πλευρική αύξηση της ταχύτητας της ροής 21%, από 38 m/s σε 46 m/s (λεπτομέρεια 3).
- Μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας στο αμέσως επόμενο υψόμετρο που αντιστοιχεί σε αύξηση 34%, από 38 m/s σε 51 m/s (λεπτομέρεια 4).
- Ομαλή κατανομή των ταχυτήτων δίπλα και πίσω από το κτίριο.



Εικόνα 6.8: Λεπτομέρεια 3

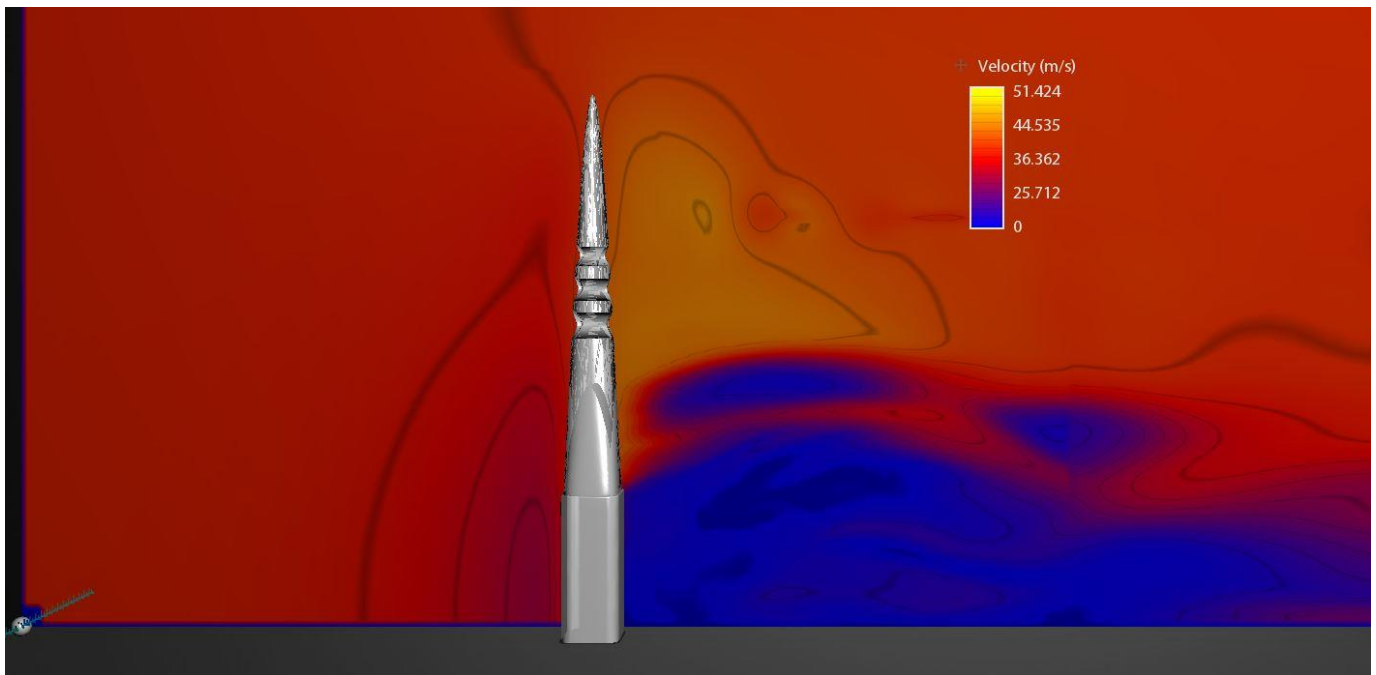


Εικόνα 6.9: Λεπτομέρεια 4

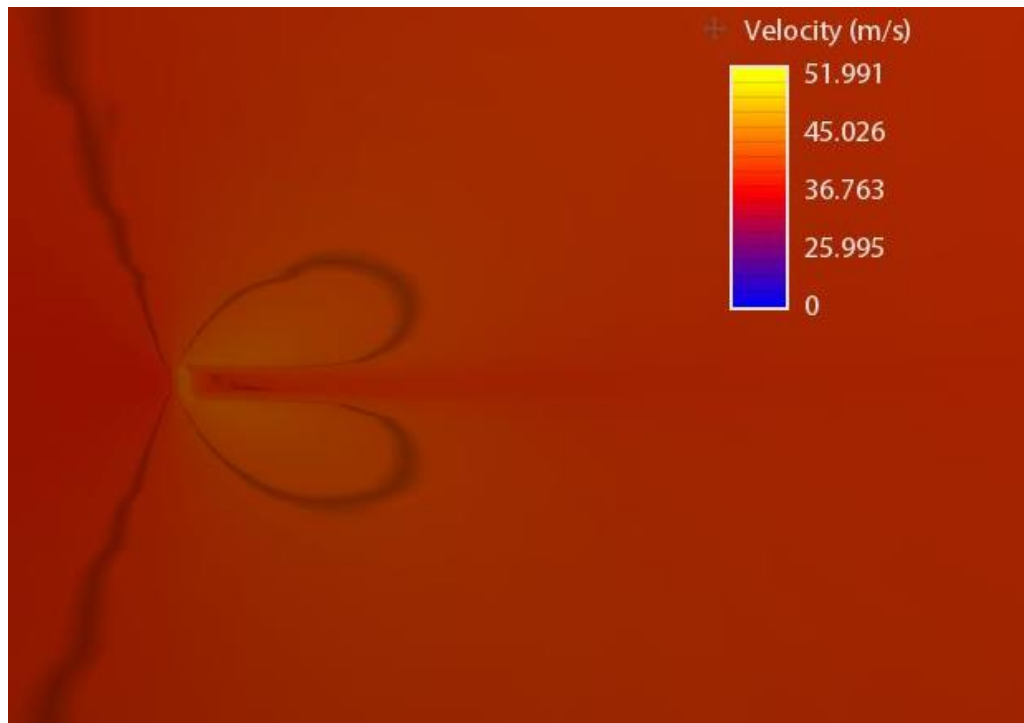
Στις λεπτομέρειες 5 και 6 πραγματοποιούνται τομές για την ακριβή κατανόηση της κατανομής των ταχυτήτων πλευρικά και στην κορυφή. Η λεπτομέρεια 5 είναι τομή σε κοντινή απόσταση από το δεξί όριο του κτιρίου και η λεπτομέρεια 6 στην κορυφή του.

Στις λεπτομέρειες 5, 6 παρατηρείται

- Πλευρική αύξηση της ταχύτητας της ροής 34%, από 38 m/s σε 51 m/s (λεπτομέρεια 5).
- Παρόμοια αύξηση της ταχύτητας στην κορυφή που αντιστοιχεί σε αύξηση 34%, από 38 m/s σε 51 m/s (λεπτομέρεια 6).



Εικόνα 6.10: Λεπτομέρεια 5

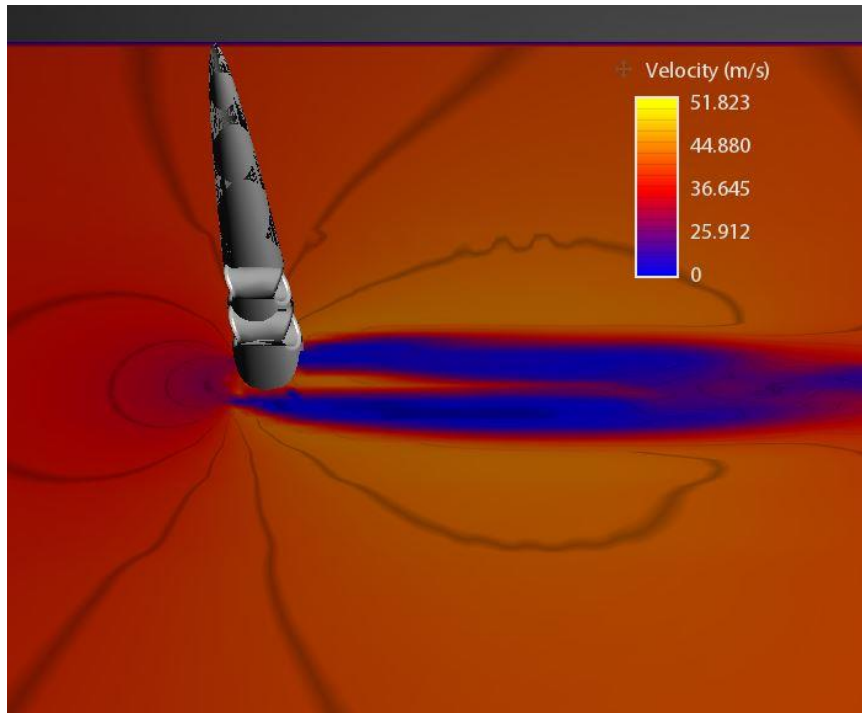


Εικόνα 6.11: Λεπτομέρεια 6

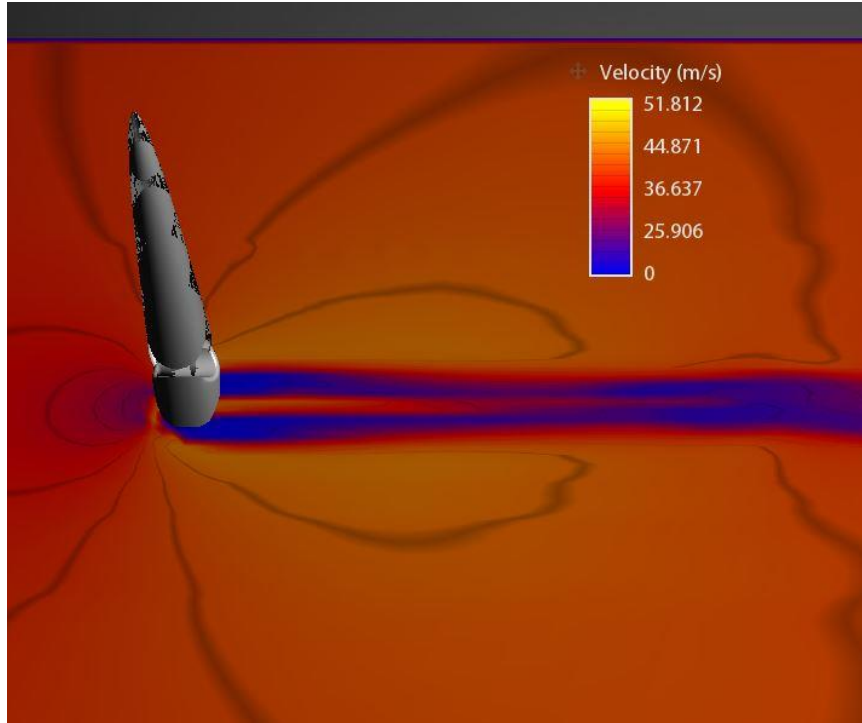
Στις λεπτομέρειες 7, 8 και 9 πραγματοποιούνται τρεις τομές καθ' ύψος. Η πρώτη κατά σειρά στον άξονα της πρώτης οπής, σε υψόμετρο 209 m. Η δεύτερη στον άξονα της δεύτερης οπής στα 230 m και η Τρίτη κατά σειρά σε υψόμετρο 255 m, που αντιστοιχούν στον άξονα της τρίτης και μικρότερης οπής. Οι τομές αυτές πραγματοποιούνται για την εξακρίβωση της τιμής της ταχύτητας του διερχόμενου ρεύματος ανέμου στην κάθε μία, με στόχο την πρόταση ενεργειακής εκμετάλλευσης του.

Στις λεπτομέρειες 7, 8 και 9 παρατηρείται

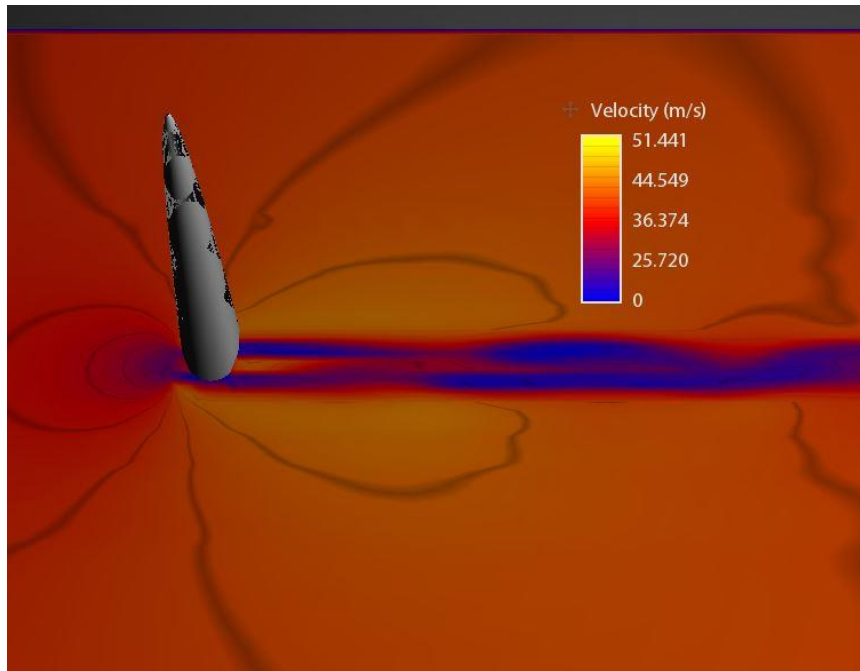
- Και στις 3 οπές παρατηρείται ταχύτητα διερχόμενου ανέμου περίπου ίση με 48 m/s, δηλαδή αύξηση της ταχύτητας ροής ίση με 26%.



Εικόνα 6.12: Λεπτομέρεια 7



Εικόνα 6.13: Λεπτομέρεια 8



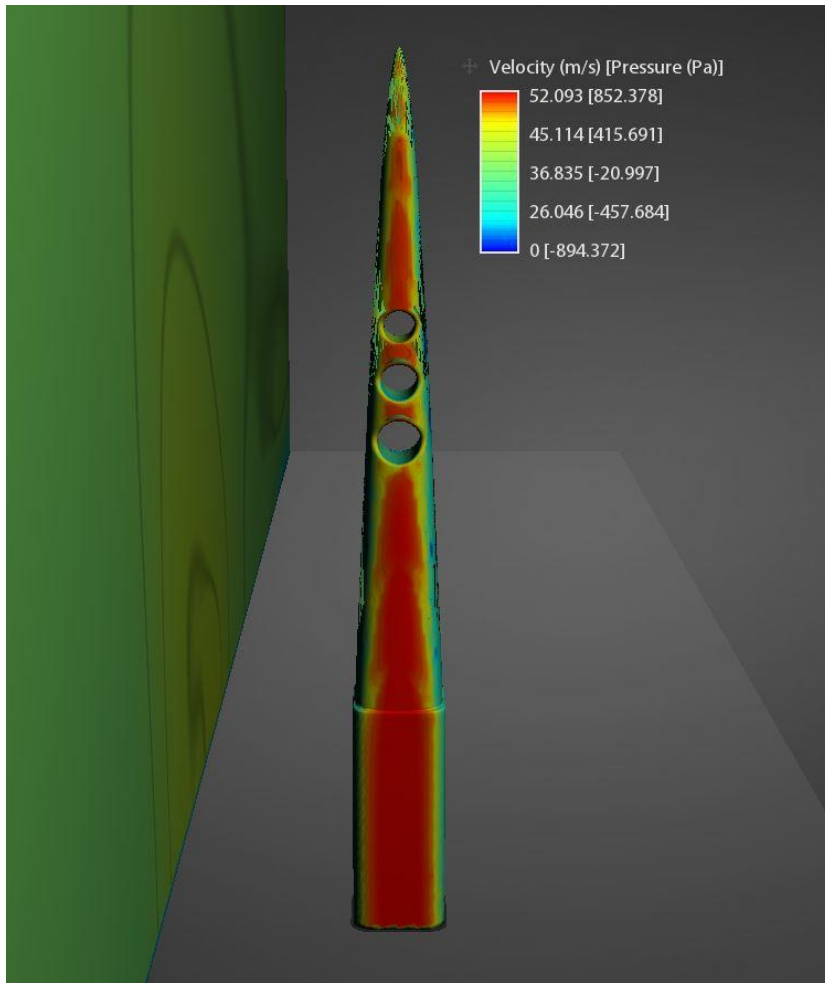
Εικόνα 6.14: Λεπτομέρεια 9

Οι λεπτομέρειες 10, 11 απεικονίζουν τις πέσεις που ασκούνται στο μέτωπο πρόσπτωσης (και αντίστοιχα στην πίσω όψη) του ελέγχου για την συγκεκριμένη ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου.

Στις λεπτομέρειες 10, 11 παρατηρείται:

- Τυπική μέγιστη πίεση παρατηρείται στο κάτω τμήμα του κτιρίου και ισούται με περίπου 850 Pa, ενώ και στα σημεία πιο μακριά από τις γωνίες αλλά και όσο μεγαλώνει το ψόμετρο και μειώνεται η κάτοψη (και η προσβαλλόμενη επιφάνεια) οι τιμές σταδιακά μειώνονται. Τυπική τιμή είναι των 415 Pa.
- Αλγεβρικά ελάχιστη πίεση (υποπίεση) δεν παρατηρείται εστιασμένη κάπου, είναι περίπου ατμοσφαιρική καθ' ύψος.





Εικόνα 6.15: Λεπτομέρεια 10



## 7. Επίλογος – Προτάσεις περεταίρω μελέτης

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάστηκε η πρόταση η οποία περιείχε όλα τα εξαγόμενα από την μελέτη αποτελέσματα. Αυτό οδήγησε σε συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης  $C_d=0.76$  ο οποίος είναι εξαιρετικά ευμενής, διατηρώντας όμως ταυτόχρονα κατά το δυνατόν και τα πλεονεκτήματα των δυσμενέστερων αεροδυναμικά σχημάτων. Η δύναμη αντίστασης επίσης είναι  $F_d=8.66.586$  N, μικρότερη από οποιαδήποτε τιμή παρουσιάστηκε στα αποτελέσματα της παραμετροποίησης του κεφαλαίου.

Συνολικά, σε σχέση με την απλή περίπτωση τετραγωνικής κάτοψης επετεύχθη μείωση του συντελεστή  $C_d$  της τάξεως του 51%, που αποτελεί τον στόχο τα παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συγκεκριμένα:

- Βάση τετραγωνική με αμβλυμένες γωνίες. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι αρχιτεκτονικά προτιμότερη όσον αφορά την καλύτερη εκμετάλλευση των χώρων.
- Αλλαγή κάτοψης και δημιουργία πάνω τμήματος με μορφή πυραμίδας, επίσης αμβλυμένων γωνιών. Η μειούμενη κάτοψη είναι στατικά πολύτιμη, όπως αναλύθηκε σε τμήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμη η μειούμενη κάτοψη συντελεί κι στην αποφυγή του προαναφερθέντος down draught effect. Η πυραμίδα επίσης αντιστοιχεί σε ουσιαστικά τετραγωνική κάτοψη μειούμενη καθ' ύψος και προτιμήθηκε από την εξίσου καλή αεροδυναμική επιλογή του κώνου (μειούμενου κυλίνδρου) για τους προαναφερθέντες αρχιτεκτονικούς λόγους.
- Δημιουργία 3 οπών με τριπλό όφελος. Πρώτον την άμβλυνση των πιέσεων πρόσοψης και ανομοιομορφιών στις γραμμές ροής. Δεύτερον την αποφυγή έντονων υποπιέσεων και συνεπώς δυνάμεων στην πίσω όψη του κτιρίου και τρίτον την δυνατότητα ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στην βελτιστοποίηση του εξωτερικού σχήματος ενός ουρανοξύστη σε περιβάλλον μη αστικό, με στόχο την μείωση του αδιάστατου αεροδυναμικού συντελεστή αντίστασης του.

Θέματα για περεταίρω μελέτη και διερεύνηση μπορούν να αποτελέσουν τα εξής:

- Ένταξη ενός τέτοιου κτιρίου στον αστικό ιστό και μελέτη της επίπτωσης των μεταβολών της ταχύτητας και των προκαλούμενων ανομοιομορφιών ροής σε αστικό περιβάλλον, με στόχο την άμβλυνση αυτών.
- Μελέτη ενεργειακής εκμετάλλευσης των οπών σε τέτοια κτίρια, όσον αφορά την βέλτιστη θέση τους πάνω στο κτίριο αλλά την βέλτιστη γεωμετρία τους, και κατ' επέκταση το μέγεθος της δυνατής ενεργειακής κάλυψης που μπορεί να παρέχει αυτή η τεχνοτροπία.



## 8. Βιβλιογραφία

1. Ernst Neufert (2000). «Οικοδομική & αρχιτεκτονική σύνθεση, 36<sup>η</sup> γερμανική έκδοση.» Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
2. Anil K. Chopra (2007). «Δυναμική των κατασκευών, θεωρία και εφαρμογές στην σεισμική μηχανική, 3<sup>η</sup> αμερικάνικη έκδοση.» Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
3. EN 1991-1-4, Ευρωκώδικας 1, «Δράσεις στις κατασκευές», Μέρος 1-4:Γενικές Δράσεις – Δράσεις ανέμου, CEN, Απρίλιος 2004
4. <http://www.aeronautics.nasa.gov/>
5. <http://faculty.philau.edu/masoodir/PDF/Projects/Fluid/Aerodynamics%20of%20Buildings.pdf>
6. <http://buildinggreen.gr/>
7. <http://www.engin.umich.edu/aero/research/facilities/wind-tunnels>
8. <http://www.southampton.ac.uk/windtunnels/index.page>
9. [http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/wind\\_tunnel\\_index.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/wind_tunnel_index.html)
10. <http://www.willistower.com/building-information/history-and-facts>
11. <http://www.taipei-101.com.tw/en/building.aspx>



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Autodesk Fusion 360

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα Fusion 360 της Autodesk είναι ελεύθερο για χρήση σε σπουδαστές. Είναι ιδιαίτερα εύχρηστο λογισμικό ακόμα και για σχεδιαστικά άπειρους χρήστες. Παρέχει την δυνατότητα 2D αλλά και 3D σχεδίασης. Λόγω 2 διαφορετικών περιβαλλόντων 3D σχεδίασης, μπορεί ο σχεδιαστής να επιλέξει αν θέλει να εστιάσει στις ακριβείς διαστάσεις του σχεδίου ή αν ενδιαφέρεται περισσότερο για την μορφή του. Τα δύο περιβάλλοντα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικά κομμάτια του ίδιου σχεδίου. Στην παρούσα διπλωματική η βάση του προτεινόμενου σχεδίου (παραπομπή) είναι σχεδιασμένη στο πρώτο περιβάλλον σχεδιασμού, ενώ το πάνω κομμάτι είναι σχεδιασμένο στο δεύτερο περιβάλλον.

Εφαρμόζονται ουσιαστικά γνώσεις παραστατικής γεωμετρίας, δημιουργώντας μέσω τομών σχημάτων κάθε επιθυμητό αποτέλεσμα.

Είναι επίσης δυνατή η επιλογή των υλικών κάθε στοιχείου. Τέλος, πρόσφατα έχει προστεθεί η δυνατότητα στατικής ανάλυσης με αποτελέσματα σε επίπεδο πιέσεων αλλά και μετατοπίσεων σημείων.

Για την περαιτέρω χρήση του μοντέλου για την αεροδυναμική του ανάλυση από το Autodesk Flow Design είναι απαραίτητη η εξαγωγή (export) του μοντέλου σε μορφή (\*.iges) ή (\*.igs).

### Χρήση Flow Design

Το πρόγραμμα προσομοίωσης wind tunnel Flow Design της Autodesk είναι ελεύθερο για χρήση σε σπουδαστές.

Η πορεία μελέτης είναι η εξής. Αρχικά εισάγεται το μοντέλο σε μορφή (\*.iges) ή (\*.igs).



- Ταμπέλες Flow Design

Στην ταμπέλα simulation καθορίζεται η λεπτομέρεια της ανάλυσης που κυμαίνεται από 50% ως 400%. Ουσιαστικά καθορίζεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων, επομένως όταν υπάρχουν συγκεκριμένες μορφολογικές λεπτομέρειες είναι αναγκαία μία ανάλυση μεγάλης λεπτομέρειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία όλα τα μοντέλα έχουν ελεγχθεί σε 400%.

Στην ταμπέλα wind tunnel καθορίζονται οι διαστάσεις του τούνελ. Συγκεκριμένες προδιαγραφές για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων πρέπει να τηρούνται. Στο site της Autodesk αναλύονται διεξοδικά. Εδώ

έχει επιλεγεί επιπλέον ύψος 2.5 φορές το ύψος του αντικειμένου, και βάθος παρόμοιο.

Στην ταμπέλα orientation τοποθετείται και περιστρέφεται το μοντέλο, ενώ στην δίπλα ταμπέλα επιλέγεται αν η ανάλυση θα γίνει σε 2 ή 3 διαστάσεις. Συνίσταται να γίνεται σε 3 λόγω ορθότητας των οριακών συνθηκών και με σεβασμό στην λεπτομέρεια.

Στην ταμπέλα Velocity καθορίζεται η ταχύτητα του ανέμου, ενώ η επιλογή Drag Plot εμφανίζει τον πίνακα της σύγκλισης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αριθμητική σύγκλιση στον συντελεστή  $C_d$ .

Οι υπόλοιπες επιλογές είναι επιλογές εξόδου και εμφάνισης των αποτελεσμάτων. Υπάρχει πληθώρα επιλογών για την βέλτιστη παρουσίαση του επιλεγμένου κάθε φορά χαρακτηριστικού.