



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΩΝ
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Περουλάκης Μιχάλης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Περίληψη

Η επίδραση της ροής του ανέμου σε κτηριακές δομές αποτελεί ουσιαστικό θέμα μελέτης του σύγχρονου μηχανικού. Ιδιαίτερα η κατανομή των πιέσεων στις σύγχρονες ολοένα και αναπτυσσόμενες κατά μέγεθος δομικές κατασκευές, είναι κρίσιμη παράμετρος για τη σωστή κατασκευή και αναδόμηση των μονάδων αυτών. Επιτυγχάνεται η αύξηση της ασφάλειας και μείωση των ατυχημάτων λόγω αστοχίας των υλικών μέσω της φόρτισης τους υπό την επίδραση του ανέμου. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά η επίδραση των ανεμοφορτίων σε πρότυπο κτήριο και συγκεκριμένα στον πύργο του Πειραιά, ο οποίος αποτελεί ένα από τα ψηλότερα σύγχρονα κτήρια στην περιοχή της Αττικής. Μέσω ανεμολογικών δεδομένων, επιλέχθηκαν 8 κατευθύνσεις του ανέμου άξιες μελέτης, συγκεκριμένα οι 4 κύριες Βόρεια, Νότια, Ανατολικά και Δυτικά, όπως επίσης και οι Βορειο-βορειοανατολική, Βορειο-βορειοδυτική, Νότιο-νοτιοανατολική και Νοτιο-νοτιοδυτική. Η πειραματική μελέτη αφορά την εύρεση της κατανομής των συντελεστών πίεσης καθ' όλη την επιφάνεια του κτηρίου και διεξάγεται στην αεροδυναμική σήραγγα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF FLUIDS

INNOVATIVE ENVIROMENTAL TECHNOLOGIES LABORATORY

Experimental Simulation of a Model Building Exposed to an Atmospheric Boundary Layer

DIPLOMA THESIS

Peroulakis Michalis

Supervisor: Demetri Bouris, Associate Proffesor, NTUA

Athens, July 2021

Abstract

The effect of wind flow on building structures is an essential topic of study for modern engineers. In particular, the distribution of pressures in modern ever growing in size structural structures is a critical parameter for the proper construction and reconstruction of these units. Increased safety and reduced accidents due to failure of materials through their loading under the influence of wind are achieved. In this paper, the effect of wind loads on a model building is experimentally investigated, namely the tower of Piraeus, which is one of the tallest modern buildings in the Attica region. Through wind data, 8 wind directions worthy of study were selected, namely the 4 main North, South, East and West wind directions, as well as North-Northeast, North-Northwest, South-Southeast and South-Southwest. The experimental study involves finding the distribution of pressure coefficients across the entire surface of the building and is carried out in the aerodynamic tunnel of the National Technical University of Athens.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποια άτομα τα οποία στάθηκαν δίπλα μου κατά τη φοιτητική μου πορεία και κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Δημήτριο Μπούρη για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου για την διεκπεραίωση του έργου που είχε αναλάβει, όπως επίσης και την αμέριστη βοήθεια, υποστήριξη και υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Πάλλα Νικόλαο που δίχως τη συμμετοχή του η ολοκλήρωση του πειράματος θα ήταν ανέφικτη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμπαράσταση που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Περουλάκης Μιχάλης

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	12
1.1	Μελέτη φορτίων ανέμου.....	12
1.2	Σκοπός της εργασίας.....	13
1.3	Δομή της εργασίας.....	14
2.	Αεροδυναμική σήραγγα	16
2.1	Γενικά στοιχεία αεροδυναμικής σήραγγας.....	16
2.2	Είδη αεροδυναμικών σήραγγων.	20
2.2.1	Ανοιχτού τύπου: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.	20
2.2.2	Κλειστού τύπου: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.	22
2.2.3	Αεροναυπηγικές αεροδυναμικές σήραγγες.....	23
2.2.3.1	Αεροδυναμικές σήραγγες υψηλού αριθμού Reynolds.	23
2.2.3.2	Αεροδυναμικές σήραγγες V/STOL.....	24
2.2.3.3	Σήραγγες περιστροφής και σήραγγες καθέτου ανέμου.	24
2.2.4	Σήραγγες καπνού.....	25
2.2.5	Αεροσήραγγες αυτοκινήτων.	25
2.3	Εξαρτήματα αεροδυναμικής σήραγγας	25
2.3.1	Τμήμα δοκιμών.....	25
2.3.2	Ακροφύσιο.	26
2.3.3	Θάλαμος καθίζησης.....	28
2.3.4	Διαχύτης.	29
2.3.5	Γωνίες.....	30
2.3.6	Σταθμός παραγωγής ενέργειας.....	32
2.4	Τεχνικές μέτρησης φορτίων ανέμου σε κτήρια μέσω αεροσήραγγας.....	34
2.4.1	Τεχνική μέσου όρου πίεσης.....	34
2.4.1.1	Πνευματικός μέσος όρος πίεσης.....	34
2.4.1.2	Πορώδεις κοιλότητες πολυαιθυλενίου.	35
2.4.1.3	ON-LINE Averaging.....	35
2.4.1.4	Μέσος όρος πίεσης τροπικών φορτίων.....	36
2.4.1.5	Ολοκλήρωση της πίεσης	36
2.4.2	Τεχνική άμεσης μέτρησης φορτίου.	37
2.4.2.1	Ισορροπία δύναμης υψηλής συχνότητας	37
2.4.2.2	Μετατροπείς δυνάμεων σε υποδομές κτηρίου.....	37
2.4.3	Άλλες τεχνικές.....	37

2.4.3.1	Ισορροπία δύναμης πολλαπλών επιπέδων.....	37
2.4.3.2	Εξαναγκασμένη ταλάντωση.....	38
3.	Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.....	39
3.1	Ανάπτυξη και δομή ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.....	39
3.2	Ανάπτυξη και δομή ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.....	44
3.2.1	Μέση ταχύτητα.....	44
3.2.2	Ένταση τύρβης.....	46
3.2.3	Ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης.....	47
4.	Πειραματική διάταξη και τεχνικές μετρήσεων.....	49
4.1	Η αεροδυναμική σήραγγα.....	49
4.2	Προσομοίωση ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στην αεροσήραγγα.....	50
4.2.1	Στοιχεία τραχύτητας.....	50
4.2.2	Οβελίσκοι.....	51
4.2.3	Διάταξη προσομοίωσης ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.....	53
4.3	Μέτρηση χαρακτηριστικών οριακού στρώματος στην αεροσήραγγα.....	53
4.3.1	Θερμό νήμα.....	54
4.3.1.1	Αρχή λειτουργίας.....	54
4.3.1.2	Διάταξη θερμού νήματος στο εργαστήριο.....	54
4.3.2	Βαθμονόμηση διάταξης θερμού νήματος.....	55
4.3.3	Αποτέλεσμα βαθμονόμησης.....	56
4.3.3	Αποτέλεσμα βαθμονόμησης.....	56
4.3.4	Χαρακτηριστικά οριακού στρώματος.....	57
4.3.4.1	Κατανομή μέσης ταχύτητας.....	58
4.3.4.2	Κατανομή έντασης της τύρβης.....	60
4.3.4.3	Κατανομή ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους τύρβης.....	61
4.4	Βαθμονόμηση πειραματικής διάταξης μέτρησης πίεσης.....	62
4.4.1	Τεχνική βαθμονόμησης σωληνώσεων μέτρησης πίεσης.....	63
4.4.2	Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης σωληνώσεων μέτρησης πίεσης.....	65
4.4.3	Μετρήσεις και αποτέλεσμα βαθμονόμησης.....	68
4.5	Μέτρηση πιέσεων στην επιφάνεια του πρότυπου κτηρίου.....	69
4.5.1	Το μοντέλο του Πύργου το Πειραιά.....	68
4.5.2	Διάταξη διεξαγωγής των μετρήσεων.....	82
4.5.3	Διάφορα σενάρια μελέτης.....	86
5.	Αποτελέσματα και συγκρίσεις με Ευρωκώδικα.....	88
5.1	Ανεμολογικά δεδομένα.....	88

5.2	Αποτελέσματα στις μετρηθείσες κατευθύνσεις.....	91
5.2.1	NORTH.....	93
5.2.2	NNE.....	96
5.2.3	EAST.....	99
5.2.4	SSE.....	102
5.2.5	SOUTH.....	105
5.2.6	SSW.....	107
5.2.7	WEST.....	111
5.2.8	NNW.....	113
5.3	Ευρωκώδικας	116
5.3.1	Επιλογή τιμών για ανάλυση με Ευρωκώδικα	116
5.3.2	Αποτελέσματα Ευρωκώδικα στις 0°.	122
5.3.3	Αποτελέσματα Ευρωκώδικα στις 90°.	125
6.	Συμπεράσματα και σχόλια.....	129
7.	Βιβλιογραφία	132

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Μελέτη φορτίων ανέμου

Στη σύγχρονη εποχή, μεγάλη πρόκληση για αρχιτέκτονες και δομικούς μηχανικούς, αποτελεί ο σχεδιασμός ψηλών κτηρίων και ουρανοξυστών. Σε ένα διαφανόμενο, ψηλό κτήριο, κύριο μέλημα των μηχανικών σχεδιασμού αποτελεί το κύρος και η αίγλη η οποία ακτινοβολεί, όπως επίσης και η μοναδικότητα και η έλξη από το κοινό. Παρά όλα αυτά, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου κτηρίου, συντίθεται από ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων και μεταβλητών. Μια εκ των σημαντικότερων παραμέτρων, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της προκειμένης διπλωματικής εργασίας, είναι τα φορτία ανέμου υποκατηγορία της γενικότερης επιστήμης της μηχανικής του ανέμου.

Η μηχανική του ανέμου περιγράφεται καλύτερα ως η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ανέμου του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, του ανθρώπου και των έργων του στην επιφάνεια της γης. Για την κατανόηση και ανάλυση της είναι απαραίτητη μια σύνθεση γνώσεων από τη ρευστομηχανική, τη μετεωρολογία, τη δομική μηχανική, τη φυσιολογία και άλλα. Όσον αφορά τη δομική μηχανική, η αξιολόγηση των φορτίων πίεσης που προκαλούνται από τον άνεμο στις επιφάνειες των κτιρίων, και η συνακόλουθη κατά μήκος, πλάτος και στρεπτική απόκριση του ανέμου, είναι σαφώς οι σημαντικότερες εφαρμογές. Η καλή γνώση της ρευστομηχανικής και της δομικής μηχανικής είναι το θεμελιώδη στοιχεία, απαραίτητα για την κατανόηση των λεπτομερειών της αλληλεπίδρασης μεταξύ ροής του ανέμου και των κατασκευών ή των κτιρίων.

Λόγω της μεγάλης σημασίας της συγκεκριμένης παραμέτρου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τη μελέτη της. Τα φορτία ανέμου, συγκεκριμένα σε κτήρια, υπολογίζονται κυρίως από έτοιμα εγχειρίδια, τα οποία ονομάζονται Ευρωκώδικες. Τα κύρια χαρακτηριστικά των εγχειριδίων αυτών, είναι η ευκολία στη χρήση, το ελάχιστο κόστος μελέτης και προφανώς η ευρεία χρήση τους, η οποία όπως έχει αποδειχθεί δεν είναι αιτία πρόκλησης καταστροφών και ατυχημάτων. Από την άλλη πλευρά όμως, οι Ευρωκώδικες αναλύουν το πρόβλημα με πολύ περιορισμένο τρόπο. Όπως θα αναπτυχθεί και σε μεταγενέστερο κομμάτι της έκθεσης αυτής, υπάρχουν περιορισμοί σε διάφορους κλάδους, όπως είναι το σχήμα των κτηρίων, οι κατευθύνσεις του ανέμου, οι διάφορες πιο εξεζητημένες γεωμετρίες (σκίαστρα, εξωτερικοί ανελκυστήρες, αλλαγή στη γεωμετρία καθ' ύψος ή πλάτος κλπ.). Εκτός της χρήσης του Ευρωκώδικα, αναλύσεις φορτίων του ανέμου μπορούν να γίνουν πολύ εύστοχα μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης. Μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς ιδιαίτερες, έως και αμελητέες ορισμένες φορές, αποκλίσεις από τα πραγματικά. Αποτελεί έναν μειωμένου

κόστους τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Είναι όμως μέγιστης σημασίας η εισαγωγή στο πρόβλημα σωστών οριακών συνθηκών όπως επίσης και η ανάπτυξη ορθού υπολογιστικού πλέγματος. Τα τελευταία συγκροτούν και τα προβλήματα της συγκεκριμένης μεθόδου. Οι οριακές συνθήκες, ως βασικές παράμετροι των υπολογιστικών προβλημάτων χρειάζονται εκτεταμένη μελέτη πριν χρησιμοποιηθούν. Το υπολογιστικό πλέγμα από την άλλη πλευρά παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες στη δόμηση εφόσον υπάρχουν πολύπλοκες γεωμετρίες όπως σκίαστρα. Έτσι αυξάνεται η πιθανότητα λανθασμένου υπολογιστικού πλέγματος και κατά επέκταση λανθασμένων αποτελεσμάτων. Τέλος η μέθοδος ανάλυσης σε αεροδυναμική σήραγγα, η οποία αποτελεί και το κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας. Οι δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν τα ακριβέστερα αποτελέσματα εκ των τριών μεθόδων καθώς γίνεται χρήση πιστού αντιγράφου του μελετούμενου μοντέλου υπό κλίμακα. Επομένως λύνονται τα προβλήματα των πολύπλοκων γεωμετριών. Η μορφή του ανέμου και του οριακού στρώματος έχουν τη δυνατότητα προσέγγισης των πραγματικών, καθώς εκτός από τον ενδεικνύμενο τρόπο παραγωγής αστικού οριακού στρώματος σε αεροδυναμική σήραγγα, τοποθετούνται υπό κλίμακα γύρω από το μελετούμενο κτήριο, αντίγραφο της δομής των κτηρίων που το περιβάλλουν και στην πραγματικότητα . Προσφέρεται επίσης μέσω αυτής της μεθόδου η δυνατότητα για περεταίρω μελέτες που αφορούν το κτήριο αλλά και άλλους παράγοντες που το επηρεάζουν, ή επηρεάζονται από αυτό, όπως είναι δοκιμές αεροελαστικότητας, κατανομής ρυπαντών, τοπογραφικές μελέτες και μελέτες εδάφους, αξιολογήσεις της κατάστασης των πεζών γύρω από το κτήριο λόγω της επίδρασης του ανέμου , και άλλα. Η προσέγγιση του προβλήματος με χρήση αεροδυναμικής σήραγγας αποτελεί από τις τρεις μεθόδους την πλέον δαπανηρή, όμως προσφέρει μεγάλο εύρος δυνατοτήτων μελέτης, ευκολία στη διεξαγωγή και ακριβή αποτελέσματα.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Παρά την ευρεία πλέον αποδοχή της μεθόδου ανάλυσης σε αεροδυναμική σήραγγα, η μελέτη φορτίων ανέμου σε κτήρια γίνεται κατά βάση, όπως προαναφέρθηκε, με χρήση συγκεκριμένων εγχειριδίων. Είναι επομένως σημαντικό να αναδειχθούν τα οφέλη της μεθόδου αεροδυναμικής σήραγγας, όπως επίσης και οι περιπτώσεις στις οποίες είναι αναγκαία η χρήση της, λόγω των προβλημάτων των οποίων είναι σε θέση να επιλύσει σε αντίθεση με άλλες μεθόδους. Οι λόγοι διεξαγωγής τέτοιου είδους πειραμάτων, είναι κυρίως λόγοι αξιοπιστίας της επίδοσης των δομικών έργων, όμως μείζονος σημασίας είναι και οι οικονομικοί λόγοι που διέπουν μια επένδυση. Συγκριτικά με τα υπάρχοντα εγχειρίδια, η μέθοδος της αεροδυναμικής σήραγγας δίνει την δυνατότητα εύρεσης φορτίων ανέμου με μεγαλύτερη επίδραση στο κτήριο, κατά επέκταση πρόκληση μεγαλύτερου πλήγματος, με επιπλέον θετική παράμετρο την ακριβή τοποθεσία των πληγμάτων αυτών. Όσον αφορά την επίδοση των δομικών έργων, η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τους κατασκευαστές, καθώς δίνεται η δυνατότητα στοχευμένης ενίσχυσης του κτηρίου, με σκοπό την αποφυγή εμφάνισης προβλημάτων ή και ατυχημάτων, τα οποία ενδέχεται να αποβούν μοιραία ή κοστοβόρα. Από οικονομικής άποψης, τα αποτελέσματα που αφορούν χαμηλά φορτία ανέμου, δίνουν τη δυνατότητα εξοικονόμησης υλικών και εργατοωρών. Το τελευταίο προκύπτει καθώς οι

μελετούμενες επιφάνειες οι οποίες εμφανίζουν χαμηλά φορτία, δεν χρήζουν ενίσχυσης και περεταίρω ενασχόλησης. Συγκριτικά με εγχειρίδια όπως ο Ευρωκώδικας, ο οποίος δίνει αποτελέσματα της τάξης των έως τριών διαφορετικών τιμών πίεσης καθ' ύψος ή κατά πλάτος των όψεων του κτηρίου, γίνεται αντιληπτό το υπάρχον χάσμα μεταξύ των δύο μεθόδων ανάλυσης.

Η διπλωματική εργασία, διεξήχθη στα πλαίσια έργου του Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Δημήτριου Μπούρη. Το πρότυπο κτήριο της μελέτης είναι ο Πύργος του Πειραιά, και η χρησιμότητα των αποτελεσμάτων της μελέτης έγκειται στη λήψη αποφάσεων ως προς την εξωτερική αναδόμηση την οποία ο Πύργος θα υποστεί.

1.3 Δομή της εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας συντελείται από 6 κεφάλαια τα οποία διαρθρώνονται ως εξής:

- Κεφάλαιο 1

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας. Γίνεται αναφορά στις κύριες μεθόδους μέτρησης φορτίων ανέμου και κατατίθενται με σκοπό την αξιολόγηση, θετικές και αρνητικές πτυχές τους. Αναφέρεται επίσης ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας.

- Κεφάλαιο 2

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική παρουσίαση στοιχείων των αεροδυναμικών σηράγγων. Έπειτα αναφέρονται οι τρόποι ταξινόμησης τους ανάλογα με διάφορες παραμέτρους και αναλύονται. Τέλος γίνεται μια εκτεταμένη ανάλυση των τεχνικών μέτρησης φορτίων ανέμου σε κτήρια μέσω αεροδυναμικής σήραγγας

- Κεφάλαιο 3

Το τρίτο κεφάλαιο της έκθεσης αφορά το οριακό στρώμα. Αρχικά γίνεται αναφορά στον τρόπο ανάπτυξης και την δομή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα σημαντικά χαρακτηριστικά του.

- Κεφάλαιο 4

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία η οποία έλαβε χώρα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Σε αρχικό στάδιο παρουσιάζεται η αεροδυναμική σήραγγα στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Έπειτα γίνεται αναφορά στις διατάξεις για την προσομοίωση του οριακού στρώματος και στη μεθοδολογία με την οποία μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά του. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η μεθοδολογία βαθμονόμησης της

πειραματικής διάταξης και τέλος παρουσιάζεται το μοντέλο του Πύργου, η συνολική πειραματική διάταξη και αναφέρονται τα σενάρια μελέτης που διεξήχθησαν.

- Κεφάλαιο 5

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το κεφάλαιο στο οποίο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Αρχικά γίνεται αναφορά στα ανεμολογικά δεδομένα, έπειτα παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων και ισοϋψών τα αποτελέσματα ανάλογα τη μετρηθείσα κατεύθυνση του ανέμου. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά από εφαρμογή του Ευρωκώδικα

- Κεφάλαιο 6

Αυτό είναι το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία συνοπτική ανακεφαλαίωση της εργασίας και στη συνέχεια αξιολογούνται τα αποτελέσματά των συγκρίσεων. Τέλος, ακολουθούν προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση ή και βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο 2

Αεροδυναμική σήραγγα

2.1 Γενικά στοιχεία αεροδυναμικής σήραγγας

Αεροδυναμική σήραγγα ονομάζεται το εργαλείο που χρησιμοποιείται στην αεροδυναμική έρευνα και σκοπό έχει τη μελέτη των επιδράσεων του αέρα γύρω από στερεά αντικείμενα όπως επίσης και των επιπτώσεων του αέρα στα ίδια τα στερεά αντικείμενα.

Ο τρόπος λειτουργίας μια αεροδυναμικής σήραγγας είναι αρκετά απλός και κατανοητός. Μέσω κάποιου μηχανισμού, δημιουργείται στον αγωγό της αεροδυναμικής σήραγγας ρεύμα αέρα. Κατά βάση το ρεύμα αέρα δημιουργείται στην αεροδυναμική σήραγγα μέσω ανεμιστήρων κινούμενων από ηλεκτροκινητήρες. Παρά όλα αυτά, αντλίες έγχυσης, κινητήρες αεροσκαφών ή άλλοι κινητήρες καυσίμων, υδροστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι ανεμιστήρες αυτοί είτε εμφυσούν, είτε αναρροφούν αέρα, δημιουργώντας ένα εξαιρετικά τυρβώδες πεδίο ροής. Για την εξομάλυνση του πεδίου ροής και ακύρωση των στροβιλισμών που προκύπτουν από την κίνηση των ανεμιστήρων, τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από αυτούς πτερύγια, είτε κατακόρυφα, είτε οριζόντια. Ο σχεδιασμός του εσωτερικού της αεροδυναμικής σήραγγας οφείλει να πραγματοποιείται με κύριο γνώμονα την μειωμένη τύρβη. Αυτό σημαίνει ότι κυριαρχούν λείες επιφάνειες και οποιοδήποτε είδους όργανο, βοηθητικό ή μετρητικό, βρίσκεται είτε εκτός της αεροδυναμικής σήραγγας είτε ενσωματωμένο στα τοιχώματα της. Επίσης λόγω επιθυμίας μειωμένων επιπέδων τύρβης, η εγκάρσια διατομή της αεροδυναμικής σήραγγας, επιλέγεται συνήθως να είναι κυκλικού σχήματος, αποφεύγοντας έτσι την επιλογή του ορθογωνίου το οποίο προκαλεί συστολή της ροής στις γωνίες λόγω του ιξώδους, και προφανώς αύξηση της τύρβης.

Εκτός του όρου της τύρβης, σημαντικός στον σχεδιασμό της σήραγγας είναι και ο παράγοντας της αστάθειας. Με τον όρο αστάθεια στην ορολογία της αεροδυναμικής σήραγγας εννοείται η διακύμανση της ταχύτητας σε τόσο χαμηλά επίπεδα συχνοτήτων, έτσι ώστε να γίνεται αισθητή στα διάφορα όργανα μέτρησης (μανόμετρα, ζυγαριές). Αστάθεια της ροής σε σήραγγα, είναι δυνατό να προκληθεί από διαχωρισμό της ροής, για παράδειγμα σε διαχύτη με μεγάλη γωνία διαστολής ή μικρή γωνία συστολής. Άλλος παράγοντας πρόκλησης αστάθειας μπορεί να θεωρηθεί ο διακοπτόμενος διαχωρισμός της ροής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονων στροβιλοδών δινών. Οι δίνες αυτές ενδέχεται να δημιουργήσουν διακυμάνσεις της ταχύτητας πολύ μειωμένων συχνοτήτων, συγκριτικά με τις συχνότητες της τύρβης, οι οποίες αποτελούν το μεγαλύτερο κομμάτι της τυρβώδους ενέργειας. Ο ήχος επίσης αποτελεί έναν

τρόπο παραγωγής διακυμάνσεων. Ήχος στα πλαίσια της αεροδυναμικής σήραγγας μπορεί να προκληθεί από τις εξής παραμέτρους:

- Μηχανική δόνηση, στη συχνότητα του άξονα του ανεμιστήρα.
- Διέγερση των κινούμενων πτερυγίων του ανεμιστήρα λόγω ανομοιόμορφης και τυρβώδους ροής.
- Διέγερση των ακίνητων πτερυγίων, υπεύθυνων για την ομαλοποίηση της ροής, λόγω ανομοιόμορφης και τυρβώδους ροής.
- Διέγερση οποιουδήποτε άλλου στερεού ορίου.

Τα εφαρμοζόμενα υλικά για την κατασκευή επομένως, προτείνεται να έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης ηχητικών κυμάτων, καθώς υλικά όπως σκυρόδεμα ή μέταλλο έχουν μεγάλο χρόνο αντήχησης με αποτέλεσμα ο ήχος, προκαλούμενος από κάποια από τις προαναφερθείσες πηγές, να έχει εξαιρετικά υψηλή ένταση.

Κατά τη λειτουργία της αεροδυναμικής σήραγγας το μελετώμενο αντικείμενο, το οποίο ονομάζεται μοντέλο αεροδυναμικής σήραγγας, βρίσκεται τοποθετημένο στο τμήμα δοκιμών. Το μοντέλο είναι τοποθετημένο στη μέση του τμήματος δοκιμών και ανάλογα την εκάστοτε μελέτη βρίσκεται είτε τοποθετημένο στο δάπεδο, με σκοπό την επίδραση του οριακού στρώματος στο πείραμα, είτε υπερυψωμένο στο κέντρο της διατομής του τμήματος δοκιμών, για την αντίθετη περίπτωση. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι η γεωμετρική ομοιότητα του με το πρωτότυπο αντικείμενο. Με τον όρο γεωμετρική ομοιότητα εννοείται ότι οι αναλογίες αντίστοιχων διαστάσεων μεταξύ μοντέλου και πρωτότυπου είναι ίδιες. Εκτός της γεωμετρικής ομοιότητας, ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος ομοιότητας αποτελεί η δυναμική ομοιότητα. Η αρχή της δυναμικής ομοιότητας βασίζεται στους αριθμούς:

- Reynolds: αδιάστατος αριθμός που δίνει ένα μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων, με τις ιξώδεις δυνάμεις. Ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (2.1.1)$$

Όπου:

- u (m/s), είναι η μέση ταχύτητα του αντικειμένου σε σχέση με το ρευστό
- L (m), είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος του αντικειμένου
- μ (Pa·s ή N·s/m ή kg/(m·s)), είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
- ν (m²/s), είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού
- ρ (kg/m³), είναι η πυκνότητα του ρευστού

- Mach: αδιάστατος αριθμός που δίνει ένα μέτρο της αναλογίας της ταχύτητας ενός αντικειμένου σχετικά με την τοπική ταχύτητα μετάδοσης του ήχου. Ορίζεται ως:

$$M = \frac{u}{c} \quad (2.1.2)$$

Όπου:

- **u** (m/s), είναι η τοπική ταχύτητα ροής του αντικειμένου σε σχέση με κάποιο όριο
 - **c** (m/s), είναι η ταχύτητα του ήχου στο μέσο, η οποία στον αέρα μεταβάλλεται με την τετραγωνική ρίζα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας.
- Froude : αδιάστατος αριθμός που ορίζεται ως ο λόγος της αδράνειας της ροής, προς το εξωτερικό πεδίο (το οποίο στις περισσότερες εφαρμογές αποτελεί το βαρυτικό πεδίο). Ορίζεται ως:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}} \quad (2.1.3)$$

Όπου:

- **u** (m/s), είναι η τοπική ταχύτητα ροής
- **L** (m), είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος
- **g** (m/s²), είναι το τοπικό εξωτερικό πεδίο

Σύμφωνα με τους παραπάνω αριθμούς επομένως, ορίζεται η αρχή της δυναμικής ομοιότητας η οποία παραθέτει ότι ένα μοντέλο κλίμακας υπό τον ίδιο αριθμό Reynolds και αριθμό Mach θα έχει δυνάμεις και ροπές που μπορούν να κλιμακωθούν άμεσα. Με αυτόν τον τρόπο τα μοτίβα ροής στο σώμα πλήρους κλίμακας και στο μοντέλο αεροδυναμικής σήραγγας θα είναι ακριβώς παρόμοια. Δεν είναι αναγκαίο σε κάθε είδος πειράματος να προσομοιώνονται όλοι οι προαναφερθέντες αριθμοί. Σε πειράματα όπου επικρατούν χαμηλές ταχύτητες αέρα, γίνεται χρήση του αριθμού Reynolds για απεικόνιση της πραγματικής κατάστασης. Αντίθετα σε πειράματα υψηλών ταχυτήτων αέρα είναι σημαντική η σύγκριση μέσω του αριθμού Mach. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαίο να γίνει σύγκριση και με τα δύο αδιάστατα μεγέθη, για ορθότερη αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών.

Ανεξαρτήτως της εφαρμογής για την οποία λαμβάνουν χώρα τα πειράματα, με χρήση αεροδυναμικής σήραγγας διεξάγονται μετρήσεις πιέσεων και δυνάμεων στο μοντέλο αεροδυναμικής σήραγγας.

Για μετρήσεις πίεσης τα αντίστοιχα μοντέλα εξοπλίζονται με οπές λήψης πίεσης (pressure taps). Με τον όρο τοπικά φορτία ανέμου δηλώνονται τα φορτία ανέμου τα οποία δρουν σε μικρές περιοχές, ενώ τα φορτία πίνακα αναφέρονται σε φορτία δρώντα σε μεγαλύτερες επιφάνειες. Τα δύο αυτά είδη διαχωρίζονται με βάση τα αποτελέσματα της μέσης επιφάνειας της πίεσης του ανέμου. Σε μετρήσεις πίεσης είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της δυναμικής πίεσης αναφοράς, κυρίως για λόγους σύγκρισης. Ταυτόχρονα σε πειράματα στα οποία δεν είναι αναγκαία η μελέτη του φαινομένου της αεροελαστικότητας, δεν είναι αναγκαία η μέτρηση πιέσεων με διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, με μόνη προϋπόθεση την χρήση οργάνων μέτρησης επαρκούς απόκρισης για την καταγραφή των μεγίστων πιέσεων.

Όσον αφορά τις μετρήσεις δυνάμεων, για δυναμικά ενεργές δομές, η τεχνική μέτρησης εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την ύπαρξη ή μη αεροελαστικής απόκρισης. Κατά βάση οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα με χρήση ζυγού. Η τεχνική ισοζυγίου δυνάμεων υψηλής συχνότητας αποτελεί την κύρια μέθοδο μέτρησης και χρησιμοποιείται για εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν συνολικά φορτία που προκαλούνται από τον άνεμο και αποκρίσεις των κατασκευών. Το μοντέλο αεροδυναμικής σήραγγας αποτελείται μονάχα από την εξωτερική γεωμετρία της κατασκευής, το οποίο είναι συνδεδεμένο άκαμπτα με τον ζυγό. Ο τελευταίος βαθμονομείται σε προγενέστερο χρόνο της πειραματικής διαδικασίας και η βαθμονόμηση περιλαμβάνει μετρήσεις θεμελιωδών τιμών συχνότητας ταλάντωσης και στρέψης των δονήσεων του συστήματος μοντέλου-ζυγού. Βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι η παραδοχή άκαμπτου συστήματος, με αποτέλεσμα τα εξαγόμενα αποτελέσματα να ανάγονται στη συμπεριφορά του κτηρίου και όχι του ζυγού. Σε αντίθετη περίπτωση, ανάλογες παραδοχές οφείλουν να αναγράφονται στη μελέτη.

2.2 Είδη αεροδυναμικών σηράγγων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αεροδυναμικής σήραγγας και δυο βασικές διαμορφώσεις τμημάτων δοκιμών. Ωστόσο υπάρχουν σχεδόν ατελείωτες παραλλαγές ειδικών χαρακτηριστικών των διαφόρων σηράγγων.

Οι δύο βασικοί τύποι αεροσήραγγας είναι οι εξής:

- Ανοιχτού κυκλώματος
- Κλειστού κυκλώματος

Επιπλέον οι δύο βασικές διαμορφώσεις του τμήματος δοκιμών είναι:

- Ανοιχτό τμήμα δοκιμών
- Κλειστό τμήμα δοκιμών

Πλέον βέβαια τα δύο είδη αυτά του τμήματος δοκιμής, θεωρούνται ακραίες διαμορφώσεις στο φάσμα των διαμορφώσεων, καθώς ευρεία έχει γίνει η χρήση τμημάτων δοκιμής με σχισμές στους ανάλογους τοίχους-όρια.

Σε μια κλειστού κυκλώματος αεροδυναμική σήραγγα, ο παραγόμενος αέρας ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στο κύκλωμα της με καθόλου ή και λίγη επαφή με την κατάσταση της ατμόσφαιρας στο εξωτερικό της.

Αντίθετα στην περίπτωση ανοιχτού τύπου αεροδυναμικής σήραγγας, ο αέρας που ρέει ακολουθεί μια ευθύγραμμη πορεία από την είσοδο, στο τμήμα συστολής, το τμήμα δοκιμών, έναν διαχύτη και το τμήμα εξαγωγής του αέρα, με την προαναφερθείσα σειρά.

Η επιλογή του είδους της αεροσήραγγας ανάγεται στην εκάστοτε εφαρμογή και το κόστος, καθώς και τα δύο είδη παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

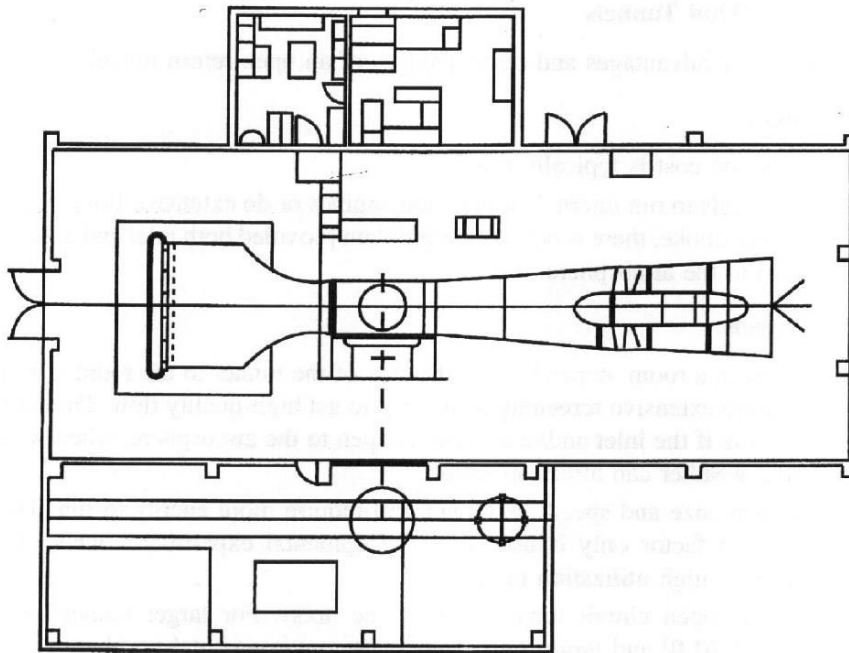
2.2.1 Ανοιχτού τύπου: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα

- Η κατασκευή απαιτεί μικρότερο κεφάλαιο
 - Επιτρέπει την εύκολη διεξαγωγή πειραμάτων αναφορικά με μηχανές εσωτερικής καύσης ή οπτικοποίηση της ροής, καθώς η είσοδος αλλά και η έξοδος του αέρα είναι ανοιχτές προς το περιβάλλον.
-

Μειονεκτήματα

- Λόγω ακριβώς της δομής της, απαιτεί εκτεταμένο έλεγχο της ροής εισόδου, για την εξακρίβωση ύπαρξης υψηλής ποιότητας ροής εισόδου. Αντίστοιχα στην ροή εξόδου, σε περίπτωση που αυτή είναι ανοιχτή προς το περιβάλλον, υψηλής έντασης άνεμοι περιβάλλοντος αλλά και χαμηλές θερμοκρασίες, ενδέχεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα.
- Συγκριτικά με την κλειστού τύπου αεροδυναμική σήραγγα, σε περιπτώσεις αναπτυξιακών πειραμάτων όπου η χρήση της σήραγγας είναι εκτεταμένη, απαιτεί μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για τη λειτουργία της, αυξάνοντας έτσι τα κόστη λειτουργίας.
- Λόγω της άμεσης επαφής του αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον, σε μεγαλύτερης κλίμακας αεροδυναμικές σήραγγες (τμήμα δοκιμών 7m^2 ή και περισσότερο) ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα λόγω παραγωγής ήχου αυξημένης έντασης. Η αυξημένη ηχητική ένταση είναι πηγή περιβαλλοντικών προβλημάτων, ίσως μειώσει τις διαθέσιμες ώρες λειτουργίας ή σε αντίθετη περίπτωση αυξήσει το κόστος κατασκευής λόγω ανάγκης ηχομονωτικών εργασιών.



Σχήμα 2.1: Κάτοψη αεροσήραγγας ανοιχτού κυκλώματος

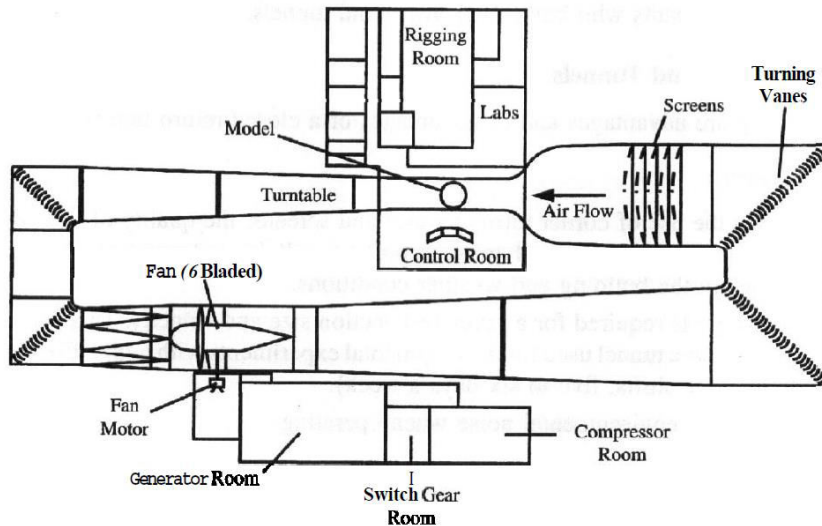
2.2.2 Κλειστού τύπου: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα

- Λόγω χρήσης πτερυγίων στροφής της ερχόμενης ροής και τμημάτων σιτών, η ποιότητα της ροής είναι πολύ περισσότερο ελεγχόμενη και κυρίως ανεξάρτητη ατμοσφαιρικών συνθηκών του περιβάλλοντος του κτηρίου στο οποίο είναι εγκατεστημένη η αεροσήραγγα.
- Τα λειτουργικά κόστη λόγω κατανάλωσης ενέργειας παραμένουν χαμηλά σε περιπτώσεις αναπτυξιακών πειραμάτων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.
- Οι ηχητικές εντάσεις λόγω λειτουργίας, παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα και περιορίζονται στο περιβάλλον του κτηρίου.

Μειονεκτήματα

- Το κόστος κατασκευής της διάταξης είναι υψηλότερο, λόγω ύπαρξης αγωγών επιστροφής και πτερυγίων στροφής της ροής.
- Σε πειραματικές διατάξεις στις οποίες μελετώνται μηχανές εσωτερικής καύσης είτε οπτικοποιήσεις ροής, δημιουργούνται θέματα εκκαθάρισης της αεροσήραγγας
- Για σταθεροποίηση των συνθηκών του αέρα λειτουργίας, είναι αναγκαία η εγκατάσταση συστήματος ψύξης, λόγω της αύξησης θερμοκρασίας της εγκατάστασης οφειλόμενη στην ισχύ του ηλεκτροκινητήρα - οδηγού του ανεμιστήρα, η οποία μετατρέπεται συνεχώς σε θερμότητα.



Σχήμα 2.2: Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος

2.2.3 Αεροναυπηγικές αεροδυναμικές σήραγγες.

2.2.3.1 Αεροδυναμικές σήραγγες υψηλού αριθμού Reynolds.

Συχνό φαινόμενο σε δοκιμές αεροδυναμικής είναι η ανικανότητα επίτευξης αριθμών Reynolds πλήρους κλίμακας με χρήση μοντέλου πλήρους κλίμακας. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι η κατασκευή πειραματικών διατάξεων αεροσήραγγας πεπιεσμένου αέρα. Εύκολα μέσω της καταστατικής εξίσωσης τέλει αερίου και της έκφρασης του αριθμού Reynolds προκύπτει ότι οποιαδήποτε αύξηση της πίεσης προκαλεί αύξηση της πυκνότητας για δεδομένη θερμοκρασία και κατά συνέπεια αύξηση του αριθμού Reynolds.

Φυσικά το κόστος κατασκευής και λειτουργίας τέτοιου είδους αεροδυναμικών σηράγγων είναι αισθητά αυξημένο καθώς αυξάνονται τα κόστη των υλικών του κελύφους και προστίθεται στην εγκατάσταση ο συμπιεστής, ο οποίος αυξάνει και τα λειτουργικά κόστη. Λόγω αυξημένης πίεσης, η πρόσβαση στην αεροσήραγγα καθίσταται πολυπλοκότερη. Επομένως ο κατασκευαστής έρχεται στο εξής δίλημμα: αύξηση κόστους μέσω ανάπτυξης δομών για απομακρυσμένη πρόσβαση στο μελετούμενο μοντέλο και τα ενδεχόμενα μετρητικά στοιχεία ή αύξηση του χρόνου διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων λόγω ύπαρξης νεκρού χρόνου για την συμπίεση και αποσυμπίεση του τμήματος δοκιμών.

Δεύτερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η αλλαγή του εργαζόμενου μέσου. Η ιδέα πίσω από την αλλαγή του εργαζόμενου μέσου έγκειται στην μεταβολή του ιξώδους. Για παράδειγμα με αλλαγή του εργαζόμενου μέσου από ατμοσφαιρικό αέρα σε Freon 12, επέρχεται αύξηση του αριθμού Mach κατά 2.5 φορές και του αριθμού Reynolds κατά 3.6 φορές. Παρά την διατήρηση της πίεσης σε ατμοσφαιρικά επίπεδα, εμφανίζονται θέματα αύξησης κόστους ανάλογα με το ενδεχόμενο της αυξημένης πίεσης.

Τρίτη προσέγγιση του προβλήματος αναφέρεται η πολύ υψηλού κόστους κρυογονική σήραγγα. Ο τύπος σήραγγας αυτός λειτουργεί σε κρυογονικές συνθήκες και παράλληλα έχει τη δυνατότητα μεταβολής της δυναμικής πίεσης και του αριθμού Reynolds σε ένα μεγάλο εύρος. Ένα παράδειγμα τέτοιου είδους εγκατάστασης είναι η National Transonic Facility της NASA στο Langley. Εργαζόμενο μέσω σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί το αέριο άζωτο το οποίο επιδέχεται ψύξης μέσω έγχυσης υγρού αζώτου ανάντι του ανεμιστήρα. Η σήραγγα αυτή έχει επίσης δυνατότητα λειτουργίας σε σταθερή πίεση, με την επίτευξη μεταβολής του αριθμού Reynolds να γίνεται μέσω μεταβολής της θερμοκρασίας.

2.2.3.2 Αεροδυναμικές σήραγγες για δοκιμές κάθετης/βραχείας απογείωσης - προσγείωσης.

Οι αεροδυναμικές σήραγγες δοκιμών κάθετης/ βραχείας απογείωσης-προσγείωσης ή αλλιώς V/STOL είναι σήραγγες που απαιτούν μεγάλο τμήμα δοκιμών για δεδομένο μέγεθος μοντέλου, λόγω των μεγάλων γωνιών κατωρευμάτων που δημιουργούνται. Λειτουργούν σε εύρος ταχυτήτων μικρότερο της συμβατικής αεροσήραγγας, φτάνοντας μέγιστες τιμές ταχύτητας ανέμου 60-160 kph σε αντίθεση με τις συμβατικές που φτάνουν και τα 500 kph. Η μειωμένη ταχύτητα λειτουργίας συνεπάγεται με μειωμένη ισχύ ανεμιστήρα και κατά συνέπεια κινητήρα. Λόγω της πολύ περιορισμένης χρήσης τους οι αεροσήραγγες για δοκιμές V/STOL κατά βάση είναι δομές συνδυαζόμενες με δομές επίτευξης αυξημένων ταχυτήτων. Για παράδειγμα αεροσήραγγες με περισσότερα του ενός τμημάτων δοκιμών είτε εξοπλισμένες με ανεμιστήρα μεγάλου εύρους στροφών, για επίτευξη μικρότερων και μεγαλύτερων ταχυτήτων στο τμήμα δοκιμών.

2.2.3.3 Σήραγγες περιστροφής και σήραγγες κάθετου ανέμου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις αεροσκάφη μετά την απώλεια στήριξης τους από τον άνεμο (στολάρισμα), έχουν την τάση να μπαίνουν σε περιστροφή. Η ανάκαμψη από αυτή την περιστροφή, μελετάται σε σήραγγες περιστροφής. Οι σήραγγες αυτές είναι κατά βάση κατακόρυφης διεύθυνσης και ο άνεμος προσανατολίζεται από την βάση προς την κορυφή μέσω ενός ανεμιστήρα στην κορυφή της δομής. Υπάρχουν κλειστού τύπου σήραγγες περιστροφής, με δακτυλιοειδείς αγωγούς επιστροφής και πτερύγια στροφής, αλλά και ανοικτού τύπου, με απλή εκπομπή του ανέμου στο περιβάλλον. Το μοντέλο εισάγεται στην αεροσήραγγα σε στάση περιστροφής, διατηρώντας σταθερό ύψος μέσω της επίδρασης του ανέμου. Κατά τις δοκιμές η απόκριση του αεροσκάφους μαγνητοσκοπείται, για περεταίρω ανάλυση, ενώ ταυτόχρονα ζυγοί μέτρησης περιστροφικών δυνάμεων συλλέγουν δεδομένα.

2.2.4 Σήραγγες καπνού.

Η κύρια χρήση των σηράγγων καπνού είναι η οπτικοποίηση της ροής. Πρόκειται για σήραγγες ανοιχτού τύπου, καθώς οι μέθοδοι εξαγωγής αποτελεσμάτων είναι οπτικές, επομένως είναι αναγκαίος ο καθαρισμός της τοπικής ατμόσφαιρας. Οι ταχύτητες του ανέμου δεν ξεπερνούν τα 20 m/s. Ως πηγές καπνού χρησιμοποιούνται εξατμιζόμενα ελαφρά έλαια, όπως η κηροζίνη και προπυλενογλυκόλη.

2.2.5 Αεροσήραγγες αυτοκινήτων.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες αεροδυναμικών σηράγγων που συμμετέχουν σε αεροδυναμικά πειράματα που αφορούν αυτοκίνητα. Η κατηγορία της εξωτερικής αεροδυναμικής που αφορά μελέτη επιδόσεων, θόρυβο του ανέμου και οδηγική συμπεριφορά και η κατηγορία εσωτερικής ροής όπως ροή για ψύξη των φρένων, του κινητήρα και άλλων μερών του αυτοκινήτου, που συνδέεται όμως άρρηκτα με την εξωτερική αεροδυναμική ροή. Οι μελέτες των αυτοκινήτων γίνονται κατά βάση σε πλήρη κλίμακα, όμως σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπεται η χρήση μοντέλων μερικής κλίμακας, παραδείγματος χάρη κλίμακα 0.25 – 0.40, τα οποία όμως δοκιμάζονται σε αριθμούς Reynolds πλήρους κλίμακας.

2.3 Εξαρτήματα αεροδυναμικής σήραγγας.

Τα στοιχεία που απαρτίζουν μια αεροδυναμική σήραγγα χαμηλής ταχύτητας, κλειστού τύπου, παρατίθενται παρακάτω.

2.3.1 Τμήμα Δοκιμών

Το μέγεθος του τμήματος δοκιμών καθορίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τον τρόπο χρήσης της αεροδυναμικής σήραγγας, καθώς το τμήμα δοκιμών με τη σειρά του, θέτει περιορισμούς ως προς τα μεγέθη των μοντέλων όπως επίσης και ως προς τον αριθμό Reynolds που επιτυγχάνεται. Σε βιομηχανικές ή αστικές εφαρμογές επιλέγεται συνήθως τετραγωνική διατομή θαλάμου με την προϋπόθεση ότι το μετωπικό εμβαδόν του εξεταζόμενου μοντέλου δεν ξεπερνά το 10% του εμβαδού της διατομής. Για τρισδιάστατες δοκιμές παρ'όλα αυτά, συνίσταται ορθογωνικό σχήμα με αναλογία ύψους προς πλάτος 3:4. Στις περισσότερες εφαρμογές είναι αναγκαία η ύπαρξη εξοπλισμού μέσα στο περιβάλλον διεξαγωγής των μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, οφείλει η εσωτερική πίεση του θαλάμου να διατηρείται σε επίπεδα ίσα με την τοπική εξωτερική. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με τη διάνοιξη μικρών θυρίδων με μήκος που δεν ξεπερνά το 1% του συνολικού μήκους του τμήματος δοκιμών. Σύμφωνα με τον Idel'Chik (1969), ο συντελεστής απώλειας πίεσης που συσχετίζεται με τη δυναμική πίεση που επικρατεί στο τμήμα δοκιμών, η οποία αποτελεί και την πρότυπη δυναμική πίεση για του υπολογισμούς, δίνεται από την έκφραση:

$$\zeta = \frac{\lambda \cdot L}{D_H} \quad (2.3.1)$$

Όπου:

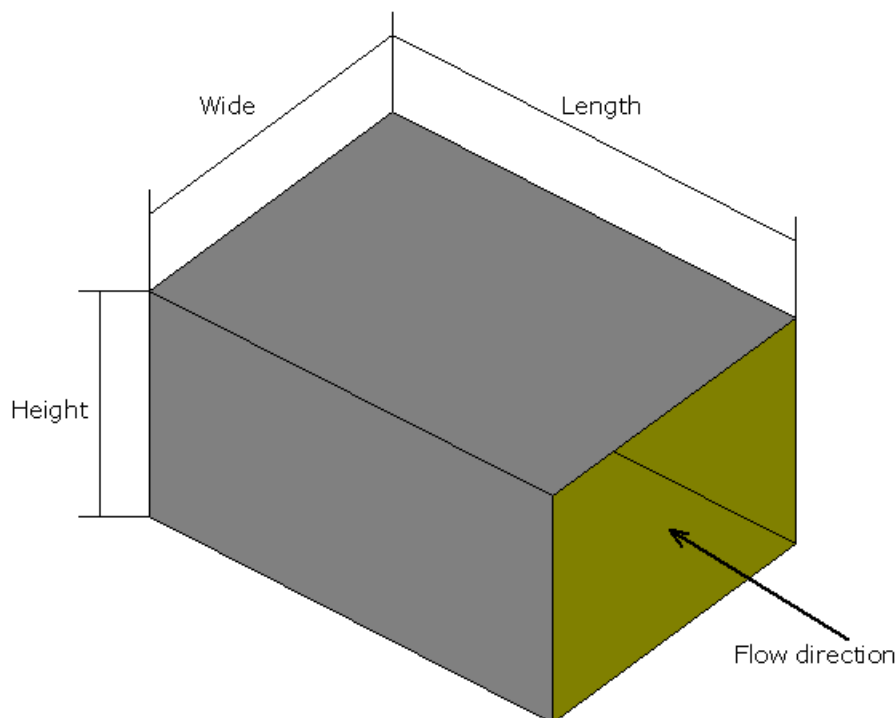
- L (m), το μήκος του τμήματος δοκιμών.
- D_H (m), η υδραυλική διάμετρος που δίνεται από τον τύπο

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2.3.1)$$

- A (m), το εμβαδόν της διατομής.
- P (m), την βρεχόμενη από ρευστό περίμετρο.
- λ έναν συντελεστή απωλειών που δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda = \frac{1}{\{1.8 \cdot \log(Re) - 1.64\}^2} \quad (2.3.3)$$

με Re τον αριθμό Reynolds υπολογισμένο για την υδραυλική διάμετρο.



Σχήμα 2.3: Διάταξη θαλάμου δοκιμών αεροσήραγγας σταθερής διατομής.

2.3.2 Ακροφύσιο.

Το ακροφύσιο αποτελεί το κρίσιμότερο εξάρτημα της αεροδυναμικής σήραγγας, καθώς είναι το εξάρτημα που ορίζει σε μεγαλύτερο ποσοστό την ποιότητα της ροής του ρευστού. Το

ακροφύσιο είναι υπεύθυνο για την επιτάχυνση της ροής, με ταυτόχρονη όμως διατήρηση της ομοιομορφίας του, από το θάλαμο καθίζησης προς το θάλαμο δοκιμών. Τα προαναφερθέντα εξαρτώνται κυρίως από τον λόγο συστολής N ο οποίος εκφράζεται ως η αναλογία του εμβαδού της διατομής εισόδου με την έξοδο. Θεωρητικά ο λόγος συστολής πρέπει να είναι ο μεγαλύτερος δυνατός. Παρ' όλα αυτά στην πράξη αυτό δεν είναι εφικτό καθώς εισέρχονται στην εξίσωση σχεδιασμού περιορισμοί λόγω διαστάσεων. Σε αεροσήραγγες αστικών ή βιομηχανικών εφαρμογών οι λόγοι συστολής λαμβάνονται από ένα εύρος 4.0-6.0 με επίπεδα ανομοιομορφίας της ροής να φτάνουν το 2% της ροής ή ακόμη και την τάξη του 0.5% με την εγκατάσταση εξαρτήματος σίτας. Σε αεροναυπηγικές εφαρμογές, όπου οι μελέτες είναι αυστηρότερες επιλέγονται λόγοι συστολής 8.0 – 9.0 και το ρεύμα αέρα παρέρχεται από πολλαπλά επίπεδα σιτών για επιπλέον ομαλοποίηση της ροής. Η μορφή του τοιχώματος του ακροφυσίου είναι επίσης σημαντικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία του. Σύμφωνα με τη λογική μικρής ακτίνας καμπυλότητας στο ευρύ άκρο και μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας στο στενό άκρο, σχεδιασμός που προκύπτει από μονοδιάσταση προσέγγιση της ροής, είναι αυξημένη η πιθανότητα διαχωρισμού του οριακού στρώματος και απότομη αύξηση της τύρβης.

Σύμφωνα με τους R. Metha και P. Broadshaw, το βέλτιστο σχήμα του τμήματος συστολής του ακροφυσίου προκύπτει μέσω παρεμβολής δύο πολυωνυμικών καμπυλών τρίτου βαθμού:

$$y = a_w + b_w \cdot x + c_w \cdot x^2 + d_w \cdot x^3 \quad (2.3.4)$$

$$y = a_n + b_n \cdot x + c_n \cdot x^2 + d_n \cdot x^3 \quad (2.3.5)$$

Οι συντελεστές της μεταβλητής x υπολογίζονται από τις εξής συνθήκες:

- Τις συντεταγμένες του τελευταίου σημείου του ευρέως τμήματος (x_w, y_w) .
- Τις συντεταγμένες του πρώτου σημείου του στενού τμήματος (x_n, y_n) .
- Μηδενική κλίση στο τελευταίο σημείο του ευρέως τμήματος
- Μηδενική κλίση στο πρώτο σημείο του στενού τμήματος
- Τις συντεταγμένες του σημείου ταύτισης των δύο καμπυλών, επιλέγεται το 50% της συνολικής καμπύλης επομένως $(x_m, y_m) = \left[\frac{x_w + x_n}{2}, \frac{y_w + y_n}{2} \right]$.
- Την κλίση στο τέλος της καμπύλης με αρχή το στενό σημείο του διαχύτη.

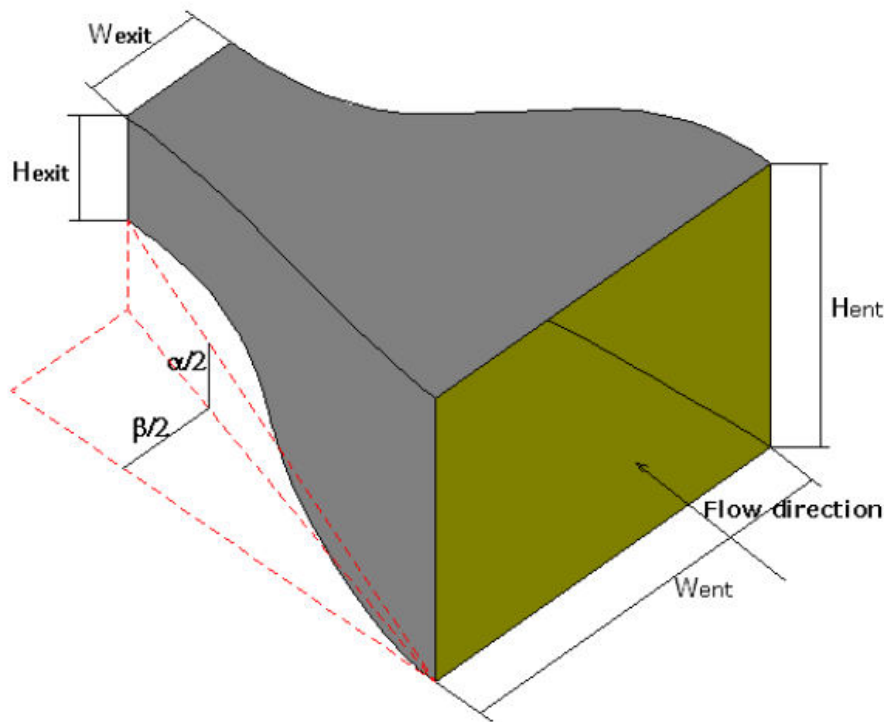
Σύμφωνα με τον Idel' Cik (1969), ο συντελεστής απωλειών δυναμικής πίεσης του διαχύτη στο στενό τμήμα του δίνεται από την έκφραση:

$$\zeta = \left\{ \frac{\lambda}{16 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right\} \left(1 - \frac{1}{N^2}\right) + \left\{ \frac{\lambda}{16 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right\} \left(1 - \frac{1}{N^2}\right) \quad (2.3.6)$$

Με

$$\lambda = \frac{1}{\{1.8 \cdot \log(Re) - 1.64\}^2} \quad (2.3.7)$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds υπολογισμένος για την υδραυλική διάμετρο.

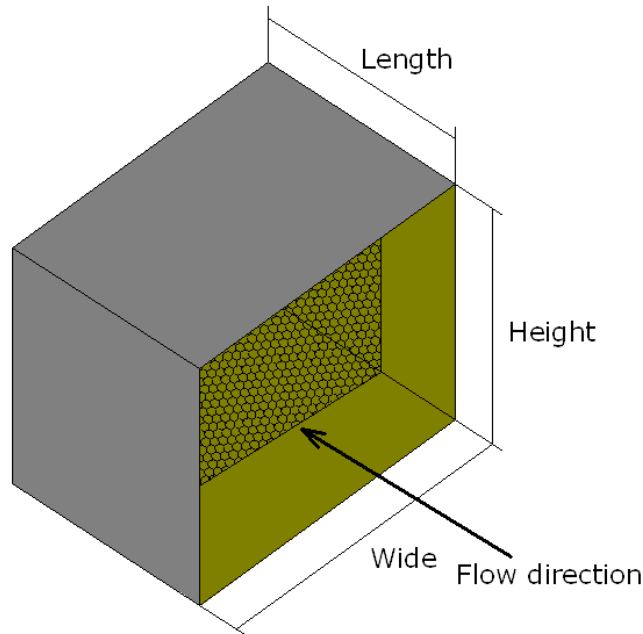


Σχήμα 2.4: Γενική διάταξη τρισδιάστατης συστολής αεροσήραγγας.

2.3.3 Θάλαμος Καθίζησης.

Η διαδικασία ομογενοποίησης της ροής ξεκινά στον θάλαμο καθίζησης. Σε πειραματικές διατάξεις όπου δεν είναι αναγκαία η υψηλή ποιότητα ροής, ο θάλαμος καθίζησης πρόκειται απλώς για ένα τμήμα αγωγού σταθερών διαστάσεων. Αντίθετα σε εφαρμογές όπου υπάρχει απαίτηση υψηλής ποιότητας ροής, στο σταθερό αυτό τμήμα αγωγού εγκαθίστανται ορισμένα επιπλέον εξαρτήματα. Τα εξαρτήματα που συντελούν σε αυτή την αύξηση ποιότητας, δηλαδή την μείωση της τύρβης, είναι είτε τοιχία κυψελίδων, είτε σήτες. Τα τοιχία κυψελίδων έχουν δομή κηρήθρας, αποτελούμενα δηλαδή από παράλληλους σωλήνες στους οποίους ρέει κατά μήκος ο παραγόμενος αέρας. Το μήκος των σωλήνων πρέπει να είναι τουλάχιστον 6 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο τους, για επαρκή εξουδετέρωση της πλευρικής τύρβης. Λόγω της δομής της όμως, η διάταξη αυτή αυξάνει την διαμήκη τύρβη και έτσι εισάγονται περιορισμοί

του πάχους της κυψελίδας. Αντίθετα, οι διατάξεις σητών δεν επηρεάζουν την πλευρική τύρβη, δρούν όμως αποτελεσματικότερα στην εξάλειψη της αξονικής τύρβης. Για απαιτητικές εφαρμογές είναι δυνατή η εγκατάσταση 2 ή 3 επιπέδων σητών, όμως η ανώτατη ποιότητα ροής προκύπτει από εγκατάσταση και των δύο ειδών σε σειρά.



Σχήμα 2.5: Γενική διάταξη ενός θαλάμου καθίζησης με στρώμα κηρήθρας.

2.3.4 Διαχύτης.

Η ανάκτηση της στατικής πίεσης στο κύκλωμα αεροδυναμικής σήραγγας γίνεται μέσω των διαχυτών, αυξάνοντας έτσι την απόδοση της σήραγγας. Ένα κλειστό κύκλωμα σήραγγας αποτελείται από πολλούς διαχύτες. Ο διαχύτης που ακολουθεί τον θάλαμο δοκιμών αναλαμβάνει έναν πλέον σημαντικό ρόλο, καθώς είναι υπεύθυνος για ομαλοποίηση της ροής. Κακός σχεδιασμός του διαχύτη αυτού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά παλμού πίεσης ανάντι του, δηλαδή στο τμήμα δοκιμών, άρα μεγάλες ανομοιομορφίες πίεσης και ταχύτητας. Ο διαχύτης που τροφοδοτεί τη μονάδα παραγωγής ανέμου έχει παραπλήσιο ρόλο, καθώς αναστέλλει το ενδεχόμενο διαχωρισμού της ροής και ταλαντώσεων, από τα οποία ο ανεμιστήρας επηρεάζεται αρνητικά. Άλλοι διαχύτες αναλαμβάνουν απλώς ρόλο μετάβασης της ροής και τροφοδότησης των γωνιών του κλειστού κυκλώματος. Για την επίτευξη των παραπάνω, εμπειρικά αποφεύγεται η ημιγωνία ανοίγματος του διαχύτη να ξεπερνά την τιμή των 3.5° . Η απώλεια δυναμική πίεσης στο περιβάλλον του διαχύτη υπολογίζεται σύμφωνα με τον Idel'Chik (1969) ως εξής:

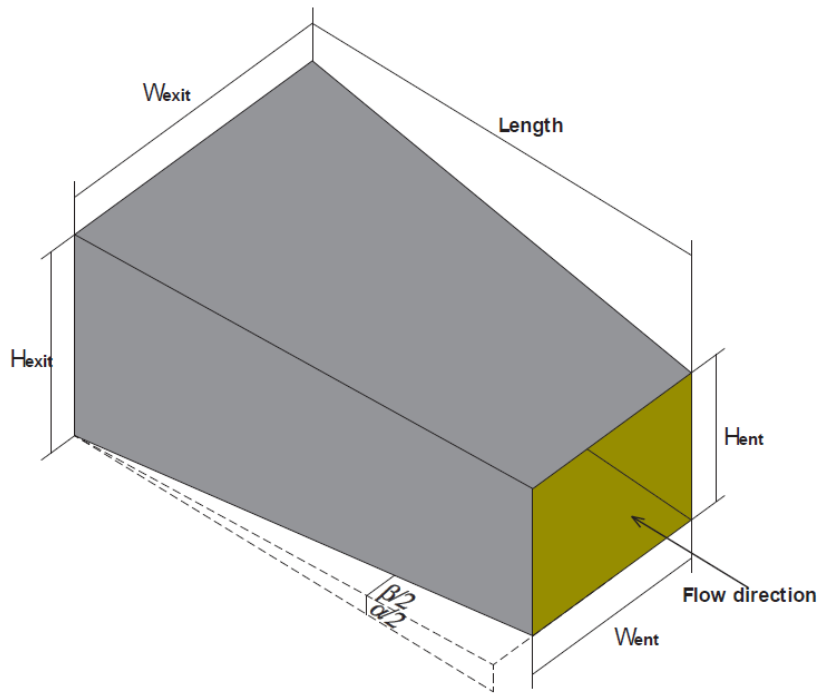
Υπολογίζεται ο συντελεστής απώλειας πίεσης, αναφορικά με την δυναμική πίεση του στενού άκρου του διαχύτη μέσω της έκφρασης:

$$\zeta = 4.0 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt[4]{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{A_o}{A_1}\right)^2 + \zeta_f \quad (2.3.8)$$

Όπου:

- α (°), είναι η μέση γωνία ανοίγματος.
- A_o (m²), είναι το εμβαδόν διατομής του στενού άκρου
- A_1 (m²), είναι το εμβαδόν διατομής του ευρέως άκρου
- ζ_f , συντελεστής που δίνεται από την σχέση:

$$\zeta_f = \frac{0.02}{8 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \left(1 - \left(\frac{A_o}{A_1}\right)^2\right) \quad (2.3.9)$$



Σχήμα 2.6: Διαχύτης ορθογώνιας διατομής.

2.3.5 Γωνίες.

Στις αεροδυναμικές σήραγγες κλειστού τύπου είναι αναγκαία η ύπαρξη τεσσάρων γωνιών στροφής της ροής. Οι γωνίες αυτές είναι υπεύθυνες για περισσότερο από 50% της συνολικής απώλειας πίεσης, με την γωνία κατάντι του θαλάμου δοκιμών να κατέχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά των απωλειών. Ο σχεδιασμός των γωνιών αυτών επομένως είναι μια κρίσιμη παράμετρος. Οι διαστάσεις στην είσοδο των γωνιών καθορίζονται από τις διαστάσεις

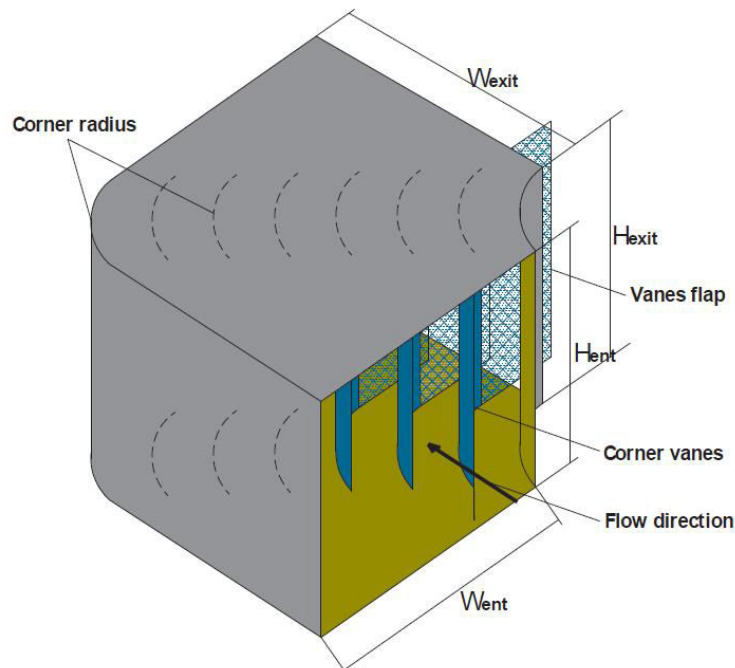
των αντίστοιχων διαχυτών. Παρ' όλα αυτά στην έξοδο οι διαστάσεις ενδέχεται να αυξηθούν, συγκεκριμένα το πλάτος, δίνοντας έτσι στη γωνία λόγο συστολής ο οποίος επιδρά θετικά στην απώλεια πίεσης. Για την μείωση της απώλειας πίεσης οι γωνίες ενέχουν γωνιακά πτερυγία. Εμπειρικά οι γωνίες στροφής των πτερυγίων υπολογίζονται με βάση τα πλάτη εισόδου των γωνιών και λαμβάνουν τιμές 0.20-0.25 των πλατών αυτών. Συνήθως τα πτερυγία αυτά είναι απλώς καμπύλες πλάκες, όμως σε πειραματικές διατάξεις αυστηρών εφαρμογών σχεδιάζονται ως αεροτομές και βελτιστοποιούνται ανάλογα τη χρήση με σκοπό την μειωμένη απώλεια πίεσης. Ο αριθμός των πτερυγίων σε μια γωνία υπολογίζεται σύμφωνα με τον Idel'Chik (1969) από την έκφραση:

$$n = 1.4 \cdot \frac{S}{t_1} \quad (2.3.10)$$

Όπου,

- S (m), είναι η διαγώνια διάσταση της γωνίας.
- t_1 (m), είναι η χορδή του πτερυγίου.

Η πυκνότητα τοποθέτησης συνήθως δεν αποτελεί σχεδιαστικό πρόβλημα καθώς ακολουθείται η μέθοδος της ίσης απόστασης των πτερυγίων εκτός της γωνίας κατάντι του θαλάμου δοκιμών, όπου για αποφυγή διαταράξεων της ροής και μεγάλων απωλειών πίεσης επιβάλλεται σταδιακή αύξηση της πυκνότητας κατά την κίνηση προς το εσωτερικό της γωνίας.



Σχήμα 2.7: Σχήμα γωνίας αεροσήραγγας, συμπεριλαμβανομένων των πτερυγίων.

2.3.6 Σταθμός Παραγωγής Ενέργειας.

Στόχος του σταθμού παραγωγής είναι η διατήρηση της ροής του ρευστού και η αντιστάθμιση των απωλειών του κυκλώματος της αεροσήραγγας. Μεταβλητές που τον χαρακτηρίζουν αποτελούν:

- Η αύξηση πίεσης Δp :

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.3.11)$$

Όπου:

- ζ , ο συνολικός συντελεστής απωλειών πίεσης.
- $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$, η πυκνότητα του ρευστού.
- $V \left(\frac{m}{s}\right)$, η ταχύτητα λειτουργίας.

- Η παροχή όγκου Q :

$$Q = V \cdot S_{TC} \quad (2.3.12)$$

Όπου:

- $V \left(\frac{m}{s}\right)$, η ταχύτητα λειτουργίας
- $S_{TC} (m^2)$, το εμβαδόν διατομής του θαλάμου δοκιμών.

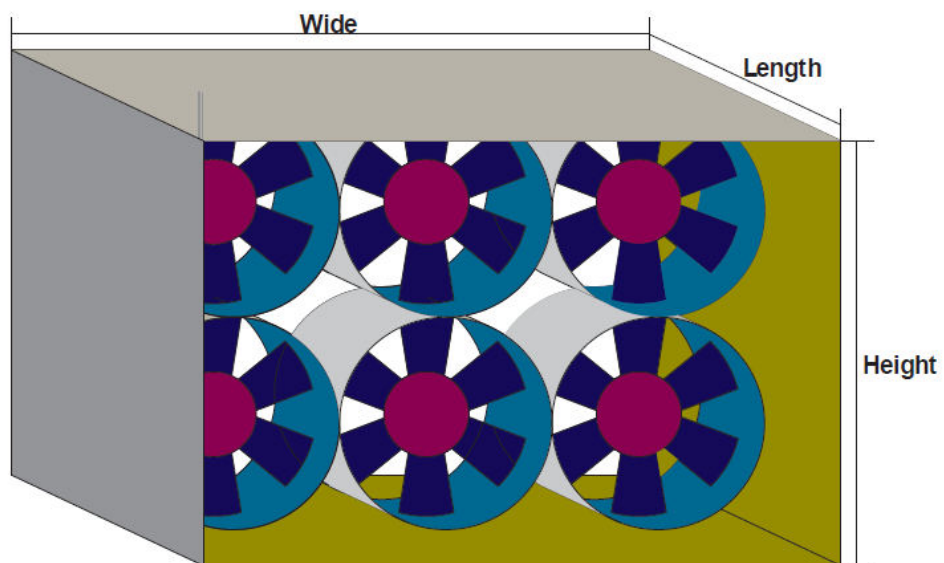
- Η ισχύς P :

$$P = \Delta p \cdot \frac{Q}{\eta} \quad (2.3.13)$$

Όπου:

- $\Delta p (Pa)$, η αύξηση της πίεσης.
- $Q \left(\frac{m^3}{s}\right)$, η παροχή όγκου.
- η , ο βαθμός απόδοσης του ανεμιστήρα.

Για λόγους κόστους, συνήθως τακτική αποτελεί η παράλληλη εγκατάσταση ανεμιστήρων μικρότερης ισχύος, σε αντίθεση με την ύπαρξη ενός μεγάλου ανεμιστήρα μεγάλης ισχύος.



Σχήμα 2.8: Διάταξη ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς ανεμιστήρες.

2.4 Τεχνικές μέτρησης φορτίων ανέμου σε κτήρια μέσω αεροδυναμικής σήραγγας.

Ανά τα χρόνια, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές εκτίμησης των φορτίων του ανέμου σε κατασκευές. Δεν είναι δυνατόν να τεθεί ερώτημα για ορθότερη τεχνική, καθώς η τεχνική μέτρησης η οποία επιλέγεται από τους μηχανικούς, προκύπτει από ένα συνονθύλευμα παραγόντων όπως η ακρίβεια και η συνάφεια των αποτελεσμάτων, η σχέση των αποτελεσμάτων με θέματα δημόσιας ασφάλειας, ο χρόνος εξαγωγής αποτελεσμάτων, το διαθέσιμο κεφάλαιο, η καινοτομία και άλλα. Για παράδειγμα, σε καταστάσεις κατά τις οποίες μελετώνται έργα συμβατικού δομικού σχεδιασμού, όπως τυπικά χαμηλά κτήρια, στα οποία απαιτούνται σχετικά περιορισμένοι προϋπολογισμοί και χρονοδιαγράμματα, όπως επίσης ο παράγοντας ανθρωπίνου κινδύνου είναι μικρός, οι τεχνικές μέτρησης επιλέγονται να είναι γρήγοροι και φθηνοί. Σε αντίθετη περίπτωση, σε καταστάσεις όπου ο σχεδιασμός είναι καινοτόμος και λιγότερο προβλέψιμος, το κεφάλαιο επένδυσης αφορά σημαντικά μεγαλύτερο ποσό και οι χρόνοι μελέτης είναι αυξημένοι, οι επιλεγόμενες τεχνικές είναι πληρέστερες και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

2.4.1 Τεχνική μέσου όρου πίεσης

Ο μέσος όρος πίεσης είναι μια τεχνική κατά την οποία καθίσταται δυνατό να εκτιμηθούν φορτία τα οποία δρουν σε συγκεκριμένες περιοχές είτε φορτία δρώντα κατά μήκος δομικών στοιχείων. Οι τεχνικές μέσου όρου πίεσης που εφαρμόζονται, αναλύονται παρακάτω.

2.4.1.1 Πνευματικός μέσος όρος πίεσης

Τα φορτία περιοχών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω μετρήσεων των τοπικών πιέσεων και εξαγάγοντας την μέση τιμή αυτών, με μηχανικό τρόπο. Τα μοντέλα αεροδυναμικής σήραγγας εξοπλίζονται με απολήψεις πίεσης (pressure taps), σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια μέσω εύκαμπτων πλαστικών αγωγών συνδέονται σε ένα συλλέκτη. Οι πιέσεις αυτές με τη σειρά τους επεξεργάζονται από έναν μετατροπέα πίεσης και οι τιμές εισάγονται σε λογισμικό ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η τεχνική αυτή παρά την ευκολία που φαίνεται ότι προσδίδει, παρουσιάζει αρκετά θέματα σχεδιασμού. Λόγω της ίδιας της τεχνικής, είναι πολύ συχνό φαινόμενο, η εμφάνιση ψευδοπιέσεων, οι οποίες προκαλούνται από την γεωμετρία του συστήματος σωληνώσεων, λόγω ακουστικής, ενισχυτικών συμβολών και ακυρωτικών συμβολών. Με τον όρο γεωμετρία του συστήματος σωληνώσεων εννοείται η πορεία την οποία ακολουθούν μέχρι τη σύνδεση τους με τον συλλέκτη, όπως επίσης και η διάμετρος τους, όπου επιλέγεται να είναι η ελάχιστη δυνατή, και τέλος η ποσότητα υλικού από το οποίο συντίθενται. Συχνά, οι τιμές των πιέσεων που απαιτούνται για την αξιολόγηση των ανεμογενών φαινομένων, λαμβάνονται μέσω ομαδοποίησης των απολήψεων πίεσης ανά ζητούμενη περιοχή εξαγωγής αποτελεσμάτων, και στη συνέχεια σταθμίζονται με διαδικασία υπολογισμού μέσης τιμής. Κατά βάση οι πιέσεις μετρώνται συγκριτικά με κάποια πίεση αναφοράς η οποία οφείλει να είναι κατάλληλη για τη σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων. Η

πίεση αναφοράς αυτή συνδέεται στην μια απόληξη του μανομέτρου, ενώ στην άλλη απόληξη συνδέεται η επιθυμητή πίεση που προκύπτει από την εκάστοτε απόληψη πίεσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μέτρηση ενδέχεται να πραγματοποιηθεί χωρίς την ύπαρξη πίεσης αναφοράς, συνδέοντας στις δύο διαφορετικές απολήξεις του μανομέτρου δύο διαφορετικές πιέσεις προερχόμενες από διαφορετικές απολήψεις πίεσης, μετρώντας με αυτόν τον τρόπο διαφορά πίεσης. Σε τύπους πειραμάτων όπου δεν είναι μόνο η μέση τιμή πίεσης μέγεθος ενδιαφέροντος, είναι αναγκαία η ορθή αναπαράσταση του περιεχομένου συχνότητας των κυμαινόμενων φορτίων. Επομένως αποτελεί σημείο δέουσας σημασίας, η απόκριση συχνότητας της πνευματικής μετάδοσης. Το σύνολο των μετρούμενων πιέσεων οφείλει να είναι επαρκώς μεταδιδόμενο στον μετατροπέα, για αποφυγή μέτρησης παραμορφωμένου σήματος. Εξίσου σημαντικά είναι και το πλάτος αλλά και η φάση του σήματος. Τέλος μεγάλης προσοχής χρήζει και η τοποθεσία των απολήψεων πίεσης. Δηλαδή σε περιοχές κοντά σε ακμές συναντάται μεγαλύτερη πυκνότητα απολήψεων, λόγω μεγάλης κλίσης πίεσης, σε αντίθεση με κεντρικότερες περιοχές, όπου η κλίση πίεσης είναι μικρή.

2.4.1.2 Πορώδεις κοιλότητες πολυαιθυλενίου.

Η χρήση πορώδους πολυαιθυλενίου αποτελεί μια πιο άμεση τεχνική μέτρησης πιέσεων σε σχέση με τον Πνευματικό Μέσο Όρο Πίεσης, καθώς προσφέρει αποτελεσματικότερη χωρική ανάλυση. Απαιτεί όμως μεγαλύτερη πολυπλοκότητα κατά την κατασκευή του μοντέλου. Σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο ενέχει ενσωματωμένα φύλλα πολυαιθυλενίου, πάχους 0,13 έως 0,5 mm, τα οποία αφενός παρουσιάζουν αρκετά στερεή δομή ώστε να διατηρείται η γεωμετρία του μοντέλου, και αφετέρου είναι αρκετά πορώδη ώστε να έχουν τη δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου εύρους συχνοτήτων κυμαινόμενων πιέσεων. Πιο συγκεκριμένα, στο μοντέλο σχεδιάζεται μια κοιλότητα η οποία καλύπτεται από ένα φύλλο πολυαιθυλενίου, τοποθετημένο στο ίδιο επίπεδο με την εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου. Για την εξισορρόπηση της πίεσης αφήνεται πίσω από την εξωτερική επιφάνεια ένας μικρός όγκος. Η κάθε κοιλότητα είναι συνδεδεμένη με μια μόνο απόληψη πίεσης, η οποία μετράει την μέση πίεση αυτής.

2.4.1.3 ON-LINE Averaging

Πολύ κοντά στην τεχνική πνευματικού μέσου όρου πίεσης είναι η τεχνική του ταυτόχρονου υπολογισμού μέσου όρου (on-line averaging). Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η αδυναμία χειρισμού του εξερχόμενου σήματος σε περιπτώσεις παραμορφώσεων του πλάτους ή της φάσης του σήματος. Η μέθοδος του on-line averaging γίνεται μέσω συνδυασμού των λαμβανόμενων σημάτων των ηλεκτρονικών μετατροπέων από μεμονωμένα μετρούμενες τοπικές πιέσεις. Έτσι δίνεται η δυνατότητα αναλογικού υπολογισμού του μέσου όρου των σημάτων. Βέβαια αυτή η τεχνική δεν βρίσκει εφαρμογή, καθώς η ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων αυτών αποτελεί πλέον, πιο εύχρηστο, πιο φθηνό και κυρίως πιο γρήγορο τρόπο. Σε περίπτωση πάντως που είναι επιθυμητή η εκτέλεση της μεθόδου, ο

χρήστης οφείλει να προβλέψει επαρκώς την κατανομή των απολήψεων πίεσης όπως επίσης και τον τρόπο πλήρους και ορθής μετάδοσης των σημάτων.

2.4.1.4 Μέσος όρος πίεσης τροπικών φορτίων.

Σε αντίθεση με τον πνευματικό τρόπο μέσου όρου πίεσης ο οποίος αναπτύχθηκε με σκοπό την μείωση του εξοπλισμού και συγκεκριμένα των μετατροπέων πίεσης, τα σύγχρονα πειράματα ακολουθούν άλλη προσέγγιση. Λόγω του μειωμένου κόστους εξοπλισμών, την ανάπτυξη λογισμικών και την αύξηση των χώρων αποθήκευσης, είναι πλέον εφικτή η παράλληλη επεξεργασία πολύ μεγαλύτερων πακέτων δεδομένων. Επομένως οι σύγχρονες τεχνικές έχουν τη δυνατότητα μέτρησης μεγαλύτερων ευρών πίεσης, σε μεγαλύτερες περιοχές της δομής.

2.4.1.5 Ολοκλήρωση της πίεσης.

Μια επέκταση της on-line μεθόδου μέτρησης πιέσεων αποτελεί η προσέγγιση ατομικής ολοκλήρωσης των μετρούμενων τοπικών πιέσεων για την εκτίμηση των φορτίων. Εκτός από το πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών, η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα χειρισμών υψηλότερων συχνοτήτων σήματος, δεν απαιτεί διορθώσεις του σχήματος λειτουργίας και χειρίζεται εύκολα την αξιολόγηση δυνάμεων σε εφαρμογές με συζευγμένους βαθμούς ελευθερίας. Κατά τη διαδικασία μέτρησης συνολικών φορτίων, γίνεται ταυτόχρονη μέτρηση τοπικών πιέσεων με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν το πλήρες πεδίο πίεσης, ασκούμενο στην εξωτερική επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή βασίζεται κατά μεγάλο ποσοστό στην επιλογή του αριθμού των καναλιών πίεσης. Για την εκτίμηση του αριθμού των καναλιών λαμβάνονται υπ' όψιν τα παρακάτω:

- Το πεδίο στατικής πίεσης πάνω από τη μετρούμενη επιφάνεια του μοντέλου απαιτεί επαρκή επίλυση, επομένως η χωρική ανάλυση οφείλει να είναι εκτενέστερη. Η ύπαρξη περιοχών υψηλής κλίσης πίεσης, κυρίως κοντά σε ακμές, γεννά την ανάγκη μεγαλύτερη πλήρωσης της δομής με απολήψεις πίεσης.
- Οι κυμαινόμενες πιέσεις παρουσιάζουν το εξής χαρακτηριστικό. Με αύξηση της συχνότητας διακύμανσης, πιο εντοπισμένη χωρικά γίνεται η κυμαινόμενη πίεση. Στις περισσότερες περιπτώσεις μελέτης μεγάλων κτηριακών εγκαταστάσεων, οι αποστάσεις συσχέτισης των πιέσεων που κυμαίνονται στις σημαντικές ιδιοσυχνότητες, είναι της ίδια τάξης μεγέθους της ίδια της δομής. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη χωρική ανάλυση για την εκτίμηση των δυνάμεων.
- Λόγω εμφάνισης στροβιλισμών στις ανάντι ακμές των κτηρίων, οι οποίοι εκτείνονται κατά μήκος της πλάγιας όψης, οι απολήψεις πίεσης τοποθετούνται με μεγαλύτερη πυκνότητα, ώστε να γίνουν αντιληπτά τα προκείμενα δυναμικά φορτία.

- Σε περιπτώσεις ύπαρξης διακυμάνσεων πίεσης με συχνότητες χαμηλότερες της θεμελιώδους της δομής, υπάρχει συμβολή σε ημι-στατικά φορτία, τα οποία ενδέχεται να είναι σημαντικά για την συγκεκριμένη δομή.

2.4.2 Τεχνική άμεσης μέτρησης φορτίου.

2.4.2.1 Ισορροπία δύναμης υψηλής συχνότητας.

Η ισορροπία δυνάμεων υψηλής συχνότητας αποτελεί μια ευρέως αποδεκτή τεχνική μέτρησης φορτίων σε μοντέλα αεροδυναμικής σήραγγας, κυρίως για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Η τεχνική αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Tschanz (1982) ο οποίος βασίστηκε σε πρώιμη προσέγγιση του Whitbread (1975). Για την εφαρμογή της μεθόδου, είναι αναγκαία μονάχα η εξωτερική γεωμετρία του μοντέλου και το κύριο εξαγόμενο μέγεθος είναι η απόκριση του συστήματος. Πρόκειται επομένως για ταχεία εναλλακτική τεχνική αεροελαστικής ανάλυσης, η οποία μάλιστα δεν απαιτεί επαναλήψεις πειραμάτων, καθώς με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, οι προκύπτουσες αποκρίσεις από τυχόν αλλαγές στη γεωμετρία υπολογίζονται αναλυτικά. Μειονέκτημα της διαδικασίας αποτελεί η δυσκολία αναίρεσης των σφαλμάτων που εισάγονται στην πειραματική μέτρηση λόγω των ιδιοτήτων του μοντέλου που αναλύεται.

2.4.2.2 Μετατροπείς δυνάμεων σε υποδομές κτηρίου

Υπάρχει η δυνατότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις, τοποθέτησης υποδομών σε μετατροπής δύναμης για άμεση λήψη αποτελεσμάτων σχετικά με τα ασκούμενα φορτία του ανέμου. Οι μετατροπείς αυτοί ακολουθούν πολύ συγκεκριμένο σχεδιασμό με κύριο χαρακτηριστικό τους τη δυσκαμψία, για αποφυγή εμφάνισης συντονισμών της εγκατάστασης. Παραδείγματα υποδομών εφαρμογής της αναφερθείσας διαδικασίας είναι κατάρτια, κεραίες, μέχρι και τμήματα γεφυρών και ορόφων.

2.4.3 Άλλες τεχνικές.

2.4.3.1 Ισορροπία δύναμης πολλαπλών επιπέδων.

Επέκταση της τεχνικής ισορροπίας δυνάμεων υψηλής συχνότητας, αποτελεί η ισορροπία δυνάμεων πολλαπλού επιπέδου ή ισορροπία δυνάμεων δεύτερης γενιάς. Η τεχνική βασίζεται στην μέτρηση ροπών και δυνάμεων σε πολλαπλά επίπεδα, οι οποίες ροπές και δυνάμεις δεν είναι εφικτό να αναλυθούν στο πρώιμο μοντέλο της ισορροπίας δυνάμεων υψηλής συχνότητας. Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα παρουσιάζουν μια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην κατασκευή, όπως επίσης είναι απαραίτητη η ύπαρξη εξειδικευμένης

ζυγαριάς. Παρόλα αυτά δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη εκτεταμένου εξοπλισμού μετατροπών πίεσης.

2.4.3.2 Εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Η τεχνική αυτή της εξαναγκασμένης ταλάντωσης χρησιμοποιείται κυρίως για μελέτες δυνάμεων, προκύπτουσες λόγω κίνησης, όπως επίσης και για τον προσδιορισμό πληροφοριών σχετιζόμενων με την αεροελαστική συμπεριφορά των δομών. Οι δυνάμεις αυτές είναι κατά βάση πολύ μικρές συγκριτικά με τις δυνάμεις του ανέμου και τις αδρανειακές και ελαστικές δυνάμεις της κατασκευής. Παρ' όλα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως προκαλούμενες από τον άνεμο, δυνάμεις απόσβεσης και δυσκαμψίας και έτσι τροποποιούν την απόσβεση και τη δυσκαμψία της δομής.

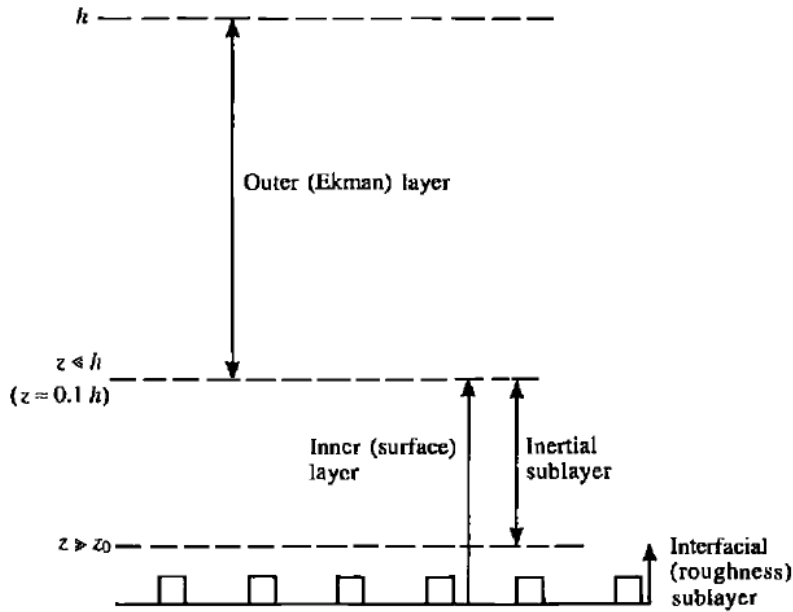
Κεφάλαιο 3

Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

3.1 Ανάπτυξη και δομή ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Σε πλαίσιο ατμόσφαιρας, είναι μια δύσκολη διαδικασία ο ακριβής ορισμός του οριακού στρώματος. Παρόλα αυτά, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μπορεί να ορισθεί ως το στρώμα αέρα ευρισκόμενο ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της γης, στο οποίο όλες οι επιδράσεις της επιφάνειας (τριβή, θέρμανση, ψύξη) γίνονται αισθητές σε κλίμακα χρόνου μικρότερη από μια ημερολογιακή μέρα, και στις οποίες σημαντικές ποσότητες ροών ορμής, θερμότητας και ύλης μεταφέρονται μέσω τυρβώδων κινήσεων σε χωρικές κλίμακες της τάξης του ύψους του οριακού στρώματος, ή και μικρότερες. Η τυρβώδης φύση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αποτελεί ένα από τα πιο εμφανή χαρακτηριστικά του. Παρ' όλα αυτά η τύρβη η οποία αναπαρίσταται σε δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας και η τύρβη των κατώτερων στρωμάτων του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος διαφέρουν. Σε πλαίσιο ατμόσφαιρας, η μηχανική τύρβη, εννοώντας την τύρβη η οποία προκύπτει λόγω διάτμησης του ανέμου, συνυπάρχει με την τύρβη λόγω θερμικών συναγωγών, οι οποίες αποτελούν βασικό και συνεχόμενο φαινόμενο της ατμόσφαιρας. Επιπλέον η τύρβη του οριακού στρώματος εξαρτάται άμεσα από την μέση ροή του ανέμου λόγω περιστροφής της γης.

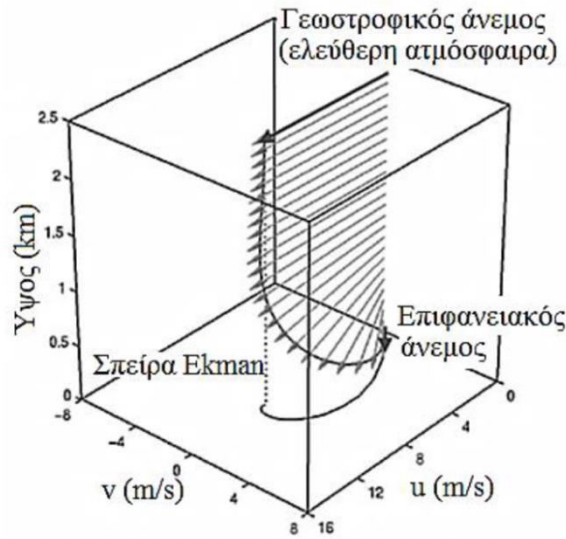
Η δομή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος παρουσιάζει διακριτή εσωτερική και εξωτερική περιοχή. Στην εξωτερική περιοχή η δομή του οριακού στρώματος έχει ελάχιστη εξάρτηση από τη φύση της επιφάνειας, αλλά μεγάλη εξάρτηση από τη μέση ροή της ατμόσφαιρας και τη δύναμη Coriolis η οποία οφείλεται στην περιστροφή της γης. Η εξωτερική αυτή περιοχή στη βιβλιογραφία αναφέρεται πολλές φορές ως στρώμα Ekman. ((φωτο με εκμαν)). Από την άλλη πλευρά, η εσωτερική περιοχή, επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη μορφολογία της επιφάνειας και ελάχιστα από την περιστροφή και διαχωρίζεται σε δυο επιμέρους υποστρώματα, το επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα και το στρωτό οριακό υπόστρωμα. Η μεταβατική περιοχή μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού στρώματος δεν χαρακτηρίζεται από απότομες αλλαγές και αποτελεί απλά ένα στρώμα επικάλυψης των επιμέρους περιοχών.



Σχήμα 3.1: Σχηματική δομή ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος τραχιάς αεροδυναμικά ροής σε συνθήκες ουδέτερης διαστρωμάτωσης.

ΣΤΡΩΜΑ ΕΚΜΑΝ

Ιδανικά το στρώμα Ekman εκτείνεται καθ' όλο το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Παρόλα αυτά λόγω των μεταβολών του συντελεστή τυρβώδους κινητικότητας μ_t , το στρώμα Ekman εκτείνεται από την κορυφή του επιφανειακού οριακού στρώματος, έως το ολικό ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Σε όλο τον όγκο του στρώματος Ekman θεωρείται ότι υπάρχει ισορροπία μεταξύ της δύναμης Coriolis, της αναπτυσσόμενης δύναμης λόγω κλίσης πίεσης, και των διατμητικών τάσεων των ροών του ανέμου. Κατά το μοντέλο του Ekman το κατώτερο υπόστρωμα ρευστού επιβραδύνεται λόγω τριβής με το στρώμα που βρίσκεται σε επαφή, με αποτέλεσμα η ταχύτητα του επάνω στρώματος λόγω της περιστροφής της γης, να στρέφεται προς τα δεξιά της τάσης που εφαρμόζεται. Η θεωρία αυτή ανάγεται σε ένα μοντέλο σπείρας, στο οποίο αναπαρίσταται η καθ' ύψος στροφή του διανύσματος της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από κατακόρυφο άξονα, με τέτοιο τρόπο ώστε με προβολή των διανυσμάτων σε οριζόντιο επίπεδο τα άκρα τους να βρίσκονται στη σπείρα αυτή. Πρακτικά με την προσέγγιση του εδάφους, λόγω της μεταφοράς των τάσεων από το ένα υπόστρωμα στο άλλο, εμφανίζεται και ανάλογη στροφή του διανύσματος της ταχύτητας είτε προς τα αριστερά για το Βόρειο ημισφαίριο, είτε προς τα δεξιά για το Νότιο.



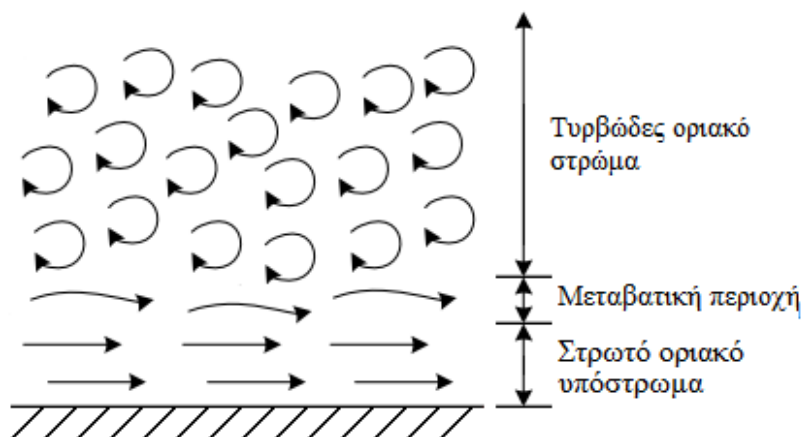
Σχήμα 3.2: Σπείρα μεταβολής ταχυτήτων Ekman στον χώρο.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ

Το επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα εμφανίζεται κατά κύριο λόγο την ημέρα λόγω αυξημένης τύρβης και φτάνει μέχρι τα 100m σε ύψος, ενώ τις νυχτερινές ώρες λόγω ευστάθειας της ατμόσφαιρας φτάνει σε ύψος τα μερικά μέτρα. Χαρακτηρίζεται από αυξημένη ένταση τύρβη, η οποία όμως είναι μικρής κλίμακας. Κύριες γενεσιουργοί αιτίες του υποστρώματος αυτού είναι η τραχύτητα της επιφάνειας και η ανάπτυξη ρευμάτων λόγω μεταφοράς θερμότητας.

ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ

Το στρωτό οριακό υπόστρωμα είναι εκείνο το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της γης, προσκολλώμενο στις διάφορες επιφάνειες. Έχει ύψος μερικά χιλιοστά και χαρακτηρίζεται από μειωμένα επίπεδα τύρβης.



Σχήμα 3.3: Στρωτή και τυρβώδης κίνηση του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο Stull (1989) επιχείρησε την περιγραφή της δομής του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Σύμφωνα με τον Stull το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές δομές, το μεικτό στρώμα, το υπολειπόμενο στρώμα και το σταθερό οριακό στρώμα. Ανάλογα με την ύπαρξη νεφών, το μεικτό στρώμα επιδέχεται περεταίρω διαχωρισμού σε στρώμα νεφών και στρώμα υπό των νεφών.

ΜΕΙΚΤΟ ΣΤΡΩΜΑ

Όταν ένα στρωματοποιημένο μεικτό στρώμα βρίσκεται σε περιοχή θερμότερου από αυτό εδάφους, τα ανερχόμενα θερμικά ρεύματα συναντούν τα κατερχόμενα ψυκτικά ρεύματα λόγω ψύξης μέσω ακτινοβολίας στην κορυφή των νεφών, με αποτέλεσμα λόγω συναγωγής θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων, την εμφάνιση στροβιλισμών. Η τύρβη επομένως του μεικτού στρώματος είναι κυρίως αποτέλεσμα ανάμιξης ρευμάτων διαφορετικών θερμοκρασιών και μεταφοράς θερμότητας μεταξύ τους. Εμφάνιση τύρβης προκύπτει επίσης λόγω των ισχυρών διατμητικών ρευμάτων της ελεύθερης ροής στην κορυφή του μεικτού στρώματος. Στην περίπτωση απουσίας νεφών, το μεικτό στρώμα επηρεάζεται εξ' ολοκλήρου από της ηλιακή θέρμανση καθώς τα θερμά ανερχόμενα ρεύματα παρασύρουν τα ψυχρότερα με αποτέλεσμα την έντονη ανάμιξη. Το μεικτό στρώμα αυξάνει το πάχος του καθώς παρασύρει μη τυρβώδεις ροές και τις μετατρέπει σε τυρβώδεις φτάνοντας το μέγιστο πάχος του τις απογευματινές ώρες. Τα χαρακτηριστικά του μεικτού στρώματος μπορούν να απεικονιστούν μέσω των προφίλ της εικονικής ενδεχόμενης θερμοκρασίας, του λόγου ανάμιξης μάζας υγρού με τη μάζα ξηρού αέρα, τη συγκέντρωση ρυπαντών και την ταχύτητα του ανέμου. Στην κορυφή του μεικτού στρώματος υπάρχει ένα στρώμα το οποίο δεν επιτρέπει στα θερμικά ρεύματα να ανέλθουν περεταίρω, ενώ το στρώμα ευρισκόμενο στην επιφάνεια παρουσιάζει έναν υπεραδιαβατικό χαρακτήρα. Λόγω της ύπαρξης του σταθερού στρώματος στην κορυφή είναι αδύνατη απαγωγή των ρύπων, με αποτέλεσμα την παγίδευση τους σε χαμηλά ατμοσφαιρικά επίπεδα και την δημιουργία προβλημάτων σε κατοικίσιμες περιοχές. Για τον προσδιορισμό της κορυφής του μεικτού στρώματος λαμβάνονται δεδομένα υγρασίας, η οποία βρίσκεται σε χαμηλή περιεκτικότητα στο σημείο, και δεδομένα από το προφίλ της ενδεχόμενης θερμοκρασίας.

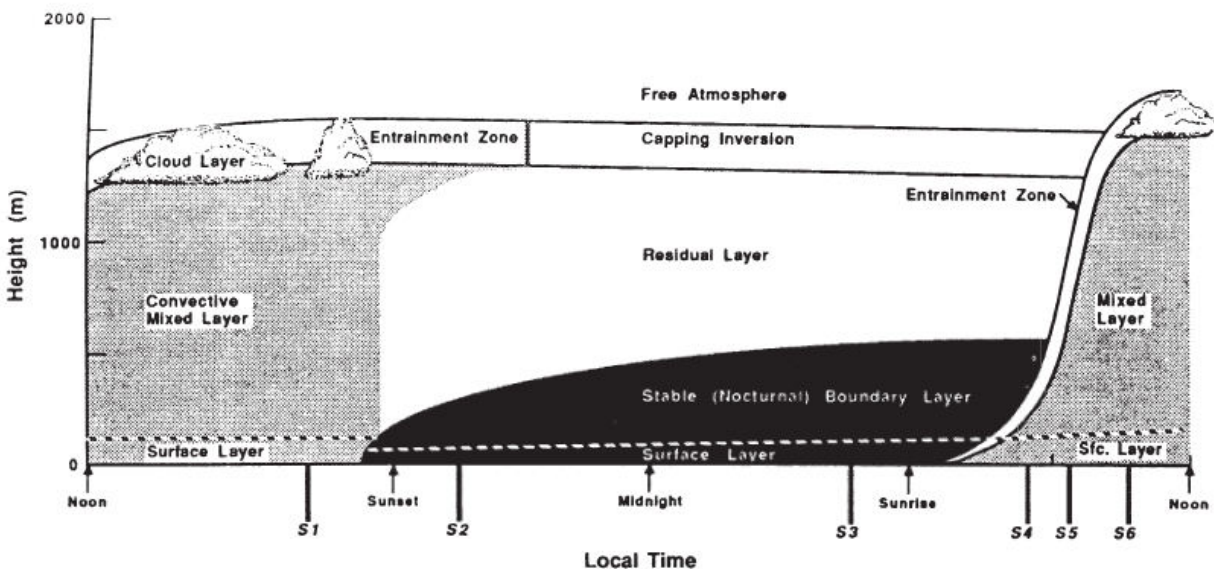
ΥΠΟΛΕΙΠΟΜΕΝΟ ΣΤΡΩΜΑ

Περίπου μισή ώρα πριν το ηλιοβασίλεμα το μεικτό στρώμα μετατρέπεται σε αυτό που ονομάζεται υπολειπόμενο στρώμα. Η τύρβη του μεικτού στρώματος κατευνάζεται και επιτυγχάνεται μια ουδέτερη σταθερότητα. Στη φάση αυτή του υπολειπόμενου στρώματος, λαμβάνουν χώρα ορισμένες χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ρύπων, οι οποίες παράγουν νέα προϊόντα, είτε αέρια τα οποία διαφεύγουν, είτε σωματίδια τα οποία δημιουργούν ίζημα. Το κύριο χαρακτηριστικό του υπολειπόμενου στρώματος είναι τα επίπεδα υγρασίας, τα οποία αυξάνουν. Ακόμη το προφίλ της εικονικής ενδεχόμενης θερμοκρασίας δείχνει αδιαβατική συμπεριφορά σε αυτό το είδος στρώματος. Το υπολειπόμενο στρώμα παρά τα χαρακτηριστικά του, δεν ανήκει στο οριακό στρώμα. Αυτό συμβαίνει καθώς το στρώμα αυτό

δεν έρχεται σε επαφή με το έδαφος, λόγω της ύπαρξης του νυχτερινού σταθερού στρώματος το οποίο την αποτρέπει.

ΣΤΑΘΕΡΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, στο επίπεδο του εδάφους σχηματίζεται το σταθερό οριακό στρώμα. Το είδος οριακού στρώματος αυτό, χαρακτηρίζεται από σταθερές ροές ανέμου με πολύ μικρότερα ποσοστά τύρβης. Η σταθερότητα του στρώματος αυτή επιτρέπει την εκκένωση των ρύπων μόνο κατά την οριζόντια κατεύθυνση, ένα φαινόμενο που ονομάζεται fanning. Οι εντάσεις του ανέμου στα επίπεδα αυτά παραμένουν χαμηλές σε αντίθεση με μεγαλύτερα ύψη του οριακού στρώματος όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η κορυφή του σταθερού οριακού στρώματος συμπίπτει με την αρχή του υπολειπόμενου οριακού στρώματος δημιουργώντας αναμειξείς. Οι νυχτερινοί άνεμοι εμφανίζουν περίπλοκες συμπεριφορές καθώς οι στροβιλισμοί του ανέμου λόγω αυτών των αναμειξεων είναι αντιστρόφως ανάλογες με τη μορφολογία του εδάφους. Οι διαφορές στην ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, καθώς ενδέχεται σε επιφανειακό επίπεδο να επικρατεί ήρεμος άνεμος ενώ σε υψόμετρο 200m οι ταχύτητες του ανέμου να ανέρχονται σε 10-30m/s και σε μεγαλύτερα υψόμετρα να λαμβάνουν τιμές ανάλογες της γεωστροφικής τιμής. Το σταθερό οριακό στρώμα ενδέχεται να σχηματισθεί και κατά τη διάρκεια της μέρας, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου ένα θερμό ρεύμα αέρα έρχεται σε επαφή με μια χαμηλής θερμοκρασίας επιφάνεια, παραδείγματος χάρη κοντά στις ακτές.



Σχήμα 3.4: Δομή οριακού στρώματος συναρτήσει της ημερήσιας ώρας.

3.2 Χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων σε διατάξεις αεροδυναμικής σήραγγας, ζωτικής σημασίας είναι η προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Κατά τις αρχικές μελέτες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, εξήχθησαν επαρκή δεδομένα για την περιγραφή της δομής του, όμως ανεπαρκή για την ορθή προσομοίωση του σε πειράματα ατμοσφαιρικών ροών. Αρκετά αργότερα χρονικά, με βάση πληθώρα εργαστηριακών μετρήσεων, αναπτύχθηκαν εμπειρικές εξισώσεις για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του, οι οποίες επιτρέπουν και την προσομοίωση του.

Κατά την προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος σε περιβάλλον αεροδυναμικής σήραγγας ελέγχονται και εξετάζονται τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Η καθ' ύψος κατανομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου για τις τρεις κατευθύνσεις του χωρικά.
- Η καθ' ύψος κατανομή της έντασης της τύρβης του ανέμου.
- Η καθ' ύψος κατανομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης του ανέμου.
- Το φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας της τύρβης του ανέμου.

Περαιτέρω ανάλυση περί των παραπάνω ακολουθεί στη συνέχεια.

3.2.1 Μέση Ταχύτητα.

Ανά τα χρόνια, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές εξισώσεις για την περιγραφή της καθ' ύψος κατανομής της μέσης ταχύτητας. Ο Stevenson το 1880 πρότεινε τον παραβολικό νόμο, ο οποίος εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \sqrt{\frac{z + 22}{z_{ref} + 22}} \quad (3.2.1)$$

Όπου:

- \bar{u} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα
- \bar{u}_{ref} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα αναφοράς
- z (m) είναι το ύψος
- z_{ref} (m) είναι το ύψος αναφοράς

Αργότερα, το 1916 ο Hellman πρότεινε τον εκθετικό νόμο, ο οποίος διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left(\frac{z - d}{z_{ref} - d} \right)^a \quad (3.2.2)$$

Όπου:

- \bar{u} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα.
- \bar{u}_{ref} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα αναφοράς.
- z (m) είναι το ύψος.
- z_{ref} (m) είναι το ύψος αναφοράς και λαμβάνεται ίσο με 10m.
- α εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους.

Συγκεκριμένα οι τιμές του εκθέτη α για διάφορους τύπους μορφολογίας εδάφους, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Μορφολογία Εδάφους	Τιμή Εκθέτη α
Λίμνη, ωκεανός ομαλό σκληρό έδαφος	0.10
Χαμηλό γρασίδι	0.15
Ψηλή βλάστηση, θάμνοι	0.20
Πυκνή δασική περιοχή	0.25
Μικρή πόλη με λίγα δέντρα και θάμνους;	0.30
Αστική περιοχή με ψηλά κτήρια	0.40

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές του εκθέτη α για διάφορους τύπους εδάφους.

Η πιο πρόσφατη και πλέον ευρέως γνωστή έκφραση για περιγραφή της μέσης ταχύτητας αποτελεί η μαθηματική εξίσωση η οποία προτάθηκε από τον Sutton το 1949 και πρόκειται για τον λογαριθμικό νόμο:

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k} \cdot \ln \left[\frac{z - d}{z_0} \right] \quad (3.2.3)$$

Όπου:

- \bar{u} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα.
- u^* (m/s) είναι η ταχύτητα τριβής που ορίζεται ως:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.2.4)$$

με τ_0 την διατμητική τάση στο έδαφος και ρ την πυκνότητα του αέρα.

- z_0 (m) το μήκος τραχύτητας του εδάφους.
- z (m) είναι το ύψος.
- d (m) είναι το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης
- k η σταθερά Von Karman με τιμή 0.41

Ως επίπεδο μηδενικής μετατόπισης d ορίζεται το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, στο οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου θεωρείται μηδενική λόγω της ύπαρξης εμποδίων στην κατεύθυνση του ανέμου. Κατά κύριο λόγο εκτιμάται ότι παίρνει τιμή κοντά στα 2/3 του μέσου

ύψους h των εμποδίων, εκτός από περιπτώσεις όπου η κατανομή των εμποδίων είναι πολύ πυκνή, όπου τότε ταυτίζεται με το ύψος h των εμποδίων.

Το μήκος τραχύτητας z_0 αποτελεί έναν όρο ο οποίος συμπεριλαμβάνει στην εξίσωση την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας με την οποία είναι σε επαφή η ροή. Λαμβάνει τιμές από 0.10 έως 0.30 του μέσου ύψους των εμποδίων, χωρίς να είναι όμως ισοδύναμο με αυτό καθώς εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα αλλά και το σχήμα των στοιχείων τραχύτητας.

Τυπικές τιμές του μήκους τραχύτητας z_0 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Επιφάνεια	$z_0(m)$
Πάγος	10^{-5}
Θάλασσα, Έρημος, Χιόνι	10^{-3}
Χαμηλή βλάστηση	10^{-2}
Μέτριου ύψους βλάστηση	0.05
Δάση	1
Προάστια	2
Κέντρο πόλης	5-10

Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές μήκους τραχύτητας εδάφους.

3.2.2 Ένταση τύρβης.

Όσον αφορά το φαινόμενο της τύρβης, κατά την προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, το μέγεθος με το οποίο γίνεται η περιγραφή της είναι η ένταση της τύρβης. Η ένταση της τύρβης ορίζεται ως εξής:

$$I_u = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad (3.2.5)$$

Όπου:

- \bar{u} (m/s) είναι η μέση ταχύτητα.
- u_{rms} (m/s) είναι η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για την οποία ισχύει:

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'(t)^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i'^2} \quad (3.2.6)$$

Αντίστοιχα ορίζεται η ένταση τύρβης και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας και για τις ταχύτητες των υπόλοιπων κατευθύνσεων

Όπως και για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος, έτσι και στην ένταση τύρβης αντιστοιχούν εμπειρικές σχέσεις οι οποίες έχουν εξαχθεί μέσω πειραματικών διαδικασιών. Την πλέον απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη έκφραση η οποία δίδει την καθ' ύψος ένταση τύρβης αποτελεί η παρακάτω:

$$I_u = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.2.7)$$

Η σχέση αυτή έχει προκύψει μετά από συνδυασμό του λογαριθμικού νόμου με την εμπειρική έκφραση για την τυπική απόκλιση της ταχύτητας:

$$u_{rms} = 2.5 \cdot u^* \quad (3.2.8)$$

Μια περισσότερο περίπλοκη, για την οποία όμως απαιτείται υπολογισμός του ύψους τραχύτητας πριν την εφαρμογή, αποτελεί η κατά ESDU 75001 εμπειρική σχέση:

$$I_u = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} [0.867 + 0.566 \cdot \log(z) - 0.246(\log(z))^2] \cdot \lambda \quad (3.2.9)$$

$$\mu \epsilon \lambda = \begin{cases} \frac{0.76}{z_0^{0.07}} & \text{για } z_0 > 0.02m \\ 1 & \text{για } z_0 \leq 0.02m \end{cases}$$

Εκτός των προαναφερθέντων, υπάρχουν και άλλες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της έντασης τύρβης.

3.2.3 Ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης.

Η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο παρέχει μια ένδειξη για την κλίμακα της τύρβης του ανέμου. Όπως και για τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους τύρβης μέσω εμπειρικών σχέσεων.

Κατά ESDU 75001 υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$Lu_x = 25 \cdot \frac{z^{0.35}}{z_0^{0.063}} \quad (3.2.10)$$

Εξαρτώμενης δηλαδή μόνο από το μήκος τραχύτητας z_o .

Κατά ESDU 74031 υπολογίζεται με τη βοήθεια του φάσματος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και συγκεκριμένα μέσω του μεγίστου της συχνότητας στο φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας f_{max} :

$$Lu_x = \frac{0.146 \cdot \bar{u}_z}{f_{max}} \quad (3.2.11)$$

Καθώς όμως η ακρίβεια των εμπειρικών συσχετίσεων αυτών είναι μικρή, η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης υπολογίζεται μέσω του ορισμού της με τη βοήθεια λογισμικών ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Συγκεκριμένα η μέθοδος υπολογισμού της απαιτεί την χρήση μιας συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Πιο συγκεκριμένα, για δυο τυχαίες χρονικές στιγμές t_1 και t_2 η αυτοσυσχέτιση μιας χρονοσειράς $u(t)$ προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$R(t_1, t_2) = \overline{[u(t_1)u(t_2)]} \quad (3.2.12)$$

Καθώς η χρονοσειρά της ταχύτητας $u(t)$ αποτελεί μια στατιστικά παγιωμένη χρονοσειρά, η αυτοσυσχέτιση δεν εξαρτάται από τις χρονικές στιγμές κάθε αυτές, αλλά από την διαφορά τους $\tau = t_1 - t_2$

Η εξίσωση αυτοσυσχέτισης επομένως μετατρέπεται στην:

$$R(\tau) = \overline{[u(t)u(t + \tau)]} \quad (3.2.13)$$

Στη συνέχεια ορίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης η οποία παρουσιάζεται αδιαστατοποιημένη ως εξής:

$$r(\tau) = \frac{\overline{[u(t)u(t + \tau)]}}{\bar{u}^2} \quad (3.2.14)$$

Μπορεί επομένως να οριστεί η σχέση ολοκληρωτικής κλίμακας χρόνου της τύρβης:

$$Tu_x = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (3.2.15)$$

Από την οποία προκύπτει η ζητούμενη έκφραση ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης:

$$Lu_x = Tu_x \cdot \bar{u} \quad (3.2.16)$$

Κεφάλαιο 4

Πειραματική Διάταξη και Τεχνικές Μετρήσεων

4.1 Η αεροδυναμική σήραγγα.

Ο χώρος στον οποίο εκτελέστηκαν οι πειραματικές μετρήσεις, είναι η αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Η σήραγγα αυτή, συνολικού μήκους 32m, αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων, καθώς διαθέτει τρεις διαφορετικούς χώρους δοκιμών, καλύπτοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

- Ο μικρός χώρος δοκιμών έχει ύψος 1.4m και πλάτος 1.8m, με δυνατότητα ανάπτυξης ταχύτητας ροής αέρα έως και 60m/s.
- Ο μεσαίος χώρος δοκιμών, στον οποίο έλαβε χώρα και το εν λόγω πείραμα, έχει ύψος 2.5m, πλάτος 3.5m και μήκος 12m και έχει δυνατότητα ανάπτυξης ταχύτητας ροής αέρα έως 17m/s.
- Ο μεγάλος χώρος δοκιμών έχει διαστάσεις πλάτους 4.5m και ύψους 3.5m με δυνατότητα ανάπτυξης ταχύτητας ροής αέρα έως 9.5m/s.

Από άποψη ταξινόμησης, όπως αποφαινεται και από τις παραπάνω πληροφορίες, η αεροδυναμική σήραγγα ανάγεται στις υποηχητικές. Επιπλέον από άποψη δομής, όπως αναδεικνύεται στο παρακάτω σχήμα, πρόκειται για κλειστού τύπου αεροσήραγγα.

Το μεσαίο τμήμα δοκιμών αποτελεί το πλέον χρησιμοποιούμενο τμήμα για τις διάφορες μελέτες. Στην εγκατάσταση του συμπεριλαμβάνονται:

- Δομές φωτισμού, είτε φυσικού, είτε τεχνητού, εντοιχισμένων για αποφυγή αύξησης της τύρβης.
- Περιστρεφόμενη τράπεζα (turntable), κυκλικής διατομής διαμέτρου 2.4m, η οποία είναι συνδεδεμένη σε ηλεκτροκινητήρα και ελέγχεται μέσω χειριστηρίου εξωτερικά της αεροδυναμικής σήραγγας. Επιπλέον η τράπεζα φέρει ενδείξεις μοιρών, για τον εύκολο υπολογισμό των περιστροφών.
- Βραχίονα (Τραβέρσα) συνδεδεμένου με ηλεκτροκινητήρες, προσφέροντας κίνηση τριών βαθμών ελευθερίας κατά μήκος των τριών αξόνων του χώρου. Ο έλεγχος του βραχίονα γίνεται μέσω λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή εκτός της αεροδυναμικής σήραγγας.

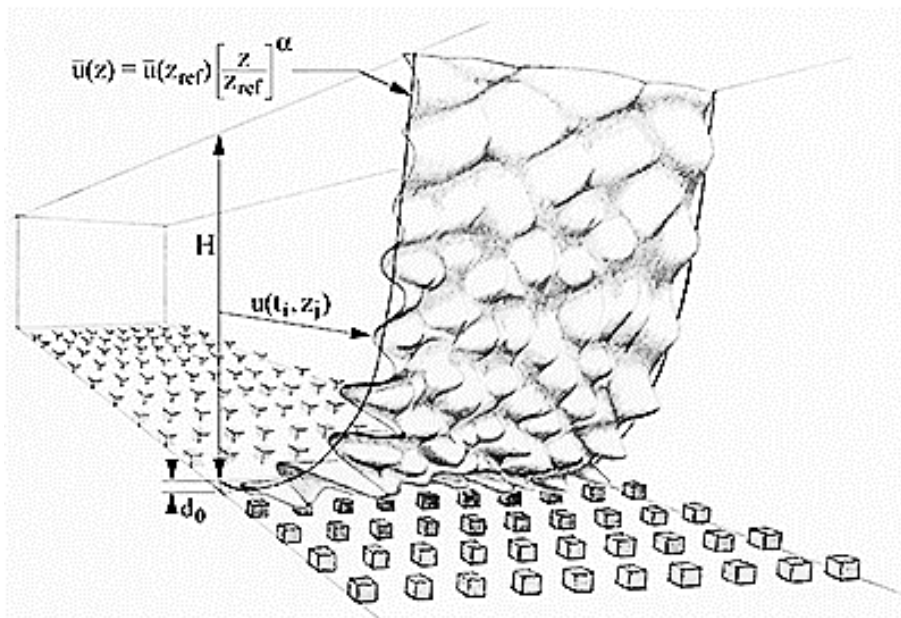
Στην αρχή του μεσαίου τμήματος βρίσκεται εγκατεστημένος ο γενεσιουργός μηχανισμός ροής αέρα. Πρόκειται για φουσητήρα 8 πτερυγίων, διαμέτρου 2.67m, τροφοδοτούμενου από ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος ισχύος 300kW

4.2 Προσομοίωση Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος Αεροσήραγγα

Για την προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στην αεροδυναμική σήραγγα, ακολουθήθηκαν, όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία, παθητικές μέθοδοι. Πιο συγκεκριμένα, οι παθητικές αυτές μέθοδοι αφορούν την εισαγωγή στο τμήμα δοκιμών της αεροδυναμικής σήραγγας, κατάλληλων διατάξεων και δομών, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ομαλοποίηση και ανάμιξη της ροής, όπως επίσης και για την γένεση τύρβης. Οι δομές αυτές αποτελούνται από πλέγματα, οριζόντιες και κατακόρυφες πλάκες, ειδικά διαμορφωμένους τάπητες και άλλα.

4.2.1 Στοιχεία Τραχύτητας

Ιδιότητα των στοιχείων τραχύτητας ως δομή προσομοίωσης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αποτελεί η προσομοίωση της τραχύτητας του εδάφους. Κατά βάση επιλέγονται κυβικές δομές τοποθετούμενες σε λείους τάπητες. Ανάλογα την εφαρμογή και τις συνθήκες των πειραματικών μετρήσεων προκύπτει το μέγεθος των κυβικών στοιχείων όπως επίσης και η πυκνότητα τοποθέτησης τους.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση διαμόρφωσης οριακού στρώματος με στοιχεία τραχύτητας.

Στην προκείμενη πειραματική διάταξη, όπως προτείνει ο Z. Xing, επιλέχθηκε πλευρά κύβων $k = 5\text{cm}$ και απόσταση μεταξύ τους $D = 20\text{cm}$.

Το ύψος του οριακού στρώματος δ υπολογίζεται μέσω της έκφρασης:

$$\frac{k}{\delta} = e^{\left\{ \left(\frac{2}{3} \ln\left(\frac{D}{\delta}\right) - 0.1161 \cdot \sqrt{\frac{2}{C_f} + 2.05} \right) \right\}} \quad (4.2.1)$$

Με

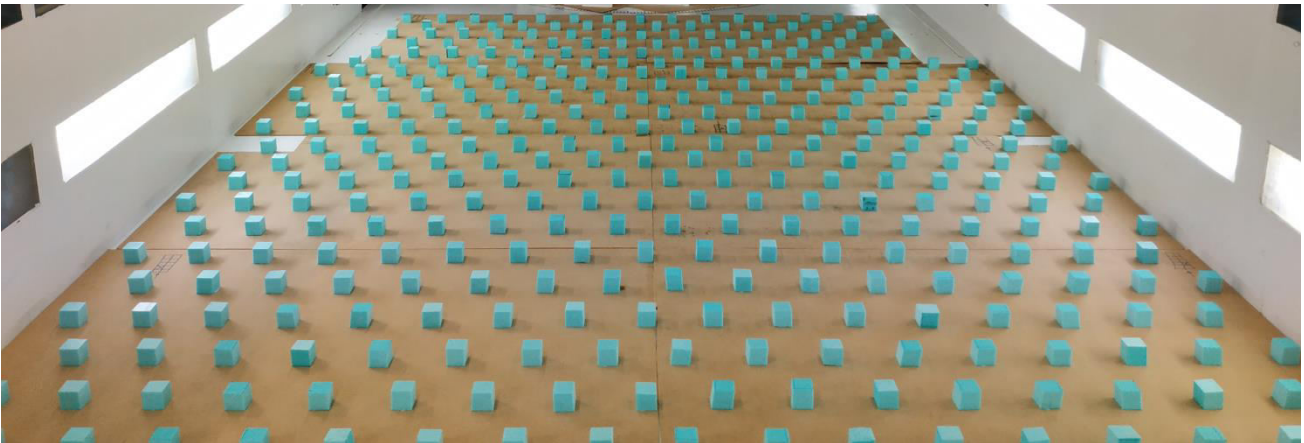
$$C_f = 0.136 \cdot \left(\frac{a}{1+a} \right)^2 \quad (4.2.2)$$

όπου το μέγεθος a ορίζεται ως ο εκθέτης κατανομής της μέσης ταχύτητας.

Προϋπόθεση για την ισχύ της παραπάνω σχέσης αποτελεί η έκφραση:

$$30 < \frac{\delta \cdot D^2}{k^3} < 2000 \quad (4.2.3)$$

Τα κυβικά στοιχεία, κατασκευασμένα από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ) τοποθετήθηκαν σε έξι τμήματα τάπητα από κόντρα πλακέ (MDF) μήκους 110 cm και πλάτους 175 cm και έτσι ο συνολικός τάπητας μήκους 330 cm τοποθετήθηκε ανάντι του μελετούμενου μοντέλου.



Σχήμα 4.2: Διάταξη στοιχείων τραχύτητας για την αναπαράσταση του οριακού στρώματος.

4.2.2 Οβελίσκοι.

Ο σκοπός τοποθέτησης διάταξης οβελίσκων στο τμήμα δοκιμών έγκειται στην ανάγκη ανάμειξης της ροής και αύξησης του οριακού στρώματος. Η μορφή των οβελίσκων που υιοθετήθηκε είναι τριγωνικού σχήματος, όπως προτάθηκε από τον Irwin. Κατά τον Irwin, για

αεροδυναμική σήραγγα ύψους $H = 2.5m$ στην οποία αναπτύσσεται οριακό στρώμα που ακολουθεί τον εκθετικό νόμο (βλ. εξ 3.1) με εκθέτη α , οι διαστάσεις και η διάταξη των οβελίσκων υπολογίζονται από τις παρακάτω εκφράσεις:

$$h = 1.39 \cdot \frac{\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \quad (4.2.4)$$

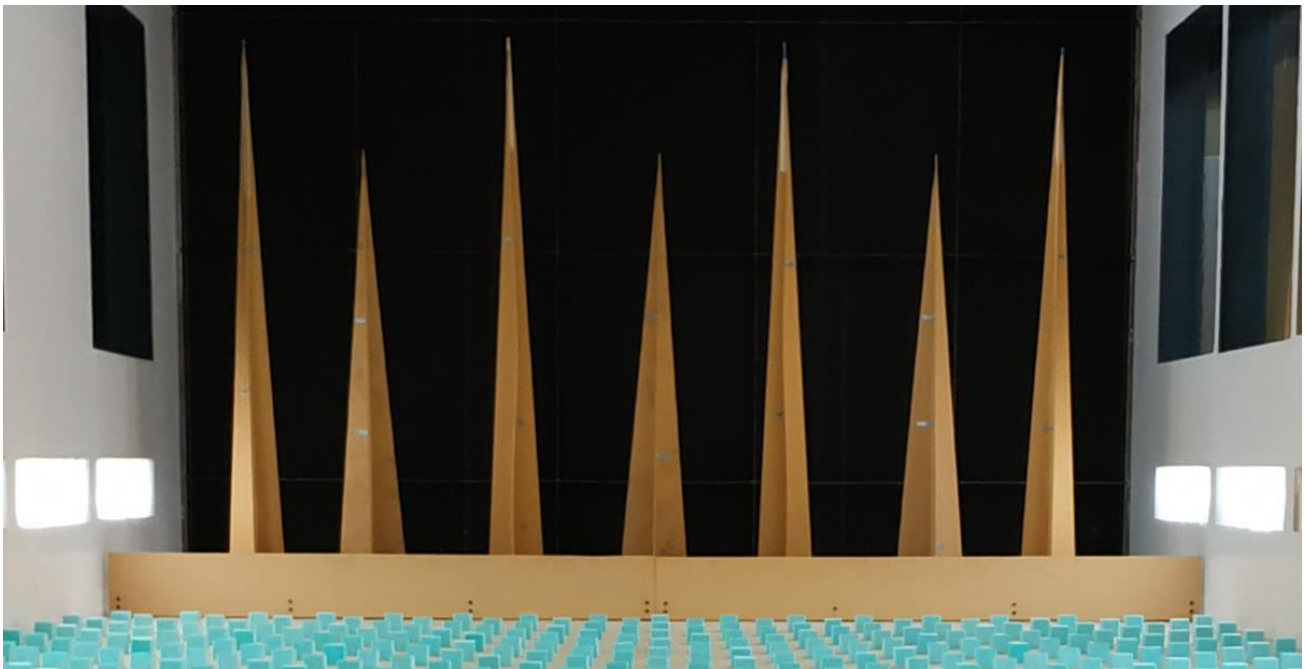
$$\frac{b}{h} = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{H}{\delta} \cdot \frac{\psi}{(1 + \psi)} \quad (4.2.5)$$

$$\psi = \frac{\beta}{(1 - \beta)^2} \left\{ \frac{2}{1 + 2\alpha} + \beta - \frac{1.13\alpha}{(1 + \alpha)(1 + \frac{\alpha}{2})} \right\} \quad (4.2.6)$$

$$\beta = \frac{\delta}{H} \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (4.2.7)$$

Με βάση διαφόρων δοκιμών και των παραπάνω, επιλέχθηκαν δυο διαφορετικά είδη οβελίσκων. Συγκεκριμένα οι διαστάσεις τους:

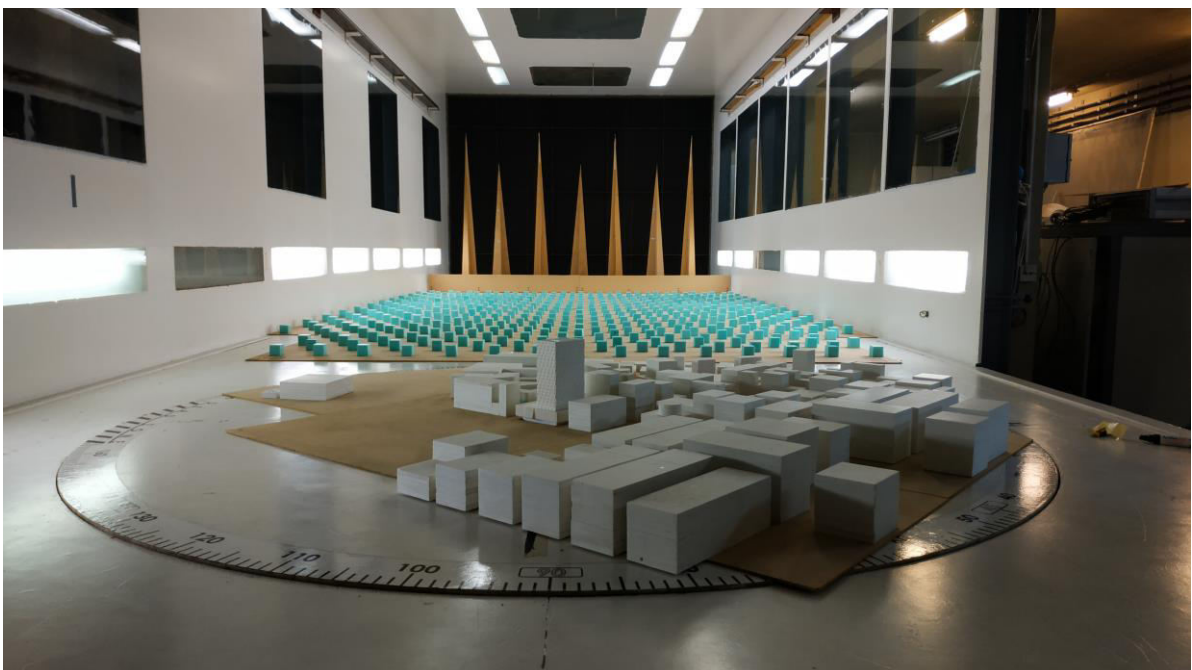
	Οβελίσκος A	Οβελίσκος B
Ύψος h	186cm	150cm
Πλάτος b	20cm	24.5cm



Σχήμα 4.3: Διάταξη οβελίσκων για την αναπαράσταση του οριακού στρώματος.

4.2.3 Διάταξη Προσομοίωσης Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος.

Με βάση τα παραπάνω και την πρόταση του Irwin, για την προσομοίωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στην αεροδυναμική σήραγγα, επιλέχθηκε ένας συνδυασμός τριγωνικών οβελίσκων, κυβικών στοιχείων τραχύτητας και ειδικά διαμορφωμένου τοίχιου κάθετου στη ροή. Με την τοποθέτηση και των έξι τμημάτων τάπητα των στοιχείων τραχύτητας επιτυγχάνεται η διαμόρφωση οριακού στρώματος υψηλής διάτμησης, στοιχείο επιθυμητό για την προκείμενη πειραματική διάταξη, καθώς αναπαρίσταται μοντέλο πυκνοδομημένης πόλης και συγκεκριμένα της περιοχής του Πειραιά. Το ειδικά διαμορφωμένο τοίχιο με τη σειρά του, είναι υπεύθυνο για την ανύψωση του οριακού στρώματος σε μεγαλύτερα επίπεδα από αυτά που επιτυγχάνονται με τη χρήση των τριγωνικών οβελίσκων.



Σχήμα 4.4: Διάταξη οβελίσκων και στοιχείων τραχύτητας για την αναπαράσταση του οριακού στρώματος.

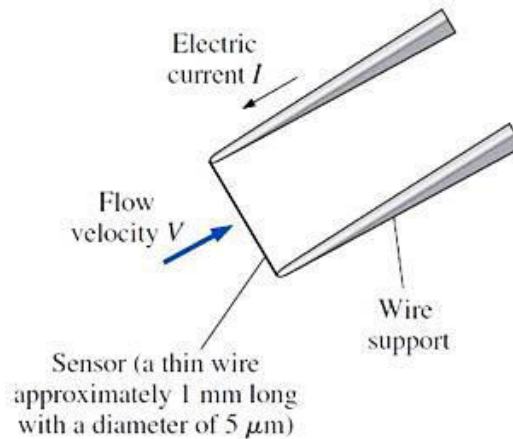
4.3 Μέτρηση χαρακτηριστικών οριακού στρώματος στην αεροσήραγγα.

Για την μέτρηση των χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος στην αεροδυναμική σήραγγα επιλέχθηκε η μέθοδος του θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας (Hot Wire Constant Temperature Anemometer). Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα μέτρησης όχι μόνο της ταχύτητας του ανέμου, αλλά λόγω της διάταξης και της αρχής λειτουργίας της, επιτρέπει και την μέτρηση της τύρβης. Το θερμό νήμα είναι ικανό να ανιληφθεί τις τάχιστες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με υψηλή ακρίβεια, σε κλίμακα συχνοτήτων της τάξης των 1 kilohertz.

4.3.1 Θερμό Νήμα.

4.3.1.1 Αρχή λειτουργίας.

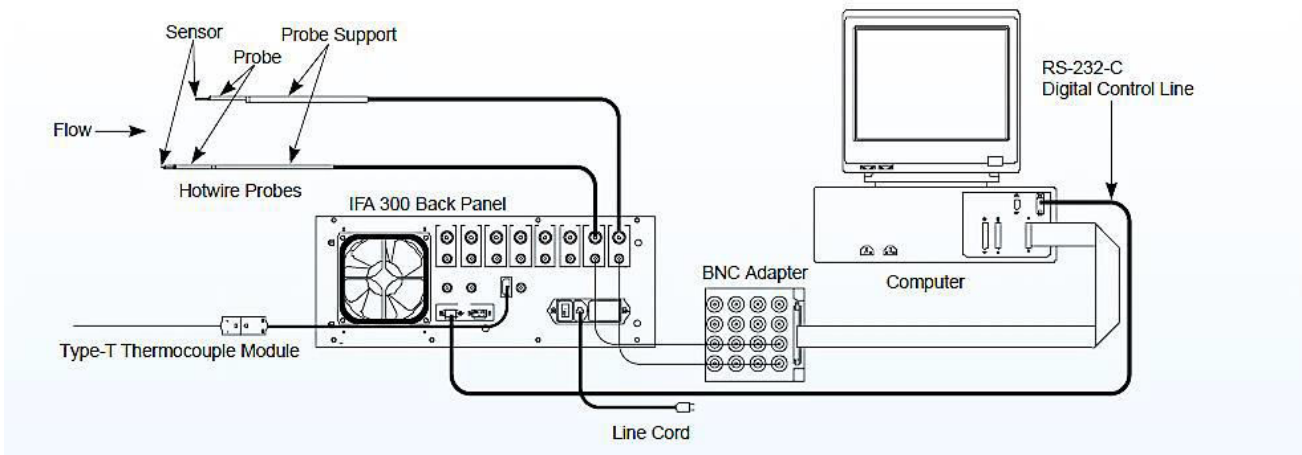
Η ανεμομέτρηση με χρήση θερμού νήματος βασίζεται στο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας. Συγκεκριμένα ο αισθητήρας, ο οποίος δεν είναι τίποτα άλλο από ένα λεπτό μεταλλικό νήμα, συνδέεται σε ένα κύκλωμα ελέγχου που αποτελείται από μια γέφυρα Wheatstone και έναν ενισχυτή τάσης. Ο ενισχυτής τάσης είναι το εξάρτημα στο οποίο βασίζεται η μέθοδος. Κύρια ιδιότητα του αποτελεί η διατήρηση της γέφυρας Wheatstone σε ισορροπία. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του αέρα έχουν αντίκτυπο στην απαγωγή θερμότητας από το θερμό νήμα. Για τη διατήρηση ισορροπίας ο ενισχυτής μεταβάλλει συνεχώς το διαρρέον ρεύμα του νήματος και έτσι οι αντίστοιχες μεταβολές της τάσης είναι εφικτό να καταγραφούν. Συσχετίζεται επομένως η διακύμανση του ανέμου με την διακύμανση της τάσης της γέφυρας.



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση του αισθητήρα θερμού νήματος.

4.3.1.2 Διάταξη θερμού νήματος στο εργαστήριο

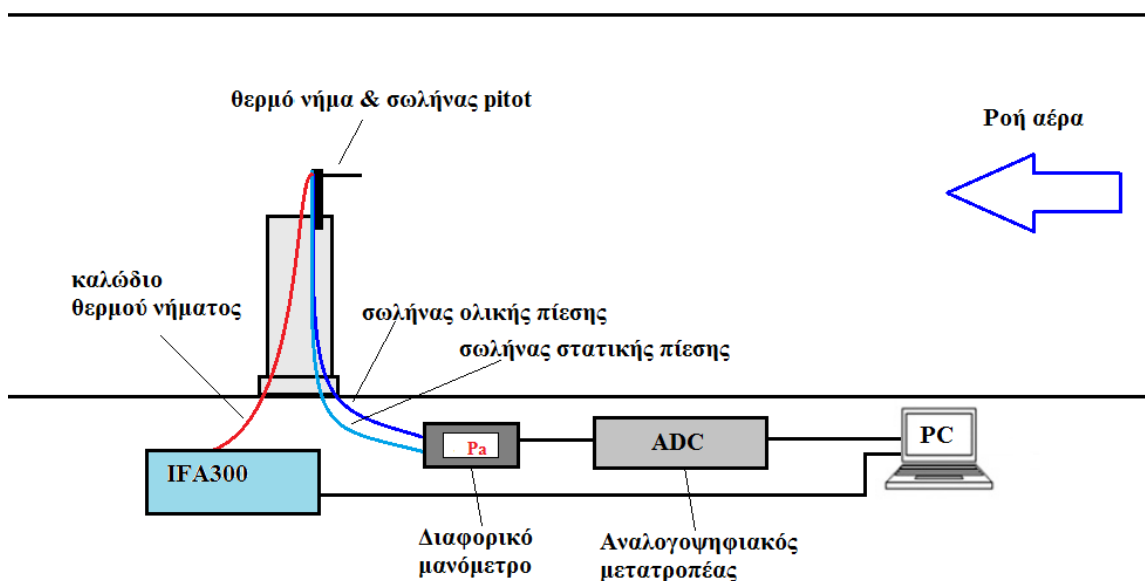
Η διάταξη θερμού νήματος του εργαστηρίου είναι ως εξής. Το θερμό νήμα της εταιρίας TSI με κωδικοποίηση μοντέλου Model 1201-06 Disposable Probe, βρίσκεται τοποθετημένο στη βάση στήριξης του, η οποία με τη σειρά της βρίσκεται πακτωμένη στον βραχίονα-τραβέρσα της αεροδυναμικής σήραγγας. Η βάση στήριξης είναι της TSI, το μοντέλο Model 1155-6 Standard Probe Support και υποστηρίζει επίσης αισθητήρες μέτρησης σε δύο διαστάσεις. Μέσω καλωδιώσεων οι οποίες εξέρχονται της αεροδυναμικής σήραγγας, το θερμό νήμα συνδέεται με το ανεμόμετρο IFA-300. Το σήμα του ανεμομέτρου αφού πρώτα διέλθει ενός μετασχηματιστή καταλήγει σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή και συγκεκριμένα του λογισμικού ThermalPro, το οποίο επιτρέπει την οπτικοποίηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.6: Διάταξη μέτρησης θερμού νήματος.

4.3.2 Βαθμονόμηση Διάταξης Θερμού Νήματος.

Το θερμό νήμα για την ορθή λειτουργία του απαιτεί βαθμονόμηση προγενέστερα από την μέτρηση των χαρακτηριστικών του οριακού στρώματος στην αεροδυναμική σήραγγα. Η βαθμονόμηση γίνεται με σκοπό την συσχέτιση της τάσης της γέφυρας του κυκλώματος ελέγχου του θερμού νήματος με την ταχύτητα της ροής. Η ταχύτητα της ροής υπολογίζεται με χρήση σωλήνα Pitot, ο οποίος τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στον αισθητήρα, με προϋπόθεση να μην διαταράσσει την τοπική ροή του νήματος. Ο σωλήνας Pitot είναι συνδεδεμένος με το διαφορικό μανόμετρο FC016 της Furness Controls Ltd και στη συνέχεια το σήμα, αφού επεξεργαστεί από αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα, επεξεργάζεται μέσω λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μετράται ένα εύρος ταχυτήτων από μηδενική έως λίγο αυξημένη σε σχέση με το όριο που τίθεται από το πείραμα. Ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται μέσω ελέγχου των στροφών του ανεμιστήρα, οι οποίες αντιστοιχίζονται με τα μεγέθη της ταχύτητας και της τάσης της γέφυρας του ανεμομέτρου για τις δεδομένες συνθήκες.



Σχήμα 4.7: Διαδικασία βαθμονόμησης.

4.3.3 Αποτέλεσμα Βαθμονόμησης.

Η ταχύτητα μέσω του σωλήνα Pitot υπολογίζεται μέσω της μετρούμενης δυναμικής πίεσης από το διαφορικό μανόμετρο μέσω της σχέσης:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\rho}} \quad (4.3.1)$$

Όπου:

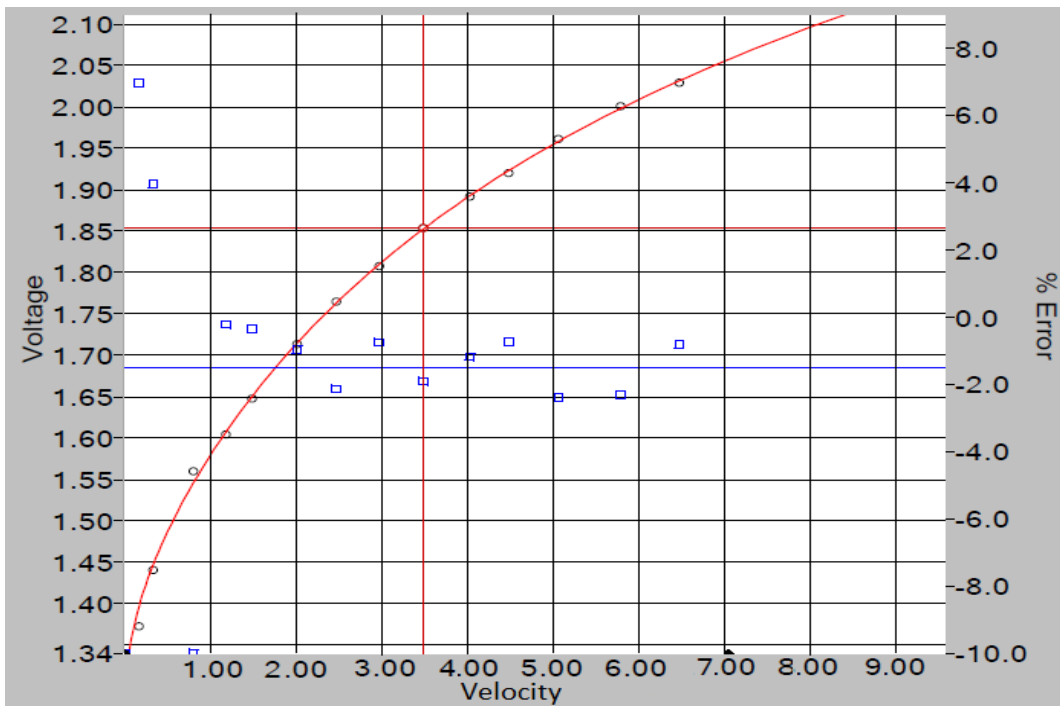
- $V \left(\frac{m}{s}\right)$, η ταχύτητα
- $q \text{ (Pa)}$, η δυναμική πίεση
- $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$, η πυκνότητα του ρευστού

Ταυτόχρονα με την ταχύτητα στον σωλήνα Pitot, γίνονται μετρήσεις της τάσης της γέφυρας μέσω του λογισμικού ThermalPro. Εισάγονται στο λογισμικό οι μετρούμενες ταχύτητες και τα σημεία τάσης-ταχύτητας παρεμβάλλονται από ένα πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού. Προκύπτει επομένως η καμπύλη βαθμονόμησης η οποία αποτελεί μια έκφραση της ταχύτητας συναρτήσει της τάσης της γέφυρας:

$$V = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3 + a_4 E^4 \quad (4.3.2)$$

Οι συντελεστές του πολυωνύμου αυτού προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία με χρήση 15 σημείων μέτρησης ως εξής:

- $a_0 = 108.6050$
- $a_1 = -267.7132$
- $a_2 = 246.7310$
- $a_3 = -102.2035$
- $a_4 = 16.4571$



Σχήμα 4.8: Καμπύλη βαθμονόμησης θερμού νήματος και τα σφάλματα μετρήσεων, σε περιβάλλον λογισμικού ThermalPro.

Μέσω του ThermalPro υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα:

$$MSE = 0.00169 \left(\frac{m^2}{s^2} \right) \tag{4.3.3}$$

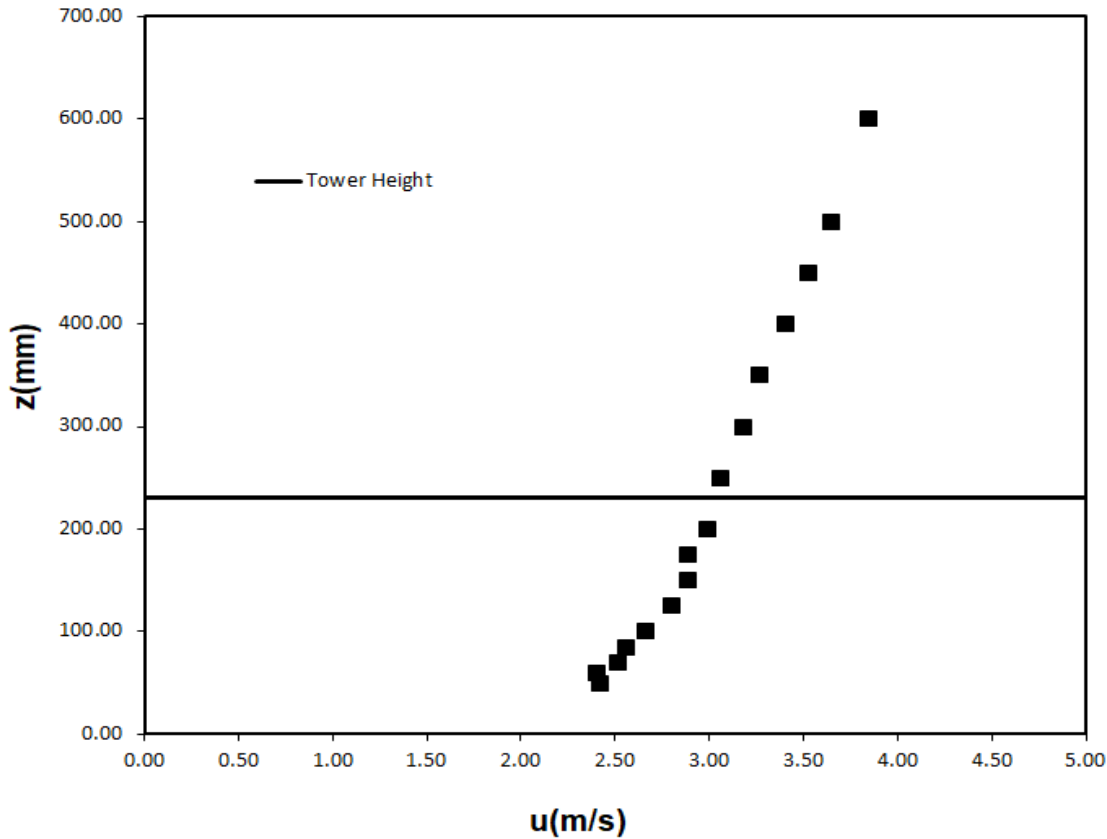
Το σχετικό σφάλμα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, παραμένει μικρό για το μεγαλύτερο πλήθος των σημείων καθώς δεν ξεπερνά το 2.5%. Η αύξηση του σφάλματος που εντοπίζεται στις μικρές ταχύτητες είναι κάτι αναμενόμενο.

4.3.4 Χαρακτηριστικά Οριακού Στρώματος.

Θεωρώντας ως αρχή των αξόνων το κέντρο του σημείου τοποθέτησης του μελετώμενου μοντέλου, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανάντι, σε απόσταση περίπου τριπλάσια του ύψους του μοντέλου, συγκεκριμένα στο σημείο (0.75,0,Z)[m], όπου Z θεωρούνται τα διάφορα ύψη μέτρησης. Το ύψος Z ελεγχόταν μέσω λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο έδινε τη δυνατότητα κίνησης μέσω εντολών στους ηλεκτροκινητήρες της τραβέρσας, εξωτερικά του περιβάλλοντος της αεροδυναμικής σήραγγας.

4.3.4.1 Κατανομή Μέσης Ταχύτητας

Η κατανομή της μέσης ταχύτητας του οριακού στρώματος προκύπτει ως εξής:



Σχήμα 4.9: Κατανομή μέσης ταχύτητας.

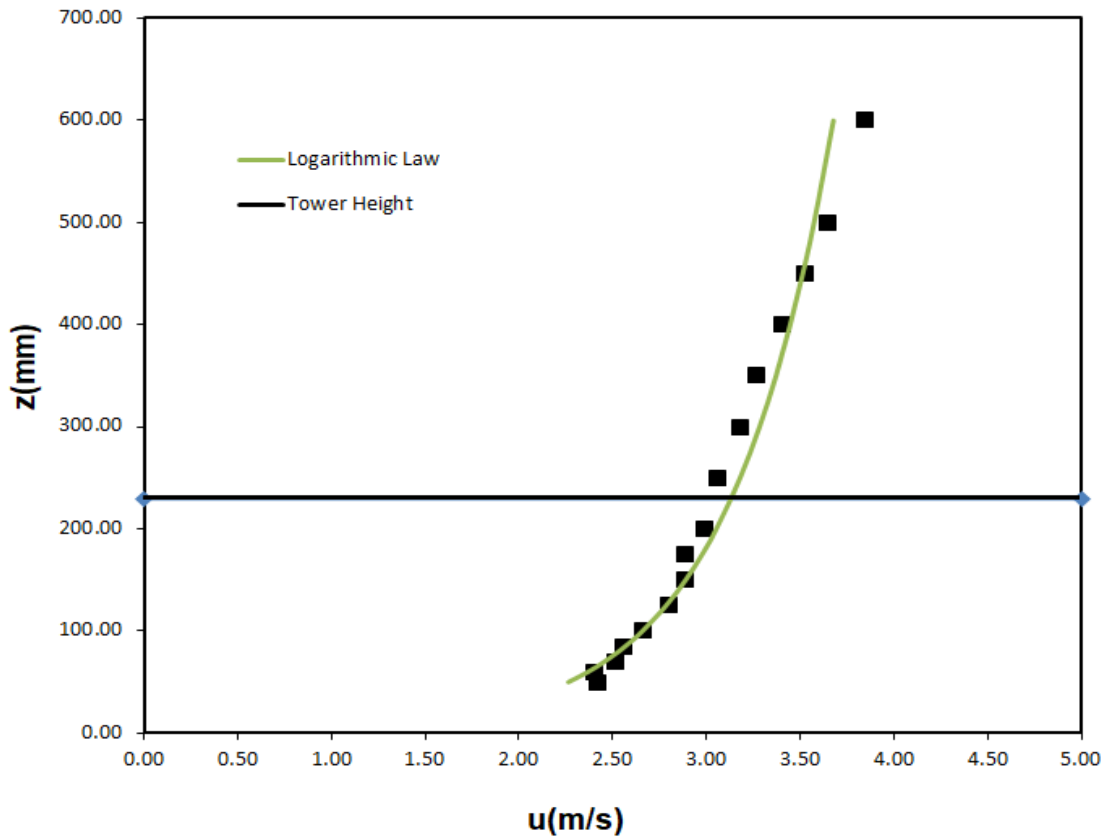
Για έλεγχο των αποτελεσμάτων, αρχικά θεωρήθηκε ότι οι κατανομές ακολουθούν τον λογαριθμικό νόμο και ακολούθησε προσαρμογή των σημείων για την εύρεση των σταθερών όρων. Για υπενθύμιση, ο λογαριθμικός νόμος δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\bar{u} = \frac{u^*}{k} \cdot \ln \left[\frac{z - d}{z_o} \right] \quad (4.3.4)$$

Οι σταθερές που προέκυψαν από την προσαρμογή των σημείων είναι:

- $u^* = 0.2275 \frac{m}{s}$
- $z_o = 0.9335 \text{ mm}$

Το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης d λαμβάνει αμελητέες τιμές και έτσι θεωρείται αυθαίρετα μηδενικό.

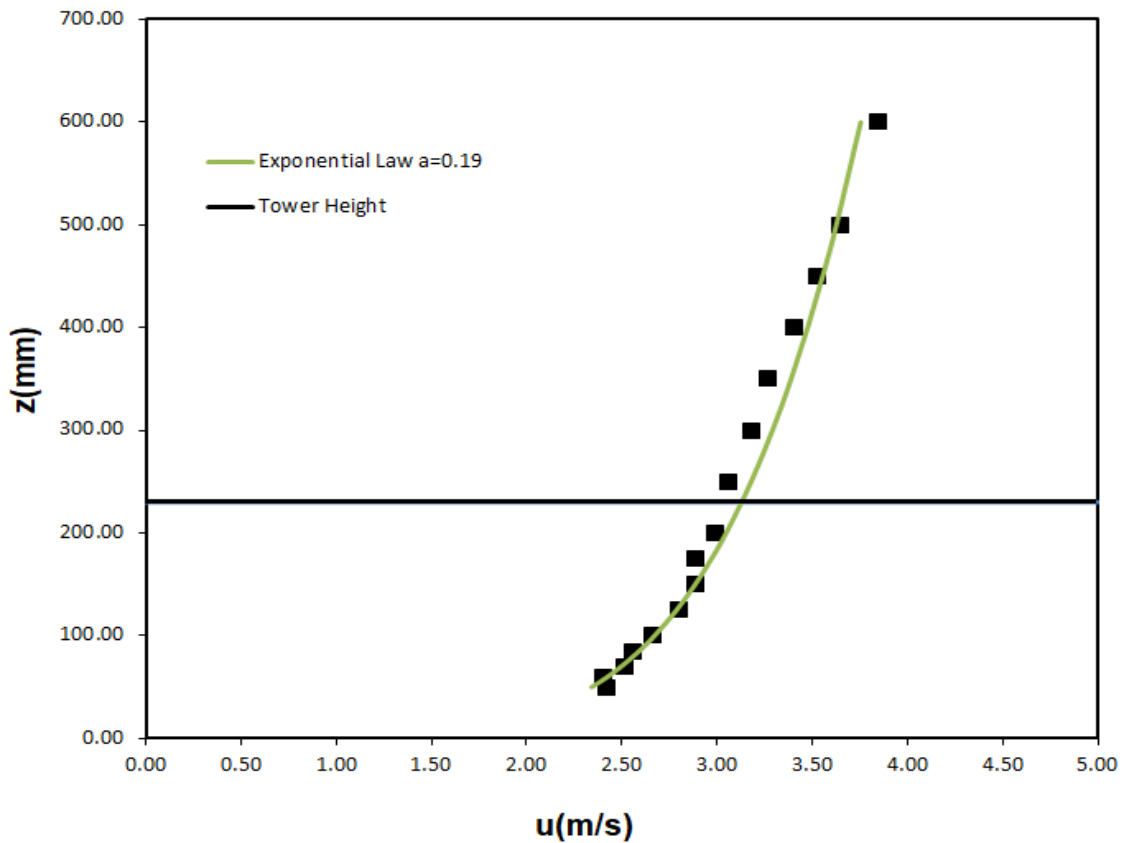


Σχήμα 4.10: Προσαρμογή λογαριθμικού νόμου στην κατανομή μέσης ταχύτητας.

Επιπλέον προσαρμόστηκε στις μετρηθείσες τιμές ο εκθετικός νόμος. Για υπενθύμιση ο εκθετικός νόμος προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left(\frac{z - d}{z_{ref} - d} \right)^{\alpha} \quad (4.3.5)$$

Το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης λαμβάνει πάλι μηδενική τιμή. Ως πρότυπο ύψος λαμβάνονται το $z_{ref} = 0.15m$ το οποίο αντιστοιχεί σε 50m σε πραγματική κλίμακα και η αντίστοιχη πρότυπη ταχύτητα στο σημείο αυτό προκύπτει $u_{ref} = 2.885m$. Ο εκθέτης της εκθετικής κατανομής για καλύτερη περιγραφή των αποτελεσμάτων βρέθηκε $\alpha = 0.19$.



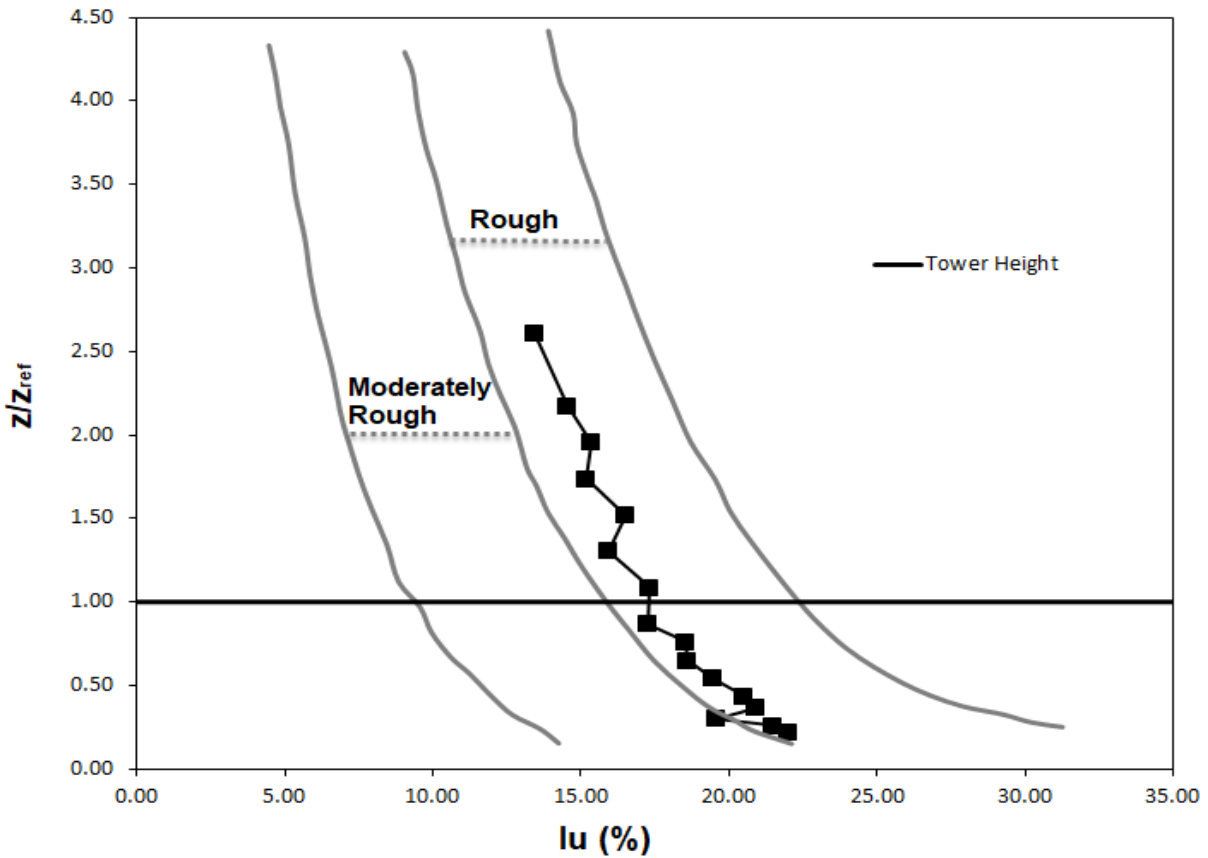
Σχήμα 4.11: Προσαρμογή εκθετικού νόμου στην κατανομή μέσης ταχύτητας.

4.3.4.2 Κατανομή Έντασης της Τύρβης.

Υπενθυμίζεται ότι η ένταση της τύρβης εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$I_u = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad (4.3.6)$$

Με u_{rms} την τυπική απόκλιση. Έτσι προκύπτει η παρακάτω κατανομή για την οποία η ένταση τύρβης δίνεται ποσοστιαία και το ύψος είναι αδιαστατοποιημένο με το ύψος του πύργου.



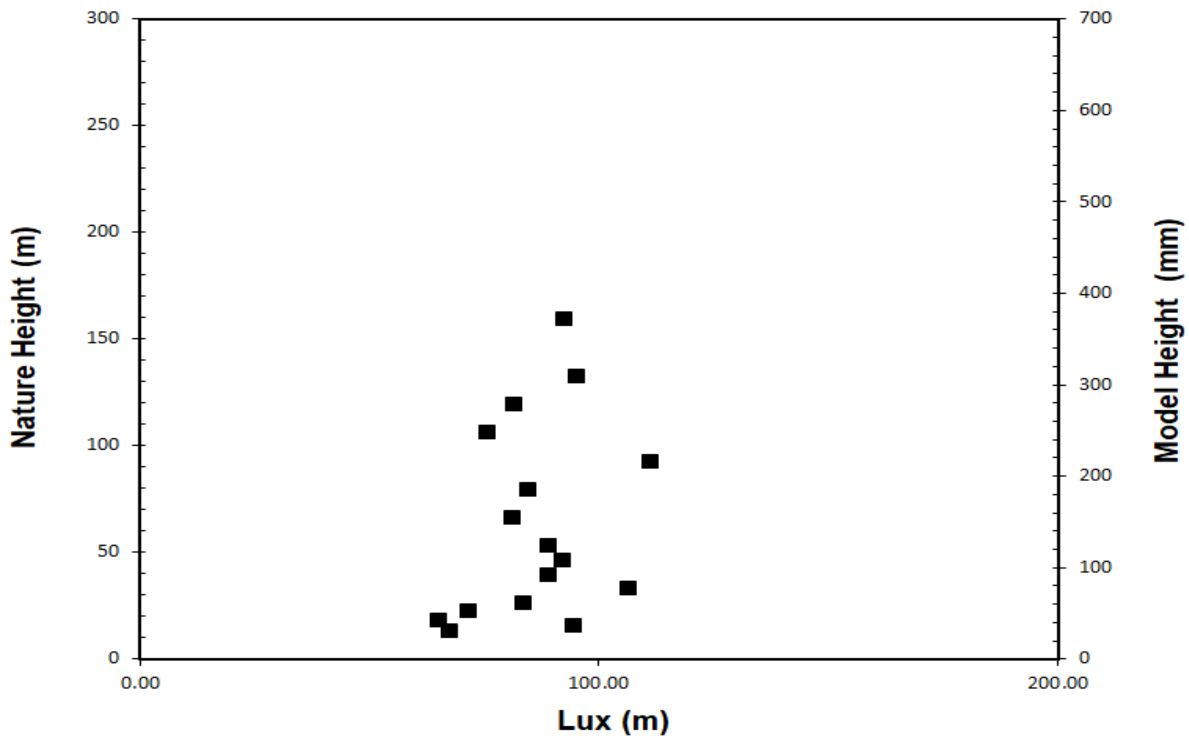
Σχήμα 4.12: Κατανομή έντασης της τύρβης και σύγκριση με πρότυπα.

Καθώς για το πείραμα γίνεται προσομοίωση ροής σε αστικά πλαίσια, λογική απόρροια είναι το οριακό στρώμα να παρουσιάζει μεγάλες εντάσεις τύρβης. Με βάση το παραπάνω σχήμα αποφαίνεται ότι η ένταση τύρβης δεν είναι η μέγιστη δυνατή και δεν αντιστοιχεί σε αστικό περιβάλλον. Όμως κατά την περιγραφή του μοντέλου που θα ακολουθήσει, γίνεται αντιληπτή η επιλογή αυτή. Η θέση του οικοδομήματος χωροταξικά είναι δίπλα σε θαλάσσια περιοχή και συγκεκριμένα σε λιμάνι. Λόγω ακριβώς αυτού επιλέχθηκε η ένταση τύρβης σε περισσότερο μεσαία επίπεδα, και όχι τόσο υψηλά.

4.3.4.3 Κατανομή ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους τύρβης.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η κλίμακα χρόνου της τύρβης προκύπτει μέσω εφαρμογής μιας συνάρτησης αυτοσυσχέτισης στην χρονοσειρά της ταχύτητας $u(t)$. Η αυτοσυσχέτιση αυτή έγινε μέσω του λογισμικού ThermalPro το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις του θερμού νήματος. Έπειτα μέσω της μέσης ταχύτητας και της ολοκληρωτικής κλίμακας χρόνου υπολογίστηκε η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους:

$$Lu_x = Tu_x \cdot \bar{u} \quad (4.3.7)$$



Σχήμα 4.13: Κατανομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης.

4.4 Βαθμονόμηση Πειραματικής Διάταξης Μέτρησης Πίεσης.

Σε πειράματα αεροδυναμικής σήραγγας είναι πολύ σημαντική η ικανότητα μέτρησης της πίεσης. Ιδανική φαίνεται η λύση της ενσωμάτωσης μετατροπέων πίεσης σε κάθε σημείο της δομής όπου είναι επιθυμητή η μέτρηση της, με σκοπό την απευθείας έκθεση των μετρητικών οργάνων στο ρεύμα του αέρα. Παρ' όλα αυτά μια τέτοια λύση, εκτός από υπερβολικά κοστοβόρος λόγω της μεγάλης ποσότητας μετρητικού εξοπλισμού, είναι και πρακτικά αδύνατη λόγω του μεγέθους των μετρητών. Προκύπτει επομένως ένα πρόβλημα προς επίλυση. Κοινή πρακτική σε πειράματα που αφορούν μετρήσεις πίεσης σε δομές, είναι πλέον η χρήση εύκαμπτων αγωγών. Οι αγωγοί αυτοί δίνουν τη δυνατότητα μέτρησης της πίεσης που επικρατεί στο ζητούμενο σημείο και τη μεταφορά της σε περιβάλλον εξωτερικό της αεροδυναμικής σήραγγας, για μέτρηση με έναν εξωτερικό μετατροπέα πίεσης. Η μέθοδος αυτή, αν και εξαιρετικά χρήσιμη, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα σημαντικό μειονέκτημα. Η ύπαρξη σωληνώσεων διαστρεβλώνει το μετρούμενο σήμα πίεσης και γεννά την ανάγκη για βαθμονόμηση της διάταξης. Η βαθμονόμηση αυτή ταυτίζεται στην προκειμένη περίπτωση με ανάπτυξη μιας συνάρτησης μεταφοράς η οποία ουσιαστικά διορθώνει το διαστρεβλωμένο σήμα πίεσης, δημιουργώντας την αίσθηση μέτρησης χωρίς παρεμβολή σωληνώσεων.

4.4.1 Τεχνική Βαθμονόμησης σωληνώσεων μέτρησης πίεσης.

Η τεχνική που εφαρμόστηκε για την βαθμονόμηση των σωληνώσεων μέτρησης πίεσης αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως Μέθοδος Αντιστρόφου Μετασχηματισμού Fourier (ITF Method). Η μετρούμενη χρονοσειρά μεταβαλλόμενης πίεσης $P_0(t)$ στην οπή ανάληψης πίεσης γράφεται ως:

$$P_0(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega t} \quad (4.4.1)$$

Και η χρονοσειρά της μεταβαλλόμενης πίεσης με την επίδραση του σωλήνα σύνδεσης στο διαφορικό μανόμετρο γράφεται ως:

$$P_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n e^{in\omega t} \quad (4.4.2)$$

Όπου τα A_n και B_n είναι μιγαδικοί συντελεστές Fourier και προφανώς $i = \sqrt{-1}$. Τότε εάν τεθεί T_n η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος:

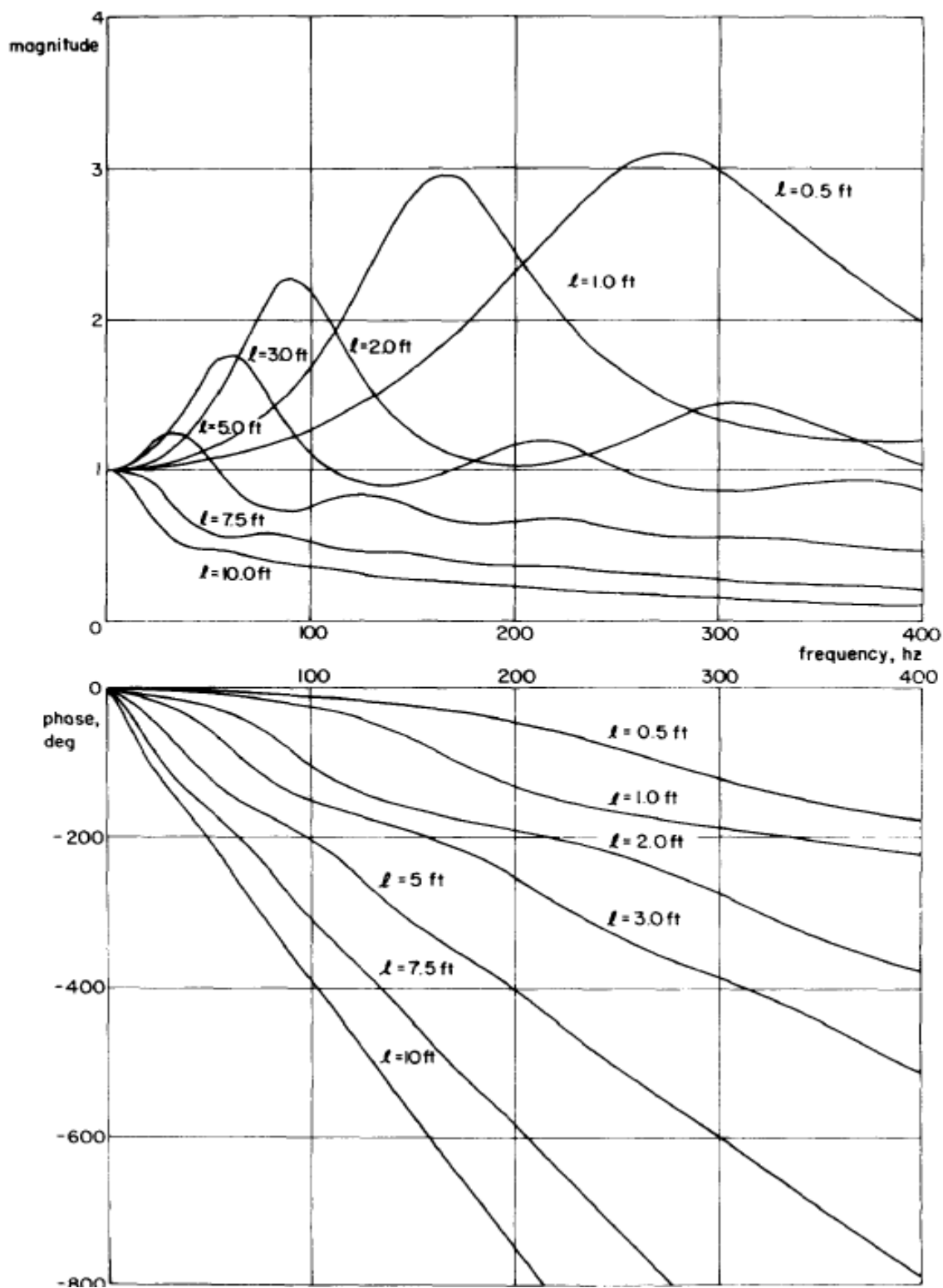
$$B_n = T_n A_n \quad (4.4.3)$$

Επομένως οι συντελεστές Fourier της ζητούμενης χρονοσειράς πίεσης $P_0(t)$ μπορούν να υπολογισθούν από:

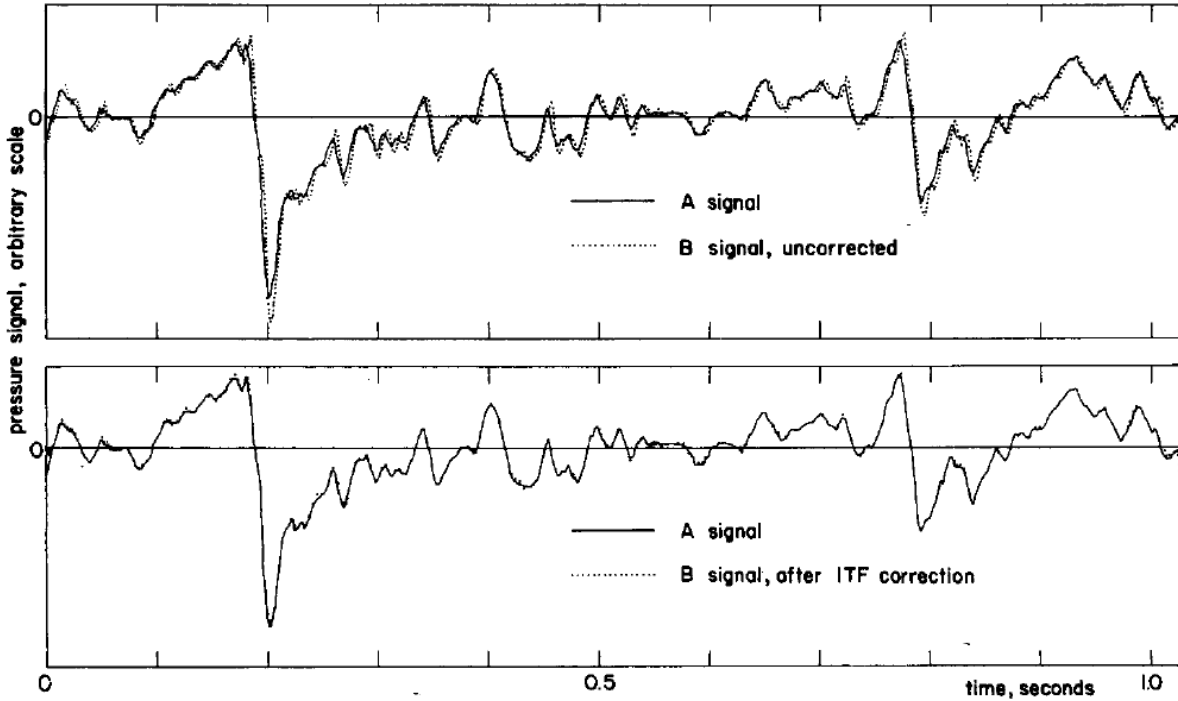
$$A_n = \frac{B_n}{T_n} \quad (4.4.4)$$

Η διόρθωση αυτή του σήματος είναι εφικτό να περιλαμβάνει και το πλάτος αλλά και τη φάση του μετρούμενου σήματος $P_0(t)$.

Προκύπτει λοιπόν ότι το αναλλοίωτο σήμα $P_0(t)$ μπορεί να υπολογισθεί μέσω υπολογισμού του μετασχηματισμού Fourier, B_n , της μετρούμενης πίεσης $P_1(t)$, έπειτα με την υπόθεση ότι η συνάρτηση μεταφοράς T_n είναι γνωστή μέσω της παραπάνω εξίσωσης, εύρεση του μετασχηματισμού Fourier A_n και τέλος εφαρμογή αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier.



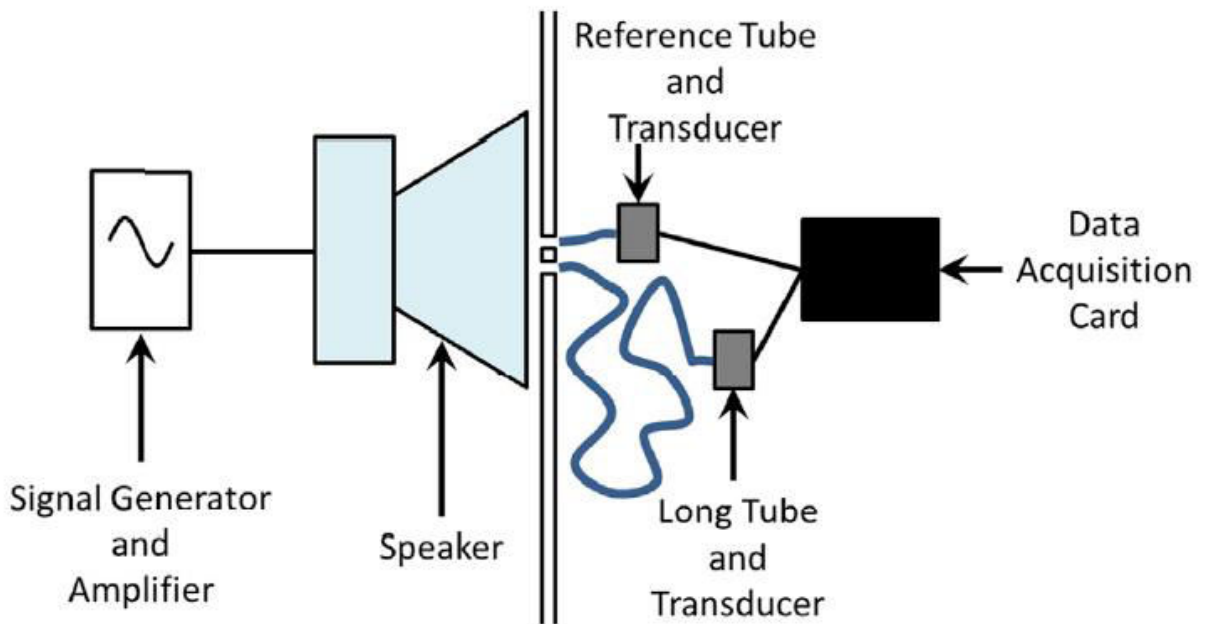
Σχήμα 4.14: Παράδειγμα συναρτήσεων μεταφοράς για συστήματα πίεσης διαφορετικών μηκών, εσωτερικής διαμέτρου σωληνώσεων 1,35mm.



Σχήμα 4.15: Αποτέλεσμα διόρθωσης Αντιστρόφου Μετασχηματισμού Laplace.

4.4.2 Πειραματική Διάταξη Βαθμονόμησης Σωληνώσεων Μέτρησης Πίεσης.

Η πειραματική διάταξη της βαθμονόμησης διαμορφώθηκε σύμφωνα με διάφορα δημοσιευμένα άρθρα.



Σχήμα 4.16: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης βαθμονόμησης.

Ως πηγή πιέσεων χρησιμοποιήθηκε μια διαμόρφωση ηχείου- ενισχυτή συνδεδεμένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συγκεκριμένα το κομμάτι του ηχείου όπου παρήγαγε την ζητούμενη χρονοσειρά πιέσεων ήταν το εξάρτημα εκείνο το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξισορρόπηση της πίεσης του εσωτερικού του ηχείου (Bass Reflex), αναρροφώντας ή προσδίδοντας αέρα, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση του σε ήχους χαμηλών συχνοτήτων. Ουσιαστικά πρόκειται για μια οπή ή θυρίδα του περιβλήματος του ηχείου συνδεδεμένη εσωτερικά με ένα μικρό τμήμα σωλήνα.

Να σημειωθεί ότι η αρχική προσέγγιση και η προτεινόμενη από τα προαναφερθέντα άρθρα ήταν η χρήση ως πηγής πιέσεων της μεμβράνης του ηχείου και όχι του εξαρτήματος Bass Reflex. Παρ όλα αυτά, το Bass Reflex έδινε κύματα πίεσης πολύ μεγαλύτερης έντασης συγκριτικά με την μεμβράνη του ηχείου, όπως επίσης τοποθετεί τη διαδικασία βαθμονόμησης των σωληνώσεων σε περιβάλλον αντίστοιχο της τελικής πειραματικής διάταξης όπου μετρώνται πιέσεις λόγω επίδρασης του ανέμου. Μπροστά από το Bass Reflex τοποθετήθηκαν εναλλάξ τα δύο είδη σωλήνα για τη βαθμονόμηση, πρότυπο σωληνάκι όμοιο με τα σωληνάκια τα οποία προσαρτήθηκαν αργότερα στο πρότυπο κτήριο για την διεξαγωγή του πειράματος, με σκοπό τη μέτρηση της χρονοσειράς $P_1(t)$ και πρότυπο σωληνάκι ίδιας κατασκευής με το προαναφερθέν, αλλά μήκους μερικών εκατοστών με σκοπό τη μέτρηση της χρονοσειράς $P_0(t)$.



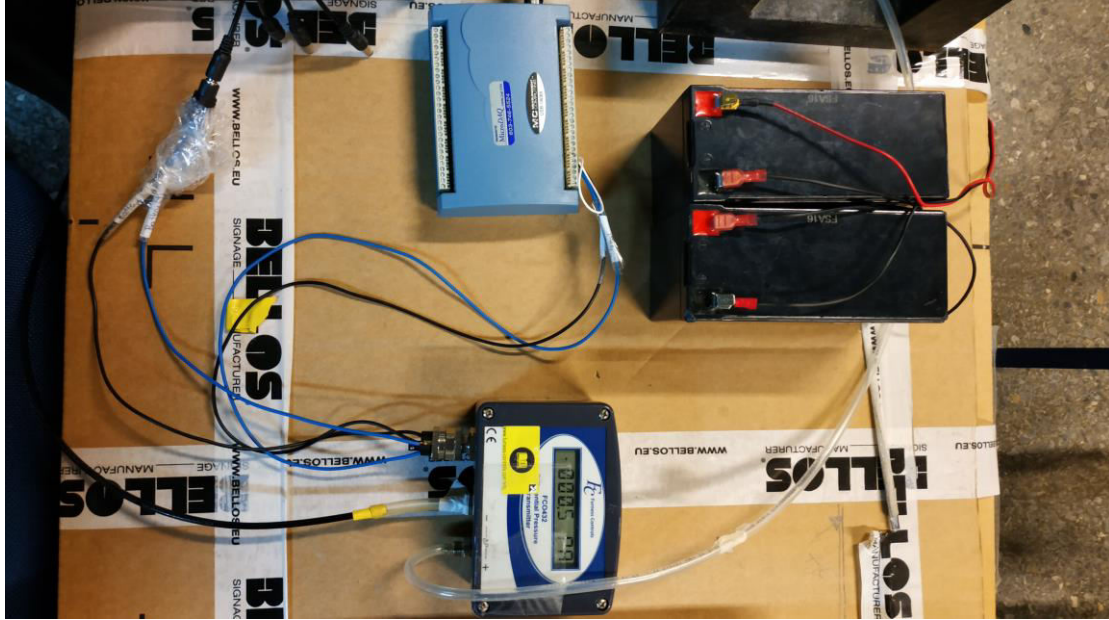
Σχήμα 4.17: Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης, μεγέθυνση στην πηγή πίεσης.

Το μεταλλικό εξάρτημα, το μολύβι, το εξωτερικό περίβλημα (διαφανές) και η κολλητική ταινία που διακρίνονται στην εικόνα έχουν μοναδικό ρόλο τη στήριξη του πρότυπου (μπλε) σωλήνα. Το μέτρο (εργαλείο) τοποθετήθηκε στην πειραματική διαδικασία για τον έλεγχο ενδεχόμενης μετακίνησης της διάταξης με αποτέλεσμα τη λήψη λανθασμένων μετρήσεων.

Το πρότυπο σωληνάκι έπειτα συνδεόταν με τα στοιχεία σύνδεσης (connectors) τα οποία με τη σειρά τους συνδέονταν με τον σαρωτή (scanner). Τα εξαρτήματα αυτά θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Ο σαρωτής έπειτα μεταφέρει τον παλμό πίεσης μέσω δικής

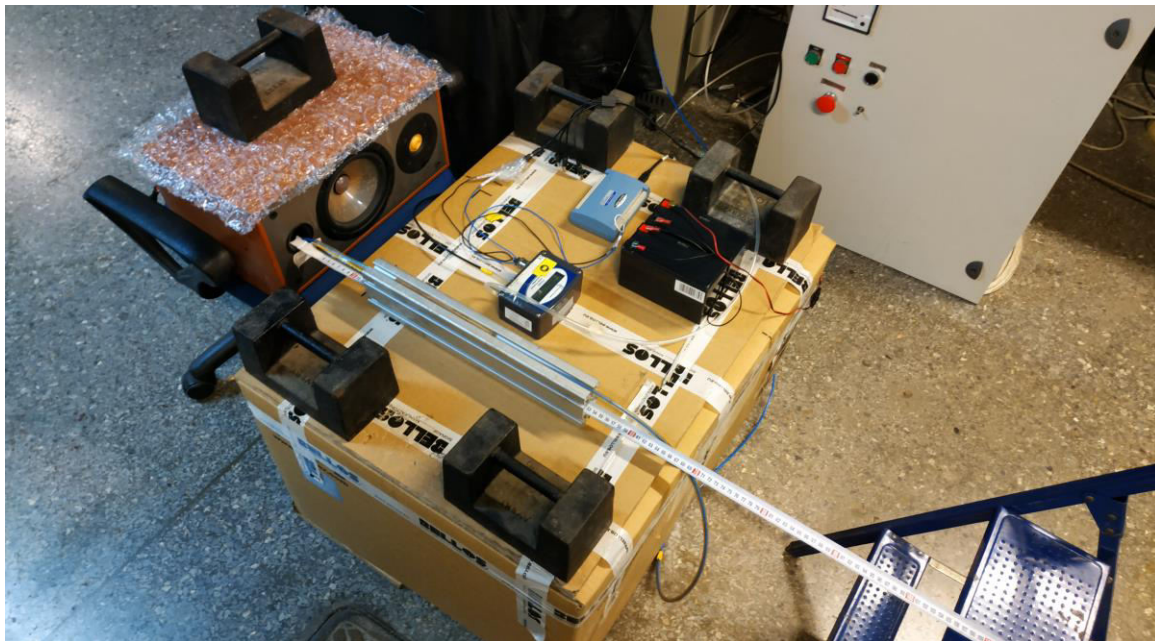
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διάταξη και Τεχνικές Μετρήσεων.

του σωλήνωσης στο διαφορικό μανόμετρο του εργαστηρίου FC0432 της Furness Controls Ltd. Το σήμα εφόσον επεξεργαστεί μέσω αναλογο-ψηφιακού μετατροπέα, καταγράφεται σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή με χρήση του λογισμικού TracerDAQ. Σημειώνεται ότι για την αποφυγή διαστρέβλωσης των μετρήσεων, η δεύτερη απόληξη του διαφορικού μανομέτρου ήταν συνδεδεμένη με εύκαμπτο σωλήνα, ο οποίος ήταν εκτεθειμένος σε πίεση περιβάλλοντος σχετικά μακριά από την πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.18: Μανόμετρο (κάτω), αναλογοψηφιακός μετατροπέας (πάνω), πηγή ρεύματος (δεξιά).

Παρακάτω παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη βαθμονόμησης στο σύνολό της:



Σχήμα 4.19: Συνολική πειραματική διάταξη βαθμονόμησης αγωγών.

4.4.3 Μετρήσεις και Αποτέλεσμα Βαθμονόμησης.

Για κάθε ένα από τα δύο διαφορετικά μήκη εύκαμπτων σωλήνων ελήφθησαν 10 μετρήσεις χρονοσειρών πίεσης. Επιλέχθηκε η αναπαραγωγή ηχητικών κυμάτων από την πηγή πίεσης, δηλαδή το ηχείο, από κατάλληλο ιστότοπο, ο οποίος έδινε τη δυνατότητα αναπαραγωγής ήχων χαμηλής συχνότητας και έως 200Hz. Οι συχνότητες των κυμάτων που ενδιαφέρουν την πειραματική διάταξη του προτύπου κτηρίου κυμαίνονται μέχρι τα 200Hz. Υψίσυχνα κύματα δεν μελετώνται σε αυτού του είδους τις διατάξεις, καθώς είναι αδύνατον να επηρεάσουν τη συμπεριφορά δομών όπως είναι οι κτηριακές, λόγω των μειωμένων μηκών κύματος που διαθέτουν. Η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν της τάξης των 30 δευτερολέπτων με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 1kHz$, η οποία θεωρήθηκε αρκετά υψηλή για επαρκή αποτύπωση του σήματος. Η κάθε μετρούμενη χρονοσειρά είχε τη δυνατότητα να αποθηκευτεί μέσω του λογισμικού TracerDAQ σε αρχεία κειμένου, τα οποία προορίζονταν για περαιτέρω επεξεργασία. Παρότι το μανόμετρο του εργαστηρίου είχε εγκατεστημένη οθόνη ένδειξης των στιγμιαίων μετρούμενων τιμών σε μονάδες Pascal, οι τιμές που κατέληγαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ήταν τιμές τάσης Volt. Η μετατροπή σε μονάδες Pascal πραγματοποιήθηκε μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης του διαφορικού μανομέτρου η οποία είναι η εξής:

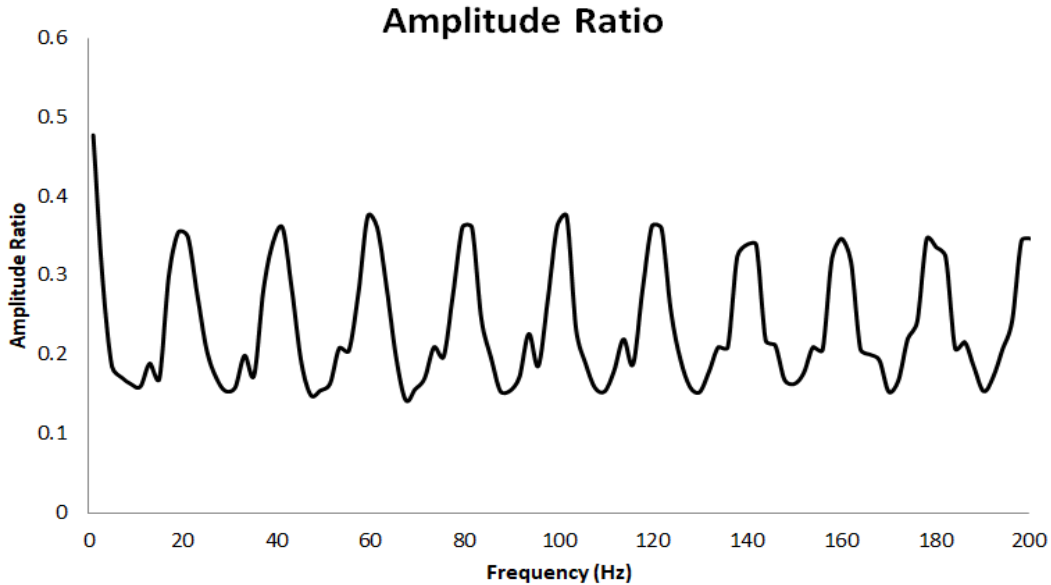
$$P = 14.992 \cdot V - 0.0086 \quad (4.4.5)$$

Με V σε Volts και P σε Pascals.

Έπειτα ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων. Για την επεξεργασία αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα Fortran. Ο κώδικας επεξεργαζόταν τα δεδομένα με την εξής σειρά:

- Μετέτρεπε τις μετρηθείσες τιμές σε μονάδες Pascal, και υπολόγιζε μέση τιμή και τυπική απόκλιση των εκάστοτε δεδομένων, για έλεγχο των μετρήσεων.
- Πραγματοποιούσε μετασχηματισμό Fourier στην χρονοσειρά των πιέσεων.
- Έβρισκε τον λόγο των συντελεστών Fourier και τους κατέγραφε σε ένα αρχείο.

Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατή η εύρεση μιας συνάρτησης μεταφοράς για την περιγραφή της αλλοίωσης του πλάτους του σήματος. Παρακάτω φαίνεται το αποτέλεσμα της επεξεργασίας που αναφέρθηκε, για ένα ζεύγος εκ των 10 που μετρήθηκαν.



Σχήμα 4.20: Αναλογία πλατών σήματος πίεσης, αγωγός 4m προς είσοδο μανομέτρου.

Λόγω της διαφαινόμενης μορφής επανάληψης που επικρατεί στο παραπάνω διάγραμμα, η οποία επικρατούσε σε όλα τα ζεύγη μετρήσεων, αποφασίσθηκε η απλούστευση της συνάρτησης μεταφοράς για τη διόρθωση του πλάτους σε ένα συντελεστή για όλο το ζητούμενο φάσμα συχνοτήτων. Συγκεκριμένα από κάθε αρχείο προέκυψε ένας μέσος όρος του λόγου των συχνοτήτων ο οποίος με τη σειρά του ενσωματώθηκε στον γενικό μέσο όρο που προέκυψε από τους μέσους όρους όλων των αρχείων. Η συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει επομένως σαν γενικός μέσος όρος των λόγων των πλατών και είναι η παρακάτω:

$$T_{n-ampl} = 0.25348 \quad (4.4.6)$$

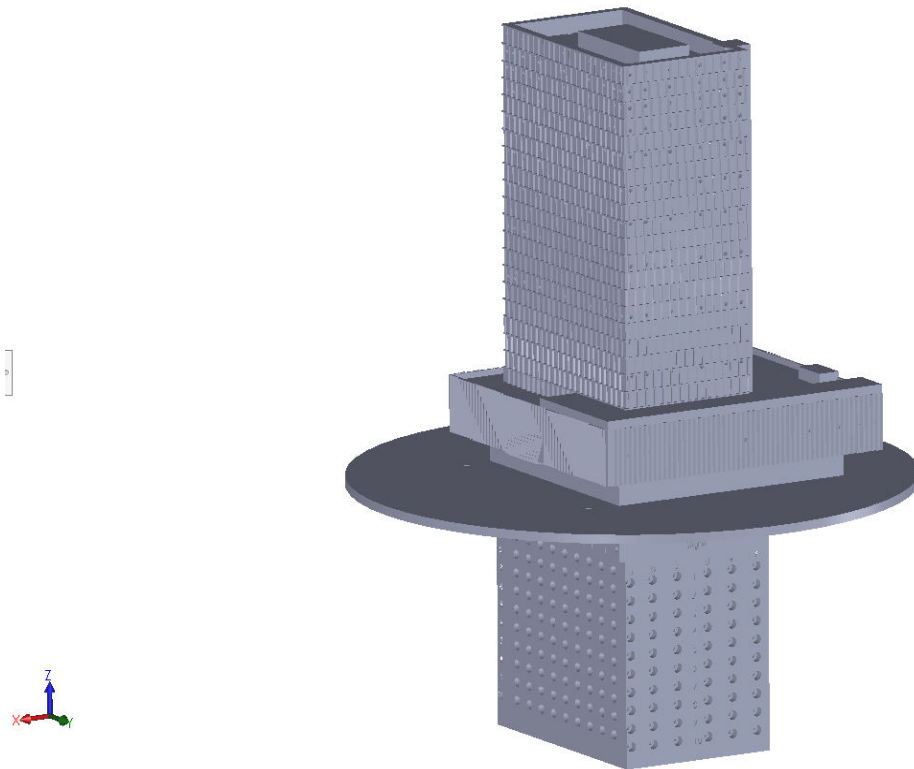
Δυστυχώς, λόγω τεχνικών προβλημάτων δεν ήταν εφικτή η εύρεση συνάρτησης μεταφοράς για τη διόρθωση της φάσης του σήματος. Η διόρθωση φάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με ταυτόχρονη μέτρηση του ίδιου σήματος από τα δύο είδη σωλήνων. Υπήρχε όμως στη διάθεση του εργαστηρίου μοναδικό διαφορικό μανόμετρο, διάταξη που επέτρεπε την σειριακή λήψη δεδομένων και όχι την παράλληλη. Η μελέτη των διαφορών φάσης ήταν επομένως εφικτή μόνο για σήματα μετρημένα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, κατάσταση η οποία αυτόματα ακυρώνει τη μεθοδολογία σύγκρισης.

4.5 Μέτρηση Πιέσεων στην Επιφάνεια του Πρότυπου Κτηρίου.

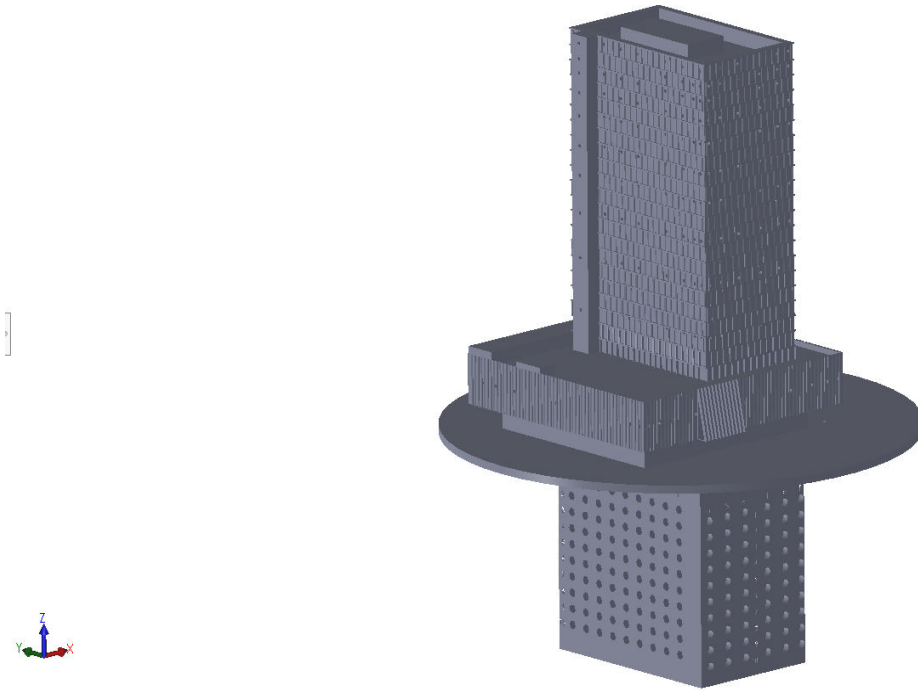
4.5.1 Το μοντέλο του Πύργου του Πειραιά.

Πρότυπο κτήριο της παρούσας πειραματικής διάταξης αποτελεί ο Πύργος του Πειραιά. Πρόκειται για ένα μοντέλο που κατασκευάστηκε στα πλαίσια έργου του Αναπληρωτή Καθηγητή Δημητρίου Μπούρη. Το έργο αφορά μέτρηση των φορτίων του ανέμου στο κτήριο

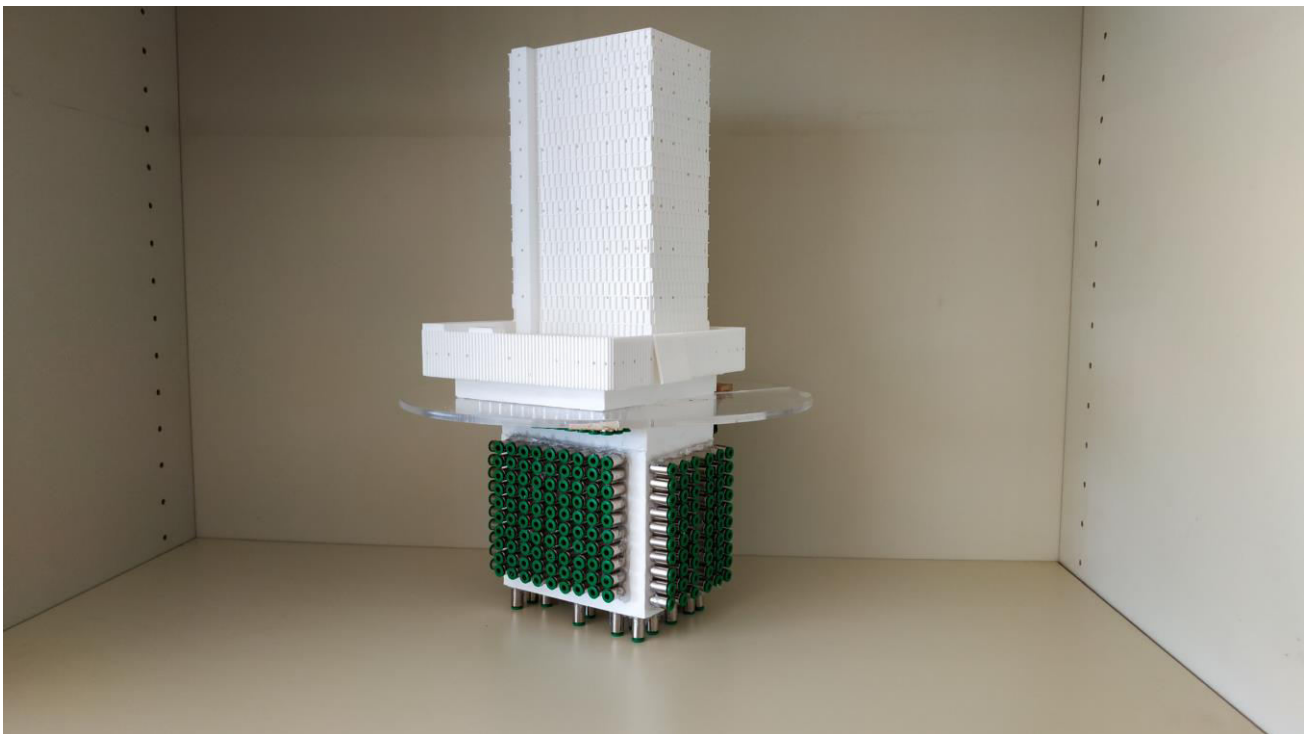
με σκοπό την εξωτερική αναδόμηση σε ασφαλή πλαίσια. Το μοντέλο του Πύργου κατασκευάστηκε με χρήση εκτυπωτή τρισδιάστατων μοντέλων (3D Printer), μέθοδος η οποία κατέστησε δυνατή την ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού καναλιών στο εσωτερικό του για τη μεταφορά των κυμάτων πίεσης από τις απολήψεις στα εύκαμπτα σωληνάκια. Να σημειωθεί εδώ ότι η κλίμακα του μοντέλου σε σχέση με το πραγματικό υπάρχον οικοδόμημα, είναι 1:350.



Σχήμα 4.21: Αναπαράσταση μοντέλου Πύργου του Πειραιά σε περιβάλλον Solidworks, εμπρόσθια και δεξιά όψη.



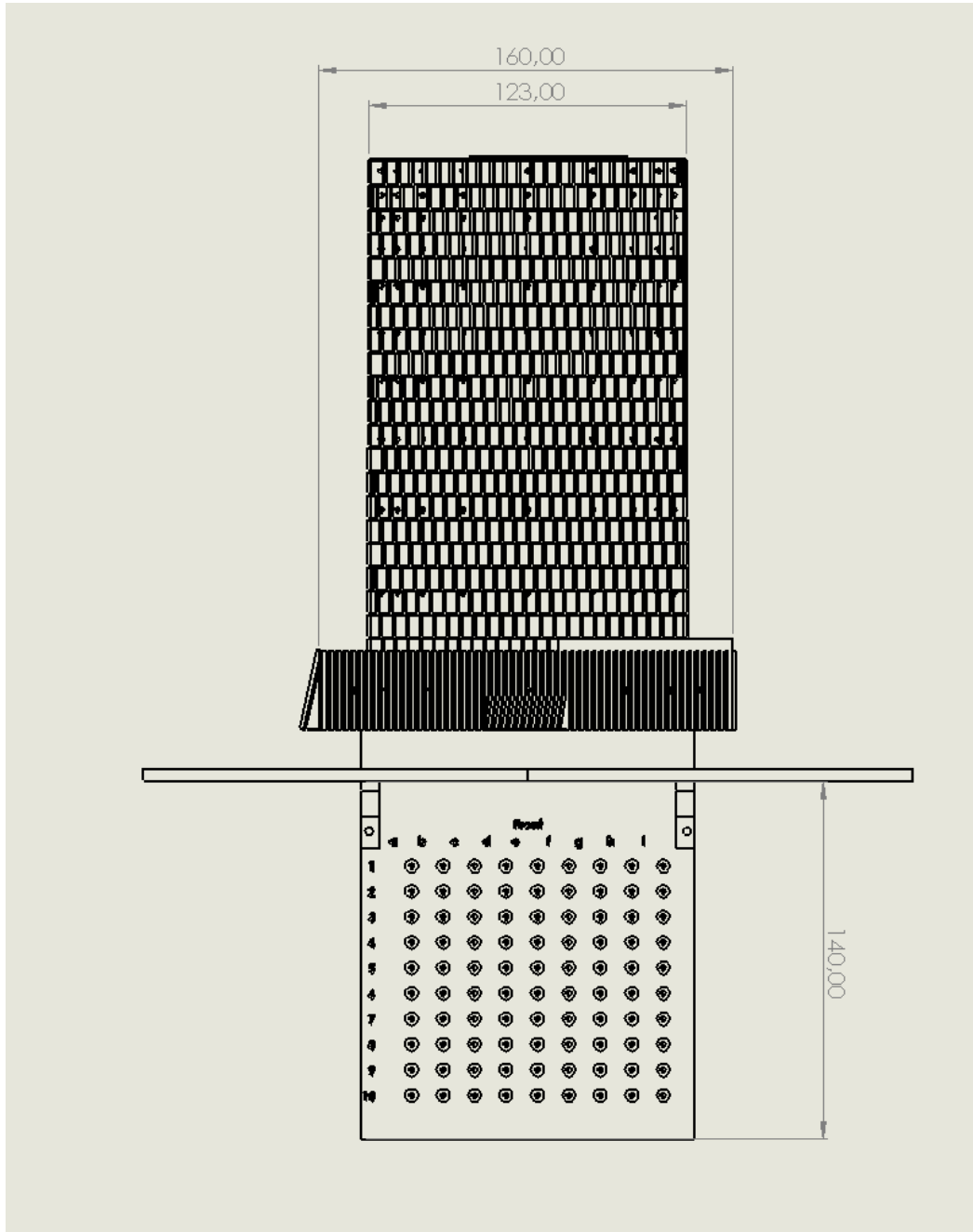
Σχήμα 4.22: Αναπαράσταση μοντέλου Πύργου του Πειραιά σε περιβάλλον Solidworks, οπίσθια και αριστερή όψη.



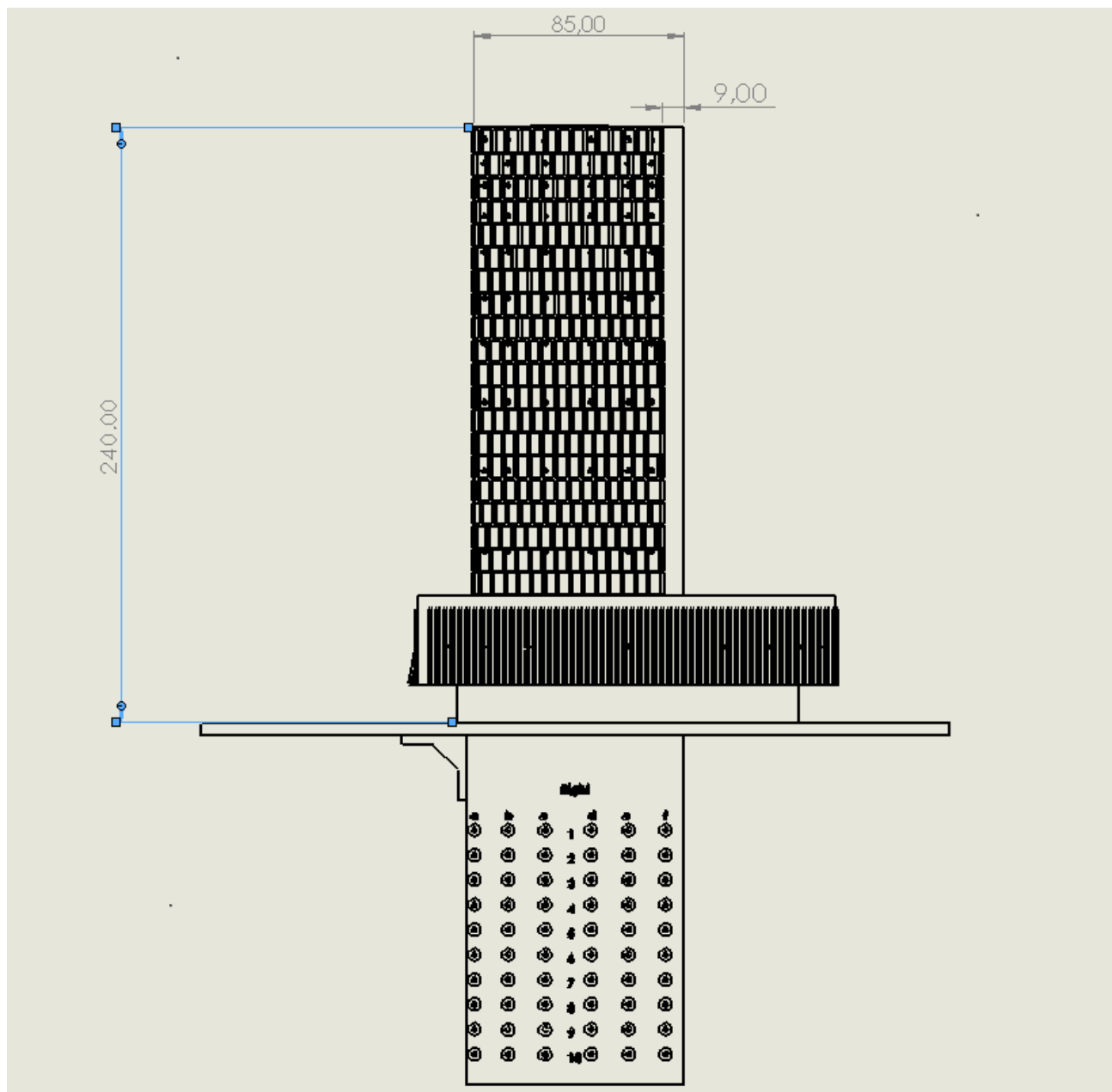
Σχήμα 4.23: Το μοντέλο του Πύργου του Πειραιά.

Το ύψος του μοντέλου του Πύργου, το οποίο εκτίθεται στην ροή της αεροδυναμικής σήραγγας, δεν ξεπερνά τα 24cm, όμως κάτω από τη βάση από Plexiglass εκτείνεται το κομμάτι υπεύθυνο για τη σύνδεση των εύκαμπτων σωληνώσεων, ύψους 14cm. Συνολικά επομένως το μοντέλο

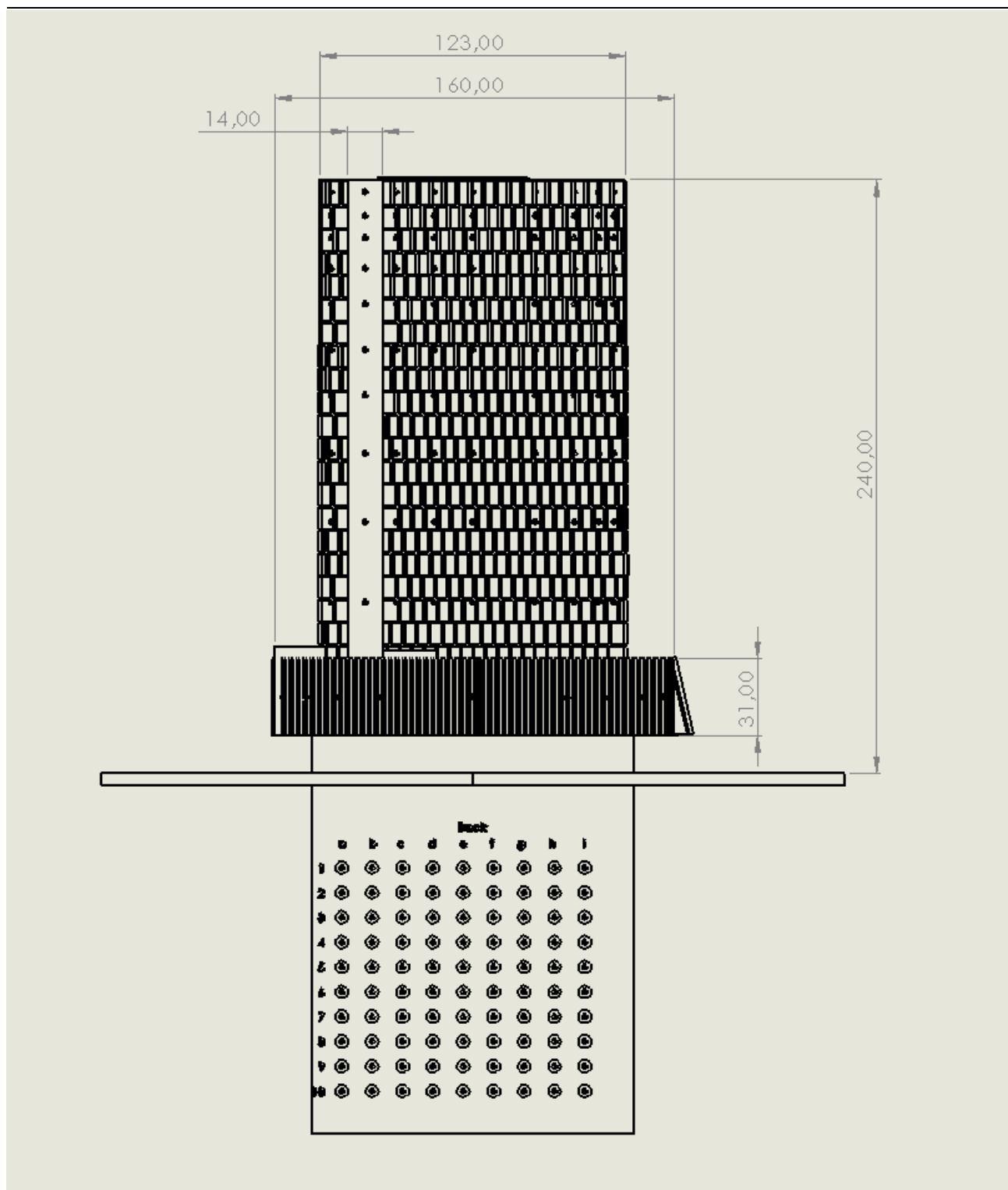
έχει ύψος 38cm. Το πλάτος του Πύργου μεταβάλλεται ανάλογα την πλευρά. Στην εμπρόσθια όψη το ελάχιστο πλάτος είναι 12,3cm στο πάνω μέρος, ενώ το μέγιστο φτάνει τα 16cm στη βάση. Ίδιες αναλογίες ισχύουν και στην οπίσθια όψη. Αντίθετα, στην αριστερά και δεξιά όψη, το ελάχιστο πλάτος, συμπεριλαμβανομένου του ανεγκυστήρα είναι 8.5cm ενώ το μέγιστο 16.7cm. Οι διαστάσεις του μοντέλου φαίνονται συνολικά στα παρακάτω σχέδια:



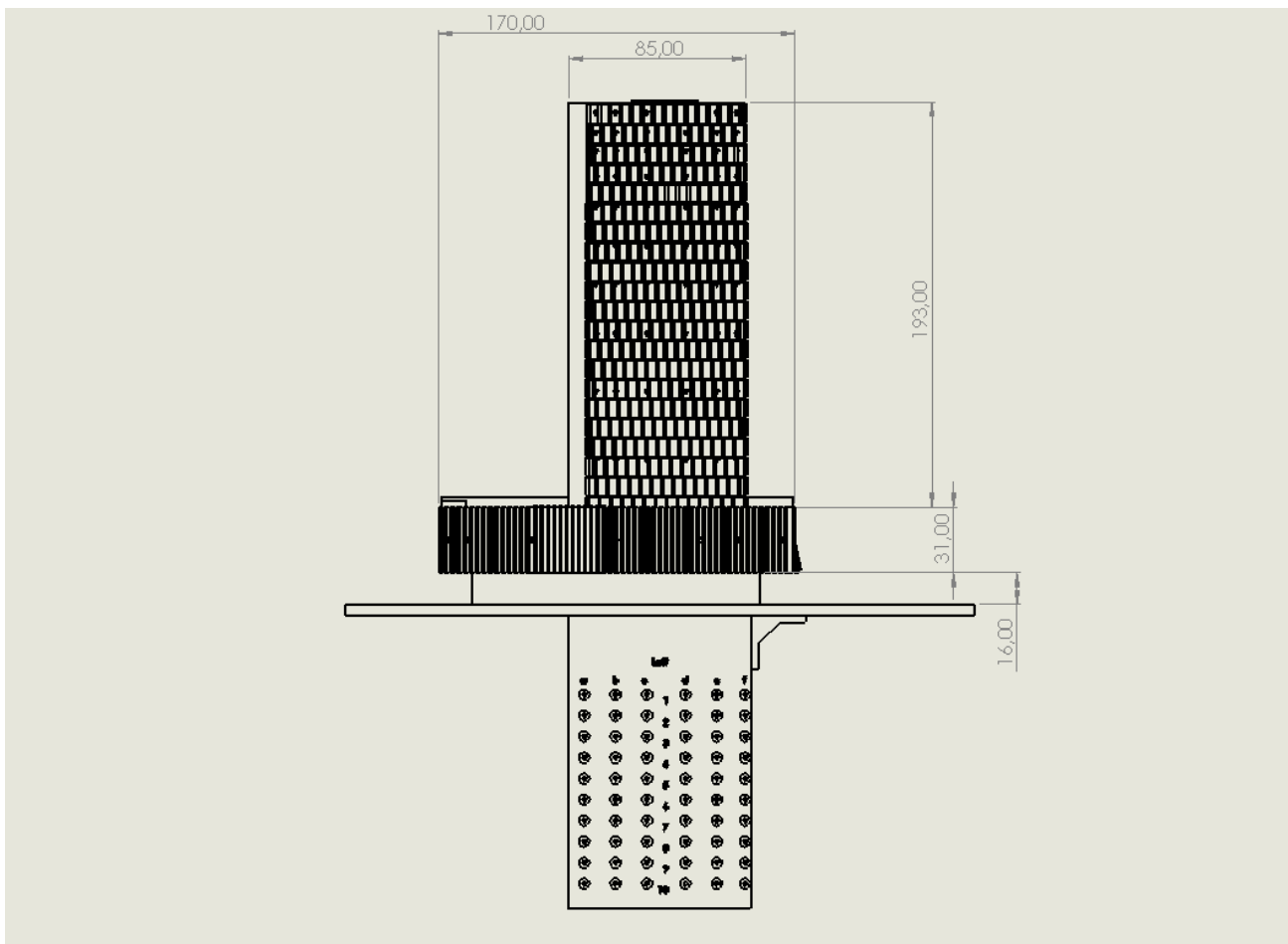
Σχήμα 4.24: Διαστάσεις εμπρόσθιας όψης του μοντέλου.



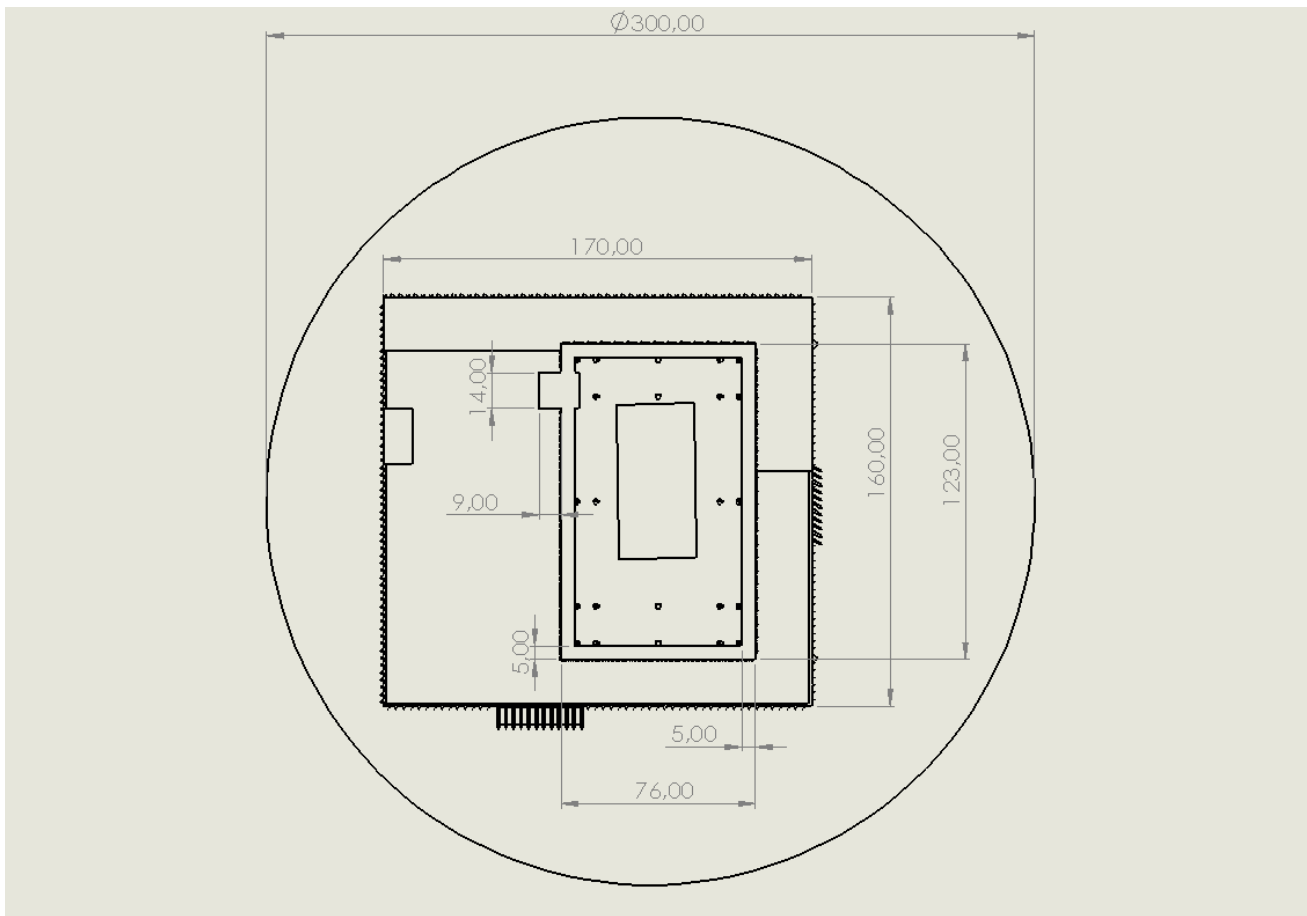
Σχήμα 4.25: Διαστάσεις δεξιάς όψης του μοντέλου.



Σχήμα 4.26: Διαστάσεις οπίσθιας όψης του μοντέλου.



Σχήμα 4.27: Διαστάσεις αριστερής όψης του μοντέλου.



Σχήμα 4.28: Διαστάσεις κάτοψης του μοντέλου.

Συγκεκριμένα ο πύργος αποτελείται από 356 απολήψεις πίεσης, άρα και από 356 κανάλια στο εσωτερικό του, ένα για κάθε απόληψη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω και επίσης φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, τα κανάλια καταλήγουν στο κάτω μέρος του μοντέλου όπου υπάρχουν τα σημεία σύνδεσης με τις σωληνώσεις. Τα σημεία σύνδεσης αυτά αποτελούν εξαρτήματα τα οποία δεν είναι ενσωματωμένα στο μοντέλο, αλλά αντίθετα έχουν την δυνατότητα αποσύνδεσης καθώς είναι βιδωμένα σε σχεδιασμένο σπείρωμα κάθε οπής, στο υλικό του μοντέλου. Ταυτόχρονα, τα εξαρτήματα αυτά προσφέρουν έναν μηχανισμό ασφάλειας για τα συνδεδεμένα σωληνάκια, για αποφυγές αποσύνδεσης.

Οι οπές διαχωρίζονται με συγκεκριμένο αριθμό ανά πλευρά και ακολουθούν συγκεκριμένη κατανομή κατά μήκος και καθ' ύψος. Η εμπρόσθια και οπίσθια όψη αποτελείται η κάθε μια από 90 οπές. Αντίστοιχα η δεξιά και αριστερά όψη αποτελείται από 60 οπές η κάθε μια. Οι υπόλοιπες απολήψεις διαχωρίζονται στην βάση και στην οροφή του μοντέλου. 23 απολήψεις στην οροφή και 33 στην βάση.

Η κατανομή των οπών προκύπτει ως εξής:

- **Εμπρόσθια όψη – Πάνω μέρος Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση.**

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \tag{4.5.1}$$

Όπου $dx = 1346.02$ και $a = 1.6$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της οπής με αρχική οπή για $i = 0$

Οι οπές είναι 9 επομένως ακολουθείται αυτή η κατανομή μέχρι την 5^η οπή και οι επόμενες προκύπτουν μέσω συμμετρίας.



—◆— Front - Upper Tower - Horizontal

Σχήμα 4.29: Κατανομή απολήψεων εμπρόσθιας όψης – επάνω μέρος μοντέλου– οριζόντια διεύθυνση.

– **Οπίσθια όψη – Πάνω μέρος Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση**

Οι οπές είναι και σε αυτήν την όψη 9. Ακολουθείται η ίδια κατανομή με προηγουμένως για το ένα μισό το Πύργου, συγκεκριμένα το μισό που δεν εμπεριέχει τον ανελκυστήρα, και μετά το 5^ο σημείο οι απολήψεις ισαπέχουν. Η κατανομή αυτή επιλέχθηκε έτσι ώστε να γίνει ορθή μελέτη των στροβιλισμών που προκύπτουν λόγω της διατομής του ανελκυστήρα.



—◆— Back - Upper Tower - Horizontal

Σχήμα 4.30: Κατανομή απολήψεων οπίσθιας όψης – επάνω μέρος μοντέλου – οριζόντια διεύθυνση.

– Δεξιά και Αριστερή όψη – Πάνω μέρος Πύργου – Οριζόντια διεύθυνση

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \quad (4.5.2)$$

Όπου $dx = 2516.47$ και $a = 1.6$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της σπής με αρχική σπή για $i = 0$

Σε αυτές τις όψεις οι απολήψεις πίεσης είναι 6 κατά την οριζόντια διεύθυνση, επομένως ακολουθείται η κατανομή αυτή μέχρι την 3^η σπή και έπειτα ακολουθείται μέθοδος συμμετρίας.



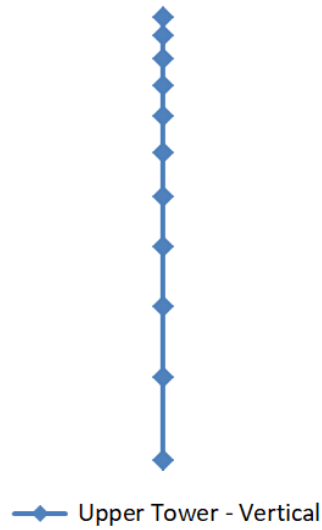
◆ Left and Right - Upper Tower - Horizontal

Σχήμα 4.31: Κατανομή απολήψεων δεξιάς και αριστερής όψης – επάνω μέρος μοντέλου– οριζόντια διεύθυνση.

– Όλες οι όψεις – Πάνω Μέρος Πύργου – Κατακόρυφη Διεύθυνση

$$y_{i+1} = y_i + dy \cdot a^{i-1} \quad (4.5.3)$$

Όπου $dy = 12255.5$ και $a = 0.85$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της σπής με αρχική σπή για $i = 0$ η οποία αντιστοιχεί στην κοντινότερη στη βάση της δομής.

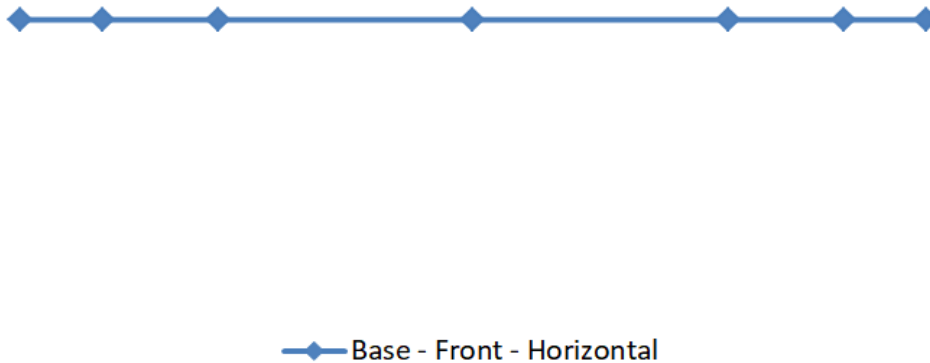


Σχήμα 4.32: Κατανομή απολήψεων επάνω μέρος μοντέλου– κατακόρυφη διεύθυνση.

– **Εμπρόσθια όψη – Βάση Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση**

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \tag{4.5.4}$$

Όπου $dx = 2672,31$ και $a = 1.4$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της σπής με αρχική σπή για $i = 0$. Ο αριθμός των σπών είναι 7. Οι τρεις πρώτες απολήψεις ακολουθούν την παραπάνω κατανομή και συμμετρικά κατασκευάζονται οι 3 τελευταίες. Η εναπομείνουσα απόληψη τοποθετείται στο μέσο της οριζόντιας κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.33: Κατανομή απολήψεων βάσης μοντέλου - εμπρόσθια όψη - οριζόντια διεύθυνση.

– **Οπίσθια όψη – Βάση Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση**

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \quad (4.5.5)$$

Όπου $dx = 2558,11$ και $a = 1.4$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της οπής με αρχική οπή για $i = 0$. Ο αριθμός των οπών είναι 9. Οι τέσσερις πρώτες απολήψεις ακολουθούν την παραπάνω κατανομή και συμμετρικά κατασκευάζονται οι 4 τελευταίες. Η εναπομείνουσα απόληψη τοποθετείται στο μέσο της οριζόντιας κατεύθυνσης.



◆ Base - Back - Horizontal

Σχήμα 4.34: Κατανομή απολήψεων βάσης μοντέλου - οπίσθια όψη - οριζόντια διεύθυνση.

– **Δεξιά όψη – Βάση Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση**

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \quad (4.5.6)$$

Για το μισό της όψης το οποίο εφάπτεται με την εμπρόσθια όψη οι συντελεστές της κατανομής είναι $dx = 2672,31$ και $a = 1.4$ αποτελούμενο από 3 απολήψεις. Αντίστοιχα για το μισό της όψης το οποίο εφάπτεται με την οπίσθια όψη οι συντελεστές της κατανομής είναι $dx = 2558,11$ και $a = 1.4$ αποτελούμενο από 4 απολήψεις, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της οπής με αρχική οπή για $i = 0$ από την κοντινότερη κάθετη πλευρά της βάσης. Στο μέσο της απόστασης των καθέτων πλευρών της βάσης της όψης τοποθετείται μια επιπλέον απόληψη.



—◆— Base - Right - Horizontal

Σχήμα 4.35: Κατανομή απολήψεων βάσης μοντέλου - δεξιά όψη - οριζόντια διεύθυνση.

– **Αριστερά όψη – Βάση Πύργου – Οριζόντια Διεύθυνση**

$$x_{i+1} = x_i + dx \cdot a^{i-1} \tag{4.5.7}$$

Όπου $dx = 2558,11$ και $a = 1.4$, ενώ i ορίζεται ο αριθμός της οπής με αρχική οπή για $i = 0$. Ο αριθμός των οπών είναι 9. Οι τέσσερις πρώτες απολήψεις ακολουθούν την παραπάνω κατανομή και συμμετρικά κατασκευάζονται οι 4 τελευταίες. Η εναπομείνουσα απόληψη τοποθετείται στο μέσο της οριζόντιας κατεύθυνσης.

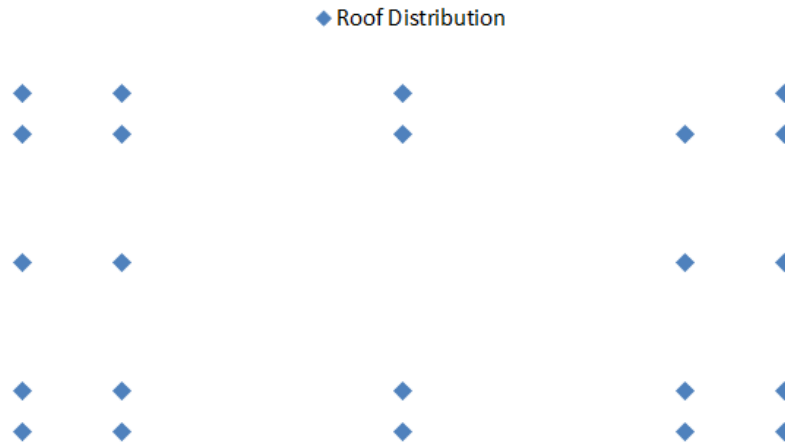


—◆— Left - Right - Horizontal

Σχήμα 4.36: Κατανομή απολήψεων βάσης μοντέλου - αριστερά όψη - οριζόντια διεύθυνση.

– **Οροφή**

Στην οροφή ακολουθήθηκε η παρακάτω κατανομή:



Σχήμα 4.37: Κατανομή απολήψεων οροφής μοντέλου.

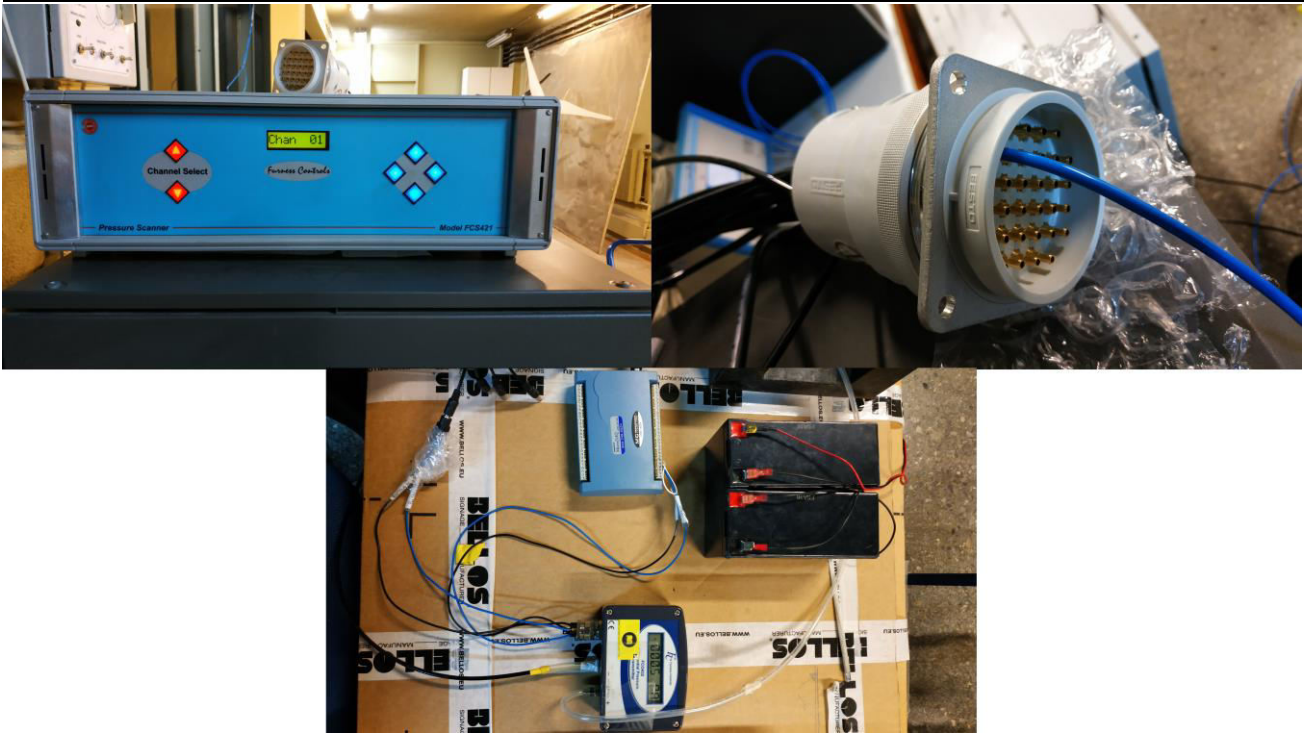
4.5.2 Διάταξη διεξαγωγής των μετρήσεων.

Το μοντέλο του πύργου του Πειραιά τοποθετήθηκε στο κέντρο της τράπεζας της αεροδυναμικής σήραγγας, όπου υπάρχει κατάλληλη διατομή η οποία επιτρέπει την εξαγωγή των εύκαμπτων σωλήνων προς τα μετρητικά όργανα του εργαστηρίου. Γύρω από το μοντέλο του πύργου, τοποθετήθηκαν μοντέλα των υπάρχοντων κτηρίων της πραγματικής δομής, για μια ακτίνα 400m με βάση την τοποθεσία του πύργου. Τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν από πλάκες Plexiglass κολλημένες καθ' ύψος. Παρά το γεγονός ότι δεν τηρήθηκε η αντίστοιχη λεπτομέρεια κατασκευής με το μοντέλο του Πύργου, τα στοιχεία αυτά αποτέλεσαν μια πολύ ικανοποιητική αναπαράσταση της χωροταξικής δομής του Πειραιά στο συγκεκριμένο σημείο. Μπροστά από το συνολικό μοντέλο ήταν τοποθετημένα τα στοιχεία τραχύτητας, καθώς και το τοιχίο ανύψωσης του οριακού στρώματος και οι οβελίσκοι.



Σχήμα 4.38: Συνολικό μοντέλο πειραματικής διάταξης (επάνω), εικόνα από το Google Earth περιοχής γύρω από τον πύργο (κάτω).

Οι εύκαμπτοι σωλήνες μετά την έξοδο τους από το περιβάλλον της αεροδυναμικής σήραγγας, κατέληγαν σε συγκεκριμένα εξαρτήματα σύνδεσης (connectors) τα οποία με τη σειρά τους συνδέονταν με τον σαρωτή του εργαστηρίου. Η αναγκαιότητα χρήσης των εξαρτημάτων σύνδεσης, έγκειται στον μεγάλο αριθμό των απολήψεων πίεσης του μοντέλου, συγκριτικά με τις εισόδους του σαρωτή του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα το μοντέλο, όπως προαναφέρθηκε, είχε ενσωματωμένες 356 απολήψεις πίεσης, ενώ ο σαρωτής επέτρεπε την ζύνδεση μόνο 60. Αντίστοιχα τα στοιχεία σύνδεσης επέτρεπαν τη σύνδεση 32 εύκαμπτων αγωγών.



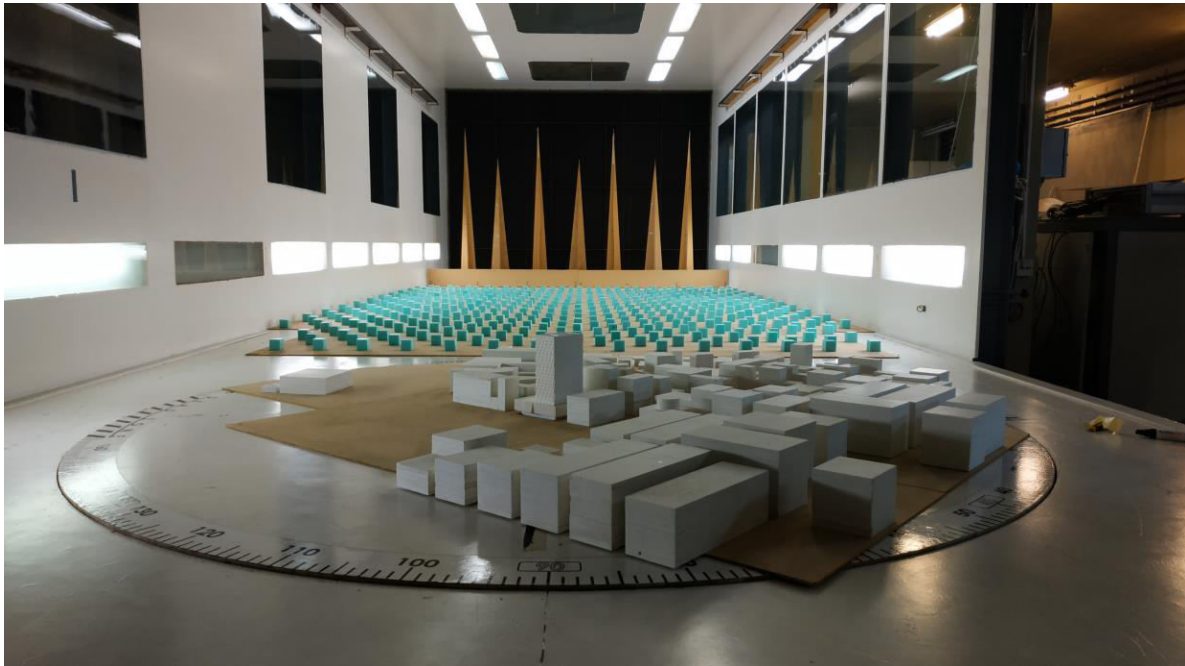
Σχήμα 4.39: Σαρωτής FCS421 (επάνω αριστερά), στοιχείο σύνδεσης (πάνω δεξιά), μανόμετρο, αναλογοψηφιακός μετατροπέας και πηγή ρεύματος (κάτω).

Η λογική κατά την οποία επιτεύχθηκαν οι μετρήσεις ήταν η εξής:

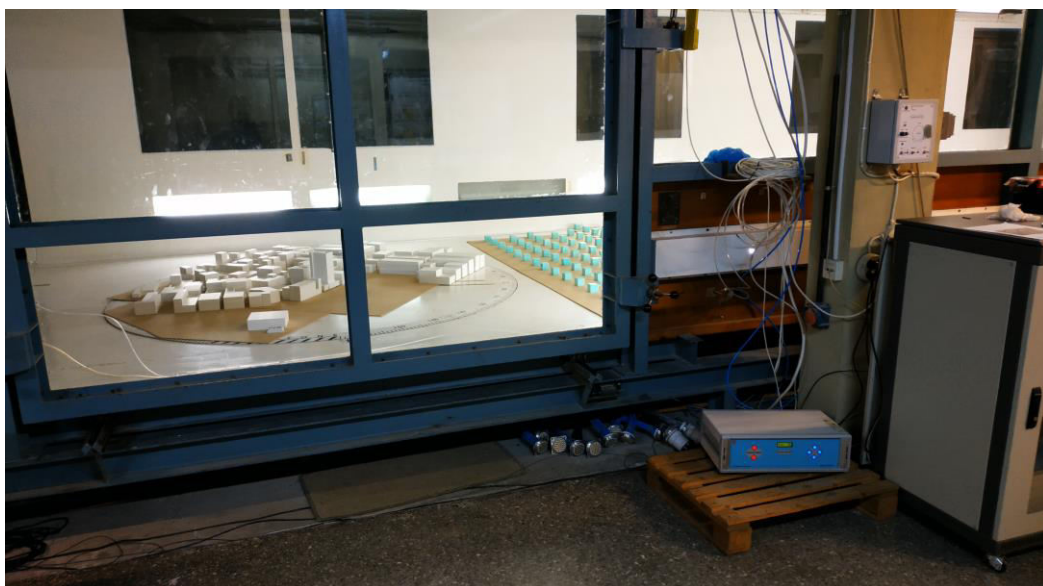
Καθ' ύψος του άνω μέρους του Πύργου, σε κάθε επίπεδο απολήψεων, αντιστοιχούσαν κατά την οριζόντια διεύθυνση και περιμετρικά 30 απολήψεις. Συγκεκριμένα η εμπρόσθια και οπίσθια όψη του κτηρίου είχαν από 9 η κάθε μια, ενώ η δεξιά και η αριστερή από 6 η κάθε μια. Συνολικά σε κάθε όροφο απολήψεων επομένως, αντιστοιχούσαν 30 απολήψεις, οι οποίες ήταν εφικτό να συνδεθούν σε ένα συνδετικό εξάρτημα. Προκύπτει δηλαδή ένα συνδετικό εξάρτημα για κάθε όροφο απολήψεων το οποίο ονομαζόταν και με τον αριθμό του αντίστοιχου ορόφου. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, υπήρχαν 10 επίπεδα απολήψεων στο άνω τμήμα του μοντέλου, επομένως για αυτό το τμήμα έγινε χρήση 10 συνδετικών στοιχείων. Οι υπόλοιπες απολήψεις της βάσης και της οροφής του μοντέλου όντας 56 συνολικά, 33 για την βάση και 23 για την οροφή, συνδέθηκαν σε άλλα δυο συνδετικά στοιχεία, τα οποία έλαβαν και την αντίστοιχη ονομασία. Οι απολήψεις της οροφής ήταν εφικτό να συνδεθούν με έναν connector όντας 23, όμως οι απολήψεις της βάσης όντας 33 υπερέβαιναν το όριο των 32 του connector. Ο περισσευόμενος αγωγός συνδέθηκε επομένως στο συνδετικό στοιχείο που αντιστοιχούσε στην οροφή.

Οι αγωγοί του σαρωτή ήταν συνεχώς συνδεδεμένοι με το αρσενικό μέρος των εξαρτημάτων σύνδεσης. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων γινόταν εναλλαγή των θηλυκών μερών των στοιχείων αυτών ανά δύο, καθώς οι 60 είσοδοι του σαρωτή επέτρεπαν την σύνδεση 2 κάθε φορά.

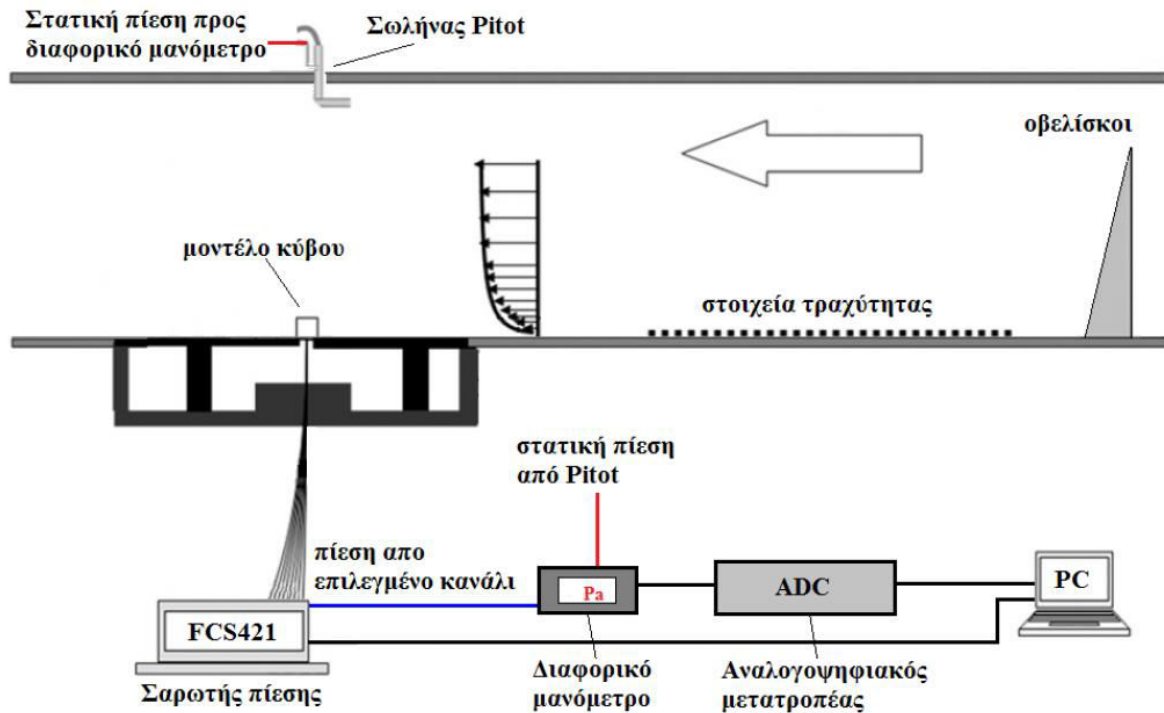
Ο σαρωτής ξεκινώντας από το κανάλι 1, σάρωνε μέχρι το 60° επιτρέποντας κάθε φορά προς το διαφορικό μανόμετρο το σήμα μιας μόνο απόληψης. Το σήμα αυτό συνδεόταν στη θετική είσοδο του μανομέτρου, ενώ στην αρνητική είσοδο ήταν συνδεδεμένος, ο αγωγός στατικής πίεσης του σωλήνα Pitot. Ο Pitot βρίσκεται σε ύψος ελεύθερης ροής, επομένως η πίεση αναφοράς είναι η στατική πίεση της ελεύθερης ροής. Το διαφορικό μανόμετρο έπειτα συνδέεται σε αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η καταγραφή των μετρήσεων και η διόρθωση του σήματος σύμφωνα με την συνάρτηση μεταφοράς που αναφέρεται στην παράγραφο 4.4.3 γίνεται αυτοματοποιημένα μέσω του λογισμικού LabVIEW.



Σχήμα 4.40: Συνολική διάταξη αεροδυναμικής σήραγγας πειραματικής διάταξης (1/2).



Σχήμα 4.41: Συνολική διάταξη αεροδυναμικής σήραγγας πειραματικής διάταξης (2/2).



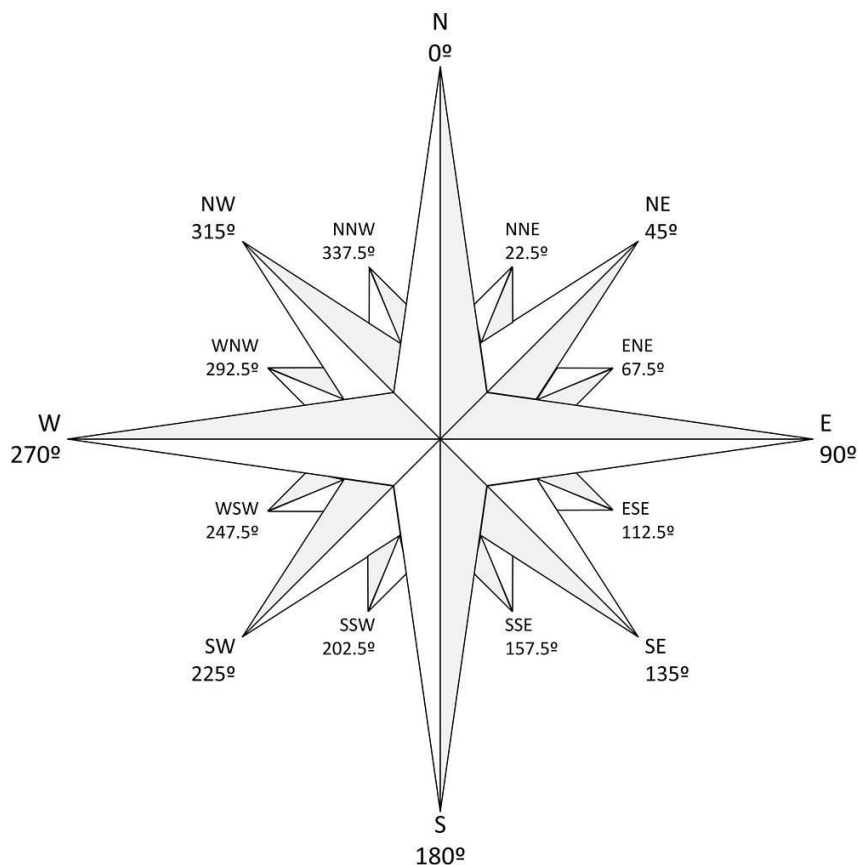
Σχήμα 4.42: Σχηματική διάταξη μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια του κτηρίου.

4.5.3 Διάφορα σενάρια μελέτης.

Με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα, τα οποία παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκαν τα διάφορα σενάρια μελέτης. Βασική μέτρηση της πειραματικής διαδικασίας αποτελούσε ο συντελεστής πίεσης. Ταυτόχρονα όμως υπολογίσθηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του, όπως επίσης και η τυπική απόκλιση του.

Εξετάζοντας τα σημεία του ορίζοντα και τα ρόδα ανέμου των ανεμολογικών δεδομένων οι παραπάνω μεταβλητές υπολογίσθηκαν για τις εξής κατευθύνσεις του ανέμου:

- Βόρεια (N - 0°)
- Βόρειο-Βορειοανατολικά (NNE - 22.5°)
- Ανατολικά (E - 90°)
- Νότιο-Νοτιοανατολικά (SSE - 157.5°)
- Νότια (S - 180°)
- Νότιο-Νοτιοδυτικά (SSW - 202.5°)
- Δυτικά (W - 270°)
- Βόρειο-Βορειοδυτικά (NNW - 337.5°)



Σχήμα 4.43: Σημεία του ορίζοντα.

Με τη βοήθεια μηχανισμού της τράπεζας υπεύθυνο για την περιστροφή της, συνδεδεμένο σε σημείο ελέγχου εκτός της αεροδυναμικής σήραγγας, το συνολικό μοντέλο περιστρεφόταν ανάλογα δημιουργώντας την ψευδαίσθηση αλλαγής της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι ενδείξεις μοιρών της τράπεζας, επέτρεπαν μια ακριβή περιστροφή.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα και συγκρίσεις με Ευρωκώδικα.

5.1 Ανεμολογικά Δεδομένα.

Στα πλαίσια του πειράματος έγινε αναζήτηση δεδομένων για την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή του κτηρίου, δηλαδή στον Πειραιά. Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), παρείχε συγκεντρωτικά ετήσια δεδομένα για την περίοδο 1956-2010 όσον αφορά τη συχνότητα του ανέμου ανά κατεύθυνση, τα οποία διατυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΠΕΡΙΟΔΟΣ 1956-2010								
N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CLM/VRB
24.59%	13.65%	7.85%	2.57%	19.93%	7.05%	10.94%	6.53%	6.89%

Πίνακας 5.1: Ετήσια συχνότητα ανέμου ανά κατεύθυνση περιόδου 1956-2010, (ΕΜΥ).

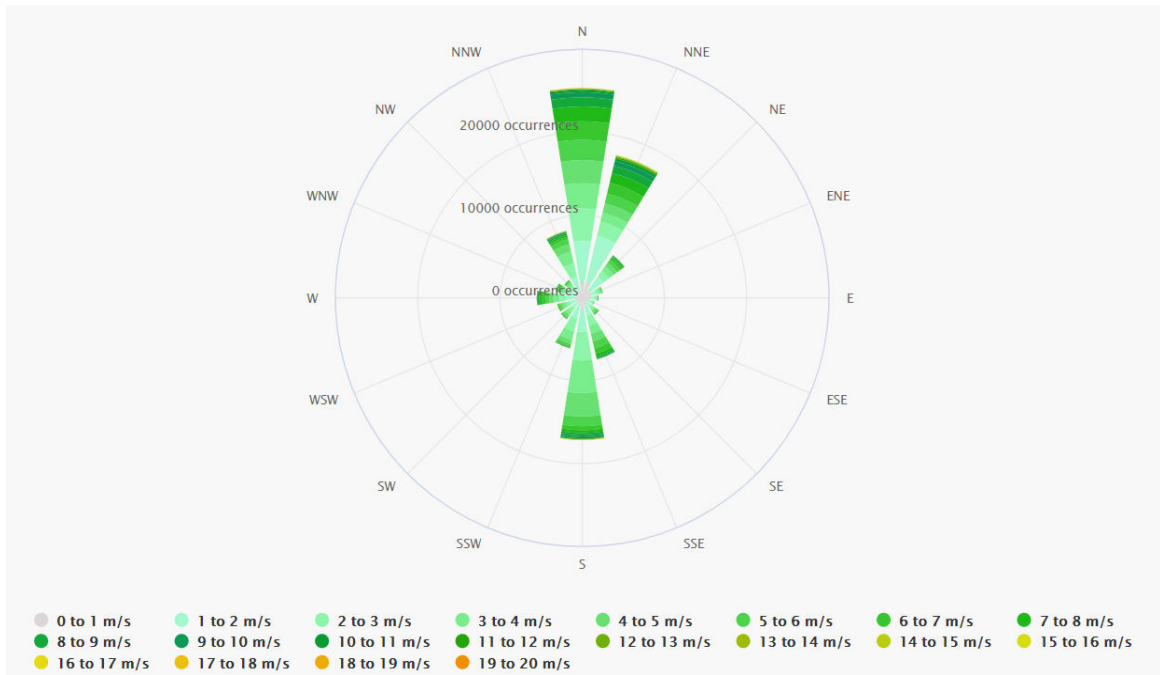
Επιπλέον η ΕΜΥ παρείχε συγκεντρωτικά μηνιαία δεδομένα για την ίδια χρονική περίοδο σχετικά με τη συχνότητα του ανέμου. Ενδεικτικά παρατίθενται τα δεδομένα των μηνών Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου:

Ιανουάριος											
Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CLM/VRB	SUM	
Beaufort	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.08	6.08	
	1	3.07	3.54	3.31	0.63	2.31	0.83	1.36	0.81	15.86	
	2	6.99	5.85	4.15	0.71	3.92	1.66	2.44	1.61	27.34	
	3	8.54	3.43	1.80	0.43	2.74	1.02	2.38	1.88	22.21	
	4	7.27	2.82	0.71	0.12	2.20	0.88	2.06	1.77	17.83	
	5	2.91	0.92	0.23	0.11	1.33	0.32	0.77	0.59	7.18	
	6	0.92	0.42	0.05	0.02	0.44	0.12	0.68	0.21	2.87	
	7	0.16	0.12	0.00	0.00	0.09	0.04	0.12	0.03	0.58	
	8	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06	
>= 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
SUM:	29.89	17.11	10.25	2.03	13.04	4.87	9.82	6.91	6.09	100.00	
Φεβρουάριος											
Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CLM/VRB	SUM	
Beaufort	0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.71	6.72	
	1	2.09	2.79	2.60	0.65	3.00	1.19	1.33	0.69	14.34	
	2	6.02	5.18	3.70	0.96	6.21	2.34	2.27	1.42	28.11	
	3	7.62	3.67	1.72	0.71	4.41	1.53	2.07	1.74	23.47	
	4	6.11	2.97	0.61	0.24	2.22	0.60	2.08	1.73	16.57	
	5	2.33	0.87	0.23	0.10	1.14	0.35	1.17	0.66	6.87	
	6	0.77	0.26	0.15	0.01	0.53	0.17	0.78	0.20	2.86	
	7	0.16	0.03	0.03	0.00	0.10	0.03	0.35	0.05	0.76	
	8	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.15	0.03	0.27	
>= 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04		
SUM:	25.15	15.78	9.04	2.67	17.66	6.23	10.22	6.54	6.72	100.00	

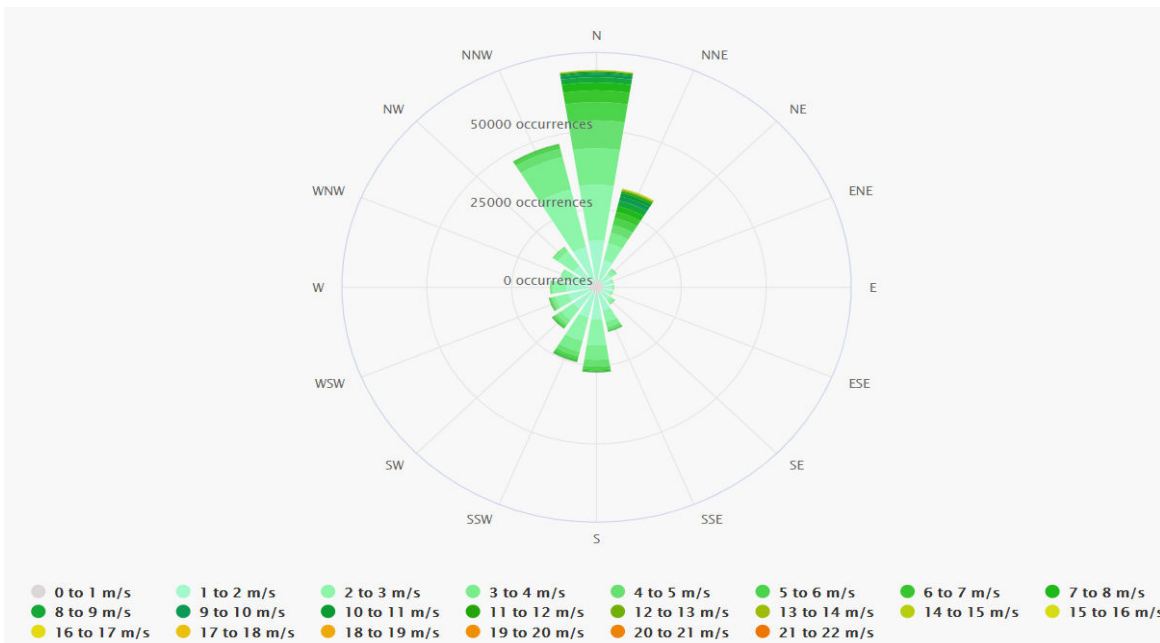
Πίνακας 5.1: Μηνιαία συχνότητα ανέμου ανά κατεύθυνση περιόδου 1956-2010 για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, (ΕΜΥ).

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα και συγκρίσεις με Ευρωκώδικα.

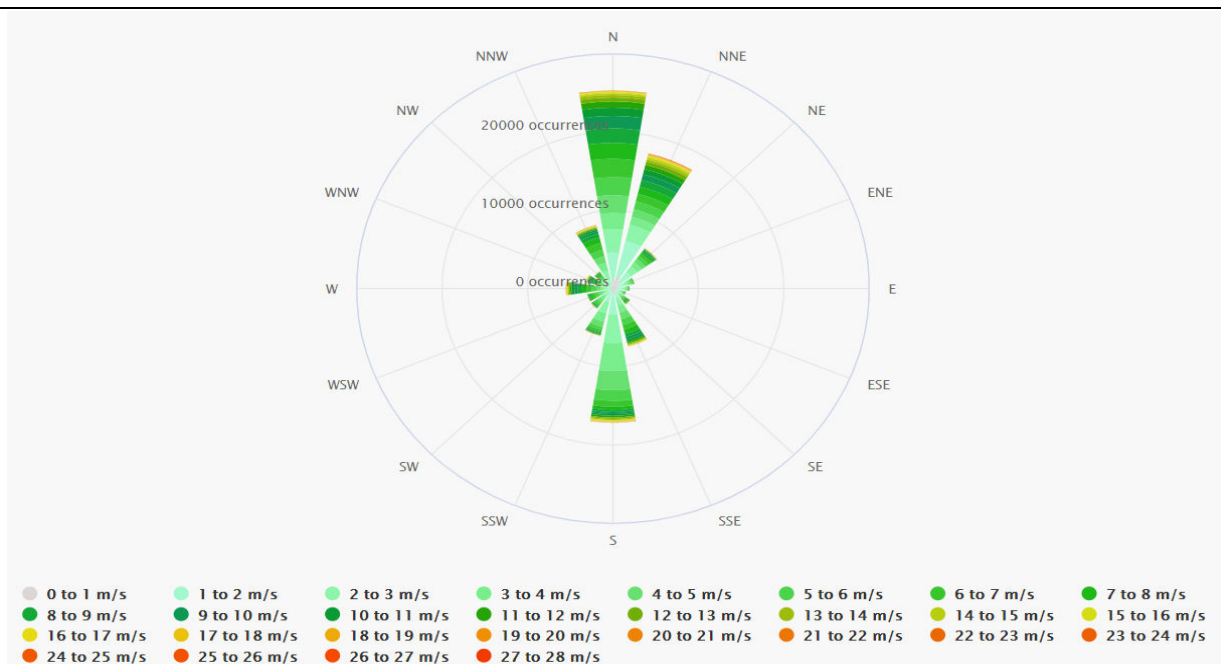
Τα δεδομένα αυτά αν και χρήσιμα ήταν ελλιπή καθώς αμελούσαν σημαντικούς παράγοντες όπως δεδομένα ριπών, δεδομένα συχνοτήτων ανέμων μεγαλύτερων της μέσης τιμής και άλλα. Επομένως υπήρχε η ανάγκη για επιπλέον αναζήτηση από άλλες πηγές. Η εταιρία Meteoblue AG η οποία εδράζεται στην Ελβετία, παρέχει ανεμολογικά δεδομένα περιοχών βασιζόμενη σε μαθηματικά μοντέλα με μεγάλη ποικιλία μεταβλητών. Στα δεδομένα αυτά βασίστηκε η πειραματική διάταξη και η επιλογή των διάφορων σεναρίων μελέτης. Παρακάτω παρατίθενται με μορφή ρόδων ανέμου.



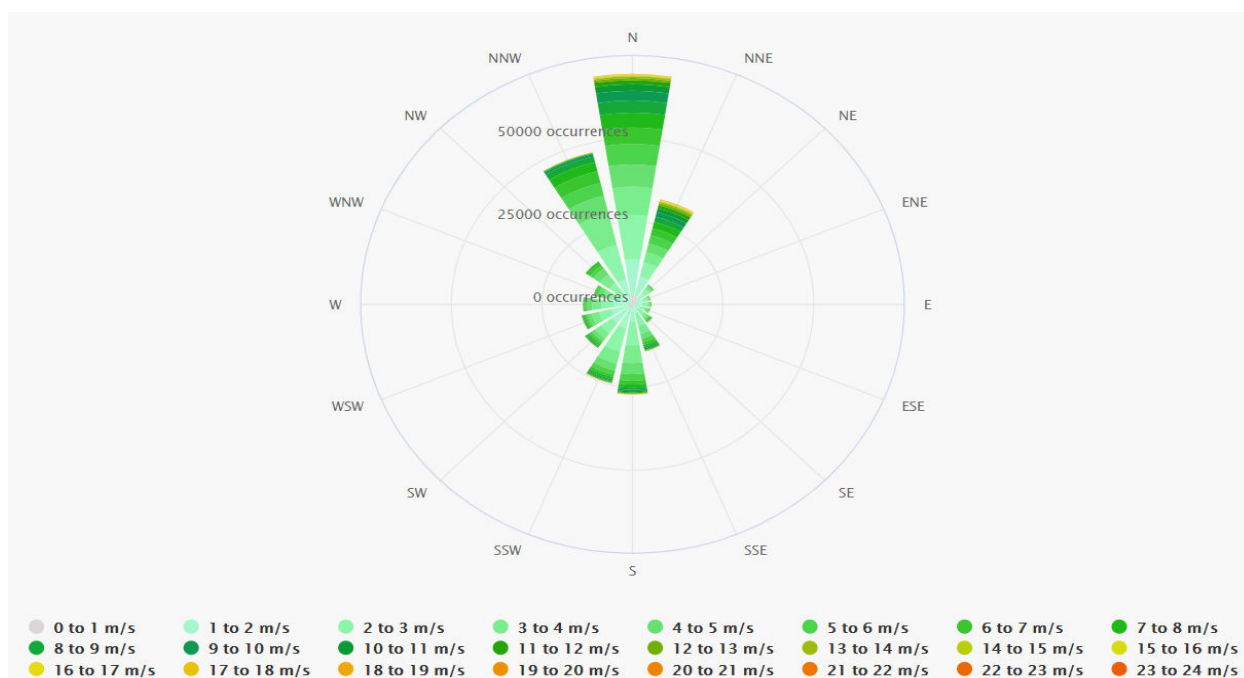
Σχήμα 5.1: Ανεμολόγιο για ταχύτητα ανέμου στα 10m, υψηλή ανάλυση, 1/2008 – 2/2021.



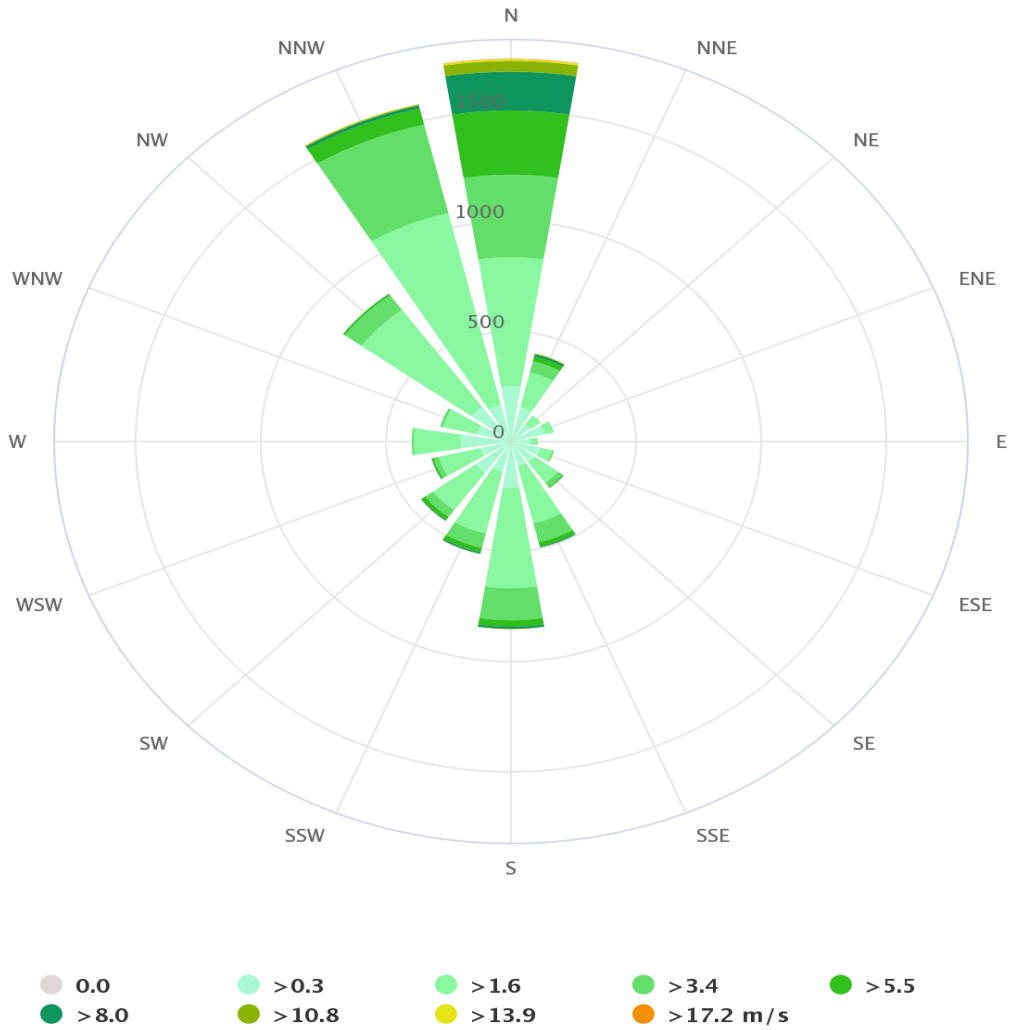
Σχήμα 5.2: Ανεμολόγιο για ταχύτητα ανέμου στα 10m, χαμηλή ανάλυση, 1/2008 – 2/2021.



Σχήμα 5.3: Ανεμολόγιο για ριπή ανέμου στα 10m, υψηλή ανάλυση, 1/2008 – 2/2021.



Σχήμα 5.4: Ανεμολόγιο για ριπή ανέμου στα 10m, χαμηλή ανάλυση, 1/2008 – 2/2021.



Σχήμα 5.5: Ώρες το έτος κατά τις οποίες η μέση ωριαία ταχύτητα ξεπερνά συγκεκριμένη τιμή (προσομοίωση 30 ετών)

5.2 Αποτελέσματα στις μετρηθείσες κατευθύνσεις.

Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται ως συντελεστές πίεσης. Συγκεκριμένα υπολογίζονται:

- $C_{p,mean}$ - μέση τιμή του συντελεστή.
- $C_{p,rms}$ - τυπική απόκλιση του συντελεστή.
- $C_{p,max}$ - μέγιστη τιμή του συντελεστή - υπολογίζεται ως:

$$C_{p,max} = C_{p,mean} + 3.5C_{p,rms} \quad (5.1.1)$$

- $C_{p,min}$ - ελάχιστη τιμή του συντελεστή - υπολογίζεται ως:

$$C_{p,min} = C_{p,mean} - 3.5C_{p,rms} \quad (5.1.2)$$

Ο συντελεστής πίεσης C_p ορίζεται ως:

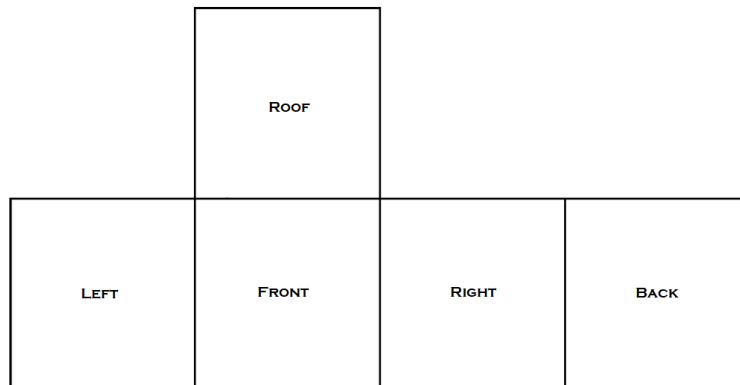
$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} \quad (5.1.3)$$

Όπου:

- p (Pa), η στατική πίεση στην επιφάνεια του πύργου, στη μετρούμενη απόληψη.
- p_{ref} (Pa), η στατική πίεση της αδιατάρακτης ροής.
- ρ ($\frac{kg}{m^3}$), η πυκνότητα του αέρα.
- U_H ($\frac{m}{s}$), η ανάντι ταχύτητα του αέρα στο ύψος του κτηρίου.

Σύμφωνα με τα ανεμολογικά δεδομένα και το Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 1 η αντιπροσωπευτική τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε πραγματικά δεδομένα επιλέχθηκε 33m/s η οποία αντιστοιχεί σε έναν αριθμό Reynolds της τάξης του 10^8 . Είναι όμως γνωστό ότι η συμπεριφορά του ανέμου γύρω από κτήρια είναι παρόμοια για αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους από 20.000. Επομένως δεν υπήρχε η ανάγκη επίτευξης τέτοιας ταχύτητας στην αεροσήραγγα. Συγκεκριμένα η ανάντι ταχύτητα στο ύψος του μοντέλου επιλέχθηκε να είναι $U_H = 3.75 \frac{m}{s}$ η οποία αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds, $Re = 60.000$.

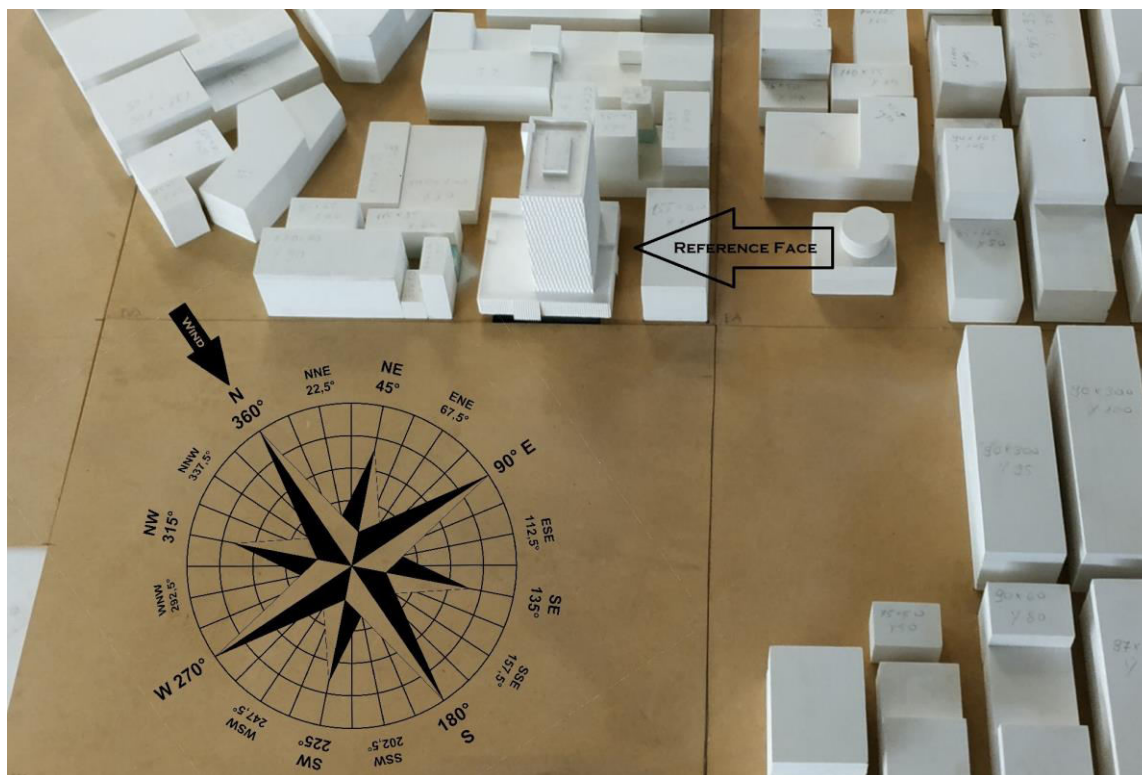
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι συντελεστές πίεσης παρουσιάζονται παρακάτω μέσω ισοϋψών καμπυλών (Contour Lines), οι άξονες αδιαστατοποιούνται με το ύψος του Πύργου, και ακολουθούν την παρακάτω κατανομή:



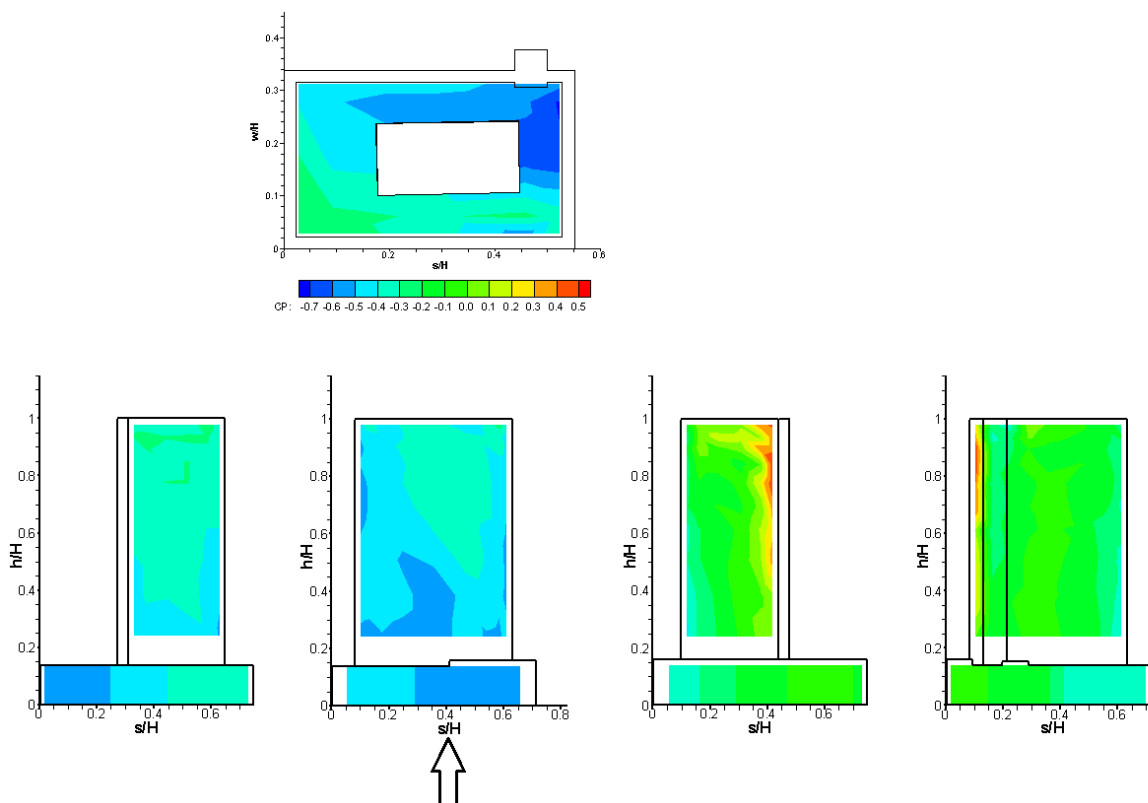
Σχήμα 5.6: Ανάπτυγμα για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε μορφή ισοϋψών καμπυλών

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε ισοϋψείς καμπύλες έγινε χρήση του λογισμικού Tecplot 360.

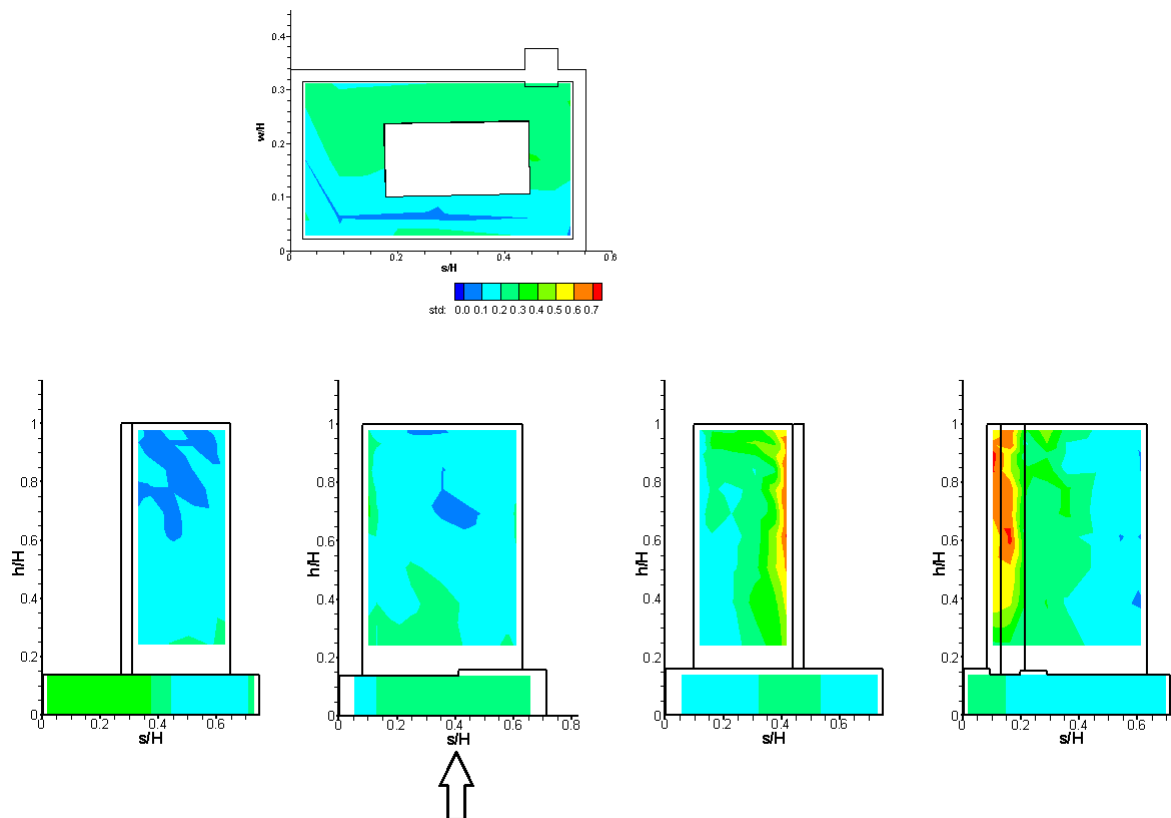
5.2.1 NORTH



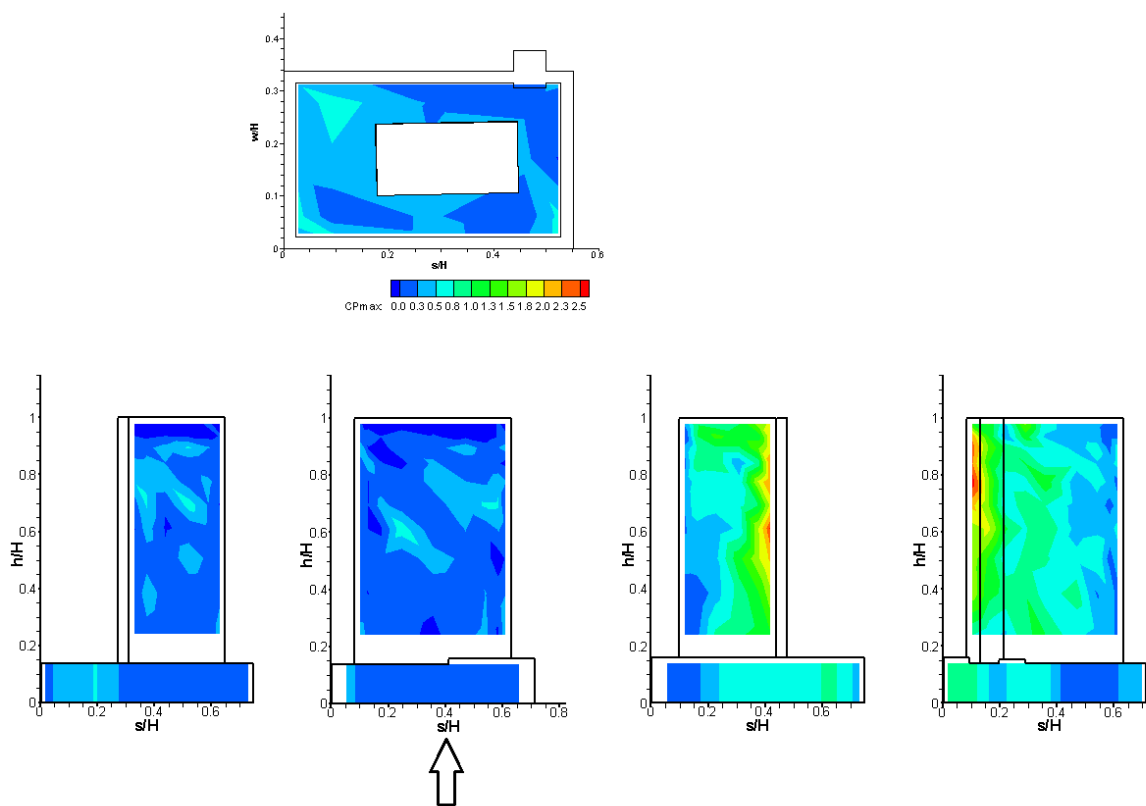
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο NORTH.



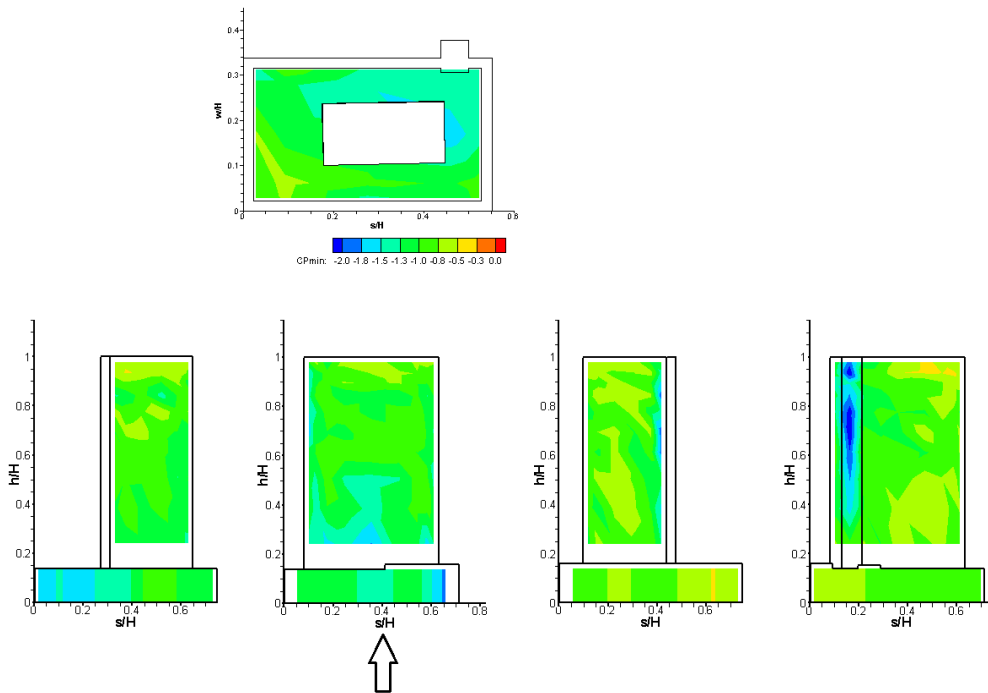
Σχήμα 5.8: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NORTH κατεύθυνση.



Σχήμα 5.9: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NORTH κατεύθυνση.



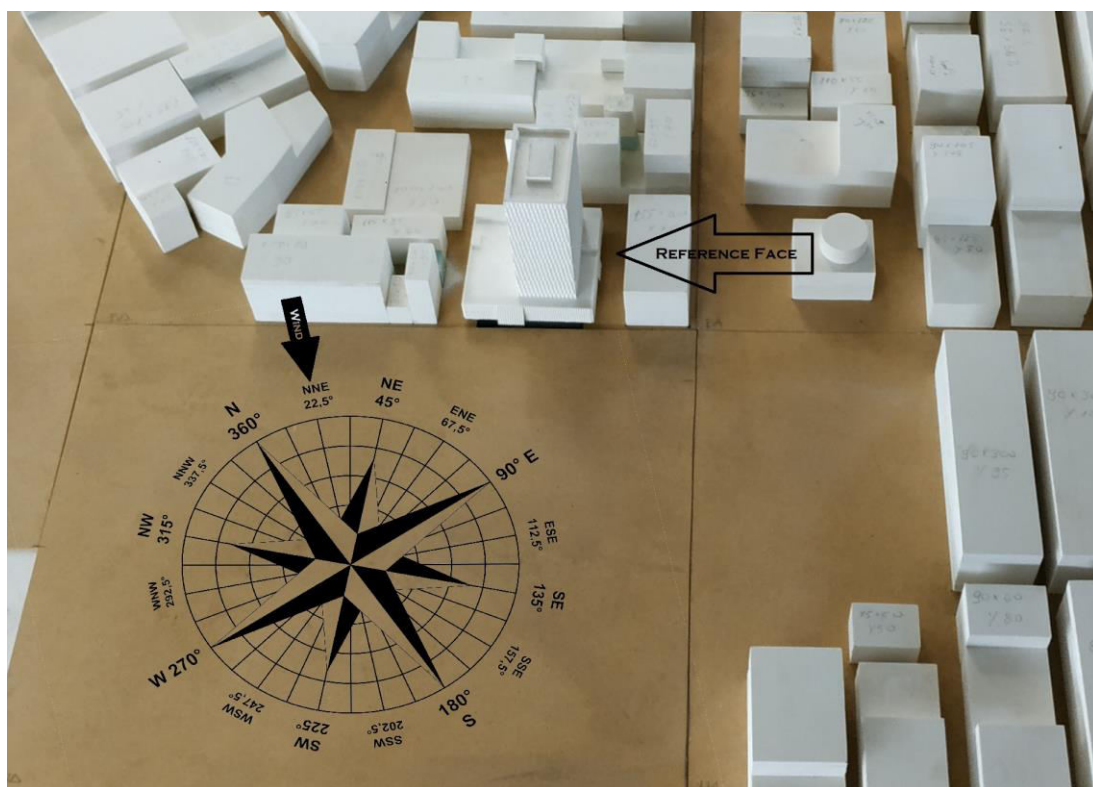
Σχήμα 5.10: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NORTH κατεύθυνση.



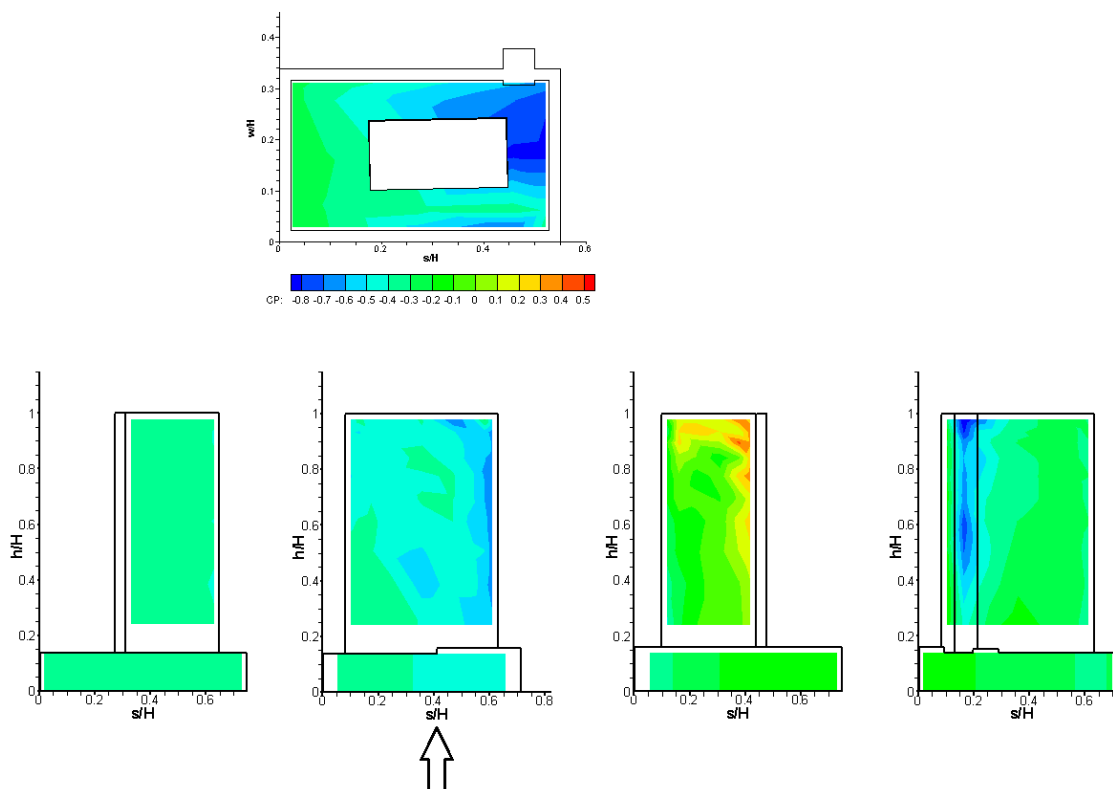
Σχήμα 5.11: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NORTH κατεύθυνση.

Στην προκειμένη κατεύθυνση του ανέμου, οι κύριες όψεις που επηρεάζονται από την επίδραση του είναι η δεξιά και η οπίσθια. Όπως παρατηρείται οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή πίεσης εμφανίζονται στην ακμή μεταξύ των δύο αυτών όψεων και συγκεκριμένα σε ένα επίπεδο του άνω τμήματος του πύργου. Το τελευταίο αποτελεί μια αναμενόμενη συμπεριφορά της ασκούμενης πίεσης καθώς η περιοχή εκείνη βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο ύψος των κτηρίων γύρω από τον πύργο, επομένως η ροή ανέμου έχει μικρότερες απώλειες ενέργειας λόγω της ύπαρξης της γύρω πόλης. Στα ίδια σημεία εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις. Επιπλέον λόγω της ακμής της οροφής η ροή επιταχύνεται προς αυτήν, με αποτέλεσμα τις μειωμένες τιμές συντελεστών πίεσης συγκριτικά με τις μέγιστες χαμηλότερα. Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή, εμφανίζονται στο οπίσθιο μέρος και συγκεκριμένα στο τμήμα του ανελκυστήρα όπου λόγω γεωμετρίας προκύπτουν στροβιλισμοί της ροής. Λόγω των στροβιλισμών αυτών παρατηρούνται και αυξημένες τυπικές αποκλίσεις του συντελεστή στα σημεία αυτά. Στην οροφή επίσης λόγω στροβιλισμών από την ύπαρξη τοιχείου, ο συντελεστής πίεσης λαμβάνει μικρές τιμές και έχει μεγάλες τυπικές αποκλίσεις, κοντά στις πλευρές του μοντέλου οι οποίες είναι εκτεθειμένες στη ροή του ανέμου.

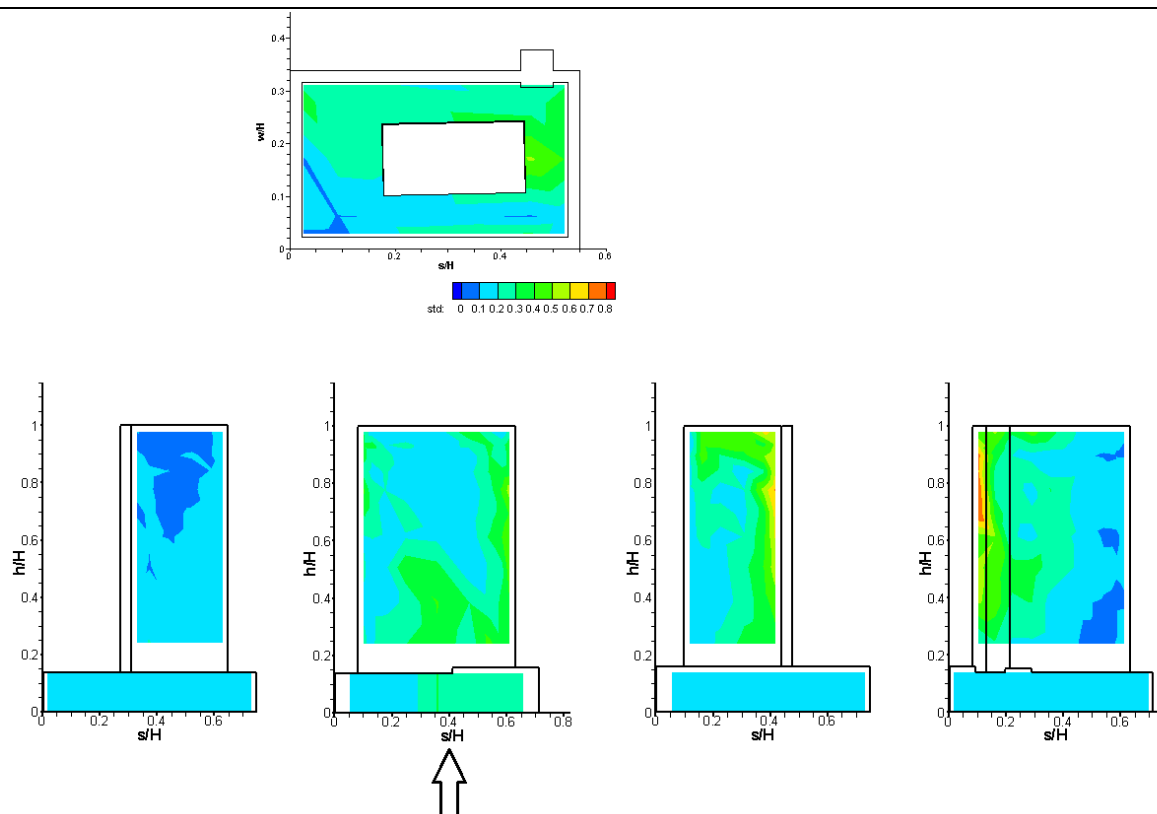
5.2.2 NNE



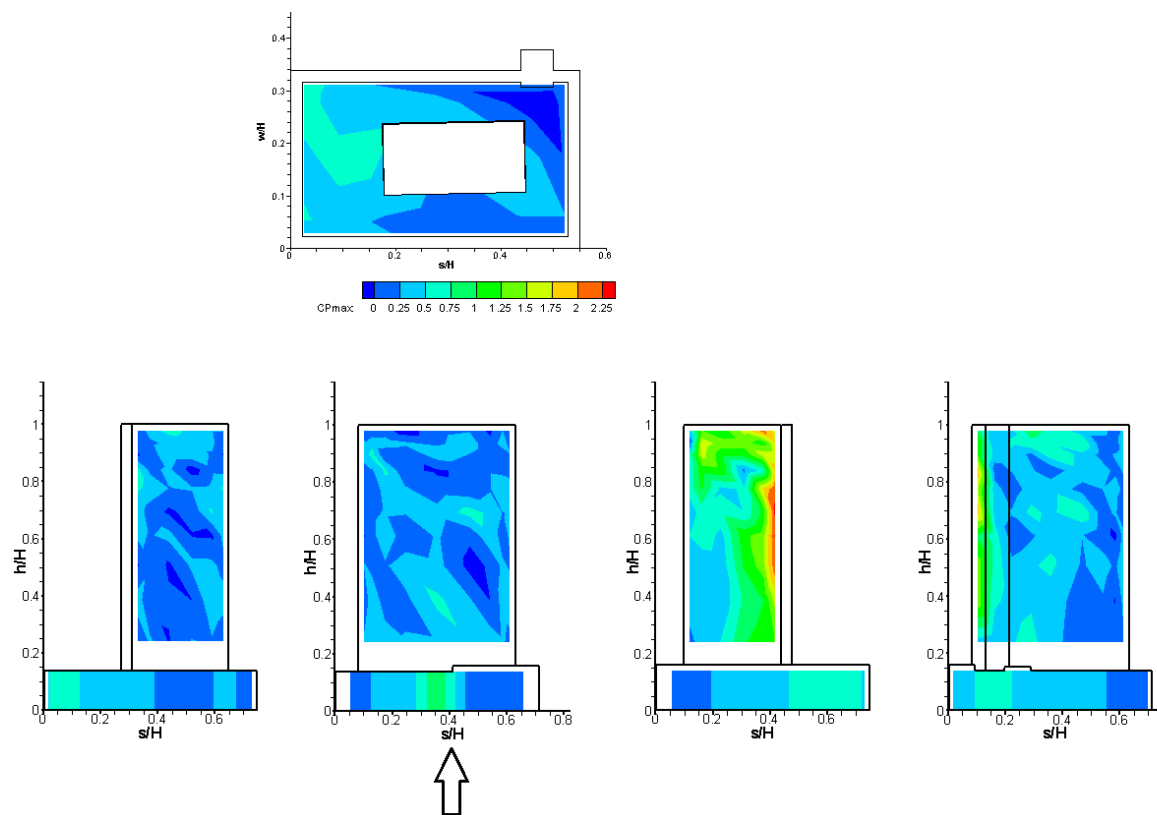
Σχήμα 5.12: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο NNE.



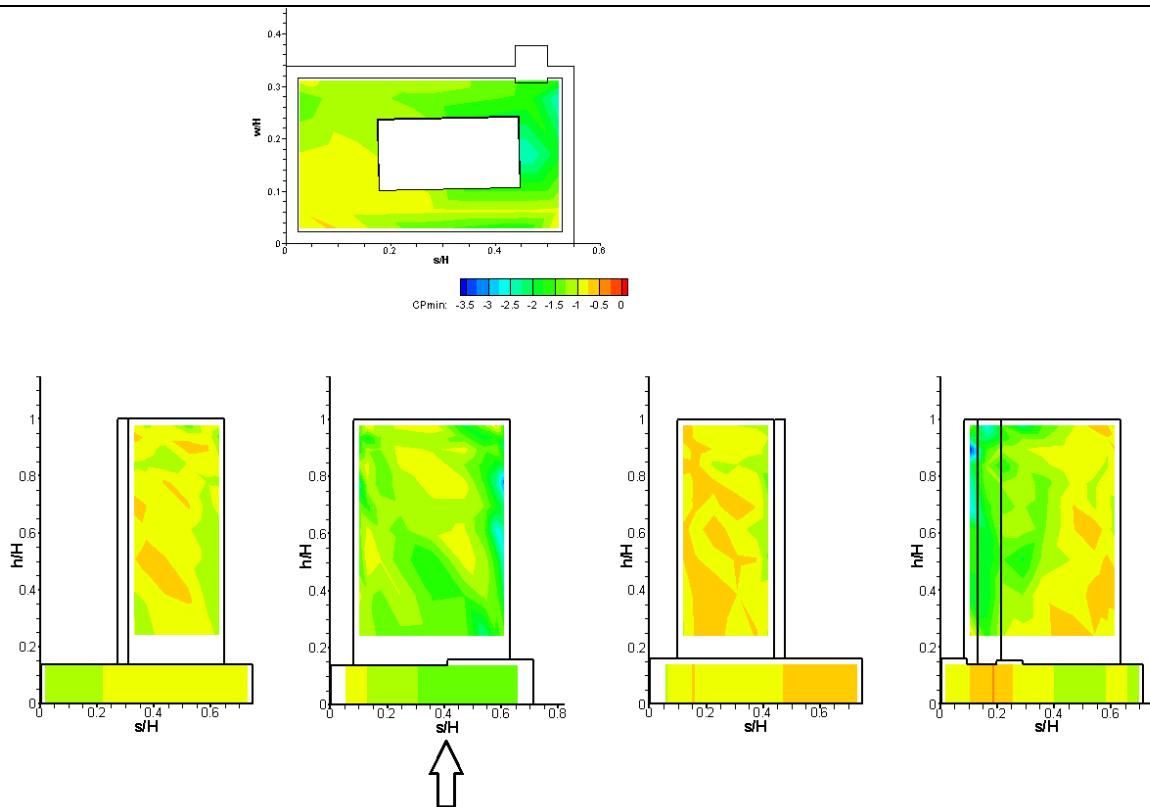
Σχήμα 5.13: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNE κατεύθυνση.



Σχήμα 5.14: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNE κατεύθυνση.



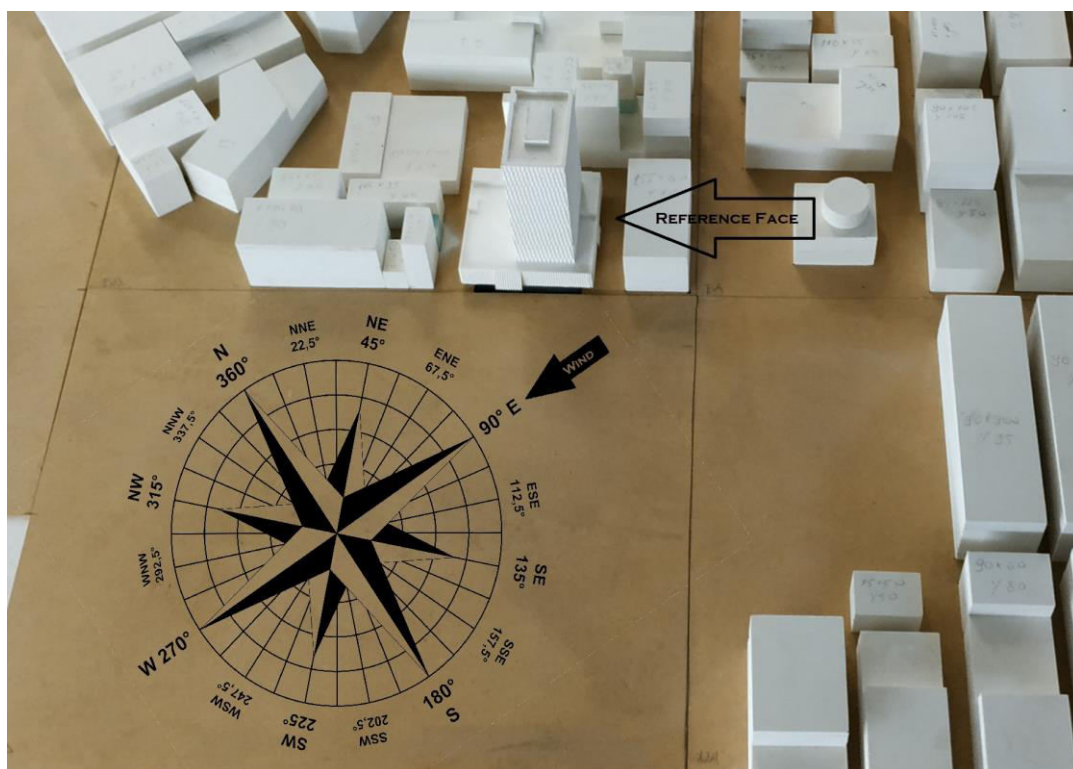
Σχήμα 5.15: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNE κατεύθυνση.



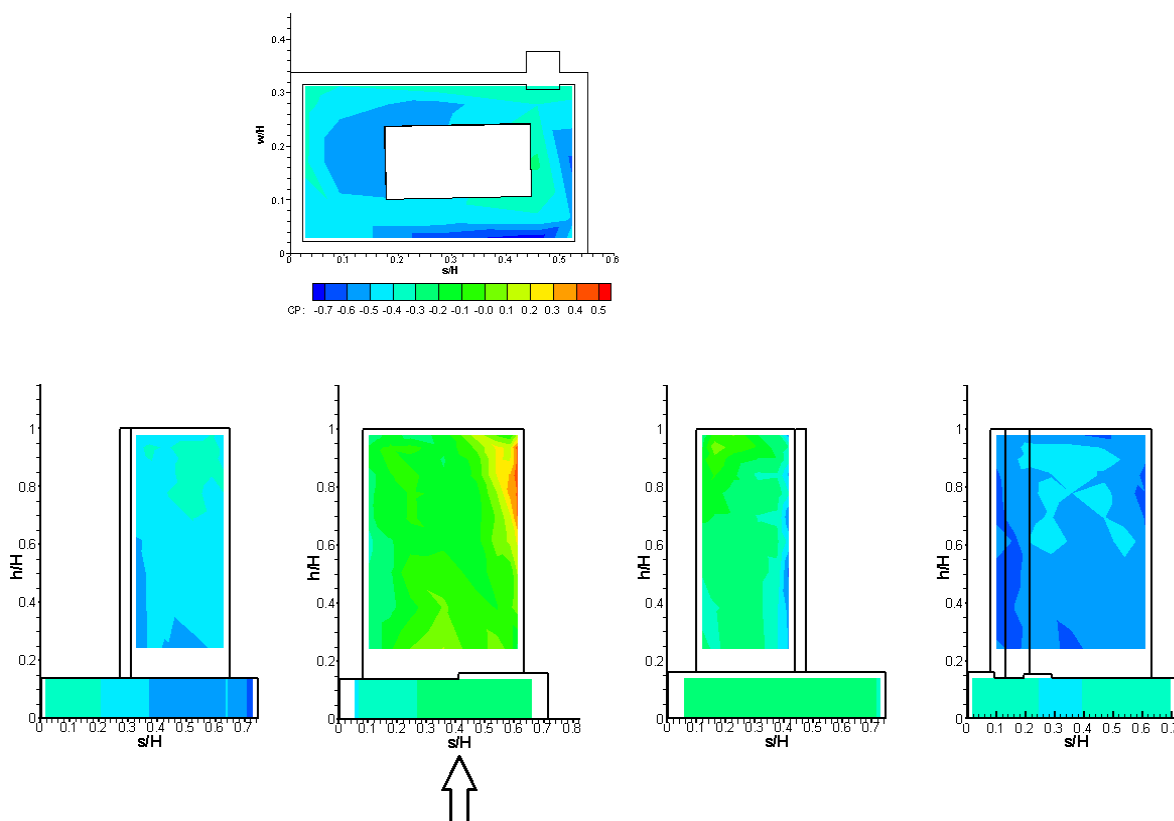
Σχήμα 5.16: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNE κατεύθυνση.

Στην NNE κατεύθυνση η κύρια όψη που επηρεάζεται είναι η δεξιά, όμως εκτεθειμένη στη ροή είναι και οπίσθια όψη. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση οι μέγιστες τιμές του συντελεστή πίεσης και οι τυπικές αποκλίσεις αυτού, εμφανίζονται στις όψεις αυτές σε αντίστοιχα χωρία. Επίσης, όπως και προηγουμένως, οι ελάχιστες μέσες τιμές προκύπτουν στις επιφάνειες του ανεκλυστήρα και της οροφής όπου εμφανίζονται στροβιλισμοί.

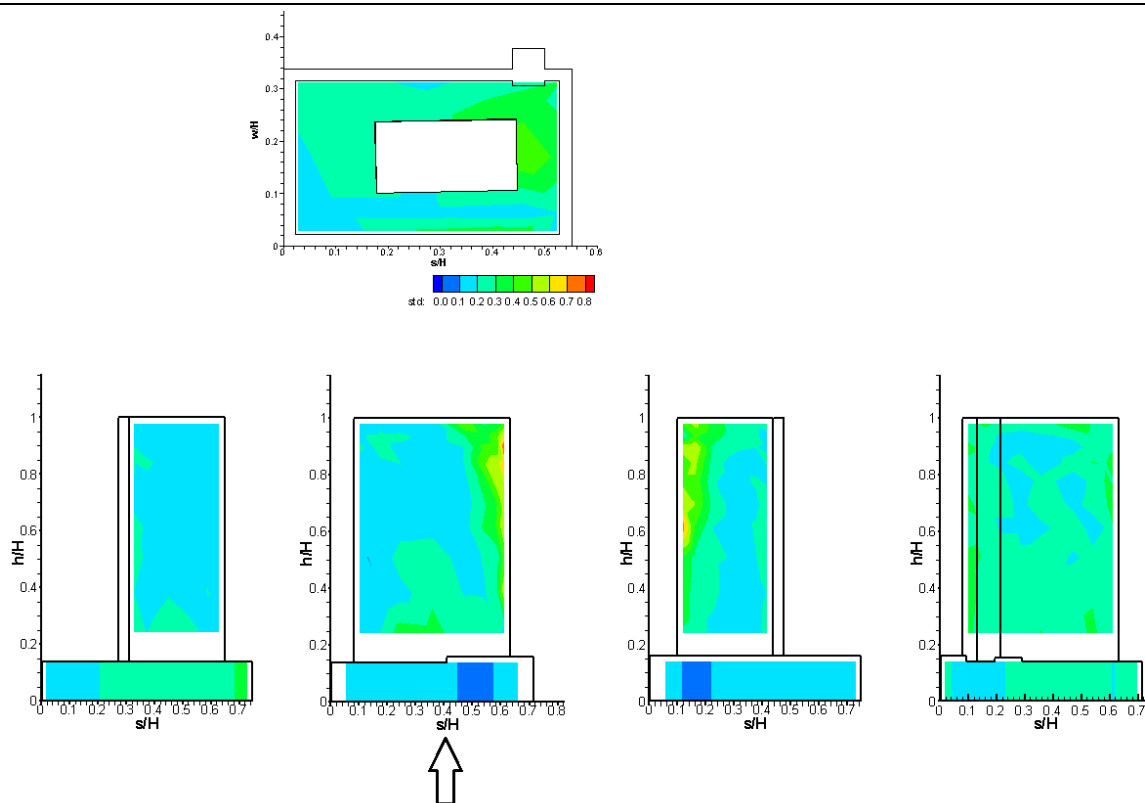
5.2.3 EAST



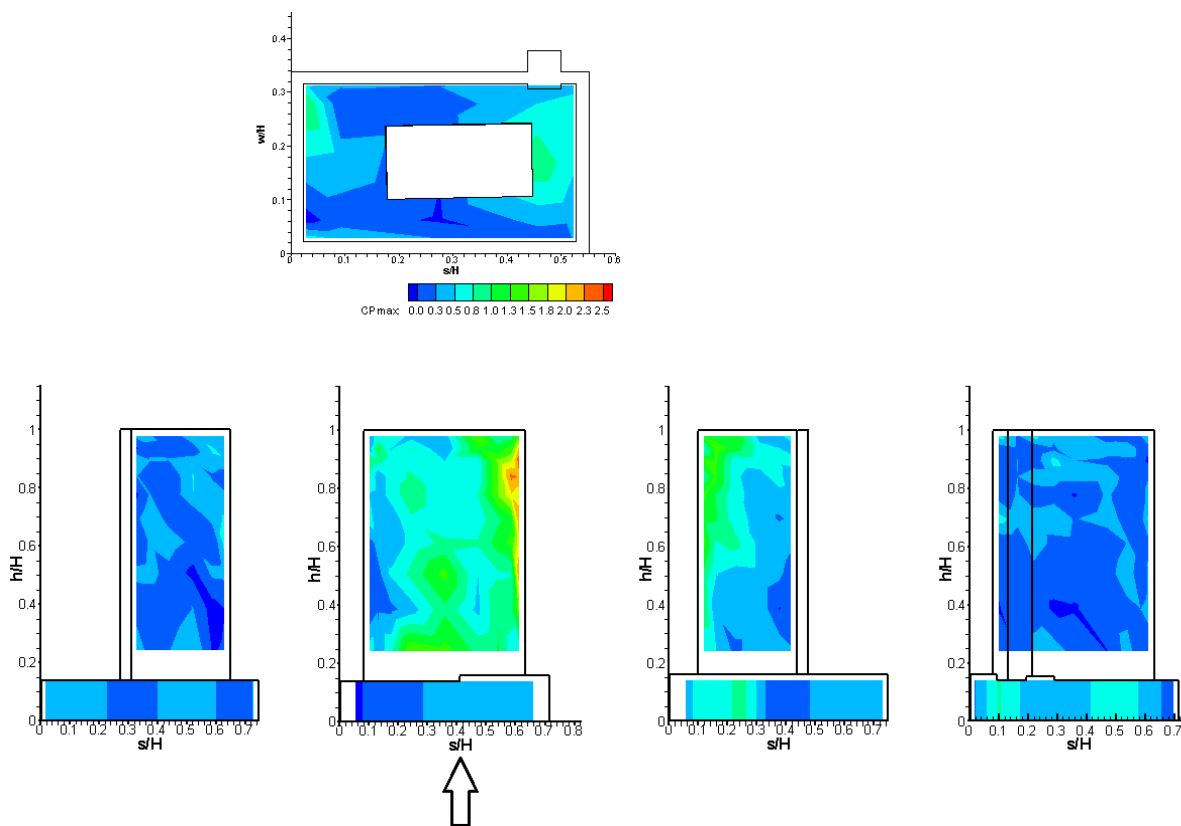
Σχήμα 5.17: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο EAST.



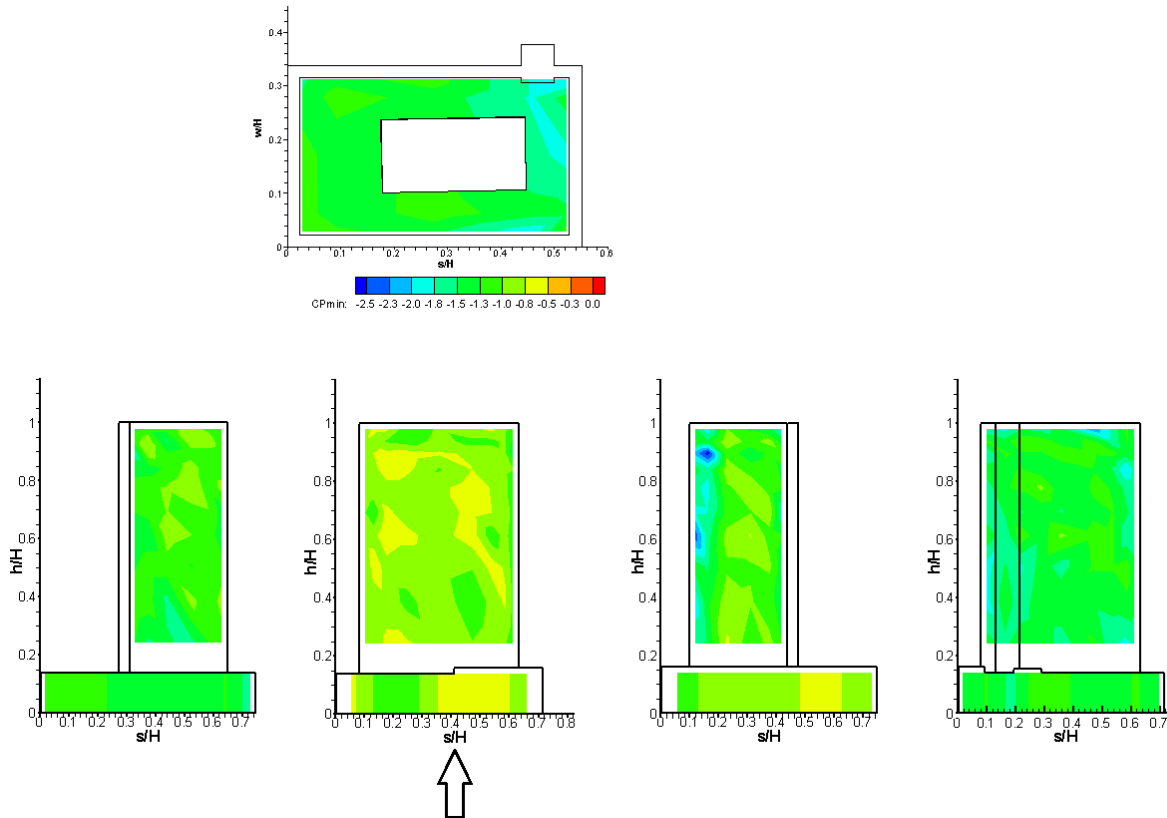
Σχήμα 5.18: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην EAST κατεύθυνση.



Σχήμα 5.19: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην EAST κατεύθυνση.



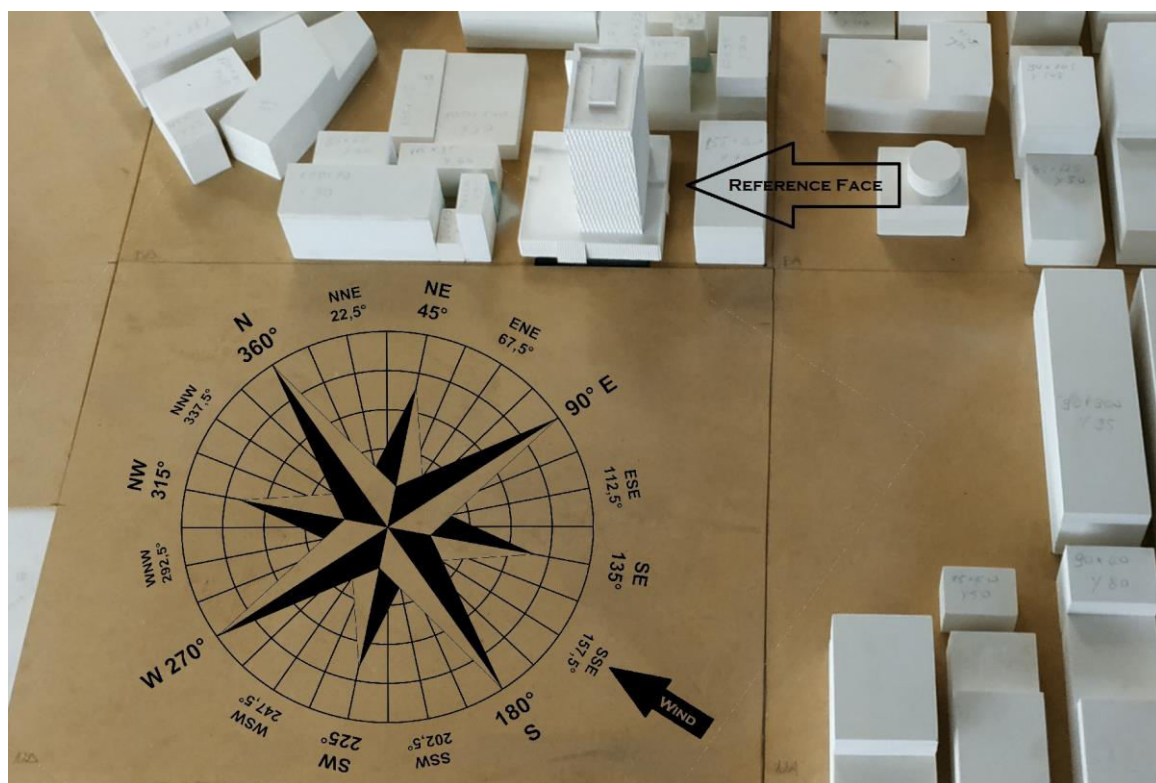
Σχήμα 5.20: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην EAST κατεύθυνση.



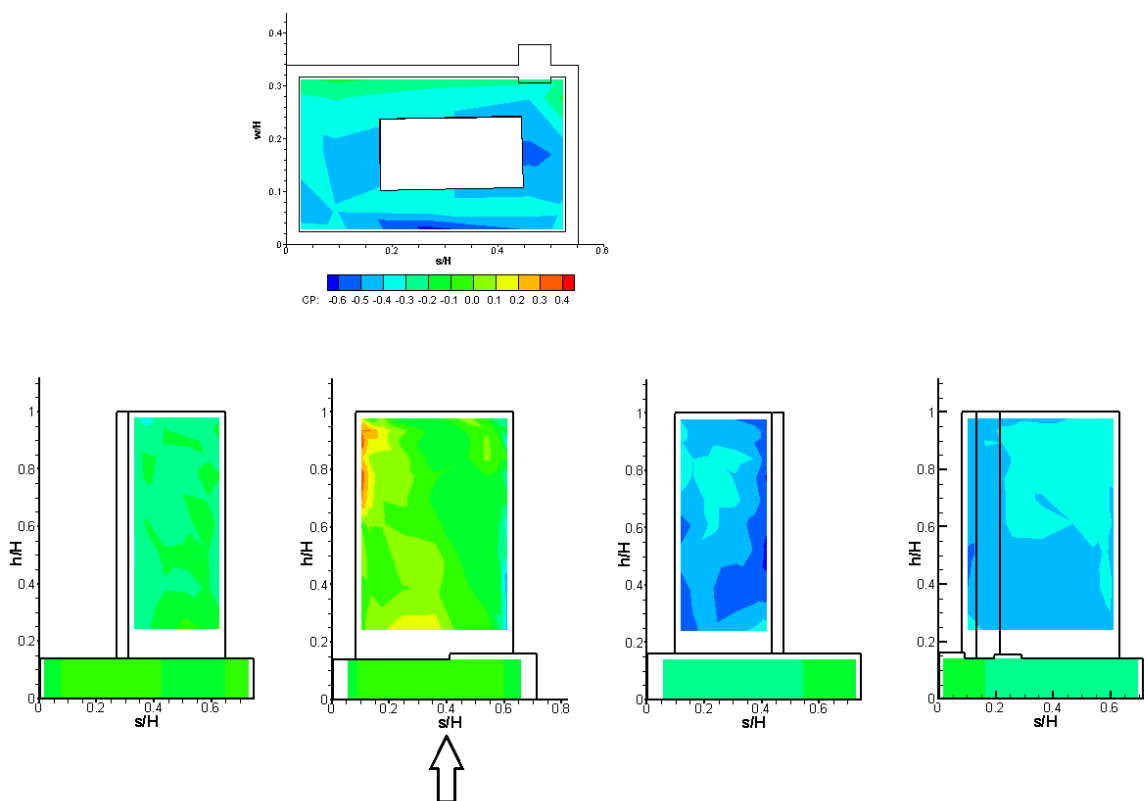
Σχήμα 5.21: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην EAST κατεύθυνση.

Στην EAST κατεύθυνση ανέμου επηρεάζονται η εμπρόσθια και η δεξιά όψη του κτηρίου. Οι μέγιστες τιμές του μέσου συντελεστή και οι μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις αυτού, εμφανίζονται όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτές τις όψεις, στην μεταξύ τους ακμή, σε επίπεδο πάλι λίγο χαμηλότερο από το ύψος του κτηρίου. Στην οροφή πλέον οι μικρότεροι μέσοι συντελεστές εμφανίζονται στην ακμή μεταξύ των προαναφερθέντων όψεων. Όπως είναι διακριτό, η ροή αποκολλάται στην ακμή της εμπρόσθιας με την αριστερή όψη, καθώς οι συντελεστές πίεσης έχουν στην τελευταία παραπλήσιες τιμές και ελάχιστες αποκλίσεις. Παρ' όλα αυτά στην οπίσθια όψη κάτι ανάλογο δεν ισχύει καθώς διαφαίνεται η επίδραση της δομής του ανελκυστήρα μέσω μειωμένων συντελεστών πίεσης και αυξημένων τυπικών αποκλίσεων. Να σημειωθεί εδώ ότι κατά αυτή την κατεύθυνση ο άνεμος παρεμβάλλεται από μεγάλη έκταση κτηρίων μέχρι να έλθει σε επαφή με τον πύργο.

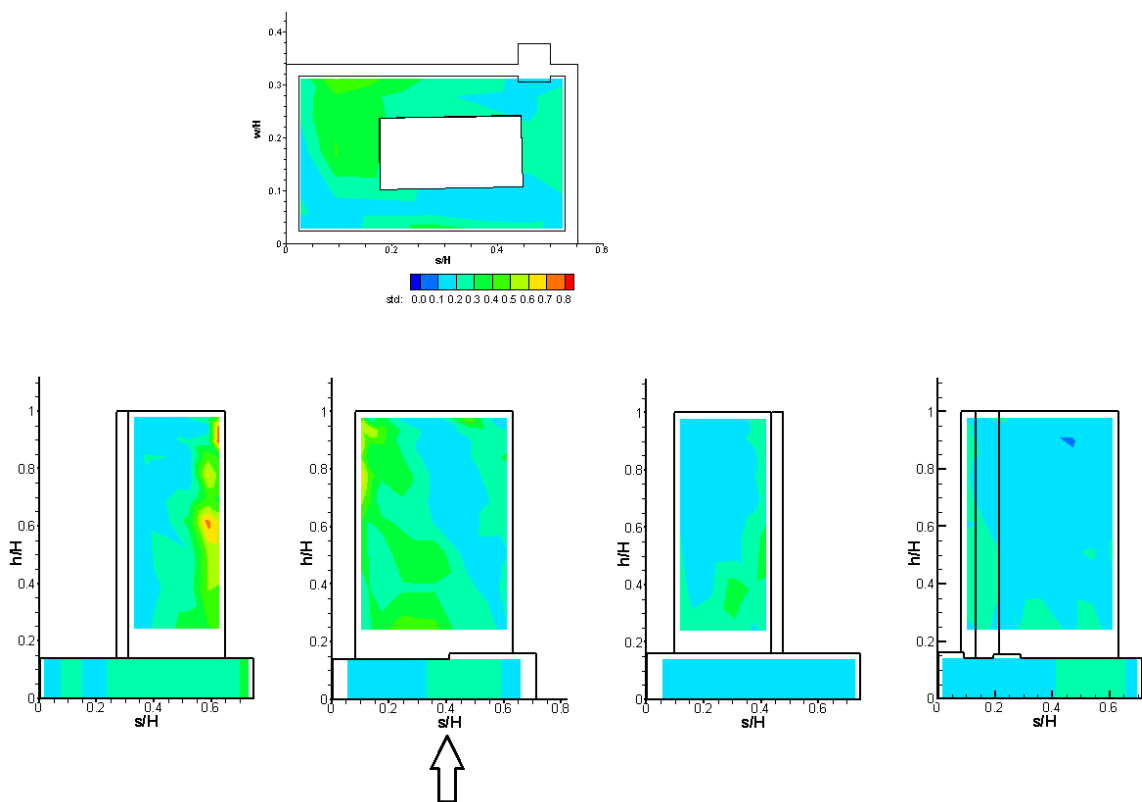
5.2.4 SSE



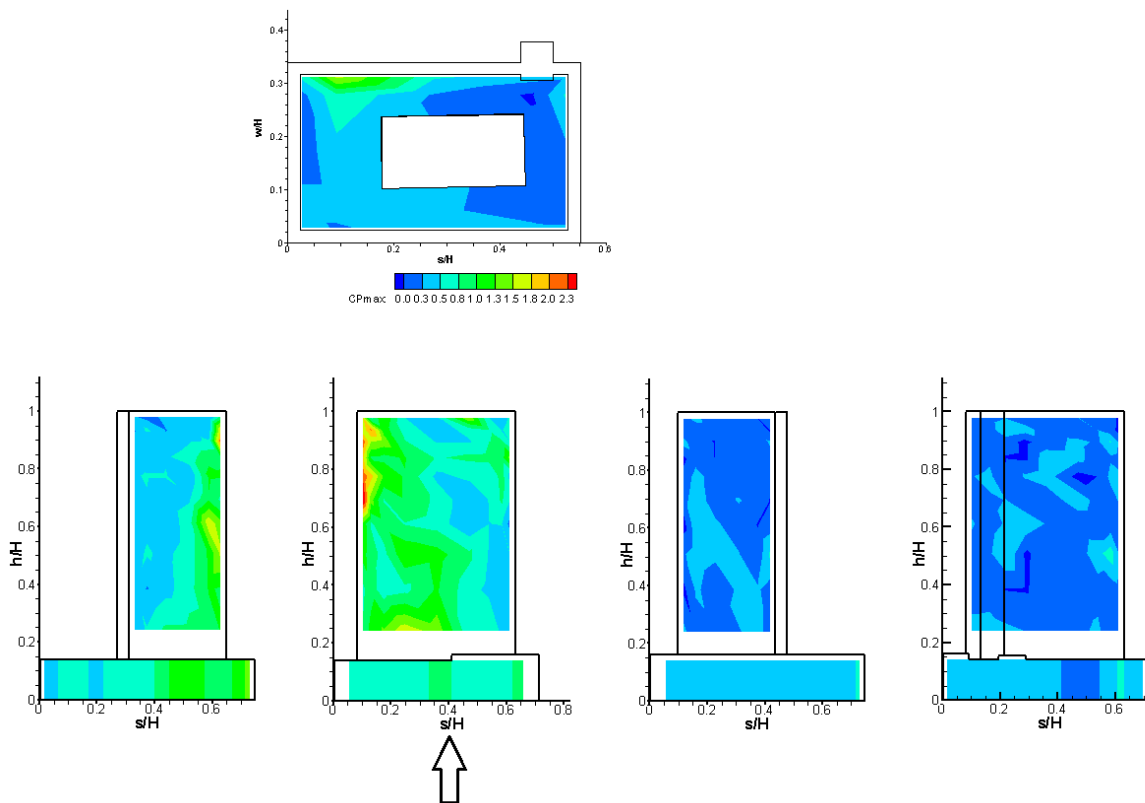
Σχήμα 5.22: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο SSE.



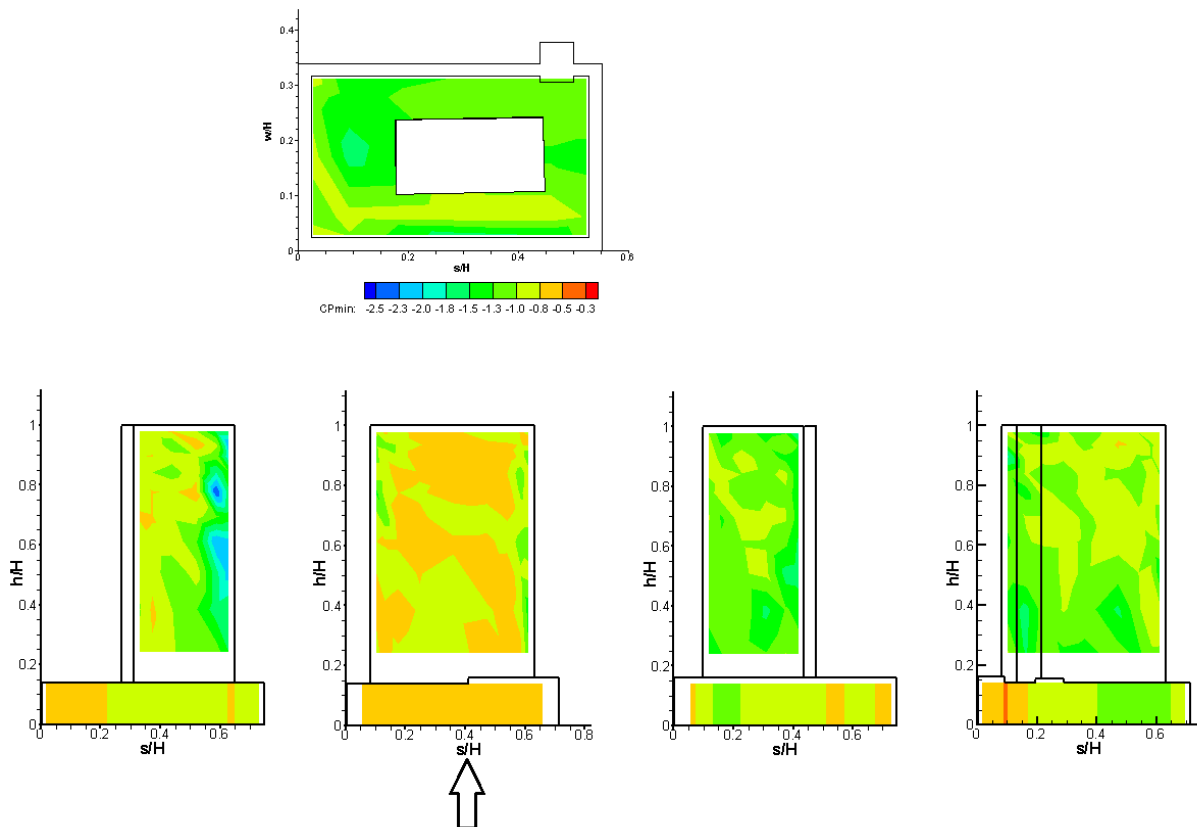
Σχήμα 5.23: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.



Σχήμα 5.24: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.



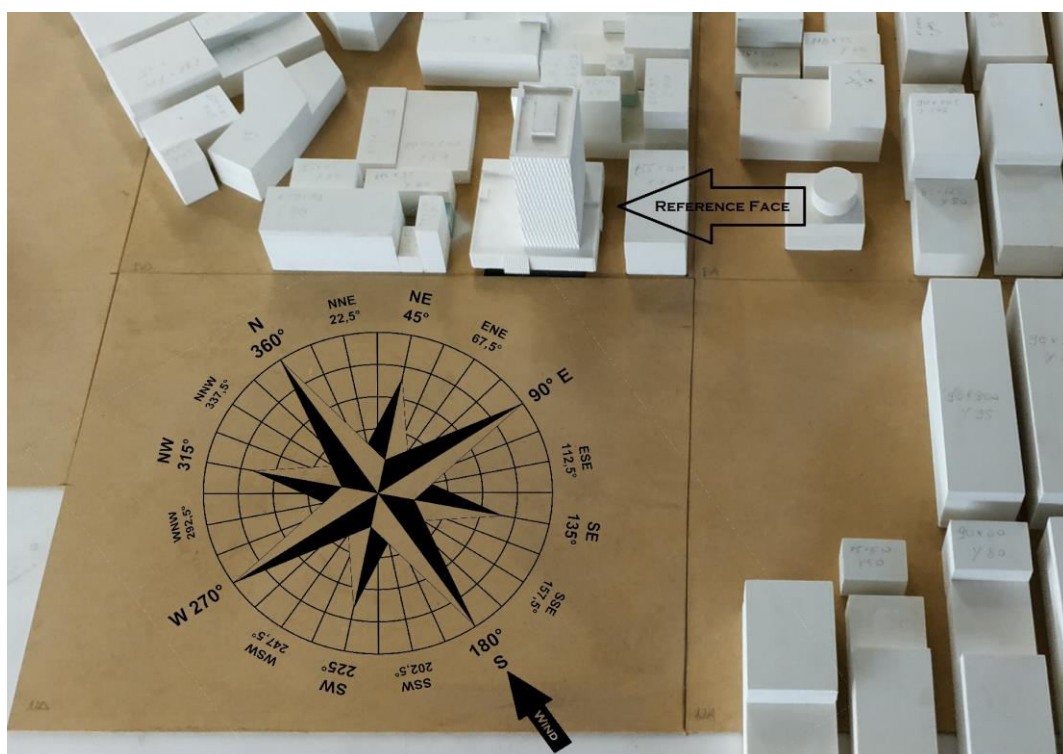
Σχήμα 5.25: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.



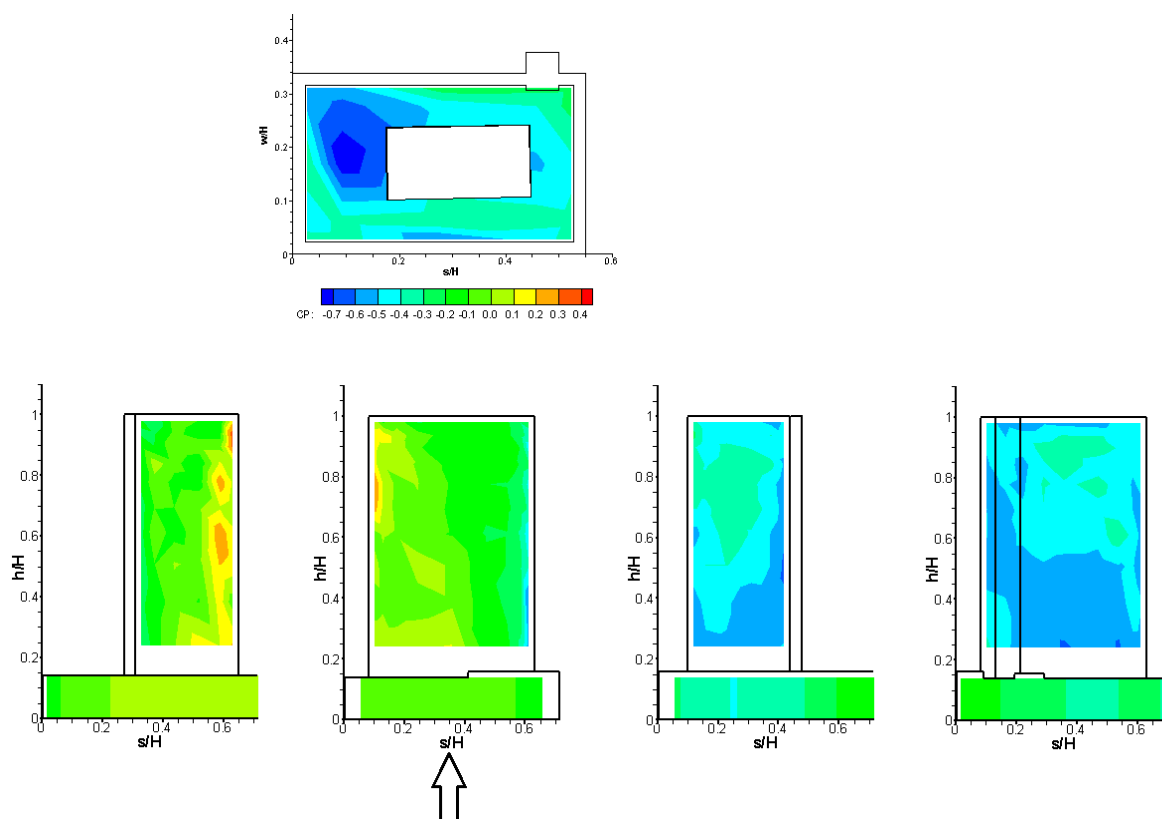
Σχήμα 5.26: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.

Εδώ η κύρια επηρεαζόμενη κατεύθυνση είναι η εμπρόσθια, και σε λιγότερο βαθμό η αριστερή. Ισχύουν οι παραπάνω παρατηρήσεις με τη διαφορά ότι στην προκειμένη κατεύθυνση οι τιμές είναι μειωμένες συγκριτικά με τις αναμενόμενες. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης αδόμητης επιφάνειας μεταξύ των κτηρίων ανάντι του πύργου και του ίδιου του πύργου, επιτρέποντας έτσι στροβιλή ροή στο μεταξύ του πεδίο. Η ροή αποκολλάται στην δεξιά όψη, μη επιτρέποντας στροβιλισμούς λόγω ανελκυστήρα στην οπίσθια.

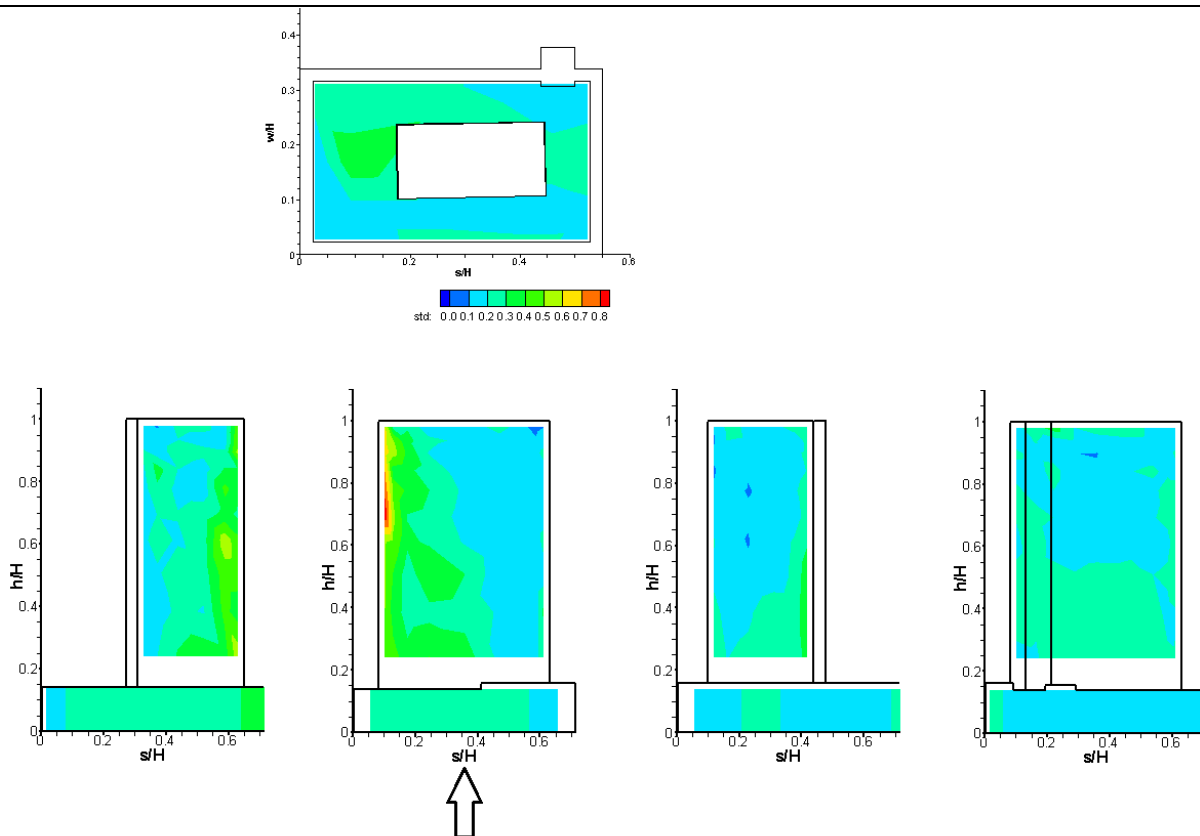
5.2.5 SOUTH



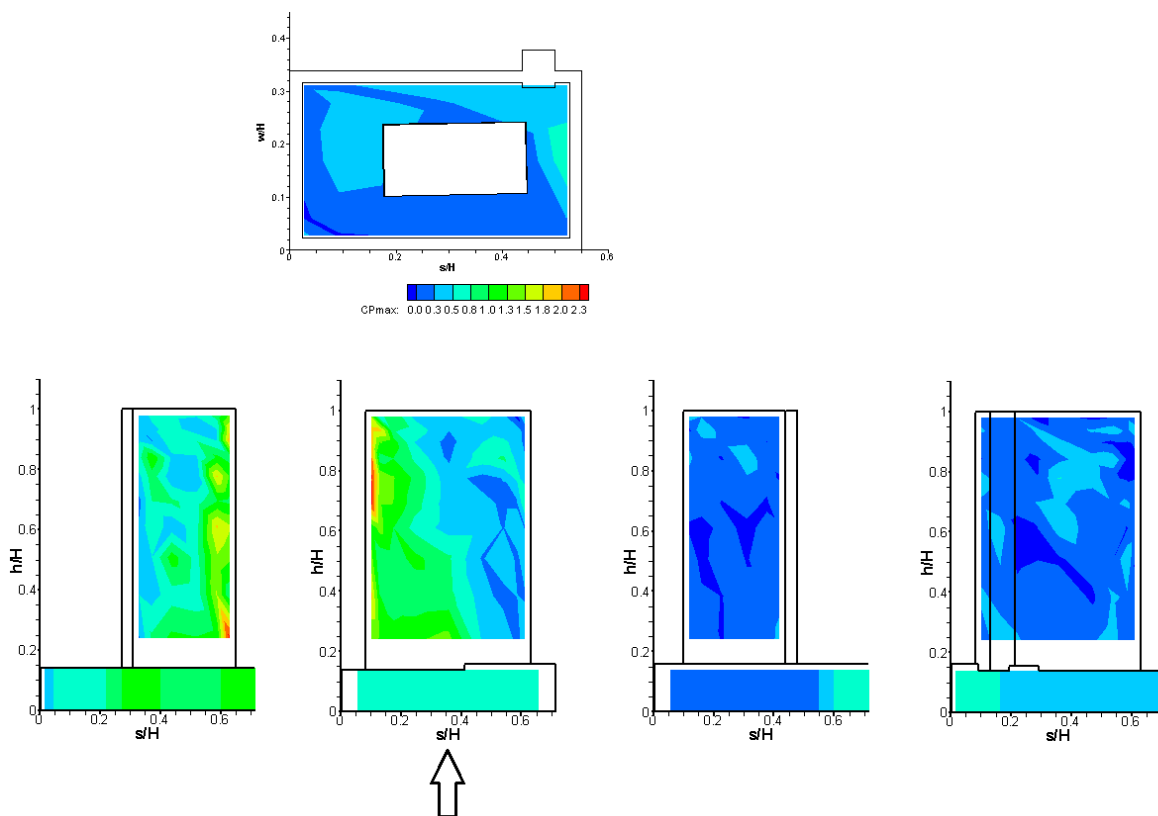
Σχήμα 5.27: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο SOUTH.



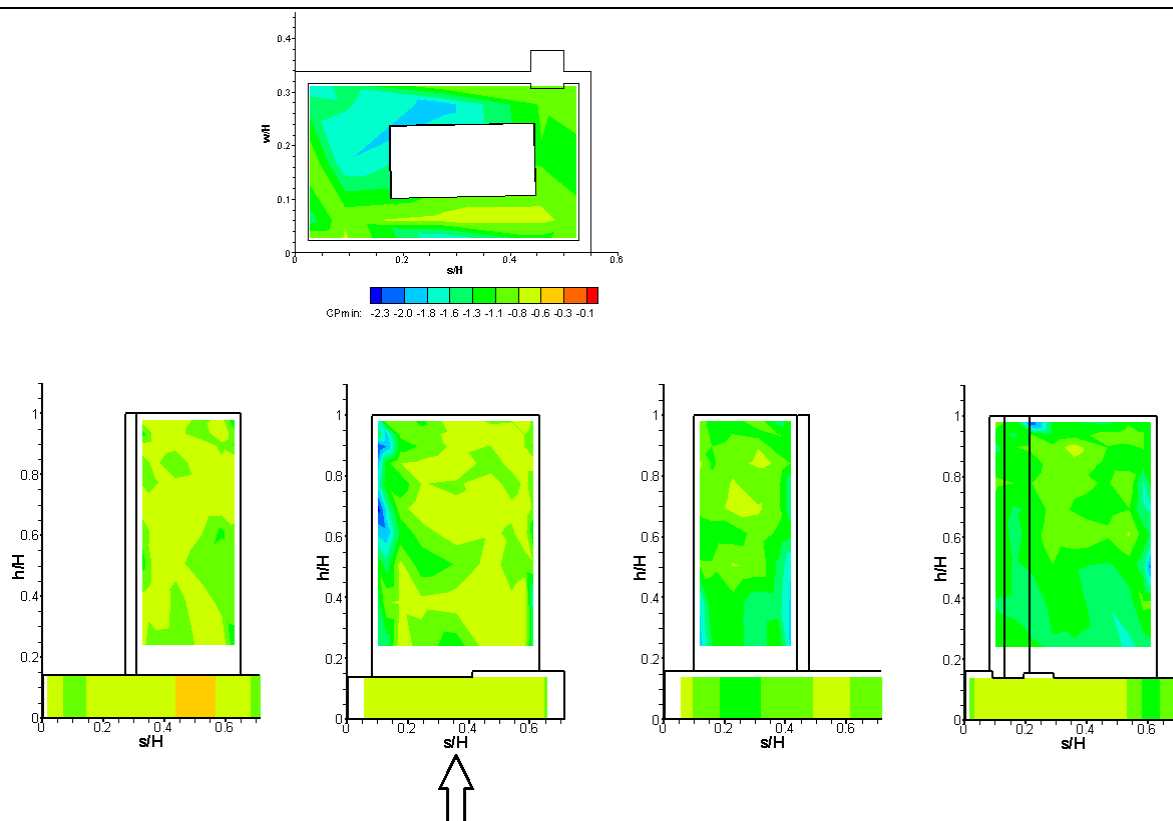
Σχήμα 5.28: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SOUTH κατεύθυνση.



Σχήμα 5.29: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.



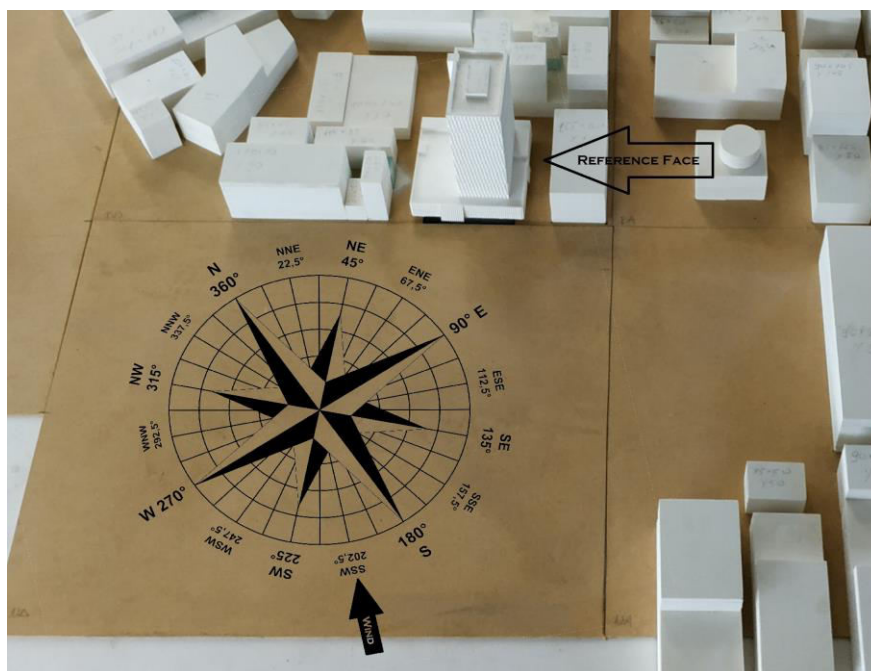
Σχήμα 5.30: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.



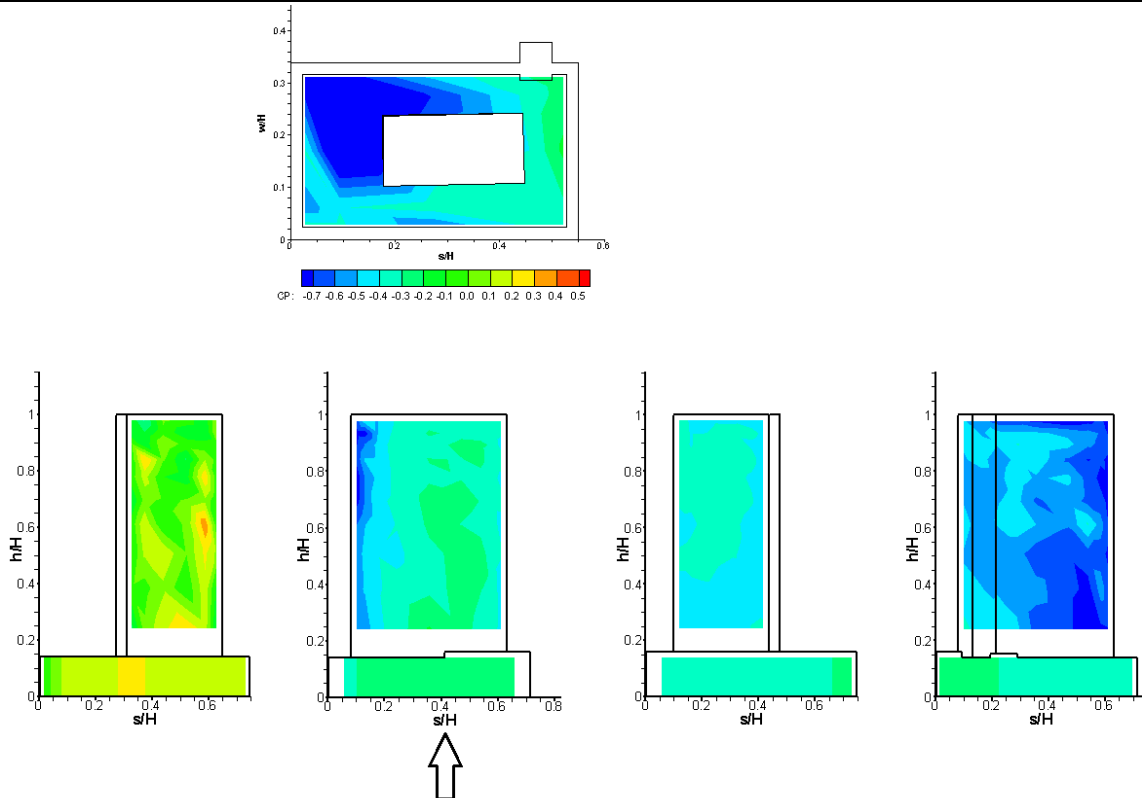
Σχήμα 5.31: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSE κατεύθυνση.

Η κατεύθυνση SOUTH εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με την SSE

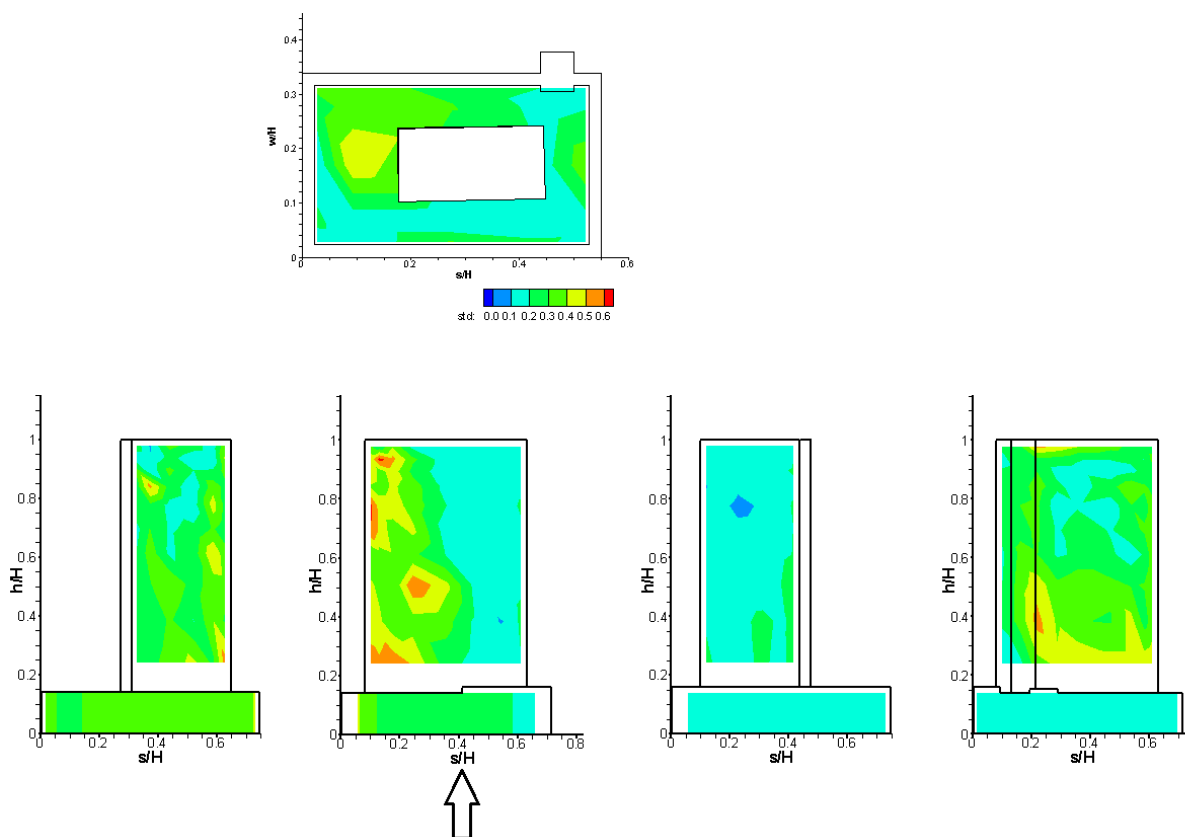
5.2.6 SSW



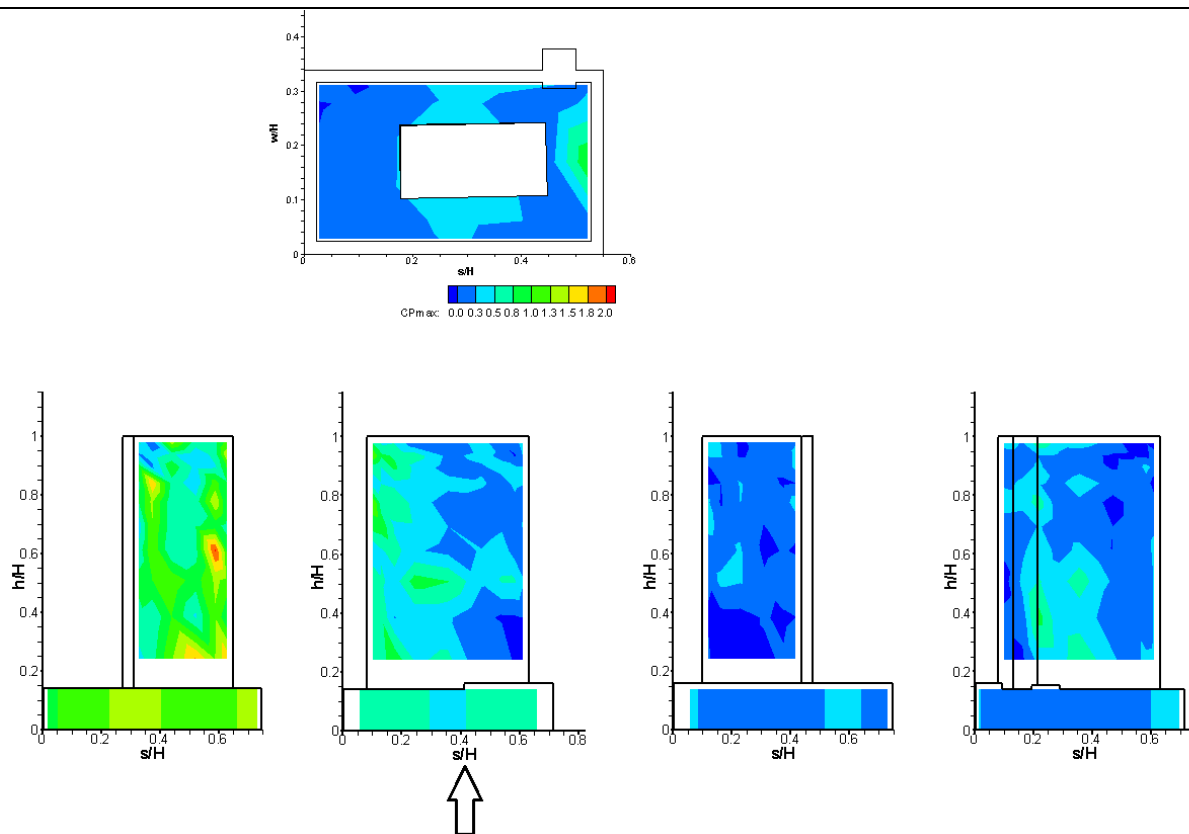
Σχήμα 5.32: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο SSW.



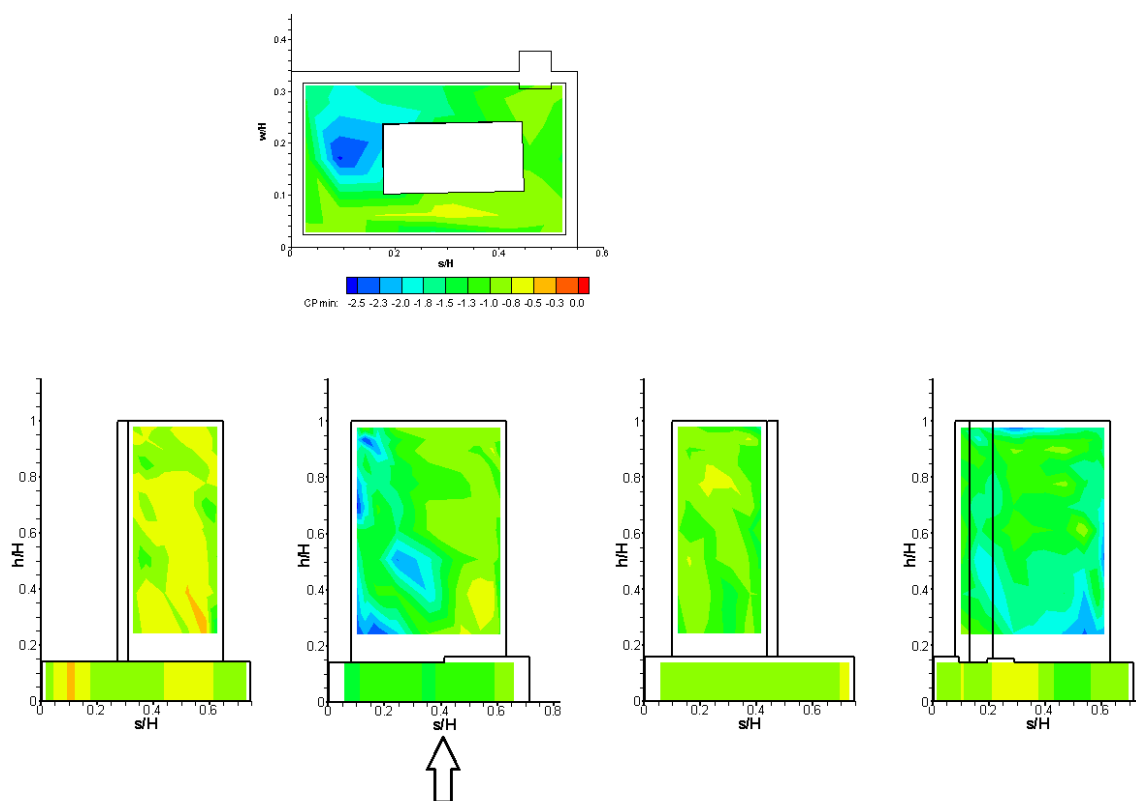
Σχήμα 5.33: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSW κατεύθυνση.



Σχήμα 5.34: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSW κατεύθυνση.



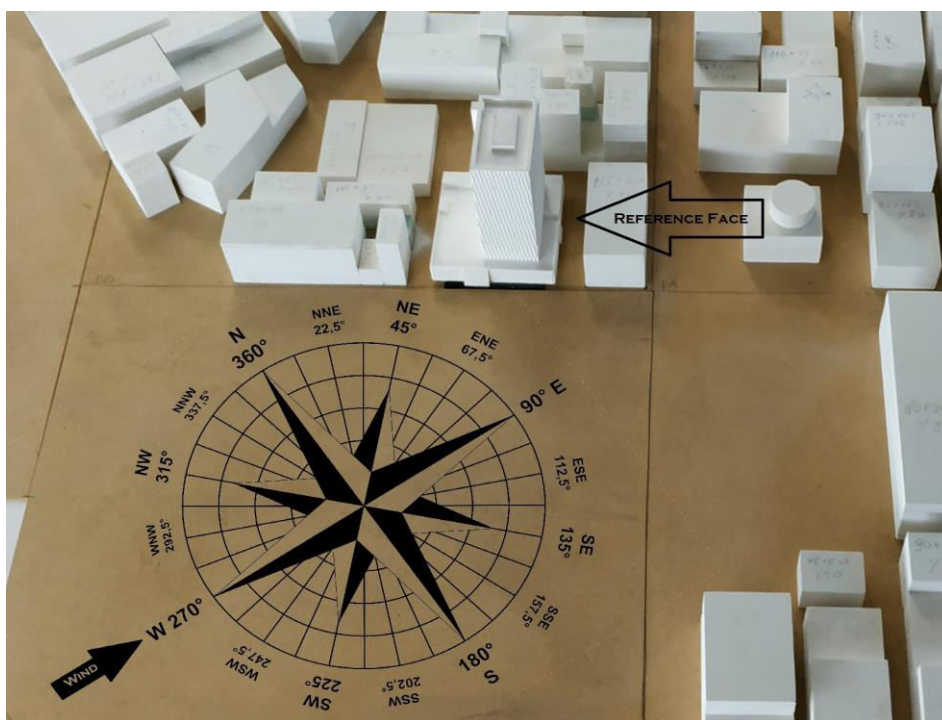
Σχήμα 5.35: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSW κατεύθυνση.



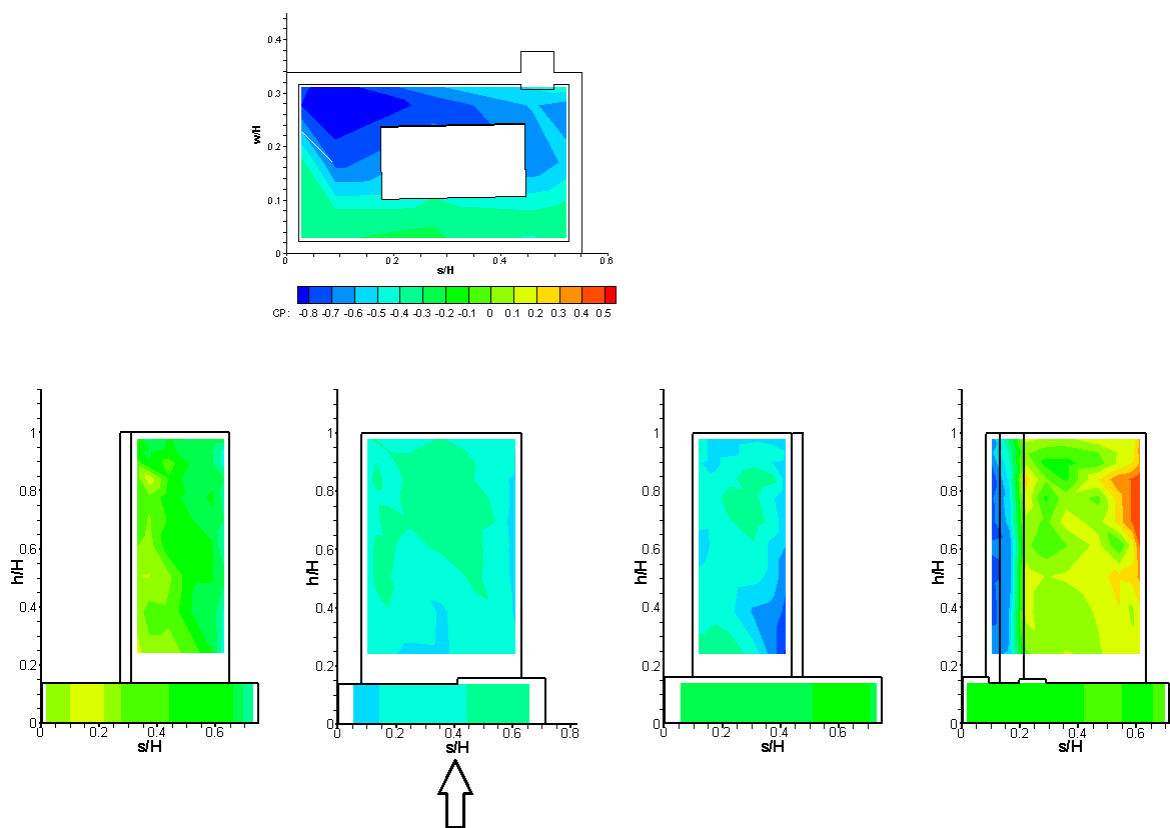
Σχήμα 5.36: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην SSW κατεύθυνση.

Της παρατηρείται, η κύρια επηρεαζόμενη επιφάνεια είναι η αριστερή. Αναμένονταν όμως αυξημένοι συντελεστές πίεσης και στην ακμή της εμπρόσθιας όψης. Αυτό δεν συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση. Αυτό το οποίο φαίνεται να συμβαίνει είναι αποκόλληση της ροής στην εμπρόσθια όψη. Οι συντελεστές είναι και σε αυτή την περίπτωση γενικώς μειωμένοι, λόγω όπως προαναφέρθηκε του στροβιλισμού του πεδίου λόγω της ύπαρξης της αδόμητης έκτασης ανάντι του κτηρίου η οποία ακολουθείται από δομημένη.

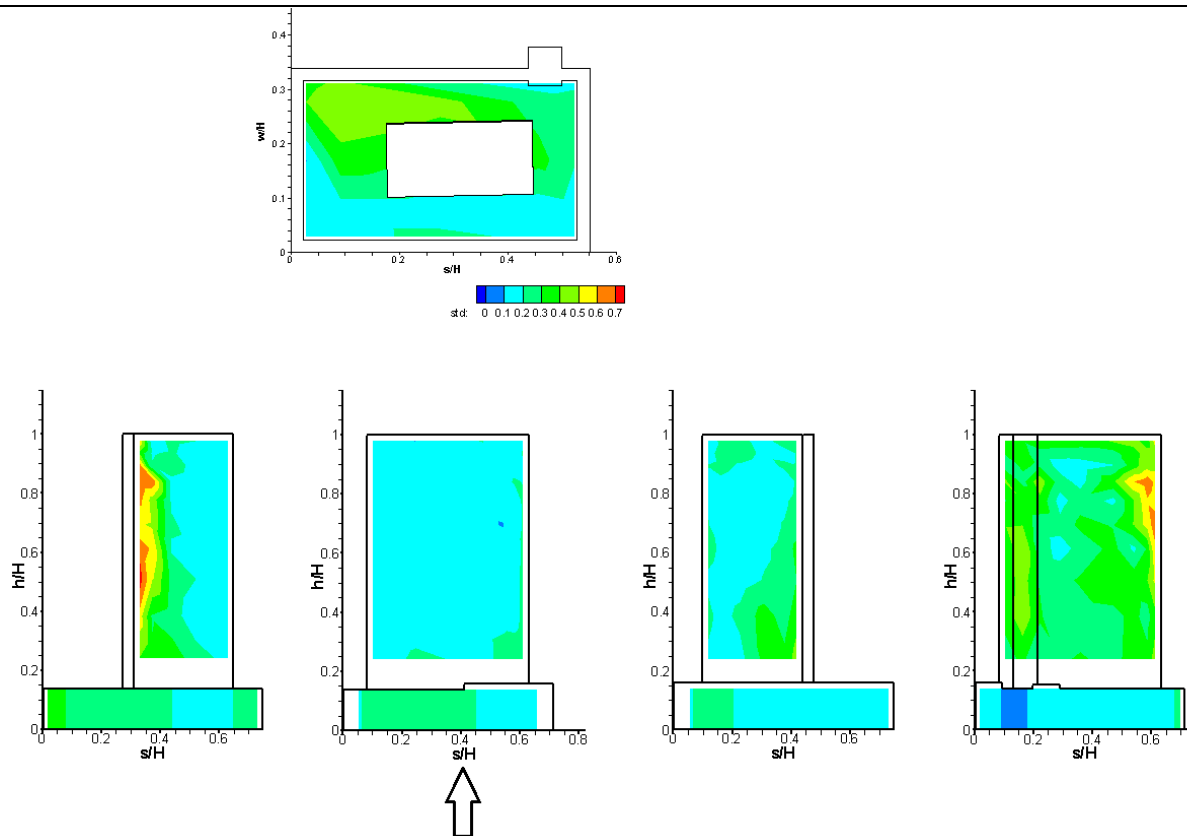
5.2.7 WEST



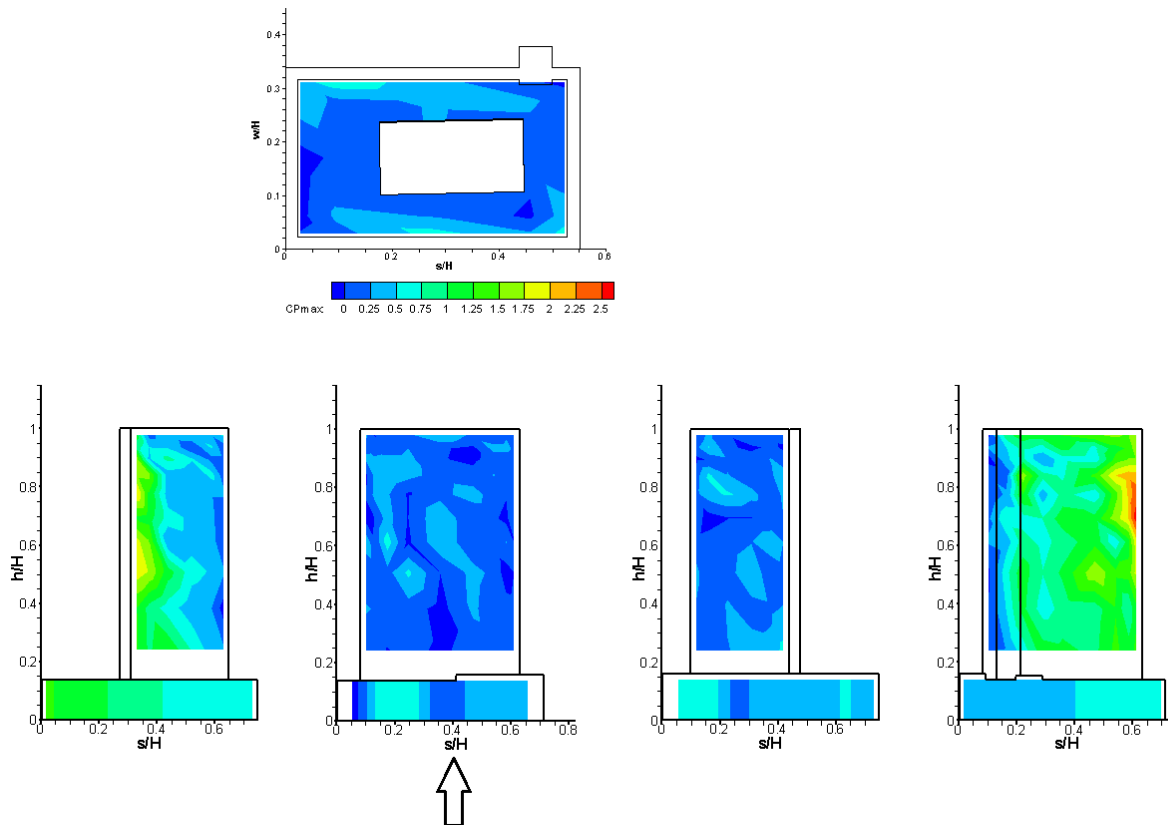
Σχήμα 5.37: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο WEST.



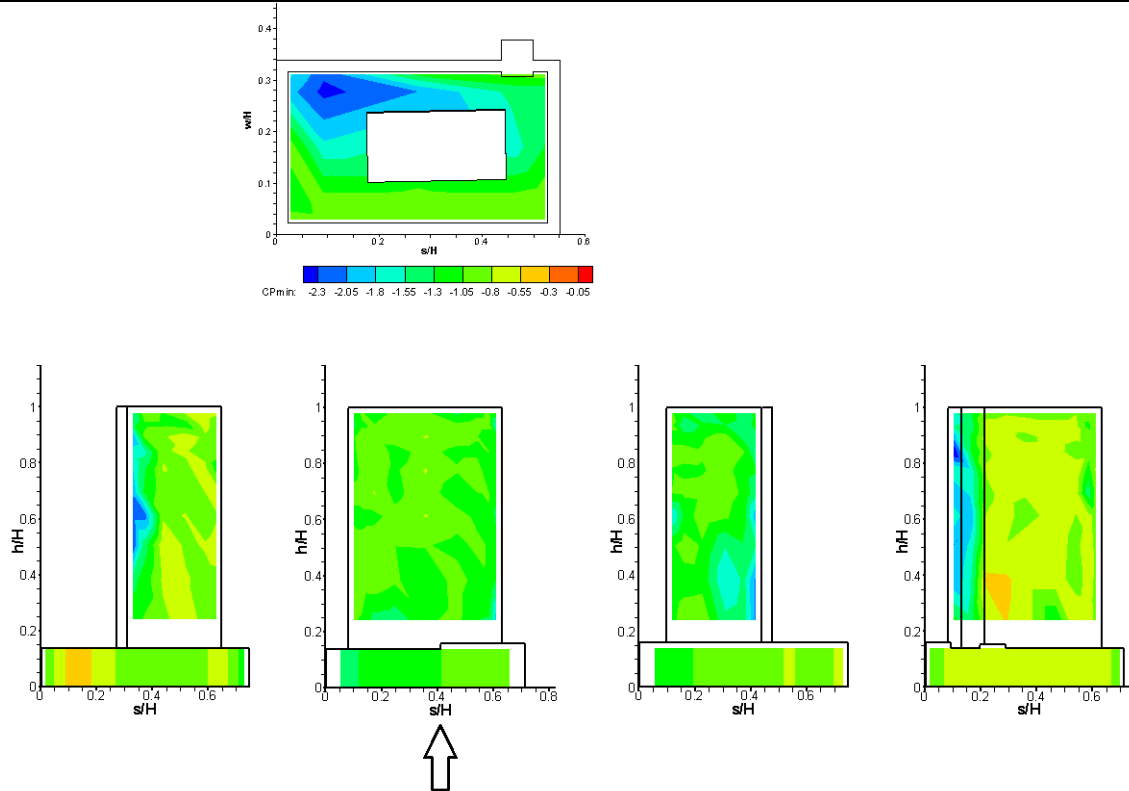
Σχήμα 5.38: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην WEST κατεύθυνση.



Σχήμα 5.39: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην WEST κατεύθυνση.



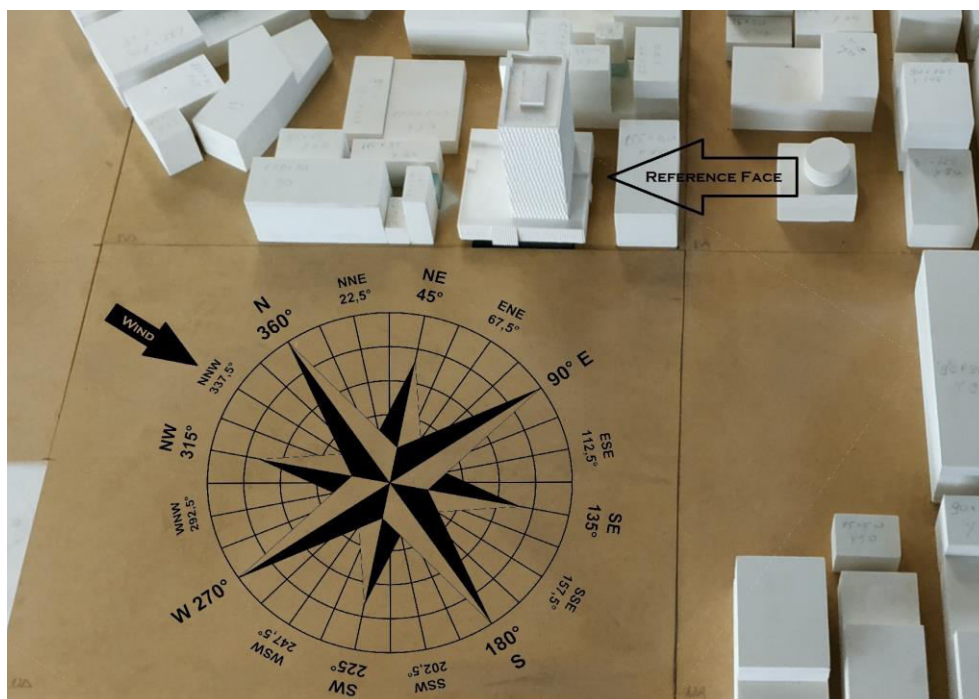
Σχήμα 5.40: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην WEST κατεύθυνση.



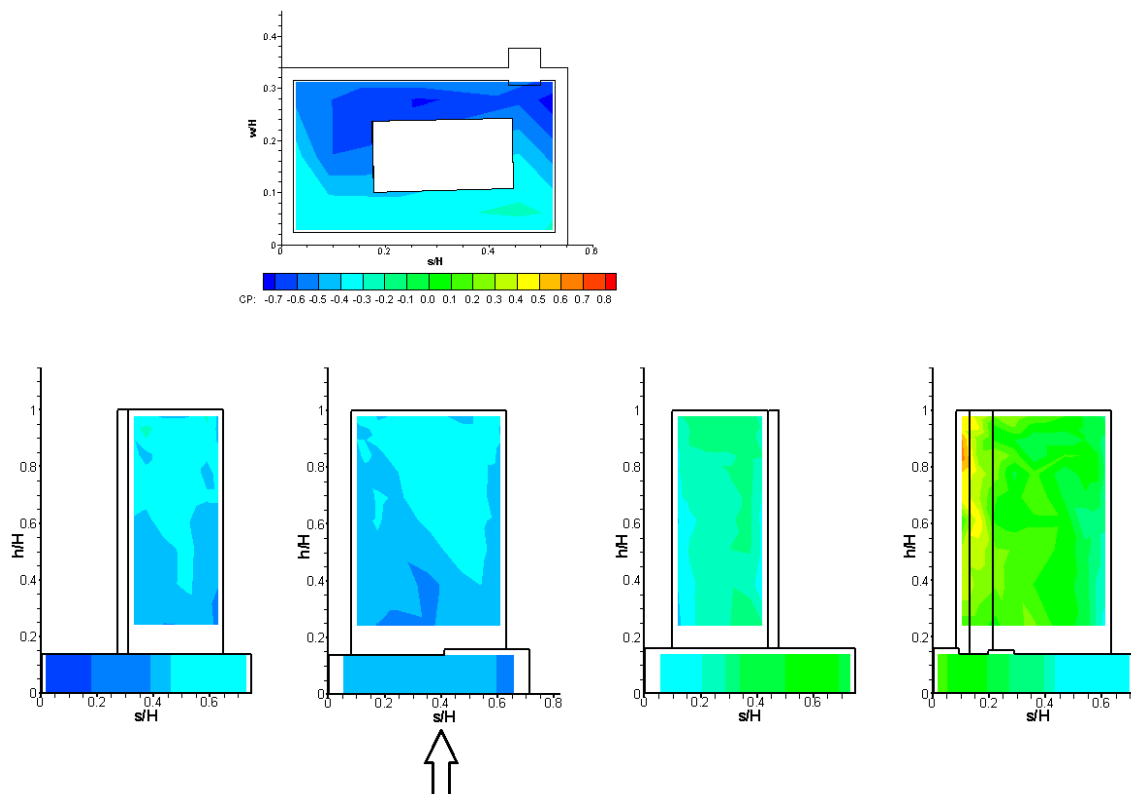
Σχήμα 5.41: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην WEST κατεύθυνση.

Η κατανομή των συντελεστών εδώ είναι κατά τα προαναφερθέντα πλήρως αναμενόμενη. Αυτό εξηγείται από την απουσία κτηριακών δομών ανάντι του πύργου.

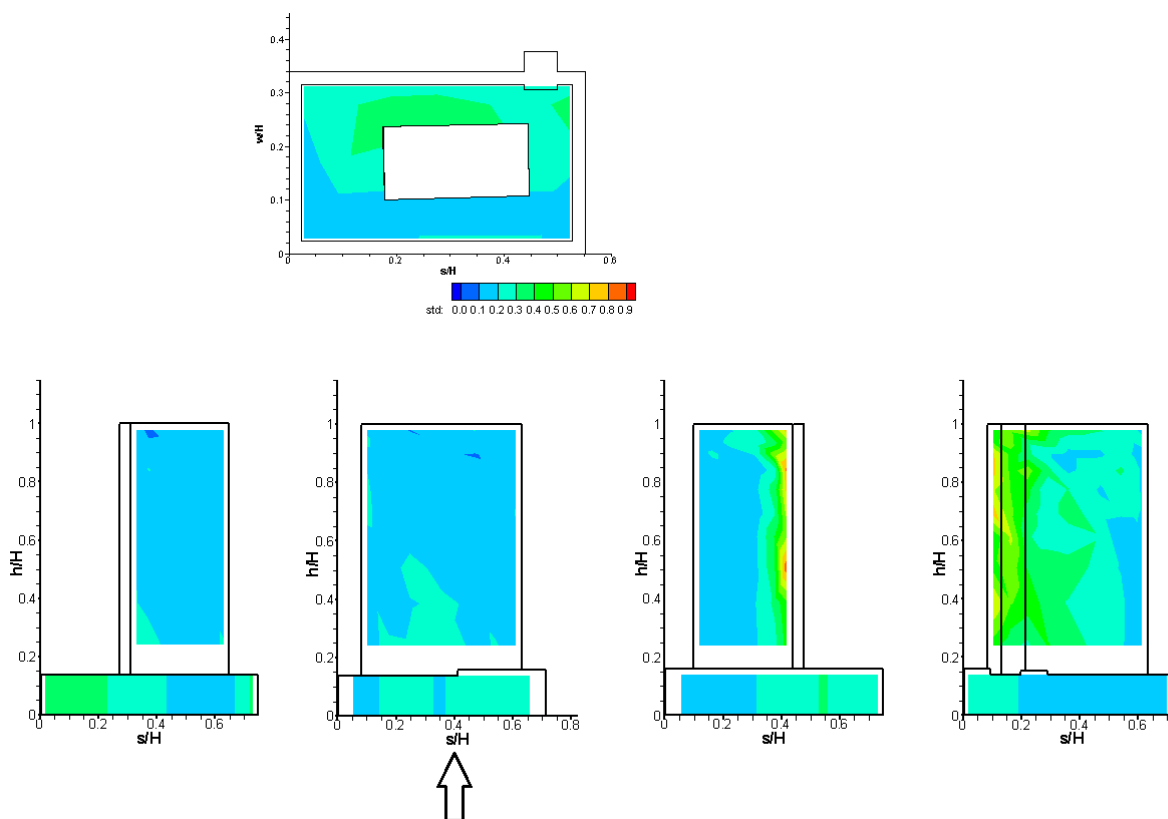
5.2.8 NNW



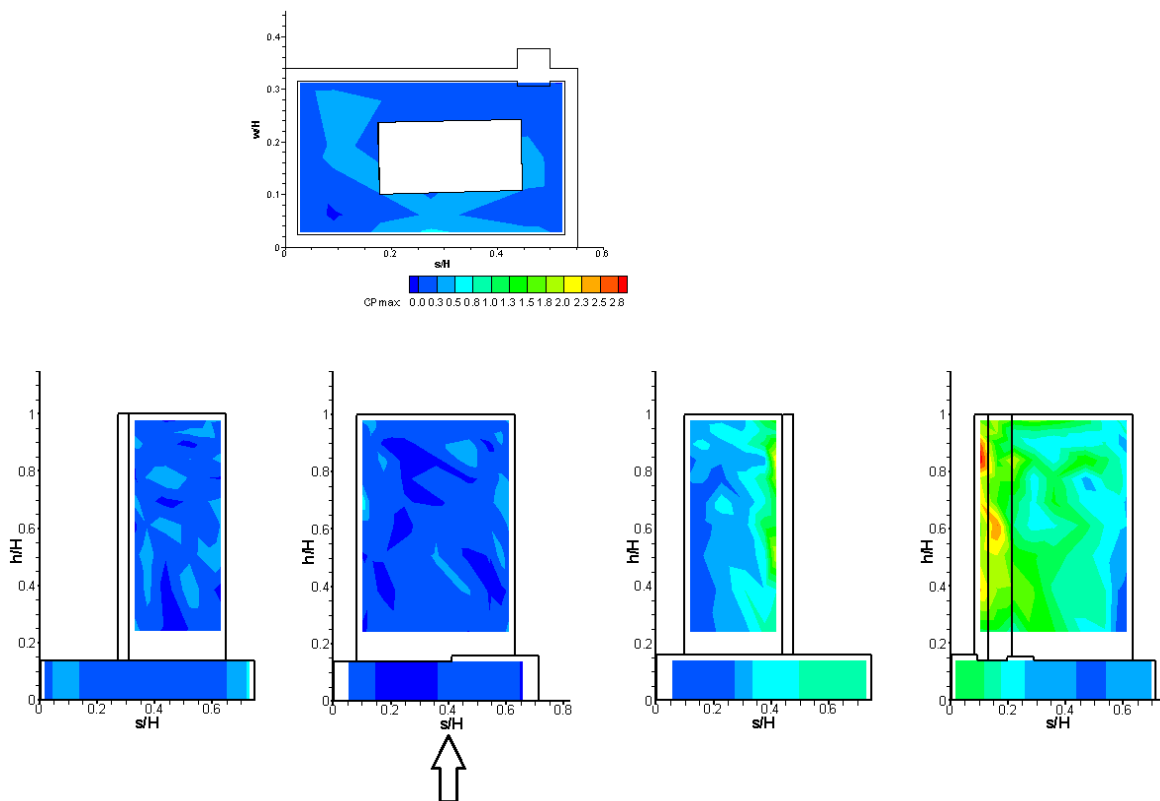
Σχήμα 5.42: Απεικόνιση κατεύθυνσης του ανέμου για το σενάριο NNW.



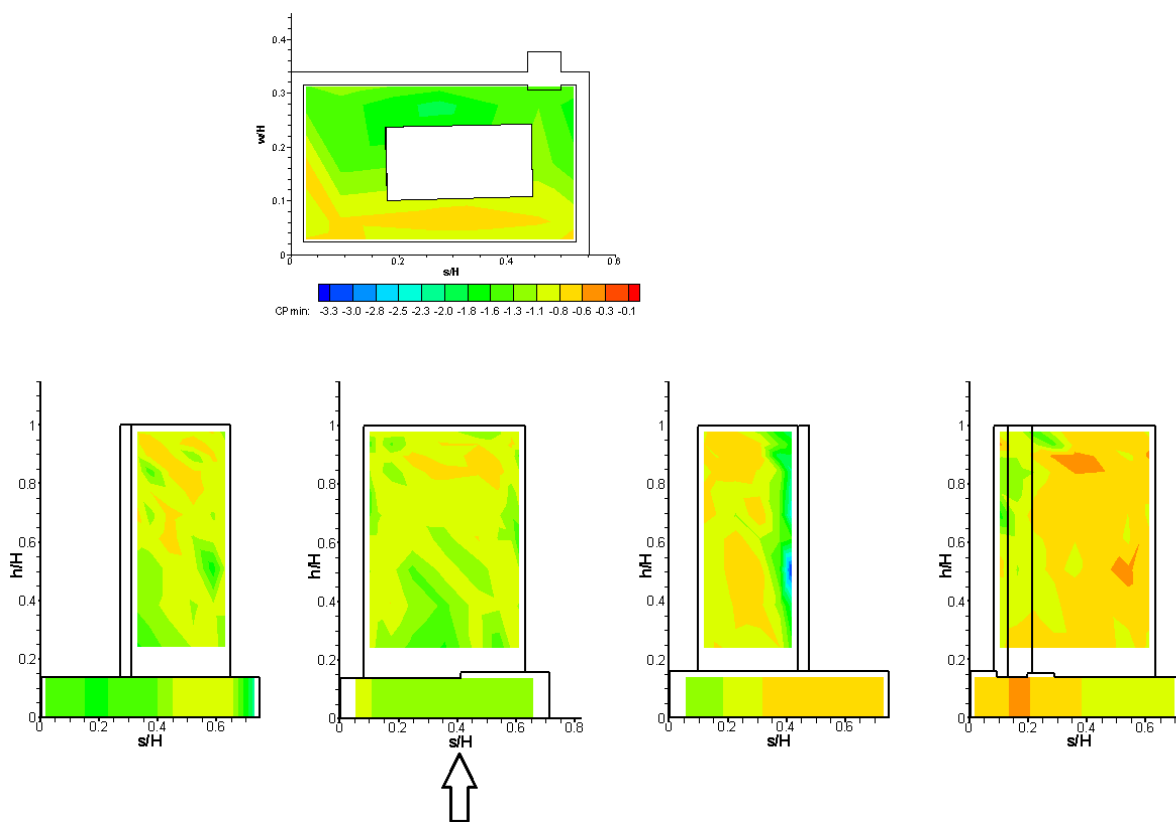
Σχήμα 5.43: Κατανομή συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNW κατεύθυνση.



Σχήμα 5.44: Κατανομή τυπικής απόκλισης συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNW κατεύθυνση.



Σχήμα 5.45: Κατανομή μέγιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNW κατεύθυνση.



Σχήμα 5.46: Κατανομή ελάχιστου συντελεστή πίεσης του ανέμου στην NNW κατεύθυνση.

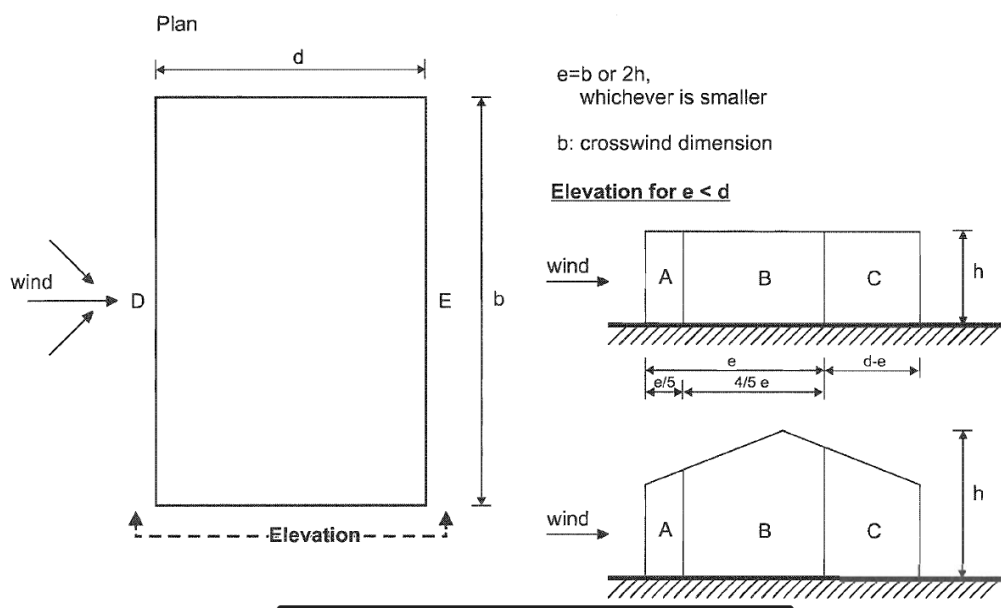
Στην κατεύθυνση αυτή εμφανίζονται οι μεγαλύτεροι μέσοι συντελεστές πίεσης συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις ανέμου, όπως επίσης και οι μέγιστες τιμές τους. η πλευρά η οποία εμφανίζει τα αποτελέσματα αυτά είναι η οπίσθια, η οποία είναι και η κύρια επηρεαζόμενη όψη από την ροή του ανέμου. Σε γενικές γραμμές σύμφωνα με τα προηγούμενα, η συμπεριφορά του συντελεστή είναι πλήρως αναμενόμενη.

5.3 Ευρωκώδικας.

5.3.1 Επιλογή τιμών για ανάλυση με Ευρωκώδικα.

Ως Ευρωκώδικες χαρακτηρίζονται μια σειρά ευρωπαϊκών προτύπων ειδικά διαμορφωμένα για τον εύκολο προσδιορισμό μεγεθών, κατά την δόμηση κτηρίων και υποδομών. Συγκεκριμένα για την μελέτη και τον προσδιορισμό των φυσικών δράσεων του ανέμου στον δομικό σχεδιασμό και στα έργα του μηχανικού, στις υπό εξέταση περιοχές φόρτισης, χρησιμοποιείται το πρότυπο EN 1991-1-4. Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει το σύνολο της κατασκευής ή τμήματα της κατασκευής ή στοιχεία που συνδέονται με την κατασκευή, π.χ. εξαρτήματα, μονάδες επένδυσης και οι στερεώσεις τους, φράγματα ασφαλείας και θορύβου και άλλα.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1991-1-4, το μελετώμενο κτήριο ταυτίζεται με ένα λείο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο χωρίζεται σε διάφορες ζώνες φόρτισης. Επιπλέον οι κατευθύνσεις του ανέμου για τις οποίες η ανάλυση του Ευρωκώδικα είναι εφικτή είναι δύο και συγκεκριμένα οι δύο κάθετες στις πλευρές του κτηρίου. Γίνεται επομένως ανάλυση για κατεύθυνση ανέμου κάθετο στην εμπρόσθια όψη του κτηρίου, δηλαδή στις 0° , και άνεμο κατεύθυνσης κάθετης σε πλάγια όψη του κτηρίου, δηλαδή στις 90° . Επιπλέον γίνεται ανάλυση αναφορικά με το φορτίο ανέμου ασκούμενο στην στέγη. Συγκεκριμένα:



Σχήμα 5.47: Υπόμνημα για κατακόρυφους τοίχους Ευρωκώδικα EN 1991-1-4.

Στη γενική περίπτωση το κτήριο χωρίζεται στις ζώνες A,B,C,D,E. Για κάθε ζώνη, σύμφωνα με πίνακα του Ευρωκώδικα, επιλέγονται προτεινόμενες τιμές των συντελεστών εξωτερικής πίεσης.

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

Πίνακας 5.1: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών εξωτερικής πίεσης για κατακόρυφους τοίχους κτηρίων ορθογωνικής κάτοψης.

Σε περίπτωση ενδιάμεσης τιμής της μεταβλητής h/d οι συντελεστές πίεσης λαμβάνονται από γραμμική παρεμβολή.

Έπειτα υπολογίζεται η βασική ταχύτητα του ανέμου V_b μέσω της εξίσωσης:

$$V_b = C_{dir} C_{season} V_{b,0} \quad (5.1.4)$$

Όπου:

- C_{dir} είναι ο συντελεστής διεύθυνσης με προτεινόμενη τιμή 1,0
- $V_{b,0}$ είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου, η οποία δίνεται στο Εθνικό Προσάρτημα
- C_{season} είναι ο εποχικός συντελεστής με προτεινόμενη τιμή 1,0

Ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή εδάφους k_r :

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_o}{z_{o,II}} \right)^{0,07} \quad (5.1.5)$$

Όπου:

- z_o είναι το μήκος τραχύτητας, η τιμή του οποίου λαμβάνεται από πίνακα του Ευρωκώδικα.
- $z_{o,II} = 0,05m$

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

Πίνακας 5.2: Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους Ευρωκώδικα EN 1991-1-4

Έπειτα υπολογίζεται ο συντελεστής τραχύτητας:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5.1.6)$$

Μπορεί στη συνέχεια να υπολογισθούν: Η μέση ταχύτητα του ανέμου $V_m(z)$:

$$V_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot V_b \quad (5.1.7)$$

Όπου:

- $C_r(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας που αναφέρθηκε παραπάνω.
- $C_o(z)$ είναι ο συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους, λαμβάνει τιμή 1,0.
- V_b είναι η βασική ταχύτητα του ανέμου που αναφέρθηκε παραπάνω.

Η ένταση του στροβιλισμού του ανέμου $I_v(z)$:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (5.1.8)$$

Όπου:

- k_I είναι ο συντελεστής στροβιλισμού ο οποίος λαμβάνει τιμή 1,0.
- $C_o(z)$ είναι ο συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους, λαμβάνει τιμή 1,0.
- z_0 είναι το μήκος τραχύτητας, η τιμή του οποίου λαμβάνεται από πίνακα του Ευρωκώδικα.

Η πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 \quad (5.1.9)$$

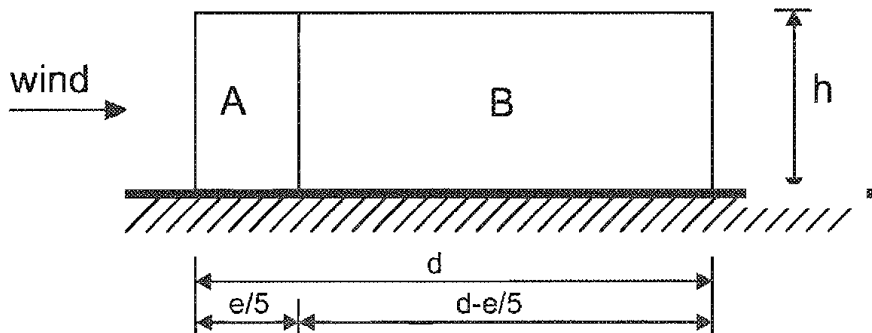
Όπου:

- $I_v(z)$ είναι η ένταση του στροβιλισμού του ανέμου.
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα.
- $V_m(z)$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου

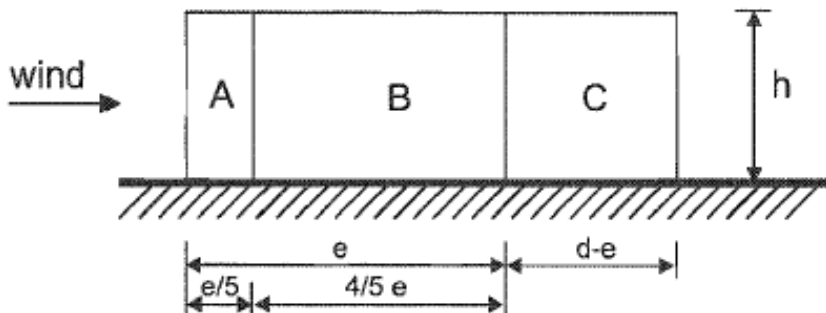
Μέσω των παραπάνω είναι εφικτός ο υπολογισμός των εξωτερικών πιέσεων κάθε ζώνης της δομής:

$$P(z) = q_p(z) \cdot c_{pe,10} \quad (5.1.9)$$

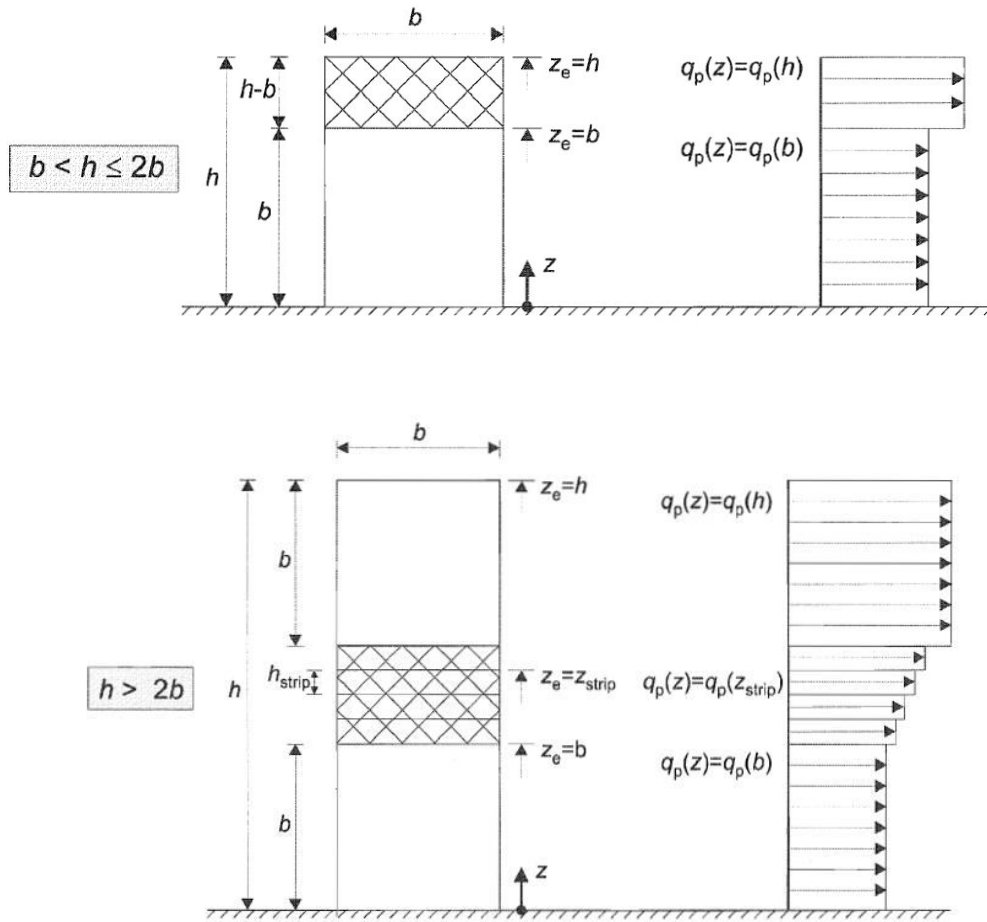
Elevation for $e \geq d$



Elevation for $e < d$



Σχήμα 5.48: Διαχωρισμός ζωνών κατά μήκος ανάλογα με τη διάσταση, με $e = b$ ή $e = 2h$ ανάλογα ποιο είναι μικρότερο.



Σχήμα 5.49: Διαχωρισμός ζωνών καθ' ύψος ανάλογα με τη διάσταση.

Όσον αφορά την οροφή, για οριζόντια κλίση χωρίζεται σε 4 τμήματα F,G,H,I και ανάλογα την ύπαρξη στηθαίων, καμπυλωμένων άκρων είτε σπαστών άκρων, ο συντελεστής πίεσης υπολογίζεται μέσω του παρακάτω πίνακα.

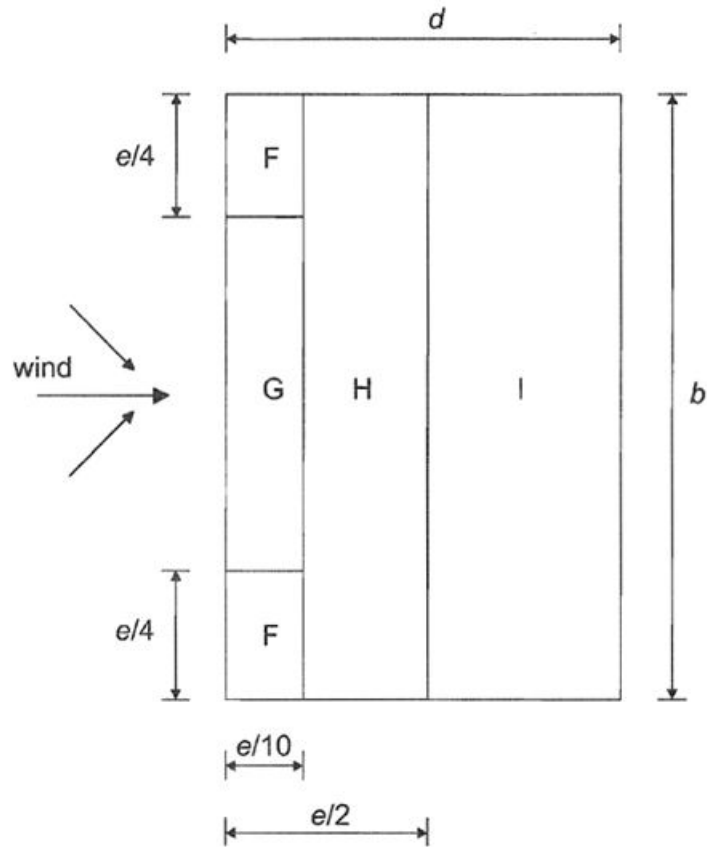
Τύπος στέγης		Ζώνη							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Αιχμηρά άκρα		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Με στηθαία	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Καμπυλωμένα	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα και συγκρίσεις με Ευρωκώδικα.

άκρα							-0,2	
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3	+0,2	
							-0,2	
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3	+0,2	
							-0,2	
Σπαστά άκρα	$\alpha = 30^\circ$		-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3	+0,2
								-0,2
	$\alpha = 45^\circ$		-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4	+0,2
								-0,2
	$\alpha = 60^\circ$		-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	+0,2
								-0,2

Πίνακας 5.3: Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για οριζόντιες στέγες.

Ανάλογα τις τιμές h_p/h , r/h και α , οι συντελεστές είναι εφικτό να υπολογισθούν μέσω γραμμικής παρεμβολής.



Σχήμα 5.50: Διαχωρισμός ζωνών οριζόντιας οροφής, Ευρωκώδικας 1991-1-4.

5.3.2 Αποτελέσματα Ευρωκώδικα στις 0°.

Συγκεντρωτικά οι επιλεγμένες τιμές για τις παραπάνω μεταβλητές στην κατεύθυνση των 0° αποτυπώνονται παρακάτω και στη συνέχεια τα αντίστοιχα διαγράμματα ισοϋψών:

Κατεύθυνση του ανέμου κάθετη στην εμπρόσθια όψη - 0 μοίρες

Τιμές συντελεστή εξωτερικής πίεσης $C_{pe,10}$.

h	83.618
b	43.628
d	25.856
hp	3.163

ZONE A	-1.2
ZONE B	-0.8
ZONE C	-
ZONE D	0.8
ZONE E	-0.6115
ZONE F	-1.504
ZONE G	-1.004
ZONE H	-0.7
ZONE I	0.2

Βασική ταχύτητα ανέμου V_b

Συντελεστής εδάφους k_r

V_b	27m/s
-------------------------	--------------

k_r	0.234329
-------------------------	-----------------

Συντελεστής τραχύτητας $C_r(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Z_{e1}	43.628
Z_{e2}	83.618

$C_r(Z_{e1})$	0.884755
$C_r(Z_{e2})$	1.0372

Μέση ταχύτητα ανέμου $V_m(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Z_{e1}	43.628
Z_{e2}	83.618

$V_m(Z_{e1})$	23.88839
$V_m(Z_{e2})$	28.0044

Ένταση του στροβιλισμού του ανέμου $I_v(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Z_{e1}	43.628
Z_{e2}	83.618

$I_v(Z_{e1})$	0.264852
$I_v(Z_{e2})$	0.225924

Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Z_{e1}	43.628
Z_{e2}	83.618

$q_p(Z_{e1})$	1017.892
$q_p(Z_{e2})$	1265.318

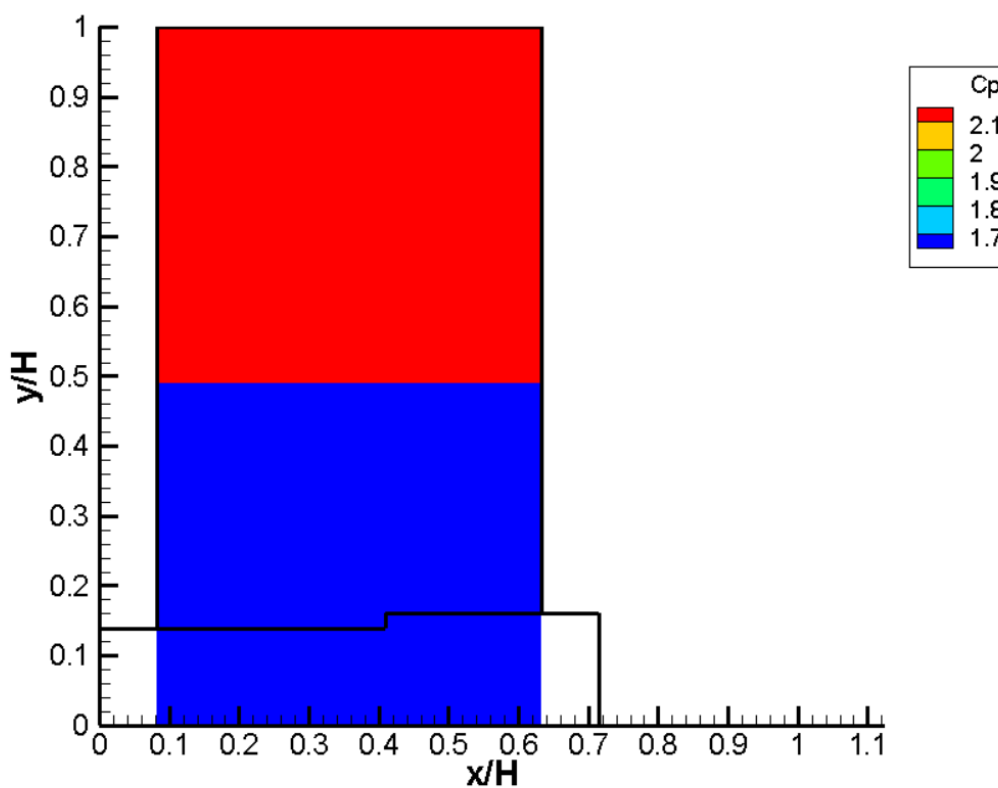
Συντελεστής πίεσης $C_p(z)$ συναρτήσει του ύψους.

ZONE D	Z_{e1}	43.628
	Z_{e2}	83.618

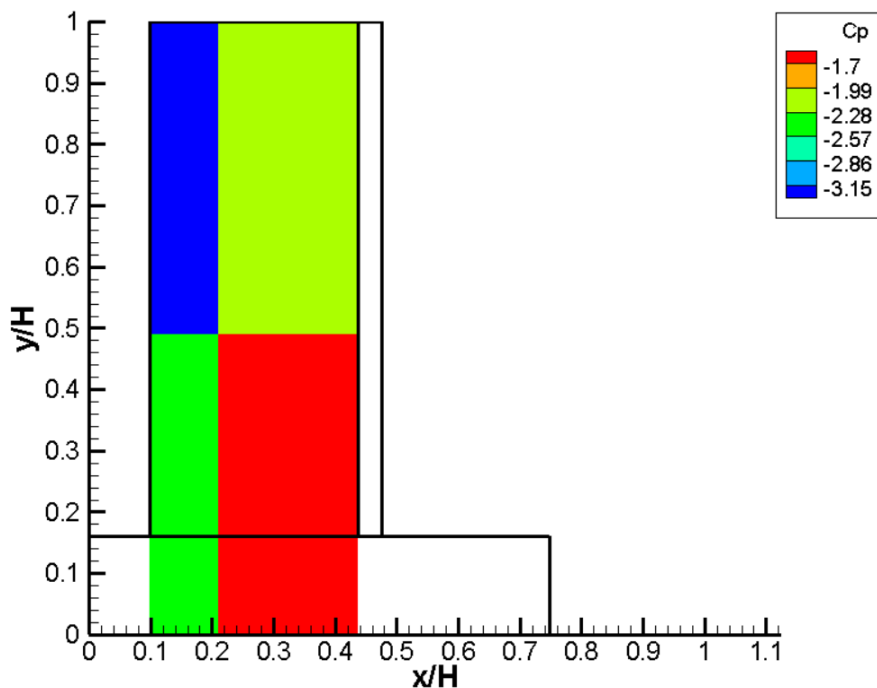
$C_p(Z_{e1})$	1.69578
$C_p(Z_{e2})$	2.10799

ZONE E	Ze1	43.628	Cp(Ze1)	-1.2962
	Ze2	83.618	Cp(Ze2)	-1.6113
ZONE A	Ze1	43.628	Cp(Ze1)	-2.5437
	Ze2	83.618	Cp(Ze2)	-3.162
ZONE B	Ze1	43.628	Cp(Ze1)	-1.6958
	Ze2	83.618	Cp(Ze2)	-2.108
ZONE F			Cp	-3.96301
ZONE G			Cp	-2.64552
ZONE H			Cp	-1.84449
ZONE I			Cp	0.526996

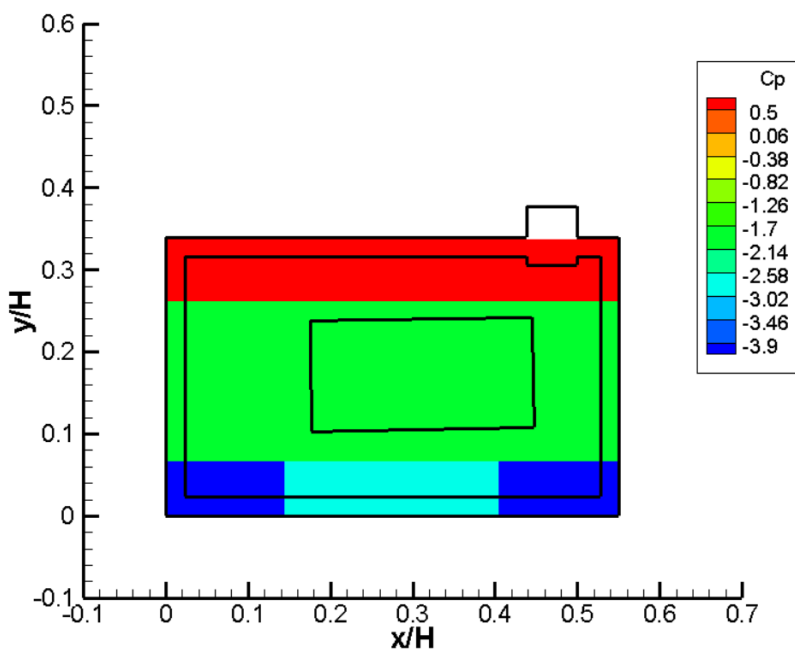
Πίνακας 5.4: Σταθερές και συντελεστές για κατεύθυνση ανέμου 0° ως προς την εμπρόσθια όψη.



Σχήμα 5.51: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην εμπρόσθια όψη για κατεύθυνση ανέμου 0°.



Σχήμα 5.52: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην δεξιά όψη για κατεύθυνση ανέμου 0°.



Σχήμα 5.53: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην οροφή για κατεύθυνση ανέμου 0°.

Η αριστερή και η οπίσθια όψη του κτηρίου έχουν, όπως φαίνεται και στην παραπάνω ανάλυση του Ευρωκώδικα, συμμετρικές κατανομές συντελεστή πίεσης με την δεξιά και την εμπρόσθια αντίστοιχα και γι αυτό δεν αναλύονται.

5.3.3 Αποτελέσματα Ευρωκώδικα στις 90°.

Συγκεντρωτικά οι επιλεγμένες τιμές για τις παραπάνω μεταβλητές στην κατεύθυνση των 0° αποτυπώνονται παρακάτω και στη συνέχεια τα αντίστοιχα διαγράμματα ισοϋψών:

Κατεύθυνση του ανέμου κάθετη στην εμπρόσθια όψη - 0 μοίρες

Τιμές συντελεστή εξωτερικής πίεσης $C_{pe}, 10$.

h	83.618
b	25.856
d	43.628
hp	3.163

ZONE A	-1.2
ZONE B	-0.8
ZONE C	-0.5
ZONE D	0.8
ZONE E	-0.546
ZONE F	-1.504
ZONE G	-1.004
ZONE H	-0.7
ZONE I	0.2

Βασική ταχύτητα ανέμου V_b

Συντελεστής εδάφους k_r

V_b	27m/s
-------------------------	--------------

k_r	0.234329
-------------------------	-----------------

Συντελεστής τραχύτητας $C_r(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Ze1	25.856	$C_r(Ze1)$	0.762164
Ze2	57.762	$C_r(Ze2)$	0.950515
Ze3	83.618	$C_r(Ze3)$	1.0372

Μέση ταχύτητα ανέμου $V_m(z)$ συναρτήσει του ύψους.

Ze1	25.856	$V_m(Ze1)$	20.57844
Ze2	57.762	$V_m(Ze2)$	25.66391
Ze3	83.618	$V_m(Ze3)$	28.0044

Ένταση του στροβιλισμού του ανέμου $I_v(z)$ συναρτήσει του ύψους.

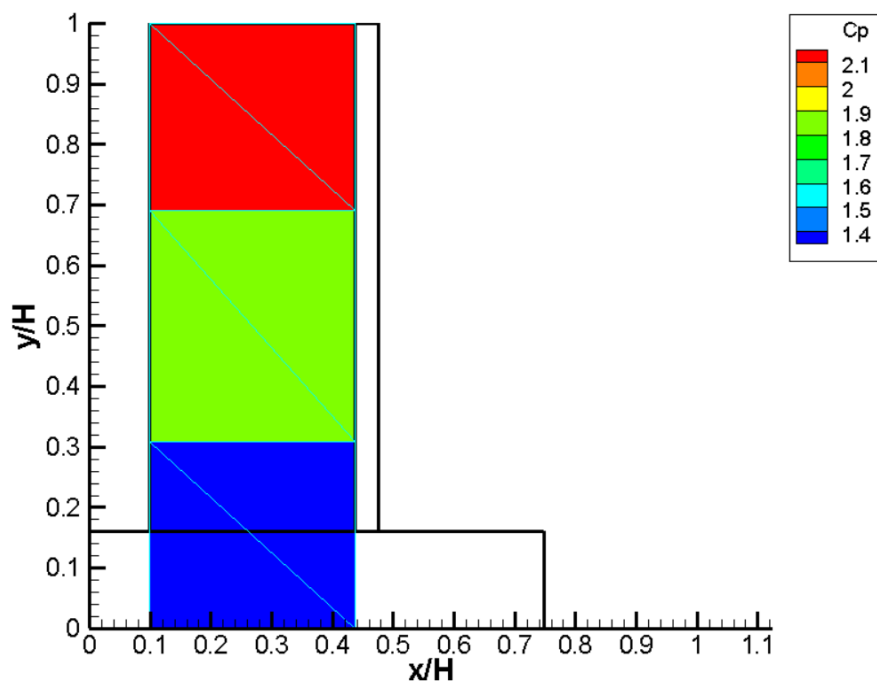
Ze1	25.856	$I_v(Ze1)$	0.307452
Ze2	57.762	$I_v(Ze2)$	0.246528
Ze3	83.618	$I_v(Ze3)$	0.225924

Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ συναρτήσει του ύψους.

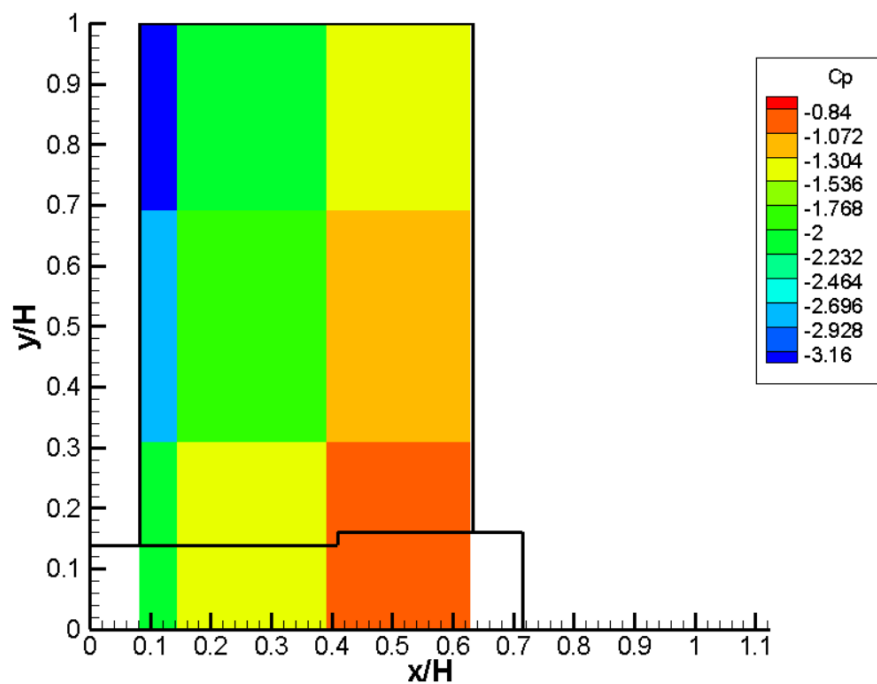
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα και συγκρίσεις με Ευρωκώδικα.

	Ze1	25.856	qp(Ze1)	834.2833
	Ze2	57.762	qp(Ze2)	1122.027
	Ze3	83.618	qp(Ze3)	1265.318
Συντελεστής πίεσης Cp(z) συναρτήσει του ύψους.				
ZONE D	Ze1	25.856	Cp(Ze1)	1.38989
	Ze2	57.762	Cp(Ze2)	1.86927
	Ze3	83.618	Cp(Ze3)	2.10799
ZONE E	Ze1	25.856	Cp(Ze1)	-0.7589
	Ze2	57.762	Cp(Ze2)	-1.0206
	Ze3	83.618	Cp(Ze3)	-1.151
ZONE A	Ze1	25.856	Cp(Ze1)	-2.0848
	Ze2	57.762	Cp(Ze2)	-2.8039
	Ze3	83.618	Cp(Ze3)	-3.162
ZONE B	Ze1	25.856	Cp(Ze1)	-1.3899
	Ze2	57.762	Cp(Ze2)	-1.8693
	Ze3	83.618	Cp(Ze3)	-2.108
ZONE F			Cp	-3.96301
ZONE G			Cp	-2.64552
ZONE H			Cp	-1.84449
ZONE I			Cp	0.526996

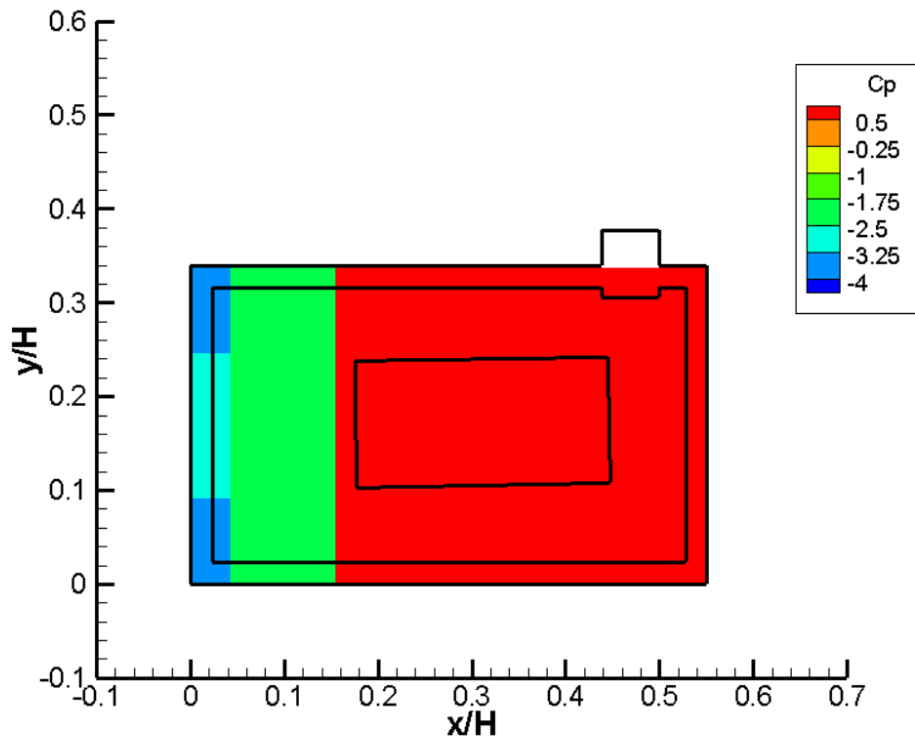
Πίνακας 5.5: Σταθερές και συντελεστές για κατεύθυνση ανέμου 90° ως προς την εμπρόσθια όψη.



Σχήμα 5.54: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην εμπρόσθια όψη για κατεύθυνση ανέμου 90°.



Σχήμα 5.55: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην δεξιά όψη για κατεύθυνση ανέμου 90°.



Σχήμα 5.56: Κατανομή, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, του συντελεστή πίεσης στην οροφή για κατεύθυνση ανέμου 90° .

Αντίστοιχα και σε αυτήν την περίπτωση παραλείπονται οι αριστερά και η οπίσθια όψη. Να σημειωθεί ότι για κατεύθυνση ανέμου 90° ως προς το κτήριο, εμπρόσθια όψη εννοείται η αντίστοιχη δεξιά, ενώ δεξιά όψη εννοείται η εμπρόσθια. Θα ήταν εφικτό επίσης ως εμπρόσθια όψη να θεωρηθεί η αριστερά ενώ ως δεξιά η οπίσθια όψη, καθώς υπάρχει συμμετρία. Ταυτόχρονα στην οροφή η επίδραση του ανέμου θα ήταν ίδια, είτε ο άνεμος ήταν κάθετος στην δεξιά είτε στην αριστερή όψη. Τα τελευταία αποτελούν ένα μείζον πρόβλημα ανάλυσης εξωτερικής πίεσης σε κτήρια με βάση τον Ευρωκώδικα, το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και σχόλια.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε πειραματικά η κατανομή επιφανειακής εξωτερικής πίεσης σε πρότυπο κτήριο, συγκεκριμένα σε μοντέλο του Πύργου του Πειραιά. Κύριες παράμετροι ήταν η πιστή αντιγραφή της χωροταξικής και κτηριακής δομής του Πειραιά σε κάποια ακτίνα γύρω από τον Πύργο, η μορφή του ανάντι οριακού στρώματος της ροής, η βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης μέτρησης πίεσης, τα ανεμολογικά δεδομένα τα οποία καθόριζαν τους διάφορους προσανατολισμούς του συνολικού μοντέλου και η 3D-Printed μορφή του κύριου μοντέλου του πύργου, η οποία επέτρεπε εισαγωγή μεγάλης δομικής λεπτομέρειας όπως σκιάστρα και άλλες ιδιομορφίες. Οι παράμετροι αυτές λαμβάνουν βασικό και κυρίαρχο ρόλο στην πειραματική μέθοδο που επιλέχθηκε προς μελέτη, δηλαδή την μέτρηση επιφανειακής πίεσης μέσω απολήψεων πίεσης στην επιφάνεια του κτηρίου, με τη χρήση διαφορικού μανομέτρου. Παράλληλα, γίνεται μια ανάλυση των επιφανειακών πιέσεων του μοντέλου με χρήση του Ευρωκώδικα 1991-1-4, η οποία αποτελεί την κύρια μεθοδολογία ανάλυσης επιφανειακής πίεσης σε κτηριακές δομές.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτή η υπεροχή της μεθόδου απολήψεων πίεσης σε μοντέλο αεροδυναμικής σήραγγας συγκριτικά με την ανάλυση μέσω του Ευρωκώδικα.

Κατ' αρχάς ο Ευρωκώδικας θέτει περιορισμούς ως προς τις κατευθύνσεις του ανέμου. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή ο άνεμος έχει τη δυνατότητα δράσης στο κτήριο μόνο από τα κύρια σημεία του ορίζοντα, δηλαδή Βόρεια, Νότια, Ανατολικά, Δυτικά. Αντίθετα στην αεροσήραγγα, με τη βοήθεια της τράπεζας περιστροφής, είναι εφικτή η ανάλυση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση του ανέμου είναι επιθυμητό.

Στη συνέχεια παρατηρείται το εξής: ο Ευρωκώδικας αποκλείει την ανάλυση πιέσεων σε εξεζητημένες γεωμετρίες του κτηρίου, όπως επίσης και την επίδραση των γεωμετριών αυτών στις υπόλοιπες πιέσεις επιφάνειας. Για παράδειγμα ο Ευρωκώδικας αντιμετωπίζει το μελετώμενο κτήριο της προκείμενης εργασίας ως λείο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, ενώ όπως φαίνεται και στην Υποενότητα 4.5.1, το κτήριο αποτελείται από δύο δομές, την επονομαζόμενη βάση και το κύριο μέρος του κτηρίου. Και στις δύο αυτές δομές φαίνεται ότι υπάρχουν σκιάστρα καθ' ύψος, μήκος και πλάτος. Ειδικά η επίδραση των σκιάστρων στις πιέσεις επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τα σκιάστρα αποτελούν μια εξωτερική υποδομή των κτηρίων και ενδέχεται να υπάρξει πρόκληση σοβαρού θανατηφόρου ατυχήματος σε περίπτωση αποκόλλησης τους.

Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανάλυσης στην αεροδυναμική σήραγγα στην Ενότητα 5.2, παρατίθενται τιμές του συντελεστή πίεσης αλλά και της τυπικής απόκλισης αυτού, του μεγίστου και του ελαχίστου του. Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς της πίεσης στην επιφάνεια του κτηρίου, σε περιπτώσεις ριπών ανέμου, κάτι που προφανώς είναι χαρακτηριστικό του ατμοσφαιρικού αέρα, ειδικά σε περιπτώσεις ψηλών κτηρίων τα οποία έχουν ύψη αρκετά μεγαλύτερα από το μέσο ύψος των κτηρίων, και η επίδραση του ανέμου είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα στα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, με χρήση αεροδυναμικής σήραγγας οι μέγιστες τιμές του συντελεστή πίεσης λαμβάνει τιμές της τάξης του 2,8. Αντίθετα ο Ευρωκώδικας δεν ξεπερνά το 2,1. Υπάρχει επομένως μια αύξηση της τιμής της τάξης του 33,33%, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Κύριος λόγος μέτρησης του συντελεστή πίεσης σε δομές, είναι το θέμα της ασφάλειας. Κατά τη δόμηση κτηρίων είναι επιθυμητή η μείωση των πιθανοτήτων αστοχιών, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν ατυχήματα. Από την άλλη πλευρά όμως τα αίτια είναι και οικονομικοί παράγοντες. Σε περιοχές μικρής επίδρασης του ανέμου είναι εφικτή η οικονομία των υλικών και κατά συνέπεια η μείωση του κόστους δόμησης ή αναδόμησης.

Στο πλαίσιο του πειράματος καθ' αυτού, ανεξάρτητα της σύγκρισης με τον Ευρωκώδικα, ακολουθήθηκε μια καίρια μεθοδολογία. Οι απολήψεις στην επιφάνεια του κτηρίου ήταν αριθμητικά επαρκείς για πλήρη ανάλυση, με κάποιες εξαιρέσεις στην οροφή της βάσης του κτηρίου, όπου βέβαια η επίδραση του ανέμου, λόγω του μειωμένου ύψους, θα ήταν ελάχιστη και γι' αυτό δεν τοποθετήθηκαν. Επίσης υπάρχει έλλειψη απολήψεων στο εξερχόμενο πλαίσιο της οροφής του κτηρίου, όπου ίσως λόγω ύψους και γεωμετρίας να είναι σημαντική. Παρ' όλα αυτά δεν ήταν εφικτή η τοποθέτηση επιπλέον απολήψεων λόγω έλλειψης χώρου για διάνοιξη καναλιών στο εσωτερικό του μοντέλου. Στα σημεία σύνδεσης των αγωγών πάνω στο μοντέλο, είχαν τοποθετηθεί ειδικά εξαρτήματα με σύστημα μόνωσης όπως επίσης και στρώμα σιλικόνης, για την εξάλειψη διαρροών. Στη συνέχεια να αναφερθεί ότι τα μοντέλα των κτηρίων γύρω από τον πύργο δεν είχαν την κατασκευαστική λεπτομέρεια του κύριου μοντέλου, όμως η λεπτομέρεια αυτή θα επηρέαζε ελάχιστα τα αποτελέσματα ενώ θα αύξανε κατά πάρα πολύ το κόστος της πειραματικής διάταξης, γι' αυτό και κατασκευάστηκαν από πλάκες Plexiglass με όσο το δυνατόν πλησιέστερη εικόνα με τα πραγματικά. Κατά την διαδικασία μέτρησης του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος γινόταν αλλαγή του ύψους μέτρησης χειροκίνητα καθώς υπήρχε βλάβη στον τηλεχειρισμό της τραβέρσας, πράγμα το οποίο ενδέχεται να επηρέασε τα αποτελέσματα. Βέβαια καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων του μοντέλου οποιαδήποτε κίνηση της τράπεζας γινόταν μέσω χειριστηρίου εξωτερικά της αεροδυναμικής σήραγγας, επομένως δεν υπήρχε επίδραση στο περιβάλλον της σήραγγας. Ταυτόχρονα να αναφερθεί ότι μετά από κάθε σάρωση των 60 καναλιών του σαρωτή, μετρούταν η δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής για διόρθωση της ταχύτητας της ροής σε περιπτώσεις αλλαγής θερμοκρασιών, πτώσης τάσης λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα και άλλες παραμέτρους επηρεασμού της ταχύτητας. Δυστυχώς λόγω έλλειψης εξοπλισμού δεν ήταν εφικτή η διόρθωση της φάσης του σήματος πίεσης. Για την διόρθωση αυτή ήταν αναγκαία η χρήση δύο ταυτόσημων διαφορικών μανομέτρων για την ταυτόχρονη μέτρηση του ίδιου σήματος πίεσης στο ίδιο σημείο, χωρίς την ύπαρξη αγωγού και

με την ύπαρξη αγωγού ίδιου με τους αγωγούς που θα χρησιμοποιούνταν στην πειραματική διάταξη. Η επίδραση της φάσης σε περιπτώσεις συμβολής, είτε ενισχυτικής είτε ακυρωτικής, ενδέχεται να επιδρούσε σημαντικά στα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφία.

Job Kurian, *Experimental Aero Dynamics Chapter 1 Lecture Presentation*.

American Society of Civil Engineers, 2012, *Wind tunnel testing for buildings and other structures ASCE-SEI 49-12*.

J. B. Barlow, W. H. Rae, Jr, A. Pope, 1999, *Low Speed Wind Tunnel Testing Third Edition*.

R.D Metha, P. Bradshaw, 1979, *Design rules for small low speed wind tunnels. Aeronaut. J., 83, 443–449*

Ahmed N.A. (Ed.), 2013, *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*

American Society of Civil Engineers, 1999, *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*

J.R. Garratt, 1992, *The Atmospheric Boundary Layer*

Ram S. Azad, 1992, *The Atmospheric Boundary Layer for Engineers*

M. Manolesos, 2013, *Experimental and Computational Study of Three-Dimensional Separation and Separation Control using Passive Vortex Generators (Ph.D. thesis), NTUA, Athens*

N.J. Kay, N.L. Oo, P.J. Richards, R.N. Sharma, 2020, *Characteristics of fluctuating pressure measurement systems utilizing lengths of 3D-Printed tubing*

de Boer, E., 1959, "Acoustic Interaction in Vented Loudspeaker Enclosures". *The Journal of the Acoustical Society of America. 31: 246–247*.

Roger Halkyard, George Blanchard, Richard Flay, Nick Velychko, 2010, *Digital filter adaptation for tubing response correction at reduced sampling frequencies*

H.P.A.H Irwin, K.R Cooper, R. Girard, 1978, *Correction of Distortion Effects Caused by Tubing Systems in Measurement of Fluctuating Pressures*.

Μ. Ι. Πάνος, 2017, *Πειραματική Προσομοίωση Προτύπου Κτηρίου Εκτεθειμένου σε Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα, Διπλωματική Εργασία*

EN 1991-1-4 (2005) (English): *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]*

DENCO Structural Engineering, 2021, *EN. Κ. Πειραιά: Φορτία Ανέμου, Document No.: S19-008-RPT-21.03.24-001*

Raible, C., Leuenberger, M., Joos, F. and Stocker, T., 2017, *Introduction to Climate and Environmental Physics HS 2014 Lecture III*.

Burton W V., 2001, *Wind tunnel simulation of an atmospheric boundary layer*. Texas Tech University.

Stevenson T., 1880, "Report on the simultaneous observations of the force of the wind at different heights above the ground." *J Scot. Met. Soc.* 5, 348-351

Hellman G., 1916, "Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre" *Meteorol. Z.*, 34 (1916) 273.

F. Bañuelos - Ruedas, et al., 2011, *Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region, Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment*, InTech, DOI: 10.5772/20669

Μπεργελές, Γεώργιος, *Πηγές, διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης / Γιώργος Μπεργελές. - 1η έκδ. - Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ*

Sutton O. G., 1949, *Atmospheric Turbulence*. Methuen, London.

Γιώργος Μπεργελές, 2005, *Ανεμοκινητήρες*, Αθήνα, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ.

Engineering Sciences Data Unit, ESDU Data Item No. 7500, 1974/1975 *Characteristics of Atmospheric Turbulence Near the Ground; ESDU: London, UK*.

Zhou Xing, 2015, *Passive Simulation of ABL in a 3.5x2.5m Experimental Wind Tunnel*. Master Thesis. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy.

ESDU, 1974, "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part 2: single point data for strong winds (neutral atmosphere)", *Engineering Sciences Data Unit 74031*

M. Schatzmann, J. Donat, S. Hendel, G. Krishan, 1995, *Design of a low-cost stratified boundary-layer wind tunnel*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 54/55 483-491

N. J. Cook, 1978, *WIND-TUNNEL SIMULATION OF THE ADIABATIC ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER BY ROUGHNESS, BARRIER AND MIXING DEVICE METHODS*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 157-176

Irwin, H., 1981, *The design of spires for wind simulation*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361-366.

M.E. De Bortoli, B. Natalini, M.J. Paluch, M.B. Natalini, 2002, *Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90 281-291

H. Kozmar, 2011, *An alternative approach to experimental simulation of wind characteristics in urban environments*, *Procedia Environmental Sciences*, 4 43-50

Counihan J., 1969, *AN IMPROVED METHOD OF SIMULATING AN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN A WIND TUNNEL*, *Atmospheric Environment Pergamon Press* Vol. 3, pp. 197-214

Counihan, J., 1973, "Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel," *Atmospheric Environment* 7:673-689

H. Kozmar, 2012, *Physical modeling of complex airflows developing above rural terrains*, *Environmental Fluid Mechanics*, 12(3),209-225

R.W. Macdonald, R.F. Griffiths, D.J. Hall, 1998, *An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays*, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Issue 11, Pages 1857-1864

Gartshore, I.S., and de Cross, K.A., 1977, "Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind,"—*Transactions of the ASME, New York, Journal of Fluids Engineering* 99:480-485

Wooding R.A. Bradley E.F. & Marshall J.K., 1973, *Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry*, *Boundary-Layer Meteorology*, 5:285-308