



Υπολογιστική Μελέτη Τεχνικών Ανεμοπροστασίας Εξωτερικών Χώρων

Διπλωματική Εργασία

Γκέμπερ Ευάγγελος-Μαξιμίλιαν

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΩΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος

Υπολογιστική Μελέτη Τεχνικών Ανεμοπροστασίας Εξωτερικών Χώρων

Διπλωματική Εργασία

Γκέμπερ Ευάγγελος-Μαξιμίλιαν

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση της τρισδιάστατης ροής διαμέσου πορώδους εμποδίου, το οποίο βρίσκεται μπροστά από ένα μοντέλο κτηρίου. Ο στόχος της μελέτης είναι να διερευνηθεί η μείωση του μέτρου της ενεργής ταχύτητας στην περιοχή ανάμεσα στο εμπόδιο και το κτήριο ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη άνεση για όσους ανθρώπους βρίσκονται εκεί. Αρχικά περιγράφεται σύντομα το πρόβλημα της άνεσης ανέμου (wind comfort) και διάφορα κριτήρια για την αξιολόγηση των συνθηκών. Έπειτα παρουσιάζονται κάποιες από τις συνηθέστερες λύσεις στο πρόβλημα, καθώς και σχετικές πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες. Αυτές αποτελούν αφορμή και βάση αναφοράς για την παρούσα εργασία. Ακολουθούν πληροφορίες για το υπολογιστικό εργαλείο SimScale, το οποίο συνδυάζει τον κώδικα επίλυσης του OpenFoam με γραφικό περιβάλλον και χρησιμοποιεί τον πλεγματοποιητή snappyHexMesh. Γίνεται επίσης σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων από την βιβλιογραφία με τα αποτελέσματα του κώδικα για να ελεγχθεί η ακρίβεια του. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίδραση του αδιάστατου ύψους, πλάτους εμποδίου, αδιάστατης απόστασης εμποδίου κτηρίου, συντελεστή αντίστασης του εμποδίου και των αρχικών επίπεδων τύρβης στην κατανομή ενεργής ταχύτητας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά άλλων μελετών της βιβλιογραφίας, τα οποία περιλαμβάνουν μόνο πορώδες εμπόδιο σε 2D πεδίο ροής, ανακύπτουν διαφορές στο μήκος της προστατευμένης περιοχής αλλά και την καταλληλότητα χρήσης στερεού εμποδίου. Αυτές οι διαφορές οφείλονται τόσο στην παρουσία του κτηρίου όσο και στην 3D ανάλυση.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the modeling of the 3D flow through a porous medium, located in front of a building model. Target of this study is to investigate the reduction of the effective velocity magnitude in the area between the porous obstacle and the building, in order to achieve more pleasant wind conditions for the people present. First, a brief description of the wind comfort problem and the criteria used to assess wind comfort is given. Some of the most common solutions to the problem are presented, as well as relevant numerical and experimental studies. These are the starting point for this study. Next, some information about the computational tool SimScale, which combines the open source code OpenFoam for solving, with graphical interface and the mesh generator snappyHexMesh. Also a validation study was performed by comparing present computational results with published experimental measurements. Finally the results for influence of the obstacle's dimensionless height, width, distance from the building, resistance coefficient and upstream wind turbulence levels on the effective velocity distribution are presented. By comparing these to other studies and sources, which include only a porous fence and a 2D flow field, it is clear that the building and 3D analysis have a big influence on the results causing significant differences in the results for a solid fence and the length of the sufficiently protected area.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται και οι σπουδές μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, αναπληρωτή καθηγητή Δ. Μπούρη, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με μία πολύ ενδιαφέρουσα διπλωματική εργασία, η οποία συνδυάζει την υπολογιστική ρευστομηχανική με το πρόβλημα της ανεμοπροστασίας. Το ζήτημα της ανεμοπροστασίας έχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, με πολλές εφαρμογές τόσο στην καθημερινότητα, όσο και στην μηχανολογία και για αυτό τον λόγο είμαι πολύ χαρούμενος που ο κ. Δ. Μπούρης μου πρότεινε αυτό το θέμα. Να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση, τις καίριες συμβουλές και υποδείξεις του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αλλά και το ενδιαφέρον του για τις δικές μου ιδέες και προτάσεις. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους καθηγητές στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, οι οποίοι με βοήθησαν να μάθω, να γίνω καλύτερος μηχανικός και να αποφοιτήσω από το τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στηρίζει σε όλες τις επιλογές μου και τους στενούς μου φίλους, με τους οποίους μοιράστηκα δυσκολίες και χαρές.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	10
2	Ανεμοπροστασία.....	11
2.1	Περιγραφή του προβλήματος	11
2.2	Συνήθεις Λύσεις.....	12
3	Το Υπολογιστικό Μοντέλο	14
3.1	Γενικά στοιχεία για το εργαλείο SimScale	14
3.2	Πλεγματοποίηση.....	14
3.2.1	Διαδικασία	14
3.2.2	Το πλέγμα γύρω από το μοντέλο του κτηρίου	17
3.3	Επιλύτες και εξισώσεις του προβλήματος.....	23
3.3.1	Οι εξισώσεις του προβλήματος	23
3.3.2	Διακριτοποίηση.....	24
3.3.3	Διαδικασία επίλυσης	26
3.3.4	Μοντελοποίηση του πορώδους	28
3.4	Οριακές συνθήκες.....	29
3.5	Επαλήθευση του μοντέλου.....	31
3.5.1	Περιγραφή των πειραμάτων αναφοράς.....	31
3.5.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων με το πείραμα των Dong et al.....	33
3.5.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων με το πείραμα των Bradley & Hulhearn.....	39
4	Αποτελέσματα	40
4.1	Παραμετρική μελέτη για H, L και W	40
4.1.1	Τομή στο επίπεδο $Y=1.5m$	40
4.1.2	Καμπύλες μέσης και μέγιστης τιμής U_{eff}	53
4.1.3	Τρισδιάστατη απεικόνιση U_{eff}	55
4.2	Επίδραση του συντελεστή αντίστασης.....	57
4.3	Επίδραση της έντασης της τύρβης	62
5	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική μελέτη.....	65
5.1	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα	65
5.2	Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	67
6	Βιβλιογραφία	68

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2-1: Ποιοτικά κριτήρια για την άνεση σε διάφορες συνθήκες ανέμου	11
Σχήμα 2-2: Μέση σχετική ταχύτητα (U/U_0) στο οριζόντιο άξονα για α) μια σειρά από δέντρα διαφορετικής πυκνότητας σε ύψος $z = 1.4m$ b) τεχνητά εμπόδια διαφορετικού πορώδους [5].....	12
Σχήμα 2-3: Πειραματική διάταξη για την ανάλυση άνεσης σε πόλη [2].....	13
Σχήμα 2-4: Πεδίου ταχύτητας υπολογιστικού μοντέλου πριν και μετά την σχεδιαστική παρέμβαση [1].....	13
Σχήμα 3-1: Πλέγμα βάσης [9]	15
Σχήμα 3-2: Πύκνωση πλέγματος γύρω από το στερεό όριο [9]	15
Σχήμα 3-3: Επίπεδα πύκνωσης [8].....	15
Σχήμα 3-4: Πύκνωση κοντά στην διεπιφάνεια [8].....	16
Σχήμα 3-5: Τοπική πύκνωση σε σημείο έντονης καμπυλότητας της γεωμετρίας [8]	16
Σχήμα 3-6: Αφαίρεση κελιών στερεού χωρίου [9]	16
Σχήμα 3-7: Επικόλληση κελίων στο όριο [9].....	17
Σχήμα 3-8: Πρόοψη του μοντέλου κτηρίου (άσπρο) και του υπολογιστικού χωρίου (πράσινο)	18
Σχήμα 3-9: Σχήμα και διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου (πάνω), η θέση του εμποδίου και κτηρίου για $L=4h$ σε πλάγια όψη (κάτω).....	18
Σχήμα 3-10 : Κατακόρυφο προφίλ U_{eff} στην θέση $x=2h$ για 3 τιμές $\Delta x/h$	19
Σχήμα 3-11: Κατακόρυφο προφίλ U_{eff} στην θέση $x=h$ για 3 τιμές $\Delta x/h$	20
Σχήμα 3-12: : Πύκνωση πλέγματος πίσω από το πορώδες εμπόδιο.....	20
Σχήμα 3-13: Πύκνωση του πλέγματος πίσω από το μοντέλο κτηρίου.....	21
Σχήμα 3-14: Πύκνωση πλέγματος στις ακμές του στερεού ορίου	21
Σχήμα 3-15: Πεπλατυσμένα κελία κοντά στο επίπεδο που μοντελοποιεί το έδαφος.....	22
Σχήμα 3-16: Τιμές Y^+ πάνω στην επιφάνεια του στερεού ορίου του κτηρίου	22
Σχήμα 3-17: Υπολογιστικό κελί με κέντρο P και ένα γειτονικό κελί με κέντρο N. Τα δύο κελιά μοιράζονται την επιφάνεια f. Το διάνυσμα d ενώνει τα κέντρα των γειτονικών κελιών. [8].....	25
Σχήμα 3-18: Λογαριθμικό διάγραμμα για τα αδιάστατα υπόλοιπα εξισώσεων συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων	28
Σχήμα 3-19: Το υπολογιστικό χωρίο με τα όρια του	30
Σχήμα 3-20: Θέση μετρητικών και λεπτομέρεια του πορώδους εμποδίου [21]	31
Σχήμα 3-21: Σχήμα του μοντέλου του εμποδίου και το σύστημα συντεταγμένων του πειράματος. H =ύψος εμποδίου. W =πλάτος εμποδίου. B =πάχος εμποδίου. U =ταχύτητα ελεύθερης ροής. z =ύψος. x =απόσταση από το εμπόδιο [22]	32

Σχήμα 3-22: Προφίλ ταχύτητας και έντασης τύρβης ανάντη του εμποδίου συναρτήσει του ύψους z. U= ταχύτητα ελεύθερης ροής [22]	32
Σχήμα 3-23: Πυκνώσεις γύρω από το εμπόδιο για τα 3 πλέγματα πλέγμα 1(πάνω), πλέγμα 2 (μέση) και πλέγμα 3 (κάτω).....	34
Σχήμα 3-24: Κατανομή k για το πλέγμα 1 (πάνω), πλέγμα 2 (μέση), πλέγμα 3(κάτω), με διαστατούς άξονες (H=0.02)	35
Σχήμα 3-25: Πειραματικά μετρημένη κατανομή k με αδιάστατους άξονες	35
Σχήμα 3-26: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=0h$ για 3 πλέγματα	36
Σχήμα 3-27: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=3h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)	36
Σχήμα 3-28: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=5h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)	36
Σχήμα 3-29: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=10h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)	37
Σχήμα 3-30: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=15h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)	37
Σχήμα 3-31: Αριστερά: Ένα τυπικό μοτίβο γραμμών ροής ($\eta=0.1$ και $U=10m/s$). l μήκος ανακυκλοφορίας, h ύψος ανακυκλοφορίας και R το σημείο προσκόλλησης. Δεξιά: Μια δεύτερη, μικρή ανακυκλοφορία ακριβώς πίσω από το εμπόδιο αναπτύσσεται για στερεό εμπόδιο και $\eta=0.05$	38
Σχήμα 3-32: Line integral convolution (LIC) του πεδίου ταχύτητας για στερεό εμπόδιο μαζί με απόλυτες συντεταγμένες (πάνω), λεπτομέρεια της δεύτερης ανακυκλοφορίας κοντά στο στερεό όριο (κάτω)	38
Σχήμα 3-33: Οριζόντιο προφίλ αδιάστατης μέσης ταχύτητας (u/u_4) για $z/h=0.38$ και $z/h=1.88$ [10] [19]	39
Σχήμα 4-1: Αριστερά: διαστάσεις L, H σε πλάγια όψη εμποδίου και κτηρίου . Δεξιά: διαστάσεις L, W σε κάτοψη εμποδίου και κτηρίου	40
Σχήμα 4-2: Επίπεδο $Y=1.5m$ (κόκκινο) μαζί με τα διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο αυτό	41
Σχήμα 4-3: Περιοχή ενδιαφέροντος (μαύρη διαγράμμιση) και διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $Y=1.5m$	41
Σχήμα 4-4: Ueff στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=2h$ και $W=1h$ με A: $H=0.5h$, B: $H=1h$ και Γ: $H=2h$	42
Σχήμα 4-5: Ueff στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=0.5h$, B: $H=1h$ και Γ: $H=2h$	43
Σχήμα 4-6: Ueff στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=10h$ και $W=1h$ με A: $H=0.5h$, B: $H=1h$ και Γ: $H=2h$	44
Σχήμα 4-7: Ueff στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=4h$ και $W=1h$ με A: $H=1h$ και B: $H=2h$	45

Σχήμα 4-8: <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$	46
Σχήμα 4-9: <i>Ueff</i> και LIC στο επίπεδο $Z=0m$ (επίπεδο XY) για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$	47
Σχήμα 4-10: Πεδίο πίεσης στο επίπεδο $Z=0m$ (επίπεδο XY) για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$	47
Σχήμα 4-11: <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5m$ με $W=2h$ και $H=2h$ για A: $L=2h$ και B: $L=4h$	48
Σχήμα 4-12: <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5m$ με $W=2h$ και $H=2h$ για $L=6h$ και $L=10h$	49
Σχήμα 4-13: <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5 m$ για $H=2h$ και $L=4h$ με A: $W=2h$, B: $W=3h$	50
Σχήμα 4-14: <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5m$ με $W=1h$, $W=2h$ και $H=2h$ για $L=10h$	51
Σχήμα 4-15: Κατανομή αδιάστατου συντελεστή ενεργής ταχύτητας R για 3D μοντέλο με $W=1h$ (μπλε), $W=2h$ (πορτοκαλί), $H=2H$ και $L=10h$ και 2D πειραματικά αποτελέσματα [10]	52
Σχήμα 4-16: Μέση <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και H/h για $W/h=1$	53
Σχήμα 4-17: Μέση <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και W/h για $H/h=1$	53
Σχήμα 4-18: Μέση τιμή <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει W/h για $L=4h$ και $H=2h$	54
Σχήμα 4-19: Μέση τιμή <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει H/h για $L=4h$ και $W=1h$	54
Σχήμα 4-20: Μέγιστη τιμή <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και H/h για $W/h=1$.55	
Σχήμα 4-21: Μέγιστη τιμή <i>Ueff</i> στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και W/h για $H/h=1.55$	
Σχήμα 4-22: Όγκος υπολογιστικών κελιών με <i>Ueff</i> $\leq 3m/s$ για $H=2h$ (πράσινο) και για $H=0.5h$ (μαύρο), για $W=1h$ και $L=6h$	56
Σχήμα 4-23: Όγκος υπολογιστικών κελιών με <i>Ueff</i> $\leq 3m/s$ για $H=3h$ (μπλε) και για $H=2h$ (πράσινο), για $W=1h$ και $L=6h$	56
Σχήμα 4-24: Όγκος υπολογιστικών κελιών με <i>Ueff</i> $\leq 3m/s$ για $W=2h$ (κόκκινο) και για $W=1h$ (πράσινο), για $H=2h$ και $L=6h$	57
Σχήμα 4-25: Πεδίο <i>Ueff</i> και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $H=2h$, $W=2h$ και $L=10h$ για A: $k\tau=1$, B: $k\tau=10$ και Γ: στερεό εμπόδιο	58
Σχήμα 4-26: Πεδίο <i>Ueff</i> και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για στερεό εμπόδιο για $H=2h$, $W=2h$ και A: $L=6h$, B: $L=4h$ και Γ: $L=2h$	59
Σχήμα 4-27: Πεδίο <i>Ueff</i> και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $H=2h$, $W=2h$ και A: $L=6h$, B: $L=4h$ και Γ: $L=2h$	60
Σχήμα 4-28: Ποσοστιαία διαφορά $(U_s - U_{kt} = 10)U_{kt} = 10$ της μέσης <i>Ueff</i> στο επίπεδο $Y=1.5$ για στερεό εμπόδιο και για πορώδες($k\tau=10$) εμπόδιο	61
Σχήμα 4-29: Πεδίο k και LIC για $L=2h$, $H=2h$ και $W=2h$ για το πορώδες (πάνω) και το στερεό εμπόδιο (κάτω).....	61

Σχήμα 4-30: Διαφορά πεδίου k και της τιμής k στην είσοδο του χωρίου, με LIC στο επίπεδο $Z=0m$ (XY) για A: $I=10\%$, B: 20% , Γ: 30%	62
Σχήμα 4-31: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 4m/s$ για $I=10\%$ (μπλε) και για $I=20\%$ (πράσινο), για $H=2h$, $W=2h$ και $L=10h$	63
Σχήμα 4-32: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 4m/s$ για $I=20\%$ (πράσινο) και για $I=30\%$ (μαύρο), για $H=2h$, $W=2h$ και $L=10h$	63
Σχήμα 4-33: Μέση τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος για διάφορες τιμές έντασης τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.....	64
Σχήμα 4-34: Μέγιστη τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος για διάφορες τιμές έντασης τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου	64

1 Εισαγωγή











Η προστασία από τον άνεμο δεν αποτελεί μια νέα ανάγκη του ανθρώπου, αλλά στο παρελθόν δεν αποτελούσε το αντικείμενο συστηματικής επιστημονικής μελέτης. Από το 1980 και μετά έχουν γίνει αρκετές πειραματικές μελέτες για την μείωση της ταχύτητας ανέμου που μπορεί να προκαλέσει ένα πορώδες ή συμπαγές εμπόδιο, ενώ αργότερα ακολούθησαν και υπολογιστικές μελέτες σε εφαρμογές όπως η ελάττωση μεταφοράς άμμου και η προστασία ηλιακών πάνελ. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η προστασία ενός χώρου μπροστά από ένα κτήριο, ένα μοντέλο που βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις αλλά ταυτόχρονα διαφοροποιείται από τις αντίστοιχες μελέτες της βιβλιογραφίας που εξετάζουν ένα εμπόδιο μόνο του. Άλλες μελέτες περιλαμβάνουν ένα στερεό σώμα και εξετάζουν την μείωση των αεροδυναμικών δυνάμεων λόγω της παρουσίας του εμποδίου.

Για να γίνει όμως αξιολόγηση της προστασίας που προσφέρει κάθε εμπόδιο χρησιμοποιείται ένα κριτήριο το οποίο αφορά την μείωση της ταχύτητας σε συνδυασμό με την ένταση τύρβης, όπου δίνεται βαρύτητα τόσο στο μέσο πεδίο ταχύτητας όσο και στο πεδίο της διαταραχής. Με βάση αυτό το κριτήριο και το υπολογιστικό μοντέλο, σε περιβάλλον SimScale, αξιολογείται η προστασία που προσφέρουν εμπόδια διαφόρων υψών και πλατών, καθώς και η επίδραση της απόστασης μεταξύ εμποδίου και κτηρίου. Τέλος γίνεται διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή αντίστασης και τους πάχους εμποδίου, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι πιο αποτελεσματικό ένα μικρό πάχος με μεγάλο συντελεστή αντίστασης ή το αντίστροφο.

2 Ανεμοπροστασία

2.1 Περιγραφή του προβλήματος

Το ζήτημα της ανεμοπροστασίας πραγματεύεται την προστασία μια περιοχής από τον άνεμο. Στην περίπτωση της άνεσης ανέμου (wind comfort), ο στόχος είναι οι συνθήκες στην περιοχή αυτή να είναι πιο ευχάριστες και ασφαλείς για τους ανθρώπους σε αυτόν τον χώρο. Για να ποσοτικοποιηθούν και να μπορούν να αξιολογηθούν διάφορες συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια. Στο Σχήμα 2-1 αποτυπώνεται ένας απλός και εμπειρικός τρόπος αξιολόγησης των συνθηκών ανέμου. [1]

		Comfort category	Gust Equivalent Mean Speed m/s (kmh)
		Sitting	≤ 2.7 (10)
		Standing	≤ 3.8 (14)
		Strolling	≤ 4.7 (17)
		Walking	≤ 5.5 (20)
		Uncomfortable	> 5.5 (20)
		Exceeded	> 25 (90)

Σχήμα 2-1: Ποιοτικά κριτήρια για την άνεση σε διάφορες συνθήκες ανέμου

Αντίθετα η σχέση 2-1 είναι ένα ποσοτικό κριτήριο που συνδυάζει μέσο πεδίο ταχύτητας και τυρβώδη διαταραχή της ταχύτητας.

$$V_e = \bar{V} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{v'_{rms}}{\bar{V}}\right)$$

2-1

v'_{rms} = τυπική απόκλιση (ρίζα του μέσου των τετραγώνων) της διαμήκουσ ταχύτητας διαταραχής

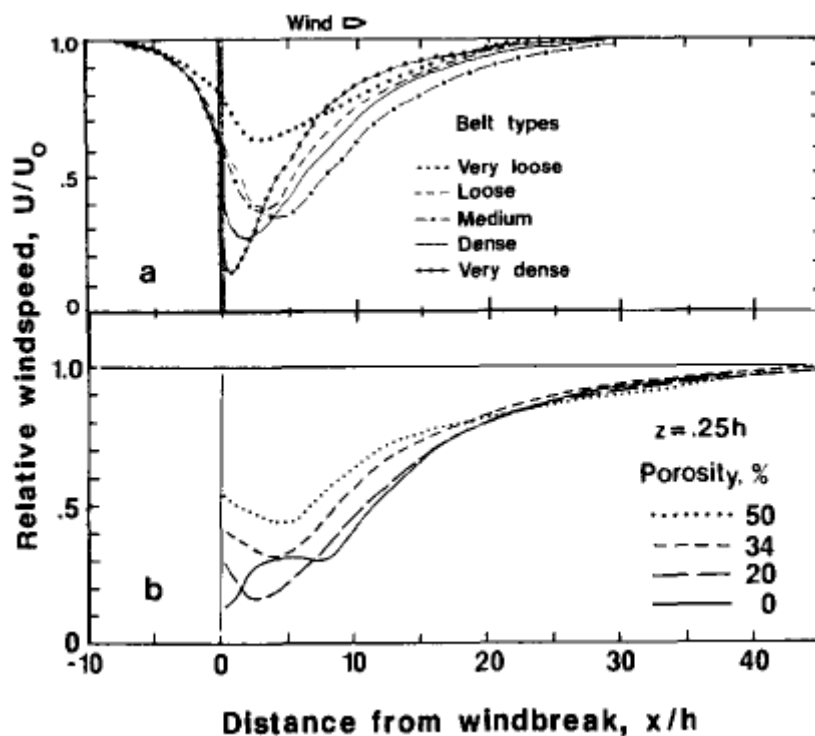
k = συντελεστής βαρύτητας (1 έως 3)

Από αυτή την σχέση προκύπτει η ενεργή ταχύτητα που αποτυπώνει το επίπεδο άνεσης πολύ καλύτερα από το μέτρο της ταχύτητας. Ο συντελεστής k δίνει την δυνατότητα να μεταβληθεί η βαρύτητα που δίνεται στην ταχύτητα διαταραχής με την τιμή $k = 3$ να χρησιμοποιείται συνήθως. [2]

Ένα άλλο πρόβλημα ανεμοπροστασίας είναι ο περιορισμός διασποράς σκόνης ή ρύπων. Σε αυτήν την περίπτωση ο στόχος είναι ο περιορισμός της διασποράς σωματιδίων από τον άνεμο, αφού αυτά μπορούν να προκαλέσουν βλάβες σε υποδομές ή ακόμα και να βλάψουν τον άνθρωπο. Σε τέτοιες εφαρμογές κριτήριο μπορεί να αποτελεί τόσο το πεδίο ροής πάνω από μια αμμώδη επιφάνεια [3], όσο και η ασκούμενη δύναμη σε ένα σώμα που αντιπροσωπεύει την πηγή σωματιδίων [4].

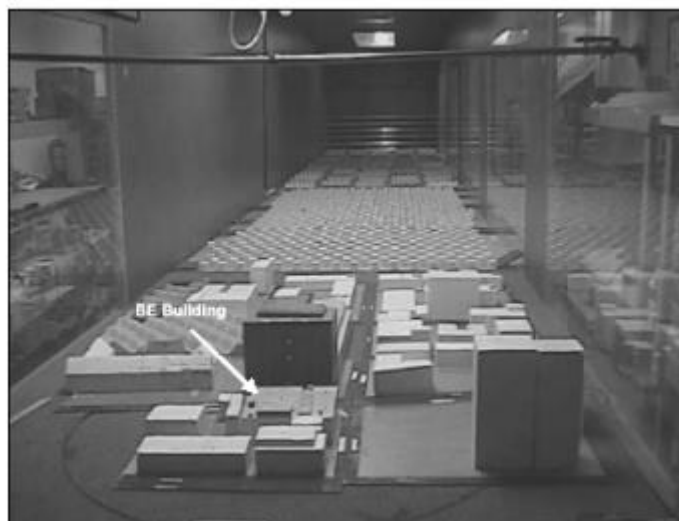
2.2 Συνήθειες Λύσεις

Για την βελτίωση των συνθηκών ανέμου υπάρχουν διάφορες λύσεις ανάλογα με την φύση του προβλήματος. Κάποιες από αυτές είναι η χρήση ενός πορώδους εμποδίου για μείωση της ταχύτητας, αεροδυναμικές βελτιώσεις στην εξωτερική γεωμετρία κτηρίων, αλλά και η μελέτη της θέσης κάθε κτηρίου σε μια ολόκληρη πόλη. Για την περίπτωση του πορώδους εμποδίου υπάρχουν πολλές εναλλακτικές από δέντρα μέχρι τεχνητούς φράχτες, τα οποία μπορούν να παραταχθούν και σε πολλές σειρές μπροστά από την περιοχή που πρέπει να προστατευθεί.

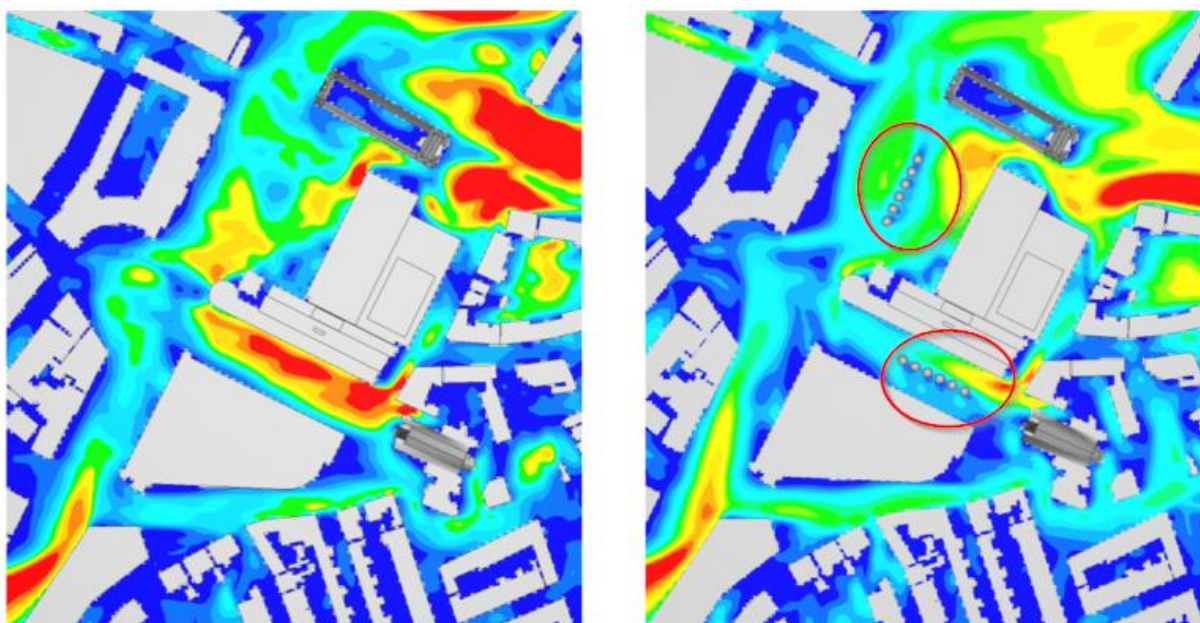


Σχήμα 2-2: Μέση σχετική ταχύτητα (U/U_0) στο οριζόντιο άξονα για α) μια σειρά από δέντρα διαφορετικής πυκνότητας σε ύψος $z = 1.4m$ β) τεχνητά εμπόδια διαφορετικού πορώδους [5]

Ο σχεδιασμός όλων αυτών των λύσεων μπορεί να γίνει είτε πειραματικά με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα (Σχήμα 2-3), είτε υπολογιστικά (Σχήμα 2-4) αλλά και με τον συνδυασμό των 2 μεθόδων. Τα τελευταία χρόνια τα υπολογιστικά μοντέλα (CFD) έχουν όλο και μεγαλύτερη συμμετοχή στην σχεδιαστική διαδικασία αφού μπορούν να μειώσουν δραματικά το κόστος, κάτι που είναι ιδιαίτερα αισθητό στην περίπτωση σχεδιασμού κτηρίων [1]



Σχήμα 2-3: Πειραματική διάταξη για την ανάλυση άνεσης σε πόλη [2]



Σχήμα 2-4: Πεδίου ταχύτητας υπολογιστικού μοντέλου πριν και μετά την σχεδιαστική παρέμβαση [1]

3 Το Υπολογιστικό Μοντέλο

3.1 Γενικά στοιχεία για το εργαλείο SimScale

Το SimScale αποτελεί μια online πλατφόρμα, με γραφικό περιβάλλον, που δίνει την δυνατότητα για επίλυση διαφόρων προβλημάτων : στατικής, αεροδυναμικής, μεταφοράς θερμότητας κτλ. Παρέχει δωρεάν τον κώδικα πλεγματοποίησης και επίλυσης καθώς και την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ μέσω cloud computing, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα για post-processing. Για προβλήματα αεροδυναμικής χρησιμοποιεί τον κώδικα του OpenFoam. [6]

Το OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) δημιουργήθηκε από τους Henry Weller και Hrvoje Jasak το 1993 στο Imperial College με την τότε ονομασία FOAM. Εν έτη 2004, ο Henry Weller, ο Chris Greenshields και ο Mattijs Janssens ίδρυσαν την εταιρία OpenCFD Ltd με σκοπό την ανάπτυξη και την έκδοση του, πλέον ανοιχτού κώδικα, OpenFOAM 1.0. Έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλες βιομηχανίες και πανεπιστημιακά ιδρύματα ανά τον κόσμο. Καθημερινά υπάρχουν συνεισφορές, διορθώσεις και βελτιώσεις από μέλη της προγραμματιστικής κοινότητας εμπλουτίζοντας έτσι το περιεχόμενο και τις δυνατότητές του. [7]

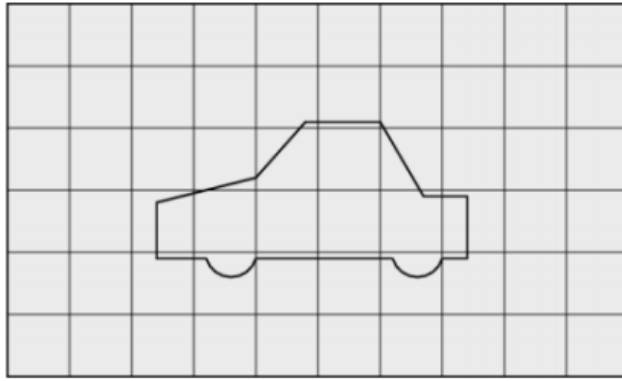
3.2 Πλεγματοποίηση

Η γεωμετρία του μοντέλου είναι αρκετά απλή και για το λόγο αυτό η γένεση πλέγμα δεν αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση. Η γένεση του υπολογιστικού πλέγματος έγινε με τον πλεγματοποιητή snappyHexMesh του OpenFOAM.

Το snappyHexMesh είναι βασικό εργαλείο πλεγματοποίησης του OpenFOAM. Δημιουργεί μη δομημένα Hex-Dominant πλέγματα υψηλής ποιότητας και είναι κατάλληλο για πλεγματοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών. Η ρύθμιση των παραμέτρων του πλέγματος γίνεται μέσα από το αρχείο system/snappyHexMeshDict, όπου βρίσκονται και όλες οι παράμετροι και οι οδηγίες για τον πλεγματοποιητή. Η γεωμετρία πρέπει να εισαχθεί ως ένα αρχείο STL (STereoLithography). Σε αυτήν τη μορφή το μοντέλο αποτελείται από τριγωνικές επιφάνειες οι οποίες ορίζονται από το κάθετο σε αυτές διάνυσμα και τις κορυφές τους δοσμένες με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Τέλος ένα μεγάλο πλεονέκτημα που έχει το snappyHexMesh είναι ότι μπορεί να εκτελεστεί παράλληλα. [8]

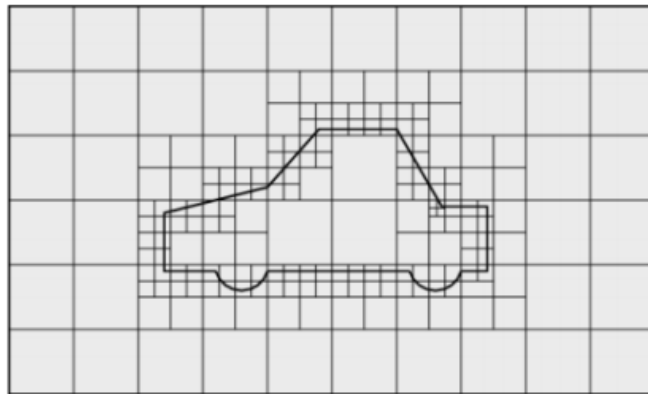
3.2.1 Διαδικασία

- 1) **Πλέγμα βάσης:** Η γένεση του πλέγματος βάσης (Σχήμα 3-1) γίνεται με το blockMesh, ένα εργαλείο που παράγει δομημένα εξαεδρικά πλέγματα. Στο πλέγμα βάσης εμπεριέχεται όλη η γεωμετρία του στερεού. Η εξωτερική επιφάνεια του χωρίου που δημιουργείται από το blockMesh διασπάται σε έξι τμήματα (patches) τα οποία είναι η είσοδος η έξοδος και οι τέσσερις παράπλευρες έδρες. Σε αυτά τα patches επιβάλλονται οι κατάλληλες οριακές συνθήκες για την επίλυση.

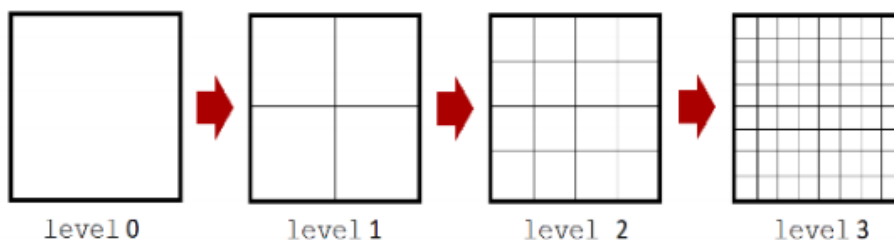


Σχήμα 3-1: Πλέγμα βάσης [9]

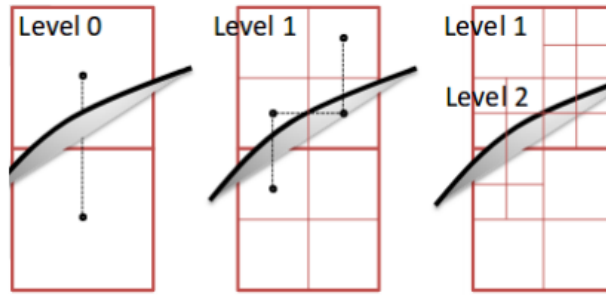
- 2) **Τοπική πύκνωση πλέγματος:** Γίνεται πύκνωση των κελιών κοντά στη διεπιφάνεια των χωρίων στερεού-ρευστού (Σχήμα 3-2) βασισμένη στην ακόλουθη λογική, τα κελιά τα οποία τέμνονται από την επιφάνεια του μοντέλου διαιρούνται στο επίπεδο πύκνωσης (Σχήμα 3-3) που έχει επιβληθεί ύστερα γίνεται σύγκριση της γωνίας που δημιουργείται μεταξύ δύο πλευρών των καινούριων γειτονικών κελιών με μια ορισμένη από τον χρήστη, αν είναι μεγαλύτερη τότε γίνεται περαιτέρω πύκνωση (Σχήμα 3-4) (Σχήμα 3-5).



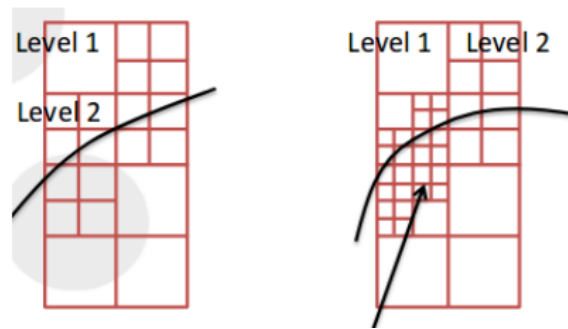
Σχήμα 3-2: Πύκνωση πλέγματος γύρω από το στερεό όριο [9]



Σχήμα 3-3: Επίπεδα πύκνωσης [8]

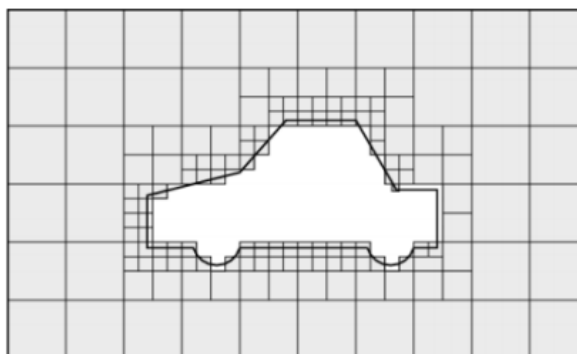


Σχήμα 3-4: Πύκνωση κοντά στην διεπιφάνεια [8]



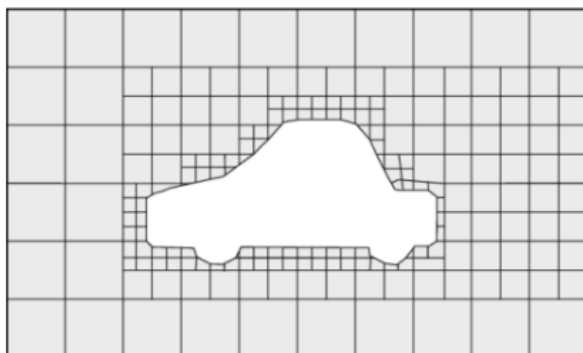
Σχήμα 3-5: Τοπική πύκνωση σε σημείο έντονης καμπυλότητας της γεωμετρίας [8]

- 3) **Αφαίρεση κελιών εντός στερεού χωρίου:** Στο συγκεκριμένο βήμα γίνεται επιλογή των κελιών που θα αφαιρεθούν έτσι ώστε να παραμείνει το πλέγμα που αντιστοιχεί στο χωρίο που καταλαμβάνει το ρευστό (Σχήμα 3-6). Σαν αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας λαμβάνεται το Castellated Mesh. Τα κελιά τα οποία έχουν χρησιμότητα για τη μελέτη είναι τα εξωτερικά του μοντέλου. Οπότε δηλώνεται ένα σημείο το οποίο ανήκει στο πλέγμα, το οποίο δεν πρέπει να είναι κόμβος και βρίσκεται εκτός του μοντέλου. Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τη θέση του σημείου σε σχέση με το μοντέλο STL που εισήχθηκε και διατηρεί το αντίστοιχο τμήμα του πλέγματος ενώ διαγράφεται το υπόλοιπο.



Σχήμα 3-6: Αφαίρεση κελιών στερεού χωρίου [9]

- 4) **Εξομάλυνση και Επικόλληση (snapping) κελιών στο στερεό όριο:** Το τελευταίο και πιο χρονοβόρο μέρος της διαδικασίας. Η ποιότητα του πλέγματος στη διεπιφάνεια στερεού-ρευστού εξαρτάται πλήρως από αυτό το βήμα. Γίνεται προβολή των κελιών που συνορεύουν με το στερεό όριο επάνω σε αυτό. Για αυτό το σκοπό ορίζεται ένα μέγιστο μήκος ακμής κελιού καθώς και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων εξομάλυνσης. Κατά το βήμα αυτό γίνονται αρχικά κάποιες επαναλήψεις εξομάλυνσης ύστερα λαμβάνει χώρα η επικόλληση των κελιών στο όριο και τέλος ακόμα ένας βρόχος εξομάλυνσης εκτελείται (Σχήμα 3-7).

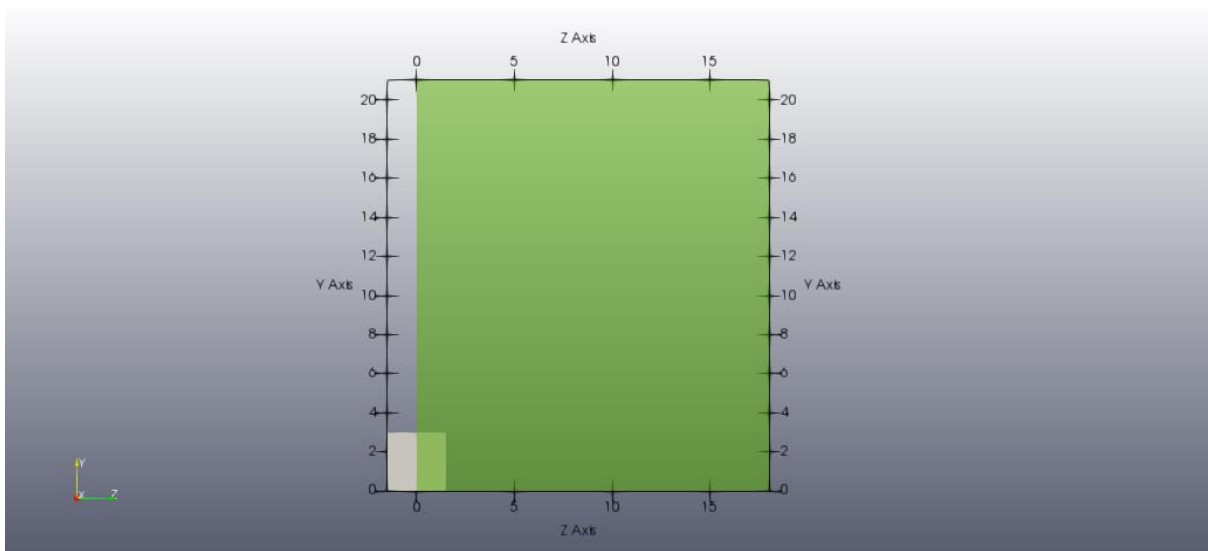


Σχήμα 3-7: Επικόλληση κελιών στο όριο [9]

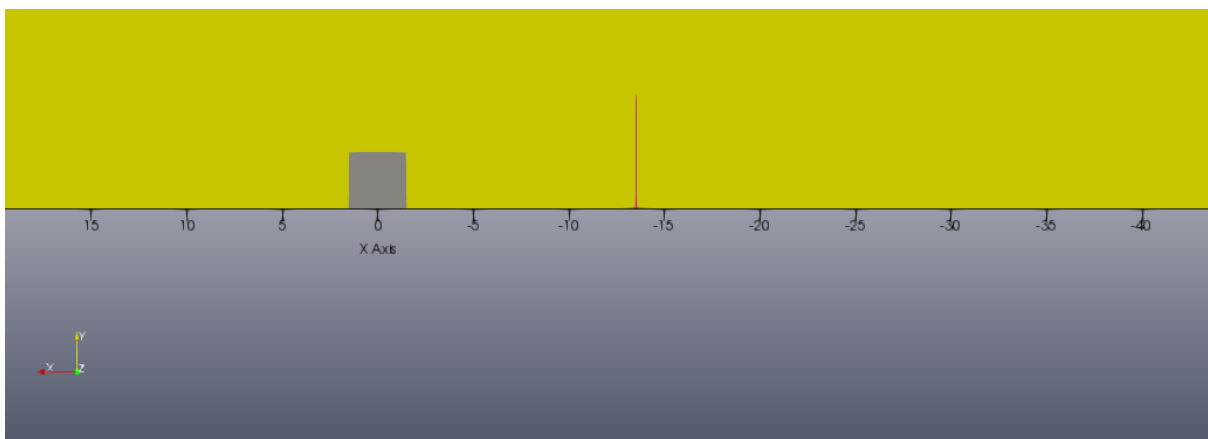
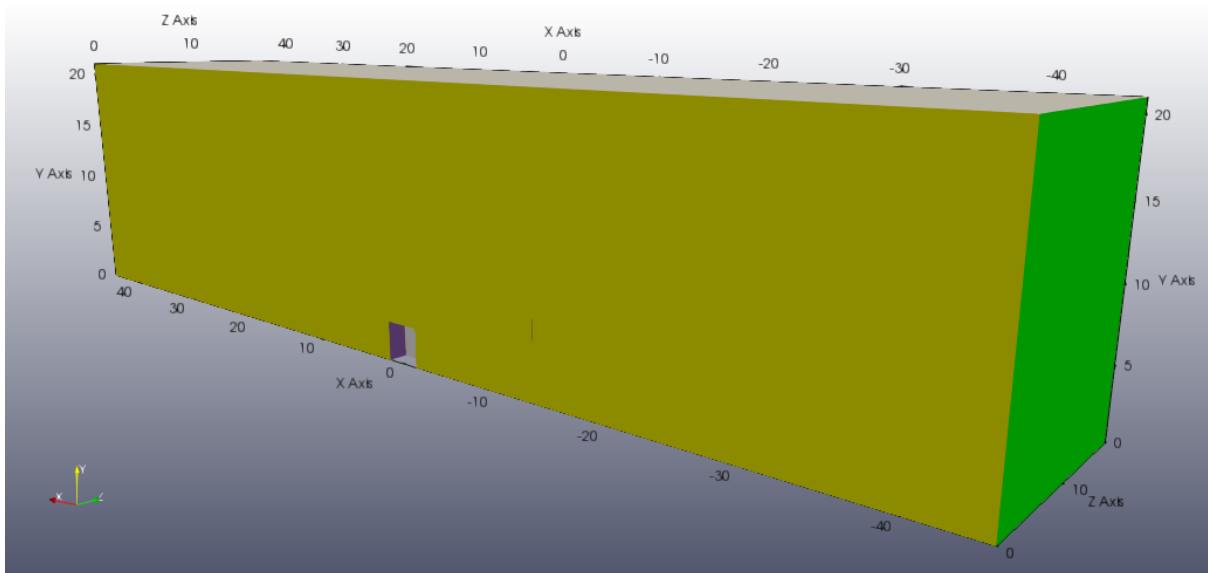
3.2.2 Το πλέγμα γύρω από το μοντέλο του κτηρίου

Το πρώτο βήμα στην γένεση πλέγματος είναι η επιλογή των διαστάσεων του όγκου ελέγχου. Λόγω της συμμετρίας του προβλήματος η επίλυση γίνεται μόνο στην μισή γεωμετρία για να επιτευχθεί μικρότερο πλέγμα, όποτε ο όγκος ελέγχου είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περιέχει το μισό κτήριο και εμπόδιο. Βασικός κανόνας σε αυτή την επιλογή είναι ο λόγος στένωσης $a = \frac{0.5h^2}{Y \cdot Z}$ να έχει μια τιμή μικρότερη από περίπου 2%, όπου Y και Z το ύψος και πλάτος του υπολογιστικού χωρίου αντίστοιχα και h το ύψος του τετράγωνου μοντέλου κτηρίου. Το μοντέλο του κτηρίου είναι τετράγωνο με $h = 3m$, αλλά λόγω της συμμετρίας του προβλήματος μόνο το μισό πλάτος είναι εντός του υπολογιστικού χωρίου (Σχήμα 3-8).

Επίσης πρέπει να αποφασιστεί η ακριβής αναλογία μεταξύ πλάτους Z (άξονας Z) και ύψους υπολογιστικού χωρίου Y (άξονας Y) (Σχήμα 3-9). Αυτό έγινε θέτοντας έναν αρχικό λόγο στένωσης κοντά στο 2% και πλάτος $Z = 4h = 12 m$ και ύψος $Y = 6h = 18 m$, έπειτα μεταβλήθηκε πρώτα το ύψος και μετά το πλάτος για να διαπιστωθεί αν υπάρχει αλλαγή στο πεδίο ροής με τις τελικές τιμές να είναι $Z = 5h = 15 m$ και $Y = 7h = 21m$ αντίστοιχα. Ο τελικός λόγο στένωσης είναι 1.4%. Επίσης, για κάθε εξεταζόμενη θέση εμποδίου, το υπολογιστικό χωρίο μπροστά από το εμπόδιο έχει μήκος $5h$ ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί ομαλά η ροή, ενώ πίσω από το κτήριο υπάρχει μήκος $15h$ για να αναπτυχθεί πλήρως ο ομόρρους, μεγέθη που επιλέχθηκαν με αντίστοιχο τρόπο. Έτσι προκύπτει ένα μήκος υπολογιστικού χωρίου $X = 15h + L_{max} + 5h = 90 m$, αφού η μέγιστη απόσταση εμποδίου – κτηρίου που εξετάστηκε είναι $L_{max} = 10h$. Η είσοδος του υπολογιστικού χωρίου είναι η πράσινη επιφάνεια $x = -45 m$ (Σχήμα 3-9), οπότε για την ταχύτητα στην είσοδο θα ισχύει $U_x > 0$.



Σχήμα 3-8: Πρόοψη του μοντέλο κτηρίου (άσπρο) και του υπολογιστικού χωρίου (πράσινο)



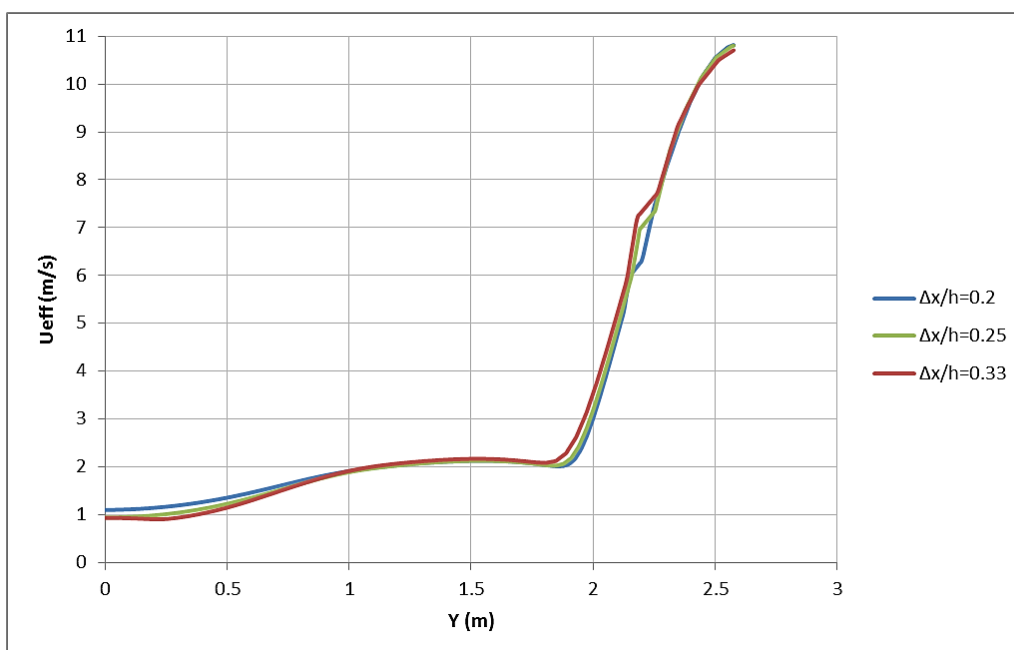
Σχήμα 3-9: Σχήμα και διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου (πάνω), η θέση του εμποδίου και κτηρίου για $L=4h$ σε πλάγια όψη (κάτω)

Το βήμα του βασικού πλέγματος είναι ομοιόμορφο σε όλες τις διαστάσεις. Επίσης, ο λόγος του βήματος του βασικού πλέγματος προς το ύψος του κτηρίου είναι $\frac{\Delta x}{h} = 0.2$, μια τιμή που επιλέχθηκε βάση βιβλιογραφικής έρευνας [10] αλλά και μέσω μελέτης ευαισθησίας πλέγματος. Να σημειωθεί πως οι τιμές στην πηγή [10] αναφέρονται στον λόγο βήματος πλέγματος προς το ύψος του εμποδίου, οπότε χρησιμοποιήθηκαν σαν μια αφετηρία για την παρούσα διερεύνηση. Συγκεκριμένα έγινε η ίδια προσομοίωση με διάφορα βήματα στο βασικό πλέγμα και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα τόσο για την μέση και μέγιστη τιμή της U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5$ (Πίνακας 3-1), όσο και για το κατακόρυφο προφίλ της U_{eff} για $x = h$ και $x = 2h$. Οι διαστάσεις των κελιών στο βασικό πλέγμα είναι καθοριστικές για όλο το πλέγμα γιατί όλες οι πυκνώσεις γίνονται με βάση αυτές τις αρχικές διαστάσεις (διαιρώντας αυτά τα αρχικά κελιά).

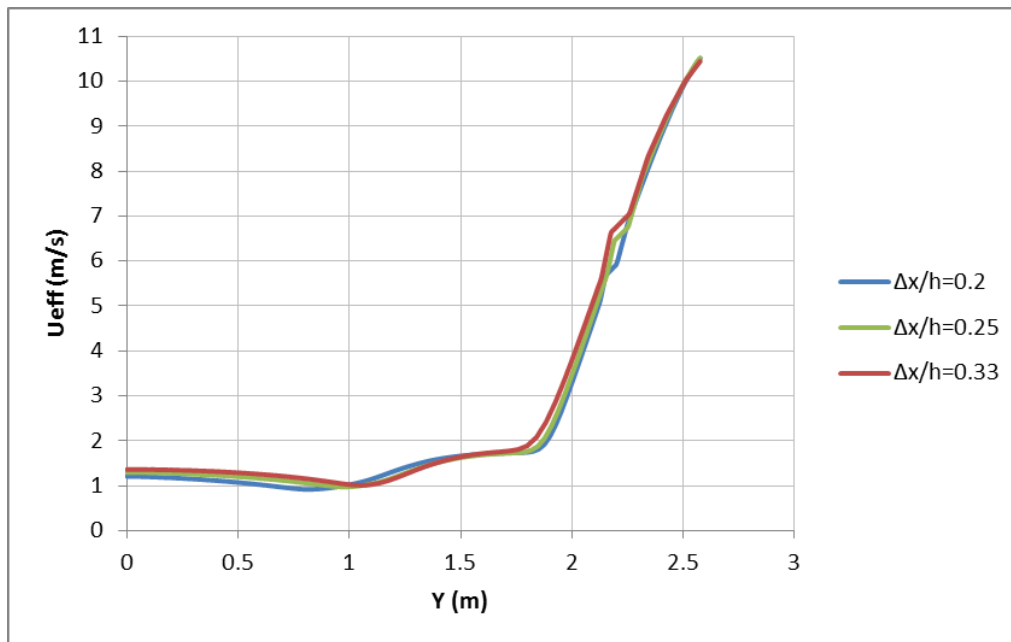
$\Delta x/h$	Μέση τιμή U_{eff} (m/s)	Διαφορά	Μέγιστη τιμή U_{eff} (m/s)	Διαφορά	Κελία (εκατ.)
0.20	1.7	0.6%	3.28	-0.9%	5.5
0.25	1.71	-1.6%	3.25	-1.6%	3
0.33	1.68		3.20		1.7

Πίνακας 3-1 : Μέση και μέγιστη τιμή U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5$ ανάμεσα σε εμπόδιο και κτήριο

Από τα Σχήμα 3-10 και Σχήμα 3-11 φαίνεται πως τα στα αποτελέσματα για τα 3 πλέγματα έχουν κάποιες διαφορές τοπικά. Καθώς ο λόγος $\frac{\Delta x}{h}$ μειώνεται οι καμπύλες σταδιακά προσεγγίζουν η μια την άλλη σε ορισμένα σημεία ενώ σε άλλα οι διαφορές αυξάνονται. Βάση του Πίνακας 3-1 και των υπολογιστικών δυνατοτήτων επιλέγεται $\frac{\Delta x}{h} = 0.2$, αφού η ακρίβεια στο επίπεδο $y = 1.5 m$, το οποίο εξετάζεται είναι ικανοποιητική.

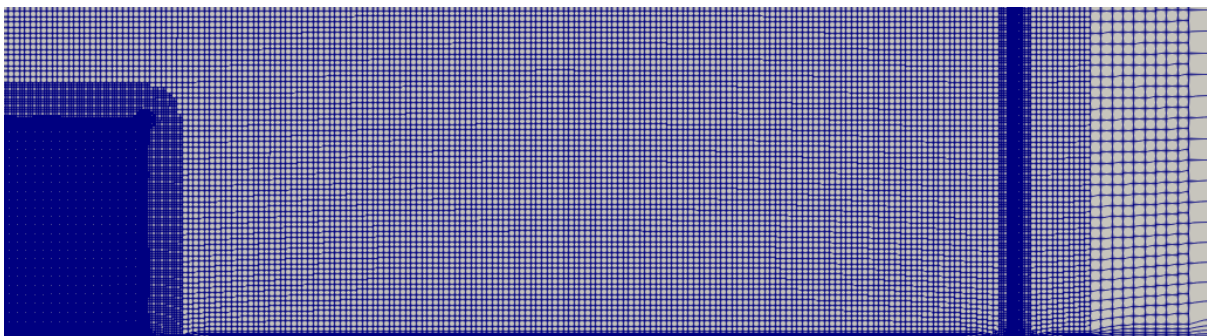


Σχήμα 3-10 : Κατακόρυφο προφίλ U_{eff} στην θέση $x=2h$ για 3 τιμές $\Delta x/h$

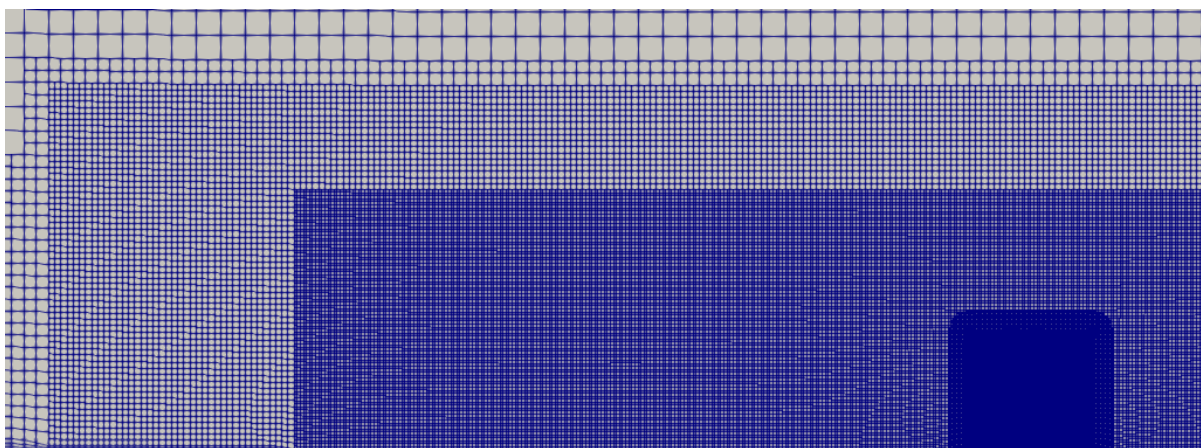


Σχήμα 3-11: Κατακόρυφο προφίλ U_{eff} στην θέση $x=h$ για 3 τιμές $\Delta x/h$

Επίσης, βασικά στοιχεία του πλέγματος είναι οι πυκνώσεις στην περιοχή πίσω από το πορώδες εμπόδιο (Σχήμα 3-12) αλλά και στον ομόρρου του κτηρίου (Σχήμα 3-13).

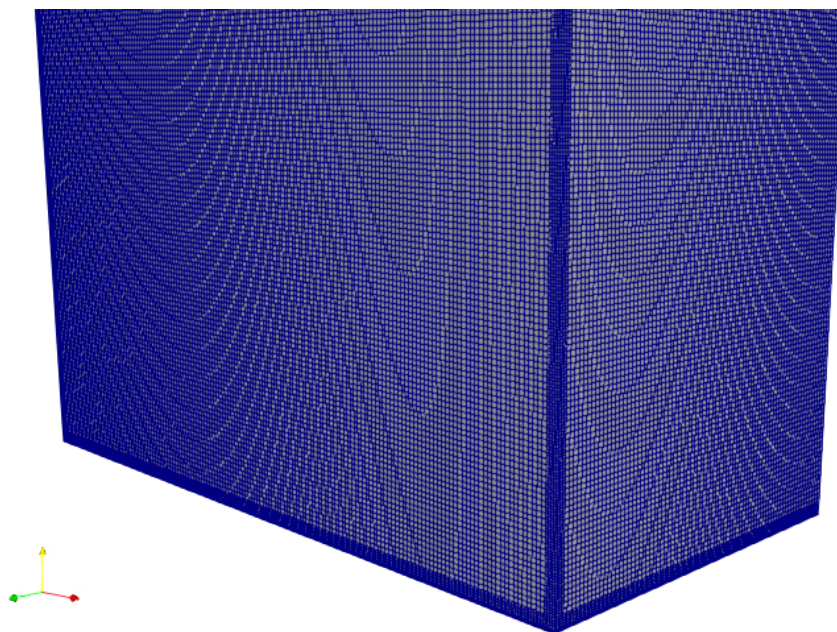


Σχήμα 3-12: : Πύκνωση πλέγματος πίσω από το πορώδες εμπόδιο

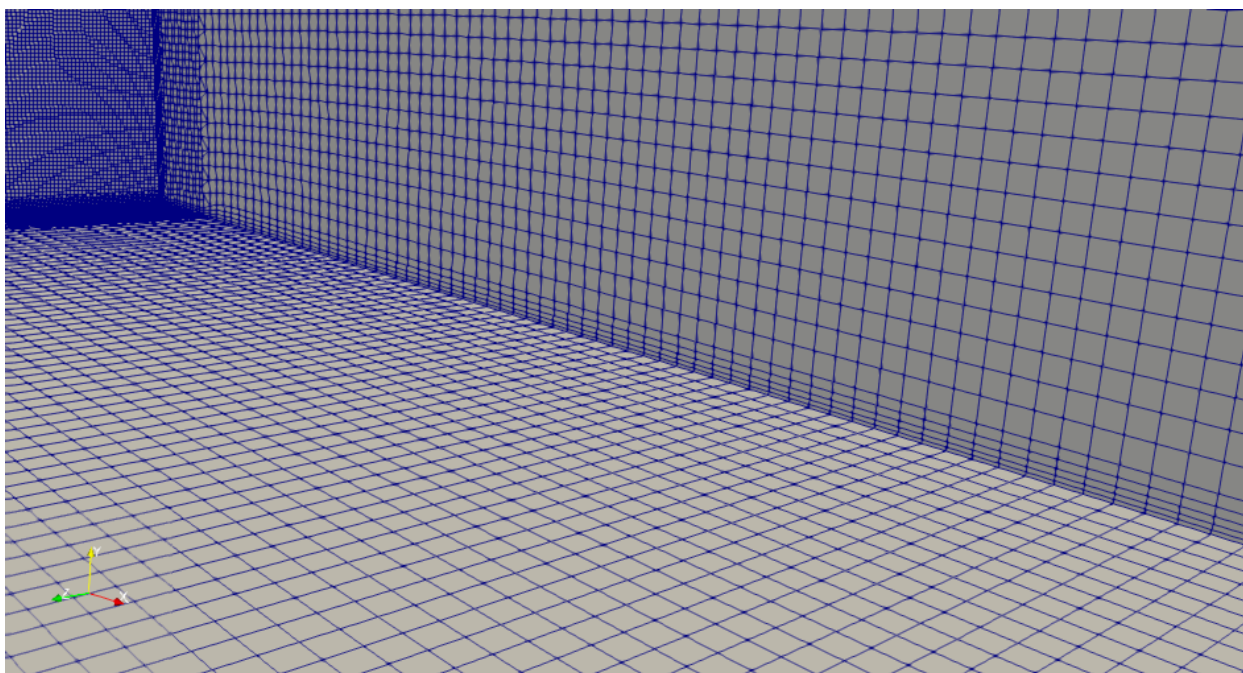


Σχήμα 3-13: Πύκνωση του πλέγματος πίσω από το μοντέλο κτηρίου

Άλλες περιοχές με πυκνώσεις είναι προφανώς οι ακμές του στερεού ορίου (Σχήμα 3-14), αλλά και η περιοχή κοντά στο έδαφος όπου εφαρμόζονται πεπλατυσμένα κελία με σταδιακά αυξανόμενο πάχος (layer cells) (Σχήμα 3-15).

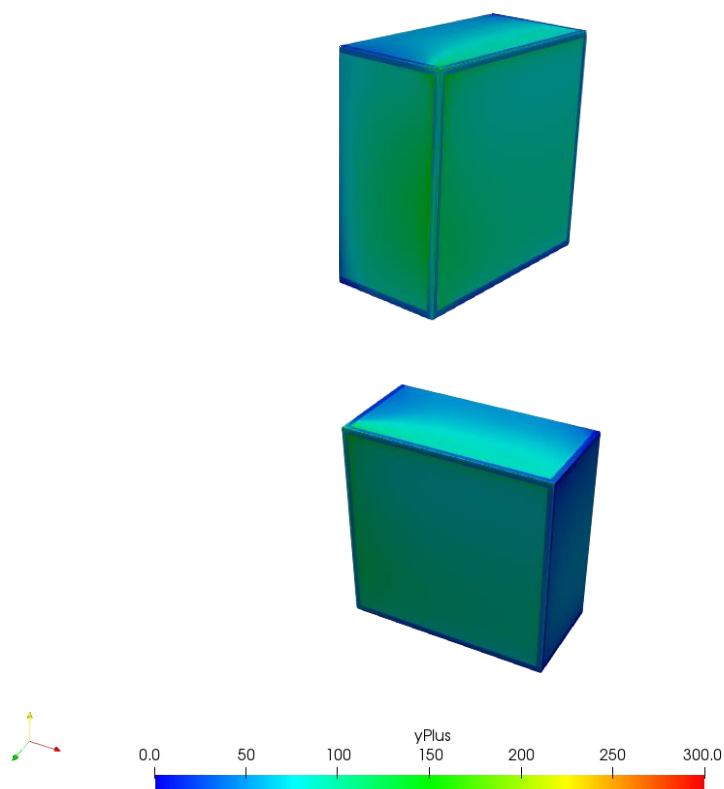


Σχήμα 3-14: Πύκνωση πλέγματος στις ακμές του στερεού ορίου



Σχήμα 3-15: Πεπλατυσμένα κελιά κοντά στο επίπεδο που μοντελοποιεί το έδαφος

Επίσης ένα καλό ποσοτικό κριτήριο για την ποιότητα πλέγματος είναι οι τιμές Y^+ για τα κελιά στο όριο, οι οποίες δεν θα έπρεπε να ξεπερνούν την τιμή 300 για μια High Re μοντελοποίηση και με τις εφαρμοζόμενες συναρτήσεις τοίχου (Σχήμα 3-16).



Σχήμα 3-16: Τιμές Y^+ πάνω στην επιφάνεια του στερεού ορίου του κτηρίου

3.3 Επιλύτες και εξισώσεις του προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στις εξισώσεις του προβλήματος, την διαδικασία διακριτοποίησης και επίλυσης τους, καθώς και στο κριτήριο σύγκλισης που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες για το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται και την μέθοδο μοντελοποίησης του πορώδους εμποδίου

3.3.1 Οι εξισώσεις του προβλήματος

Οι εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα είναι οι γνωστές εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes. Η ροή είναι ασυμπίεστη οπότε η εξίσωση της συνέχειας γράφεται:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad 3-1$$

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει την αρχή διατήρησης της μάζας. Η Εξίσωση 3-1 γράφεται αλλιώς:

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad 3-2$$

Η επόμενη εξίσωση που ισχύει είναι η διατήρηση της ορμής (δεύτερος νόμος κλασικής μηχανικής), δηλαδή η χρονική μεταβολή της ορμής είναι ίση με το άθροισμα των δρώσεων δυνάμεων. Με αντικατάσταση των υλικών εξισώσεων σε αυτές προκύπτουν οι εξισώσεις Navier-Stokes [11]. Με χρήση της διαδικασίας Reynolds decomposition, δηλαδή την γραφή της ταχύτητας ως ένα μέσο πεδίο (\mathbf{u}) συν την διαταραχή (\mathbf{u}') [12] και εφαρμογή της υπόθεσης Boussinesq για την έκφραση των τυρβωδών τάσεων Reynolds συναρτήσει της τυρβώδους συνεκτικότητας (ν_T) και του τανυστή παραμόρφωσης οι εξισώσεις μπορούν να τροποποιηθούν περεταίρω.

Τέλος απλοποιώντας τις με την εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστα ρευστά προκύπτει:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\nu + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\nabla p}{\rho} = 0 \quad 3-3$$

Η εξίσωση 3-3 μαζί με την εξίσωση συνέχειας (Εξίσωση 3-2) αποτελούν ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων και τεσσάρων αγνώστων (u, v, w, p). Για την περίπτωση στρωτής ροής ($\nu_T = 0$), επιλύοντας προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές ταχύτητας και πίεσης και καθορίζεται πλήρως η ροή. Αν η ροή δεν είναι στρωτή, τότε απαιτείται η παράλληλη επίλυση επιπλέον εξισώσεων οι οποίες προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά τύρβης ($\nu_T = f(k, \omega)$ ή $f(k, \varepsilon)$ κτλ).

Είναι δεδομένο πως η ροή μέσα από ένα πορώδες εμπόδιο και γύρω από ένα μοντέλο κτηρίου θα έχει τυρβώδη χαρακτήρα. Άλλωστε, το επίπεδο τύρβης αποτελεί και καθοριστικό παράγοντα στην εκτίμηση του επιπέδου άνεσης όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.1. Για αυτό τον λόγο η χρήση μοντέλου τύρβης είναι απαραίτητη. Το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το k- ω SST.

Το SST k- ω αποτελεί μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο στο χώρο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Η ιδιαιτερότητα που το κάνει εύχρηστο είναι πως στα εσωτερικά τμήματα του οριακού στρώματος έως και το οριακό υπόστρωμα χρησιμοποιεί το μοντέλο k- ω , ενώ

στην ελεύθερη ροή χρησιμοποιεί το μοντέλο k-ε [7] [13]. Εμφανίζει αδυναμία στα σημεία αποκοπής και στα σημεία υψηλών τιμών επιτάχυνσης, στα οποία εμφανίζει μεγάλες τιμές τύρβης. Βέβαια όχι στο επίπεδο του μοντέλου k-ε. Να τονισθεί πως στο OpenFOAM χρησιμοποιείται η βασική έκδοση με ανανεωμένες σταθερές. [7]

Αυτό το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων, δηλαδή αποτελείται από μια εξίσωση για την κινητική ενέργεια της τύρβης (Εξίσωση3-4) και μια για τον ειδικό λόγο διάχυσης (Εξίσωση3-5). [7] [13]

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad 3-4$$

$$U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = a S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad 3-5$$

Για τις σταθερές του μοντέλου ισχύει:

$$a_1 = \frac{5}{9}, a_2 = 0.44, \beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = \frac{9}{100}, \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1), F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\}$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{dU_i}{dx_j}, 10 \beta^* k \omega \right)$$

Τέλος μέσω της σχέσης 3-6 υπολογίζεται η τυρβώδης συνεκτικότητα, η οποία εμφανίζεται στις σχέσεις 3-3, 3-4 και 3-5.

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1, SF_2)} \quad 3-6$$

3.3.2 Διακριτοποίηση

Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε υπολογιστικό περιβάλλον εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Οι αρχικές μερικές διαφορικές εξισώσεις απαιτείται να εκφραστούν ως ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος είναι και λύση των αρχικών διαφορικών εξισώσεων για το συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Οπότε απαιτείται ένα πεπερασμένο σύνολο από διακριτούς όγκους πάνω στους οποίους θα εκφραστούν οι αλγεβρικές εξισώσεις ροής. Στο Κεφάλαιο 3.2 αναλύθηκε η διαδικασία ανάπτυξης πλέγματος, το οποίο αποτελείται από πεπερασμένο σύνολο κελιών. Κάθε κελί αποτελεί και έναν όγκο ελέγχου όπου επιζητείται η λύση των διαφορικών εξισώσεων.

Η μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes είναι:

$$(u \cdot \nabla) u - (\nu + \nu_T) \nabla^2 u + \frac{\nabla p}{\rho} = 0 \quad 3-7$$

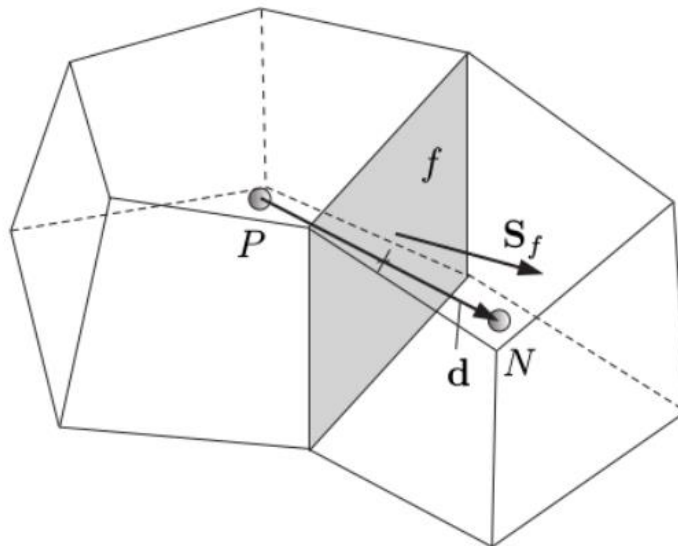
Στην εξίσωση εμφανίζονται 3 όροι, ο όρος μεταφοράς, διάχυσης και κλίσης πίεσης. Ο κάθε όρος έχει άλλη φυσική σημασία και αντιμετωπίζεται ανάλογα κατά την διαδικασία διακριτοποίησης.

Η παραπάνω εξίσωση απαιτείται να ικανοποιείται σε κάθε όγκο ελέγχου V με κέντρο P .

Αν υποθέσουμε ότι η εξίσωση 3-7 πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε όγκο ελέγχου V με βαρύκεντρο P (Σχήμα 3-17) θα πρέπει να ισχύει:

$$\int_V (u \cdot \nabla) u dV - \int_V (\nu + \nu_T) \nabla^2 u dV + \int_V \frac{\nabla p}{\rho} dV = 0 \quad 3-8$$

Η διακριτοποίηση γίνεται θεωρώντας γραμμικές μεταβολές στα γειτονικά κελιά και με χρήση του αναπτύγματος Taylor για κάθε συνάρτηση, εκφράζονται τα διαφορικά των όρων της εξίσωσης 3-8 συναρτήσει των τιμών στα βαρύκεντρα των γειτονικών όγκων. Με την εφαρμογή του θεωρήματος Gauss στα χωρικά ολοκληρώματα της εξίσωσης 3-8, δίνεται η έκφραση της εξίσωσης ως προς τα κέντρα των επιφανειών του όγκου ελέγχου [14]. Οι τιμές στα κέντρα των επιφανειών αυτών υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή, συναρτήσει των γνωστών πεδίων ταχύτητας και πίεσης [7] [8] [15] [12] [16].



Σχήμα 3-17: Υπολογιστικό κελί με κέντρο P και ένα γειτονικό κελί με κέντρο N . Τα δύο κελιά μοιράζονται την επιφάνεια f . Το διάνυσμα d ενώνει τα κέντρα των γειτονικών κελιών. [8]

Για το **όρο μεταφοράς** προκύπτει:

$$\int_V (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} dV = \oint_S \mathbf{u} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \sum_{f=1}^{nb(P)} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{S})_f u_f = a_p u_p + \sum_{N=1}^{NB(P)} a_N u_N \quad 3-9$$

Ο όρος $(\mathbf{u} \cdot \mathbf{S})_f$ είναι η παροχή μάζας και ο δείκτης f παραπέμπει στο κέντρο της κάθε επιφάνειας. Το σύνολο faces είναι αυτό, όλων των επιφανειών του εκάστοτε όγκου ελέγχου. Ο δείκτης P παραπέμπει στο κέντρο του όγκου ελέγχου και ο δείκτης N στα γειτονικά. $NB(P)$ είναι γειτονικά κελιά του κελιού με κέντρο P και $nb(P)$ είναι οι επιφάνειες του κελιού με κέντρο P .

Η γραμμικοποίηση του όρου ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των συντελεστών a_p και a_N . Αφού οι τιμές στα κέντρα των επιφανειών υπολογίζονται μέσω γραμμικής παρεμβολής, εκφράζονται συναρτήσει των u_p , u_N και της απόστασης μεταξύ αυτών. Οπότε οι ενδιαφερόμενοι συντελεστές υπολογίζονται συναρτήσει του ήδη γνωστού πεδίου ταχύτητας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του όγκου ελέγχου [7] [8]. Η χρήση ανάντι σχήματος διακριτοποίησης είναι μια συνήθης τακτική τον όρο μεταφοράς, οπότε οι συντελεστές a_p και a_N τροποποιούνται ανάλογα.

Για το **όρο διάχυσης** προκύπτει:

$$\int_V (\nu + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} dV = \oint_S (\nu + \nu_T) \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \sum_{f=1}^{nb(P)} \nabla u_f \cdot \mathbf{S}_f \quad 3-10$$

Ο όρος ∇u_f υπολογίζεται με ανάπτυγμα Taylor και ακρίβεια 2^{ns} τάξης.

3.3.3 Διαδικασία επίλυσης

Θεωρείται η ημι-διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης ορμής :

$$a_p u_p = A(u) - \nabla p \quad 3-11$$

όπου ο όρος $A(u)$ αποτελείται από το μητρώο των γνωστών συντελεστών από τα γειτονικά κελιά πολλαπλασιασμένο με τις αντίστοιχες ταχύτητες. Οι συντελεστές έχουν προκύψει από τη διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς και διάχυσης. Η επίλυση των εξισώσεων ροής γίνεται με χρήση του επιλύτη simpleFoam, ο οποίος στηρίζεται στον αλγόριθμο SIMPLE [17]. Στον επιλύτη αυτό αν η τιμή της ταχύτητας που υπολογίστηκε μία χρονική στιγμή μέσω της εξίσωσης ορμής είναι u_i^* και η αντίστοιχη πίεση που ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας είναι p^* . Η διόρθωση της ταχύτητας και της πίεσης ώστε να ικανοποιούν και τις δύο εξισώσεις κατάστασης είναι u' και p' αντίστοιχα. Η εξίσωση της ορμής ισχύει και για τις διορθώσεις χωρίς μεγάλο σφάλμα. Δηλαδή

$$a_p u'_p = A(u') - \nabla p' \quad 3-12$$

Αν θεωρηθεί πως ο πρώτος όρος στο δεξί μέρος είναι αμελητέος σε σχέση με την κλίση της διόρθωσης της πίεσης τότε:

$$u'_p = -\frac{1}{a_p} \nabla p' \quad \mathbf{3-13}$$

Επίσης:

$$\nabla \cdot u_j = 0 \quad \mathbf{3-14}$$

$$u_j = u_j^* + u'_j \quad \mathbf{3-15}$$

οπότε από τον ορισμό της διόρθωσης ταχύτητας (3-15) ισχύει

$$\nabla \cdot u'_j = -\nabla \cdot u_j^* \quad \mathbf{3-16}$$

Μεταφέροντας την εξίσωση αυτή στην 3-12 και χρησιμοποιώντας την εξίσωση ορμής προκύπτει η έκφραση πίεσης. Ολοκληρώνοντας σε όγκο ελέγχου με έδρες "faces", διακριτοποιείται στη μορφή

$$\sum_{faces} A(u_{sc}) S_{face} = \sum_{faces} \frac{1}{a_{sc}} (\nabla p S)_{face} \quad \mathbf{3-17}$$

Οπότε το τελικό διακριτοποιημένο σύστημα είναι:

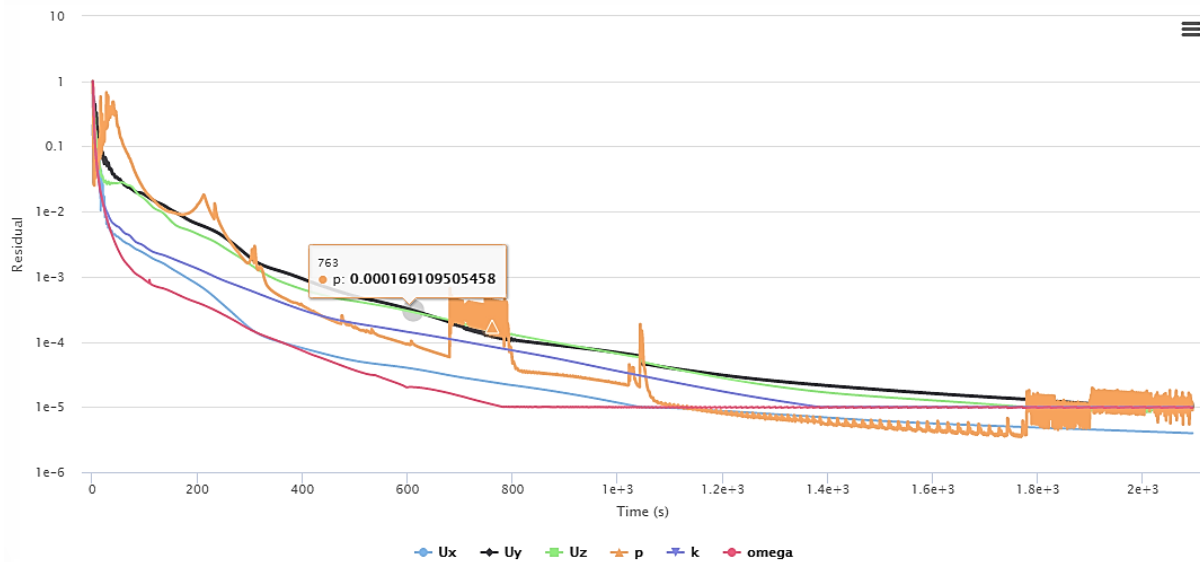
$$a_p u_p = A(u_{sc}) - \sum_{faces} (p_{sc} S)$$

$$\sum_{faces} A(u_{sc}) S_{face} = \sum_{faces} \frac{1}{a_{sc}} (\nabla p S)_{face} \quad \mathbf{3-18}$$

όπου αρχικά υπολογίζεται το πεδίο της ταχύτητας από την εξίσωση της ορμής βάσει της αρχικής τιμής της πίεσης. Η εξίσωση αυτή δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Στη συνέχεια, δημιουργείται το μητρώο $A(u)$ και με παρεμβολή εκφράζεται για τα κέντρα των επιφανειών του κελιού. Από τη δεύτερη εξίσωση υπολογίζεται το νέο πεδίο πίεσης το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας αλλά όχι αναγκαστικά της ορμής. Τέλος, από την εξίσωση 3-17 υπολογίζεται το νέο πεδίο ταχύτητας u_p . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης [7].

Σαν κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιείται η συνθήκη 3-19. Το αδιαστατοποιημένο υπόλοιπο κάθε εξίσωσης συμβολίζεται με R_i , όπου $i = u_x, u_y, u_z, p, k, \omega$. Μια τυπικά συμπεριφορά του υπολοίπου κάθε εξίσωσης συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων φαίνεται στο Σχήμα 3-18.

$$\forall i, R_i \leq 10^{-5} \quad \text{3-19}$$



Σχήμα 3-18: Λογαριθμικό διάγραμμα για τα αδιάστατα υπόλοιπα εξισώσεων συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων

3.3.4 Μοντελοποίηση του πορώδους

Για την μοντελοποίηση του πορώδους εμποδίου ο κώδικας παρέχει μια σειρά από επιλογές. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το Darcy- Forchheimer, το οποίο μοντελοποιεί την πτώση πίεσης ανά μέτρο σαν έναν όρο πηγής βάση της εξίσωσης:

$$\vec{S} = (\mu d + \frac{1}{2} f \rho |\vec{U}|) \cdot \vec{U} \quad \text{3-20}$$

Οι συντελεστές d και f ονομάζονται Darcy και Forchheimer αντίστοιχα και παρέχονται από τον χρήστη [18]. Πολλές μελέτες για πορώδη εμπόδια σε παρόμοιες συνθήκες ανέμων επιλέγουν την χρήση μόνο του συντελεστή Forchheimer [5] [10] [19], διατυπώνοντας την συνολική πτώση πίεσης του εμποδίου με την σχέση:

$$\Delta P = \frac{1}{2} k_t \rho U^2 \quad \text{3-21}$$

Για την σύνδεση του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης (k_τ) και του πορώδους (φ) έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις με αρκετή αβεβαιότητα και αποκλίσεις, αφού η σύνδεση εξαρτάται από το σχήμα και την εσωτερική δομή του πορώδους εμποδίου [5] [10]. Βάση αυτών των σχέσεων αλλά και πειραματικά υπολογισμένων τιμών k_τ για γνωστά φ [19] επιλέχθηκε ο συντελεστής αντίστασης $k_\tau = 10$, ώστε να αντιστοιχεί στην αντίσταση ενός εμποδίου με περίπου $\varphi = 0.3$ και πάχος 30 mm. Η τιμή αυτή για το πορώδες αναφέρεται σε πολλές πηγές ως η βέλτιστη, αφού παρέχει την μεγαλύτερη δυνατή προστασία συνδυάζοντας μεγάλη αντίσταση με μια επαρκή ροή μέσα από το εμπόδιο για την αποφυγή ανακυκλοφορίας πίσω από αυτό [10] [4] [20].

3.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την επίλυση του προβλήματος έχουν σαν σκοπό την μοντελοποίηση ενός τυπικού ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και αφετέρου την αριθμητική σταθερότητα. Συγκεκριμένα, για την είσοδο του υπολογιστικού χωρίου χρησιμοποιήθηκε ένα προφίλ ταχύτητας της μορφής:

$$U = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad 3-22$$

Με $u^* = 1.4 \text{ m/s}$ και $z_o = 0.2 \text{ m}$

Δίνοντας έτσι μια ικανοποιητικά μεγάλη τιμή ταχύτητας στα δέκα μέτρα ύψος ($u_{10} = 10.8 \text{ m/s}$), αλλά και μια ρεαλιστική τραχύτητα εδάφους $z_o = 0.2 \text{ m}$. Για την τιμή της κινητικής ενέργειας της τύρβης έγινε η υπόθεση ότι λόγω έντονης ανάμειξης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, όποτε υποθέτοντας ένταση τύρβης $I = 10\%$ παίρνουμε την οριακή τιμή $k = 1.8 \left(\frac{m}{s}\right)^2$ μέσω της σχέσης:

$$k = \frac{3}{2} (IU_{ref})^2 \quad 3-23$$

Με $U_{ref} = 10.8 \text{ m/s}$

Βάση της υπόθεσης $\frac{\mu_t}{\mu} = 100$ υπολογίζεται και η τιμή του omega στην είσοδο με χρήση της σχέσης:

$$\omega = \rho \frac{k}{\mu_t} \quad 3-24$$

Με $\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$ και $\mu = 1.81 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{ms}$

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση 3-25 η οποία μοντελοποιεί καλύτερα ατμοσφαιρικά οριακά στρώματα, αλλά παρουσιάζει αριθμητικές αστάθειες για $I \leq 10\%$. Για τον

λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την διερεύνηση της επιρροής μεγάλων επιπέδων τύρβης στην είσοδο (Κεφάλαιο 4.3).

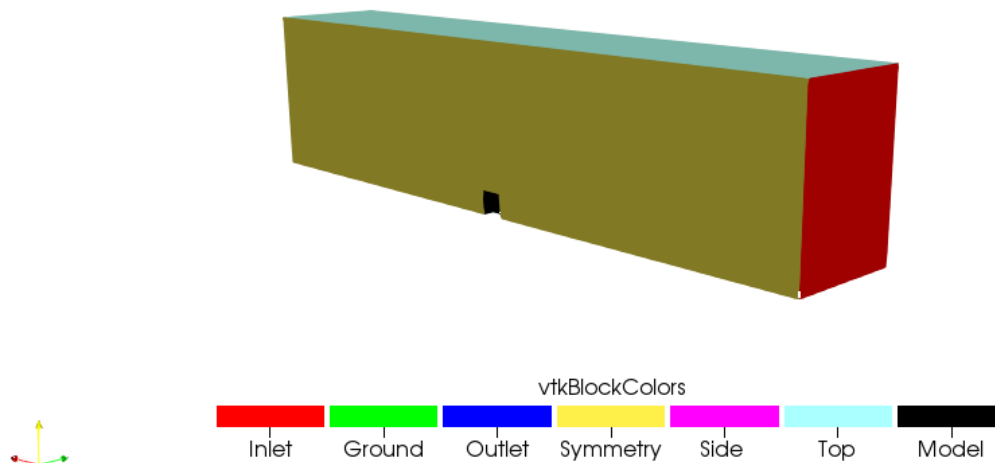
$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{0.41 \cdot C_{\mu}^{0.25} \cdot Y}$$

3-25

Για την πίεση ορίζεται οριακή συνθήκη Neumann στην είσοδο, ενώ στην έξοδο ορίζεται συνθήκη Dirichlet για αριθμητική ευστάθεια. Για τα στερεά όρια χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοίχου. Συνοπτικά όλες οι οριακές συνθήκες για όλα τα σύνορα παρουσιάζονται στο Πίνακα 3-2, ενώ στο Σχήμα 3-19 παρουσιάζονται όλα τα όρια του υπολογιστικού χωρίου.

	Πίεση	Ταχύτητα	K	omega
Είσοδος	Neumann	Dirichlet	Dirichlet	Dirichlet
Έξοδος	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann
Στερεά όρια	Neumann	Wall functions	Wall functions	Wall functions
Επίπεδο συμμετρίας	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann
Πλευρικά Όρια	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann

Πίνακας 3-2: Οριακές συνθήκες του μοντέλου



Σχήμα 3-19: Το υπολογιστικό χωρίο με τα όρια του

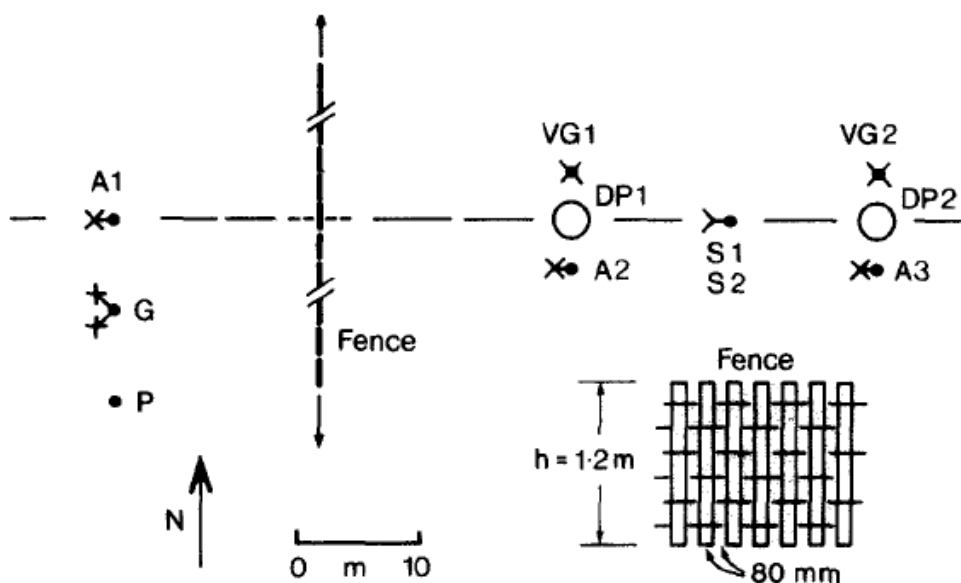
3.5 Επαλήθευση του μοντέλου

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία επαλήθευσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου χρησιμοποιώντας σαν αναφορά πειραματικές μετρήσεις σε παρόμοιες διατάξεις. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η αξιολόγηση των επιλογών που έχουν γίνει για την τιμή της παραμέτρου $\frac{\Delta x}{h}$ (μέγεθος του πλέγματος), για τον τύπο οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται και τέλος για το μοντέλο τύρβης. Η αξιολόγηση του μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τα μετρημένα προφίλ ταχυτήτων και τυρβώδους κινητικής ενέργειας με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου. Η γεωμετρία αλλά και οι οριακές συνθήκες είναι ίδιες με αυτές του πειράματος, ώστε να αποφευχθούν τυχόν αποκλίσεις λόγω διαφοροποίησης των συνθηκών της προσομοίωσης και των συνθηκών του πειράματος.

3.5.1 Περιγραφή των πειραμάτων αναφοράς

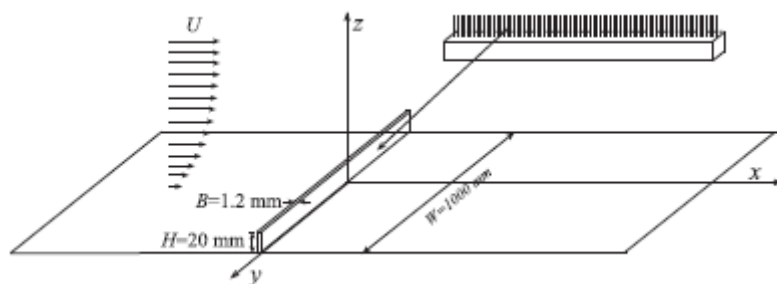
Σαν μέτρο αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν 2 πειράματα από την βιβλιογραφία, τα οποία επιλέχθηκαν βάση της ποσότητας των γνωστών παραμέτρων και πληροφοριών για τις συνθήκες διεξαγωγής. Προφανώς, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές όλες οι τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται για την προετοιμασία του υπολογιστικού μοντέλου, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί.

Το πείραμα των **Bradley & Hulhearn** [21] χρησιμοποιείται συχνά για αξιολόγηση υπολογιστικών μοντέλων. Περιλαμβάνει την μέτρηση της μέσης ταχύτητας σε διάφορες θέσεις κατάντη ενός εμποδίου με 50% πορώδες, σε συνθήκες ουδέτερης ατμόσφαιρας (μήκος Monin-Obukhov $100m \leq L \leq -20m$). Οι μετρήσεις έγιναν σε εξωτερικό χώρο και για ένα εύρος ταχυτήτων 5-10m/s υπάρχει ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων. Για το προφίλ ταχύτητας ισχύει $u_4/u_h = 1.195$ σταθερά, όπου u_4 η ταχύτητα σε ύψος τεσσάρων μέτρων και u_h η ταχύτητα στο ύψος του πορώδους εμποδίου ($h = 1.2m$). Η τραχύτητα εδάφους είναι $z_o = 2 mm$. Στο Σχήμα 3-20 Σχήμα 3-20: Θέση μετρητικών και λεπτομέρεια του πορώδους εμποδίου παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, με τις θέσεις δειγματοληψίας και το πορώδες εμπόδιο σε λεπτομέρεια [21].



Σχήμα 3-20: Θέση μετρητικών και λεπτομέρεια του πορώδους εμποδίου [21]

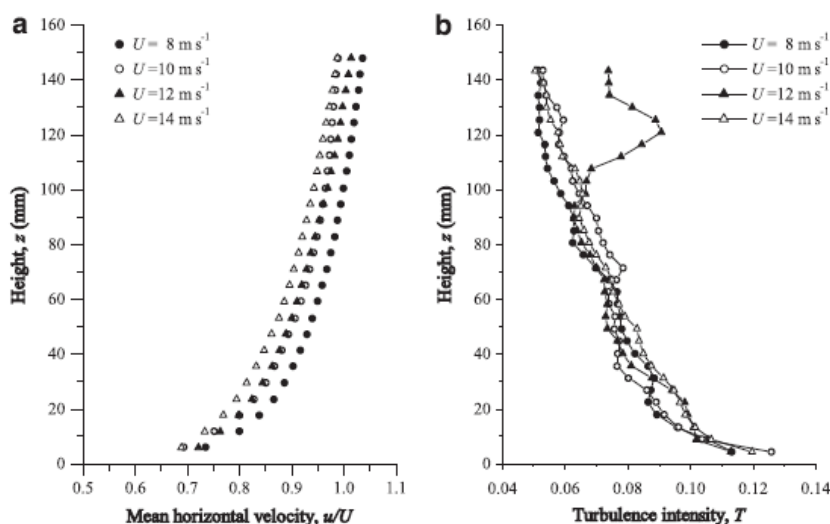
Το πείραμα των **Dong et al** [22], περιλαμβάνει την μέτρηση μέσης ταχύτητας και έντασης τύρβης δισδιάστατου πεδίου ροής κατάντη συμπαγούς και πορώδους εμποδίου με την μέθοδο PIV. Συνολικά έγιναν μετρήσεις για 11 διαφορετικές τιμές πορώδους. Το πείραμα διεξήχθη στην αεροσήραγγα του **Laboratory of Desert and Desertification of the Chinese Academy of Sciences**, η οποία έχει μια διατομή 0.6x1 m και οριακό στρώμα πάχους περίπου 120mm. Οι διαστάσεις του εμποδίου είναι $H=20\text{mm}$ (ύψος), $W=1000\text{mm}$ (πλάτος) και $B=1.2\text{mm}$ (πάχος), οπότε η ροή μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατη αφού ισχύει $W/H=50$ και $B/H=0.06$ (Σχήμα 3-21) [22].



Σχήμα 3-21: Σχήμα του μοντέλου του εμποδίου και το σύστημα συντεταγμένων του πειράματος. H =ύψος εμποδίου. W =πλάτος εμποδίου. B =πάχος εμποδίου. U =ταχύτητα ελεύθερης ροής. z =ύψος. x =απόσταση από το εμπόδιο [22]

Ο λόγος ύψους εμποδίου προς ύψους οριακού στρώματος είναι 0.17 και η απόσταση ανάντη του εμποδίου είναι 12m, δηλαδή 100 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του οριακού στρώματος οπότε το οριακό στρώμα της αεροσήραγγας μπορεί να αναπτυχθεί. Η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε για 4 ταχύτητες 8, 10, 12 και 14 m/s (Σχήμα 3-22) [22].

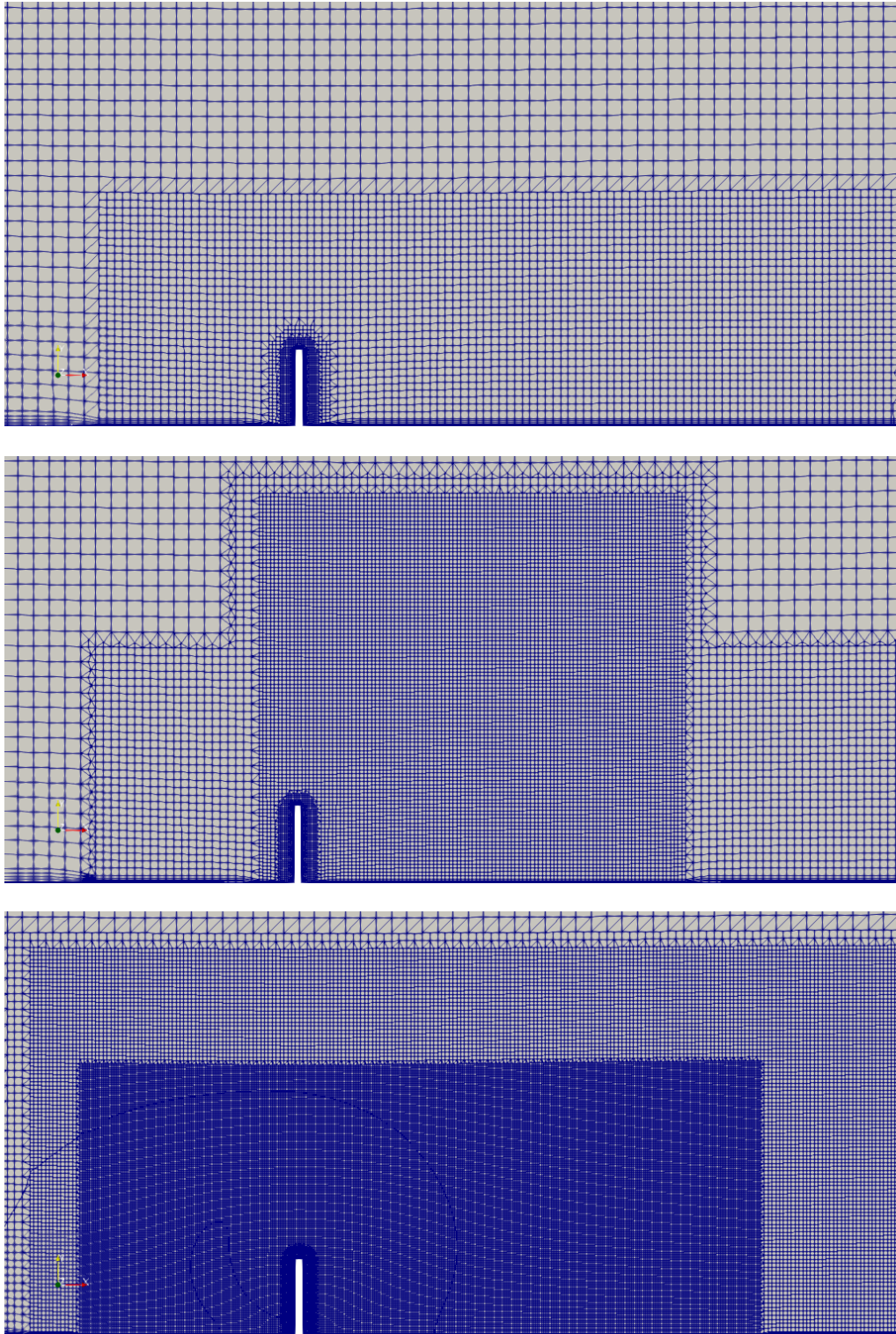
Z. Dong et al. / Journal of Arid Environments 74 (2010) 193–207



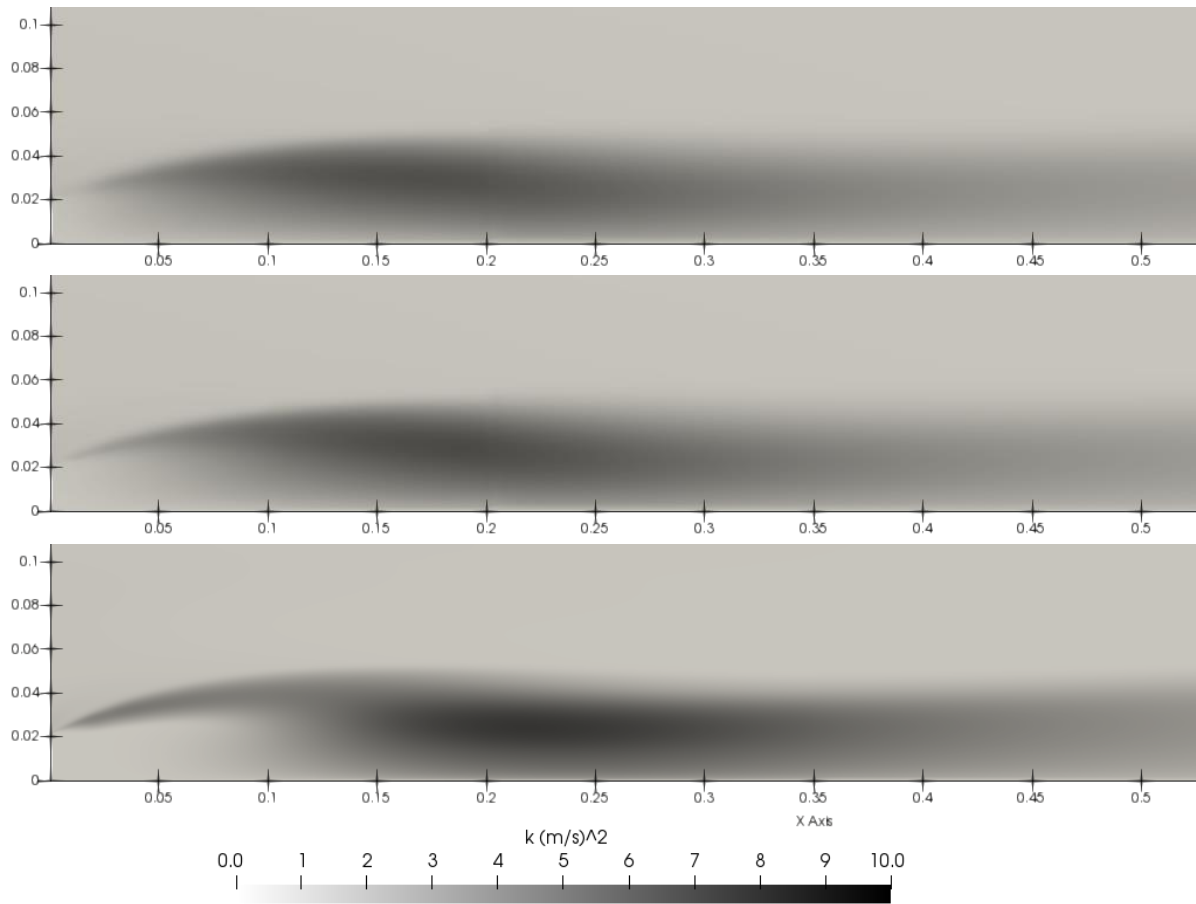
Σχήμα 3-22: Προφίλ ταχύτητας και έντασης τύρβης ανάντη του εμποδίου συναρτήσει του ύψους z . U = ταχύτητα ελεύθερης ροής [22]

3.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με το πείραμα των Dong et al.

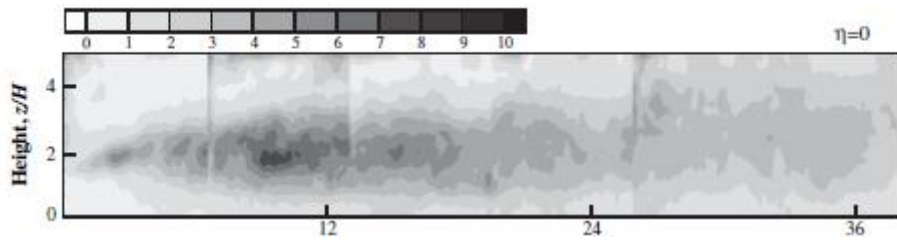
Το συγκεκριμένο πείραμα παρέχει μια πληθώρα μετρήσεων για την ταχύτητα, την ένταση τύρβης και την συστροφή του πεδίου ροής, τόσο για στερεό εμπόδιο όσο και για πορώδες. Αρχικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου και του πειράματος για το σενάριο του στερεού εμποδίου. Συγκεκριμένα συγκρίνονται οι καμπύλες κατακόρυφης κατανομής της U_x συνιστώσας της ταχύτητας πρώτα στην θέση $X=0$ για 3 διαφορετικά πλέγματα (Σχήμα 3-23). Επίσης συγκρίνονται οι κατανομές τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο επίπεδο XZ . Βάση αυτών επιλέγεται το πλέγμα 3, το πυκνότερο εκ των τριών, αφού προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική καμπύλη U_x (Σχήμα 3-26). Κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα. Το εύρος τιμών k είναι παρόμοιο για όλα τα πλέγματα και για τα πειραματικά αποτελέσματα, η διαμήκης θέση του μέγιστου k προσεγγίζεται καλύτερα από το πλέγμα 3 ($x/h=11$), όμως το ύψος του μέγιστου διαφέρει σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήμα 3-24 και Σχήμα 3-25). Έπειτα, αφού έχει επιλεγεί πλέγμα, συγκρίνονται οι καμπύλες κατακόρυφης κατανομής της U_x για τις θέσεις $X=3h, 5h, 10h$ και $25h$ (Σχήμα 3-27, Σχήμα 3-28, Σχήμα 3-29 και Σχήμα 3-30)



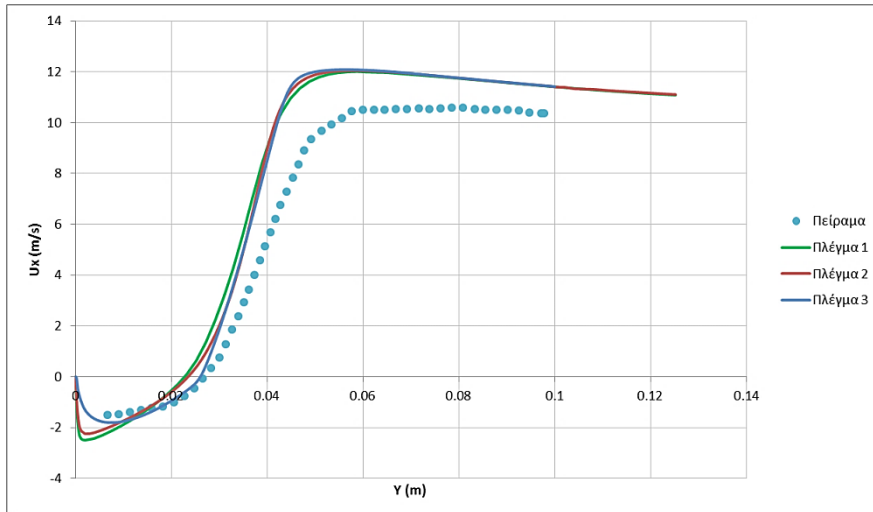
Σχήμα 3-23: Πυκνώσεις γύρω από το εμπόδιο για τα 3 πλέγματα πλέγμα 1(πάνω), πλέγμα 2 (μέση) και πλέγμα 3 (κάτω)



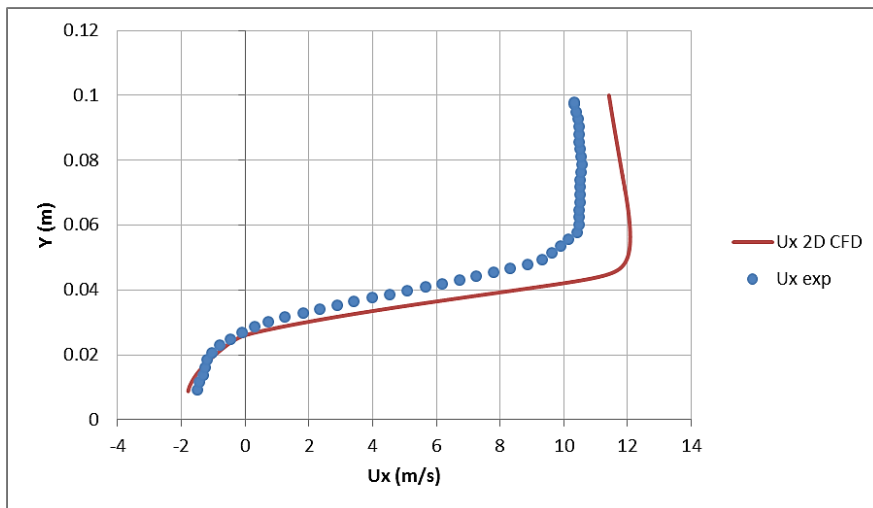
Σχήμα 3-24: Κατανομή k για το πλέγμα 1 (πάνω), πλέγμα 2 (μέση), πλέγμα 3(κάτω), με διαστατούς άξονες ($H=0.02$)



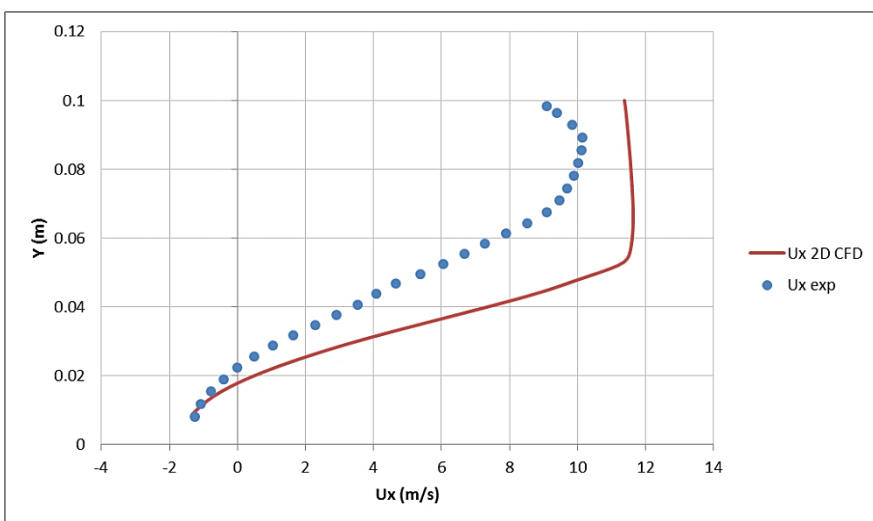
Σχήμα 3-25: Πειραματικά μετρημένη κατανομή k με αδιάστατους άξονες



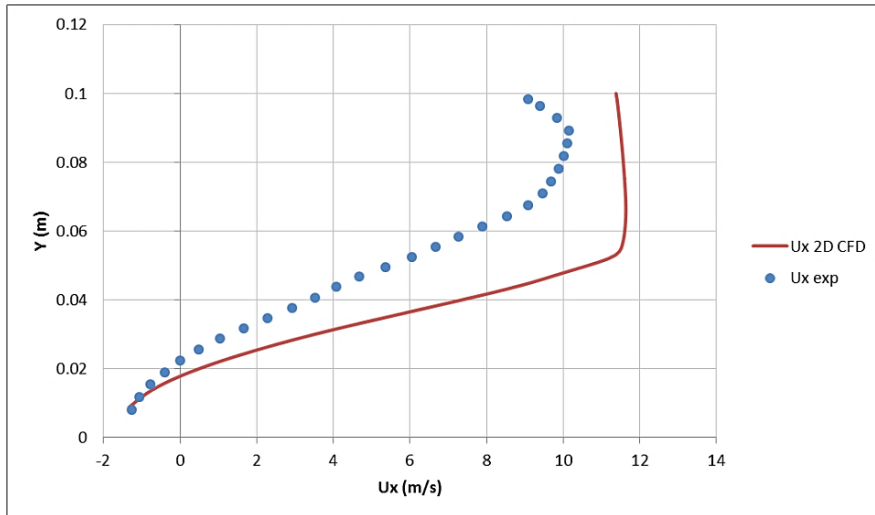
Σχήμα 3-26: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=0h$ για 3 πλέγματα



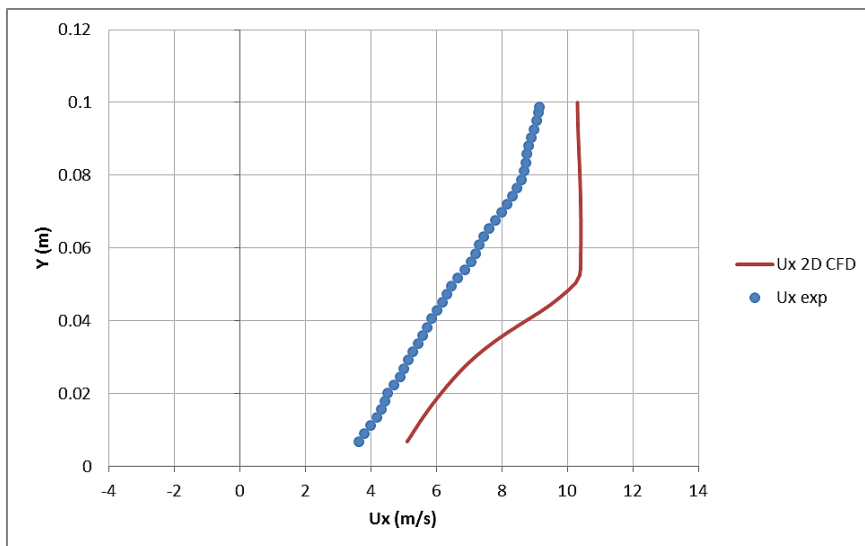
Σχήμα 3-27: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=3h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)



Σχήμα 3-28: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=5h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)

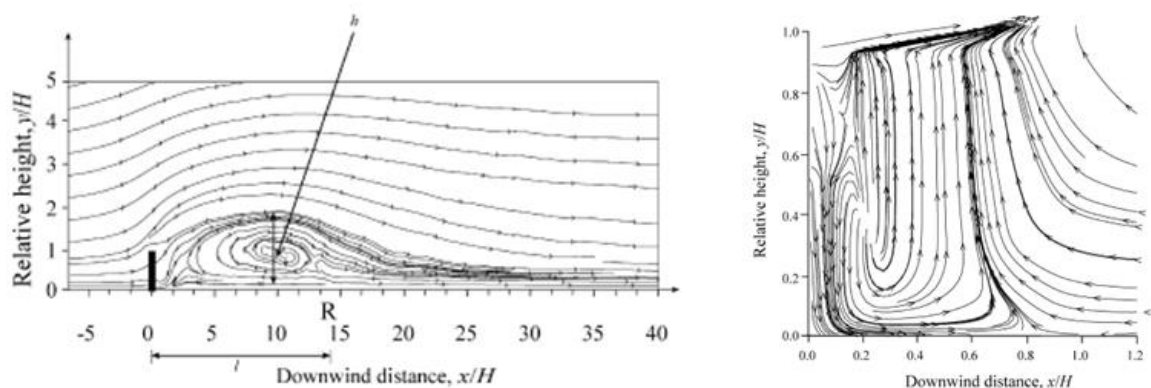


Σχήμα 3-29: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=10h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)

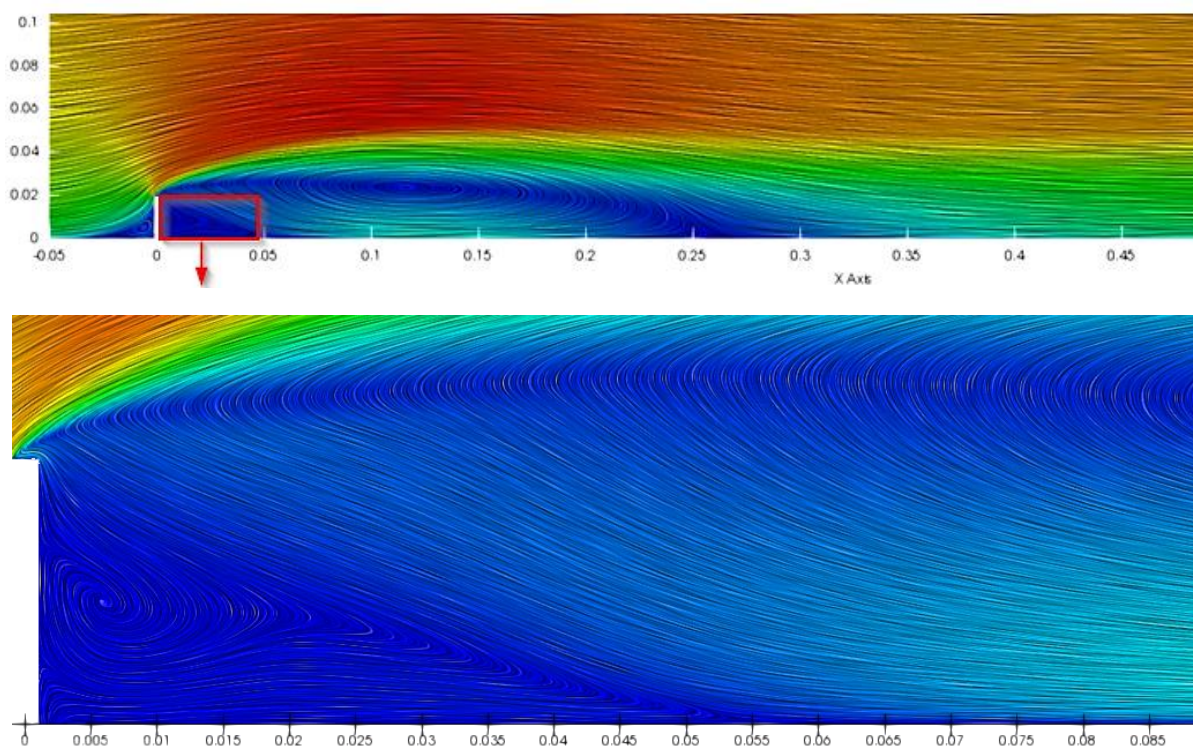


Σχήμα 3-30: Κατακόρυφη κατανομή U_x στην θέση $x=15h$, πειραματικά αποτελέσματα (μπλε) και υπολογιστικά (κόκκινο)

Επίσης συγκρίνοντας το ύψος και μήκος της ανακυκλοφορίας κατάντη του εμποδίου είναι εμφανές πως οι διαφορές ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και το υπολογιστικό μοντέλο είναι ικανοποιητικά μικρές (Πίνακας 3-3). Επίσης μια δεύτερη μικρότερη ανακυκλοφορία εμφανίζεται στην περίπτωση στερεού ή σχεδόν στερεού εμποδίου τόσο στα πειραματικά αποτελέσματα όσο και στο πεδίο ροής του υπολογιστικού μοντέλου (Σχήμα 3-31 και Σχήμα 3-32).



Σχήμα 3-31: Αριστερά: Ένα τυπικό μοτίβο γραμμών ροής ($\eta=0.1$ και $U=10\text{m/s}$). l μήκος ανακυκλοφορίας, h ύψος ανακυκλοφορίας και R το σημείο προσκόλλησης. Δεξιά: Μια δεύτερη, μικρή ανακυκλοφορία ακριβώς πίσω από το εμπόδιο αναπτύσσεται για στερεό εμπόδιο και $\eta=0.05$



Σχήμα 3-32: Line integral convolution (LIC) του πεδίου ταχύτητας για στερεό εμπόδιο μαζί με απόλυτες συντεταγμένες (πάνω), λεπτομέρεια της δεύτερης ανακυκλοφορίας κοντά στο στερεό όριο (κάτω)

	l/H	h/H	Ποσοστιαία διαφορά R	Ποσοστιαία διαφορά h
Πείραμα	13.5	1.75	3.8%	12.5%
Υπολογιστικό μοντέλο	13	2		

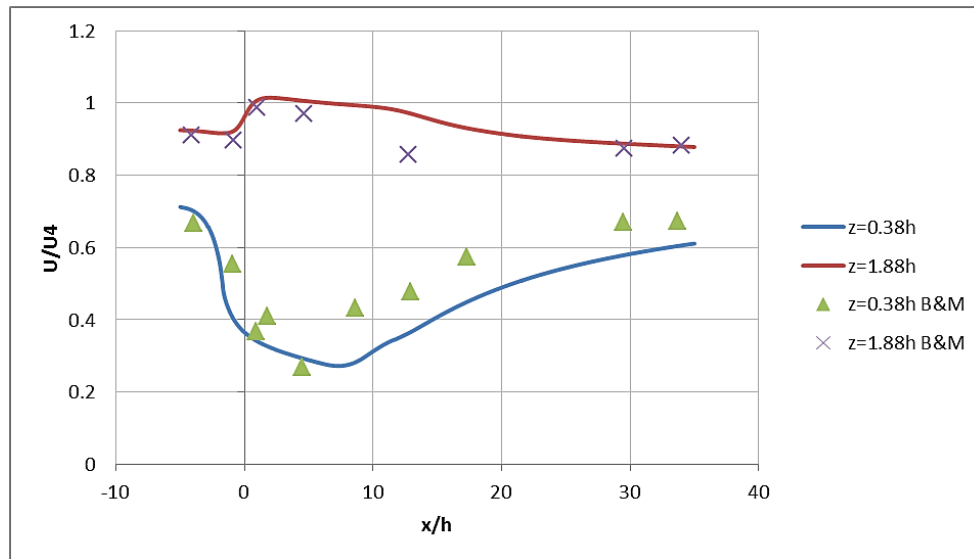
Πίνακας 3-3: Τιμές του αδιάστατου μήκους (l/H) και ύψους (h/H) ανακυκλοφορίας για το πείραμα και το υπολογιστικό μοντέλο

3.5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με το πείραμα των Bradley & Hulhearn

Για το υπολογισμό της πτώσης πίεσης στο πορώδες εμπόδιο χρησιμοποιείται η γνωστή σχέση:

$$\Delta p = \frac{1}{2} k_t \rho u^2, \text{ όπου } k_t \text{ είναι ο συντελεστής αντίστασης}$$

Για το πορώδες εμπόδιο του πειράματος των B&M ο συντελεστής αντίστασης είναι γνωστός $k_t = 4$ [10] [19].



Σχήμα 3-33: Οριζόντιο προφίλ αδιάστατης μέσης ταχύτητας (u/u_4) για $z/h=0.38$ και $z/h=1.88$ [10] [19]

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ικανοποιητικά κοντά στα πειραματικά για το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης. Για την περίπτωση $z/h=0.38$ (σε οριζόντιο επίπεδο στο 38% το ύψους του εμποδίου) εμφανίζεται η μεγαλύτερη σημειακή διαφορά κοντά στο 25% (Σχήμα 3-33).

4 Αποτελέσματα

4.1 Παραμετρική μελέτη για H, L και W

Σε πρώτη φάση οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι το ύψος (**H**) και το πλάτος (**W**) εμποδίου καθώς και η απόσταση εμποδίου κτηρίου (**L**), όλα αδιαστατοποιημένα με το ύψος του κτηρίου (Σχήμα 4-1). Η επίδραση αυτών των παραμέτρων στην ταχύτητα και τύρβη είναι εμφανής, με το μεγαλύτερο ύψος και πλάτος να προσφέρει στις περισσότερες περιπτώσεις μεγαλύτερη προστασία. Ο συντελεστής αντίστασης επιλέχθηκε $k_\tau = 10$ ώστε να αντιπροσωπεύει εμπόδιο πορώδους $\varphi = 0.3$ [10], το οποίο σύμφωνα με πολλές πηγές προσφέρει την μεγαλύτερη προστασία [10] [4] [20].



Σχήμα 4-1: Αριστερά: διαστάσεις L, H σε πλάγια όψη εμποδίου και κτηρίου . Δεξιά: διαστάσεις L, W σε κάτωψη εμποδίου και κτηρίου

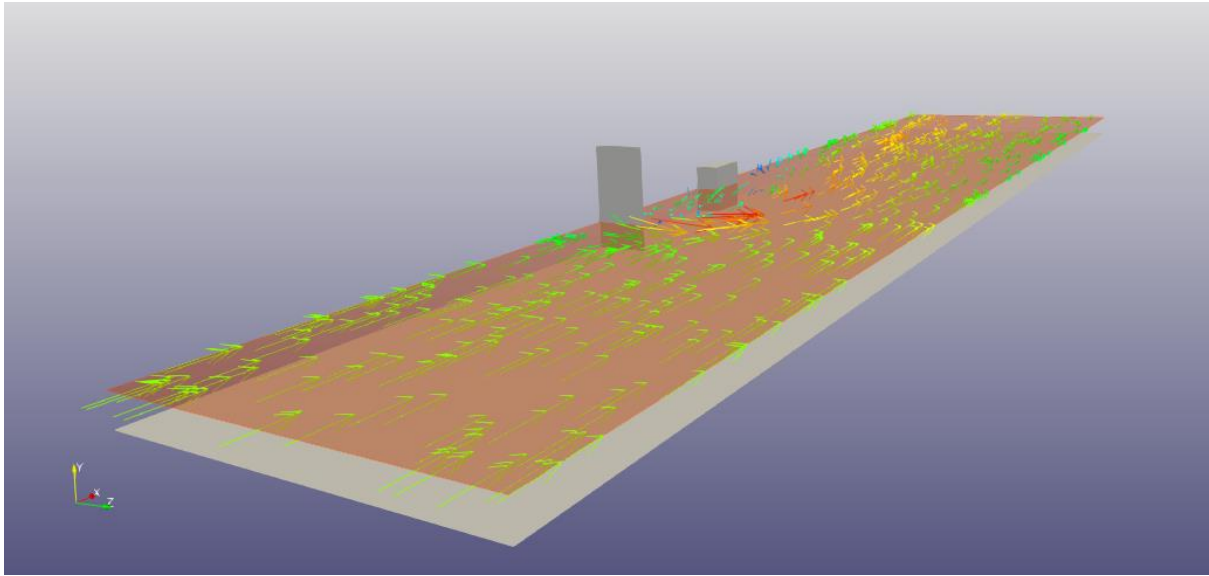
Για την αξιολόγηση κάθε επιλογής χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο η τιμή της ενεργούς ταχύτητας. Το μέγεθος αυτό, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2.1, συνδυάζει το μέσο πεδίο ταχύτητας και το πεδίο διαταραχής. Για παρούσα μελέτη ο συντελεστής βαρύτητας επιλέχθηκε $\kappa = 1.7$. Άρα προκύπτει:

$$V_e = \bar{V} \cdot (1 + 1.7 \cdot \frac{v'_{rms}}{\bar{V}}) \quad 4-1$$

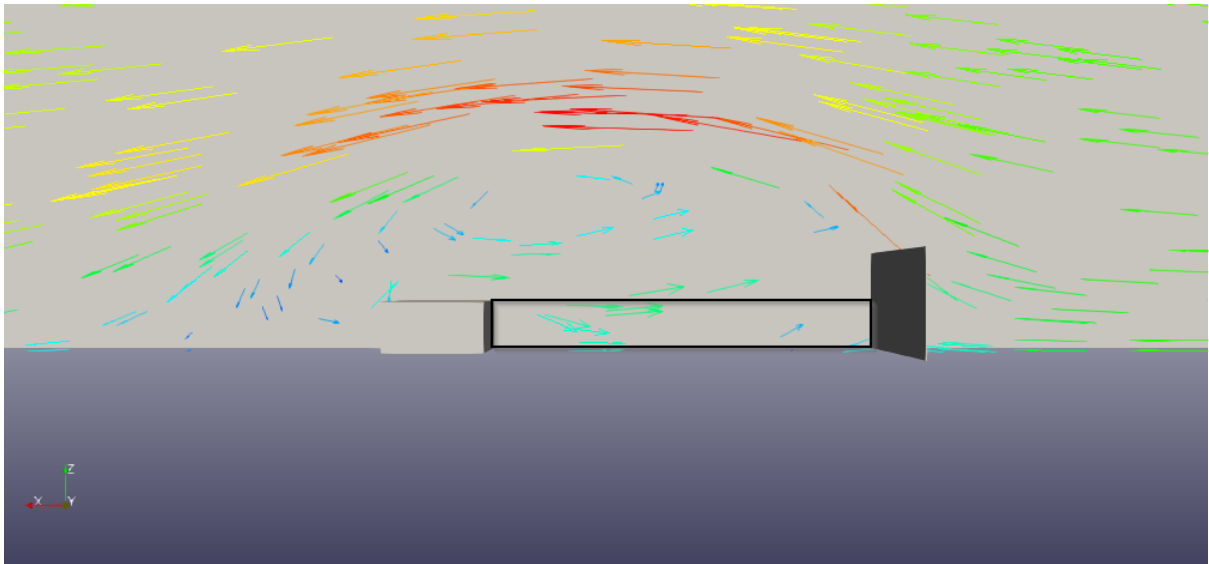
Αν θεωρηθεί πως η ταχύτητα ακολουθεί κανονική κατανομή όπου \bar{V} είναι η μέση τιμή (μ) και η τυρβώδης διαταραχή v'_{rms} είναι η τυπική απόκλιση (σ), τότε για τυχαία τιμή της ταχύτητα υπάρχει 90% πιθανότητα να ισχύει $\mu - 1.7\sigma < v_i < \mu + 1.7\sigma$. Επειδή οι περιπτώσεις με $\mu - 1.7\sigma < v_i$ δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον, το ποσοστό αυξάνεται σε 95%. Έτσι επιλέγοντας την τιμή $\kappa = 1.7$, το κριτήριο περιλαμβάνει το 95% των πιθανών τιμών της V .

4.1.1 Τομή στο επίπεδο Y=1.5m

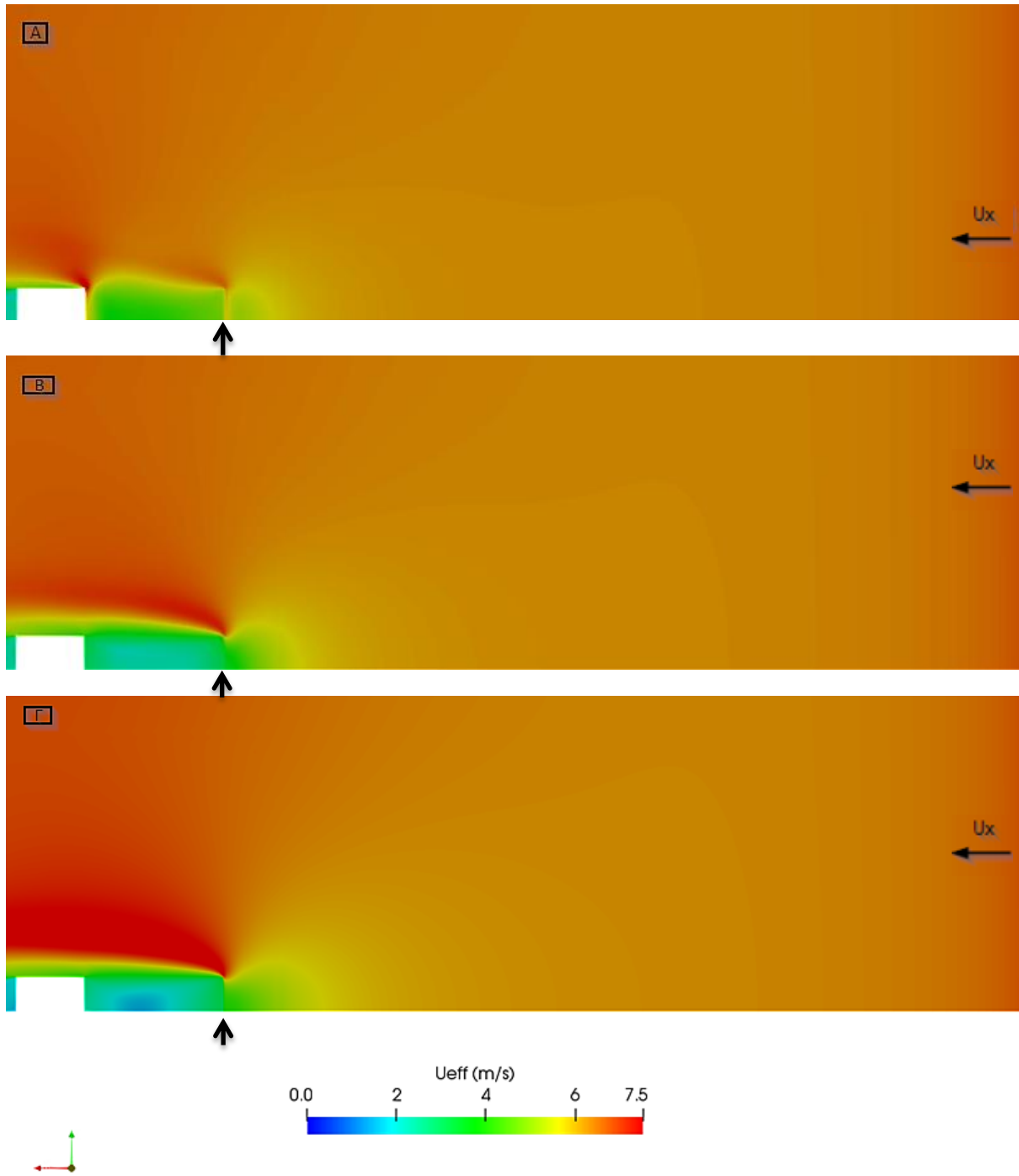
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται σε ύψος 1.5m από το έδαφος, ένα ύψος που αντιστοιχεί στο σώμα των περισσότερων ανθρώπων (Σχήμα 4-2). Σαν περιοχή ενδιαφέροντος ορίζεται η περιοχή ανάμεσα στο εμπόδιο και το κτήριο στο επίπεδο Y=1.5m (Σχήμα 4-3). Παρουσιάζονται τόσο το πεδίο ενεργούς ταχύτητας (U_{eff}) στο επίπεδο Y=1.5m όσο και γραφήματα μέσης και μέγιστης τιμής U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει **H**, **W** και **L**. Μια τιμή της $U_{eff} < 3 \text{ m/s}$ θεωρείται ικανοποιητικά μικρή (Σχήμα 2-1)



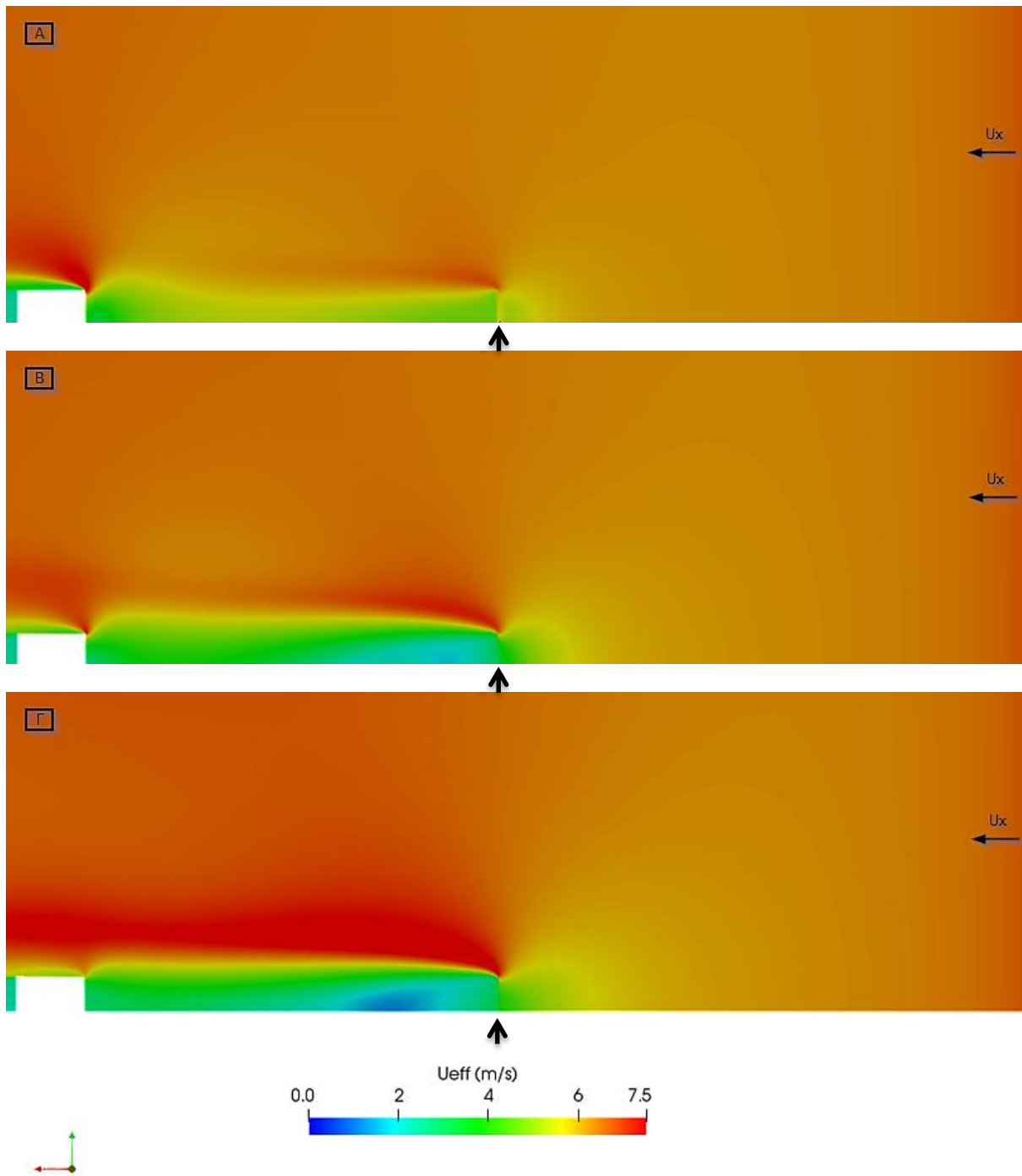
Σχήμα 4-2: Επίπεδο $Y=1.5m$ (κόκκινο) μαζί με τα διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο αυτό



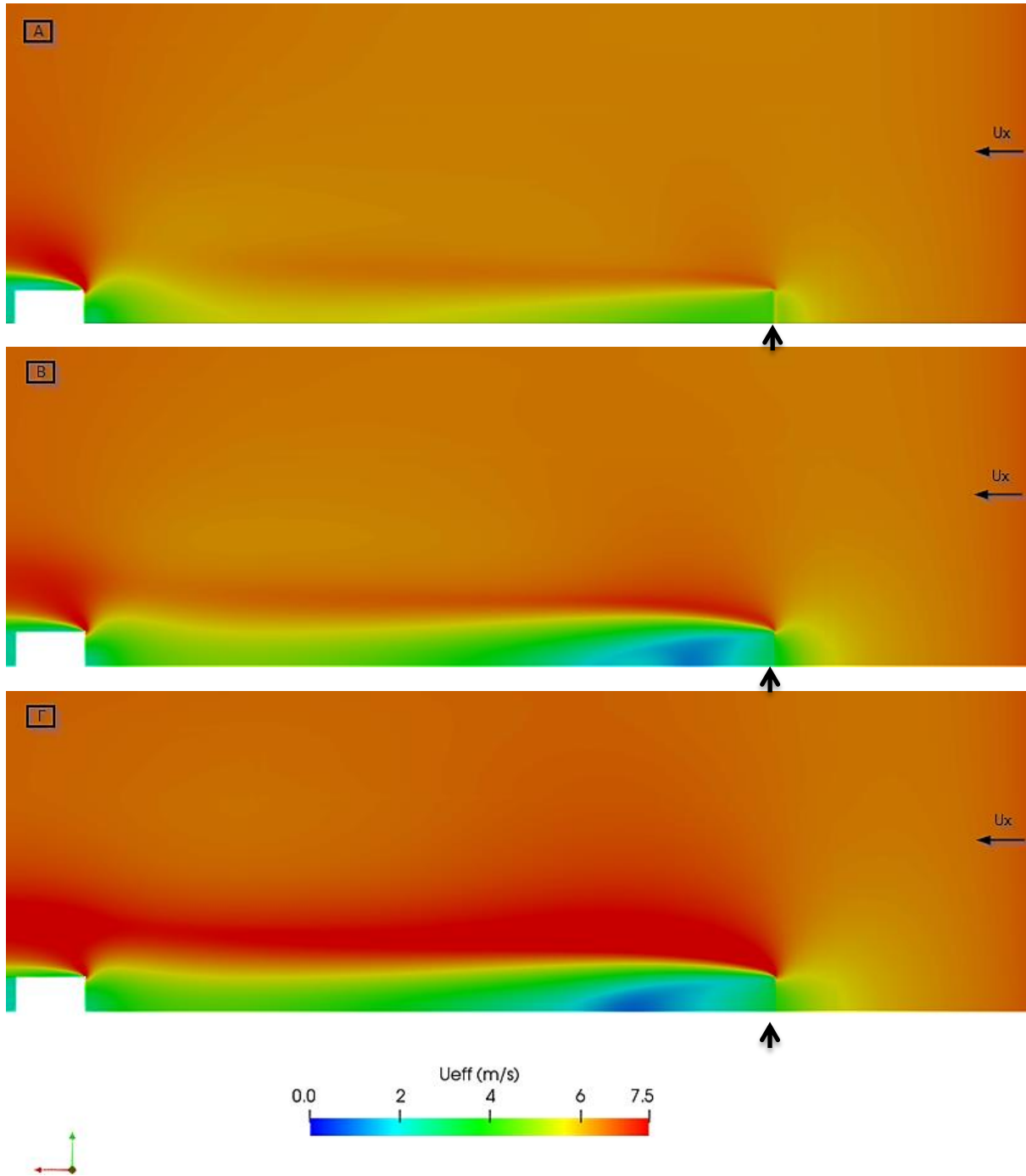
Σχήμα 4-3: Περιοχή ενδιαφέροντος (μαύρη διαγράμμιση) και διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $Y=1.5m$



Σχήμα 4-4: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=2h$ και $W=1h$ με A: $H=0.5h$, B: $H=1h$ και Γ: $H=2h$

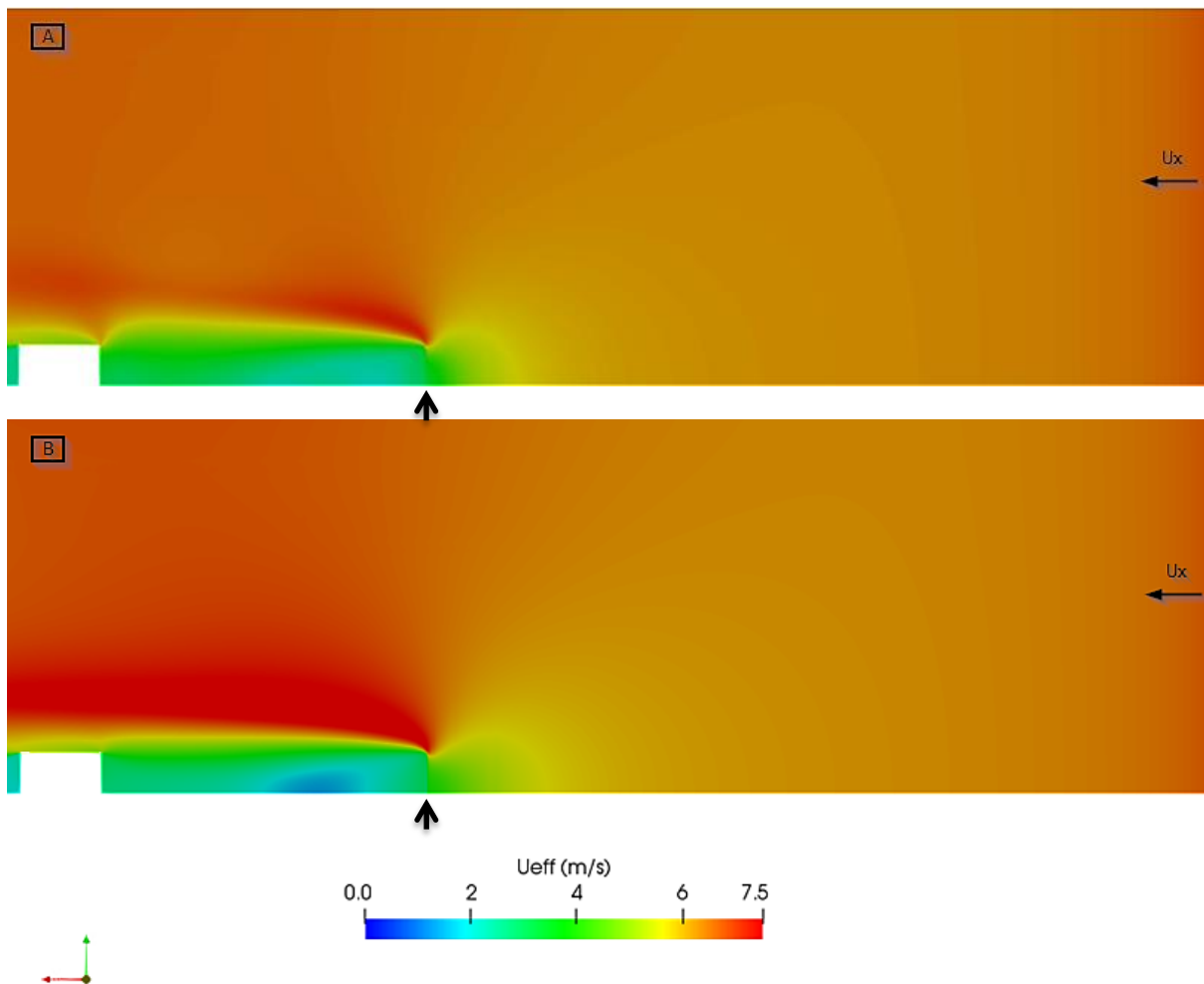


Σχήμα 4-5: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=0.5h$, B: $H=1h$ και Γ: $H=2h$



Σχήμα 4-6: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=10h$ και $W=1h$ με Α: $H=0.5h$, Β: $H=1h$ και Γ: $H=2h$

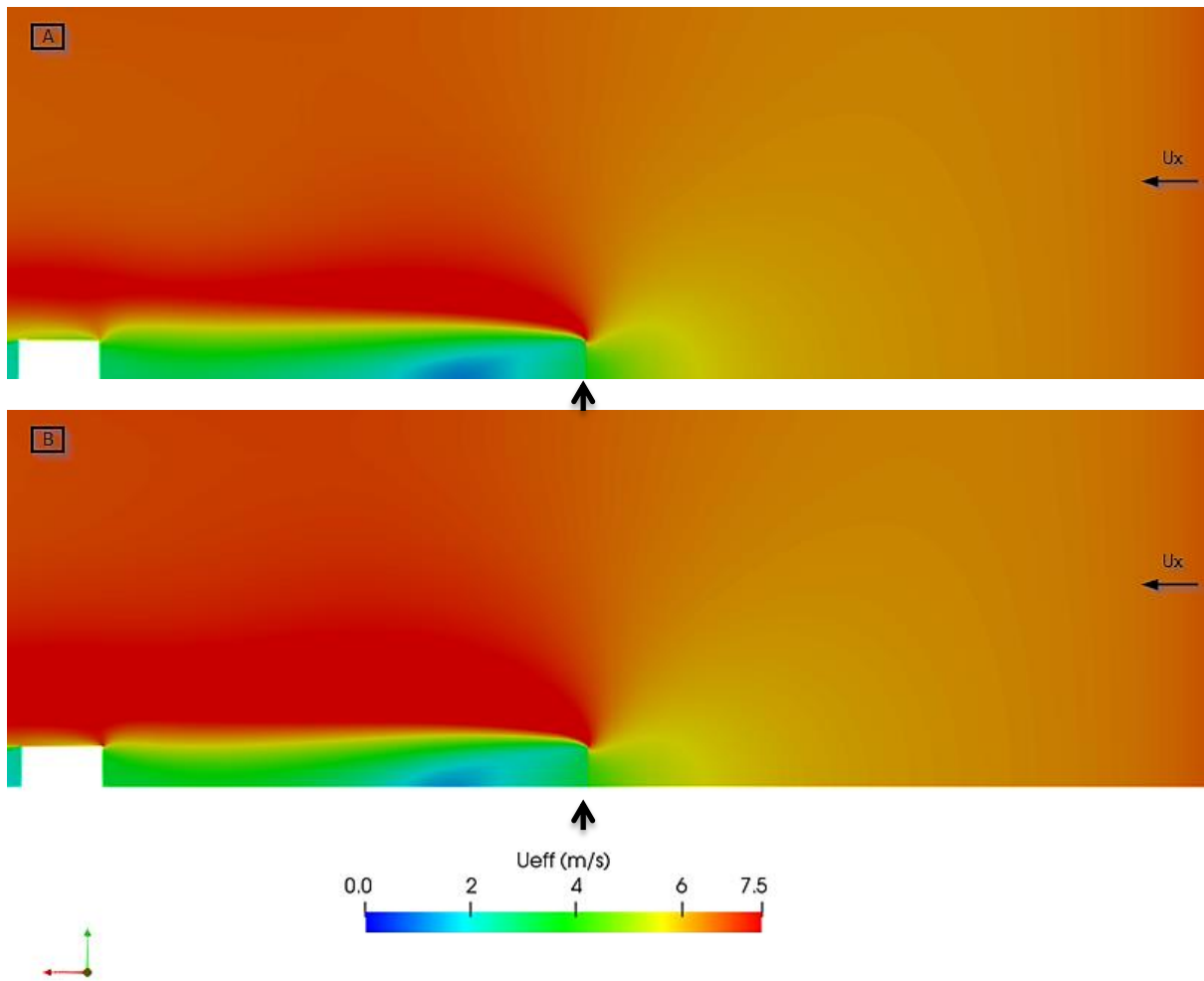
Είναι εμφανές πως για $H = 0.5h$ η τιμές της U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι για $H \geq 1h$ (Σχήμα 4-4, Σχήμα 4-5 και Σχήμα 4-6). Για αυτό και περαιτέρω προσομοιώσεις, όπως για $L = 4H$, έγιναν μόνο για τις τιμές $H \geq 1h$ (Σχήμα 4-7). Επίσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για $H = 1h$ και $H = 2h$, είναι εμφανές πως για κάθε τιμή του L η προστασία που προσφέρει το εμπόδιο με $H = 2h$ είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 4-5 και Σχήμα 4-6).



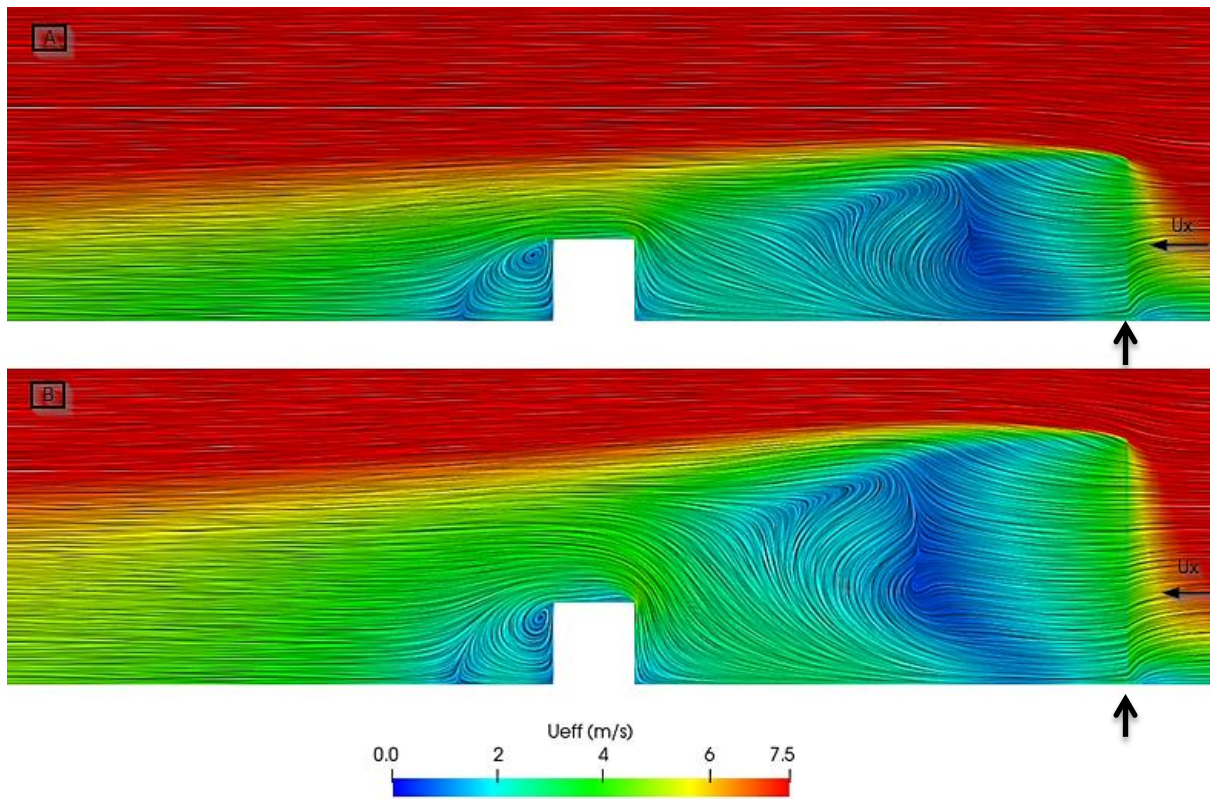
Σχήμα 4-7: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=4h$ και $W=1h$ με A: $H=1h$ και B: $H=2h$

Αυτό όμως δεν ισχύει για $H = 3h$, καθώς οι τιμές της U_{eff} δεν διαφέρουν ουσιαστικά (Σχήμα 4-8). Αναλύοντας τα αποτελέσματα και μέσω τομής στο επίπεδο $Z = 0m$ (Σχήμα 4-9) είναι εμφανές ότι το εμπόδιο με $H = 3h$ προσφέρει περισσότερη προστασία σε ένα μεγαλύτερο ύψος που δεν έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού το πρόβλημα αφορά κυρίως την άνεση για ανθρώπους. Η επίδραση του κτηρίου στο πεδίο ροής πίσω από το εμπόδιο είναι πιθανώς ο λόγος που η τιμή $H = 3h$ δεν επιφέρει κάποια επιπλέον βελτίωση του πεδίου ροής. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4-10 φαίνεται η αύξηση πίεσης μπροστά από το κτήριο η οποία εκτρέπει και τον αέρα προς τα πάνω. Με την παρουσία ενός πολύ ψηλού εμποδίου η πτώση πίεσης που προκαλεί επεκτείνεται σε ύψος και έτσι δημιουργείται μια πιο έντονη κατακόρυφη διαφορά πίεσης μπροστά από το κτήριο, η οποία οδηγεί σε επιτάχυνση της ροής.

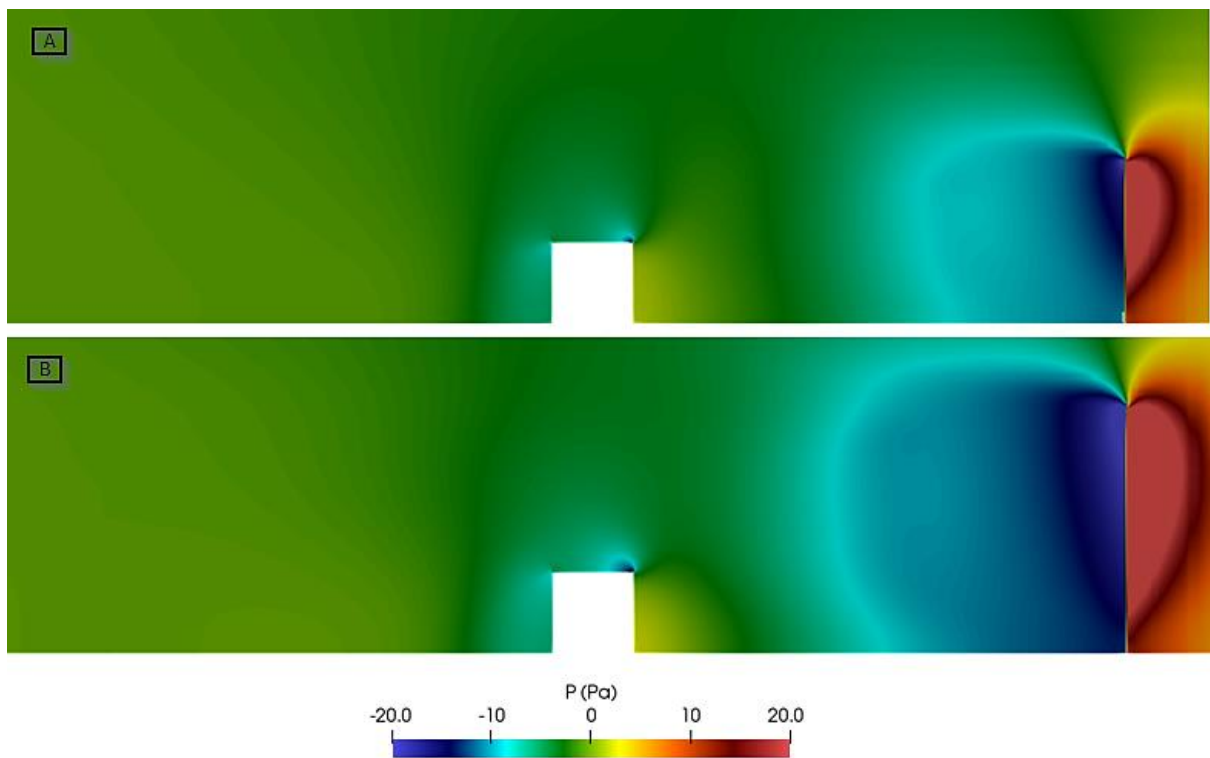
Το εξεταζόμενο ύψος είναι $y = 1.5 m$, ενώ για το ύψος εμποδίου ισχύει $1.5 m < H < 9 m$. Εξετάζοντας τον λόγο του ύψους που εξετάζεται προς ύψος εμποδίου ($\frac{y}{H}$), προκύπτει ένα εύρος τιμών 1 έως 0.167 για τις διάφορες τιμές της παραμέτρου H . Βάση των αποτελεσμάτων αρκετών βιβλιογραφικών αναφορών [5] [10] η επιπλέον προστασία μειώνεται πλησιάζοντας την τιμή $\frac{y}{H} = 0.25$. Έτσι είναι αναμενόμενο μια αύξηση πέρα της τιμής $H = 2h$ (αντιστοιχεί σε $\frac{y}{H} = 0.25$) να μην επιφέρει κάποια σημαντική βελτίωση.



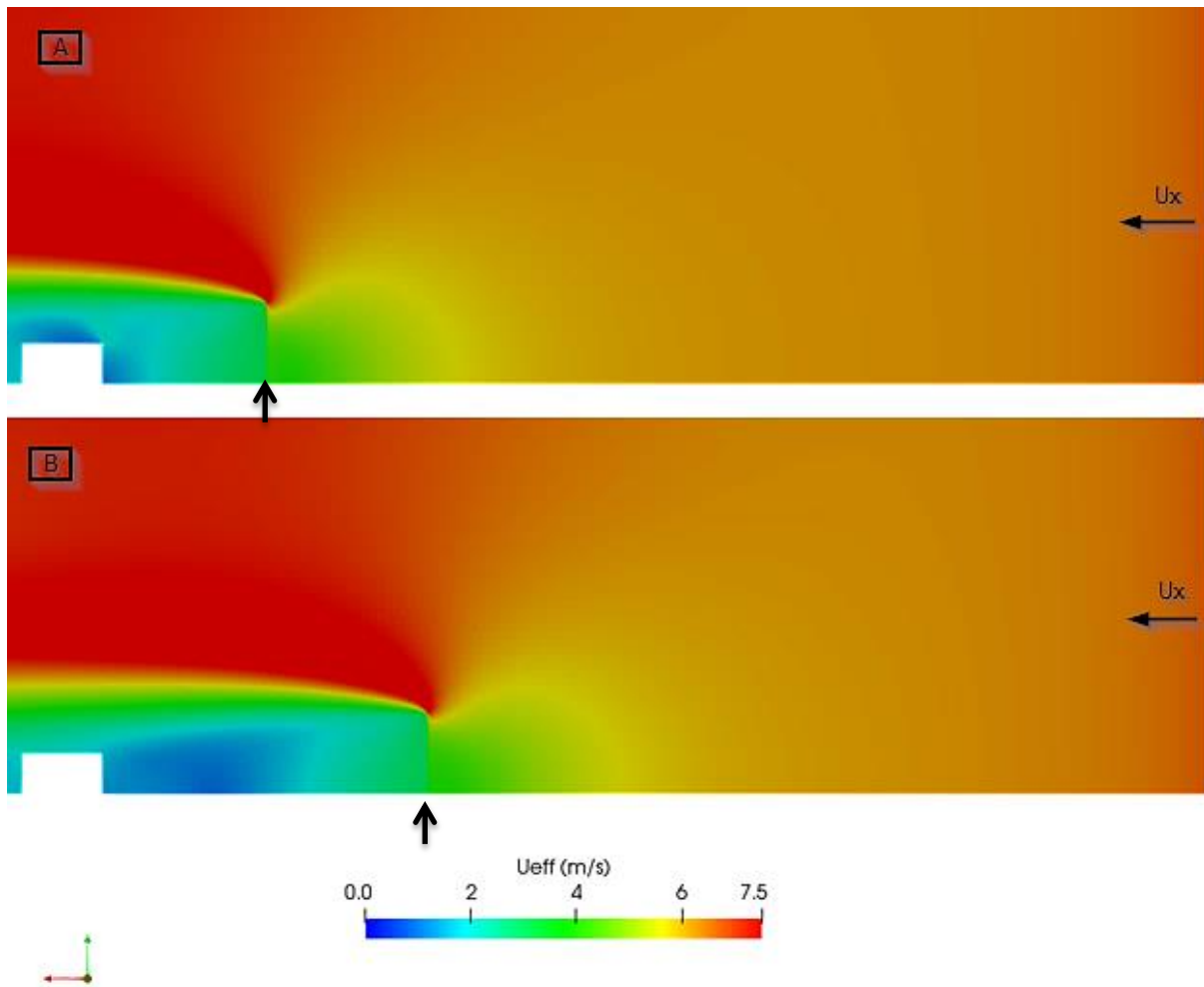
Σχήμα 4-8: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$



Σχήμα 4-9: U_{eff} και LIC στο επίπεδο $Z=0m$ (επίπεδο XY) για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$

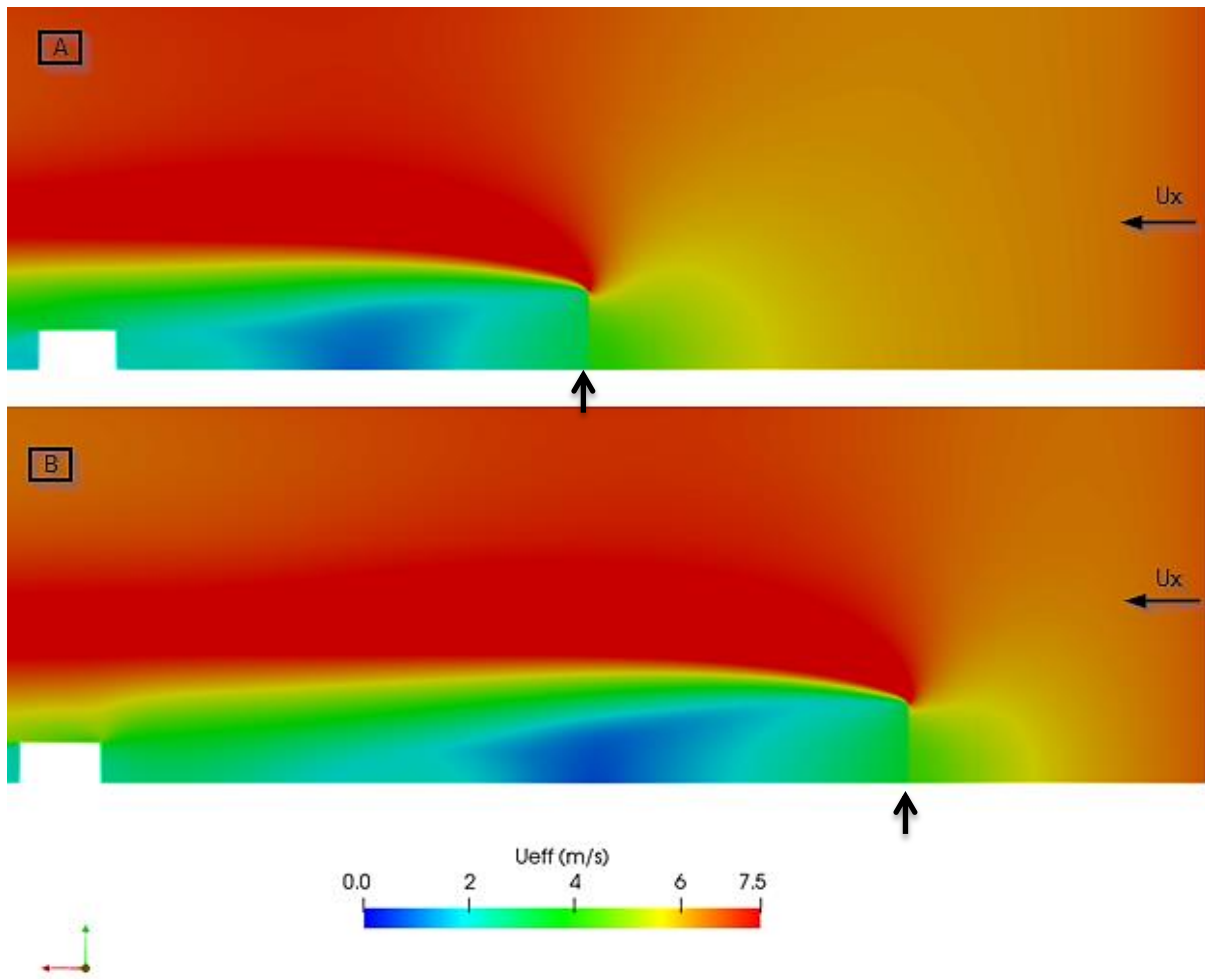


Σχήμα 4-10: Πεδίο πίεσης στο επίπεδο $Z=0m$ (επίπεδο XY) για $L=6h$ και $W=1h$ με A: $H=2h$ και B: $H=3h$

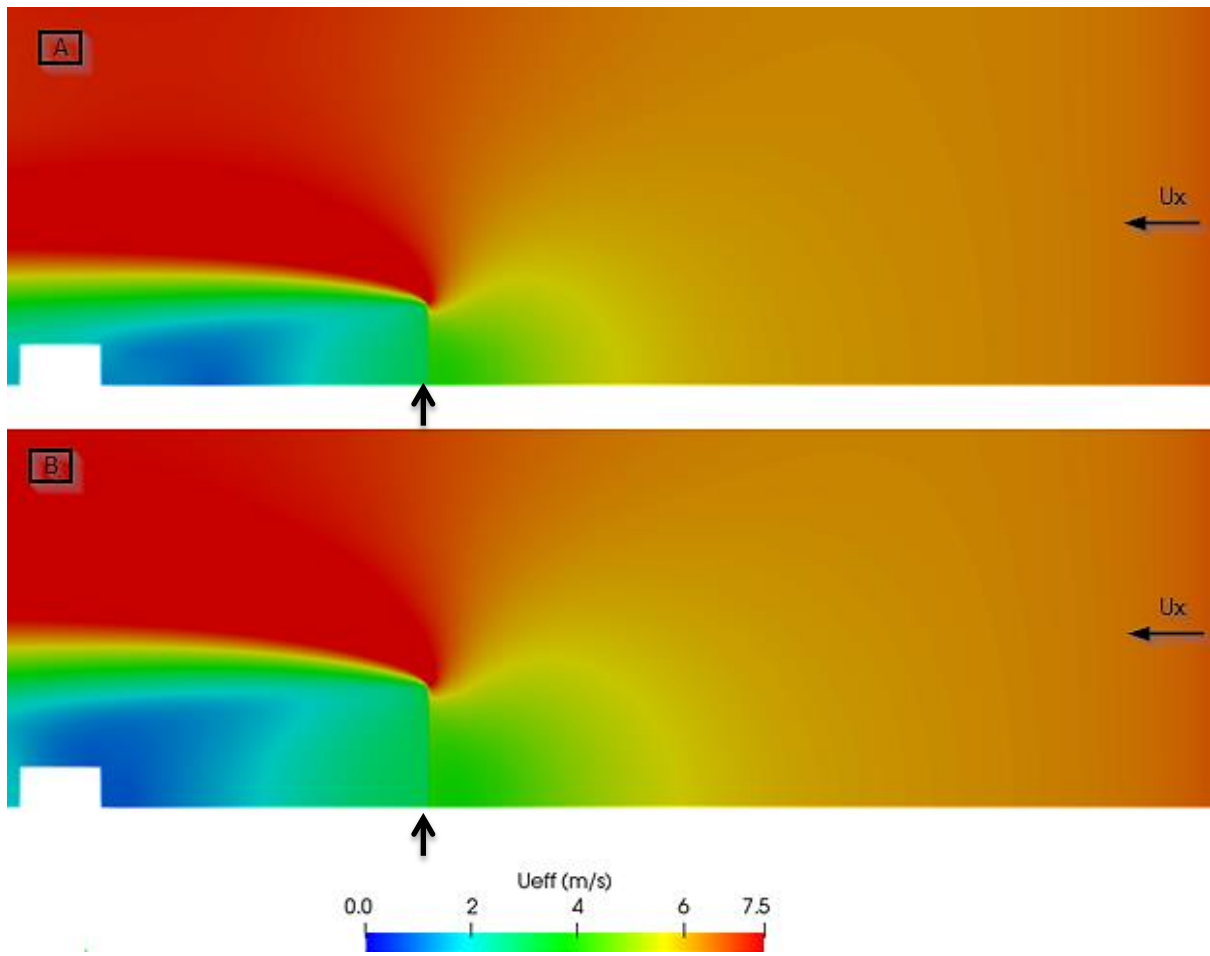


Σχήμα 4-11: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5h$ με $W=2h$ και $H=2h$ για A: $L=2h$ και B: $L=4h$

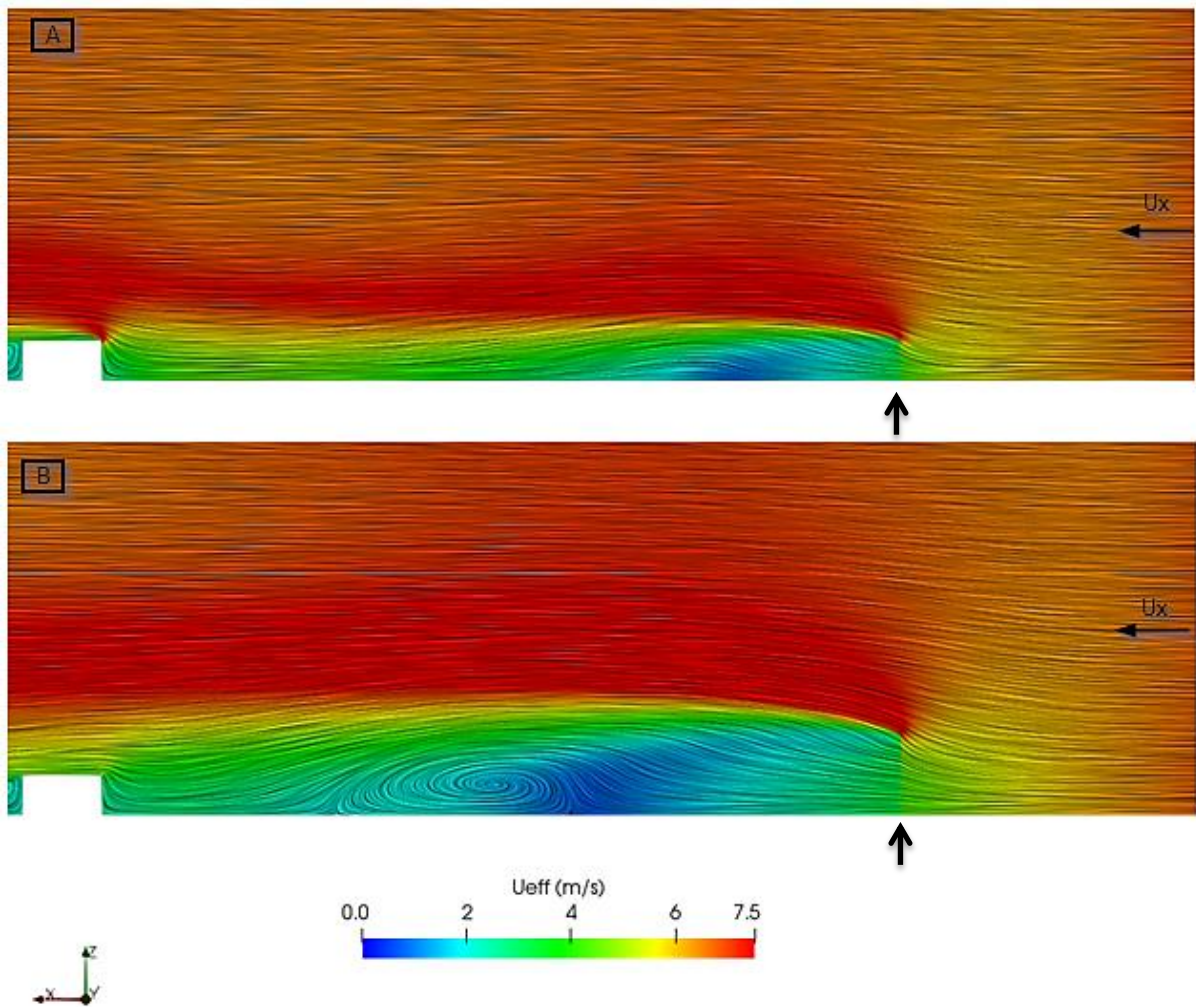
Επιπλέον, εφαρμόζοντας ένα πλάτος $W = 2h$ παρατηρείται και πάλι μια εμφανής βελτίωση του πεδίου ροής στην περιοχή ενδιαφέροντος για όλες τις τιμές του L (Σχήμα 4-11 και Σχήμα 4-12). Η διαφορά είναι ιδιαίτερα αισθητή για τις τιμές $L = 6h$ και $L = 10h$, αφού σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν εμφανής η πλαϊνή εισχώρηση αέρα υψηλής ταχύτητας (Σχήμα 4-12), ένα φαινόμενο που περιορίζεται δραματικά με την χρήση ενός εμποδίου με $W = 2h$ (Σχήμα 4-15). Όμως, όπως και στην περίπτωση του ύψους έτσι και για το πλάτος η χρήση $W = 3h$ δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο όφελος αφού δεν υπάρχει βελτίωση του πεδίου ροής (Σχήμα 4-13). Για όλες τις προσομοιώσεις με $W = 2h$ χρησιμοποιήθηκε και $H = 2h$ αφού αυτή η τιμή της παραμέτρου είχε τα καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4-12: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ με $W=2h$ και $H=2h$ για $L=6h$ και $L=10h$



Σχήμα 4-13: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5$ m για $H=2h$ και $L=4h$ με A: $W=2h$, B: $W=3h$

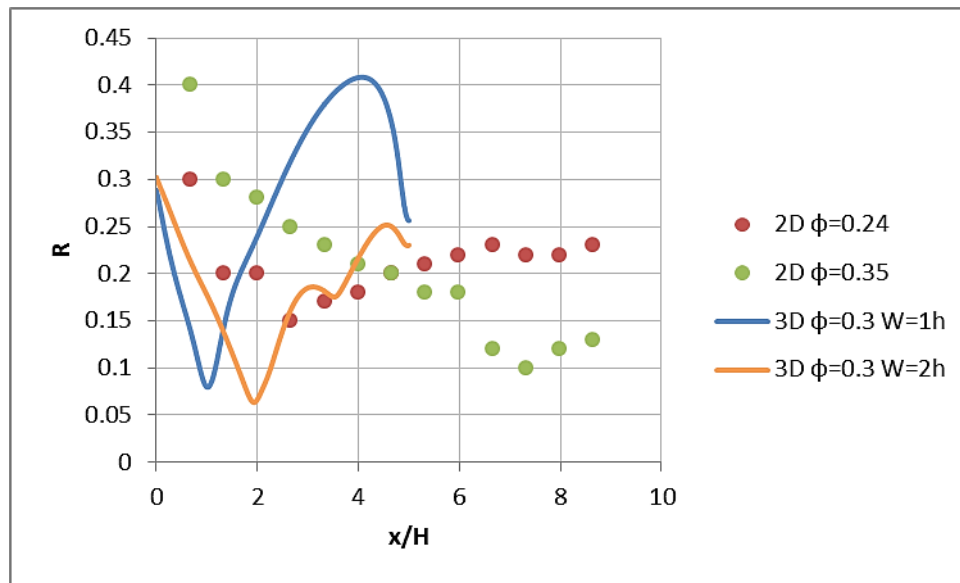


Σχήμα 4-14: U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5m$ με $W=1h$, $W=2h$ και $H=2h$ για $L=10h$

Στο Σχήμα 4-14 είναι εμφανές πως με $W = 2h$ η έκταση της προστατευμένης ζώνης αυξάνει σημαντικά αφού η πλάγια εισροή αέρα μεγάλης ταχύτητας καθυστερεί, λόγω της πολύ μεγαλύτερης αρχικής εκτροπής του αέρα. Αυτή η διερεύνηση για το πλάτος του εμποδίου αναδεικνύει την σημασία της τρισδιάστατης ανάλυσης και μελέτης του πεδίου ροής κατά την έννοια του πλάτους, αφού η κίνηση του αέρα στο επίπεδο XZ φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την παρεχόμενη προστασία σε μεγάλες αποστάσεις από το εμπόδιο ($L \geq 6h$). Επίσης σε πολλές πρακτικές εφαρμογές το πλάτος ενός προστατευτικού εμποδίου ενδεχομένως να είναι περιορισμένο οπότε η επιλογή W/h να παίζει σημαντικό ρόλο. Αν εξεταστεί η κατανομή κατά την έννοια του μήκους του συντελεστή αδιάστατης ενεργής ταχύτητας $R = \frac{U_{eff}}{(U_{eff})_{ref}}$, όπου το μέγεθος $(U_{eff})_{ref}$ υπολογίζεται σε ύψος $\frac{z}{H} = 6.67$ ανάντη του εμποδίου και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα 2D μελέτης από την βιβλιογραφία [10] είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στις 2 προσεγγίσεις. Σύμφωνα με την 2D προσομοίωση αλλά και πείραμα ο συντελεστής αδιάστατης ενεργής ταχύτητας κυμαίνεται στο εύρος $0.15 \leq R \leq 0.3$ για διάφορες αποστάσεις από το εμπόδιο ($\varphi = 0.24$). Βάση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης για $W = 1h$ ισχύει $0.07 \leq R \leq 0.4$ και για $W = 2h$ $0.07 \leq R \leq 0.3$. Είναι εμφανές πως για $W = 1h$ ελάχιστη τιμή του συντελεστή R εμφανίζεται πολύ νωρίτερα ($L = 1h$) από ότι στα αποτελέσματα τις 2D ανάλυσης, έπειτα ακολουθεί μια μεγάλη αύξηση στην τιμή του R ($1h < L < 4h$) η οποία δεν συμβαδίζει με την 2D ανάλυση και τέλος

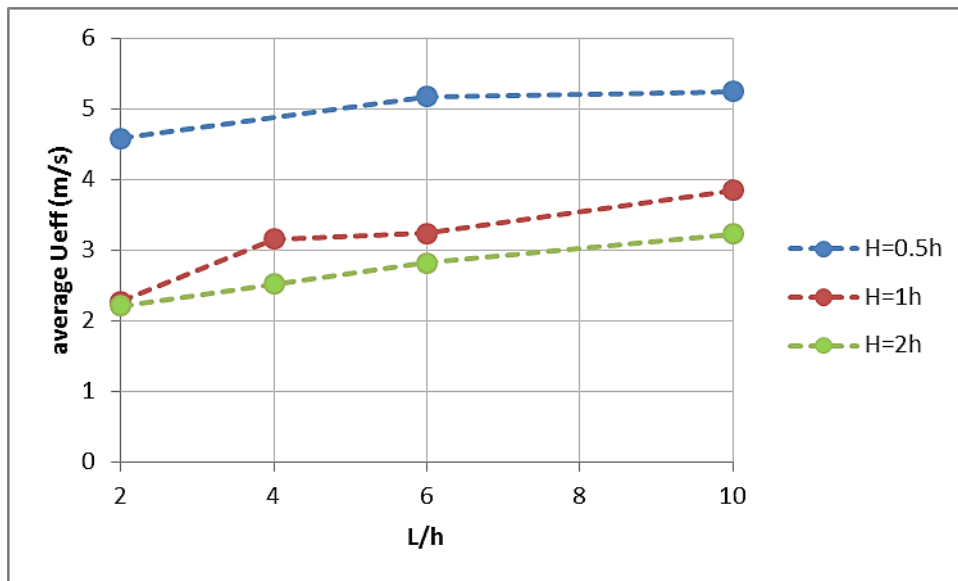
εμφανίζεται μια απότομη πτώση καθώς πλησιάζει το σημείο ανακοπής του κτηρίου ($4h < L < 5h$) (Σχήμα 4-15). Αντίθετα για $W = 2h$ η κατανομή φαίνεται να πλησιάζει την 2D ανάλυση, η θέση του ελάχιστου R είναι πλέον $L = 2h$ και η μεγάλη αύξηση του συντελεστή στην περιοχή $1h < L < 4h$ έχει περιοριστεί. Τέλος η παρουσία του κτηρίου δεν είναι πλέον τόσο αισθητή αφού ο συντελεστής R διατηρείται χαμηλός σε όλο το μήκος, οπότε δεν εμφανίζεται μια τόσο απότομη πτώση όπως για $W = 1h$ (Σχήμα 4-15).

Αυτές οι διαφορές βέβαια μπορεί να οφείλονται σε μια διαφορά του συντελεστή αντίστασης, όμως εξετάζοντας τα αποτελέσματα και για $\varphi = 0.35$ προκύπτει ένα παρόμοιο εύρος για τον συντελεστή $0.1 \leq R \leq 0.4$. Βέβαια η μορφή της κατανομής R ταιριάζει περισσότερο με την περίπτωση $\varphi = 0.24$ (Σχήμα 4-15).

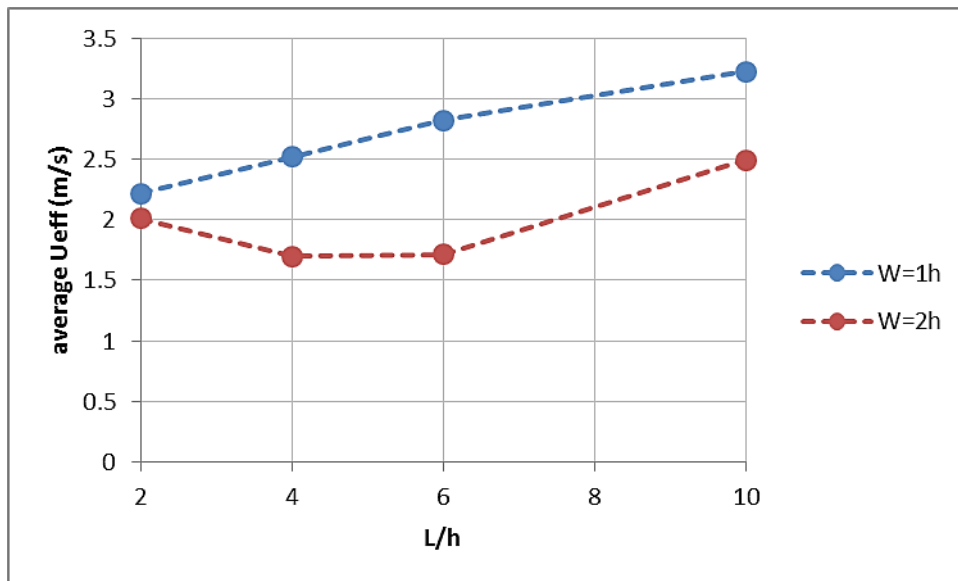


Σχήμα 4-15: Κατανομή αδιάστατου συντελεστή ενεργής ταχύτητας R για 3D μοντέλο με $W=1h$ (μπλε), $W=2h$ (πορτοκαλί), $H=2H$ και $L=10h$ και 2D πειραματικά αποτελέσματα [10]

4.1.2 Καμπύλες μέσης και μέγιστης τιμής U_{eff}

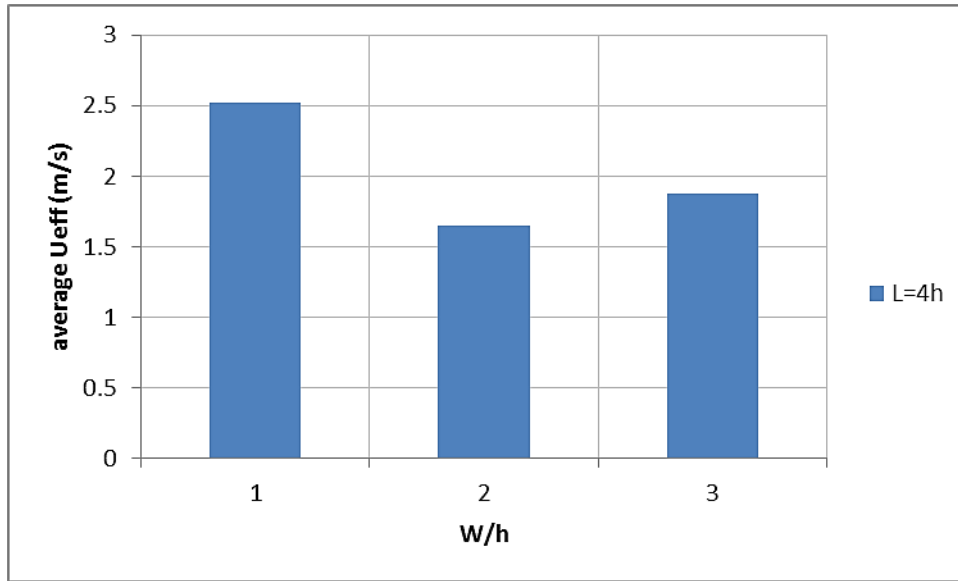


Σχήμα 4-16: Μέση U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και H/h για $W/h=1$

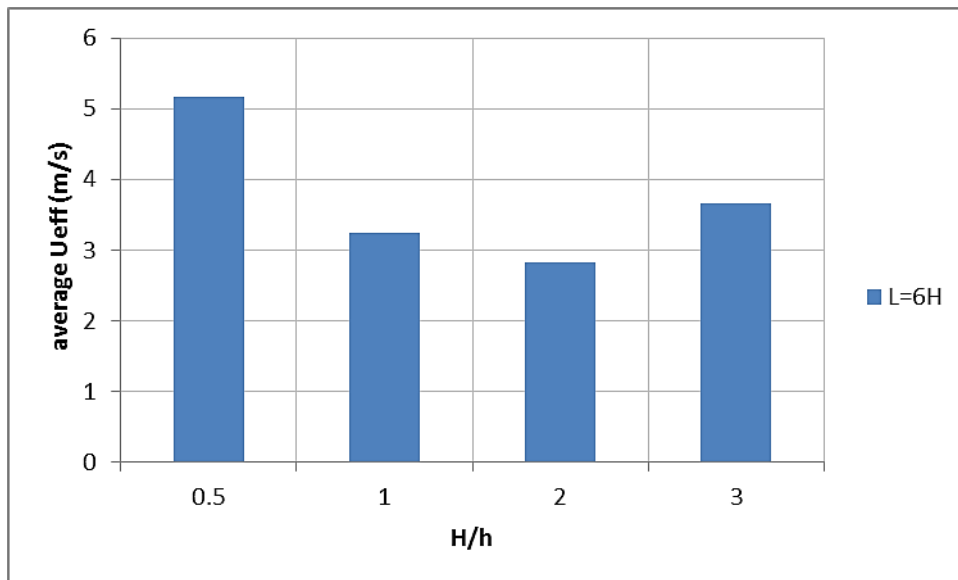


Σχήμα 4-17: Μέση U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και W/h για $H/h=1$

Παρατηρώντας το Σχήμα 4-16 και Σχήμα 4-17 είναι και πάλι εμφανής η αύξηση της προστασίας καθώς ο λόγος H/h και W/h αυξάνει. Επίσης είναι εμφανές πως η διαφορές στα αποτελέσματα μικραίνουν πλησιάζοντας στην τιμή $\frac{H}{h} = 2 \rightarrow \frac{z}{H} = 0.25$, μια συμπεριφορά που συμφωνεί με άλλες πηγές [10]. Επίσης, σύμφωνα με την ίδια πηγή [10], όταν $\varphi \cong 0.3$ και για τιμές $\frac{z}{H} = 0.25$ και $\frac{z}{H} = 0.5$ οι διαφορές στην μείωση της U_{eff} εμφανίζονται σε απόσταση $L > 4h$ οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η χρήση $\frac{z}{H} = 0.5$ επαρκεί για την προστασία σε κοντινές αποστάσεις. Σύμφωνα όμως με τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αυτό ισχύει μόνο για την περίπτωση $L = 2h$. Αυτή η διαφορά οφείλεται πιθανώς στο γεγονός πως στην παρούσα μελέτη γίνεται αξιολόγηση του πεδίου ροής σε μια επιφάνεια, η οποία επηρεάζεται σημαντικά από την τρισδιάστατη κίνηση του αέρα (πάνω και γύρω από το εμπόδιο).

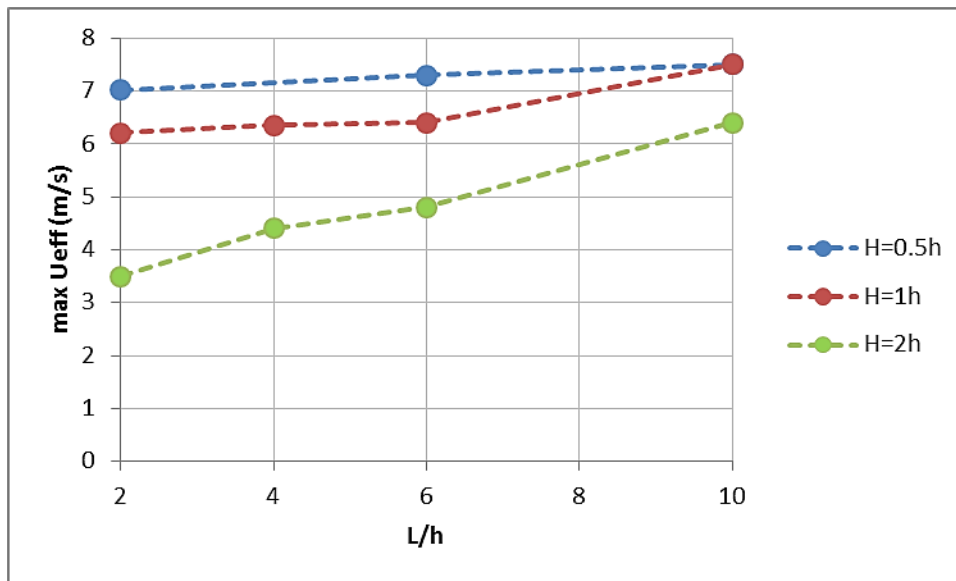


Σχήμα 4-18: Μέση τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει W/h για $L=4h$ και $H=2h$

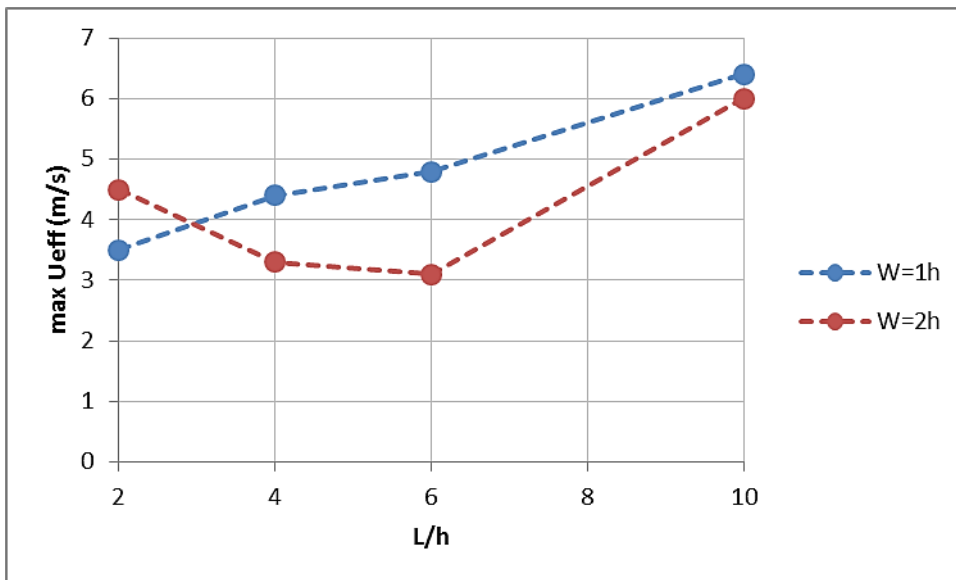


Σχήμα 4-19: Μέση τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει H/h για $L=4h$ και $W=1h$

Στο Σχήμα 4-18 και Σχήμα 4-19 είναι εμφανής η σταδιακή μείωση της μέσης U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς αυξάνει ο λόγος H/h και W/h . Για $\frac{H}{h} = 3$ και $\frac{W}{h} = 3$ δεν επέρχεται κάποια περεταίρω μείωση, όπως έχει διαπιστωθεί και από το Κεφάλαιο 4.1.1. Οι μέγιστες τιμές της U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος φαίνονται στο Σχήμα 4-20 και Σχήμα 4-21.



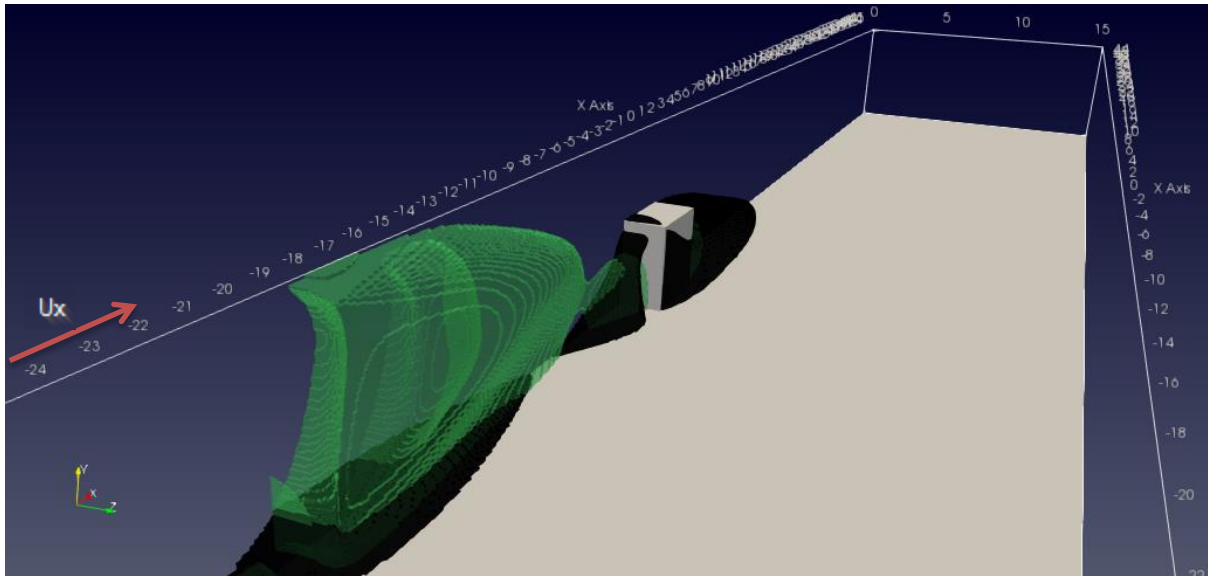
Σχήμα 4-20: Μέγιστη τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και H/h για $W/h=1$



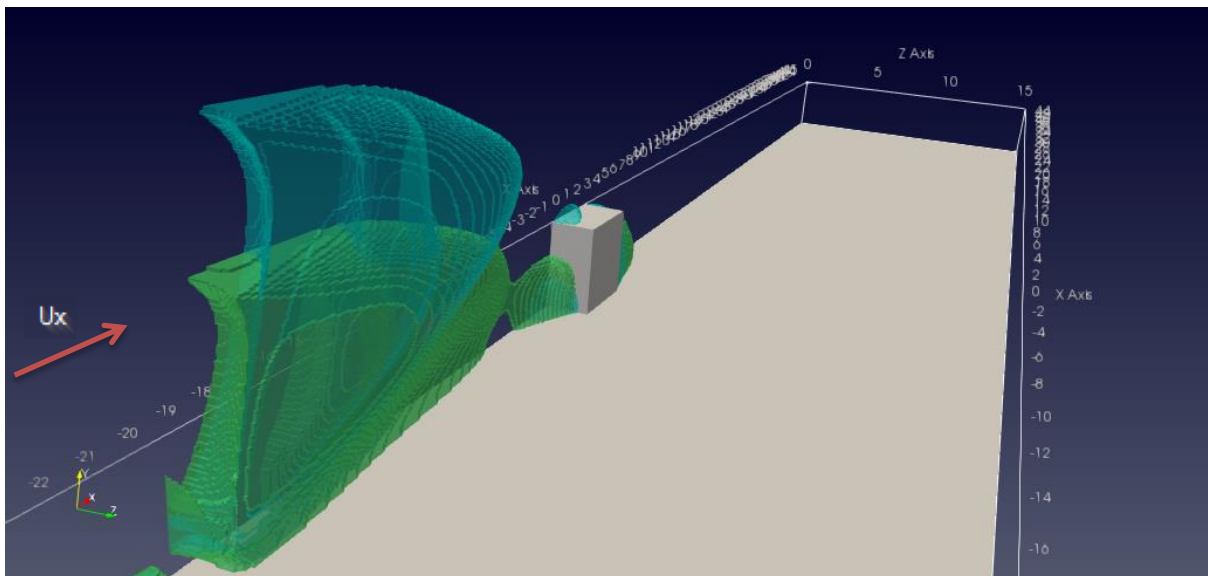
Σχήμα 4-21: Μέγιστη τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος συναρτήσει L/h και W/h για $H/h=1$

4.1.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση U_{eff}

Ένας ακόμα τρόπος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων είναι ο εντοπισμός περιοχών χαμηλής U_{eff} και στις 3 διαστάσεις. Συγκεκριμένα, με χρήση των εμπειρικών κριτηρίων (Σχήμα 2-1) μπορεί να θεωρηθεί επιθυμητή μια κατάσταση όπου $U_{eff} \leq 3 \text{ m/s}$, οπότε εμφανίζοντας μόνο τα υπολογιστικά κελιά που πληρούν την συνθήκη αυτή μπορούν να σχηματιστούν μια σειρά από όγκους που δείχνουν το μέγεθος της επαρκώς προστατευμένης ζώνης για κάθε τιμή των παραμέτρων H και W .

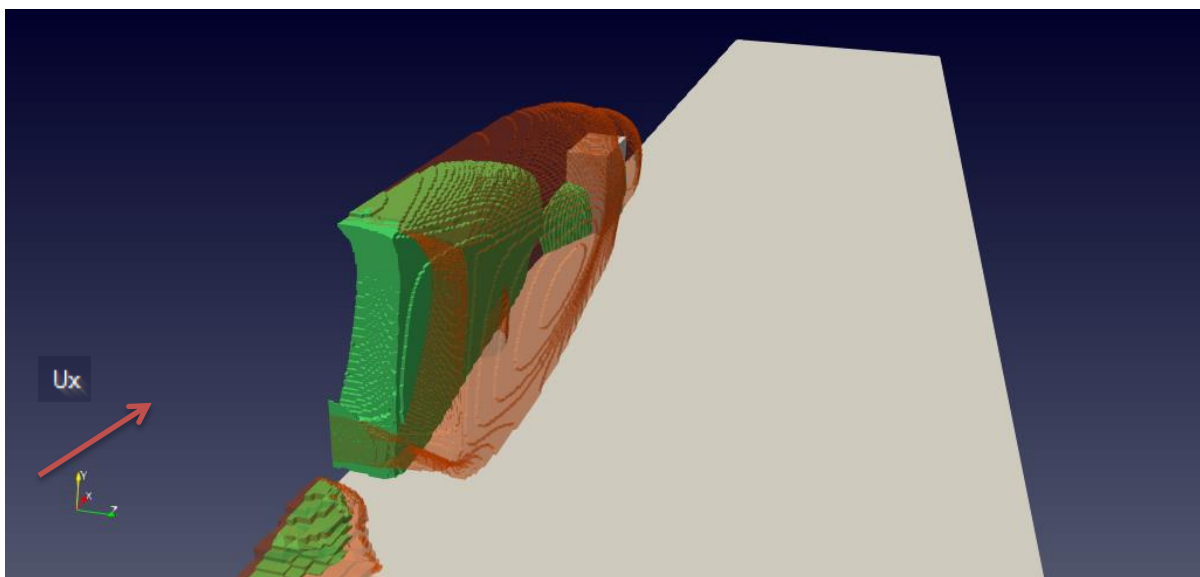


Σχήμα 4-22: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 3m/s$ για $H=2h$ (πράσινο) και για $H=0.5h$ (μαύρο), για $W=1h$ και $L=6h$



Σχήμα 4-23: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 3m/s$ για $H=3h$ (μπλε) και για $H=2h$ (πράσινο), για $W=1h$ και $L=6h$

Είναι εμφανές πως για $H=2h$ η προσφερόμενη προστασία αυξάνει σημαντικά σε σχέση με $H=0.5h$ (Σχήμα 4-22) όπως είχε τονιστεί ήδη μέσα από άλλα σχήματα. Όμως για την περίπτωση $H=3h$ παρατηρείται πως η προστατευμένη ζώνη αυξάνει γενικά σε ύψος, αλλά κοντά στο ύψος 1.5m, μειώνεται σε μήκος (Σχήμα 4-23). Έτσι η προστασία στην περιοχή που ενδιαφέρει μειώνεται.



Σχήμα 4-24: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 3m/s$ για $W=2h$ (κόκκινο) και για $W=h$ (πράσινο), για $H=2h$ και $L=6h$

Για την περίπτωση $W = 2H$ παρατηρείται μια σημαντική επιμήκυνση και διεύρυνση της προστατευμένης ζώνης. Συγκεκριμένα, όπως είχε αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4.1.1 καθώς η ροή απομακρύνεται από το πορώδες εμπόδιο αέρας υψηλής ταχύτητας εισχωρεί στην προστατευμένη περιοχή και αυξάνει την U_{eff} . Αυτό είναι εμφανές πως περιορίζεται για $W = 2H$ (Σχήμα 4-24).

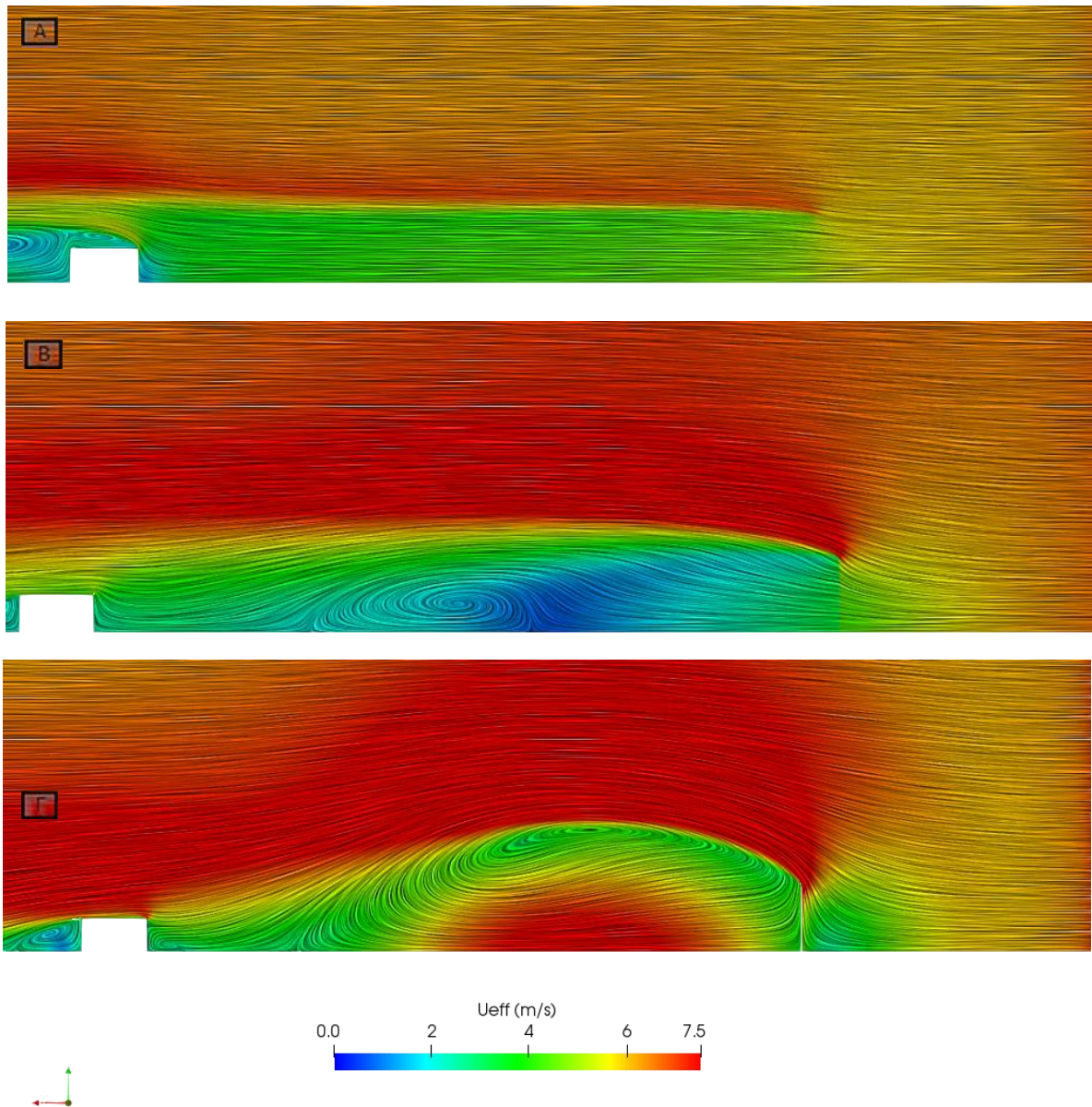
4.2 Επίδραση του συντελεστή αντίστασης

Έναν ακόμα σημαντικό παράγοντα αποτελεί ο συντελεστής αντίστασης του εμποδίου, ο οποίος εξαρτάται από το πορώδες του εμποδίου. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το πορώδες εμπόδιο μοντελοποιείται σαν μια πτώση πίεσης που εισάγεται σαν όρος πηγής.

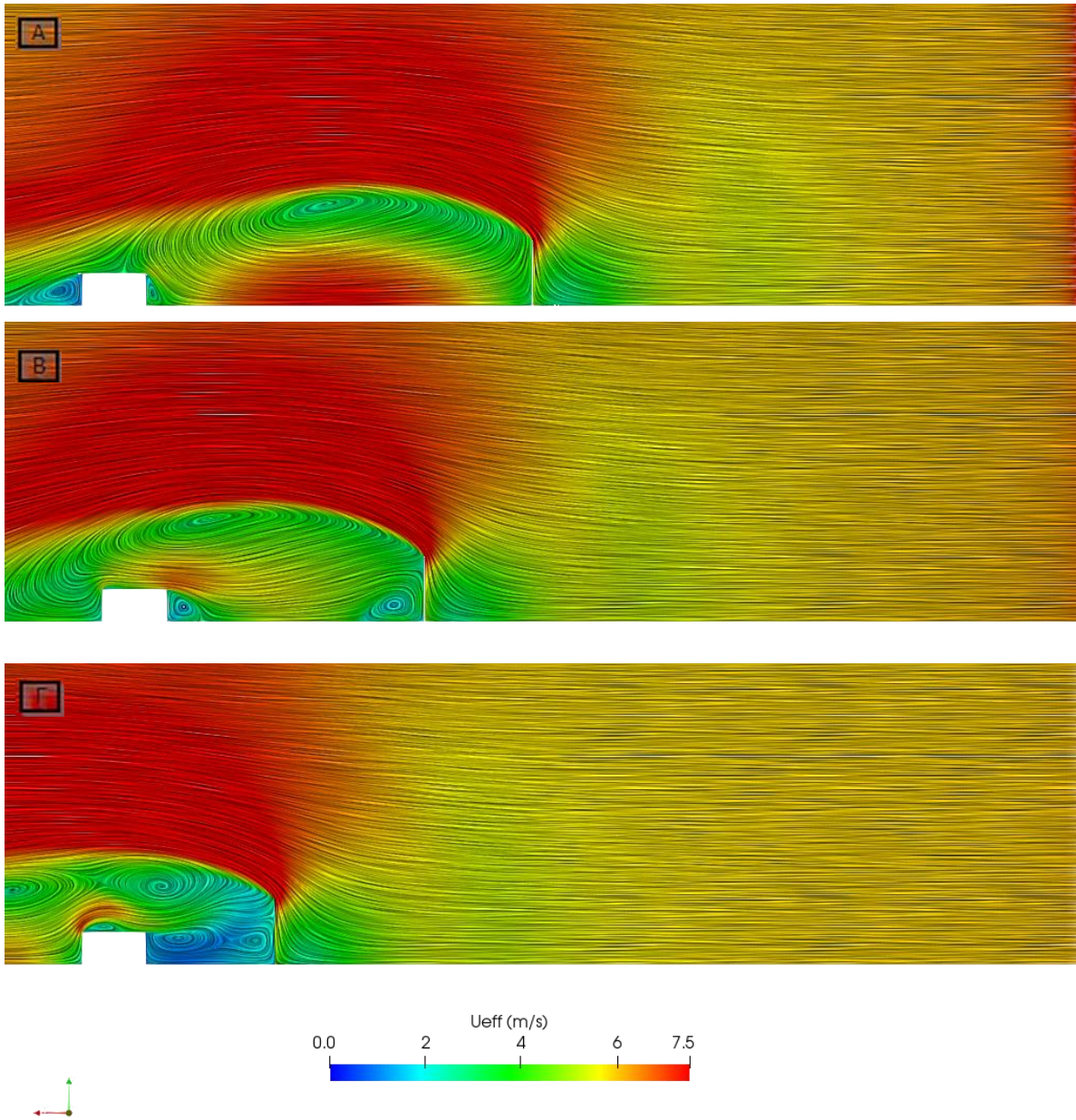
$$\vec{S} = \frac{1}{2} k_{\tau} \rho |\vec{U}| \vec{U}, \text{ όπου } k_{\tau} \text{ είναι ο συντελεστής αντίστασης}$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του συντελεστή k_{τ} και για την περίπτωση ενός στερεού εμποδίου. Αρχικά η σύγκριση γίνεται για $L = 10h$, αφού εκεί παρουσιάζεται και η μικρότερη προστασία στην παραμετρική μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου. Είναι εμφανές πως για $k_{\tau} = 1$ η προστασία είναι πολύ μικρότερη από ότι για $k_{\tau} = 10$, αφού υπάρχει μεγαλύτερη μείωση της U_{eff} σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος. Για την περίπτωση του στερεού εμποδίου, η πτώση πίεσης φαίνεται να είναι υπερβολικά μεγάλη με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας πολύ μεγάλης δίνης πίσω από το εμπόδιο και πολύ υψηλά επίπεδα τύρβης στην περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 4-25). Ο συνδυασμός αυτών των δυο φαινομένων προκαλεί την δραματική αύξηση της U_{eff} και μια πολύ μικρότερη προστασία από ότι για $k_{\tau} = 10$. Η καλύτερη απόδοση ενός πορώδους εμποδίου σε σχέση με ένα στερεό αποτελεί συμπέρασμα πολλών μελετών [5] [10] [4] [20], όμως η ύπαρξη ενός δεύτερου στερεού σώματος μπορεί να επηρεάσει την διαφορά μεταξύ των 2 αυτών λύσεων.

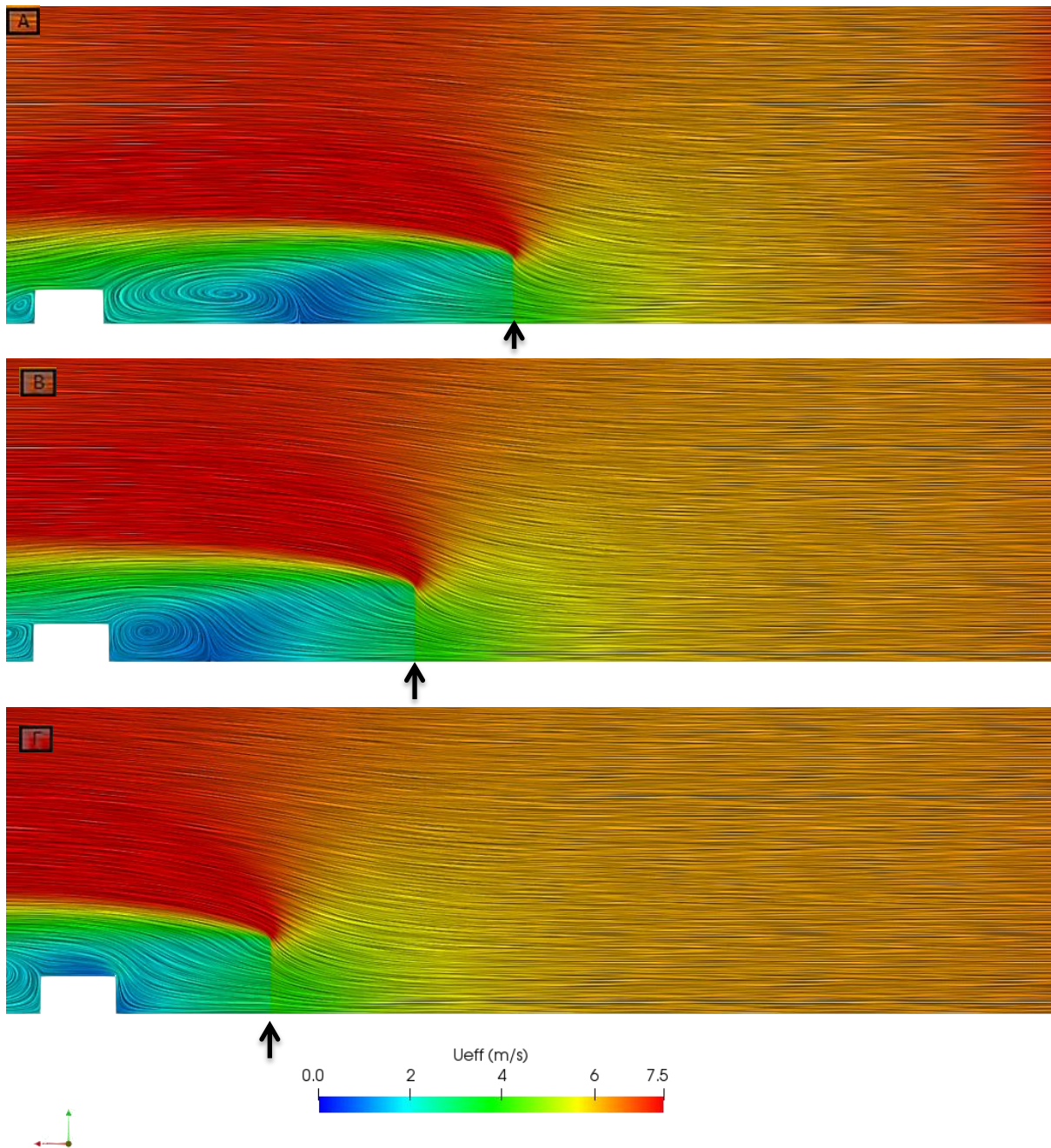
Για να διερευνηθεί Η επίδραση του κτηρίου περαιτέρω εξετάστηκαν και οι περιπτώσεις $L = 2h, 4h, 6h$. Από το (Σχήμα 4-26) μπορεί να παρατηρηθεί η σταδιακή απώθηση της κύριας ανακυκλοφορίας από την περιοχή ενδιαφέροντος και σχηματισμός μικρότερων δινών. Για $L = 2h$ τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα θετικά και η προστασία είναι συγκρίσιμη με αυτή που προσφέρει το πορώδες εμπόδιο. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή της U_{eff} στο επίπεδο $Y = 1.5m$ για το στερεό εμπόδιο είναι 40% μικρότερη από ότι για το πορώδες (Σχήμα 4-28). Αυτή η σύγκριση πορώδους και στερεού εμπόδιου, αν και συμφωνεί με αρκετές πηγές ως προς την γενικότερη συμπεριφορά, συνοδεύεται με πολύ μεγάλες διαφορές για τις περιπτώσεις $L > 2h$. Αυτές ανακύπτουν διότι οι περισσότερες μελέτες [5] [10] ασχολούνται με 2D προβλήματα, οπότε δεν εμφανίζεται κάποια δίνη στο επίπεδο XZ η οποία να προκαλέσει αύξηση της U_{eff} . Για $L \leq 2h$ η επίδραση του κτηρίου επικρατεί και απομακρύνει την δίνη, οπότε το στερεό εμπόδιο είναι καλύτερη λύση από το πορώδες. Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με βιβλιογραφικές αναφορές αλλά αυτό είναι μάλλον μια σύμπτωση, αφού οφείλεται στην παρουσία του κτηρίου.



Σχήμα 4-25: Πεδίο U_{eff} και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $H=2h, W=2h$ και $L=10h$ για A: $k_\tau=1$, B: $k_\tau=10$ και Γ: στερεό εμπόδιο

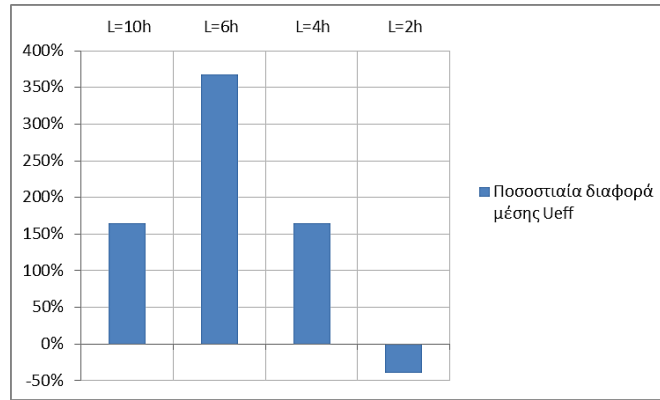


Σχήμα 4-26: Πεδίο U_{eff} και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για στερεό εμπόδιο για $H=2h$, $W=2h$ και A: $L=6h$, B: $L=4h$ και Γ: $L=2h$

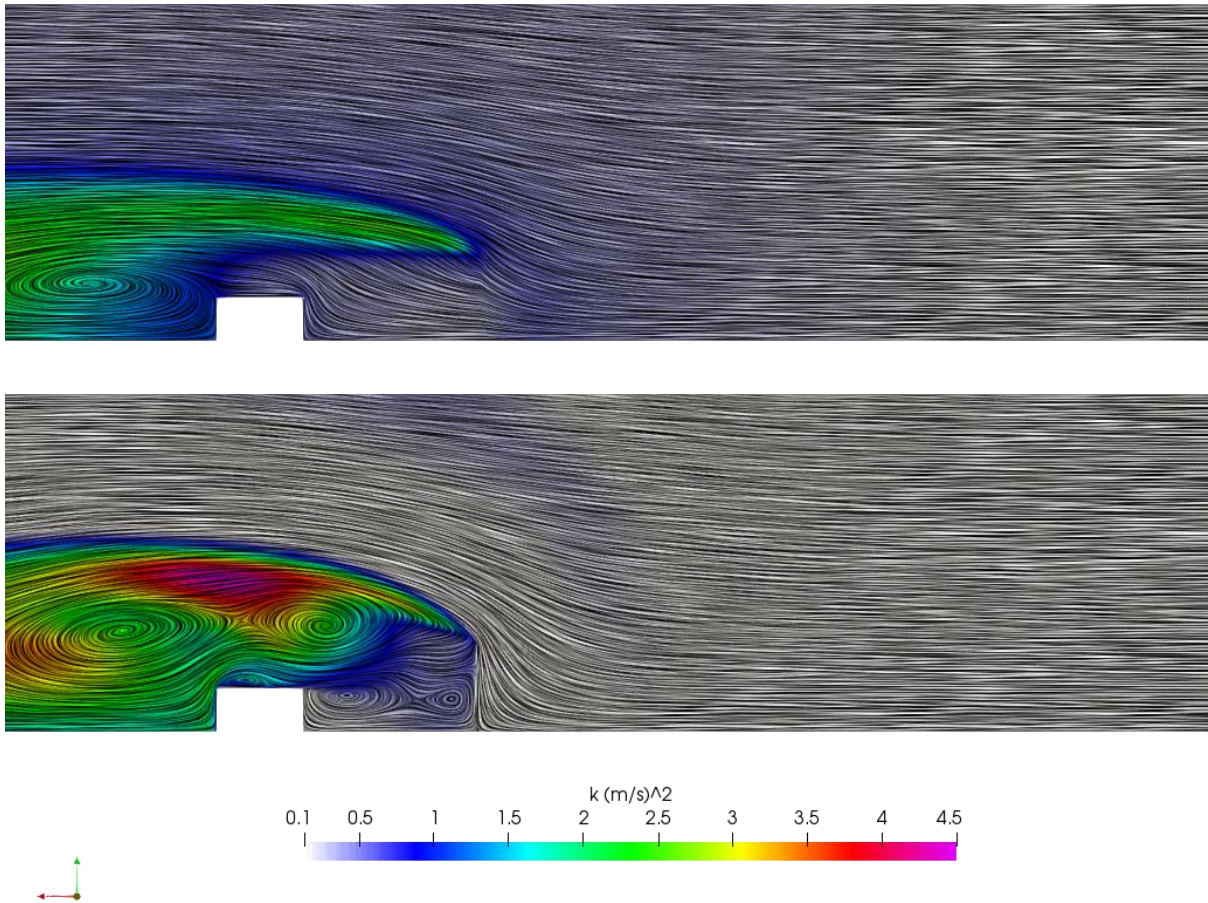


Σχήμα 4-27: Πεδίο U_{eff} και LIC στο επίπεδο $Y=1.5m$ για $H=2h$, $W=2h$ και A: $L=6h$, B: $L=4h$ και Γ: $L=2h$

Στο Σχήμα 4-27 απεικονίζεται το πεδίο U_{eff} για πορώδες εμπόδιο, τοποθετημένο σε διάφορες θέσεις. Είναι εμφανές πως μόνο στην περίπτωση $L = 2h$ το αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση στερεού εμποδίου, αφού για όλες τις άλλες περιπτώσεις η ανακυκλοφόρια πίσω από το στερεό εμπόδιο εισχωρεί στην περιοχή ενδιαφέροντος και αυξάνει σημαντικά την U_{eff} . Επίσης στο Σχήμα 4-29 φαίνεται η διαφορά στην παραγόμενη τύρβη για κάθε περίπτωση, με το στερεού εμπόδιο να παράγει πολύ περισσότερη τύρβη αλλά αυτή δεν εισχωρεί στην περιοχή ενδιαφέροντος.

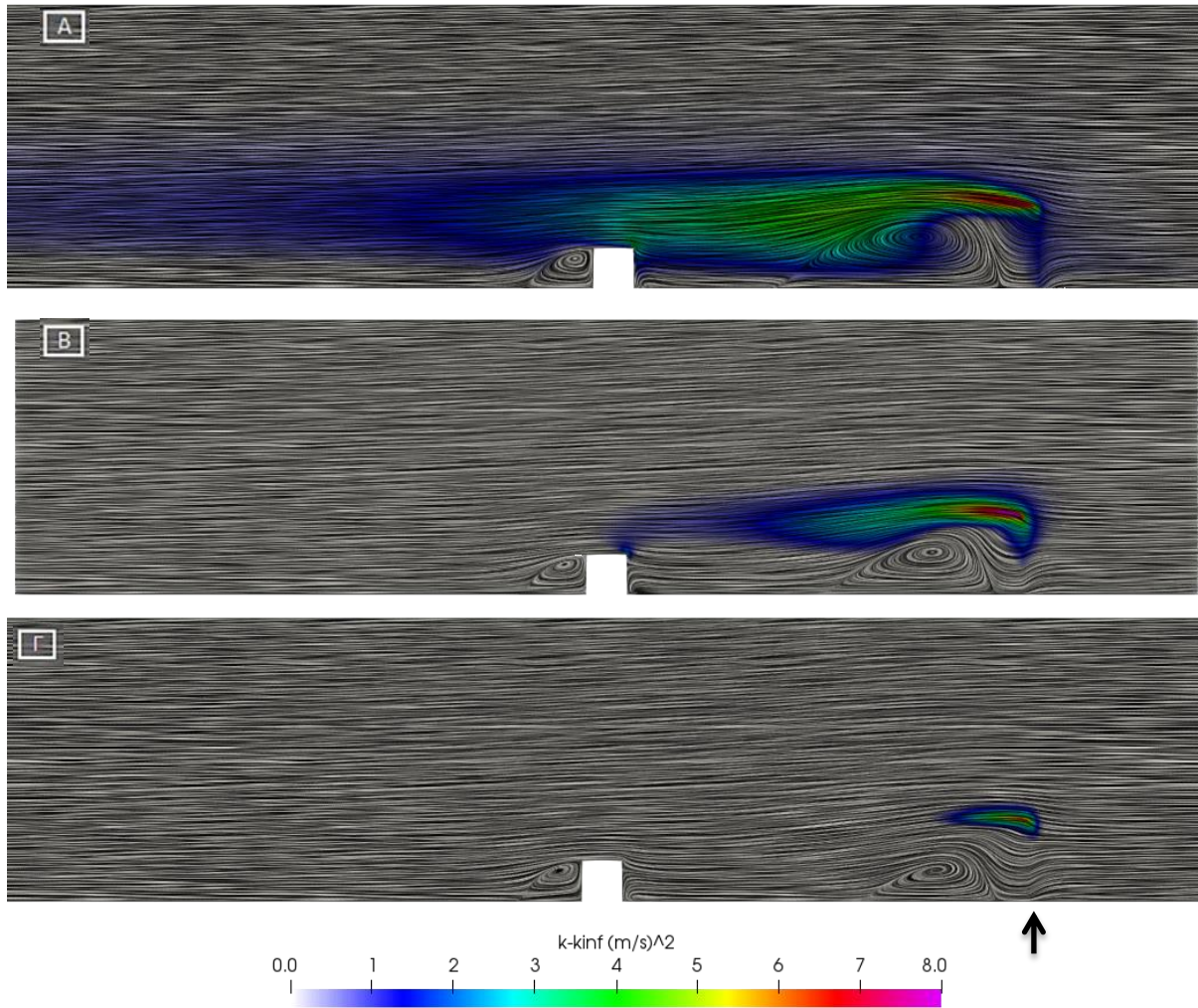


Σχήμα 4-28: Ποσοστιαία διαφορά $(U_s - U_{kt=10})/U_{kt=10}$ της μέσης U_{eff} στο επίπεδο $Y=1.5$ για στερεό εμπόδιο και για πορώδες ($k_t=10$) εμπόδιο



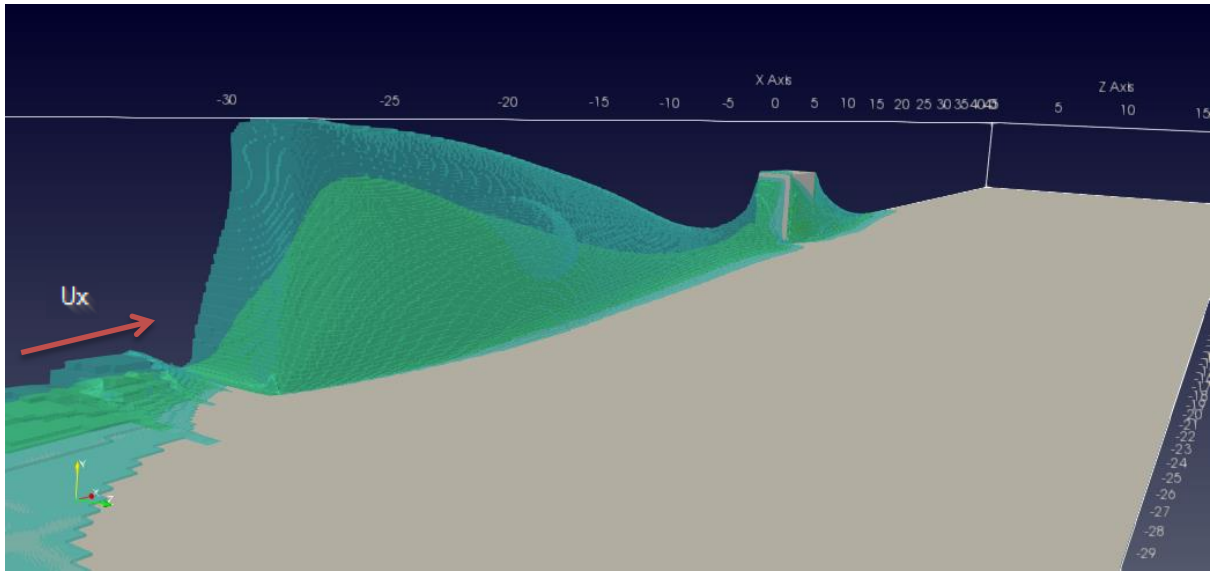
Σχήμα 4-29: Πεδίο k και LIC για L=2h, H=2h και W=2h για το πορώδες (πάνω) και το στερεό εμπόδιο (κάτω)

4.3 Επίδραση της έντασης της τύρβης

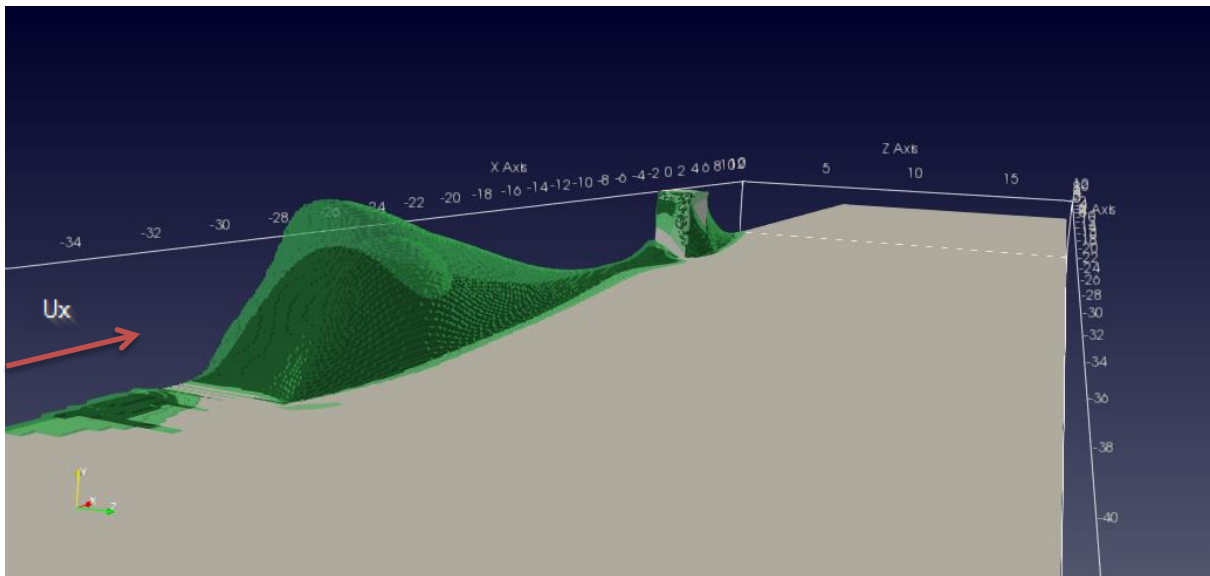


Σχήμα 4-30: Διαφορά πεδίου k και της τιμής k στην είσοδο του χωρίου, με LIC στο επίπεδο $Z=0m$ (XY) για A: $I=10\%$, B: 20% , Γ: 30%

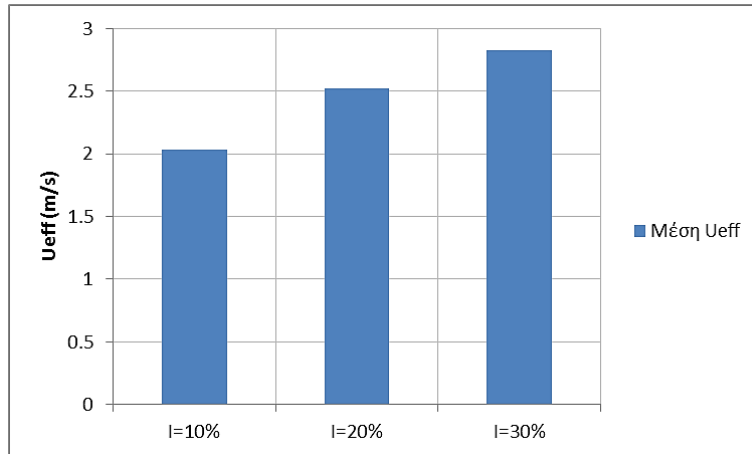
Ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την παρεχόμενη, από το εμπόδιο, προστασία είναι οι οριακές συνθήκες. Η ένταση της τύρβης (I) και κατ' επέκταση το μέγεθος της κινητικής ενέργειας της τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό και το πεδίο ροής. Οι μεγαλύτερες τιμές έντασης τύρβης (I) οδηγούν σε μεγαλύτερη ανάμειξη και κατ' επέκταση η παραγόμενη από το εμπόδιο τύρβη διαχέεται πολύ πιο γρήγορα. Επίσης ο ομόρους περιορίζεται σημαντικά. Σύμφωνα με το Σχήμα 4-30 η επιπλέον κινητική ενέργεια τύρβης(k) που παράγεται από το εμπόδιο διαχέεται πολύ πιο γρήγορα καθώς αυξάνει η οριακή τιμή I , έτσι περιορίζεται σημαντικά η εισχώρηση επιπλέον τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) στην περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται και η ανακυκλοφορία πίσω από το εμπόδιο. Όμως αυτό δεν συνεπάγεται την αύξηση της προστατευμένης περιοχής, αφού η αρχικά μεγάλες τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) διατηρούνται στο μεγαλύτερο μέρος του πεδίου ροής, αυξάνοντας σημαντικά την U_{eff} ανάμεσα στο κτήριο και το εμπόδιο (Σχήμα 4-31 και Σχήμα 4-32 Σχήμα 4-32).



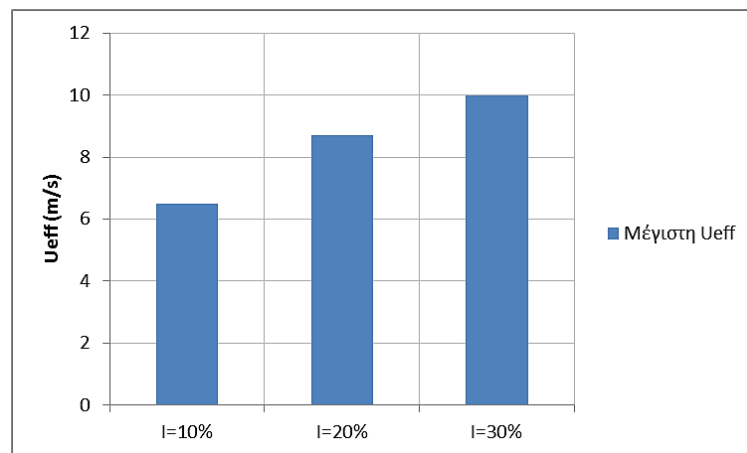
Σχήμα 4-31: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 4m/s$ για $I=10\%$ (μπλε) και για $I=20\%$ (πράσινο), για $H=2h$, $W=2h$ και $L=10h$



Σχήμα 4-32: Όγκος υπολογιστικών κελιών με $U_{eff} \leq 4m/s$ για $I=20\%$ (πράσινο) και για $I=30\%$ (μαύρο), για $H=2h$, $W=2h$ και $L=10h$



Σχήμα 4-33: Μέση τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος για διάφορες τιμές έντασης τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου



Σχήμα 4-34: Μέγιστη τιμή U_{eff} στην περιοχή ενδιαφέροντος για διάφορες τιμές έντασης τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου

Στο Σχήμα 4-33 και στο Σχήμα 4-34 φαίνεται η επίδραση της έντασης τύρβης στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου, στην μέγιστη και μέση U_{eff} της περιοχής ενδιαφέροντος. Παρόλο που μεγαλύτερες τιμές I επιφέρουν μείωση της ανακυκλοφορίας στον ομόρου, είναι εμφανές πως επιφέρουν και αύξηση της μέγιστης και μέσης U_{eff} , όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 4-31 και Σχήμα 4-32.

5 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

5.1 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εξετάζει την ανεμοπροστασία που προσφέρει ένα πορώδες ή στερεό εμπόδιο σε έναν σαφώς ορισμένο χώρο με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών ανέμου σε αυτή την περιοχή. Η ιδιαιτερότητα που διαφοροποιεί αυτή την μελέτη από παρόμοιες μελέτες της βιβλιογραφίας είναι αφενός η 3D επίλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και αφετέρου η ύπαρξη ενός δεύτερου στερεού σώματος στην προσομοίωση το οποίο επηρεάζει το πεδίο ροής και κατ' επέκταση τα συνολικά αποτελέσματα της μελέτης.

Για να ορισθεί όμως ο στόχος αυτής της μελέτης γίνεται αρχικά μια εισαγωγή στο πρόβλημα και τις υφιστάμενες λύσεις, μεθοδολογίες και κριτήρια αξιολόγησης, οι οποίες αποτελούν και αφορμή για την σύνθεση της παρούσας διπλωματικής. Ύστερα ακολουθεί μια περιγραφή της πλατφόρμας Simscale και του ανοιχτού κώδικα OpenFoam που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος. Μέρος αυτού του ανοιχτού κώδικα είναι και ο πλεγματοποιητής snappyHexMesh που χρησιμοποιήθηκε για την γένεση του πλέγματος. Για την διαδικασία αυτή δίνεται μια σύντομη περιγραφή και στην συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες και λεπτομέρειες του τελικού πλέγματος μαζί με μια μελέτη ευαισθησίας πλέγματος. Ακόμη παρουσιάζονται οι εξισώσεις προς επίλυση μαζί με τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, την μέθοδο διακριτοποίησης και τον αλγόριθμο επίλυσης. Τέλος, γίνεται σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων, από 2 διαφορετικά πειράματα, με αυτά του κώδικα ώστε να καθοριστεί το επίπεδο ακρίβειας του μοντέλου και να αξιολογηθούν επιλογές που έχουν γίνει στο πλέγμα, το μοντέλο τύρβης και τις οριακές συνθήκες.

Για την μελέτη ορίστηκαν αρχικά οι γεωμετρικοί παράμετροι L/h , H/h και W/h . Οι προσομοιώσεις έγιναν για διάφορες τιμές αυτών των παραμέτρων στοχεύοντας στην βελτίωση των συνθηκών ανέμου σε ύψος 1.5m ανάμεσα στο εμπόδιο και το μοντέλο κτηρίου. Ορίζοντας σαν κριτήριο αξιολόγησης τις τιμές της ενεργούς ταχύτητας U_{eff} και εξετάζοντας την μέση και μέγιστη τιμή της στο επίπεδο $Y=1.5m$ αναδεικνύονται οι τιμές $H = 2h$ και $W = 2h$ ως οι καλύτερες επιλογές. Παρόμοιες μελέτες από την βιβλιογραφία [10] υποδεικνύουν πως καθώς ο λόγος του ύψους που εξετάζεται προς το ύψος του εμποδίου y/H μειώνεται η προστασία σε αυτό το συγκεκριμένο ύψος αυξάνει. Καθώς όμως ο λόγος y/H πλησιάζει στην τιμή 0.25, η επιπλέον προστασία μειώνεται σημαντικά. Υπενθυμίζεται ότι $h = 3m$ και $y = 1.5m$, οπότε η τιμή $\frac{y}{H} = 0.25$ αντιστοιχεί σε $H = 2h$. Έτσι, η τελική επιλογή της τιμής $H = 2h$ και η απόρριψη της τιμής $H = 3h$ συμφωνεί με την γενικότερη τάση των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας, αλλά η διαφορά εντείνεται από την παρουσία του κτηρίου.

Επίσης γίνεται αισθητή η αλληλεπίδραση του εμποδίου με το μοντέλο κτηρίου, αφού για μικρές τιμές τις παραμέτρου L/h δημιουργείται μια καλά προστατευμένη ζώνη, ενώ όταν η απόσταση μεγαλώσει αρκετά ($L/h = 10$), η ζώνη χωρίζεται στον ομόρρου του εμποδίου και μια περιοχή χαμηλής ταχύτητας γύρω από το σημείο ανακοπής του κτηρίου. Σε αυτό το φαινόμενο συμβάλει και η τριδιάστατη φύση της ροής, αφού η πλάγια εισχώρηση αέρα υψηλότερης ταχύτητας, σε

συνδυασμό με την τυρβώδη κινητική ενέργεια που φέρει, αυξάνει την τιμή της U_{eff} μακριά από το εμπόδιο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιοριστεί αυξάνοντας την τιμή W/h και η βελτιωμένη εικόνα μπορεί να αποτυπωθεί μέσω της 3D οπτικοποίησης του όγκου της προστατευμένη ζώνης. Αναδεικνύεται έτσι το ενδιαφέρον της 3D ανάλυσης του προβλήματος, αφού έρχεται πολύ πιο κοντά σε πραγματικές εφαρμογές και τα επιπλέον προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν.

Αφού εξετάστηκαν οι γεωμετρικοί παράμετροι του εμποδίου, γίνεται μια ανάλυση για 2 επιπλέον τιμές πορώδους, μια πολύ μεγάλη και μια μηδενική (στερεό εμπόδιο), σε απόσταση $L/h = 10$. Αν και η χρήση στερεού εμποδίου έχει πολύ αρνητική επίδραση στο πεδίο ροής για $L/h = 10$, εξετάζοντας και τις περιπτώσεις $L/h < 10$ παρατηρείται μια σταδιακή βελτίωση και για την περίπτωση $L/h = 2$ η μέση τιμή της U_{eff} στο ύψος $Y = 1.5m$ είναι 40% μικρότερη από ότι για το πορώδες εμπόδιο. Το αρχικά κακό πεδίο ροής χαρακτηριζόταν από μια δυνατή ανακυκλοφορία, λόγω του στερεού εμποδίου, η οποία συνοδευόταν και από υψηλά επίπεδα τύρβης. Η ανακυκλοφορία αυτή σχηματίζεται στο επίπεδο XZ , κατά την έννοια του πλάτους δηλαδή και οφείλεται στο 3D χαρακτήρα της ροής. Καθώς όμως η απόσταση εμποδίου και κτηρίου μειώνεται η ανακυκλοφορία απωθείται σταδιακά από την περιοχή μεταξύ των 2 σωμάτων και χωρίζεται σε μικρότερες δίνες. Έτσι στην περίπτωση $L/h = 2$ η περιοχή ενδιαφέροντος περιέχει σχεδόν στάσιμο αέρα, ενώ η παραγόμενη τύρβη από την ακμή του εμποδίου δεν εισχωρεί στην περιοχή αυτή, μειώνοντας σημαντικά την U_{eff} και προσφέροντας ακόμα καλύτερες συνθήκες. Μελέτες από την βιβλιογραφία [5] [10] [23] καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα συνολικά, αλλά οι διαφορές μεταξύ της προστασίας που προσφέρουν τα 2 εμπόδια είναι πολύ μικρότερες. Αυτό οφείλεται προφανώς στο γεγονός πως αυτές οι μελέτες είναι 2D και δεν περιλαμβάνουν κάποιο επιπλέον στερεό σώμα, όμως αυτοί οι 2 παράγοντες φαίνεται πως είναι καθοριστικοί για την συγκεκριμένη σύγκριση.

Τέλος γίνεται μια διερεύνηση για την επίδραση που έχει η οριακή συνθήκη της έντασης τύρβης στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η τιμή της έντασης τύρβης στην είσοδο μοντελοποιεί το επίπεδο τύρβης της ροής στο άπειρο, ένα μέγεθος που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το περιβάλλον του προβλήματος. Ταυτόχρονα είναι γνωστό πως μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης προκαλούν και μεγαλύτερη ανάμειξη, έτσι έγινε η υπόθεση ότι κατάντι του εμποδίου η ανακυκλοφορία και ο ομόρρους θα μικρύνει. Η υπόθεση αυτή ελέγχθηκε μέσω μιας σειράς προσομοιώσεων για διάφορες οριακές τιμές I . Τα αποτελέσματα όντως δείχνουν πως η ανακυκλοφορία και ο ομόρρους περιορίζονται πολύ περισσότερο για μεγάλες οριακές τιμές I , όμως το συνολικό αποτέλεσμα δεν είναι καλύτερο αφού η U_{eff} αυξάνει σημαντικά λόγω της διατήρησης και μεταφοράς των μεγαλύτερων επιπέδων τύρβης από το όριο στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποτελέσει μια καλή βάση για περαιτέρω μελέτες πάνω στην ανεμοπροστασία με την χρήση πορώδους και στερεού εμποδίου. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να εξεταστούν πιο ειδικές εφαρμογές όπως η προστασία πάνω σε οροφές κτηρίων, ανοιχτούς χώρους εντός πόλης αλλά και η προστασία εκτεθειμένων κατασκευών (π.χ. ηλιακά πάνελ). Χρησιμοποιώντας κάποια βασικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και συνδυάζοντας τις πιο ειδικές ανάγκες αλλά και του περιορισμούς τέτοιων προβλημάτων μπορούν αναπτυχθούν διάφορες λύσεις, κατάλληλες για την κάθε εφαρμογή ξεχωριστά.

Επίσης είναι δυνατή η βελτίωση του συγκεκριμένου μοντέλου, χρησιμοποιώντας μια πιο σύνθετη μοντελοποίηση του πορώδους εμποδίου. Συγκεκριμένα, πολλές πηγές προτείνουν την χρήση 2 ακόμα όρων πηγή για την κινητική ενέργεια της τύρβης και τον ρυθμό καταστροφής της [24] [25]. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά στην μοντελοποίηση βλάστησης, θα μπορούσε έτσι να συνδυαστεί με μια εφαρμογή όπου προτείνεται η χρήση δέντρων για προστασία.

Τέλος αρκετές μελέτες έχουν ασχοληθεί και με την χρήση μιας σειράς από εμπόδια [19] ή την χρήση μιας ανομοιόμορφης κατανομής πορώδους [20]. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να συνδυαστεί με την παρούσα μελέτη για να αυξήσει την προσφερόμενη προστασία σε ένα τρισδιάστατο πρόβλημα.

6 Βιβλιογραφία

- [1] G. Giraldo, "How to Assess Pedestrian Wind Comfort in 2019," SimScale, 17th Jne 2019. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/blog/2019/02/pedestrian-wind-comfort-assessment/>. [Accessed 15 August 2019].
- [2] T. Stathopoulos, "Wind and Comfort," in *5th European and African Conference on Wind Engineering*, Florence, 2009.
- [3] N. Zhang, J.-H. Kang and S.-J. Lee, "Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles," *Geomorphology*, no. 120, p. 224–232, 2010.
- [4] G. Chen, W. Wang, C. Sun and J. Li, "3D numerical simulation of wind flow behind a new porous fence," *Powder Technology*, no. 230, p. 118–126, 2012.
- [5] G. M. Heisler and D. R. Dewalle, "Effects of Windbreak Structure on Wind Flow," *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 22/23, pp. 41-69, 1988.
- [6] "Integrated Open Source Solver Technology," SimScale, [Online]. Available: <https://www.simscale.com/open-source-solver/>. [Accessed 28 September 2019].
- [7] Β. Τσιολάκης, "Συμβολή στην Αεροδυναμική Βελτιστοποίηση Αγωνιστικού Μονοθεσίου FSAE μέσω OpenFOAM και Συνεχών Συζυγών Μεθόδων," Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2015.
- [8] Κ. Μίσσιος, "Αριθμητική Προσομοίωση Σωματιδιακής Ροής σε Μεταλλικό Αφρό," Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2018.
- [9] C. J. Greenshields, "OpenFOAM User Guide version 4.0," OpenFOAM Foundation Ltd., 2016.
- [10] J. Santiago, F. Martín, A. Cuerva, N. Bezdeneznykh and A. Sanz-Andres, "Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks," *Atmospheric Environment*, no. 41, p. 6406–6420, 2007.
- [11] Σ. Τσαγκάρης, *Μηχανική των Ρευστών Θεωρία & ασκήσεις*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων, 2013.
- [12] J. H. Ferziger and M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd rev. edition., Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
- [13] T. Uchida, "CFD Prediction of the Airflow at a Large-Scale Wind Farm above a Steep, Three-Dimensional Escarpment," *Energy and Power Engineering*, vol. 09, pp. 829-842, 2017.

- [14] Σ. Τραχανάς, Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2001.
- [15] Γ. Μπεργελές, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, 2012.
- [16] F. Moukalled, L. Mangani and M. Darwish, The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, Springer, 2016.
- [17] Ε. Μ. Παπουτσής-Κιαχαγιάς, "Συζυγείς Μέθοδοι για Τυρβώδεις Ροές, με Εφαρμογή στη Βελτιστοποίηση Μορφής ή Τοπολογίας και στο Στιβαρό Σχεδιασμό," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- [18] "SimScale docs," SimScale, [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/content/simulation/model/advancedConcepts/porousMedia/porousMedia.html>. [Accessed 12 April 2019].
- [19] J. D. Wilson and E. Yee, "Calculation of winds disturbed by an array of fences," *Agricultural and Forest Meteorology*, no. 115, p. 31–50, 2003.
- [20] W. Cornelis and D. Gabriels, "Optimal windbreak design for wind-erosion control," *Journal of Arid Environments*, no. 61, p. 315–332, 2005.
- [21] P. Hulhearn and E. Bradley, "Development of velocity and shear stress distribution in the wake of a porous shelter fence," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 15, pp. 145-156, 1983.
- [22] Z. Dong, W. Luo, G. Qian, P. Lu and H. Wang, "A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences," *Journal of Arid Environments*, no. 74, p. 193–207, 2010.
- [23] M. D. A. E. S. Perera, "Shelter behind two-dimensional solid and porous fence," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 8, pp. 93-104, 1981.
- [24] G. G. Katul, L. Mahrt, D. Poggi and C. Sanz, "one- and two-equation models for canopy turbulence," *Boundary-Layer Meteorology*, no. 113, p. 81–109, 2004.
- [25] C. Sanz, "A note on $k - \epsilon$ modeling of vegetation canopy air-flows," *Boundary-Layer Meteorology*, no. 108, p. 191–197, 2003.